

- 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 - تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای منجمی - آکرامی

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 بزرگ شکست : شکست ترد شکست نرم

در شکست ترد ، در مورد فلزات معمولاً همراه با اشاعه سریع ترک است و ظاهراً (ماکرو سکوپ)

تغییر شکل پلاستیک نداریم اما در مقیاس میکروسکوپ برای جوانه زنی ترک نیاز به تغییر فرم

پلاستیک است . (در مقیاس میکروسکوپ)

شکست نرم : در حین اشاعه ترک تغییر شکل رخ می دهد و سرعت اشاعه آن نسبت به

مورد قبلی کمتر است . قبل از جوانه زنی ترک هم تغییر فرم داریم

تقسیم بزرگ بر مبنای کرنسیالوگرافی :

شکست تورقی cleavage : در اثر تنش های برافش بر صفحات تورقی بوجود می آید و سطح

شکست معمولاً بر آن <sup>دانه ای</sup> صفحات تورقی تغییر شکل پلاستیک ندارند

شکست برشی shear : در اثر تغییر شکل یا لغزش در صفحات مصل توسط تنش های برشی

انجام می شود . سطح شکست در زیر زنجاری کم تیره رنگ و فشرده است

تقسیم بزرگ بر مبنای سطح شکست :

(۱) بران و دانه ای Granular (۲) رشته ای Fibrous

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

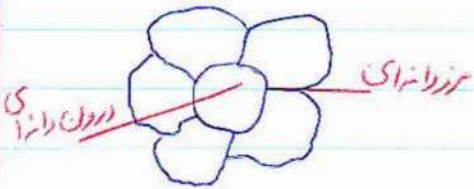
در شکست ترد، تغییر شکل تا شکست کم است. برعکس شکست نرم.

چون SG در مقابل فولاد کم کرن شکست ترد دارد.

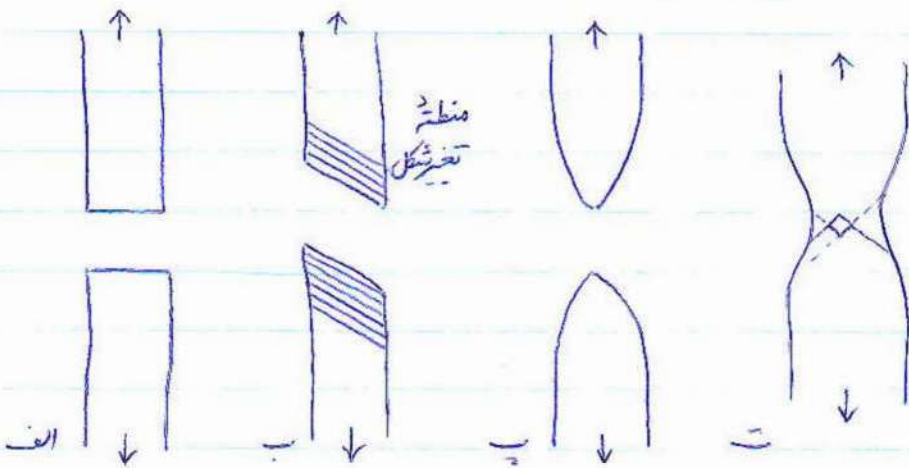
تقسیم بندی در چند بلورها بر اساس مسیر رشد و اشاعه ی ترک:

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 - سطح شکست عمود بر تنش مرفال ← ترد (تغییر شکل پلاستیک هم ندارد)

fcc تحت شرایطی می تواند انبساط باشد. ساختارهای bcc و hcp  
 ← تنش برشی برای شکست بالا باشد: در پایین درخ امکان تنش بالا

ب - سطح شکست، مورب است ← از نوع برشی (نرم) در تک بلورهای hcp  
 (خزش فقط در صفحه ی تا عمده رخ میدهد)

(۳)

پ - سطح شکست نازک شده ← تغییر شکل زیاد : فزاتِ خالص و  $fcc$  . برخی از

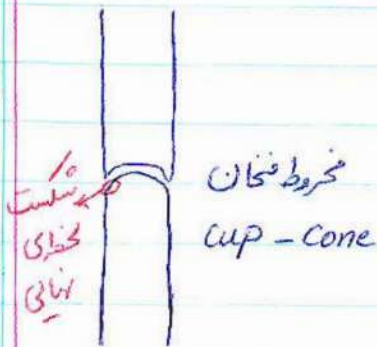
$fcc$  ها : طلا و سرب خالص

ت - قابلیت تغییر فرم متوسط ← مثلاً  $fcc$  های دارای ناخالصی

در آزمایش کشش necking را داریم . در اثر رسیدن نیرو به  $max$  ، درگیری نقاط

ضعف نقطه ، حفره ها به هم می پیوندند تا ترک بوجود آید تا اینکه طول آن (ترک) به میزان

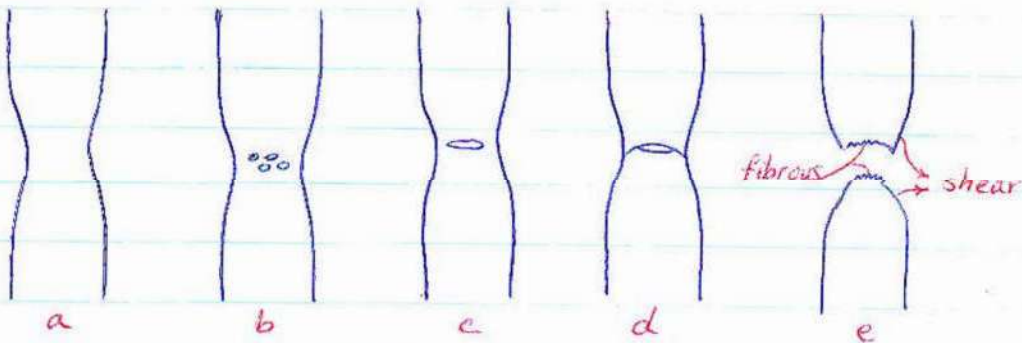
معینی برسد . ابتدا باید حفره تشکیل شود و بعد رشد کند .



مکانیزم شکست مخروط و فنجان :

(a) رسیدن به نیروی  $max$  .

(b) وجود آمدن حفره ها (c) ایجاد ترک (d) رشد ترک (e) شکست



در لبه های شکست shear داریم .

در شکست فرزدانه ای سطح بصورت برآمده است و مرزها را برجسته نشان می دهد .

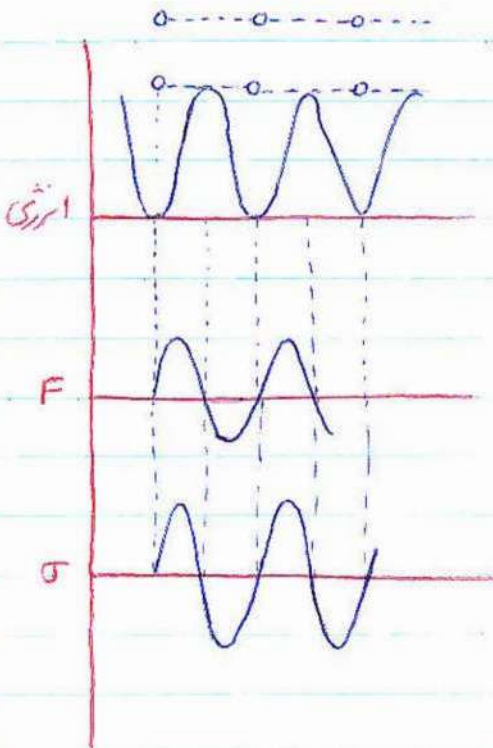
(۴)

در شکست نرم، حفره‌هایی دره می‌سوز که درون این حفره‌ها ناخالصی و آخال‌ها... وجود دارد

استحکام نظری (تئوری مواد):

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

بگیری عوامل این تنش را کاهش می‌دهند.



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

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

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

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

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

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

چون شکست ترد است از رابطه حرکت تبصیه می‌کند. انرژی لازم برای شکست صرف بوجود

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

آمدن در سطح جدید شکست میشود.

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

در عمل رابطه  $\sin$  نیست دائم هارم، برهم کش دارند پس:

در مکانیکی!، برشی در نظر داریم و  $\frac{G}{10}$  بدست آمد.

(۵)

نواقص در جادرات:

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

۱- نواقص شبکه: نقطه ای - خطی - صفحه ای (صفحه‌بندی، یک‌بندی، دوبندی)

۲- نواقص ساخت: حین فرایند ساخت، ریخته‌گری: حفره‌ها، تخلخل‌ها و ...

تراشکاری: آثار باقی‌مانده از تراشکاری ← ایجاد تمرکز تنش

۳- 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

بگوشه دهیم ← کاهش تمرکز تنش.

۴- نواقص مونتاژ: قطعات به‌طرقی بهم وصل می‌شوند: پیچ و مهره - جوشکاری که هر یک

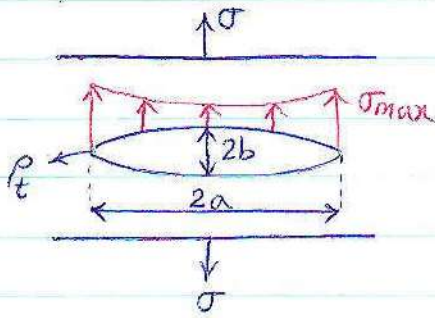
نقص هستند. (پیچ سفت بسته شود، تنش باقی می‌ماند)

۵- ریز ترک‌ها: برای بدست آوردن محصول روی آن فرایندهایی انجام می‌شود که در داخل ریز

ترک‌هایی بوجود می‌آید.

۶- نواقص مربوط به جوشکاری: تنش‌های باقی‌مانده در اثر جوشکاری

(۶) ۱۴/۱۱/۲۱



بریز ترک ها:

یک ترک بیضی شکل در نظری گریف

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

$$\Rightarrow \sigma_{max} = 2\sigma \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad \sigma_{max} : \text{تنش در رأس ترک}$$

شکست وقتی بوجود می آید که  $\sigma_{th} = \sigma_{max}$  برسد  $\sigma_{th} = \sqrt{\frac{E \gamma_s}{a_0}}$

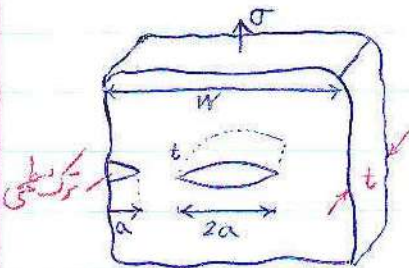
$$\Rightarrow \sigma = \sigma_F = \sqrt{\frac{E \gamma_s \rho}{4a a_0}} \quad \begin{array}{l} \rho \sim a_0 \\ 2a \sim 10^4 a_0 \end{array}$$

$$\rightarrow \text{در عمل } \sigma_F \approx \frac{E}{1000}$$

ملاحظه می شود، این نقص استحکام شکست را، ۱۰۰ مرتبه کاهش پیدا می دهد.

۱۴/۱۱/۲۳

نظریه گریفیث در مورد شکست ترد: (Griffith)



a: نصف طول ترک داخلی، طول ترک سطحی

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

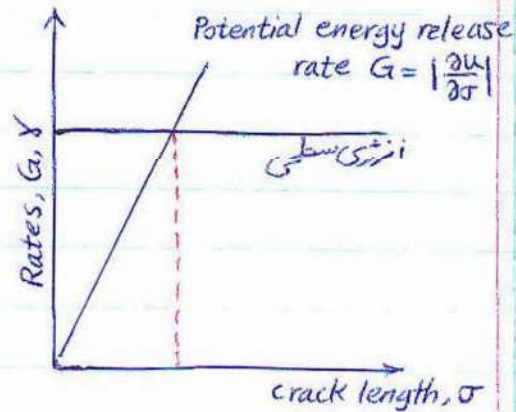
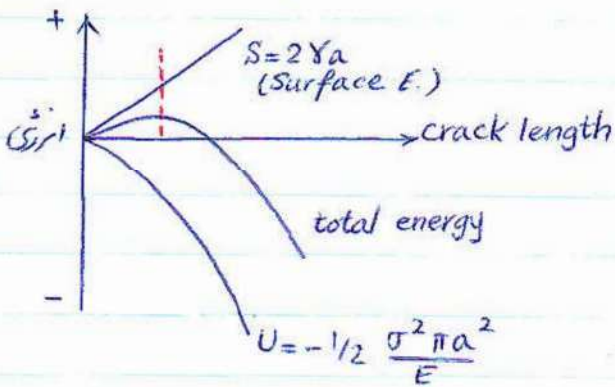
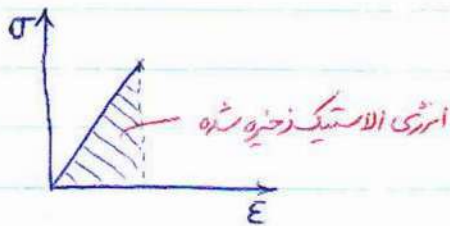
فرض: در یک ماده ترک های میکرو اسکوپیک زیادی وجود دارد که باعث

تمرکز تنش می شوند و اگر تنش در یکی از این ترک ها به حد تسلیم برسد، رشد کرده تا شکست

ردی دهد. (به حد استحکام تئوری)

(v) ۱۶/۱۱/۲۳

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



$$U/V = 1/2 (\sigma \cdot \epsilon) = \sigma^2 / 2E$$

$$u/t = \pi a^2 \sigma^2 / 2E \quad (\text{بر واحد ضخامت})$$

$$S = 2a\gamma \quad \text{انرژی سطحی}$$

$$W = U + S$$

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

$$\partial W / \partial a = 0$$

$$\sigma = (2E\gamma / \pi a)^{1/2} \quad \text{plane-stress} = \sigma_F$$

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

رابطه یابی :  $\sigma_F = \sqrt{\frac{E\gamma\rho}{4a\alpha_0}}$  . تعابیری این رابطه با رابطه ی گریفیت :

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a} \cdot \frac{\pi\rho}{8\alpha_0}} \quad ? \quad (\rho \approx 3\alpha_0) \text{ or } (\frac{\pi\rho}{8\alpha_0} = 1)$$

وقتی این دو با هم برابرند که :



(A) ۸۴/۱۱/۲۳

در حالت  $\rho = 3a_0$  از هر دو  $\rho \geq 3a_0 \rightarrow \sigma_F = \sqrt{\frac{E \gamma_s \rho}{4a_0}}$

می توان استفاده کرد  $\rho \leq 3a_0 \rightarrow \sigma_F = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}$

تئوری گریفت به فرم اولیه در مورد مواد ترد کامل مثل سیسَه صادق است. اما در مورد فلزات

برای جواهر زنی ترک نیاز به تغییر فرم پلاستیک است  $\leftarrow$  اصلاح شده:

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

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

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

رابطه قبلی

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

مقایسه رابطه اصلاح شده و رابطه قبلی

هر چه  $\rho$  بیشتر  $\leftarrow \gamma_p$  بیشتر  $\frac{\gamma_p}{\gamma_s} = \frac{\pi \rho}{8a_0}$  : حالت مساوی

$\rho$ : شعاع رأس ترک؛ پس در ضمن تغییر شکل پلاستیک،  $\rho$  زیاد می شود یعنی از

حالت تیزی بیرون می آید  $\gamma_p$ : کار تغییر شکل پلاستیک تا جواهر زنی ترک

ضریب تمرکز تنش: Stress Concentration Factor

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

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

$K_t$  به تنش اعمالی وابسته نیست و فقط به هندسه ترک وابسته است.

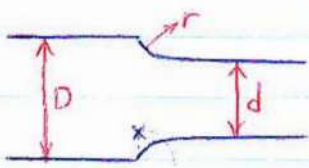
اگر در قطعه یک سوراخ ریزه‌ای وجود داشته باشد، در اطراف سوراخ، تنش 3 برابر تنش

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

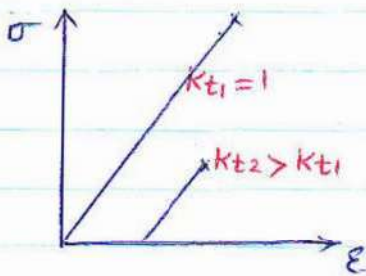
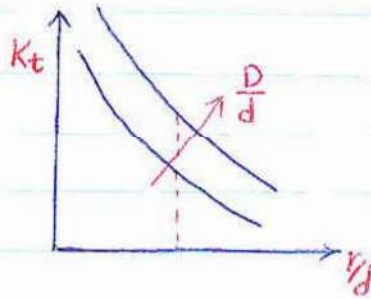
ترک را کم کنیم مثلاً درون آن را با ماری جوش بپوشیم یا  $m$  را زیاد کنیم: در بزرگ ترک یک سوراخ

باز در آن ایجاد کرد. تا سطح رأس ترک زیاد شود.



اگر قوس نباشد، شکست در این ناحیه اتفاق می‌افتد

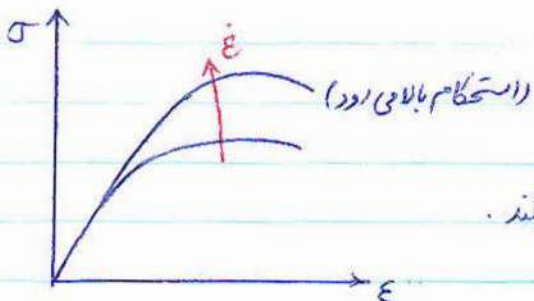
اگر در نمونه، تغییر ابعاد وجود داشته باشد مثل نمونه کشش:



تمرکز تنش، نمودار تنش و کرنش را به مقادیر

کوچکتری رساند. تنش و کرنش شکست کم می‌شود.

اثر عوامل خارجی بر نوع شکست:



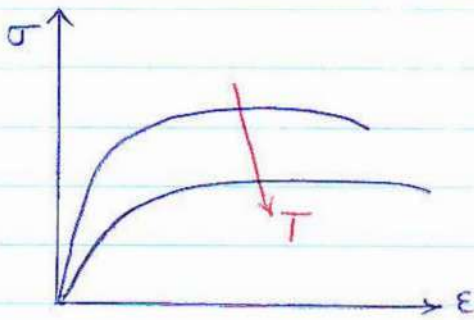
• آهنگ تغییر شکل:  $(E)$

افزایش  $E$ ، تمایل به شکست ترد را بیشتر می‌کند.

$$\dot{\epsilon} = b \rho \bar{v} \quad ; \quad \bar{v} = k T^m$$

$T$ : تنش برشی لازم برای لغزش نابجائی .  $m$ : ثابت ماده

در  $\epsilon$  و  $T$  ثابت :  $\sigma = c (\dot{\epsilon})^m_{\epsilon, T}$  رابطه ریگر



دما بر مدول الاستیسه هم تأثیر دارد در حالتیکه

$\epsilon$  تأثیر زیادی ندارد.

اشرفان (notch) :

وجود فاق، تمایل به شکست ترد را افزایش می دهد؛ به چند دلیل :

الف) ایجاد تمرکز تنش می کند.  $K_t$  ممکن است  $\sigma$  را به استحکام شکست برساند.

ب) در رأس فاق در اثر افزایش تنش به حد تسلیم می رسیم  $\leftarrow$  مقداری تغییر شکل

پلاستیک داریم . تا یک فاصله ای از رأس فاق، تغییر شکل پلاستیک داریم و از آنجا بعد

الاستیک . چون  $\sigma < \sigma_y$  . در اثر این تغییر فرم، کار سختی داریم  $\leftarrow$  افزایش استحکام

به تمایل به شکست ترد بیشتر.

ج) در منطقه ی فزون،  $\epsilon$  هم بیشتر است  $\leftarrow$  تمایل بیشتر به شکست ترد .

د) وجود فاق موجب چیدجری شدن تنش می شود . در حالت یک بعدی شرط تسلیم  $\sigma_1 = \sigma_y$

۲۳ / ۱۱ / ۸۶ (۱۱)

اما در حالت چند محوری:  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y$ ؛ کشش:  $\sigma_3$ ؛ شرط تسلیم:  $\sigma_1 = \sigma_y + \sigma_3$   
پس تنش تسلیم زیاد میشود.

در necking هم تنش سه محوری ایجاد میشود:

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

دلایل ب وجه ممکن است اصلاً ایجاد نشوند.

### جوانه زنی ترک:

بر مبنای جوانه زنی ترک مواد به سه دسته تقسیم میشوند: 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 فزرات hcp و برخی از

bcc ها، بلورهای دارای ساختار تک طعام و ...

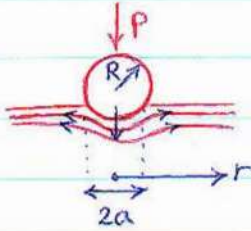
نرم: نابجائی ها بدون محدودیتی در آن حرکت می کنند. شکست ناشی از حرکت نابجائی ها است؛

مثل fcc حاد برخی bcc ها، پلیمرهای غیر شیشه ای

۱۲/۱۱/۸۶ (۱۲)

در مورد ماده‌ی ترد: حساسات سطحی موجب جوانه زنی 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 پیرامونش کششی ایجاد می‌شود.

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

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

ذرات محلول کوارتز به قطر ۱ μm روی سطح نشسته. با اعمال نیروی 1 N ترک جوانه زنی می‌کند. مقدار اعمال این نیرو به ذره‌ای با این قطر دور از ذهن است مگر اینکه با سرعت برخورد کند.

تئوری‌های دیگر:

وجود آدن محل‌های تمرکز تنش در هنگام ساخت مواد. روابط مربوط به K قبلاً درست آمد.

تغییر در ترکیب شیمیایی بعضی مناطق. مثلاً در برخی مناطق اکسید ایجاد شود. اکسیداسیون ایجاد

تنش پسماند می‌کند و اگر به استحکام تئوری برسد، ترک جوانه زنی می‌کند.

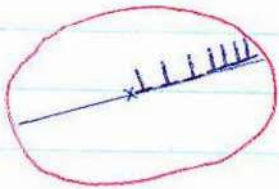
مورد دیگری: اثرات حرارت دادن. با دادن حرارت vacancy ها جمع می‌شوند ← حفره ← ترک

۱۳/۱۱/۸۶ (۱۳)

در مواردی مثل همیشه تعویض یون‌های توانده موجب جوانه زنی ترک شود. در مورد فنرات این اتفاق نمی‌افتد. یون‌های مختلف به‌شیشه اضافه می‌شود مثلاً برای تغییر رنگ. در محل نشست تنش ایجاد می‌شود و باید تنش‌گیری نمود.

**جوانه زنی ترک در موارد زیر:**

در این ماده برای جوانه زنی ترک نیاز به تغییر شکل پلاستیک داریم ← تنش تسلیم کنترل کننده است  
هم‌ترین مکانیزم، تجمع نایجابی‌ها پشت موانع است:



اولین نایجابی‌ست مانع توقف می‌شود و در مراحل بعد تجمع داریم  
← تمرکز تنش. اگر این تمرکز در رأس به حد معینی برسد

یکی از این موارد روح می‌دهد:

(۱) جوانه زنی ترک در نیم‌تردها (۲) تغییر شکل پلاستیک در زمینه‌ی اطراف در موارد نرم

در نیم‌تردها، حد معین تنش شکست است. اما در موارد نرم این حد، تنش تسلیم است.

این تمرکز در زاویه‌ی حدود  $70/5^\circ$  نسبت به سطح لغزش،  $\max$  مقدار است. ( $\max$  تنش)

اگر مانع ناخالصی باشد:

تنش اگر برسد به حد استحکام ناخالصی برسد: ذره می‌شکند که در موارد نرم موجب جوانه زنی

ترک می‌شود. ممکن است تنش به اندازه‌ی فصل مشترک ناخالصی در زمینه برسد که موجب جدا شدن

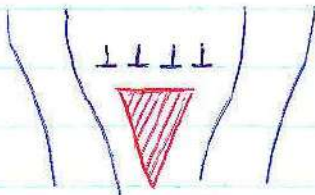
۲۰/۱۱/۸۹ (۱۴)



ناخالصی از زمینه می شود.

اگر مانع فرزدانه باشد:

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



گوه ای شکل  
wedge crack

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

احتمال جوانه زنی ترک در دانه ی مجاور است اگر به حد استحکام

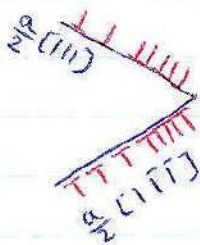
شکست برسد.

ممکن است موجب جدا شدن لایه های افقی شود. چون تنش درجه ی جهات است. در مورد بلی

لایه های عمودی بود.

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

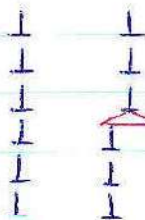
نابجائی حاصل غیر متحرک است در bcc ها چون متعلق به صفحه های {100} است. پس



بعضی مانع عمل می کند ← ترک گوه ای شکل

در fcc هم داشتیم. چون لغزش

آسان تر است جوانه زنی ترک داریم. در fcc لومر- کوتل نام داشت.



مزر فرعی در hcp موجب جوانه زنی ترک می شود.

اگر یک قسمت به مانع برخورد همچنان قسمت می ایستد ← جوانه زنی ترک

ترک های الاستیک : (آخرین مدل)

اگر آرایش نایجائی مرز فرعی باشد منتهی در سطح (به سطح خم شود) جوانی ترک میشود.



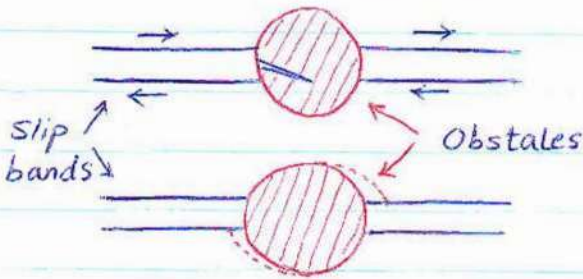
جوانه زنی ترک در مواد نرم :

ایجاد ترک سه مرحله دارد :

- (۱) جوانه زنی حفره ها (۲) رشد حفره ها (۳) بهم پیوستن حفره ها به ایجاد ترک

محل های امکان ایجاد حفره ها :

ذرات نازدوم ، ناخالصی ها ، آخال ها - محل های تمرکز تنش : مرزها و نایجائی های ساکن



پشت ذرات بجمع نایجائی و تمرکز تنش

داریم پس :

یا موجب شکست خود زره میشود و یا جدا

شدن فصل مشترک زره در زمینه . بستگی دارد تنش به حد شکست و یا حد جدا شدن فصل مشترک

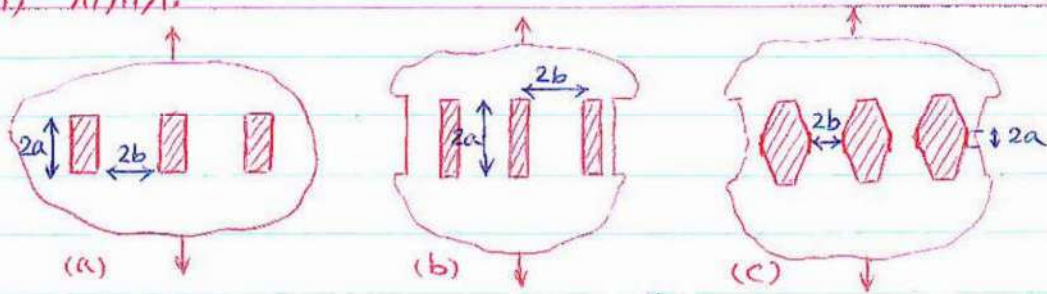
برسد . مثل جوانه زنی ترک در نیمه ترد است . در مواد نیمه ترد فقط تا جوانه زنی ترک تغییر شکل

پلاستیک داریم .

رشد حفره ها :



(14) ۱۹/۱۱/۲۰



در جهت اعمال تنش حفرات رشد می کنند تا به حالت بحرانی برسند ← necking داخلی

شکل می گیرد. مواردین حفرات necking می کنند. در نتیجه مرحله نهایی، حفرات به هم راه می یابند و ترک شکل می گیرد. در آزمایش کشش:

تا وقتی که تنش لازم برای تغییر شکل هگن کمتر از تنش لازم برای ناهگن باشد، هگن روی می دهد تا اینکه به max نیرو برسد؛ و بعد از آن کاهش می یابد. (تنش نهایی منظور است) در اینجا هم همینطور است:

تا جاییکه تنش رشد حفره ها کمتر باشد از تنش لازم برای پیوستن حفره ها، رشد حفره ها ادامه می یابد تا وقتی که تنش لازم برای بهم پیوستن کمتر شود.

میزان تغییر شکل برای جوانه زنی به چند پارامتر بستگی دارد:

(ابعاد ذرات)

(۱) در مورد بالائی زودتر جوانه زنی رخ می دهد چون ابعاد بزرگتر است و فصل

مشترک نیز بیشتر است. در مورد ذرات ریز، ناچجائی های تواننده در شان بروزند.

(۲) شکل ذرات. اگر plate باشد (صغیر) زودتر می شکند ← در فولاد ذرات سمیت را

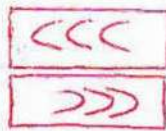
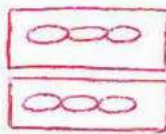
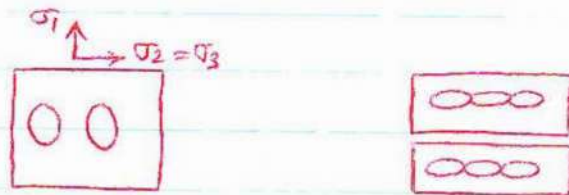


گردی می کنند.

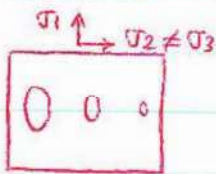
۱۳/۱۱/۸۶ (۱۷)

(۳) در صد حجی ذرات : هر چه بیشتر باشد، کرنش لازم جهت جوانه زنی کمتر خواهد بود. ذرات بجم نزدیکتر میشوند.

در مقطع شکست بکری حفره دیده میشود:



تنش برشی اگر اعمال شود:

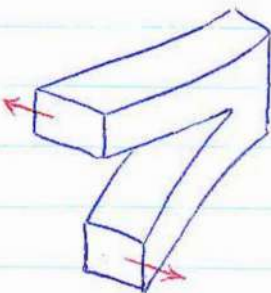


تنش نااهلگن:

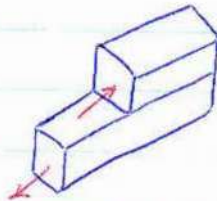
پس با دیدن سطح شکست می توان نوع تنش اعمالی را تشخیص داد و حتی منبع و منشأ ترک را هم پیدا کرد.

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

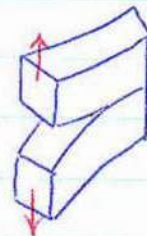
آنالیز تنش در راس ترک:



نوع ۳  
پارگی  
Tearing



نوع ۲  
برشی  
shearing



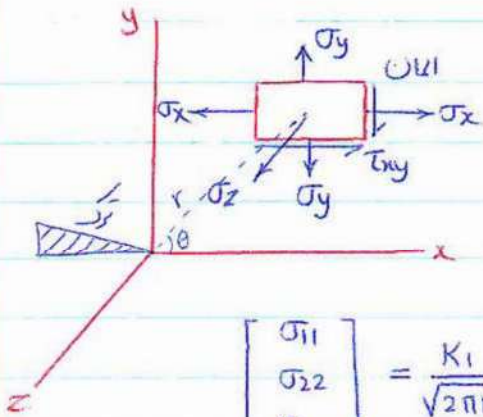
نوع ۱  
کششی  
opening

(1A) ۸۷/۱۲/۷

نوع ۱: خطرناکترین نوع است. تنش عمود بر سطح شکست یا ترک است. در عمل

ترکیبی از این‌ها را ممکن است داشته باشیم.

در مجموع تنش مولفه‌ی تنش داریم



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

$$\sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$$

$$\sigma_{33} = 0 \quad (\text{plane stress})$$

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

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

نوع ۲

$$\sigma_{13} = \sigma_{23} = 0$$

$$\sigma_{33} = 0 \quad (\text{plane stress})$$

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

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

نوع ۳

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

در رأس ترک تنش از حالت یک بعدی خارج می شود ← تمایل به تدریج بیشتری شود



plane stress

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

plane strain

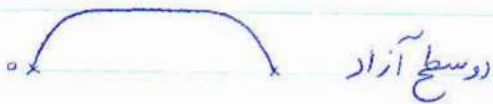
$$\epsilon_{33} \sim 0$$

اگر ضخامت کم باشد  $\sigma_{33} \sim 0$  در مورد  $\epsilon_{33} \sim 0$  ضخامت زیاد

پوره و تنش زیاد است و  $\epsilon_{33} \sim 0$

در سطح آزاد تنش صفر است. در دو طرف برابرین صفر است. در حالت ضخامت زیاد بین دو سطح

آزاد تنش داریم:



Stress intensity factor

ضریب شدت تنش:

$$K = f(\sigma, a)$$

$a$ : طول ترک

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

$m$ : ضریب تعدیل (اصلاح) ضریب کالیبراسیون

$$m = f(a/w)$$

در حالت کلی:

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

$w$ : عرض نمونه

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

(۲۰) ۸۹/۱۲/۷

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

$K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{r}}$  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 به عوامل متالورژیکی در  $K$  تأثیر دارد.

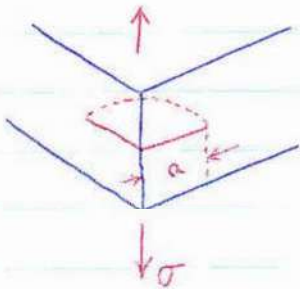
مثلاً تنش اعمالی برای شکست آهن و مس متفاوت است.

\* در لحظاتی شکست:  $K = K_c$

$K_c = m\sigma_c \sqrt{\pi a_c}$  طول ترک بحرانی:  $a_c$  تنش بحرانی:  $\sigma_c$   
(plane stress)

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

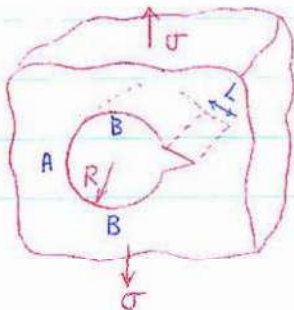
$K_{Ic}$  منظور mode I اشاعی ترک است.



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

اگر نرم سکه‌ای باشد:

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



هوانه زنی ترک از سوراخ:

بدلیل تمرکز تنش در اطراف سوراخ طول ترک:  $L$

در حالت داریم:

$$K \approx 1.12 (3\sigma) \sqrt{\pi L} \quad L \ll R \rightarrow \text{مثل ترک سطحی می شود}$$

در مورد دایره  $K_t = 3$  و در اثر اعمال تنش به قطعه  $(\sigma)$  به ترک  $3\sigma$  وارد می شود.

در هنگام جوانه زنی از این فرمول استفاده می شود. وقتی ترک بزرگ تر شد از رابطه زیر:

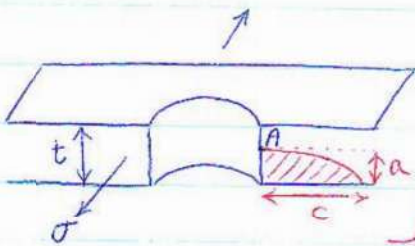
$$K = \sigma \sqrt{\pi \left(\frac{L+2R}{2}\right)} \quad L > R \rightarrow \text{مثل ترک داخلی می شود}$$

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 می شود. پس در مرحله جوانه زنی  $\max \sigma = F\left(\frac{L}{R}\right)$

است.



جوانه زنی ترک بیضی شکل از سوراخ:

$t$ : ضخامت قطعه

↑ برای شروع ترک

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

$KA$ : شرایط  $\max$  شدت تنش در سطح بیضی در  $A$

$c$ : نصف عرض زیر بیضی بیضی شکل

$a$ : عمق زیر بیضی بیضی شکل

$3\sigma$ : اثر تمرکز تنش در  $A$

1.12: ضریب اصلاح سطحی در  $A$

۱۹/۱۲/۷ (۲۲)

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

ضریب اصلاح مربوط به بیضی که برای نسبت نسبتاً بزرگ  $\frac{a}{t}$  می باشد  $\sqrt{\sec(\pi a/2t)}$

K<sub>IC</sub> : از توانیت ماده است . (چقرنگی) toughness

در طراحی از رابطه  $K_{IC} = m\sigma_c \sqrt{\pi a c}$  ما طول ترک مجاز را محاسبه می کنیم در نقطه شکست

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

اگر بخواهیم  $\sigma_c$  را بدست آوریم از دستگاه ترک یاب یا توده به وقت آن استفاده می کنیم.

$$\sigma_{II} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} (\cos \theta/2 - \cos \theta/2 \sin \theta/2 \sin 3\theta/2)$$

بجای اینکه در زاویه  $\theta$  کار کنیم ، در رأس ترک کار می کنیم ( $\theta=0$ ):

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

از این به بعد در جهت رشد ترک کار می کنیم. یعنی محور x در شکل های قبلی نه سایر جهات. (ص ۱۸)

مسئله - (آخرین فصل ۸)

$$\sigma = 350 \text{ MPa}$$

$$2a = \frac{5}{\pi} \text{ Cm}$$

$$\sigma_y = 500 \text{ MPa}$$

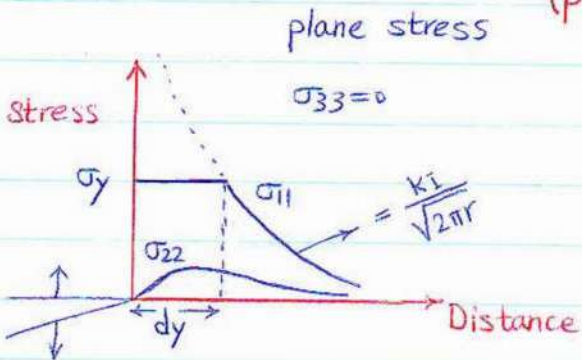
$$K = m \sigma \sqrt{\pi a}$$

نصف طول ترک  $m=1$  : ترک داخلی  $\rightarrow$

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

(۲۳) ۸۶/۱۲/۷

توزیع تنش در رأس ترک: (plane stress)



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

به صفر می رسد: به تنش اعمالی

می رسد.

در رأس تنش به  $\infty$  نمی رسد چون به تنش تسلیم یا شکست که برسد کار تمام است. (تغییر فرم)

پلاستیک رخ می دهد)  $\sigma_y$ : تنش تسلیم

فاصله  $dy$ ،  $\sigma \geq \sigma_y$ : تغییر فرم پلاستیک داریم. شکست ترد است  $\leftarrow$  تغییر فرم

ناچیز است (بیزان کار نمی ناپذیر است): تا قبل از  $dy$ ،  $\sigma = \sigma_y$

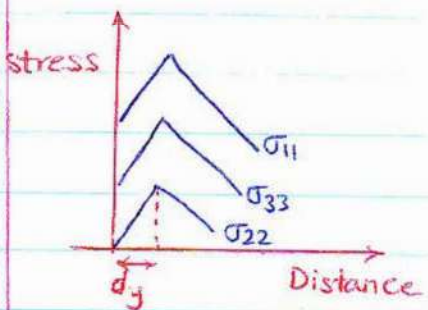
معیار تریسکا:  $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y \rightarrow \sigma_1 = \sigma_y$

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

۸۶/۱۲/۱۲

$\sigma_{22}$ : از دو طرف به سطح می رسد و صفر میشود.

توزیع تنش در رأس ترک: (plane strain)



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

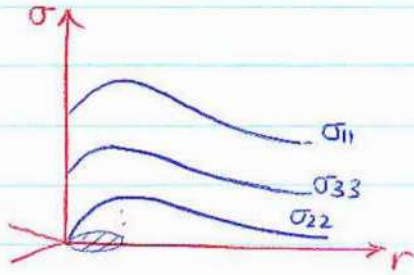
$$\sigma_{11} - \sigma_{22} = \sigma_y \rightarrow \sigma_{11} = \sigma_{22} + \sigma_y$$

۱: جهت بارگذاری

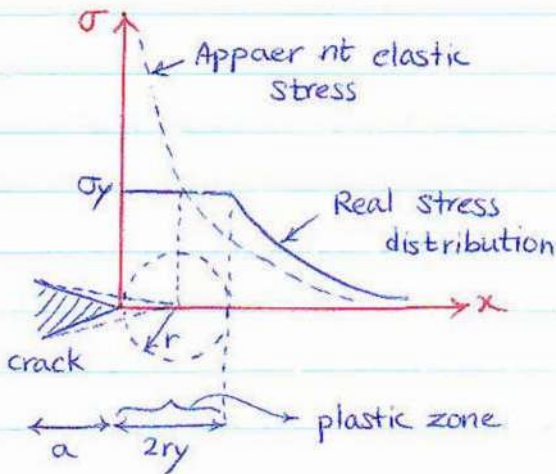


(۲۲) ۱۹/۱۲/۱۳

منطقه‌ی تغییر شکل پلاستیک داریم اما کمتر از حالت قبلی.



کاسه‌ی 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 جایی استفاده می‌کنیم که تغییر شکل پلاستیک

داریم. برای رفع این مشکل:

حجمی ترک گترش اندازه‌ی r داریم.

در حالت plane stress : از تساوی در  $\sigma_{11}$  :

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

در نمودار بالا وقتی تنش  $\sigma_y$  می‌رسد تغییر شکل پلاستیک شروع می‌شود و درگیر تنش با

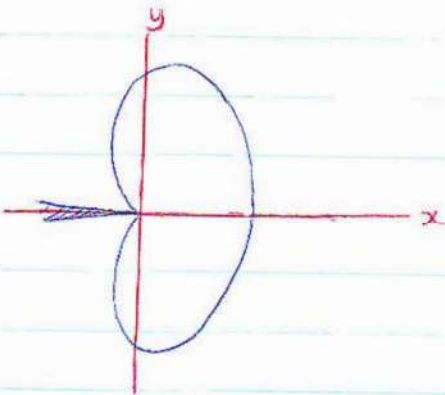
پهنای زیاد می‌شود. در اینجا از کار سختی صرف نظر می‌کنیم چون میزان تغییر فرم کم است.

(۲۵) ۱۷/۱۲/۱۲

در حالت plane strain نظری 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 سخت تر است.



باید مقدار  $K$  را اصلاح کرد اگر تغییر فرم در

برابر طول ترک قابل ملاحظه نباشد.

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

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

فاکتور شدت تنش موثر

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

انبار عمل تغییر شکل پلاستیک بصورت بالاست :

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

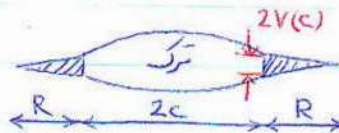
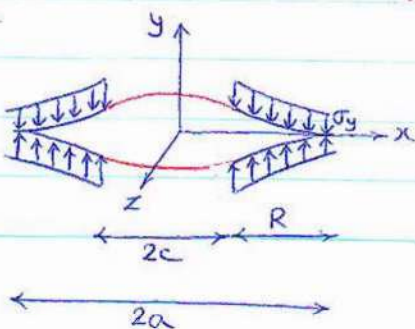
$$K_{eff} \cong Y \left( \frac{a+r_y}{w} \right) \sigma \sqrt{\pi(a+r_y)}$$

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

برای ترک داخلی

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

مدل پلاستیکی (نوار) داگدال (Dugdale) :



طول ترک داخلی :  $2c$

(۲۹) ۸۹/۱۲/۱۳

در حین رشد ترک، در منطقه‌ی تغییر شکل پلاستیک، ترک از خرد مقاومت و  $\sigma_y$  نشان می‌دهد

یعنی بازترک با طول  $2a$  بطور الاستیک رشد می‌کند.

$$\frac{c}{a} = \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\sigma}{\sigma_y}\right) \quad a = c + R$$

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

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

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

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

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

پس نتایج یکی است ولی روش‌ها متفاوت است.

ارتباط بین  $K$  و سرعت انرژی:

$$\sigma = (2E_y / \pi a)^{1/2} \quad \text{plane - stress} \quad \text{برای موارد ۲}$$

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

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

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

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

(۲۷) ۱۲/۱۲/۱۲

مسئله - چون ورق است : plane stress

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

$$K = 1 \times 350 \sqrt{R \times \frac{2.5}{100\pi}}$$

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

$$= 55.34 \text{ MPa}$$

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

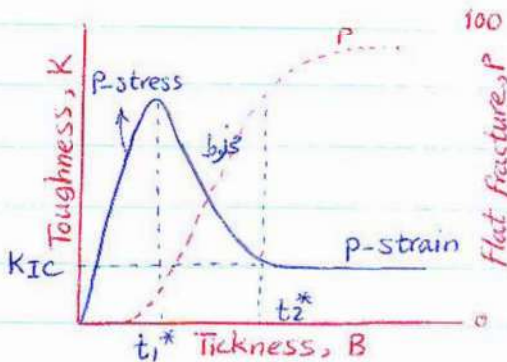
$$K_{eff} = \frac{K (\sigma \sqrt{\pi a})}{\left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^2 \right]^{1/2}} = \frac{55.34}{\left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{350}{500} \right)^2 \right]^{1/2}}$$

ترک مرکزی است .

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

پس نمی توان چشم پوشی کرد .

تغییرات چقرمگی با ضخامت :



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

P در حد شکست ترد



با افزایش ضخامت ، منطقه تغییر فرم هم زیاد

می شود ← کار انجام شده زیاد می شود ←

چقرمگی زیاد می شود . (plane stress) بیک سطحی برای وقتی است که کل منطقه را پوشاند .

از این به بعد ، منطقه ی پلاستیک کوچکتر و الاستیک بزرگتر می شود . در ضخامت های زیاد کار تغییر

شکل پلاستیک ناخیز می شود و  $K_{IC}$  ثابت خواهد شد . علت :  $r_y$  باید به  $\frac{1}{6\pi} \left( \frac{K}{\sigma_y} \right)^2$  برسد

(۲۸) ۸۶/۱۲/۱۴

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

در هر دو حالت  $r_y \propto \left( \frac{1}{\sigma_y} \right)^2$  پس یکی از عوامل موثر تنش تسلیم است.  $\sigma_y$  زیاد باشد

ممکن است در ضخامت‌های کم به  $p\text{-strain}$  برسیم. (برخلاف نمودار قبلی)

برعکس برای  $\sigma_y$  کم، در ضخامت‌های زیاد ممکن است به  $p\text{-stress}$  برسیم.

در حالت مخلوط در کنارها شکست نرم ( $p\text{-stress}$ ) در وسط که معمولاً شکست ترد

است ( $p\text{-strain}$ ) داریم. ۸۶/۱۲/۱۴

تعیین چقرمگی شکست در شرایط کرنش صفحه‌ای:

نکات مهم:

۱- ضخامت نمونه باید با اندازه‌ای باشد که از اثر لبه‌ها برشی بر چقرمگی صرف نظر شود.

۲- اندازه‌ی منطقه‌ی پلاستیک در شکست باید نسبت به سطح نمونه کم باشد تا نمونه را بتوانیم در

حالت الاستیک بررسی کنیم.

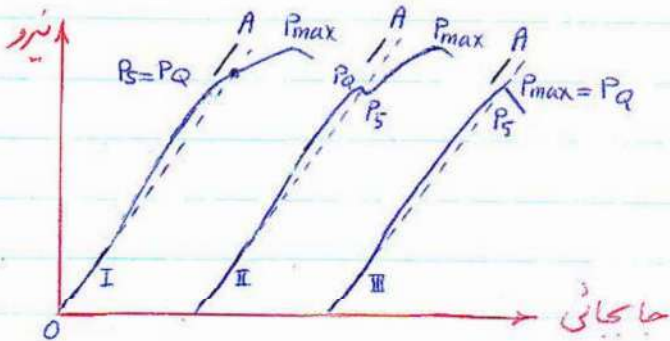
۳- ابعاد منطقه‌ی پلاستیک نسبت به طول ترک نباید زیاد باشد تا بر مقدار چقرمگی تأثیر داشته باشد.

نمونه‌های استاندارد چقرمگی شکست:

ابعاد را نداریم بلکه نسبت بین طول‌ها داریم.

\* فرمول‌ها در ضمیمه‌ی کتاب می باشد.

تعیین چقرمگی شکست:



خطی با  $S/1$  اختلاف نسبت به خط الاستیک رسم می کنیم. محل برخورد با منحنی  $= P_5$ .

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

اگر قبل از  $P_5$  نقطه‌ای بزرگتر از گام نیرو وجود نداشت:  $P_5 = P_Q$

شرط لازم:  $\frac{P_{max}}{P_Q} \leq 1.1$  برای  $p$ -strain بودن.  $K_Q$  نرم‌بجری محاسبی  $K_Q$ .

$$K_Q = \frac{P}{Bw^{3/2}} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad \text{باراشتن} \quad K_Q \text{ دست‌ی‌آید.}$$

نرم‌بجری:  $K_Q$ ،  $K_{IC}$  چیست یابند؟ 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 برتر از مورد یعنی  $p$ -strain نبوده و باید آزمایش را تغییر داد: باید طول ترک یا ضخامت افزایش یابد.

جای رابطه‌ی  $B, a$  در بالا می توان از رابطه‌ی زیر هم استفاده کرد:

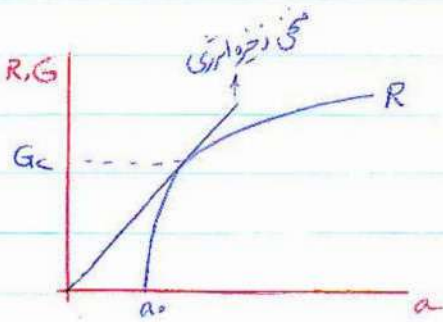
(۳۰) ۸۹/۱۳/۱۴

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left( \frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad B_0 a \geq 2.5 \times 6\pi r_y = 15\pi r_y \approx 50 r_y$$

در نوع II، قبل از  $P_5$  نقطه‌ای داریم که از  $P_5$  از کاظمیزو بیشتر باشد و آنرا  $P_4$  قرار

می‌دهیم. در نوع III هر سه روی هم منطبق اند و  $\frac{P_{max}}{P_4} = 1$  است.

علت اینکه ابعاد در نمونه نداریم: اگر  $p$ -strain نبود با تغییر پارامتر، بقیه هم تغییر میکند.



تعیین چقرمگی شکست در تنش صفحه‌ای:

$$\text{در حجم ترک دار وقتیکه} \quad \frac{\partial G}{\partial a} = \frac{\partial R}{\partial a} \quad \text{ناپایداری}$$

برخ می‌دهد.

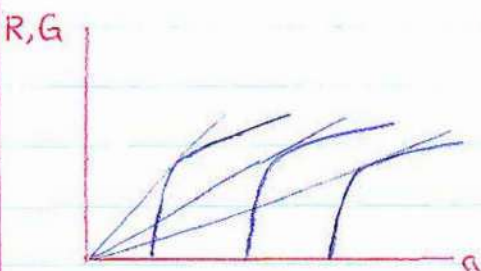
در این حالت ممکن است ترک قبل از شکست به آرامی رشد کند بنابراین تعیین  $\max$  شدت

تنش شکل خواهد بود. چون طول بیشترین ترک برای ما مشخص نیست. بنابراین باید لحظه‌ای

را به عنوان ناپایداری تعریف کنیم. رابطه‌ی بالا (ایرودین) مطابق رابطه‌ی گریفیت است.

$G_c$ : چقرمگی شکست در لحظه‌ی ناپایداری. در  $p$ -stress چقرمگی شکست زیاد است و بنابراین

تغییر شکل پلاستیک زیاد است.

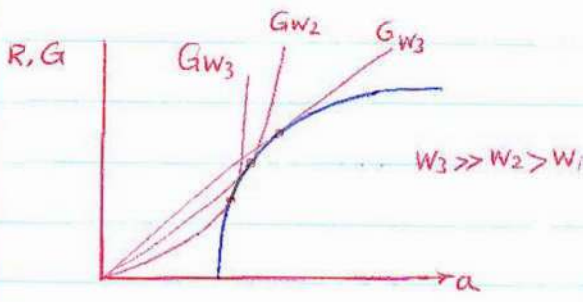


اثر طول ترک:

با تغییر ابعاد چقرمگی شکست تغییر میکند.

محل برخورد تغییر کرده. (مماس‌ها)

(۳۱) ۱۴، ۱۲، ۸۹



اثر عرض نمونه :

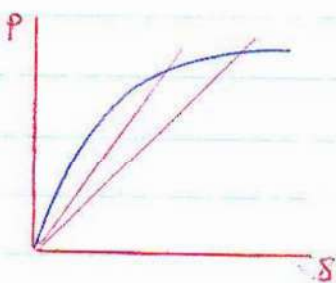
↑ ضخامت ← چقرمگی شکست ↑

رواقت تغییر بیشتر در p-stress ایجاد تأثیر

دارد. اما در p-strain،  $K_{Ic}$  ثابت است.

رنگاه R-a رایج رهد.

محل تلاقی رایج خواهیم ← نیزه را داریم و محور عمودی نمودار  $E \frac{\delta}{P} t - \frac{a}{W}$  بدست می آید. برای

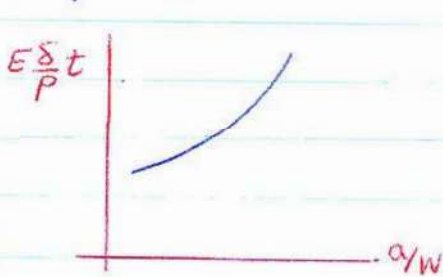


چیزین نقطه بجهن طریق عمل می کنیم

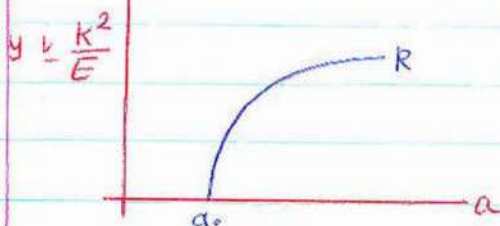
$$P = n \delta \quad ; \quad c = \frac{1}{n}$$

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

برآیند P و c،  $\delta$  بدست می آید ←  $\frac{a}{W}$  بدست می آید. و معنی  $E \frac{\delta}{P} t - \frac{a}{W}$



بدست می آید. برای یک نمونه m را داریم.



مدم بعدی بدست آوردن G است.  $(m = f(\frac{a}{W}))$   
 $(K = m \sigma \sqrt{\pi a})$

$$\frac{K^2}{E} = G : K = \sqrt{EG}$$

خط G از رابطه ی گرفتیم رسم میشود.



(۳۲) ۸۶/۱۲/۱۴

تعیین چقرمگی شکست با استفاده از COD : Crack opening displacement

COD : میزان باز شدن دهانه 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)  $\ln x \sim x-1$

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

$$2V(c) = \frac{k^2}{E\sigma_y} = \frac{g}{\sigma_y} \quad g_c \cong 2\sigma_y V(c) \quad \text{or} \quad g_c \cong n\sigma_y \cdot 2V(c) \quad (1 < n \leq 1.5-2)$$

وقتی ناپایداری اتفاق می افتد که General yielding اتفاق افتد (تسلیم عمومی)

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

p-strain :  $1 < n \leq 1.5-2$       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 می افتد که تمام عرض ترک به تسلیم رسیده باشد. اینده تسلیم کلی

اتفاق افتاده یا خیر باید با مقطع رزون و ماکروگرافی آنرا تشخیص دهیم.

۸۶/۱۲/۱۴

تعیین چقرمگی شکست با استفاده از انرژی J :

$$J = \frac{2}{b} \int_0^{s_c} P ds_c$$

محاسبه JIC :

(۳۳) ۱۶/۱۲/۱۹

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 رأس ترک است. B: ضخامت

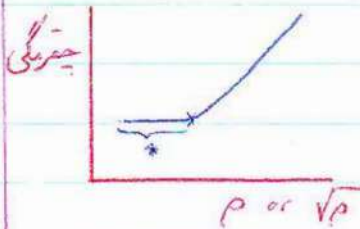
P: نیرو بر واحد ضخامت. b: لیگامنت یا انرژی باقی‌مانده

a<sub>0</sub>: طول اولیه ترک یا فاق. δc: تغییر مکان نمونه‌ی فاقدار

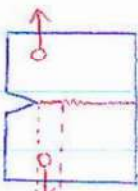
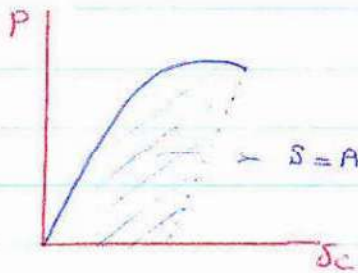
برای محاسبه: ابتدا نمونه‌ی فاقدار را تحت بارگذاری خمشی قرار می‌دهیم تا در رأس فاق، ترک

پدید آید ← ابتدا باعث می‌شود P (شعاع رأس ترک) کم شود تا بر حجمی تأثیر نداشته

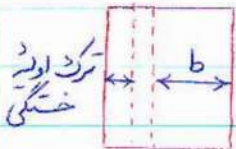
باشد و هم: می‌توان میزان رشد ترک را بدست آورد.



سپس مخفی P بر حسب δc را رسم می‌کنیم.

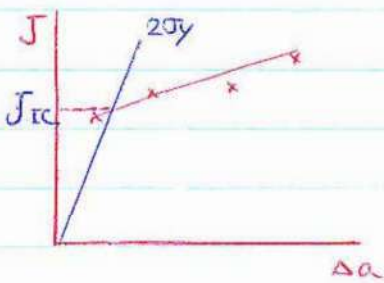


بعد مجدداً نمونه را تحت بارگذاری خمشی قرار می‌دهیم. بعد در نمونه شکست ایجاد می‌کنیم



برای محاسبه δc، مرزین دو ترک خمشی را اندازه‌گیری می‌کنیم

آن دورادست می آوریم. برای نمونه اول:  $\Delta a_1, J_1$ . سپس برای نمونه بعدی تا 4، 5 نتیجه  $J_n, \Delta a_n$  بدست آید. لیگامنت زیر میکروسکوپ قابل اندازه گیری است.



در مرحله بعد نمودار  $J-\Delta a$  را رسم می کنیم.

شکست ترد ← p-strain مد نظر است.

شرط p-strain بودن:

$$B, b \geq (25-50) \frac{J}{\sigma_y} \quad \Delta a \text{ از } J \text{ تعاطلی از } \Delta a \text{ را انتخاب می کنیم که در رابطه}$$

قوت صدق کنند. سپس از مبدأ مختصات خطی با شیب  $(2\sigma_y)$  رسم می کنیم: blunting line:

حل برخورد  $J_{IC}$  است.  $K = \sqrt{\frac{EG}{1-\nu^2}}$  در حالت p-strain ←  $K$  بدست می آید



$CoD=5$

علت رسم خط  $2\sigma_y$ :

$$g = 2\sqrt{r(c)} \sigma_y$$

$$g = CoD \cdot \sigma_y = 2 \cdot J \cdot \sigma_y = 2\sigma_y \Delta a$$

$$g = 2\sigma_y \cdot \Delta a$$

$r_y$ : طول منطقه پلاستیک

در تغییر فرم پلاستیک اگر از روابط الاستیک بخواهیم استفاده کنیم: ترک بطور الاستیک با اندازه ی

$r_y$  رشد میکند. در اینجا کار سختی صرف نظر شده چون تغییر فرم کم است. اگر بخواهیم کار سختی را در

$$\sigma_{Flow} = \frac{\sigma_y + \sigma_{UTS}}{2}$$

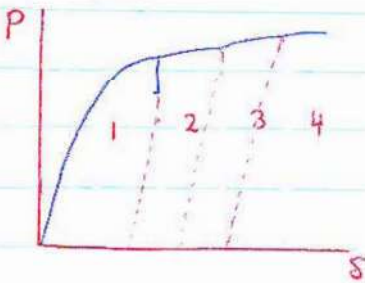
نظر بگیریم، خطی با شیب دو برابر تنش سیلان رسم می کنیم.

درست گفته شده، خشکی دوم برای هواری که در اثر دما تغییر رنگ می دهند، لازم نیست. بنابراین

(۳۵) ۸۹ / ۱۲ / ۱۹

مرزین خستگی اول در محل تغییر رنگ را برای این مواد در نظر می گیریم.

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



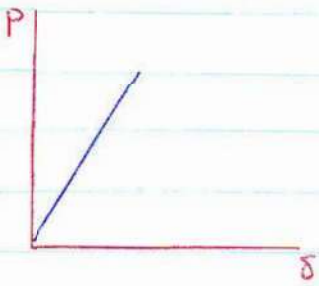
در بارگذاری ، ۱۰ درصد بارگذاری را کاهش می دهیم

بعد باید طول ترک را به روش غیر مخرب اندازه گرفت .

دوباره همین کار را در سه می دهیم .

$$a = a' = \Delta a$$

فان اولیه خستگی



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

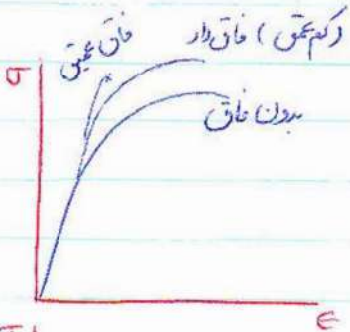
$$\delta = P \cdot c$$

در هر مرحله ، سبب همان مرحله را در نظر می گیریم . چون نمونه ها

دارای ترک هستند ، این سبب ها نام مساوی نیستند .

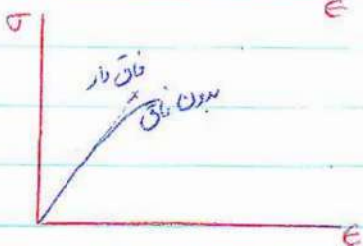
آخرین روش : آزمایش ضربه :

وجود فان ← تمایل به شکست ترد ریاری می شود .



notch - strengthening

این نمونه قابلیت انعطاف دارد .



notch - weakening

نمونه با قابلیت انعطاف کم :

۱۳۹۱/۱۲/۱۶ (۳۶)

یعنی استحکامش هم کم بشود. پس notch رو تاثیر داره: بلا تردن استحکام و عکس

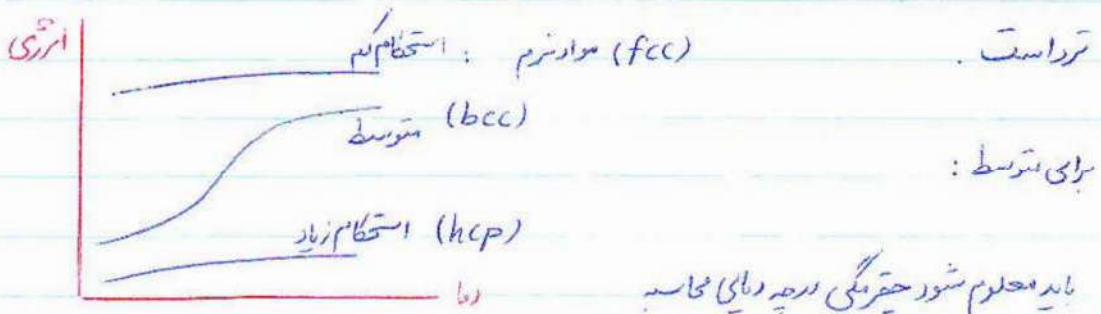
دوروش برای استحکام فربه: ISO - sharpy

در sharpy، نمونه  $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$  با فاق  $V$  شکل. عمق فاق  $0.02 \text{ mm}$  و شعاع

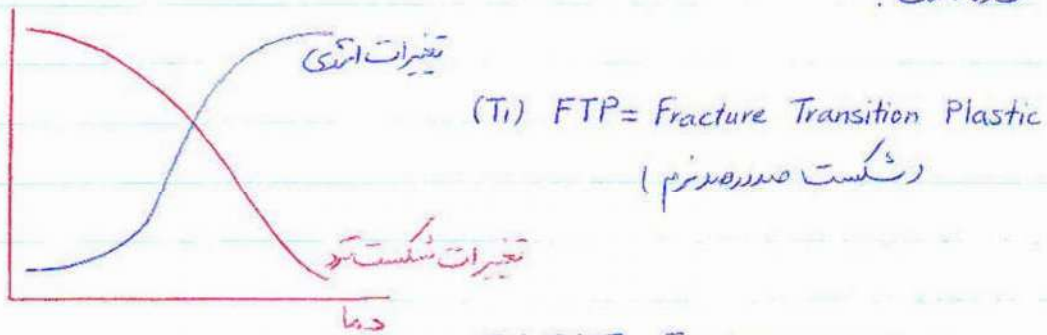
فاق:  $0.2 \text{ mm}$

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

K، در حالت p-strain می خواهیم. پس آزمون را در دمای انجام می دهیم که شکست صدمه سرد



شده است.



( $T_2$ ) FATT = Fracture appearance

Transition Temp. (50 در صدمه سرد و 50 در صدمه سرد)

$T_3 = \text{NDT} = \text{Nil ductility Temp.}$

(شکست صدمه سرد)

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

$T_5 = 15 \text{ (ft. lb)}$

دما بر سبای میزان انرژی

۱۹ / ۱۲ / ۸۶ (۳۷)

T<sub>5</sub> و T<sub>3</sub> هم هستند چون در منطقه‌ی ترد هستیم. بیشتر روی T<sub>3</sub> کار می‌کنیم. با تعیین NDT اثری شکست را می‌خوانیم. از اثری ضربه، K بدست می‌آید. ص ۳۹۸.  
 دمای تبدیل ثابت سنیت دبا عوادلی تعخیر میکنند:

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

۲- عناصر آلیاژی: نمودار به سمت راست می‌رود. (کاهش چقرمگی). نیکل در فولاد برعکس عمل میکنند.

۳- اصطلاح نمونه: بزرگتر: به سمت p-strain می‌رویم - شکست ترد: به سمت راست می‌رود و دمای تبدیل زیاد میشود.

۴- جهت آماده‌سازی نمونه: نمونه‌ی نورد ← جهت دانه‌ها در راستای نورد کشیده شدن دانه‌ها notch عمود بر راستای دانه‌های کشیده شده: چقرمگی تر است چون در این حالت مواضع (مزر دانه‌ها)

۱۲ / ۱۲ / ۸۶

زیاد هستند سر راه رشد ترک.

\* سایر آزمایشات:

به علت کوچک بودن نمونه‌های ضربه نتایج همیشه با معادله‌ی واقعی یکسان نیست. از اینرو از آزمایشات

دیگر استفاده میشود: روش انفجاری - وزنی سقوطی - پارگی دینامیکی

(۲۸) ۸۲/۱۲/۲۱

روش انفجاری: روی صفحه‌ای به ابعاد  $14 \times 14 \times 1$  in یک درز جوش سرد ایجاد و پس از قرار گرفتن

روی قالب تحت بار انفجاری (دینامیکی) قرار می‌گیرد.

NDT: بالاترین دمایی است که شکست سرد تالابی صفحه پیش می‌رود.

FTE: دمایی است که شکست سرد تالابها گسترش نمی‌یابد. (مانندترین دمایی گسترش شکست تحت تنش کششی

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

روش وزن سقوطی:

درز جوش سرد و کوتاهی بر صفحه‌ای به ابعاد  $3.5 \times 14 \times (5/8 - 1)^3$  in ایجاد و ترک کوچکی در آن ایجاد می‌شود.

سپس تحت بار دینامیکی ناشی از سقوط وزنه قرار داده می‌شود. اگر ترک در دهه کششی در امتداد عرض

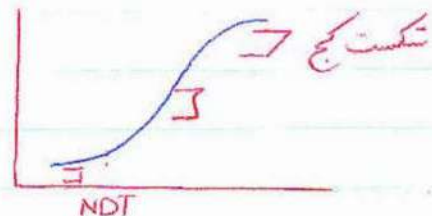
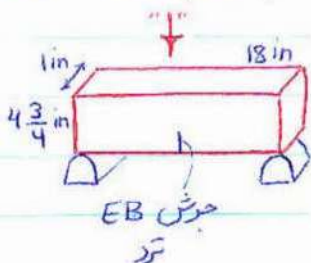
صفحه تالابها گسترش یابد، در کمتر از NDT است. با تکرار آزمایش دقیقاً توان NDT را

بدست آورد. درز جوش تمرکز تنش ایجاد می‌کند و notch باعث شکست سرد می‌شود

چون تنش‌های سه بعدی ایجاد می‌کند.

روش پارگی دینامیکی برای تعیین NDT:

مثل آزمایش شارپی است (آدنک) اما نمونه ضخیم‌تر است. جوش بدون ترک و سرد شده است.



آزمایش توقف ترک (رابرتسون):

نمونه ای با عرض 6 in تحت بار کشسان بکنواخت قرار می گیرد. گسترش ترک ترد با اعمال بار ضربه ای در طرف سرد شروع و با پیشروی به سمت گرم در نقطه ای متوقف می شود. دمای آن نقطه، معیار دمای توقف ترک یا CAT نامیده می شود. آزمایش بر روی فولادهای نرم نشان می دهد 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:

افزایش قابل شکست ترد

دیرگی اصلی

کودالاسی

یوی

فتری

پیوند الکترونی

بلورهای با تعداد کمتر

بلورهای نشسته

ساختار بلوری

تنظیم در برید

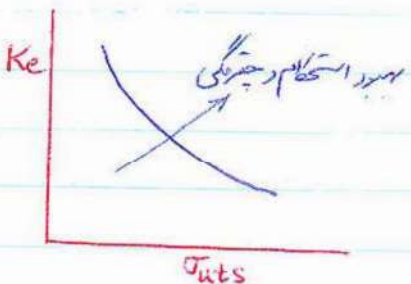
تنظیم گوناگون برید

گلول جاذبه صافی

میزان نظم

(مستویها مستقل از هم هستند)

روی ماه چه کار کنیم تا چقرمگی شکست بیشتر شود؟



مکانسیم های چقرمگی خارجی:

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

۲- چقرمگی ناشی از استحاله های مازی



(۴۰) ۸۴/۱۲/۲۱

4- ایجاد حفره در منطقه ترک

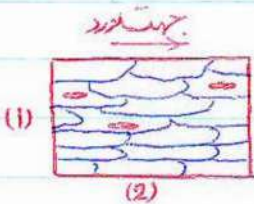
3- چقرمگی ناشی از ریز ترک ها

5- بسته شدن ترک در اثر تغییر شکل پلاستیک

7- سرش فصل مشترک سطح ترک در حال لغزش

6- پل زنی (چقرمگی رشته ای)

1- چقرمگی و نا همسانی ساختاری:



در جهت نورد، راندها کشیده می شوند + آخال

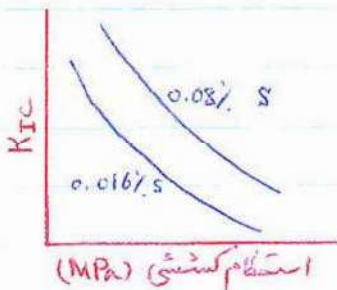
اگر notch در منطقه (2) باشد، چقرمه تراست چون

موانع بیشتری می بیند. جهت عمود بر جهت تغییر شکل چقرمه تراست. در مورد آخال هم همینطور

است. در حالت چقرمگی بیشتر از حالت است.

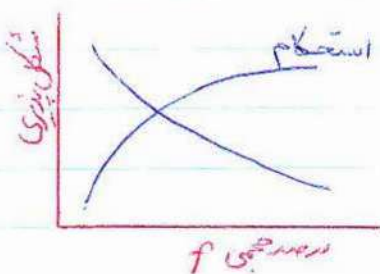
2- بهبود ترکیب شیمیایی یا تبدیلی آلیاژ و کنترل عمقیات زور:

وجود عناصری مثل گوگرد، فسفر، چقرمگی را کاهش می دهد. در سوپر آلیاژها باید درختلا زور



کنیم

3- اثر کسر حجمی نازوم:



اگر استقامت 500MPa کافیست نباید به 700MPa برسیم چون چقرمگی (KIC) کاهش می یابد.

4. درست آوردن بهترین ساختار جهت حد اکثر چقرمگی:

دورسته: آلیاژهای آهنی - غیر آهنی

\* آلیاژهای آهنی:

کربن: عامل فعال سختی پذیری - مقاوم کننده از طریق محلول جامد، کاربیدها هم چنین به استحکام رسی

مسکین کننده اما در عواصن ذرات مزرها نیز نقش دارند - کاهش چقرمگی

شکل: افزایش چقرمگی  $Cr$  و  $Mn$ : کاربیدزا - کاهش چقرمگی

$Mn$ : افزایش چقرمگی  $Si$ : اکسین زرا - دمای تبدیل را کاهش - کاهش چقرمگی

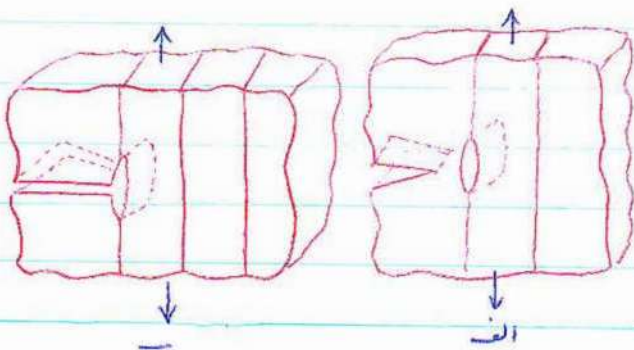
فولادهای Maraging: ساختار مارتنزیتی + عینیات پیرسازی برای افزایش استحکام

$Al$ : افزایش چقرمگی  $Ti$ : کاهش چقرمگی

\* آلیاژهای غیر آهنی: (مثل  $Ti-6V-4Al$ ): در کتاب

در این آلیاژ فاز  $\beta$  نیمه پایدار مناسب ترین فاز است. آلیاژهای  $\alpha + \beta$  بهترین حالت را

دارند: استحکام بالا اما چقرمگی پائین.



5. کاهش تنش در رأس ترک:

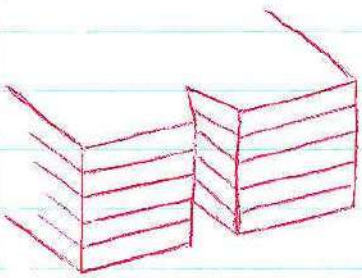
(استفاده از فصل مشترکهای ضعیف)

۸۶/۱۲/۲۱ (۴۴)

در رأس ترک تنش ها سر به سر می شود . تنش در جهتی موجب باز شدن فصل مشترک شده

و به حالت  $p$ -stress (ب) می رسم ← افزایش چقرمگی

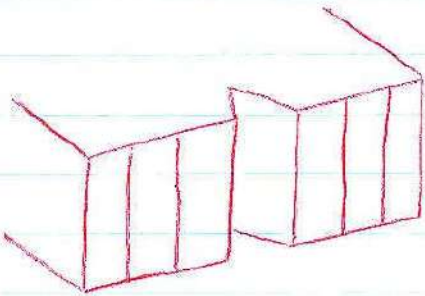
حالت دیگر تقسیم کردن فصل مشترک بصورت زیر است .



تعداد لایه ها بیشتر ← افزایش چقرمگی

چون ضخامت ها کم است ← از  $p$ -strain

$p$ -stress می رسم



حالت بعدی هم " کوتاه عرضی " است .

دوباره به  $p$ -stress می رسم .

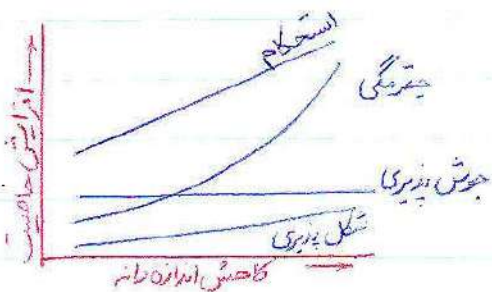
در لوله های تخت ، لوله از چند قسمت تشکیل می شود

تا ترک سریع رشد نکنند (ترک منحرف می شود)

پس در عمل از فصل مشترک ضعیف استفاده می کنند .

۸۶/۱۲/۲۶

6. ریز کردن دانه ها:



بجث شکست در راست (  $p$ -strain )

به دلیل چقرمگی زیاد می شود بار ریز کردن دانه ها:

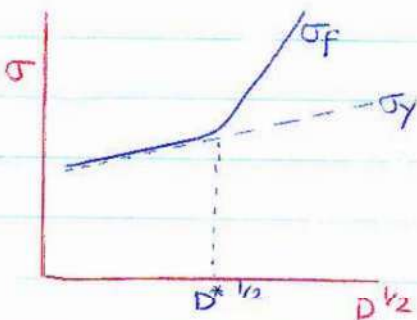
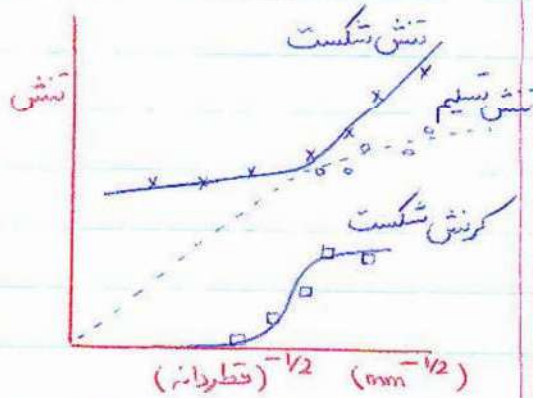
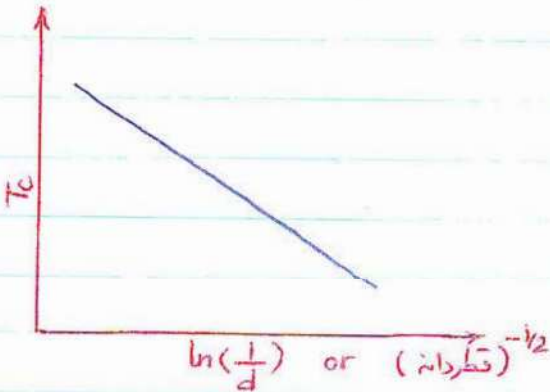
1) تعداد ریزها (موانع جلوی رشد ترک) زیاد می شود

(۴۳) ۸۹/۱۲/۲۹

2) ترک های اولیه داخل رانه ها هستند و طول ترک محدود به اندازهی رانه می شود و K در برابر KIC

بی رود. (در اینجا خوش مطرح نیست)

\* دمای تبدیل با ریز کردن رانه ها، کم می شود.



در ریزتر از  $D^*$  ابتدا به  $\sigma_y$  می ریزیم و بعد به  $\sigma_f$

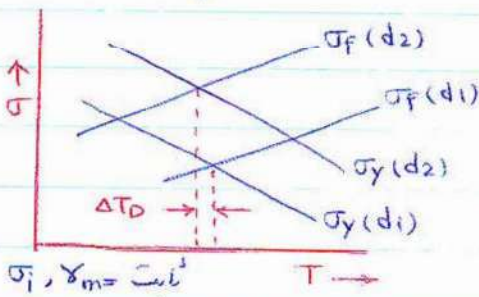
یعنی تغییر شکل پلاستیک داریم. هر چه اصطلاح  $\sigma_y$  و  $\sigma_f$  بعد از  $D^*$  (ریزتر) بیشتر باشد

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

بتر است.

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

چه کار کنیم هم چقرنگی و هم استحکام زیاد شود؟



$$d_2 < d_1$$

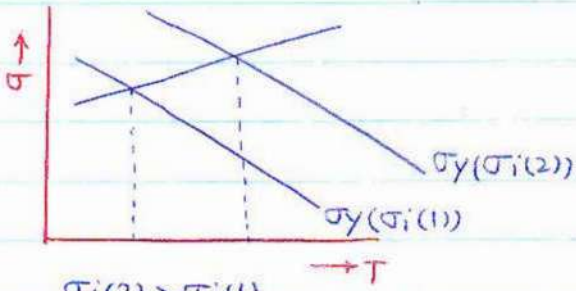
کل موجود  $\sigma_y$  و  $\sigma_f$  دمای تبدیل را نشان میدهد.

با ریز کردن رانه ها می توان این کار را کرد. هم  $\sigma_y$

زیاد شده است و هم دمای تبدیل کاهش یافته ← چقرنگی زیاد شده است.

(۴۴) ۱۹/۱۲/۲۶

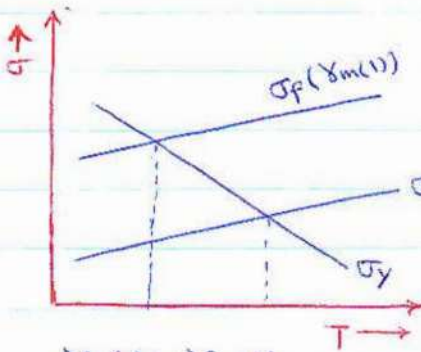
$\sigma_i$ : تنش اصطکاکی: تنش لازم برای



شروع حرکت نابجائی با درعیاب مرزانه  
غیر از مرزانه، حرعابی استحکام را زیاد کند،

$\sigma_i(2) > \sigma_i(1)$   
ثابت  $d, \gamma_m =$

$\sigma_i$  زیاد شود: زرات نامزدوم



استحکام زیاد شده است اما چقرگی کاهش یافته است.

دمای تبدیل کم شده و چقرگی زیاد

شده اما استحکام ثابت مانده است.

$\gamma_m(1) > \gamma_m(2)$   
ثابت  $d, \sigma_i =$

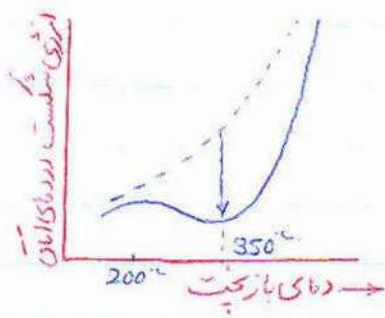
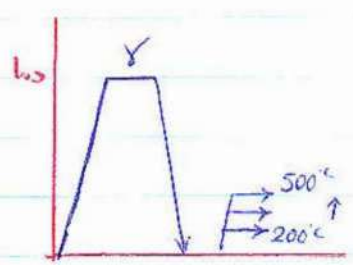
پس تنها عامل برای پاسخ به سوال قبلی، ریز کردن

دانه هاست.  $\gamma_m$ : تغییر شکل پلاستیک در داس ترک است. میتوان با

اتریش سرعت نابجائی ها و تغییر دما، میتوان  $\gamma_m$  را تغییر داد.

دما زیاد شود  $\leftarrow \gamma_m$  زیاد شود.

توزیهای متالورژیکی:



بالچار فائزیت اثری

سختی کاهش می یابد

دما زیاد بازچیت شود

۱۶، ۱۲، ۲۶ (۴۵)

هر چه دمای بازیخت زیاد شود، انرژی هم زیاد می‌شود فقط در یک دمای این مورد کاهش می‌یابد.

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

- حدایش عناصر ناخالصی در مرز دانه‌ها مثل  $Sn, P, S, N, Sb$  ← کاربرد آنها کمتر می‌شوند.

- شرایط تری با شروع رسوب‌های سختی همراه است.

- این تری ناشی از رسوب کاربرد در مرز دانه‌های اولیه است که با  $P$  و  $S$  در آن رسوب کرده‌اند.

- جهت جلوگیری باید از بازیخت کردن با ترتیب در این محدوده دمای جلوگیری کرد.

- افزودن  $Mn, Si$  دمای تری - دماهای بالاتر انتقال می‌دهد. ← از فریت بازیخت در دمای  $350^\circ$

می‌توان استفاده کرد. (۲-۱.۵) سلیم، این دما را تا  $400^\circ$  افزایش می‌دهد.

تری تمپر (TE):

این تری در فولادهای آلیاژی که به آهستگی در گستره‌ی دمای  $400-600^\circ$  سرد می‌شوند رخ می‌دهد.

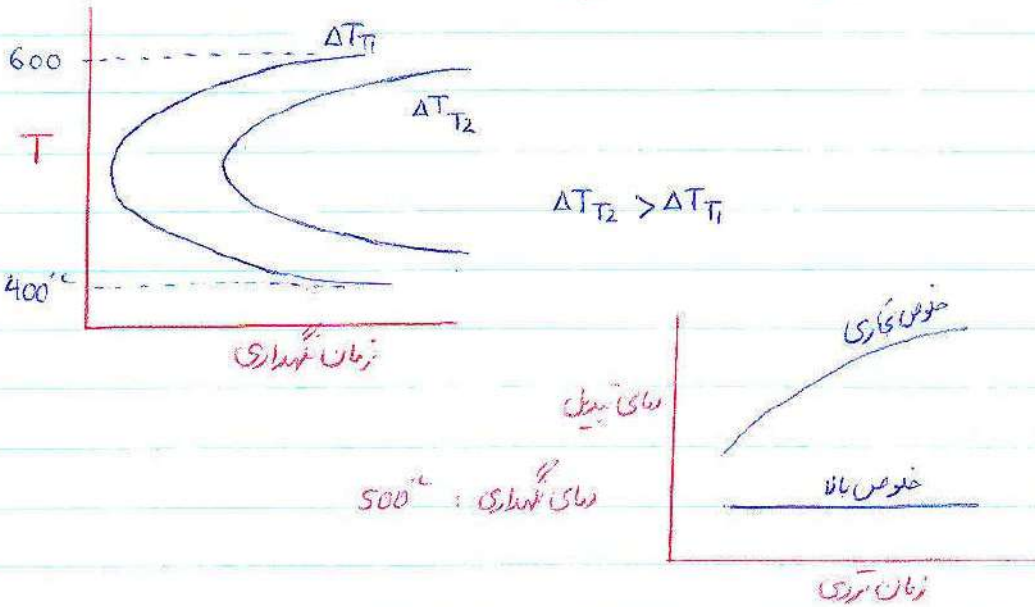
این تری همراه با افزایش دمای تبدیل تری به نرمی و سفتی مرز دانه‌ای است. (مرزهای اولیه)

این تری در فولادهای آلیاژی تجاری رخ می‌دهد. تری در اثر حدایش عناصری مثل  $Sn, P, Sb$  و ناخالصی دارد.

$As$  (به ترتیب دت) در مرز دانه‌های اولیه به هنگام نگهداری در گستره‌ی دمای تری می‌باشد.

(۴۲) ۸۶/۱۲/۲۲

تأثیر زمان نگهداری بر میزان استخال دمای تبدیل:



استخوان بدترین تأثیر را دارد. (کمترین چقرمگی را می دهد در یک حد معین نسبت به دیگر حالات ها)

ترک های ناشی از همپا:

مشخص شده که وقتی ضریب شدت تنش اولیه به مقدار زیادی کمتر از  $K_{IC}$  باشد، شکست رخ می دهد.

این نوع شکست معمولاً در اثر رشد ترک ها به ابعاد بحرانی است و در نتیجه ضریب شدت تنش اولیه به مقدار

$K_{IC}$  می رسد. رشد ترک می تواند با فرسایش های مختلفی رخ دهد. مکانیسم رشد ترک های زیر بحرانی ناشی

از واکنش متقابل بین تنش استاتیکی محیط است. از جمله SCC، تروزی هیدروژنی (HE) دترزی

خنربایع (LME).

تروزی هیدروژنی:

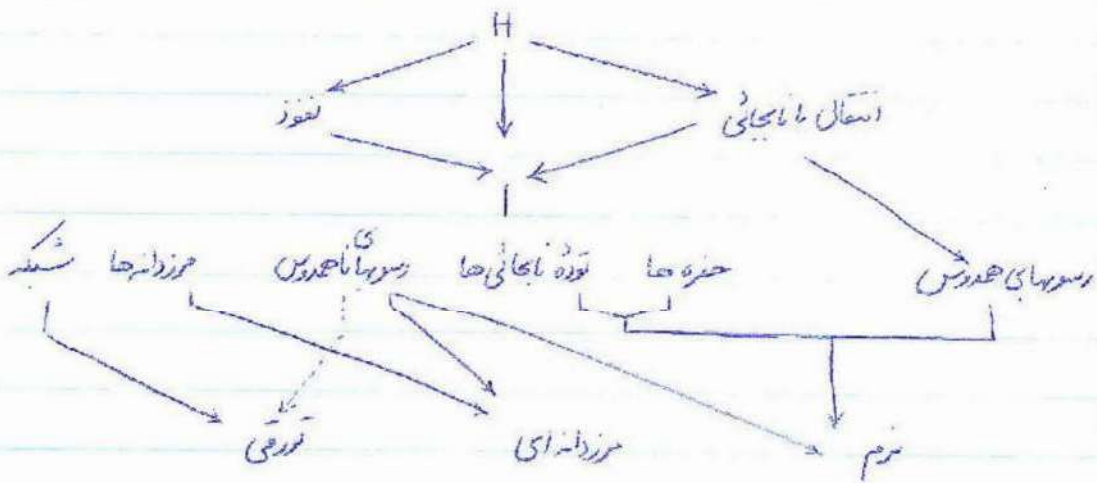
هیدروژن با مکانیسم های مختلفی باعث ترد شدن مواد می شود:

۸۴، ۱۲، ۲۴ (۴۷)

مکانسیم های فشار سطحی، فشار زیاد ناشی از تخلخل های گازی هیدروژنی باعث رشد ترک می شود.  
 در محیط های هیدروژنی کم فشار، هیدروژن کمکت سبب تنش به مناطق با تنش کششی سه بعدی نفوذ کرده و  
 برای کاهش استحکام چسبندگی با افزودن اکسید می دهد.

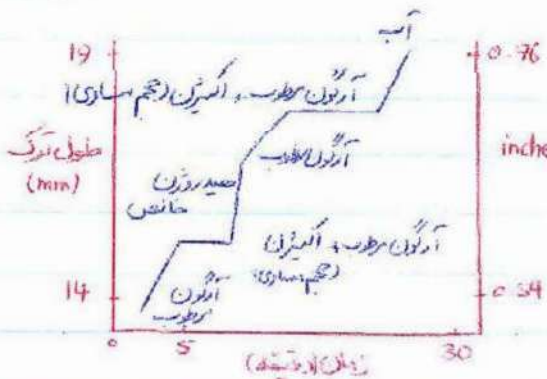
هیدروژن بخاطر خاصیت انرژی سطحی با سطوح داخلی و نیز (سطوح آزاد) واکنش می دهد.

محل های جایگاهی هیدروژن:



۸۷، ۱، ۱۸

رشد ترک نسبت به زمان در محیط های مختلف:



در محیط های  $H_2$  خالص، آب و آرگون مرطوب

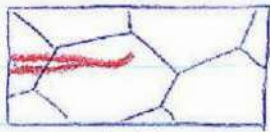
اکسایش طول ترک داریم اما در محیط حاوی  $O_2$

بدلیل اکسید شدن سطح فولاد، اکسایش طول

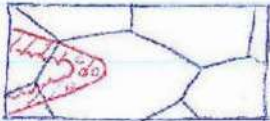
ترک نداریم. در محیط حاوی  $H_2$  سبب متغی بیشتر است.



نوع شکست در محیط هیدروژنی:

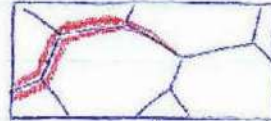


شکست (درون دانه‌ای) K متوسط



K بالا

(شکست نرم) - هم بیرون حفره‌ها



K کم

(شکست مرزدانه‌ای)

K کم ← فرصت مناسب وجود دارد برای تقویت هیدروژن در مرز دانه‌ها

تروری هیدروژنی - چند حال دستی دارد:

۱- موقعت اولیه در فرم هیدروژن (بصورت گازی یا محلول ...)

۲- واکنش‌های جایابی هیدروژن از محل تولید به محل‌هایی که با انرژی واکنش انجام می‌دهد

۳- خود مکانیزم تروری هیدروژنی

ترک خوردگی - تنشی (SCC):

یکی از مهم‌ترین الگوها: گسیختگی لایه‌های نازک می‌باشد. یعنی حل شدن آندی در رأس ترک

در رأس ترک تمرکز تنش داریم

لایه‌ها فقط در محاوره رأس ترک در اثر تغییر شکل پلاستیک منتهی شده (لایه‌ها فقط دورتر از رأس ترک

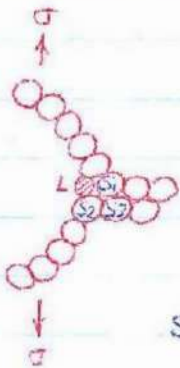
دست نخورده باقی می‌ماند) بنابراین یک سل انتریکلی ایجاد می‌شود که فشر آندی لایه‌ها فقط دست نخورده ماند

می‌باشد ← فضا اصلی تحت حل شدن آندی قرار می‌گیرد و ترک رشد می‌کند

$\sigma$  ثابت است و از  $\sigma_{ys}$  کمتر است.

تری فلز مایع، Liquid Metal Embrittlement

وقتی فلزات نرم باریک لایه نازک در درجه میکرون از یک فلز مایع پوشش داده شوند و سپس در کشش بارگذاری شوند، تنش و کرنش شکست تقریباً میزان برابری کاهش می یابد.



مکانیم: اتم فلز مایع بصورت شیمیایی جذب شده و باعث کاهش استحکام پیوندهای اتمی در محل های تمرکز تنش می شود.

مایع L استحکام پیوند اتمی بین اتم های  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  را کاهش می دهد.

را کاهش می دهد.

ارتباط بین  $K_{IC}$  و خواص مکانیکی:

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

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

$$3. K_{IC} \cong En \sqrt{2\pi d_f}$$

1 ← ارتباط بین  $K_{IC}$  و خواص کششی. مبانی فرمول: کرنش بحرانی را به COD مرتبط کردند

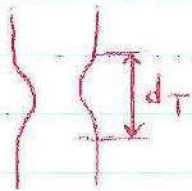
کرنش بحرانی در آزمایش کشش ( $E_f$ ) . توان کارگنجی  $n$

$\frac{1}{3}$  دلیل حالت p-strain بودن

۱۸ بار (۵۰)

2 ← برشهای ترک خوردن ذرات بزرگ و قطر  $D$  . کمترین شکست هم پیش درند

صفحه های اولیه است .  $D$  : قطر ذرات ترک خوردن  $f$  : کسر حجمی ذرات



3 ←  $d_T$  : منطقه necking  $\epsilon = n$  شروع

neck است . برای شروع : شکست در منطقه ای کوچک و

در جلوی ترک بر می خورد و تمیز کردن در این منطقه سادی باگزش پایداری را از ناپدید شدن کشش

پایه  $(\sigma = k\epsilon^n)$

حل مسائل :

$$K_{IC} = m\sigma\sqrt{\pi a} = 1.12 \cdot \frac{2}{\pi} \sqrt{\pi a f} \quad (18.1)$$

$$L-T: 29.7 = 1.12 \times \frac{2}{\pi} \sqrt{\pi a f}$$

$a_f$  با  $\sigma_f$  بدست می آید ،  $\max$  را انتخاب می کنیم .

$$\begin{aligned} D \text{ خوردن} &= 6.1 \text{ m} & t &= 25.4 \text{ mm} & P &= 17.5 \text{ MPa} & (34.1) \\ E &= 210 \text{ MPa} & \sigma_y &= 2450 \text{ MPa} & G_c &= 131 \text{ kg/m}^2 \end{aligned}$$

$$\sigma = \frac{Pr}{t} = \frac{17.5 \times 3050}{25.4} = 2411 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{EG}{\pi a}}$$

$$2411 = \sqrt{\frac{210 \times 131 \times 10^{-5}}{\pi \times a_f}}$$

$$131 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 131 \times 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

ترک را در همان فرض کرده ایم .

(51) AV/1/1A

$$K = \frac{PS}{Bw^{3/2}} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (15.1)$$

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

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

$$a = 25 \text{ mm}$$

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

تقریباً اعتبار:  $a \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_y}\right)^2$  <sup>B</sup>  
 هم در مورد B و هم در مورد a باید برقرار باشد.

Fatigue

خستگی:

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 ساختمانی را نمی کند بطور موصحنی و تدریجی در یک ماه صورت می گیرد و تن ماهه در یک یا چند نقطه تحت تنش ها و یا کرنش های تناوبی قرار گیرد. اگر مقدار چرخه ها به اندازه کافی باشد ممکن است این تغییرات ساختمانی منجر به ایجاد ترک و یا شکست کامل شود.

این تغییرات آنی نیست. و بطور ماکرو سکوپ 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 ترد است. از نظر ماکرو سکوپ سطح شکست عمود بر جهت تنش کششی اصلی است.

\* سه ایط لازم برای شکست خستگی :

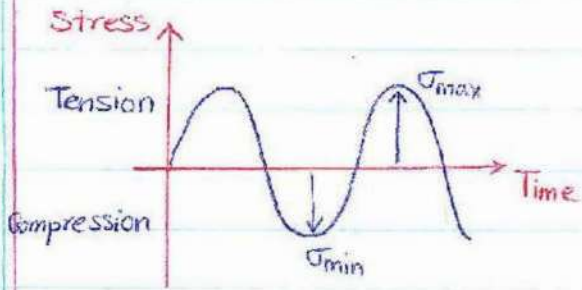
تنش کششی  $\sigma_{max}$  ، حد اکثر باشد - دامنه تغییرات تنش زیاد باشد - تعداد سیکل ها زیاد

باشد (یا تعداد چرخه ها)

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

(5P) AV, 1/2

بارگذاری های تناوبی یا تکراری :



برای جا :  $\sigma_m = 0$   
Alternative stress

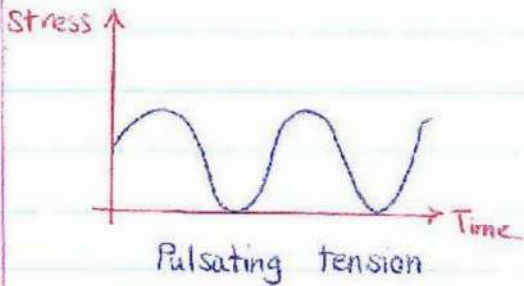
گستره تنش  $\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

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

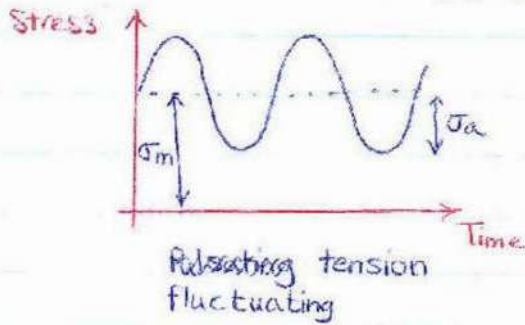
تنش متوسط  $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

شورهای در حال دوران بیشتر این نوع بارگذاری را تجربه می کنند یعنی  $\sigma_m = 0$

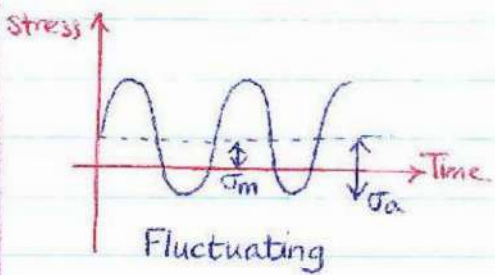
نوع دیگر بارگذاری :



Pulsating tension

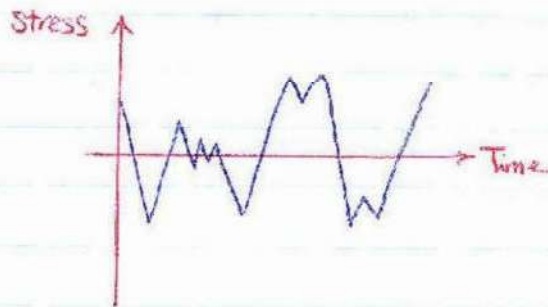


Pulsating tension fluctuating



Fluctuating

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



\* مارش های می توان این بارگذاری را

منظم کرد

بارگذاری بی نظم : نا هموار یا (سرعت هواپیما،  
سرعت باد، جهت وزش باد و ...)

۲۰/۱۷/۸۷ (۵۴)

منحنی های خستگی :

S-N ←

Stress Control

کنترل تنش

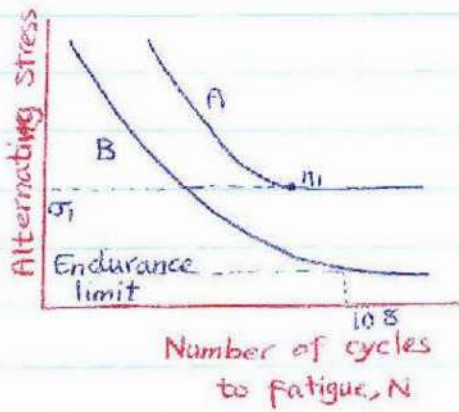
تعداد دور تا شکست : N

E-N ←

Strain Control

کنترل کرنش

منحنی S-N :



n : ماده دارای حد خستگی است و

در تنش های کمتر از آن، خستگی

رخ نمی دهد.

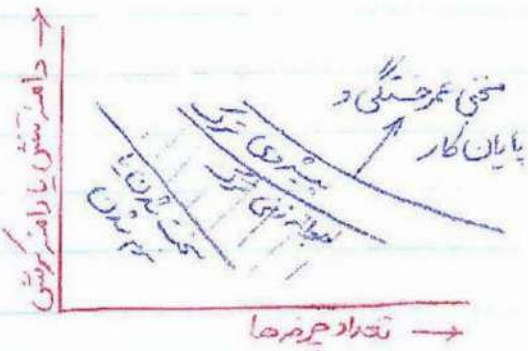
پایان آزمایش در حدودی n است. این منحنی بیشتر در مورد مواد آهنی بدست می آید.

B : منحنی بصورت افقی می شود و در هر تنشی خستگی داریم. پایان آزمایش برابر  $10^8$  سیکل در نظر

می گیریم. در اینجا دیگر حد خستگی نداریم و از استحکام خستگی استفاده نمی 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 دیگر و سکویک نیاز است تغییر شکل

پلاستیک داشته باشیم.

۸۷/۱/۲۰ (۵۳)

فرایند حستگی شامل ۳ مرحله است:

۱- نرمی حستگی / سختی حستگی:

نرم یا سخت شدن در اثر حستگی - حالت اولیه ماده در زمان تنش و کرنش سیکی دارد.

این مرحله با تغییرات در ریزساختار کل حجم بارگذاری شده مشخص می شود.

۲- مرحله جوانه زنی ترک:

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

۳- پیروی ترک:

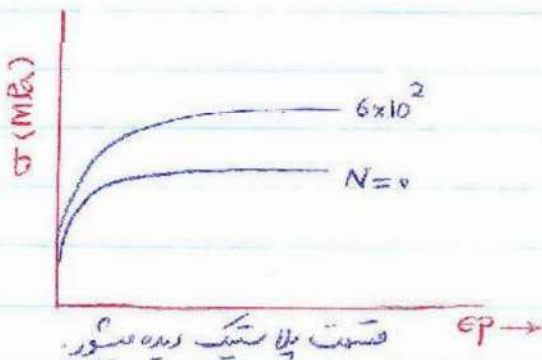
در این مرحله عامل کنترل کننده ی رشد ترک، تمرکز تغییر شکل پلاستیک چرخشی در منطقه موسسان

است.

\* در مرحله سخت یا نرم شدن تغییرات ریزساختاری بوجود می آید که بر طبقه فواصل از جمله فواصل تکاملی

منهای جایجا

تأثیری ندارد.



با انجام تنش سیکی و خوردار تنش - کرنش

بالا رفته ← سخت شده است.

مخونه در این حالت برنج است.

\* در اول الاستیک تغییر نمی کنند و در نواحی سیکی دارد.

تعداد سیکی زیاد ← بهتر سخت می شود اول بارگذاری سیکی وبعد تنش کششی



۲۰ فروردین ۸۷ (۵۲)

تعیین نرم یا سخت شدن:

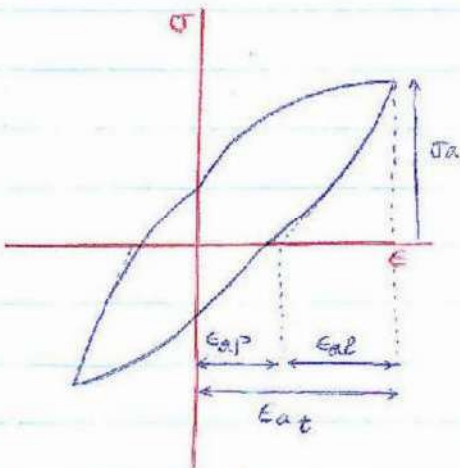
۱. برای مشخص شدن سخت یا نرم شدن در هنگام خستگی بهترین روش اندازه گیری حلقه پسماند است
۲. استفاده از سختی تست کرنش چرخه ای

مواد فولاد کم کربن (با تست تسلیم ناپیوسته) در مراحل اولیه خستگی هم نرم میشوند و هم سخت.

موادیکه قبلاً از خستگی کار سرد شده اند (کارکنی اتفاق افتاده) در مراحل اولیه خستگی نرم میشوند

موادیکه قبلاً از خستگی نرم شده باشند (مثلاً آئین، تابکاری) در مراحل اولیه خستگی سخت میشوند

حلقه پسماند : Hysteresis Loop



رشته به نفع 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

باز یاری شود.

(آزمایش کنترل کرنش است)

$\epsilon_{ap}$  دامنه کرنش پلاستیک

بار رسم حلقه های بعدی می توان فهمید ماده نرم شده یا سخت. اگر در سیکل بعدی برای رسیدن به

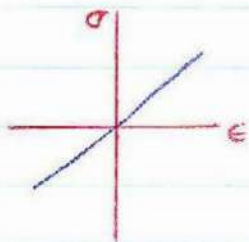
$\epsilon_{at}$  و  $\sigma_a$  بیشتری نیاز بود، ماده سخت شده است. این افزایش در سخت شدن ماده

نمی رود و به حالت استیلاج می رسد.

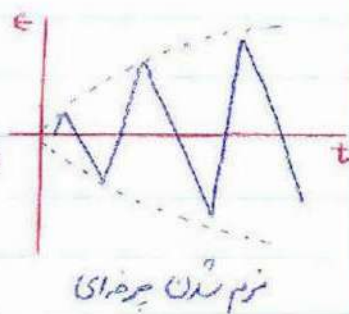
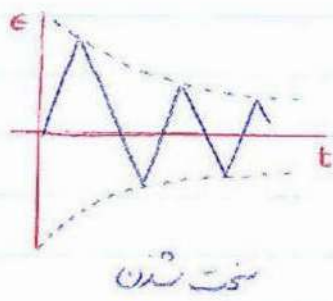
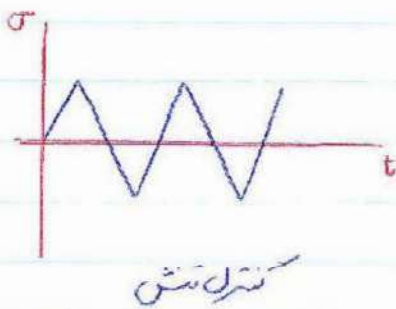
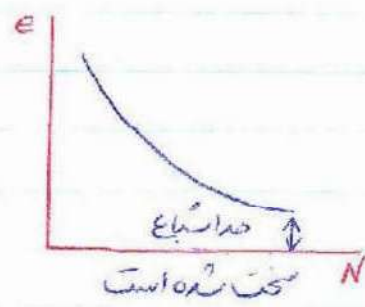
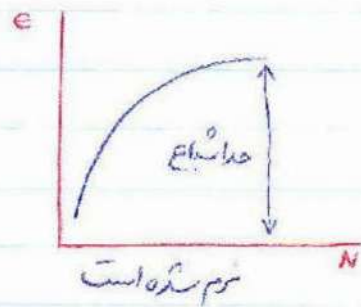
اگر برای رسیدن به  $\epsilon_{at}$  در سیکل های بعدی،  $\sigma_a$  کمتری نیاز بود، ماده نرم شده است.

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

موادی که رفتار کئسسان دارند، کرنشی پسماند وجود ندارد:

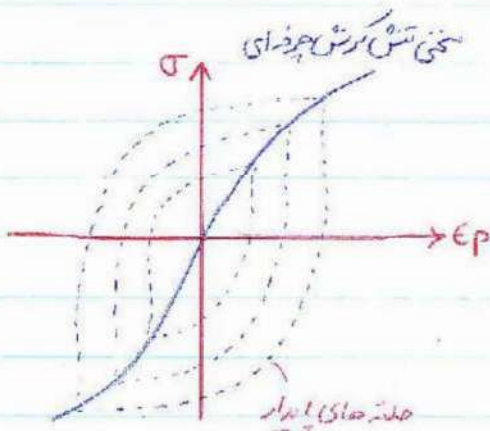


در حالت کنترل تنش، کرنش =  $\sigma$  (stress control)



همین ۳ نمودار در حالت strain control داریم.

۲- کرنش کرنش پرمضای:



این کرنشی از سبیل کردن رأس حلقه های

پسماند در حالت استیج یا حلقه های پرمضای

بر دست می آید.

کرنشی استیج مربوط به یک  $\sigma_a$  است