

به نام خالق هستی بخش

جزوه خواص مکانیکی ۱

مدرس: دکتر جوادپور

تهیه کننده: روح الله خسروشاهی

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

خواص مکانیکی

(۱) تنش و کرنش : منحنی ها ۴-۶ مهندسی و حقیقی

(۲) رفتار الاستیک و پلاستیک نمونه (تغییر فرم ها برگشت پذیر و برگشت ناپذیر)

(۳) جدول یانگ ، تنش تسلیم ، UTS ، استحکام سکست نمونه و چقرمگی ، ductility (درجه تغییر ابعاد نمونه در هنگام کشش) ^{toughness}

(۴) استحکام تئوری ماده و مقایسه با استحکام در عمل

(۵) نقش عیوب مخصوصاً عیوب خطی (ناپذیری ها) در تعیین خواص مکانیکی مواد (خطی)

(۶) مقاومت شکست در برابر حرکت ناپذیری ها + تنش پیرزاد

(۷) جهات و صفحات لغزش ناپذیری ها در سیستم ها مختلف : تجزیه ی ناپذیری ها ، انرژی ناپذیری ها ، برهم کنش ناپذیری ها ، شکست دانه بندی ناپذیری ها ، نیروی بین ناپذیری ها و ...

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

(۸) مکانیزم ها افزایش استحکام فلزات

(۹) مکانیزم ها تغییر فرم و تغییر از لغزش ناپذیری ها (دو طولی شدن - Twinning)

(۱۰) ارتباط بین ریز ساختار و خواص مکانیکی (اندازه دانه ، تخلخل ، حضور فاز ها ثانویه و ...)

(۱۱) خواص مکانیکی مواد سرد قبل سولیدیت (تئوری گرفتگی ، نقش حضور ترک در تعیین خواص مکانیکی و ...)

(۱۲) مکانیزم ها افزایش چقرمگی شکست با حذف جگه گیری از ترک

(hardness) سختی مواد (۱۳)

(Creep) خزش (۱۴)

(Fatigue) خستگی (۱۵)

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

(I) mechanical Metallurgy Properties G. E. Dieter (۱۳) فصل اول منابع:

(II) Introduction To ceramics Kingery

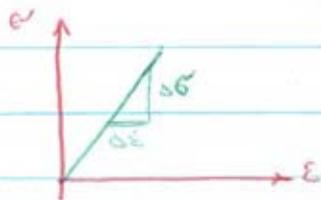
(III) Mechanical properties M. Eisen Tadt

(IV) Fundamental of Ceramic

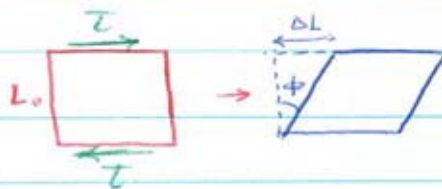
فصل ۱ مربوط به خواص مکانیکی مواد
الکتریک و حرارتی

خواص مکانیکی

در نمودار تنش و کرنش، در ناحیه ی خطی، تغییر فرم به صورت برگشت پذیر رخ می دهد. شیب نمودار در این ناحیه را، مدول یانگ می نامند. مقدار E به نوع پیوند بین اتم ها بستگی دارد.



این ناحیه ی خطی را، ناحیه الاستیک گویند.
کرنش در ناحیه ی الاستیک معادل افزایش فاصله ی اتم ها است.



$$\gamma = \tan \phi = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\tau = G \cdot \gamma$$

مدول shear و مدول برشی

جهت عمود بر انحنا را

$$\nu = - \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

جهت انحنا را

مغزی به دلیل اینکه الزاماتی که اجزای دیگر بر آن دارند

دارد

دفتر فرهنگی دانشگاه مواد و متالورژی

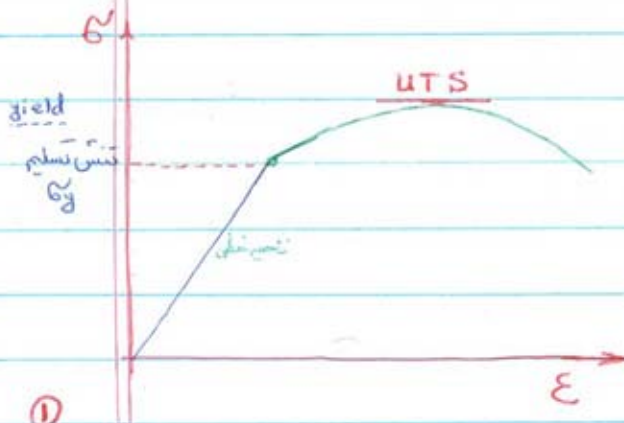
$$E = 2G(1 + \nu)$$

رابطه ی کلی

مثال: نمونه ای مسی شکل، با طول اولیه ی 25 cm و قطر اولیه ی 15 mm تحت بار کشی 49 kN قرار می گیرد.

$$E = 205 \text{ GPa}, \nu = 0.25$$

الف) طول و قطر - حتماً انحنا را

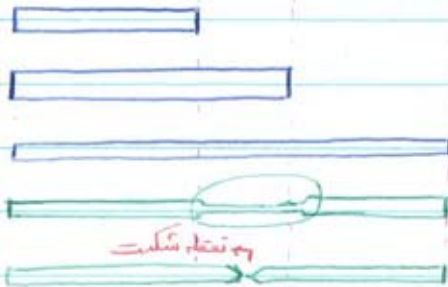
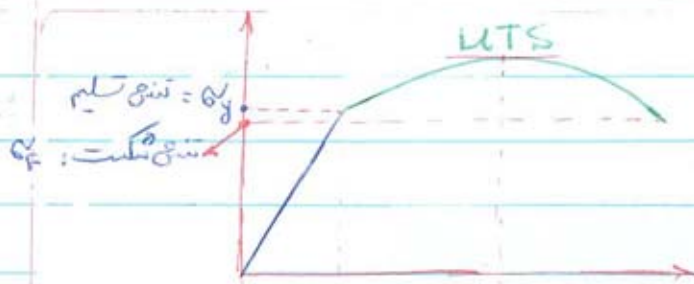


E - مقاومت نمونه در برابر افزایش طول مانند پیوند بین اتم ها

تنش تسلیم: نقطه ی بعد از این مقدار E ، تغییر فرم غیر برگشت پذیر را به

و تغییر فرم دائم رخ داده است. یعنی تغییر فرم پلاستیک

ultimate tensile stress: نقطه ی max بار اعمالی



- بین UTS و σ_y تغییر نرم پلاستیک و یکپارختی است. یعنی در تمام طول نمونه قطر یکسان است.
- بعد از UTS، تغییر نرم از نوع پلاستیک و همگرا می‌شود. گلوئی شدن یا "necking" رخ می‌دهد.

- در مواد سرد شکننده فقط ناحیه الاستیک دارد و $\sigma_F = \sigma_y$ است.

- وقتی جفت استخوان نمونه مطرح می‌شود، منظور تانگنسی UTS در نظر است و بعد از آن دیگر نمونه قابلیت برش ندارد.

دفتر فرهنگی دانشگاه خوارزمی دانشکده مواد و متالورژی

- چقرمگی یا "toughness" نمونه، مقدار سطح زیر منحنی $\sigma - \epsilon$ یا در واقع سطح انرژی لازم برای کشیدن نقطه‌ای

شکست است $\leftarrow$
$$toughness = \int_{\epsilon_0}^{\epsilon_F} \sigma d\epsilon = \int_{L_0}^{L_F} \frac{dL}{L}$$

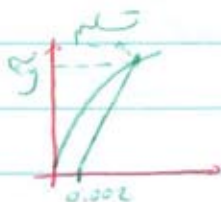
ductility: مقدار تغییر نرم در نقطه‌ای شکست. در واقع کرنش در نقطه‌ای شکست.

$$ductility = \frac{L_F - L_0}{L_0} \times 100 \quad \text{یا} \quad \frac{A_0 - A_F}{A_0} \times 100$$

تغییر در سطح مقطع کاهش در سطح مقطع

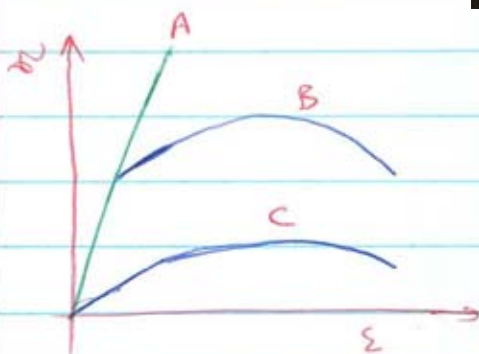
خواص مکانیکی

گواهی اطمینان، فقط برای تسلیم دقیقاً مشخص نیست. در این حالت، برای 0.2٪ کشش و 0.002٪ کشش (کشش) و از آن خط به موازات محور رسم می‌کنند تا نمودار را قطع کنند. بنابراین شروع و به نقطه تسلیم.



واحد چگالی، برای است: $\frac{N}{m^2} \cdot \frac{m}{m} = \frac{J}{m^3}$ یعنی انرژی در واحد سطح.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی



مقایسه‌ی نمونه‌ها A، B و C.

$UTS = \sigma_{max}$

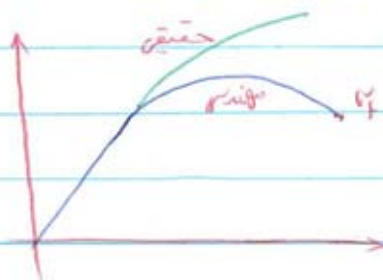
A: استحکام بالا
مواد ترد { Low ductility
Low toughness

بلبری { low strength
high ductility
Low toughness

مکتری { high strength
high ductility
high toughness

انواع تنش و کرنش:

الف) تنش و کرنش لحظه‌ای: نمودار آن بر حسب سطح مقطع اولیه رسم می‌گردد. A_0
ب) تنش و کرنش حقیقی: تغییرات در سطح مقطع در نظر گرفته می‌شود. سطح مقطع لحظه‌ای A_i instantaneous



$$\sigma = \frac{F}{A}$$

در حقیقت A در حال کم شدن، پس کم در حال زیاد شدن است.

ارتباط بین تنش و کرنش حقیقی و مهندسی:

$$\sigma_e = \frac{P}{A_0}, \quad \epsilon_e = \frac{l_{f,i} - l_0}{l_0}$$

در تغییر حجم ثابت: $A_0 l_0 = A_i l_i$

$$\sigma_T = \frac{P}{A_i}, \quad \epsilon_T = \int_{l_0}^{l_i} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0}$$

$$\Rightarrow \epsilon_T = \ln \frac{A_0}{A_i}$$

$$\underline{\sigma_T} = \frac{P}{A_0} \left(\frac{l_i}{l_0} \right) = \sigma_e \left(\frac{l_i}{l_0} \right) = \underline{\sigma_e (1 + \epsilon_e)}$$

$$\epsilon_e = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{l_i}{l_0} - 1 \Rightarrow \frac{l_i}{l_0} = 1 + \epsilon_e \quad \therefore \underline{\epsilon_T} = \ln \frac{l_i}{l_0} = \ln (1 + \epsilon_e)$$

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

کاهش در سطح مقطع: $r = \frac{A_0 - A_f}{A_0} = 1 - \frac{A_f}{A_0} \Rightarrow r = 1 - \frac{A_f}{A_0} \Rightarrow \frac{A_f}{A_0} = 1 - r \Rightarrow \frac{A_0}{A_f} = \frac{1}{1-r}$

$$\epsilon_T = \ln \frac{A_0}{A_f} \Rightarrow \epsilon_T = \ln \left(\frac{1}{1-r} \right)$$

مثال: نمونه ای با طول اولیه 2.5 cm و قطر اولیه 0.25 cm تحت تنش کششی قرار می گیرد و با 4500 N

بر آن اعمال می گردد. اگر قطر تحت نمونه 0.22 cm باشد، آن طول نهایی نمونه ϵ_T (ب) ϵ_e (ج)

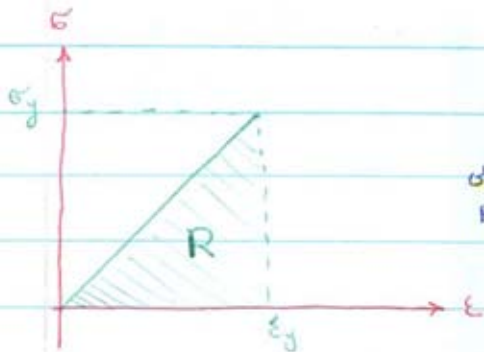
* معمولاً ϵ_T از ϵ_e بیشتر است.

خواص مکانیکی

مثال: نمونه ای با قطر اولیه $(0.505" = 12.7mm)$ تحت تنش کششی $\sigma_f = 67000 psi$ به شکست آمد.
قطر نمونه در هنگام شکست $0.422 in$ به شکست رسید. (الف) ductility نمونه بر حسب کاهش در سطح مقطع و (ب) σ_f در هنگام شکست

دفتر فرهنگی دانشگاه مواد و متالورژی

انرژی ذخیره شده در ناحیه الاستیک منحنی $(\sigma - \epsilon)$.



$$\text{ضرب قنیت یا ذخیره انرژی} = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y \quad ; \quad \sigma = E \epsilon \Rightarrow \epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Resilience

$$\Rightarrow \text{Resilience} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_y^2}{E}$$

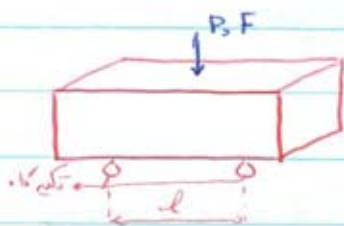
دلیل این ذخیره شدن انرژی هم، تغییر در پیوندها است که کم است و قابل بازگشت.

بررسی استحکام خمشی Bending strength - Flexural strength

معمولاً در موارد ترد و سرامیک ها سرور استفاده قرار می گیرد. دلیل آن هم این است که استحکام مکانیکی در سوار ترد بسیار حاصل می شود؛ حضور عیوب سطحی، مخصوصاً ترکهای سطحی برای ایجاد شکست مکانیکی، تهدید می شوند؛ به طبع استحکام در صورت بگیرد. برای تست کششی، شکل نمونه ها پیچیده است و برای ساخت این اشکال از سوار ترد، احتمال وجود آهک ترک در نمونه زیاد است. به همین دلیل، از اشکال ساده تر برای ایجاد شکست خمشی استفاده می گردد.

انواع تست خمشی

الف) تست خمشی سه نقطه ای - تست مخرب



تعداد را با واحدی: (N)

modulus of rupture: $MOR = \frac{3PL}{2bd^2}$ (MPa)

تعدادی بین دو تکیه گاه (mm) $\rightarrow$ L

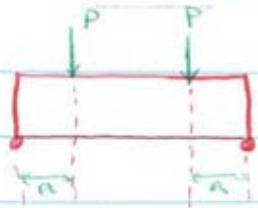
ضخامت نمونه (mm) $\rightarrow$ d

عرض نمونه (mm) $\rightarrow$ b

مدرول گسیختگی نمونه

(5)

ب) تست خمی چار نقطہ ای



$$MOR = \frac{3Pa}{bd^2}$$

ضخامت

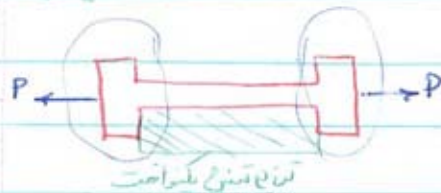
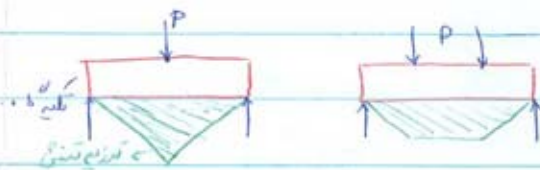
درخت خمی

مثال: نمونه ای با پهنای 6 mm و ضخامت 3 mm و فاصله بین درختها 50 mm موجود است. درختت سه نقطه ای مقدار P به هنگام شکست 670 N و درختت کششی برابر لازم برای شکست $P = 10 \text{ kN}$ می باشد. MOR و استحکام کششی را بیابید.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

علت تفاوت اعداد استحکام در تست ها مختلف: (کشش و خمی)

معمولاً خمی $<$ کشش



خواص مکانیکی حساس می باشد به حضور عیوب

نکته: توزیع تنش در نمونه مهم می باشد برای detect کردن

عیوب. توزیع تنش یکساخت بهترین حالت می باشد.

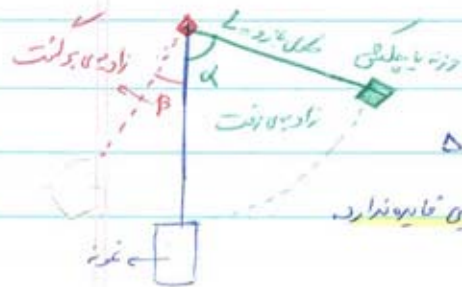
و یکساخت ترین توزیع تنش در تست کششی است. در درخت سه نقطه ای دو درخت از دو طرف درخت

نزدیک ترین اعداد به اعداد واقعی است. درخت سه نقطه ای به دلیل شکل کم بودن تنش در طرفین

عیوب در آن مکان ها به خوبی شناخته نمی شود.

تست ضربه: Impact test

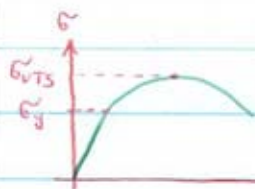
در این تست، به صورت ناگهانی - غده اعمال می گردد



$$\Delta E = mgl(c \sin \alpha - c \sin \beta)$$

یا افزایش B به مقاومت به ضربه کمتر خواهد بود. این تست حساس است و به تنهایی کاربرد ندارد.

در این تست، نمونه باید بگردد و در واقع تست مخرب است. اگر نشکند، باید از روی تغییر نرمی به یا دما را بین برد. نمونه حالت سردی از خود نشان دهد.



نرمی σ_y ، σ_{UTS}

نرمی σ_y و σ_{UTS} تغییر نرمی که خواص پلاستیک است.

با افزایش کرنش، σ لازم برای ادامه تغییر نرمی هم افزایش می‌یابد.

اینکه در این شرایط تفاوت نمونه در برابر کرنش بیشتر می‌شود، به این خاصیت کار سختی می‌گویند. **Strain hardening**

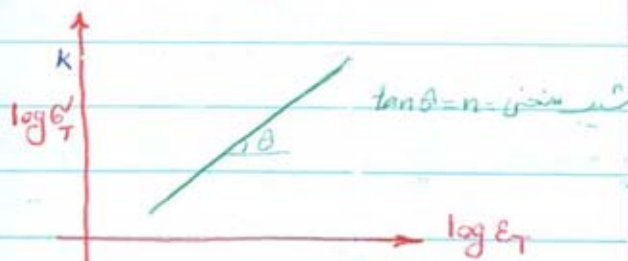
که مربوط به رقت و عیوب خطی و ناپایداریها

یکی از روابط برای این مقدار (۴-۵) در ناحیهی مذکور، توسط آقای Holloman بیان شده است.

$$\sigma_T = K \epsilon_T^n \quad \text{Strain hardening coefficient: ضریب یا توان کار سختی است}$$

که ضریب استحکام

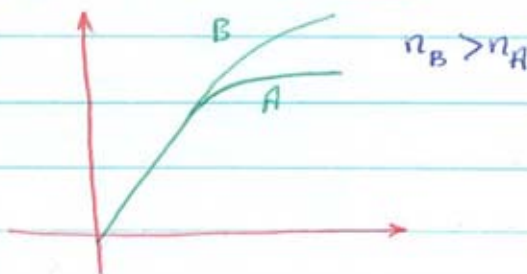
$$\Rightarrow \log \sigma_T = \log K + n \log \epsilon_T$$



K : تنش لازم برای رسیدن به یک مقدار کرنش (۴)

$$\epsilon = 1$$

$$\text{if: } \log \epsilon = 0 \Rightarrow \log \sigma_T = \log K \Rightarrow \sigma_T = K$$



۱) σ_{UTS} و ϵ_T تغییر فرم پلاستیک است که در آن کاهش در سطح مقطع به صورت یکپارچگی (پایدار) صورت می گیرد. در واقع نیروی لازم برای شکست نمونه کاهش می یابد.

۲) کار سختی در نمونه به تائید زمانی می تواند کاهش در سطح مقطع را جبران کند. (ماتقسطی UTS)
تحت این شرایط تغییر فرم از نوع یکپارچگی یا پایدار است.
بعد از نقطه UTS، کار سختی دیگر نمی تواند کاهش در سطح مقطع را جبران کند (که پدید می آید)
طوری که نمونه به تغییر فرم غیر یکپارچگی و ناپایدار می رود.

در نقطه ی حاکم حجم نمونه (UTS):

$$(I) dF = 0 \Rightarrow d(\sigma A) = 0 \Rightarrow \sigma dA + A d\sigma = 0$$

$$F = \sigma \cdot A$$

$$\Rightarrow \sigma dA = -A d\sigma \Rightarrow \frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{dA}{A}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma}{\sigma} &= -\frac{dA}{A} \\ \frac{d\sigma}{\sigma} &= \frac{dL}{L} = d\epsilon \end{aligned} \right\}$$

(II) $V = AL$, $dV = 0 \Rightarrow \frac{dL}{L} = -\frac{dA}{A} = d\epsilon$

کار سختی در نقطه ی UTS

$$\Rightarrow \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma_T$$

در نقطه ی UTS، بالاترین نقطه ای است که می تواند تنش اعمالی را تحمل کند.

$$\sigma_T = K \epsilon^n \Rightarrow K \epsilon^n = K n \epsilon^{n-1} \Rightarrow n = \epsilon_T$$

مقدار کرنش حقیقی $\rightarrow$ به ضریب کار سختی

تغییر فرم یکپارچگی یا پایدار $\Rightarrow \frac{d\sigma}{d\epsilon} > \sigma_T$ زیر نقطه ی UTS

ناپایدار یا غیر یکپارچگی یا طوری شدن $\Rightarrow \frac{d\sigma}{d\epsilon} < \sigma_T$ روی نقطه ی UTS

روی نقطه ی UTS $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma_T$

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

مثال: رابطه انرژی الکترونی ذخیره شده در نمونه ای که رفتار "Holleman" از خود نشان می‌دهد، بدین صورت بدست می‌آید:

$$Energy = \int_0^{\epsilon_k} G d\epsilon, \quad G = K\epsilon^n \Rightarrow E = \int_0^{\epsilon_k} K\epsilon^n d\epsilon = \left. \frac{K\epsilon^{n+1}}{n+1} \right|_0^{\epsilon_k}$$

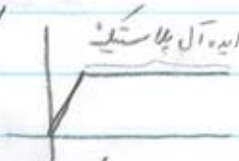
$$= \frac{K}{n+1} \epsilon_k^{n+1} = \frac{K\epsilon_k^n \cdot \epsilon_k}{n+1} = \frac{G_k \epsilon_k}{n+1} \Rightarrow E = \frac{G_k \cdot \epsilon_k}{n+1}$$

همیشه $n < 1$.

برای: $n=1 \Rightarrow E = \frac{1}{2} G_k \cdot \epsilon_k \Rightarrow$ رفتار ایده آل الاستیک

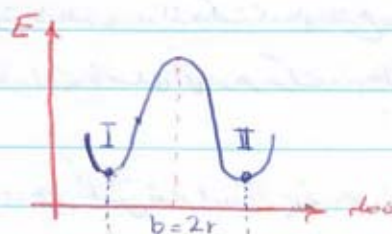
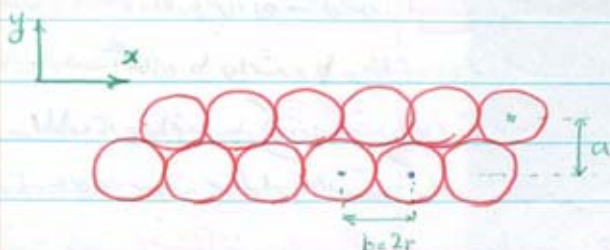
$n=0 \Rightarrow$ رفتار ایده آل پلاستیک $\Rightarrow$ کار رفتی صفر است

یعنی به نقطه ϵ_k پلاستیک که رسیدیم، دیگر مقاومتی در برابر افزایش طول نیست.



استحکام تئوری

ممکنست بین دو لایه به طور کامل برای تغییر نرم پلاستیک اتفاق بیفتد. با این فرض استحکام نمونه چقدر است؟



نسبت بزرگ

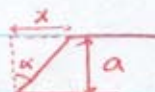
$x=0 \Rightarrow \frac{1}{2}b : T=0$

$x = \frac{1}{4}b \text{ or } \frac{3}{4}b : T = T_{max}$

تغییر دلتا



$$T = T_{max} \sin\left(\frac{2\pi x}{b}\right)$$



$T = G \cdot \delta \Rightarrow \delta = \frac{x}{a}$

$G \cdot \frac{x}{a} = T_{max} \cdot \frac{2\pi x}{b}$

$\Rightarrow T_{max} = \frac{G \cdot b}{2\pi a}$ $\Rightarrow T_{max} = \frac{G}{2\pi}$

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی



مثال: تنش لازم برای لغزش لایه γ افتح τ_{mpa} می باشد. اگر $E = 10^7 \text{ psi}$ و $\nu = 0.33$ باشد، نسبت استحکام
تنش و در عمل چقدر است؟
 $G = \frac{E}{2(1+\nu)} \Rightarrow G = 26 \text{ GPa}$, $\tau_{max} = \frac{26}{2} = 13 \text{ GPa}$

$$\Rightarrow \frac{4 \text{ GPa}}{\tau_{mpa}} = 600$$

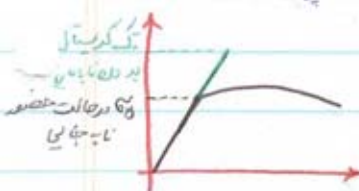
دفتر فرهنگی دانشگاه مواد و متالورژی

استحکام تنشی بسیار بالاتر از استحکام عملی است.
در پاسخ گفته اند، این ناشی از تاثیر یویب در تعیین خواص مکانیکی است
فقط ای، خصوصاً در جهت لغزش
خطی و ناچجایی ها: تاثیر در رفتار مکانیکی مواد فلزی

عیوب خطی: ناچجایی (dislocation)

با ورود یک ناچجایی به آتم به لایه های صفحات دیگر، یک عیب خطی شکل می گیرد. در اطراف نیم صفحه تنش فشرده و در پایین آن تنش کششی رخ
می دهد. ناچجایی با نیروی منفرجه ناچجایی حرکت می کند. این مدل ناچجایی، لبه ای باشد. با رسیدن ناچجایی به انتهای قطعه، قطعه
اندازه ی ناچجایی، با لایه های آن جدا می شود.  مقدار ناچجایی قسمت بالا نیم صفحه نسبت به پایین را بر دار بزرگتر (b) گویند. جهت حرکت
ناچجایی لبه ای طایقی باشد و چاه خط ناچجایی عمود است. تغییر نرم پلاستیک مواد فلزی، در اثر حرکت ناچجایی ها رخ می دهد.
در اطراف ناچجایی آتم ها دچار کرنش می باشند. یعنی تحت تنش هستند. ناچجایی ها به اندازه فاصله ی آتمی در حرکت، به جلو می روند.
در ناچجایی ها به صورت مرحله ای حرکت می کنند.

عقد تعداد استحکام تنش و استحکام در عمل، به نوعی می شود. نحوه ی حرکت ناچجایی، نخستین تعداد نیروی از پیوند به صورت مرحله ای
اینکه لازم نیست همه ی پیوندها همزمان بکنند
در صورت عدم حضور ناچجایی یا عدم حرکت آن، مانع رفت و آمد مولکول ها نیست.



دانشجوی ناچجایی: شکل ناچجایی در واحد حجم را گویند یا، تعداد ناچجایی ها در واحد سطح.

ناچجایی پیچشی: خط ناچجایی طایقی بر دار بزرگ است و جهت حرکت ناچجایی عمود بر بر دار بزرگ.

حضور ناچجایی و حرکت آنها باعث افزایش انرژی سیستم می شود. که دلیل آن هم به هم خوردن فاصله ی آتمی ها اطراف ناچجایی و در نتیجه افزایش
انرژی آزاد سیستم می شود. رفتار ناچجایی ها هنگام حرکت در جهت کاهش انرژی می باشد. حرکت ناچجایی در صفحات و جهات
برقرار که رخ می دهد (جهت در لغز). انرژی ناچجایی متناسب با مربع اندازه ی بر دار بزرگ است. $E \propto b^2$

خواص مکانیکی

F.C.C : در سائل $\{111\}$ صفحات برترانیم

$$\Rightarrow 4 \times 3 = 12 \text{ slip system}$$

$\{110\}$ جهات برترانیم

سیستم لغزش: یک صفحه لغزش + یک جهت لغزش را سیستم لغزش گویند.

با افزایش تعداد سیستم های لغزش، تغییر فرم پلاستیک راحت تر رخ می دهد.

HCP : در سائل $\{0001\}$ صفحات برترانیم

$$\Rightarrow 3 \times 1 = 3 \text{ slip system}$$

$\{11\bar{2}0\}$ جهات برترانیم

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

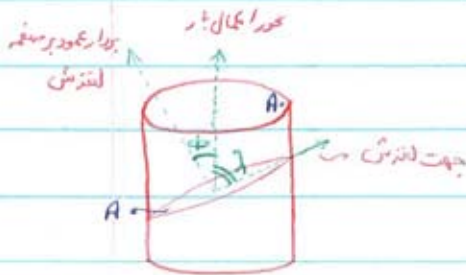
B.C.C : در سائل $\{110\}$ صفحات برترانیم

$\{111\}$ و $\{11\bar{2}0\}$ جهات برترانیم

$$6 \times 2 = 12 \quad 12 \times 1 = 12$$

فعال شدن سیستم های لغزش در B.C.C رابطه -
دما می باشد.

لغزش در B.C.C راحت تر است.



$$F_r = F \cos \lambda, \quad A = \frac{A_0}{C_0 \phi}, \quad \tau_r = \frac{F_r}{A}$$

$$\Rightarrow \tau_r = \frac{F \cos \lambda}{\frac{A_0}{C_0 \phi}} = \cos \lambda \cdot C_0 \phi$$

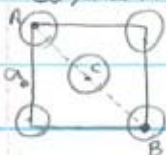
حرکت ناچگانی همراه با افزایش انرژی است. به همین دلیل سیستم در مقابل آن مقاومت می کند.

ولای حرکت ناچگانی $\tau_r \geq \tau_{crss}$ (critical resolved shear stress)

$$\tau_{crss} = \sigma_y \cdot C_0 \lambda \cdot C_0 \phi$$

شروع حرکت ناچگانی همان گذشتن از نقطه ای تنشی تسلیم است.

ساختار B.C.C : $\{111\}$ و $\{110\}$ صفحات برترانیم

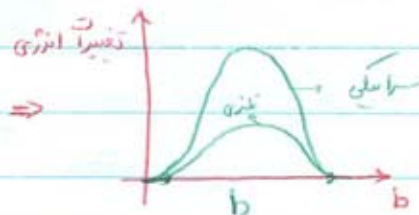
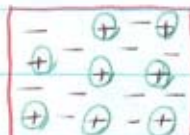


$$|AB| = \sqrt{2} a \Rightarrow AC = \frac{AB}{2} = \frac{\sqrt{2}}{2} a \Rightarrow |BC| = \frac{\sqrt{2}}{2} a$$

مثال: محاسبه بردار برگر من را بنویسید

۱۱

۱۰. چرا حرکت ناچ جایی در سیستم فیزیکی نسبت به سیستم ها سرانگیزی راحت تر صورت می گیرد؟
 این موضوع به نوع پیوندهای برقی مربوط است. در مواد سرانگیزی پیوندهای یونی یا کووالانسی است که جهت دارند و در این حالت حرکت ناچ جایی انرژی بالایی نیاز دارد چون پیوندها باید شکسته شوند و دوباره جهت بگیرند و بی در مواد فلزی مجموعه ای از یونهای مثبت و منفی داریم که این کار را راحت می کنند.



دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

ادامه در صفحه بعد

فشار اصلی ناب جانایی در تأثیر بر تغییر فرم ماده است.

تغیر پیر - نابار (Peierls - Nabarro)

مقاومت ناب جانایی $\rightarrow$
 $\tau_{PN} \propto \exp\left(-\frac{w}{b}\right)$
 $\rightarrow$ بردار برد

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

مقاومت ناب جانایی یا توانایی گسترش ناب جانایی در یک ماده یا سهولت گسترش در یک ماده (تغییر ناچیز انرژی بر اثر حرکت ناب جانایی)
 = چگالی ناب جانایی در پیوند فلزی نسبت به پیوندهای یونی و کووالانسی بیشتر می باشد.

τ_{PN} با افزایش w یا کاهش b افزایش می یابد.

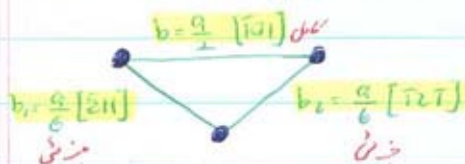
سهولت حرکت ناب جانایی به صورت خاصه ای اعین صورت می گیرد (ناچیز کامل - Perfect dislocation) $\tau \propto b^2$

گام حرکت ناب جانایی به صورت کامل نبوده و فواصل (و حرکت) اتفاق می افتد به صورت مرحله ای باشد (تکلیف ناچیز)
 حرکت دوم از نظر انرژی به صرفه تر است.

$\vec{b} = \vec{b}_1 + \vec{b}_2$

شرایط تشکیل ناچیز جزئی:
 $b^2 > b_1^2 + b_2^2$
 ناچیز جزئی تشکیل می شود
 $b_1^2 + b_2^2 > b^2$
 ناچیز کامل تشکیل می شود

F.C.C shockly partial = ناچیز جزئی شکلی



$b \rightarrow b_1 + b_2$

$$\frac{a^2}{4} [1^2 + 0 + 1^2] > \frac{a^2}{36} [1^2 + 1^2 + 2^2] + \frac{a^2}{36} [2^2 + 1^2 + 1^2] \Rightarrow \frac{a^2}{2} > \frac{a^2}{3}$$

b^2 b_1^2 b_2^2

تسکيل ناپايي جزئي، بعت به وجود آمدن نقص جديد در شكمي گردد.

(stacking sequence) ABC ABC ABC ... در شكمي F.C.C

اين چيدهان در شكمي F.C.C بعت به وجود آمدن min انرژي در شكمي و اگر جام جام شود، انرژي سيم افزايش يابد.

با حرارت هاي به هموت كامل، تغيير در نحوه چيدهان رخ خواهد داد. (مثلا از ABA يا CCA).

ABABC ABC ... : HCP, ABABAB ... => تسکيل ناپايي جزئي

شبه HCP شده است

دفعه فرهنگي دانشکده مواد و متالورژي

	SF Energy ($\frac{J}{m^2}$)	فاصله بين درنا چيني جزئي (nm)
Silver	0.02	19
Gold	0.06	5.7
Cu	0.07	6.3
Al	0.2	1.5
Ni	0.4	2

$$d = \frac{G(b_1 b_2)}{2\pi \gamma}$$

shear modulus $\rightarrow$ SF energy

با افزايش فاصله بين درنا چيني جزئي، انرژي SF کاهش يابد.

$$E = E_{plastic} + E_{elastic}$$

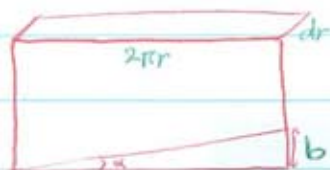
انرژي ناپايي:

درنا چيني جزئي در شكمي هستي ناپايي در شكمي (در فاصله ي کم از r چيني) (dislocation core)

dislocation core قانون حرکت صاف نيست. طبق نسبت پيچيده، $E_p \approx \frac{1}{15} E$ در شكمي کمتر تغيير انرژي مربوط به انرژي الاستيک در فاصله ي دورتر از هستي ناپايي رخ مي دهد.

خواب منم

انرژی الاستیک برای ناهمبایی پیچشی:



$$\delta = \tan \alpha = \frac{b}{2\pi r} \Rightarrow \delta = \frac{b}{2\pi r}$$

$$T = G \cdot \delta = \frac{Gb}{2\pi r} \Rightarrow \frac{dE}{dv} = \frac{1}{2} T \delta = \frac{G}{2} \left(\frac{b}{2\pi r} \right)^2$$

$$dv = 2\pi r dr l \Rightarrow dE = \frac{lGb^2}{4\pi} \cdot \frac{dr}{r}$$

$$\Rightarrow E_{\text{screw}} = \frac{lGb^2}{4\pi} \int_{r_0}^R \frac{dr}{r} \Rightarrow E_{\text{screw}} = \frac{lGb^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_0}$$

که جایی که انرژی الاستیک آمارتی بشود

$$\Rightarrow E_{\text{screw}} = \frac{lGb^2}{2} \Rightarrow \frac{E_{\text{screw}}}{l} = \frac{Gb^2}{2}$$

تغییرات انرژی در واحد طول برای ناهمبایی پیچشی

$$\frac{E}{l} = \frac{Gb^2}{2(1-\nu)} \quad (\text{Homework})$$

تغییرات انرژی در واحد طول برای ناهمبایی لبه‌ای

مثال: انرژی ناهمبایی برای فلز Al ، $G = 28 \text{ GPa}$ ، $b = 0.29 \text{ nm}$ ، $\nu = 0.33$ ، $r_0 = 1 \text{ nm}$ ، $R = 10^5 b$

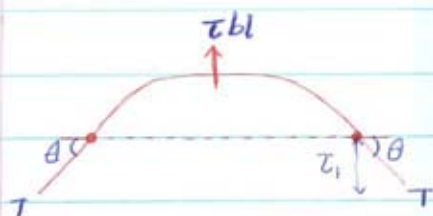
$$\text{برای لبه‌ای: } \frac{E}{l} = \frac{28 \times 10^9 \times 0.29 \times 10^{-9}}{2(1-0.33)} = 2.87 \times 10^{-9}$$

$$\text{پیچشی: } \frac{E}{l} = 1.93 \times 10^{-9} \text{ J/m}$$

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی



$$T_1 = T \sin \theta \rightarrow T_b = 2 T \sin \theta$$

$$T = \frac{1}{2} G b^2 \left\{ \Rightarrow \tau = \frac{G b}{L} \right.$$

لگتن لازم برای تفسیر تابع جابی.

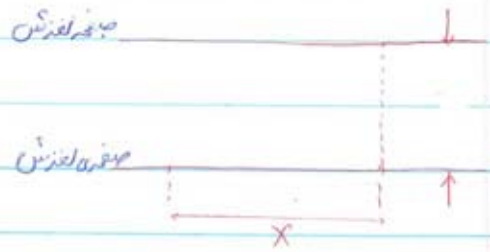
$$\tau = \frac{G b}{L}$$

تغییراتی در تابع جابی
طول تابع جابی

در هم گشتن بین تابع جابی با واسطه جیبی در احوال تابع جابی.
فیروزی دنا غنی و جابجایی بین تابع جابی هادی تابع فیروزی دارد از یک تابع جابی بر تابع جابی دیگر.

اگر دو تابع جیبی همسود باشند، اگر جدا جدا باشند، $\epsilon \propto b^2 = b_1^2 + b_2^2 = 2b^2$ و اگر هم باشند، $\epsilon = (b_1 + b_2)^2 = 4b^2$. پس اگر جدا باشند انرژی کمتر دهنده است.

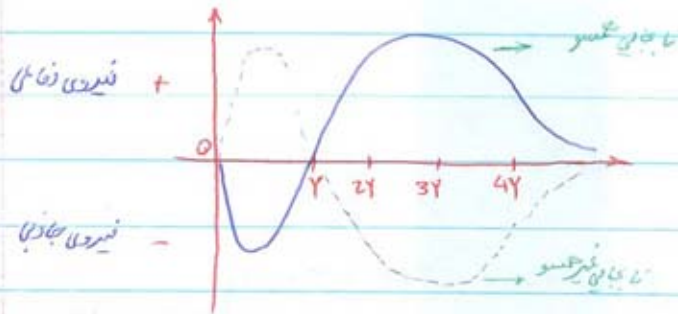
دلی اگر غیر همسود باشند، اگر برابر باشند، ازین دور، در غیر انصورت، در حد کرد. دلی هم بهتر است.



$$F_x = \frac{Gb^2 x (x^2 - y^2)}{2\pi(1-\nu)(x^2 + y^2)^2}$$

$$\frac{Gb^2}{2\pi(1-\nu)} = C \cdot \frac{y}{x} \rightarrow \frac{FY}{C} = XY \frac{(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}$$

نمودار به موجب فرمول است.



تأثیر عمودی $x > y$
تأثیر افقی $x < y$

برای روابط خاصی موازی و عمود

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

برای روابطی غیر عمود و موازی است

$$T = G \cdot \Delta, \Delta = \frac{b}{2\pi r}, F = T \cdot b$$

$$\Rightarrow F = \frac{Gb^2}{2\pi r}$$

در فاصله $d = r$ حاصل می شود

تأثیر عمودی $x > y$

این نیرو می تواند جابجایی یا دافعه باشد.

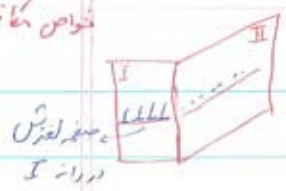
مکانیزم های افزایش استحکام در مواد فلزی

میزان کنیم می خواهیم یک را افزایش دهیم. یعنی وارد شدن به مرحله تغییر نرم به سختی. این به معنای این است که از حرکت نایجابی جلوگیری و یا آن را سخت تر کنیم.

کنترل بریز ساختار نفوذ (کنترل اندازه دانه): با کاهش اندازه دانه، استحکام افزایش پیدا می کند.

در واقع افزایش درز دانه. این درز دانه مانند سست در برابر حرکت نایجابی می باشد.

خواص مکانیکی



(۱۵۹- هندسه شاهی)

✓ طبق جدول σ_{UTS} و σ_{TS} که $T =$ به دلیل تغییر صفحات لغزش، نیروی لازم برای
افتتاح صفحات مجاور و تغییر σ_{TS} که زیادتر می باشد این اتفاق رخ دهد

$$\sigma_{ds} = \sigma_o + Kd^{-\frac{1}{2}}$$

$K =$ عامل مقول شوندگی یا به عبارتی در مهندسی (Locking Factor)

Hall-patch

$\sigma_o =$ تنش تسلیم فلز کریستال بدون ترکیب و چون دانستیم σ_o به d

$d =$ میانگین قطر دانه

$$\frac{N}{m^2} = \frac{1}{m} \times \frac{m}{m^2}$$

$$\frac{N}{m^2} = \frac{1}{m^{\frac{1}{2}}} \times \frac{m^{\frac{1}{2}}}{m^{\frac{1}{2}}}$$

تغییر کریستال ها در صورت نبودن σ_o ، استیجاً آبیاری دانه دارد

✓ در واقع نمودار $\sigma - d$ که به ازای σ_o که صاف است، در σ_{TS} ها به ازای d که در صفحات مختلف است σ_{TS} باید بزرگتر
از σ_o باشد و به حرکت کند. پس در حالت کلی، حرکت σ_o یا به سختی می گردد.

✓ فرض درک نمودن σ_o و σ_{TS} 4000 MPa در صورتی که میانگین اندازه دانه 5 μm باشد. اگر میانگین اندازه دانه 100 μm باشد،
 $\sigma_{TS} = 1200$ MPa. اگر بخواهیم σ_o و K 3000 MPa بر اساس میانگین اندازه دانه حقیقی است که

$$\sigma_o = \sigma_o + Kd^{-\frac{1}{2}} \Rightarrow \begin{cases} 4000 = \sigma_o + K\sqrt{5} \\ 1200 = \sigma_o + 10K \end{cases} \Rightarrow K = 8070, \sigma_o = 395 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow 3000 = 393 + 8070\sqrt{d} \Rightarrow d_{ave} = 9.5 \mu m$$

(۲) استفاده از بازه های ثانویه

شماره زرات ثانویه $\Delta \sigma = \frac{0.13 Gb}{L} \ln \frac{r}{b}$ (Orvan-Ashby)

بهره برگشت ثانویه $\Delta \sigma =$ به دلیل برتری نمودن

(۳) کار سختی: اگر نمونه ای اعمال تنش دارد تا حدی پلاستیک شده و سپس فانی و برآورده شود و دوباره آهسته را انجام دهیم.

به دلیل تشکیل σ_o و در نتیجه افزایش احتمال برخورد σ_o با σ_{TS} و افزایش σ_o در واقع مقاومت نمونه در برابر
تغییر نرم افزایش و در نتیجه کار سختی جاری می شود. در ضمن ماده نیز تردتر می گردد. پس باید دنبال یک optimum برای

پس با افزایش دما سختی، رفتار شکست از نوع ترد می گردد یعنی بدون تغییر نرم به استیک

brittle fracture بدنه تغییر نرم به استیک

ductile " شکست همراه تغییر نرم به استیک

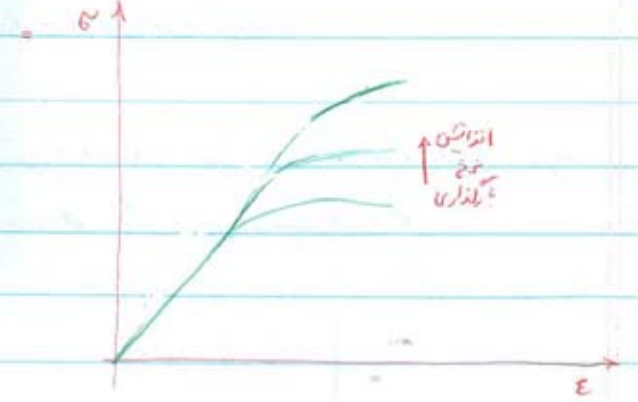
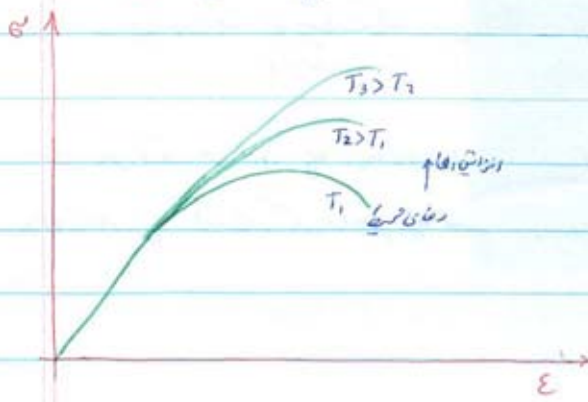
در بررسی SEM، ابعاد سطح شکست b و ضخامت از df است

تقریب مقدار تغییر نرم به استیک

$$\delta = l \cdot L \cdot b$$

مکانیسم تغییر نرم به استیک در دما و استیکه به دما

$$\delta_p = l \cdot b \cdot \bar{L} \quad \text{و} \quad \frac{\delta}{t} = \frac{l \cdot b \cdot \bar{L}}{t} \quad \text{نرخ کرنش}$$



تأثیر دما بر تغییر نرم به استیک کرنش
با کاهش انرژی بر حسب کاهش دما، حرکت نابجایی شکل تر می شود.

تأثیر نرخ کرنش بر تغییر نرم به استیک کرنش
با افزایش سرعت بارگذاری، مدت ماندن نابجایی کم می شود، پس استیکه نابجایی در رد.

دفتر فرهنگی دانشگاه مواد و متالورژی

تجربه کامپوزیت

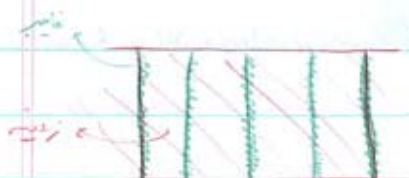
استفاده از فایبر و دیگر در جهت افزایش استحکام
فایبر: ماده کریستال در ابعاد کوچک که نسبت طول به عرض آن زیاد است
و دیگر: ماتریس کریستال

استفاده از ذرات فایبر و ذرات Al برای افزایش استحکام Al
Bulk = قطعه حجیم

فرض مکانیکی

لاستیک می تواند استحکام را در سه تئوری بالا ببیند. در صورتیکه نیجایی نداشته باشد.

فایبرها به دلیل کم بودن عرض آنها در حد μm ، دارای اندازه ی رانه ی کمی هستند و طبق رابطه ی Hall-Patch استحکام افزایش می یابد.



استفاده از فایبرها باعث اتصال خوب بین فایبر و ماتریس می شود.

Iso-strain = کرنش یکسان در فایبر و ماتریس.

$$P_c = P_f + P_m \quad ; \quad \sigma_f = \frac{P_f}{A_f} \Rightarrow P_f = \sigma_f A_f \Rightarrow \sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

$$\Rightarrow \sigma_c = \sigma_f \left(\frac{A_f}{A_c} \right) + \sigma_m \left(\frac{A_m}{A_c} \right) \quad \text{استحکام کامپوزیت} \quad \sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad \text{I} \quad , \quad \epsilon_c = \epsilon_f = \epsilon_m \quad \text{II}$$

معدل یک ریخته کامپوزیت

کسر حجمی V

$$\text{I و II} \Rightarrow \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} V_f + \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m \Rightarrow E_c = E_f V_f + E_m V_m$$

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{\sigma_f A_f}{\sigma_m A_m} = \frac{E_f \epsilon_f A_f}{E_m \epsilon_m A_m} \Rightarrow \frac{P_f}{P_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m}$$

باقی به جابجای شدن معدل یانگ فایبر نسبت به ماتریس، و اتصال مستقیم توسط ماتریس میانی بیشتر از ماتریس است (این دلیل افزایش استحکام است)

با کاهش اندازه رانه، استحکام افزایش می یابد. مورد دیگر تجمع ناخالصی ها در حوز رانه است (dislocation pile up).

میدان ها تنش و کرنش در اطراف حوز ناخالصی، انگیزه ای برای عبور از حوز رانه به وجود می آورد. در ریز ساختار ریز رانه

چون تعداد ناخالصی ها کمتر است، نیجایی کمتری هم وجود دارد و میدان تنش و کرنش کم تر و در نتیجه باید جابجایی بیشتری

باشد، و در ریز ساختار درشت رانه، تعداد ناخالصی ها بیشتر و جابجایی کمتری نیاز دارد.

$$\tau = \tau_{\text{ای}} + n \tau_{\text{ناخالصی}}$$

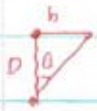
دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

مزد رانه با زاویه ی انحراف کم angle grain boundary

در منحنی (تنش-کرنش) جابجایی ها (F)، آنگاه از حالت تعادل $F=0$ ، گذرگشتی جابجایی ها بر روی یکدیگر می باشد.

(۲۱)

بنابر این در ریزش ختمرها، زاویه انحراف کم تر دانسته می شود توسط حضور نا بجا می ها بر روی یکدیگر توصیف کرد.



$$\tan \theta = \frac{b}{D} \Rightarrow \theta = \frac{b}{D}$$

(C) بر حسب رادین

نامی از این نا بجا می ها که زاویه انحراف بین دو دان

عدد اندازه دان: grain size number

مربوط به اندازه دان می باشد، و می خود را نیست

$$N = 2^{n-1}$$

N = تعداد دان در 10^3 در یک ریزش $100 \times$

n = عدد اندازه دان

با افزایش عدد اندازه دان، ریزش ختمرها، ریزش دانسته تر می شود.

دفتر فشرده سازی دانشکده مواد و متالورژی

$$504 \mu m = \frac{25.4 \times 25.4}{120 \times 100 \times 100}$$

برای تخمین سطح احاطه شده توسط یک دان $N = 125$ و بزرگترین $100 \times$

با فرض مربع بودن دان: ابعاد دان = $22.4 \mu m$

$$N_{100} = N_m \left(\frac{m}{100} \right)^2 = 2^{n-1}$$

تفسیر فرم بلاستیک در طولی شدن **Twinning**

حرکت نا بجا می ها بر روی لغزش است. در روش لغزش، بعد از حرکت نا بجا می، وضعیت قرار گرفتن آن ها

قبل و بعد حرکت یکسان است. حالت دیگر دو تلو شدن است. شرایط این مدل تفسیر فرم بلاستیک از:

(1) نرم کردن (2) سیستم های لغزش کم (3) دما پایین. یعنی شرایطی که سهولت حرکت نا بجا می را نداریم.

به حتماً امکان تستی در این حالت، بدین ترتیب صفحات، به عنوان صفحات دو تلو شدن کلان گفته می شود. در این صورت این

صفحات تغییرات در وضعیت قرار گیری آن ها، طوری رخ می دهد که این صفحه حالت آینه ای صفحه دو تلو شدن می دهد.

مدلاً در سیستم H.C.P. دلیل کمتر بودن صفحات لغزش، این مورد بیشتر است می شود.

حوض کتابخانه

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

دفتر فرهنگی و دانشجویی دانشکده مواد و متالورژی

خواص کمانی

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

در تعیین رفتار شکست مواد ترد موارد زیر مؤثر است:

- (۱) مقدار تنش اعمالی
- (۲) طول عیب ترک
- (۳) K_{Ic}

(الف) فرض کنیم K_{Ic} و C مشخص باشد، برای جلوگیری از شکست (افزایش طول ترک - صورت خود به خودی) باید رابطه زیر برقرار باشد:

$$G_a \leq \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi C}}$$

(ب) فرض کنیم K_{Ic} و G_a مشخص باشد، برای جلوگیری از شکست باید رابطه قابل برقرار باشد:

$$C \leq \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{G_a} \right)^2$$

رابطه انرژی کرنشی واقع

$$G = \left(\frac{2\gamma E}{\pi C} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\Rightarrow \frac{G_{در حد}}{G_c} = \frac{\left(\frac{2\gamma E}{\pi C} \right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{E\gamma}{a} \right)^{\frac{1}{2}}} = \left(\frac{a}{1.5C} \right)^{\frac{1}{2}}$$

استحکاک کششی مواد ترد

$$G_c = \left(\frac{E\gamma}{a} \right)^{\frac{1}{2}}$$

به ابعاد شکست

در متن ابعاد عیب عیوب یا ترک به سمت ابعاد شکست، استحکام در عمل نیز استحکام تئوری تبدیل خواهد شد.

مثال: فرض کنیم در قطعه ای تری داریم، دارای $C = 1 \mu$ است. ترک جانبی ای در ابعاد شکست $a = 2 \times 10^{-6} m = 2 \mu$ می باشد. نسبت استحکام واقعی به تئوری را بیابید.

$$\frac{G_{در حد}}{G_c} = \left(\frac{a}{1.5C} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 10^{-2}$$

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

مقدار استحکام در مواد ترد، حساسیت شدیدی به حضور عیب دارد.

مکانیزم های پدید آورنده چقرمگی شکست *Fracture toughness* در مواد ترد.

در مواد فلزی، به دلیل افزایش سطح زیرغیر، چقرمگی شکست زیاد بود، ولی در آلیاژها به دلیل افزایش استحکام آلودگی، به آلیاژ به جلوگیری از حرکت عیوب می کردیم.

ولی در مواد ترد، به علت وجود پیوندهای قوی تر، انتظار می رود استحکام بالاتری نسبت به فلزات داشته باشیم.

در واقع مدل یگ سرانگیز از فلزات به این صورت است: $E_c > E_m$ (۲۷)

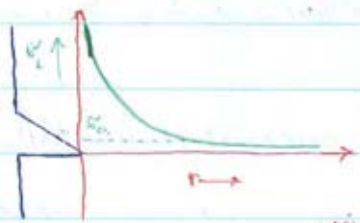
این خاصیت، به مثابه گامش *Fracture toughness* دانسته می‌شود. پس ما به تلاش کنیم K_{IC} را افزایش دهیم. پس هدف افزایش K_{IC} است. یعنی جلوگیری از رشد ترک یا به تاخیر انداختن هر چه در رسیدن به طول بحرانی. افزایش K_{IC} ، تفاوت خوب در برابر رشد ترک افزایش پیدا می‌کند.

مکانیزمی که هست، صرف کردن انرژی بوجود در ترک ترک برای ایجاد کارهای دیگر. بیشتر به کنترل ریزش ساختار صورت می‌گیرد. یکی از سه روش را به ما، مایکرو ترک ریزش ساختار ترک باز می‌شود و در واقع کاهش اندازه‌ها دارد. K_{IC} نیز می‌شود.

مثلاً به این که ما به ترک کریستال و پلی کریستال ، چون حرکت نموده در ترک کریستال، دلیل عدم وجود مقاومتی در برابر آن را احتیاط است، پس K_{IC} ترک کریستال کمتر است. در مدار پلی کریستال، حضور مرز دانه مقاومتی است در برابر رشد ترک. در نتیجه مرز دانه باعث انحراف ترک از مسیر اصلی می‌شود. *Crack deflection*

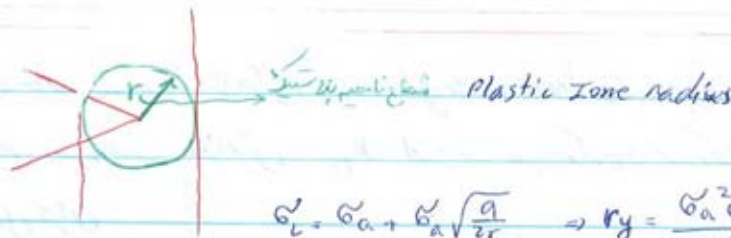
روش دیگر استفاده از مواد انعطاف پذیر است: "Plastic deformation" مثل کامپوزیت Al_2O_3/Al

تغییرات $\sigma_c = \sigma_a + \sigma_a \sqrt{\frac{c}{2r}}$: σ_c : تنش در نوک ترک ، σ_a : تنش اعمالی ، c : نصف طول ترک ، r : شعاع نوک ترک



دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

مثلاً سیستم فوق، فاز انعطاف پذیر Al است که می‌تواند $\sigma_c \geq \sigma_a$ شود. پس تغییر نرم پلاستیک فراهم می‌کند. پس ما انرژی را گرفته و در واقع انرژی ذخیره شده در نوک ترک، صرف تغییر نرم پلاستیک در اطراف نوک ترک شده است.



$$\sigma_c = \sigma_a + \sigma_p \sqrt{\frac{a}{2r}} \Rightarrow r_p = \frac{\sigma_a^2 a}{2\sigma_y^2} \cdot \frac{\pi}{\pi} = \frac{k_{IC}^2}{2\pi\sigma_y^2}$$

رابطہ تغییر پذیری

$\sigma_y = \sigma_c$

$$G = 2\gamma$$

لا: فالتد مقاومت در برابر ترک در مواد تردیدال مثل شیشه

$$G = 2\gamma + P$$

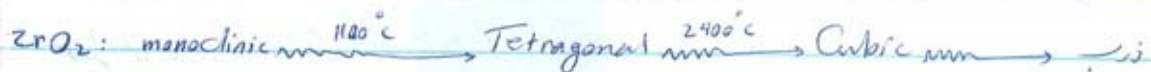
Plastic work

با اعمال یک نیروی جدید حجمی شکست =

$$\sigma = \left(\frac{2E(\gamma + P)}{\pi c} \right)^{1/2}$$

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

روش دیگر استفاده از زیرکونیای نیمه پدیدار است Partially stabilized zirconia



mono 5-6% tetra

Tetra $\rightarrow$ mono 5-6%
نسبت حجمی

از این روشی استفاده می کنیم.

اولین مرحله، سنتز ZrO_2 نیمه پدیدار به صورت شیمیایی با استفاده از CeO_2 , Y_2O_3 , CaO برای تغییر نسبت $\frac{c}{a}$ به طوری که در دمای محیط و فاز نیمه پدیدار متراکم باشد.

بسته به میزان استفاده از افزودنی ها، ترکیب مختلف mono + Tetra داریم. به همین دلیل هم برای نیمه پدیدار داریم.

این پودر حاوی فاز mono و Tetra را به Al_2O_3 ترکیب می کنیم. با توجه به ناپایداری بودن فاز Tetra در دمای محیط، این فاز تمایل دارد طی یک استقام به فاز mono تبدیل شود. برای این استقام لازم است مقداری انرژی داشته باشیم. این انرژی از انرژی نوک ترک استفاده می کنیم. در ضمن، نرخ دامن

خاص مکانیکی

این است که باعث انقباض حجم می گردد، این انقباض باعث امکان نیرو در جهت بسته شدن ترک و ترک ترک می گردد.

۱. انقباض ناشی از تبدیلی و استخار Tetra و mono گاه ها باعث ایجاد میکرو ترک و تنگی در فصل مشترک Al_2O_3 و ZrO_2 می شود که بر آن رها این تنگی و میکرو ترک ایجاد می گردد.

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

مداخل موثر بر K_{IC}

۱) کنترل ریزش ها

۲) استقامت می خازی

۳) استفاده از عناصر انعطاف پذیر

۴) کشش نه نهایی از ماتریس کامپوزیت

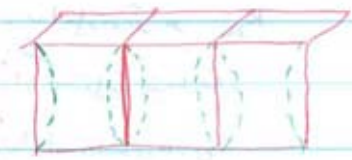
۵) Crack bridging

(۷) تأثیر ضخامت نمونه

$$\text{Plane Stress} \begin{cases} \sigma_z = 0 \\ \epsilon_z \neq 0 \end{cases} \quad , \quad \text{plane strain} \begin{cases} \sigma_z \neq 0 \\ \epsilon_z = 0 \end{cases}$$

• با کاهش ضخامت نمونه، K_{Ic} افزایش می‌یابد.

فرض کنیم سه دانه متصل به هم داریم، اگر بخواهیم ضخامت را بزرگ کنیم، دانه‌های ما رو به هم گسیختگی می‌روند. در این اتفاق نمی‌تواند رخ دهد. ← به واسطه جلوگیری از کاهش ابعاد در دانه، تغییر حاصل می‌شود.

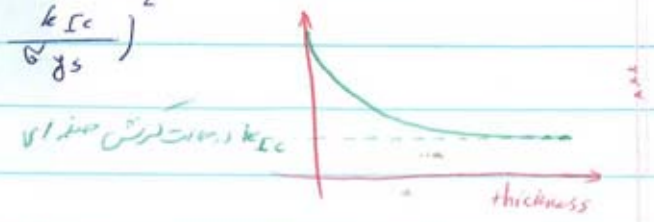


حالت اثر ضخامت نمونه را افزایش دهیم و تا دانه بزرگ شدن پیش برویم ←

$$\begin{cases} \sigma_z = 0 \\ \epsilon_z \neq 0 \end{cases}$$

← با افزایش کرنش، K_{Ic} افزایش می‌یابد.

$$\text{ضخامت نمونه در شرایط کرنش صغیری} \geq 2.5 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$



$$K_{Ic} = Y \sigma \sqrt{\pi c}$$

Y = ضریب هندسی: مقدار بستگی دارد به نسبت طول ترک به ابعاد نمونه

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

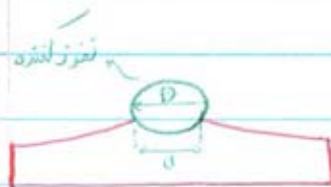
لختی: Hardness

مقدار مقاومت نمونه در برابر نفوذ بار (نفوذ کننده).

برای بررسی سختی، قطر نفوذ و عمق نفوذ مهم است.

خواص مکانیکی

Brinell : برای سختی ناحیه ی نفوذ



جنس ماده ی نفوذ کننده : فولاد و کاربید تنگستن (WC)
 بار نفوذ کننده که بین 500 تا 3000 کیلوگرم است
 قطر نفوذ کننده بین 1 تا 10 میلی متر

Brinell hardness number

$$BHN = \frac{P}{(\pi \frac{D}{2})(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

طبق استاندارد ASTM

با افزایش زمان، ممکن است کار سختی پیش بیاید و بر روی عدد فوق تاثیر نداشته و کم نشود.
 در واقع در این تست، نفوذ نفوذ کننده به معنای بررسی تغییر فرم پلاستیک و در نتیجه حرکت نابجایی و در نتیجه ایجاد کار سختی می شود.

Rockwell : برای سنجش ناحیه ی نفوذ

به اسکن نوع نفوذ کننده، بار اعمالی و سازه نفوذ کننده، سه نوع تست داریم: Rockwell A، Rockwell B، Rockwell C

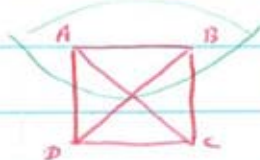
نوع نفوذ کننده	بار اعمالی
نوع نفوذ کننده: مخروط الماسی شکل	150 kg
نوع نفوذ کننده: مخروط الماسی شکل	100 kg
نوع نفوذ کننده: مخروط الماسی شکل	1/16 in

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

روش Brinell و Rockwell، برای سنجش در حالت "Macro hardness" می باشد.

دری برای سنجش در ناحیه کوچکتر نمونه مثل روزانه و... حالت "Micro hardness" است.

تست "Vickers": در این روش، نفوذ کننده یک هرم مربعی قائم الزامی است.

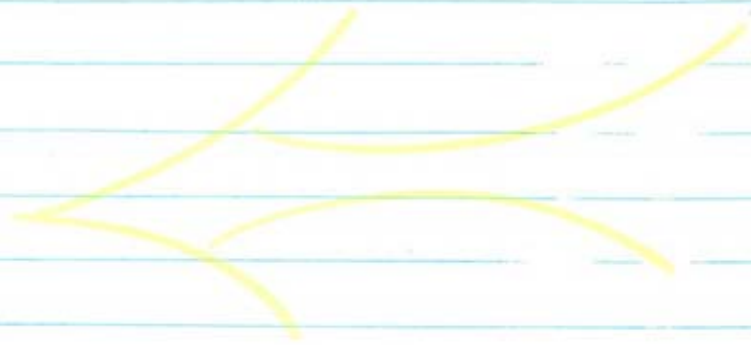


$$\begin{cases} AC = d_1 \\ BD = d_2 \end{cases}$$

$$H_V = \frac{2P \sin(\frac{\theta}{2})}{d_{ave}^2} = \frac{1.854 P}{d_{ave}^2}$$

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

در ادامه در صفحه بعد

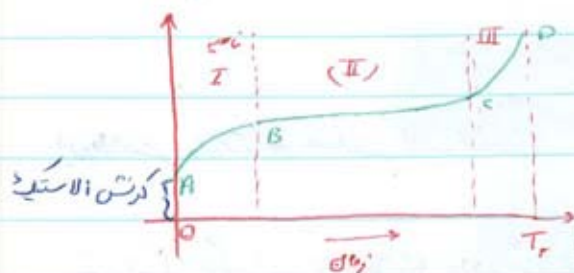


خزش Creep

سرعت کرنش مقاطع بر حسب زمان در دما بالا

معرفه لغت خزش در ۳ دما زیر اینجاست

$$\epsilon = f(\sigma, T, t)$$



دفتر فرهنگی دانشگاه مواد و متالورژی

زمان لازم برای تقسیم شدن نمونه = rupture time T_r
 OA = کرنش الاستیک، مقدار بستگی دارد به جدول یا یک نمونه

AB = ناحیه I = در این ناحیه، کاهش نرخ خزش مربوط به کار سختی بر اثر حرکت نابجایی ها است.

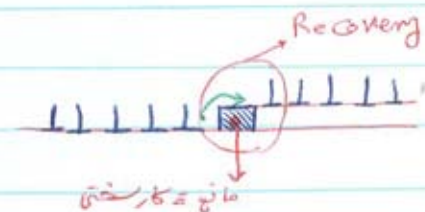
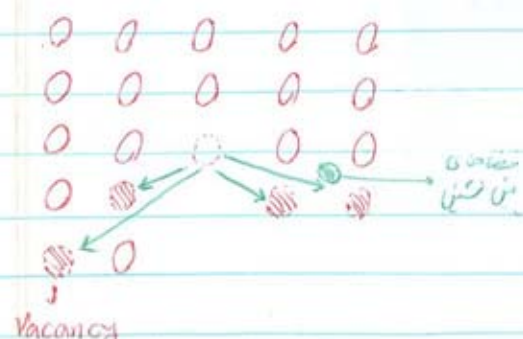
CD = ناحیه III = ثبت گوی شدن، در این ناحیه کاهش سطح مقطع، افزایش دما، و تغییر اختلاف نرخ خزش است.

BC = ناحیه II: پرس ها، کار سختی (نمایه یابی)
 در این ناحیه، نرخ پرس ① = نرخ پرس ②

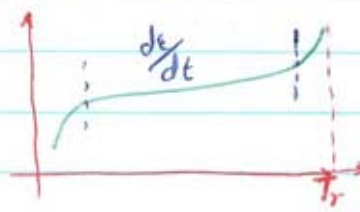
• معنای نرخ خزش یا "Creep rate"، نرخ خزش در ناحیه ② می باشد.

• مکانیزم ها Recovery:

① Climb motion: حرکت خود بر صفحه لغزش نابجایی ← لغزش آتی ← با توجه به بالا بودن دما، احتمال لغزش آتی وجود دارد.



• نرخ کار سختی برابر است با نرخ Recovery.
 • خلل های خوب با افزایش دما، زیاده می شود.



creep rate در یک ترکیب معین، برای یک T معین $\Rightarrow$ T_r را بیشتر می توان با تغییر دما می توان T_r را بیشتر می توان $\Rightarrow$ در صورتیکه شکست، با تغییر دما می توان T_r را بیشتر می توان $\Rightarrow$

دفتر فرهنگی دانشکده مواد و متالورژی

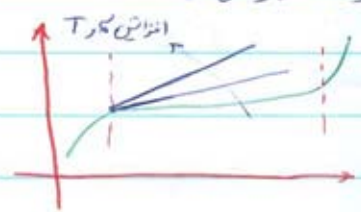
Larson-miller پارامتر T_r : $T_r (C + \log Tr)$

این پلاستمر برای این مختلف ثابت است

اگر برای یک ترکیب در $\sigma = 310 \text{ MPa}$ و در $T = 650^\circ \text{C}$ $Tr = 3500 \text{ hr}$ باشد، در $T = 705^\circ \text{C}$ Tr چقدر است؟

$$(650 + 273)(20 + \log 3500) = (705 + 273)(20 + \log Tr) \Rightarrow Tr = 150 \text{ hr}$$

در ناحیه (II) $\frac{d\epsilon}{dt}$ رابطه به دما و σ می باشد و با افزایش دما و σ زیاد می شود.



$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = C \sigma^n$$

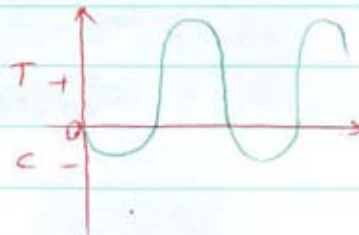
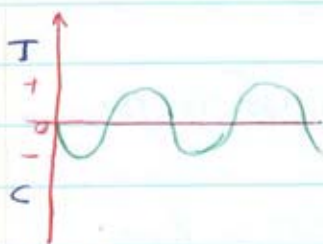
n و C رابطه به دما و σ می باشد.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad B = \frac{Q}{R}$$

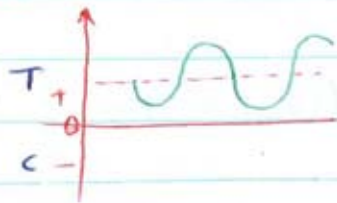
A و B رابطه به دما و σ می باشد.

خستگی Fatigue

رفتار مکانیکی سوار در تنش های متغیر



سطح های متغیر تنش



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

↓
میانگین تنش

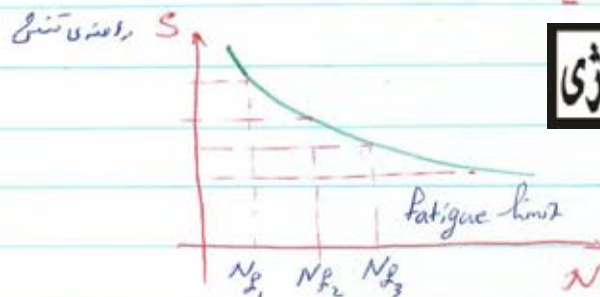
$$\sigma_a = \sigma_{max} - \sigma_m$$

↓
دامنه ی تنش

بending & Rotation خستگی



نمونه ای مانند ریمبرو، در ابتدا جبر خازنه شده و حجمی تحت فشار، در در بعد کشیده می شود و پدیده ی ریمبرو



دفتر فرهنگی دانشگاه مواد و متالورژی

$N \rightarrow$ # of cycle to Fatigue

مکانیزم خستگی:

با تغییر سیکل تنش، مثلاً کم و زیاد شدن تنش از نوع کشش، احتمال کار سستی در قطعه به وجود می آید و

مابین سعت افزایش احتمال شکست ترد پیوسته در یک معنی افزایش طول ترک در هر سیکل: $\frac{da}{dN}$

و معیار طول بحرانی ترک داریم. در این حالت، برش خورده خوردگی ترک شروع می دهد.

$\frac{da}{dN} = A(\Delta k)^m$ $\rightarrow$ A و m جزئیات ماده و خاک هستند.

$\Delta k = k_{max} - k_{min} = \gamma \Delta \sigma \sqrt{\pi a} = \gamma (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \sqrt{\pi a}$ $\leftarrow$ تناوبی ترک تنش

$\log \frac{da}{dN} = \log [A(\Delta k)^m] = m \log \Delta k + \log A$

رابطه ای برای پیش بینی طول عمر خستگی قطعه:

$N_f = \int_0^{N_f} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{A(\Delta k)^m}$

$\downarrow$
تعداد سیکل ها تنش تا شکست

دفتر فرهنگی دانشگاه مواد و متالورژی