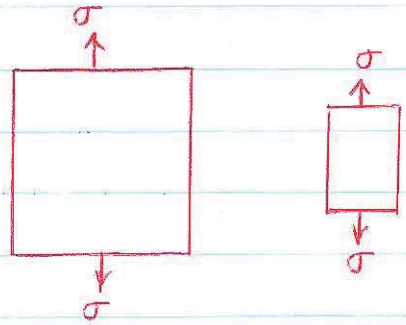
بارگذاری همگن : تنش در سطح مقطع یکسان است .

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



اگر عیوب وجود نداشته باشد ، تغییر نمی کند حد خستگی

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

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

می شود .

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

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

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

اثر فرکانس :

* اثر محیط :

* اثر تنش :

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

قطعه‌ی اول 10^5 دقیقه و دیگری 10^2 دقیقه . [زمان اصلاً برای مالهم نیست]

فرکانس اگر بالا باشد ، اگر محیط هوزنده باشد ، زمان کمتری در محیط هوزنده بوده ← استحکام خستگی بیشتر

اگر محیط هوزنده نباشد ، فرکانس تأثیری ندارد .

دریک سیکل معین ، تنش لازم برای شکست :

فرکانس عکس زمان سیکل است ← تغییر شکل پلاستیک کمتر ← حساسیت کمتر ← تنش بیشتری لازم است . پس اثر فرکانس بستگی به تنش دارد . (اثر این فرکانس به نفع ماست در محدوده‌ی تنش بالای حد خستگی) .

(حرکت ناپیمائی)

اثر تغییرات دامنه تنش :

* تا الان دامنه‌ی تنش تغییری نمی‌کرد : اما با تغییر دامنه‌ی تنش :

■ اصل حساسیت جمع پذیر یا اصل مانر :

$$\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = 1$$

اگر مجموع حساسیات به ۱ برسد ، شکست خستگی خواهیم داشت .

k : تعداد سطوح تنش در بارگذاری $\quad\quad$ σ_i : سطح تنش i ام

n_i : تعداد چرخه اعمال شده در σ_i $\quad\quad$ N_i : عمر خستگی در σ_i

نتایج تجربی : اصل مانر همیشه صادق نیست . اگر $\sigma_1 < \sigma_2$ ← $\sum \frac{n}{N} > 1$

↓

استفاده از اصل مانر ضرری ندارد .

و اگر $\sigma_1 > \sigma_2$ ← $\sum \frac{n}{N} < 1$.

مسئله 8 از فصل 12 :

$n_1 = 2500$ $\quad N_1 = 10^4$ $\quad \sigma_1$

$n_2 = 10000$ $\quad N_2 = 5\times10^4$ $\quad \sigma_2$

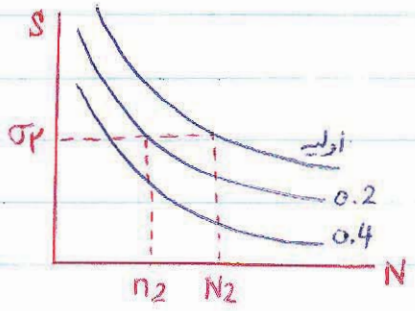
n_3 $\quad N_3 = 5\times10^5$ $\quad \sigma_3$

$$\sum_{i=1}^{3} \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad \mapsto \quad n_3 = 0.55 \times 5\times10^5 = 275000$$

$\sigma_1 > \sigma_2$ با فرض صادق بودن اصل ماینر این مسئله حل شده است .

تشخیص صادق بودن اصل ماینر:

با یک آزمایش دو مرحله‌ای معلوم می‌شود . فرض : منحنی S_N را برای ماده داریم . اگر حد خستگی 10^8 سیکل باشد .



8_12 نمونه ، هرکدام با σ_1 ، 0.2×10^8 سیکل تنش اعمال می‌کنیم .

منحنی S_N آنها را رسم می‌کنیم . بعد 0.4 و ... .

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} = 1$$

n_2 درست می‌آید $\longrightarrow$ N_2 را داریم

$$0.2 + \frac{n_2}{N_2} = 1$$

n_2 را با نمودار مقایسه می‌کنیم .

اثر (1) understressing ، (2) coaxing ، (3) زمان استراحت :

(1) : تنشی زیر حد خستگی $\longleftarrow$ تعداد زیادی سیکل اعمال می‌کنیم $(0.6\times10^8 \text{ cyc})$: اگر دوباره آنرا بارگذاری خستگی کنیم ، حد خستگی زیاد می‌شود

(2) : تنش زیر حد خستگی و تعداد زیاد سیکل . چندین بار این کار را می‌کنیم . بعد تست خستگی می‌گیریم . حد خستگی حتی از حالت (1) هم بیشتر می‌شود .

(3) : از حد خستگی تحت بارگذاری قرار دارد ، یک مدت زمان استراحت می‌دهیم ؛ اگر خستگی را دوباره انجام دهیم ، حد خستگی زیاد شده است .

آهن با حالت (1) ، ٪23 گرافیت شده (فولاد کم کربن) ، حالت (2) ، ٪30 و با زمان های استراحت 23 hr از فواصل $\frac{1}{7}$ حد اولیه ، ٪100 افزایش در حد خستگی گزارش شده است . علت : پدیده‌ی پیرکرنشی بر می‌گردد . (نفوذ اتم‌های نیتروژن و کربن قفل ناجایی‌ها)

اثر شکاف :

■ فاکتور شکاف در خستگی :

$$K_f = \frac{\text{حد یا استحکام خستگی نمونه بدون شکاف}}{\text{" " " شکاف دار}}$$

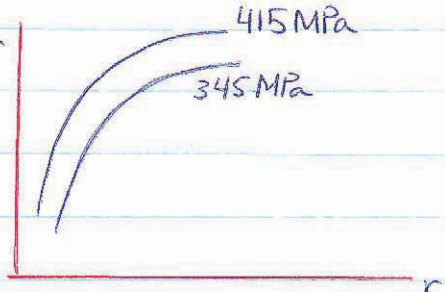
$$q = \frac{1}{1+\frac{P}{r}} = \frac{K_f - 1}{K_t + 1}$$

P : ثابت یا م r : شعاع رأس شکاف

Kt : فاکتور تمرکز تنش الاستیکی در کنج شکست q : ضریب حساسیت به شکاف : بین صفر تا 1

- اثر عوامل مختلف :

الف) استحکام کششی و r :



با افزایش استحکام کششی در یک شعاع معین ، حساسیت به شکاف بیشتر می‌شود . در r های بزرگ میزان تأثیر کمتر است .

ب) سایر عوامل:

۱. اثر اندازه: کیت p_stress و p_strain در قطعات بزرگ حساسیت فاق بیشتر است.

۲. شعاع رأس فاق: در شعاع رأس فاق های کمتر، تأثیر بیشتری روی q دارد.

ادامه اثر فاق:

$$K_b = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{a}{r}}} \quad (Neuber)$$

K_b همان K_f منتها در $\sigma_m = 0$.

$$K_b = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \rho/r} \quad (Peterson)$$

a و ρ با افزایش استحکام کاهش پیدا می کند. r: شعاع رأس فاق. a و ρ: ثوابت

پارامتر مؤثر دیگر: تعداد سیکل مورد بررسی - تنش متوسط روی K_b یا K_f.

تخمین عمر خستگی قطعات ترک دار: ۸۷/۲/۱۰

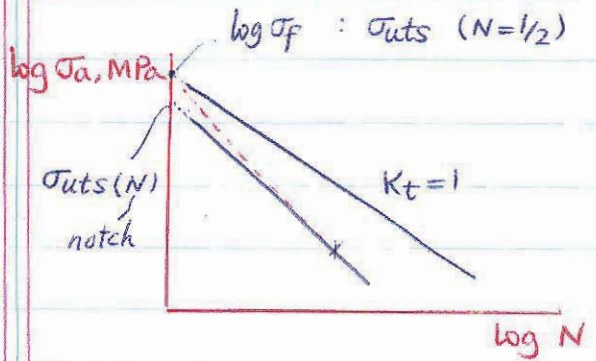
* استفاده از منحنی S-N نمونه بدون ترک

* با استفاده از تنش و کرنش رأس ترک

۱. تنش و کرنش در رأس ترک کمتر از تنش و کرنش تسلیم

2. تنش و کرنش در رأس ترک

منحنی S-N نمونه بدون ترک :



$\sigma_a = \sigma_f (2N_f)^b$

σ_f : ضریب استحکام خستگی

N_f : تعداد سیکل تا شکست

برای خط دیگر، دو نقطه لازم است : حد خستگی ←

$K_b = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + P/r}$

از یکی از روابط ، K_b را بدست می آوریم .

$K_b = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{a}{r}}}$

$K_f = \frac{\text{حد یا استحکام خستگی بدون فاق}}{\text{فاق دار} \quad " \quad "}$

با داشتن S-N ، حد خستگی نمونه بدون فاق را داریم ← برای نمونه فاق دار بدست می آید . نقطه ی دیگر : انجام آزمایش کشش یک نمونه فاق دار مشابه فاق برای خستگی .

اگر امکانات آزمایش کشش نداشتیم، می توانیم از σ_{uts} بدون فاق به نقطه ی اولی وصل کنیم، در این صورت برای طول عمرهای زیاد تفاوتی نمی کند اما برای طول عمرهای کم ، درصد خطا زیاد می شود .

تنش و کرنش راس ترک :

حالت اول : تنش و کرنش نمونه فاق دار (در راس فاق)

$\sigma_N = K_t \sigma_{app}$

$\sigma_N < \sigma_y$

$K_t = K_\sigma = K_\varepsilon$

کمتر از تنش و کرنش تسلیم [با وجود فاق هنوز به σ_y نرسیده ایم]

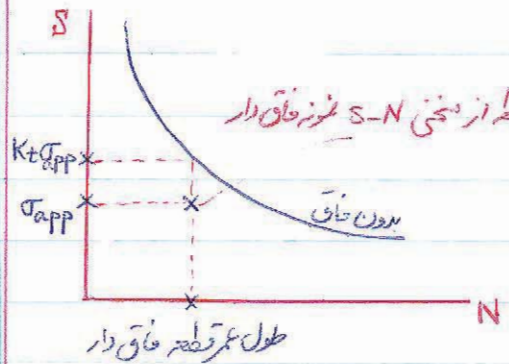
(۸۴) ۸۷/۲/۱۰

$$K_\sigma = \frac{\sigma_N}{\sigma_{app}} \qquad K_\epsilon = \frac{\epsilon_N}{\epsilon_{app}}$$

$$K_t = 1 + \frac{2a}{b} \qquad \sigma_{app}: \text{اعمالی} \qquad N: \text{در رأس شیار}$$

$\sigma_N < \sigma_y \rightarrow$ در منطقه الاستیک $\rightarrow K_\epsilon = K_\sigma = K_t$

K_t : تنش در رأس ترک به تنش اعمالی.



حالت دوم: تنش در رأس شیار بزرگتر از تنش تسلیم (یا کرنش ها):

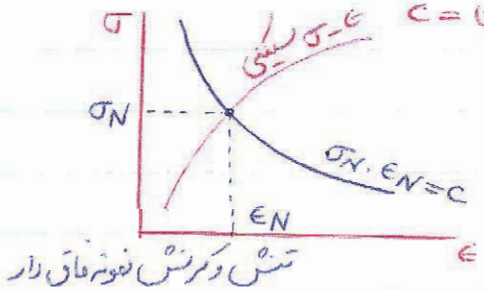
$\sigma_N > \sigma_y$, $\epsilon_N > \epsilon_y$ $\qquad K_\sigma . K_\epsilon = K_t^2$

(معادله نیوبر)

$$\rightarrow \frac{\sigma_N}{\sigma_{app}} . \frac{\epsilon_N}{\epsilon_{app}} = K_t^2 \quad : \quad \sigma_N . \epsilon_N = \sigma_{app}\epsilon_{app}K_t^2$$

عدد ثابت برای بارگذاری معین $= C$

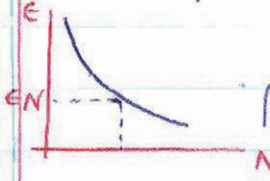
$$\rightarrow \sigma_N . \epsilon_N = C$$



در حالت : $\sigma = K'(\epsilon)^{n'}$ $\qquad n'$: معادل n اما در حالت (توان کارسختی حالت)

σ_N را به منحنی $S-N$ نمونه بدون شیار منتقل می کنیم و طول عمر را می خوانیم.

اگر منحنی $\epsilon - N$ را داشتیم، ϵ_N را منتقل می کنیم و طول عمر را می خوانیم.



(روش سوم) با استفاده از آهنگ گسترش ترک :

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \qquad \int_0^{N_f} dN = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{A(y\Delta\sigma\sqrt{\pi a})^m}$$

$$\hookrightarrow N_f = \frac{2}{(m-2)Ay^m\Delta\sigma^m}\left[\frac{1}{a_0^{\frac{m-2}{2}}} - \frac{1}{a_f^{\frac{m-2}{2}}}\right] \qquad m \neq 2$$

$y = f(\frac{a}{w})$ با فرض ثابت بودن y وگرنه

جوانه زنی ترک سطحی نیست چون تخمینی از طول عمر است .

a_0 : طول اولیه ترک

a_f : طول نهایی ترک (با داشتن K_{IC} بدست می‌آید)

$$K_{IC} = y\Delta\sigma\sqrt{\pi a_f} \qquad N_f = \frac{1}{Ay^m\Delta\sigma^m\pi^{m/2}}\int_{a_0}^{a_f}\frac{da}{a}$$

فقط قسمت کششی را قرار می‌دهیم .

اگر دامنه بارگذاری $-50, 250$ بود در رابطه $\Delta\sigma = 250$ نه 300 .

مسئله .

$a_0 = 5\ mm$ $\quad K_{IC} = 75\ MPa\sqrt{m}$ $\quad \sigma = 400\ MPa$

$N_f = ?$ $\quad \frac{da}{dN}\left(\frac{m}{cyc}\right) = 4\times10^{-37}\Delta K^4\ (Pa\sqrt{m})$

$$K_{IC} = m\sigma\sqrt{\pi a_f} \Rightarrow 75 = 1.12\times400\sqrt{\pi a_f} \rightarrow a_f = 9.2\ mm$$

$$N_f = \frac{1}{4\times10^{-37}(1.12)^4\pi^2(400\times10^6)^4}\left[\frac{1}{0.005} - \frac{1}{0.0092}\right] = 617$$

منحنی $\epsilon - N$:

ضریب شکل پذیری حقیقی

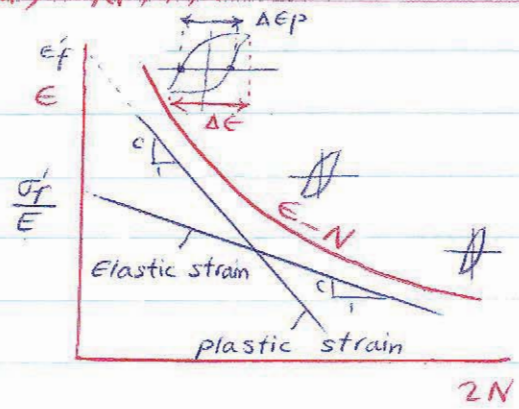
$$\frac{\Delta\epsilon_T}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^b + \epsilon_f'(2N_f)^c$$

$$\epsilon_a = \epsilon_{ae} + \epsilon_{ap} \qquad \frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2}$$

$$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \epsilon_{at} = \frac{\sigma_f'}{2}\ldots\ldots\ldots\ldots \epsilon_{ap} = \epsilon_f'(2N_f)^c \qquad \sigma_a = \sigma_f'(2N_f)^b$$

$$*\sigma_a = E\epsilon_a$$

(۸۴) ۸۷/۲/۱۰



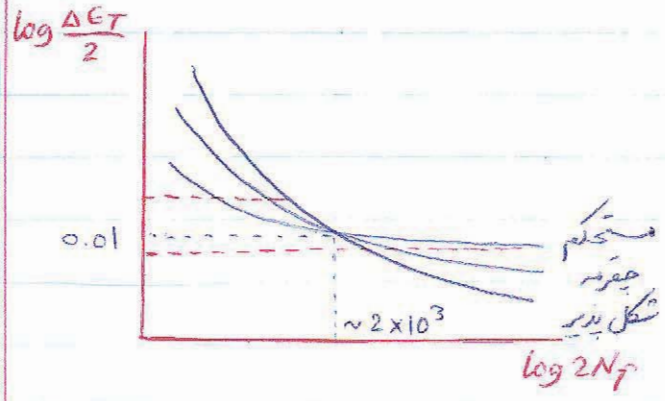
در مقیاس لگاریتمی بصورت خطی می‌شوند.

مجموع این دو خط، $\varepsilon - N$ را می‌دهد.

در دامنه کرنش زیاد (طول عمر کم) کرنش پلاستیک کنترل کننده است و در دامنه کرنش کم یا طول عمر زیاد، کرنش الاستیک کنترل کننده است.

محل برخورد این دو تا : $2N = 2000$ و $\varepsilon = 0.01$.

پس $\varepsilon > 0.01$ (دامنه کرنش)، کرنش پلاستیک کنترل کننده است.



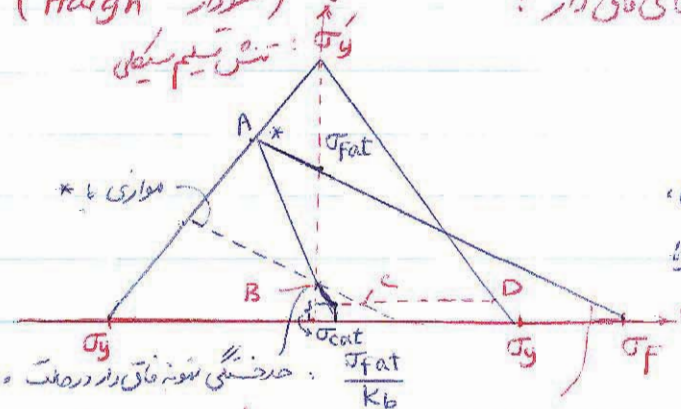
$\varepsilon > 0.01$: ماده شکل پذیر مقاومت

- خستگی بیشتری دارد. (ε_p کنترل کننده)

$\varepsilon < 0.01$: ماده مستحکم تر مقاومت

- خستگی بیشتری دارد. از $\varepsilon > 0.01$، ماده سخت تغییر شکل پلاستیک ندارد

اثر تنش متوسط بر حد خستگی نمونه های ترک دار : (نمودار Haigh)



اطلاعات لازم برای رسم

تنش تسلیم در کشش، تنش تسلیم سیکلی،

حد خستگی نمونه بدون فاق و فقی $\sigma_m = 0$ یا σ_{fat}، K_f یا K_b، σ_{cat}

و σ_F (تنش شکست کششی که باید حقیقی یا شده نمودی)

اثر تنش متوسط بر حد خستگی نمونه بدون فاق : $\sigma_a = \sigma_{fat}\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_F}\right)$

(۸۷) ۸۷/۲/۱۰

برای شروع رشد ترک نیاز به یک حداقل فاکتور شدت تنش است (آستانه‌ای) که همان ΔK_{th} است. (σ_{cat})

B : روی (در محور افقی) منحنی اندازه‌ی σ_{cat} جدا کرده و به A وصل می‌کنیم. محل تلاقی آن با خط موازی دوم = B

A ، B ، C ، D : حد خستگی نمونه فاقد دار با تنش متوسط تغییرات

خستگی خوردگی :

۸۷/۲/۱۵

* اثر خوردگی بر خستگی * اثر خستگی بر خوردگی * تشخیص خوردگی خستگی با استفاده از سطح مقطع

در محیط خورنده مقاومت داره کمتر است. محیط خورنده ← حفره های خوردگی ← نقاط تمرکز تنش زیاد

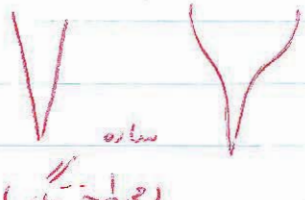
← جوانه زنی ترک تسریع میشود حضور تنش سیکلی ← آهنگ خوردگی زیاد میشود.

در محیط خورنده لایه محافظ تشکیل میشود و بارگذاری سیکلی این لایه را می‌شکند ← خوردگی زیاد میشود.

پس خوردگی و خستگی روی هم اثر دارند.

تشخیص : با توجه به مقطع شکست ← وجود محصولات خوردگی نشان از خستگی در محیط خورنده می‌باشد ؛ تعدد ترک های خستگی نسبت به محیط ساده ؛ ظاهر (شکل ظاهری ترک ها)

ابتدای ترک پهن تر است بدلیل حفره‌ای شدن



خستگی گرمائی: Thermal Fatigue

تعریف. همیشه لازم نیست منشأ خستگی خارجی باشد. یکی از منابع دیگر، تغییرات دما است.

موتور خودروها، پره‌های توربین که موقع روشن و خاموش کردن ← اختلاف دما ← کرنش

$$\ell = \ell_0 (1+\alpha\Delta T) \qquad \frac{\Delta\ell}{\ell_0} = \epsilon = \alpha\Delta T \qquad \text{(الاستیک)}$$

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

$\uparrow \Delta T, \alpha, E$ ← تنش ایجاد شده ↑

پس پارامترهای مؤثر: E ، α ، ΔT . پارامتر دیگر، ضریب هدایت حرارتی. هرچه بیشتر باشد، مقاومت به خستگی گرمایی بهتر میشود چون ΔT کمتر می‌شود.

(پایان بحث خستگی)

خزش (Creep)

منابع:

- Creep of metals at high temperature, P. Greenfield
- The plastic deformation of metals, R.W.K. Honeycomb
- Creep, viscoelasticity and creep fracture

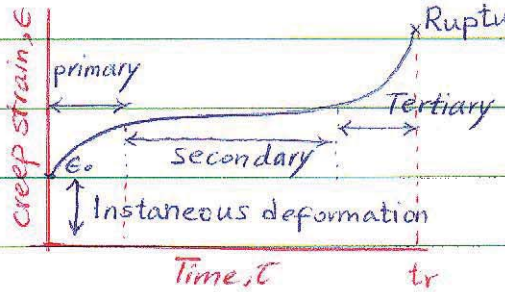
خزش: تغییر شکل تدریجی در یک ماده وقتی این ماده در دمای بالا تحت تنش ثابت قرار بگیرد. در دمای اتاق با اعمال تنش، بعد از مدتی تغییر شکل متوقف میشود یعنی وابسته به زمان نیست؛ اما در دمای بالا کرنش وابسته به زمان است و ادامه پیدا می‌کند.

منظور از دمای بالا: حدود $0.4-0.5\,T_m$ به بعد اهمیت دارد. (T_m: نقطه ذوب در مقیاس کلوین)

میله سرب، دمای اتاق برایش دمای بالائی است و تحت وزن خودش، دچار خزش می‌شود.

در دمای بالا شرایط عوض میشود: تعداد سیستم های لغزش بیشتر، تحرک اتم‌ها بیشتر، اکسایش اتفاق می‌افتد، صعود و نایجائی راحت‌تر، ممکن است استحاله فازی صورت بگیرد و...

منحنی $\varepsilon - t$:



در یک دما و تنش ثابت

با محض اعمال تنش یک کرنش ناگهانی ایجاد میشود که جزء تغییر شکل خزش محسوب میشود (ε_0)

2000 For All

Subject. (۹۰) Date. ۸۷/۲/۱۵

مرحله‌ی اول : خزش گذرا یا لگاریتمی : شیب منفی (آهنگ خزش، $\dot{\varepsilon}$) با گذشت زمان کم میشود ؛ تا به حداقل رسیده که شروع مرحله‌ی دوم است .

مرحله‌ی دوم : شیب ثابت است و طولانی ترین مرحله که ممکن است سال‌ها طول بکشد بسته به شرایط . (مرحله‌ی پایدار خزش)

مرحله‌ی سوم : آهنگ خزش افزایش می‌یابد . تنش و دما ثابت است اما تغییرات کرنش داریم .

چون دما بالاست یکسری تغییرات داریم . مرحله‌ی تغییرات باعث کاهش مقاومت به تغییر شکل خزش میشوند و مرحله‌ی افزایش . اگر دما طوری باشد که نابجائی‌ها بتوانند صعود کنند ، تغییر شکل راحت‌تر میشود . اگر دما طوری باشد که رسوب درشت شوند (درصورت وجود) نابجائی‌ها راحت‌تر حرکت می‌کنند (فاصله مؤثر لغزش زیاد میشود) . اگر دما طوری باشد که رسوب ایجاد شود مقاومت به تغییر شکل زیاد میشود . خود تغییر شکل ایجاد کارسختی می‌کند و مقاومت به تغییر شکل را زیاد می‌کند .

* واکنش هایی که مقاومت به تغییر شکل را زیاد می‌کند در رکب خزش ، کارسختی نام دارد .
* " " " " " کم می‌کند " " بازیابی نام دارد .

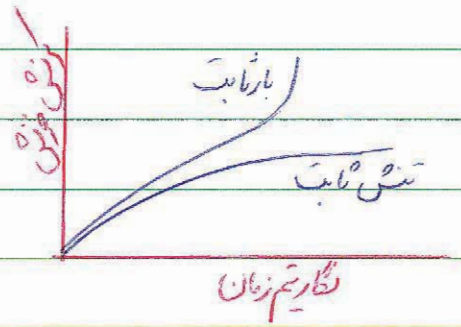
در مرحله‌ی ۱ : آهنگ خزش با گذشت زمان کم میشود ← کارسختی بر بازیابی غلبه می‌کند . (هردو را داریم)

در مرحله‌ی ۲ : توازن بین کارسختی و بازیابی برقرار شده ← آهنگ خزش ثابت است .

در مرحله‌ی ۳ : افزایش آهنگ خزش ← کنترل کننده حفره‌ها و ترک‌های ریز زیادی هستند که موجب افزایش آهنگ خزش میشود . این عوامل در مراحل قبلی ایجاد شده‌اند اما در مرحله‌ی سوم خودشان را نشان می‌دهند .

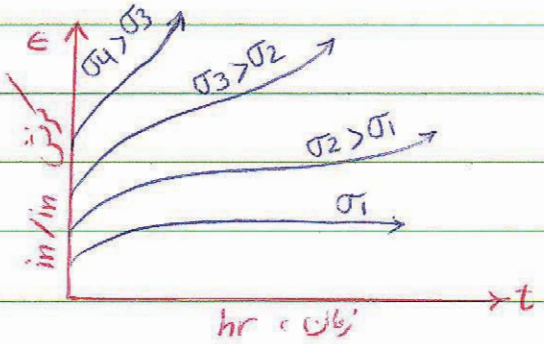
2000 For All

بخش های خزش تحت نیروی ثابت و تنش ثابت:



نیرو ثابت است ← سطح مقطع کاهش می یابد.
در تنش ثابت ← نیرو را کم کنیم.

اثر تنش و دما:



اثر دما بر بخش خزش مشابه با اثر تنش می باشد.

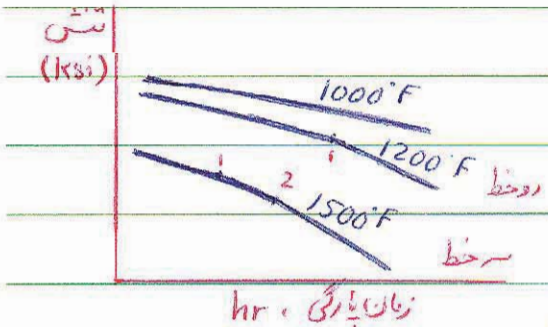
در تنش های خیلی کم، ممکن است خزش متوقف شود و به مرحله ی ۲ نرسد.

با افزایش تنش طول مراحل کوتاه میشود. در σ_4 از همان ابتدا وارد مرحله ی سوم میشویم.

در σ_1 شکست نداریم. در شرایط دما و تنش برخی از مراحل حذف میشوند.

با افزایش دما و تنش، ε_0 هم زیاد میشود. (کرنش ناگهانی)

گسیختگی تنشی: stress Rupture



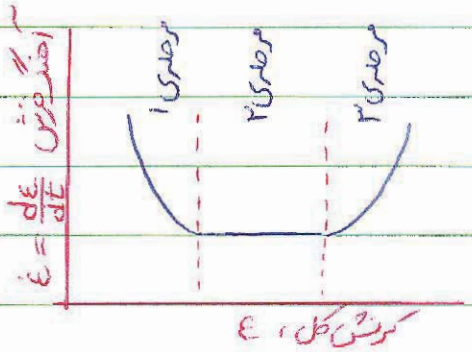
برای برخی مواد صادق است.
تغییرات خطی است.

آزمایش خزش: کمتر سال ها مطرح است ← تنش بالاتر در نظر می گیریم تا زودتر اتفاق افتد: یعنی گسیختگی تنشی. شرط خطی بودن می توان عمر تقریبی خزش را بدست آورد. خزش واقعی 10000hr خزش آزمایشگاهی 2000hr: (2000-10000 hr) (Stress Rupture)

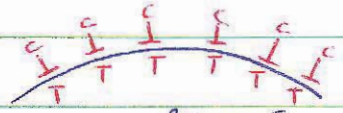
اما در آز. مکانیکی هیچ کدام نبود. در خزش واقعی تغییر شکل در محدوده‌ی ۱٪ است اما در stress Rupture تغییر شکل به ۵۰٪ هم می‌رسد. ← ابزار برای اندازه‌گیری کرنش در حالت واقعی گران‌تر است. از نظر زمان stress Rupture بهینه‌تر است.

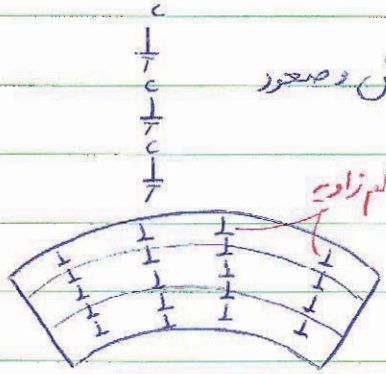
شکستگی در متن: تغییر مسیر اشاعه ترک از داخل دانه‌ها به مرز دانه‌ها. از یک زمان و دمایی به بعد مسیر از داخل دانه‌ها به مرز دانه‌ها می‌آید.

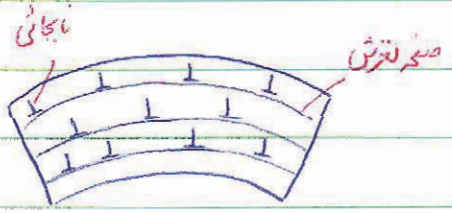
تغییرات ساختاری به هنگام خزش:



مرحله‌ی اول: علت اصلی: غلبه کارسختی بر بازیابی.







ناجائی‌های مثبت و منفی همدیگر را حذف می‌کنند ← بازیابی

در خزش (بارگذاری ناهمگن) ایجاد ناجائی از یک نوع (مثبت) ← مرزهای فرعی و کم زاویه با عریض شدن ناجائی‌ها

در خزش تغییر شکل ناهمگن است: برخی دانه‌ها خم می‌شوند و چون دما بالاست ← مرز فرعی ایجاد می‌شود

Subject. (۹۳) Date. ۸۷/۲/۱۵

کارسختی در مرحله‌ی اول ← ایجاد مرزهای فرعی که آرایشی از نابجایی‌ها هستند و حرکت می‌کنند برای حرکت مرز فرعی نیروی بیشتری لازم است نسبت به حرکت یک نابجایی‌ها. دلیل دوم: احتمال برخورد مرز فرعی با موانع نسبت به یک نابجایی بیشتر است.

پس ایجاد مرز فرعی مقاومت به تغییر شکل را زیاد می‌کند. با گذشت زمان چگالی مرزدانه‌های فرعی در مرحله‌ی اول زیاد می‌شود و پس از مدتی ثابت می‌شود.

تنش کمتر و نابالاتر ← طول مرز فرعی بیشتر خواهد بود. طول مرزهای فرعی وابسته به دما و تنش است.

مرحله‌ی دوم: لغزش مرزدانه‌ها:

علاوه بر لغزش معمولی، لغزش مرزدانه‌ها اضافه می‌شود: در مرزهایی که تنش برشی max دارد یا مرزهایی که زاویه حدود 45° داشته باشند.

روش‌های اندازه‌گیری کرنش مرزدانه‌ها:

$\epsilon_t = \epsilon_s + \epsilon_{G.B}$

ϵ_t: کرنش حرّتی، ϵ_s: لغزش، $\epsilon_{G.B}$: مرزدانه‌ها

۱) روش مستقیم: $\epsilon_{G.B} = An\bar{\ell}$

A: ثابت n: تعداد مرزها بر واحد طول

$\bar{\ell}$: میزان متوسط تغییر مکان مرزدانه‌ها در جهت تنش

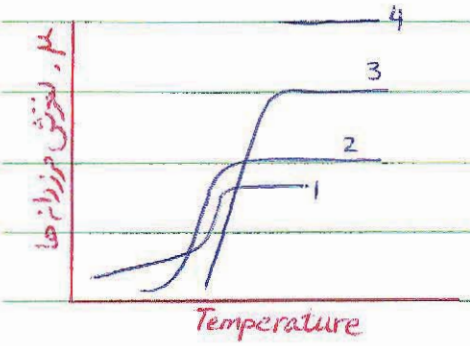
با استالوگرافی توأم است.

۲) روش غیرمستقیم: ابتدا کرنش حاصل از لغزش را حساب کرده و از کرنش کل کم می‌کنیم.

$\epsilon_{GB} = \epsilon_t - \epsilon_s$ $\epsilon_s = (1+\sqrt{2np}+n^2p^2)-1$

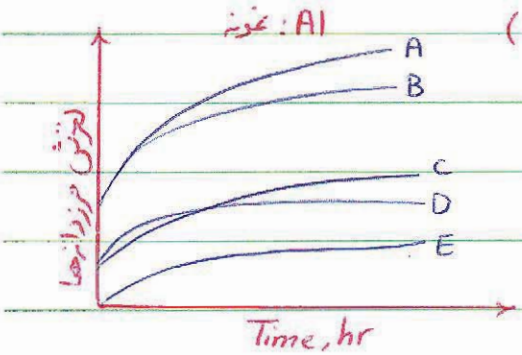
n: تعداد نوار لغزش P: تغییر مکان نوارهای لغزش

مرحله‌ی دوم: لغزش مرزدانه‌ها



با افزایش دما میزان تغییر شکل مرزدانه‌ها بیشتر میشود و در یک دمای معین با زیرکردن دانه‌ها تغییر شکل مرزدانه‌ها بیشتر میشود.

از ۱ به ۴ دانه‌ها ریزتر میشود.



A: 4.5 grain/mm , 1650 psi

B: 10 grain/mm , 1100 psi

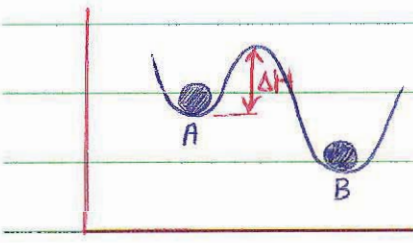
C: 9.2 grain/mm , 1100 psi

D: 4.5 grain/mm , 1100 psi

E: 4.5 grain/mm , 750 psi

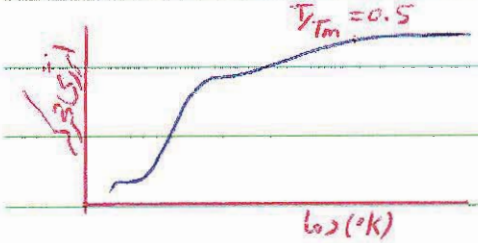
در خزش مرزدانه‌ها لغزش دارند و به تنش، دما و اندازه‌ی دانه‌ها بستگی دارد.

انرژی محرکه خزش:

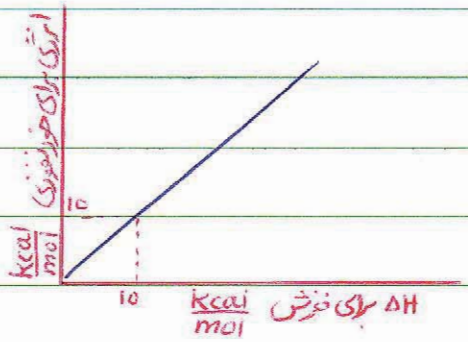


فرایند نیاز به انرژی محرکه دارد چون در دماهای بالا مطرح است.

انرژی برای غلبه بر قله انرژی، انرژی محرکه است.



از $0.5\,T_m$ به بعد، انرژی محرکه ثابت است و با دما تغییر نمی‌کند ← خزش در ΔH ثابت انجام میشود.



انرژی محرکه خزش با انرژی self diffusion یا هم تقریباً برابرند.

آهن α تراکم کمتری نسبت به γ دارد ← انرژی محرکه کمتری دارد

$$\dot{\varepsilon} = f(T, \sigma, \varepsilon, m_1, m_2)$$

T: دمای مطلق σ: تنش کششی اعمال ε: کرنش

m_1 : خواص مقاومت در داخل شبکه ، مثل مدول کشسان G و ساختار بلوری

m_2 : عوامل مقاومت میکروسکوپی ، مثل اندازه دانه و زبردانه ، انرژی نقص انباشتگی

g : آهنگ خزش در مرحله‌ی دوم

$$\dot{\varepsilon} = A \exp\left(-\frac{\Delta Hc}{RT}\right)$$

روش‌های اندازه‌گیری انرژی محرکه :

* روش اول : Dorn et al

اگر فرض شود که در فاصله حرارتی کم ، A ثابت بماند یا بعبارتی مکانیسم خزش عوض نشود :

$$\dot{\varepsilon}_1 = A \exp(-\Delta H/RT_1)$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = A \exp(-\Delta H/RT_2) \quad \rightarrow \Delta Hc = \frac{R \ln \dot{\varepsilon}_1/\dot{\varepsilon}_2}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}$$

* روش دوم : اگر فرض شود که در یک کرنش معین ، ساختار در دماهای مختلف ثابت بماند :

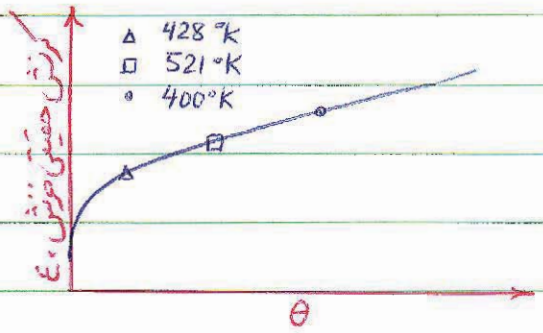
زمان رسیدن به کرنش معین مد نظر است. $\varepsilon = \alpha \left(t \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right)\right)^n$

2000 For All

$$\varepsilon = \alpha \left(t_1 \exp\left(\frac{-\Delta H}{RT_1}\right)\right)^n \qquad \varepsilon = \alpha \left(t_2 \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT_2}\right)\right)^n$$

Dorn پارامتر $\theta = t \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right)$

$$\Delta H = R \left(\ln \frac{t_2}{t_1}\right) \ln \left(\frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}\right)$$



مرحله‌ی سوم : ایجاد ترک‌ها در حفره‌های مرزدانه‌ای :

در خزش دو نوع ترک وجود دارد :

۱) ترک های گوه‌ای شکل یا نوع W (Wedge cracks)

2) ترک های کروی شکل یا نوع r

ترک‌های نوع W : معمولاً در تنش های بالا و دماهای کم و در اثر لغزش مرزدانه‌ها و در نقاط سه‌گوش مرزها بوجود می‌آیند (در اثر تمرکز تنش و باز شدن مرزدانه‌ها).

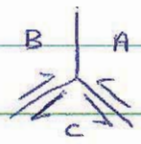
عکس ترک های W ، ترک های r است . نقاط سه‌گوش مرزدانه : ۳ تا مرز به هم می‌رسند.

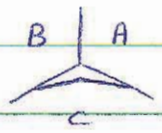
ترک های نوع W :

(a)

(b)

B و C نسبت به هم و A و C هم نسبت به هم





(c)

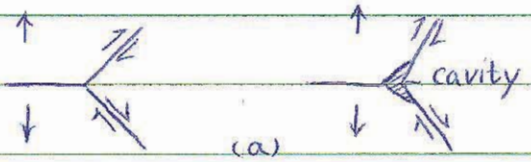
رشد ترک ها در جهت عمود بر تنش اعمالی است . در تنش ↑↓ σ ، نوع a و b رشد می کنند ولی c رشد نمی کند.

ترک های نوع ۲ :

■ در تنش های کم و دماهای بالا ■ از مرزدانه ها

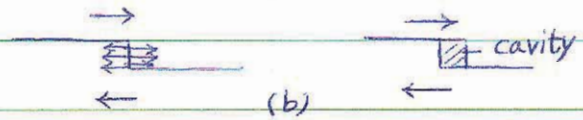
۱- تجمع تهی جای ها 2- در اثر لغزش مرزدانه ها 3- آخال ها، ذرات ناخالصی و...

مثل نوع W .



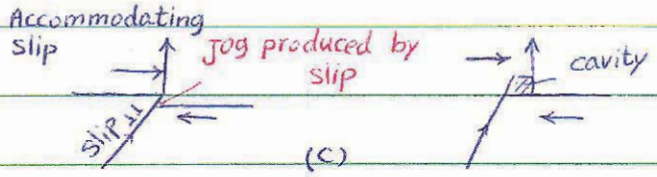
(a)

یک مرزدانه یا ناپیوستگی یا صفحه لغزش ، پله دار شده است



(b)

جاگ ایجاد میشود .



(c)

ترک خوردن مرزدانه ها : حفره های ناشی از لغزش مرز در مرزدانه ها ایجاد میشود .

عوامل موثر بر نوع ترک :

۱- تبلور مجدد : اگر حین خزش ، تبلور مجدد رخ دهد چه میشود؟ با تبلور مجدد

تراکم نابجائی کم میشود و تمرکز تنش در نقاط سه گوش کم شده و ایجاد ترک نوع W به تأخیر می افتد.

۲ـ وجود ذرات (آخال) در نقاط سه گوش: تمرکز تنش زیاد می شود و تمایل ایجاد ترک نوع W زیاد میشود.

اگر این ذرات در مرز دانه ها باشند، نابجائی ها کمتر به مرز سه گوش می رسند و نوع W کمتر ایجاد میشود اما نوع ۲ زیاد میشود.

۳ـ غیرهمگن بودن ساختار متالورژیکی (مثل آلیاژهایی که رسوب سختی شده اند):

توزیع رسوب ها در ساختار ناهمگن باشد: قسمت رسوب کمتر در مرز ← نوع W
و قسمت های رسوب بیشتر: نوع ۲.

۴ـ تنش: ترک های نوع W مکانیزم لغزش دارند ← تنش بیشتر، ترک نوع W بیشتر (در جهات 45°، تنش برشی max است)

۵ـ دما: نوع W جایی که نفوذ کم باشد یعنی دمای پائین. در دماهای بالا (نفوذ زیاد) نوع ۲.

تنش برشی لازم برای جوانه زنی ترک نوع W بر مبنای لغزش مرز دانه ای سه گوش

$$\tau = \left[\frac{3\pi\gamma_b G}{8(1-\nu)L}\right]^{1/2}$$

قطر دانه $\sim L$: طول مؤثر لغزش یا طول مرز

تنش برشی لازم برای جوانه زنی ترک نوع ۲

$$\tau = \frac{\pi}{2}\left(\frac{c}{d}\right)^{1/2}\left[\frac{4\gamma_b G}{(1-\nu)d}\right]^{1/2}$$

$2c$: ضخامت ذره در مرز — $2d$: فاصله مرز دانه ها از هم = قطر دانه

زمان لازم برای شکست بر مبنای آهنگ خزش مرحله دوم

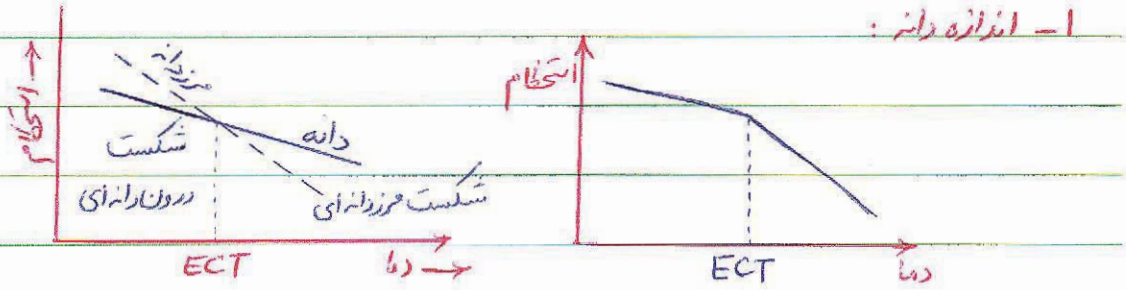
$$t_r = \frac{1}{\dot{\varepsilon}}\left[\frac{L\,\gamma\,8\pi(1-\nu)}{Gd^2}\right]^{1/2}$$

d: قطر دانه

2000 For All

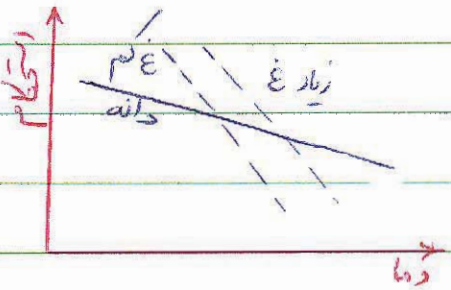
اثر عوامل مختلف بر خزش :

۱ـ اندازه دانه :



در دمای کمتر از دمای هم استحکامی (ECT) شکست از داخل دانه اتفاق می افتد و مرز دانه ها قوی ترند پس دانه های ریز استحکام بیشتری دارد . در دماهای بالاتر از ECT مرز نقاط ضعف هستند و دانه های درشت استحکام بیشتری دارند.

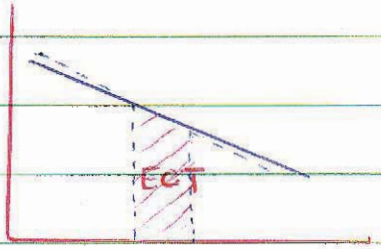
ECT : دمایی که استحکام مرز دانه و دانه مساوی باشد . ECT با یکی پارامترها تغییر می کند . از جمله این پارامترها ، $\dot{\varepsilon}$ است (آهنگ خزش)



$\dot{\varepsilon}$ زیاد ← ECT زیاد : در دماهای بالاتر هم می توان از دانه ریز استفاده کرد.

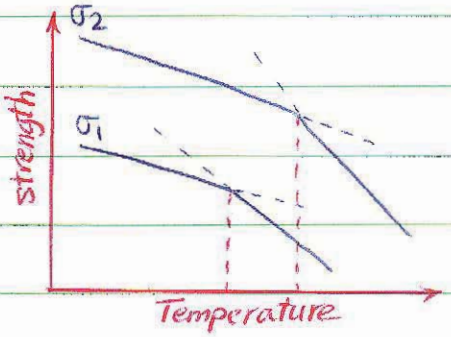
$\dot{\varepsilon}$ زیاد ← زمان رسیدن به ε خاص کمتر و در نتیجه نفوذ کم تر میشود ← ECT بالاتر رود

پارامتر دیگر ، خلوص است :



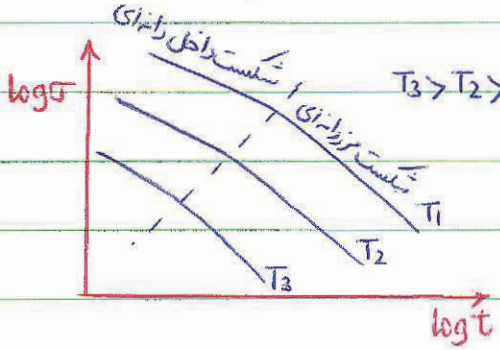
در خلوص زیاد ، دمای هم استحکامی بجای یک نقطه ، یک رنج میشود .
در خلوص خیلی زیاد ECT معنایی ندارد

پارامتر دیگر، تنش اعمالی است. تنش بالاتر رود، ECT هم بالاتر می رود.



$\sigma_2 > \sigma_1$

۸۷/۲/۲۲

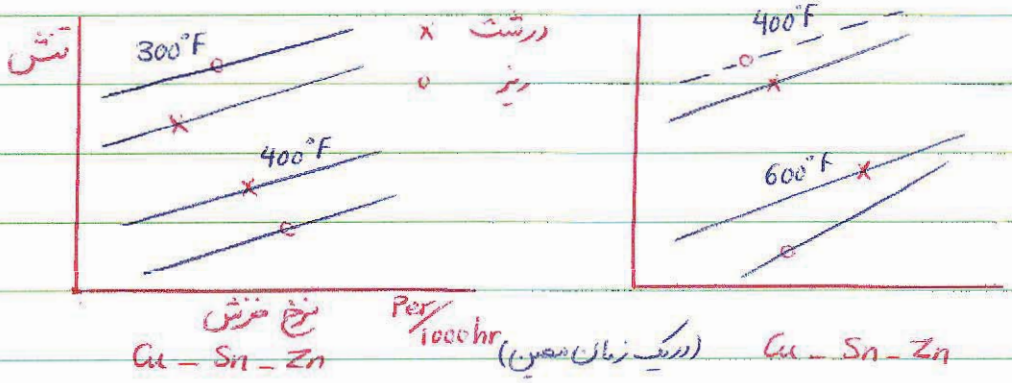


$T_3 > T_2 > T_1$

تغییرات تنش شکست برحسب زمان شکست در سه دمای T_i.

با افزایش دما، زمان شکست مرز دانه ای کم میشود.

در تنش های بالا و دمای پائین از دانه های ریز استفاده می کنیم چون زمان شکست مرز دانه ای بیشتر است.
در تنش های پائین و دمای بالا از دانه های درشت استفاده می کنیم.

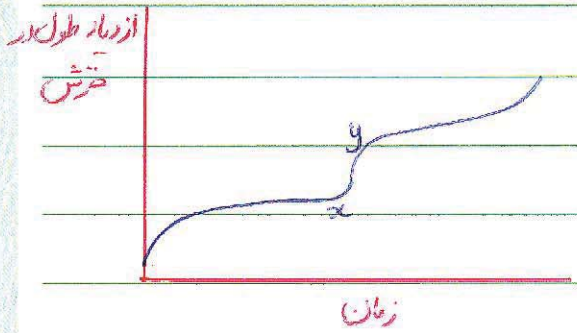


در شکل راست: در ۴۰۰°F نرخ خزش دانه درشت بیشتر است. چون دمای تبلور مجدد این آلیاژ بین 300°-400° است، آهنگ خزش تغییر کرده است.
پس دماهای کمتر از تبلور مجدد از دانه های ریز و دماهای بیشتر از تبلور مجدد از دانه های درشت استفاده می کنیم.

2000 For All

Subject. (۱۰۱) Date. ۸۷/۲/۲۲

اثر بازیابی و تبلور مجدد :

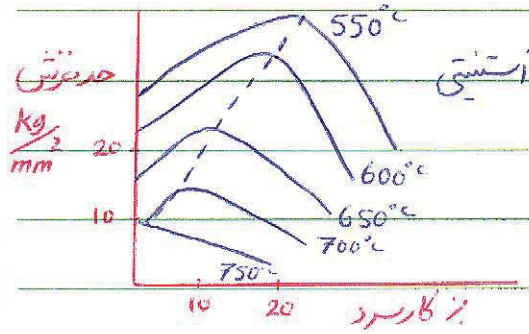


در اثر کار سرد و بعد در حرارت بالا : آنیل . اگر حین فرش این فرایند اتفاق بیفتد، چه تغیری در مقاومت فرش دیده می‌شود؟

در فاصله x تا y یک رفت ε زیاد شده است.

بری‌ها حاشان می‌دهد در این فاصله تبلور مجدد رخ داده است . دانه‌های جدید بدون تغییر شکل اند و آماده‌ی تغییر شکل هستند ← ε زیاد میشود.

اثر پیش کرنش :



تغییرات حد فرش نسبت به میزان کار سرد.

حد فرش : در تنش های کمتر از آن، فرش رخ ندهد (یا فرش قابل ملاحظه)

در 750°c از همان ابتدا کاهش داریم . در دمای 550°c به حداقل کرنش نیاز داریم تا تبلور مجدد رخ دهد که مربوط به پیک نمی است . بعد از این حداقل کرنش ، مقاومت به فرش کم میشود و پیش کرنش مضر میشود

در 750°c ، پیش کرنش کلاً مضر است .

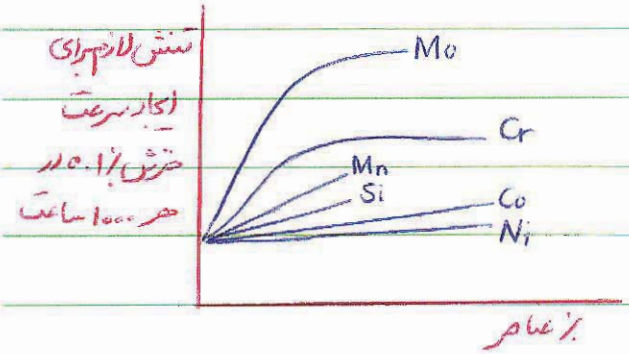
اثر عناصر آلیاژی :

عناصر آلیاژی بصورت های مختلفی هستند :

2000 For All

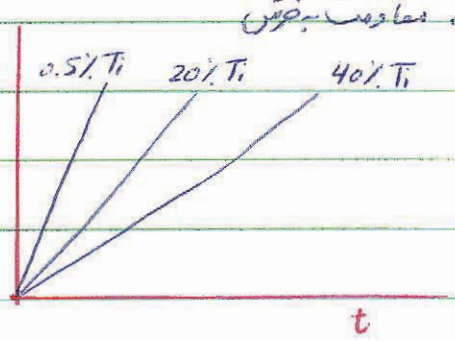
1- محلول جامد :

- مقاومت به خزش را زیاد می کند. - میزان کرنش اولیه را کاهش می دهند.
- عناصری که بازیابی و تبلور مجدد را به تأخیر بیندازند مؤثرترند.
- اثر آنها در دماهای بالا تقریباً به اندازه اثر آن ها در دماهای پایین نیست.



اثر هر عنصر متفاوت است. (میزان انحرافی که در شبکه ایجاد می کند و اختلاف پارامتر شبکه و ...)

با افزایش درصد Ti در محلول جامد Ni-Ti ، مقاومت به خزش زیاد میشود.



دلایل :

۱- جدایش برنابجائی ها و ایجاد قفل کاترل (اتمسفر کاترل)

*۲- اثر الاستیکی برنابجائی ها

۳- جدایش در مناطق نقص چیدن

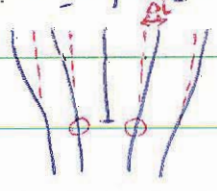
۴- واکنش با ذرات های ها و نابجائی های جاگذار

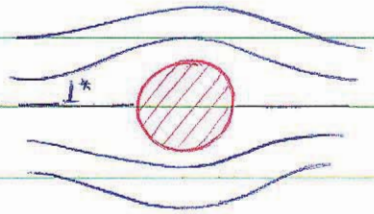
۵- تشکیل نظم کوتاه برد و دور برد

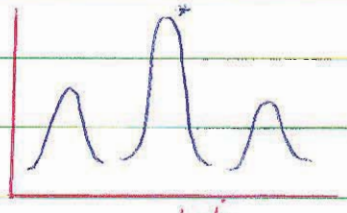
۶- جدایش به مرزدانه ها

* عناصر آلیاژی زیر خط نابجائی ← در محدوده نابجائی ها، لایه های اتمی بهم نزدیک ترمیشوند.

به اندازه ی $\Delta\rho$ باید نابجائی بیشتر حرکت کند یعنی مقاومت بیشتر.





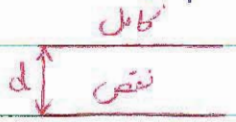


بسته به محل نابجائی، نیرو متفاوت است.

این دو مکانیزم مربوط به اثر الاستیک بر نابجائی هاست.

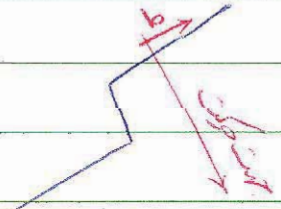
۳) متقابل چیدن در شبکه های فشرده بوجود می آید. مرز مناطق نقص و مناطق کامل را نابجائی های جزئی تشکیل می دهد که این نابجائی ها در فرایند تغییر شکل (صعود و ...) شرکت نمی کند. اگر فاصله منطقه نقص کوتاه تر باشد احتمال ترکیب دو نابجائی جزئی وجود دارد ← نابجائی کامل ← مقاومت به تغییر شکل کم میشود.

با افزودن عناصر آلیاژی، انرژی نقص چیدن کاهش می یابد. (بصورت محلول جامد باشد) پس d زیاد میشود [وسعت منطقه نقص بیشتر] پس احتمال ترکیب نابجائی جزئی کم میشود و مقاومت به خزش زیاد میشود.



۴) برای ایجاد ترک نیاز به حرکت تهی جای ها و هم پیوستن آنها می باشد.

اگر اتم بصورت محلول جامد داشته باشیم، تهی جای ها پر میشود و احتمال ایجاد ترک نوع ۲ کم شده و مقاومت به خزش بیشتر میشود.

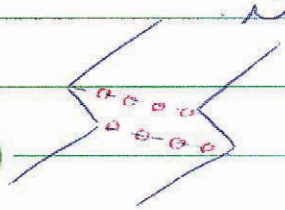


جاگ در نابجائی پیچی ← پله مانع حرکت نابجائی است.

در نابجائی مارپیچ این اتفاق نمی افتد چون ماهیت جاگ هم مارپیچ است.

اگر قسمت پله ای هم زمان با حرکت نابجائی بتواند صعود کند، کل نابجائی می تواند حرکت کند.

با صعود نابجائی، Vacancy تولید می کند ← این منطقه با وجود اتم بصورت محلول جامد این تولید مشکل میشود و حرکت جاگ مشکل خواهد شد.

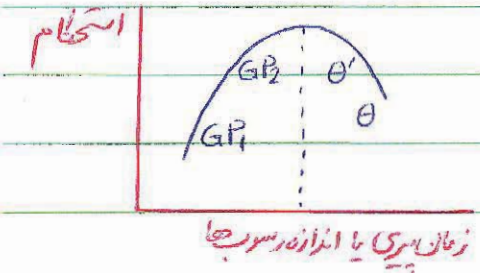


2000 For All

۶) مانع حرکت مرزدانه‌ها (لغزش) میشوند و ترک نوع W شکل نخواهد گرفت.

2 ـ رسوب‌ها:

اتم حل شونده بصورت رسوب باشد. انتظار می‌رود مقاومت به خزش زیاد شود. کنث رسوب سختی سطح میشود



باید قبل از پیک سختی باشیم تا مقاومت به خزش زیاد باشد.

$\tau = \frac{2\alpha Gb}{d}$ $\quad o \xleftarrow{d} o$

از GP_1 ـ GP_2 تعداد رسوب زیاد و d کم ← استحکام زیاد

از پیک به بعد، رسوب‌ها درشت میشوند و d زیاد میشود ← استحکام کم.

(بیش از این رسوب نداریم)

در دمای بالا، اگر قبل از پیک باشیم و در حین خزش رسوب ایجاد شود به نفع ماست و مقاومت به خزش زیاد میشود.

رسوب‌ها اگر در مرز قرار بگیرند: جلوگیری لغزش مرزدانه‌ای و ایجاد ترک نوع W و...

3 ـ ذرات پراکنده: dispersion hardening

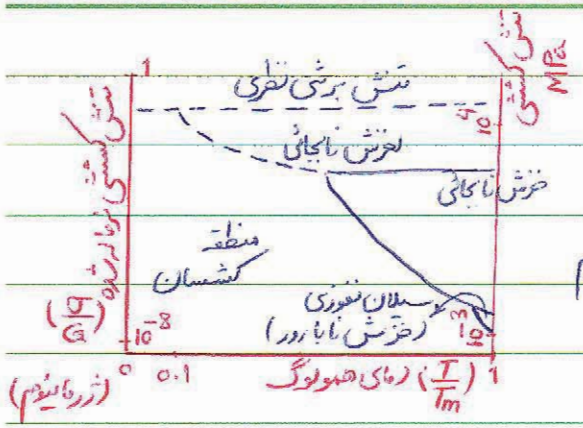
خود اتم نیست و بصورت ذره است. معمولاً از ذرات ژراکسیدی استفاده می‌کنند: Al_2O_3

این ذرات روی مسیر لغزش میشود و مقاومت در برابر حرکت نابجایی‌ها بیشتر شده و استحکام زیاد میشود. هرچه فاصله بین ذرات پخش شده کمتر باشد، استحکام بیشتر میشود.

ذرات پراکنده در دمای بالا مقاومتشان به حل شدن بیشتر است ← اثرشان بیشتر از رسوب‌هاست. یعنی در دمای بالا مقاومتشان را حفظ می‌کنند.

اما رسوب‌ها بعد از مدتی به هم می‌پیوندند و استحکام را کم می‌کنند.

مکانیزم های خزش :



مکانیزم هایی توانند مستقل باشند. سریع ترین مکانیزم در این حالت کنترل کننده است : مقاوم ترین مکانیزم اما اگر مکانیزم ها با هم وابسته باشند، کندترین مکانیزم کنترل کننده است.

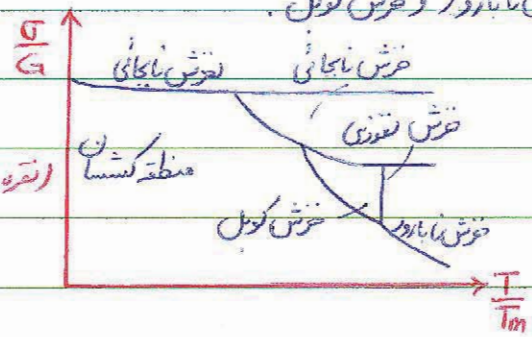
با توجه به وابستگی آهنگ خزش به دما می توان منحنی تنش - دما را رسم کرد. که نقشه های مکانیزم تغییر شکل نامیده میشود.

در دماهای بالاتر، نفوذ راحت تر انجام می شود. در تنش های زیاد به حد استحکام تئوری می رسیم.

دما را با T_m (نقطه ذوب) و تنش را نسبت به استحکام برشی (G) نرمالیزه می کنیم.

در منطقه ی کشسان تحولی نداریم.

خزش تنش نفوذی به دو منطقه تقسیم می شود : خزش ناپایدار و خزش کوبل.



با داشتن آهنگ خزش، می توان مکانیزم خزش را فهمید.

این نقشه برای راهنمایی های متفاوت، فرق می کند.

خزش ناپایدار :

با حرکت برگشت ناپذیر ناپایداری ها در اثر نفوذ تهی جای ها یا لغزش تقاطعی رخ می دهد (یا صعود یا تقاطعی شدن - ناپایداری : پله ای، پیچی). تهی جای ها با نفوذ تونلی در دمای متوسط یا با نفوذ حجمی در دماهای بالاتر نفوذ می کنند. نفوذ تونلی : در محدوده ی خط ناپایداری / نفوذ حجمی : از کل بالک.

در این حالت : $\dot{\varepsilon} = K\sigma^n$

n تا الان 40 هم گزارش شده است.

- n : بین 4 تا 6 در تنش های متوسط
- n : بین 8 تا 12 در تنش های بیشتر

خزش ناپایدار نسبت به نفوذی در دماهای کمتر می تواند اتفاق بیفتد.

در مورد ناپایداری ساده ← صعود ناپایداری پیچی ← لغزش تقاطعی

این خزش، کنترل شده با صعود و تقاطع هم نامیده می‌شود.

شخصی به نام Ashby این خزش را به ۴ دسته تقسیم کرد:

۱- لغزش + صعود کنترل شده با نفوذ شبکه‌ای (خزش دمای بالا) : حرکت نابجایی در بالک

۲- لغزش + صعود کنترل شده با نفوذ هسته‌ای (خزش دردمای پایین) : در اطراف هسته نابجایی

۳- خزش Harper-Dorn

۴- نقض قانون توانی

1,2 ← کلیه تئوری‌ها در این زمینه اساساً ← وقتی مواد در دمای بالا تحت تغییر شکل قرار گیرند، با اعمال تغییر شکل سخت می‌شوند (کارسختی) و با گذشت زمان نرم می‌شوند. دو نوع فرایند را داریم:
کارسختی - بازیابی (آزاد شدن نابجایی‌ها از موانع با صعود یا لغزش تقاطعی) وقتی تعادلی یا توازنی بین کارسختی و بازیابی بوجود آید، خزش ادامه می‌یابد.

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

در تئوری جدید ← شبکه‌ی نابجایی‌ها را سه بعدی می‌گیرند و فرض می‌کنند، فرایند خزش با بازیابی و کارسختی که بطور پی در پی اتفاق می‌افتند کنترل می‌شود. چون دما بالاست ممکن است نابجایی آزاد شود یعنی بازیابی ← تغییر شکل انجام می‌شود. وقتی ماده گرم می‌شود در اثر نوسانات گرمایی تعدادی از این تقاطع‌ها شکسته می‌شوند (آزاد شدن نابجایی) و معمولاً در تقاطع‌هایی که نابجایی‌های بلند دارند این اتفاق می‌افتد. نابجایی آزاد شده تا رسیدن به تقاطع پیدده حرکت می‌کند ← تغییر شکل (خزش) ← کارسختی. این فرایند مدام انجام می‌شود.

3 ← برخی نتایج نشان می‌دهد در تنش‌های خیلی کم خزش نابجایی اتفاق می‌افتد اما $\dot{\epsilon}$ با σ رابطه‌ی خطی دارد نه توانی. این پدیده در ابتدا توسط این دو تقریر شده و در مورد Pb و Al دیده شده. مکانیزم: خزش در تحت تنش‌های خیلی کم می‌دهد که چگالی نابجایی‌ها با تنش تغییر نمی‌کند.

$$\dot{\epsilon} = \rho \frac{D_{eff} G \Omega}{KT} \cdot \frac{\sigma}{G}$$

م: جگالی نابجایی D_{eff} : ضریب نفوذ موثر G: مدول برشی Ω: حجم اتمی

این پدیده بعدها در دیگر فلزات نیز دیده شد.

۴ ← در تنش های باندازه‌ی کافی بالا، مشاهده شده که قانون توانی صادق نیست و آهنگ خزش $(10^{-3}G)$ نسبت به قانون توانی افزایش می‌یابد. چون: ناشی از انتقال از خزش (فرایند خزش) از خزش کنترل شده با صعود - سیلان کنترل شده با لغزش که با تنش بطور exp تغییر می‌کند.

$$\dot{\epsilon} \propto \exp(B\sigma)$$

* خزش نفوذی:

$$\dot{\epsilon} = 14\,\frac{\sigma\Omega}{KT}\,\frac{1}{d^2}\,D_V\left(1+\frac{nA_B}{d}\cdot\frac{D_B}{D_V}\right)$$

تنش می‌تواند باعث سیلان نفوذی در داخل یا اطراف مرزدانه‌ها [داخل دانه یا اطراف مرزدانه] شود. این نوع سیلان، خزش نفوذی نام دارد. اگر هر دو نوع سیلان [" " "] آهنگ خزش از رابطه‌ی بالا بدست می‌آید.

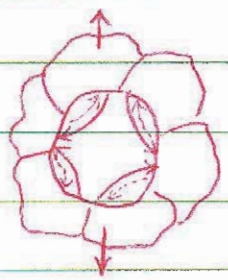
d: قطر دانه D_V: ضریب نفوذ حجمی D_B: ضریب نفوذ مرزدانه‌ای

A_B: سطح مقطع موثر مرزدانه‌ای برای انتقال نفوذی.

اگر جمله‌ی دوم بزرگتر از ۱ باشد، مکانیزم کوبل حاکم است. (جمله داخل پرانتز)

اگر کوچکتر باشد، مکانیزم نابارو - هرینگ کنترل کننده است (نفوذ در حجم اتفاق می‌افتد)

خزش نابارو - هرینگ:



--- : جهت حرکت مواد

— : جهت حرکت نهی جای‌ها

در تنش های پائین و دماهای بالا (جائیکه آهنگ خزش با تنش اعمالی تغییر می‌کند) این لایه فرض کردند که فرایند خزش با نفوذ اتمی ناشی از تنش کنترل شود. این نفوذ شامل مهاجرت نهی جای‌ها

از مرزهای کَت کشش به مرزدانه‌های کَت فشاری باشد. هم‌زمان اتم‌ها در جهت عکس حرکت می‌کنند. این دو نفوذ باعث افزایش طول دانه‌ها و نهایتاً خزش خواهد شد.

شیب خطی تی‌جای‌ها ناشی از کاهش انرژی تشکیل تی‌جای‌ها در مرزهای کَت کشش و افزایش انرژی در مرزهای تحت فشار می‌باشد.

$$\dot{\epsilon}_s \approx \frac{7\sigma D_V b^3}{KTd^2}$$

b: بردار برگرز

رابطه مربوط به مرحله‌ی دوم است.

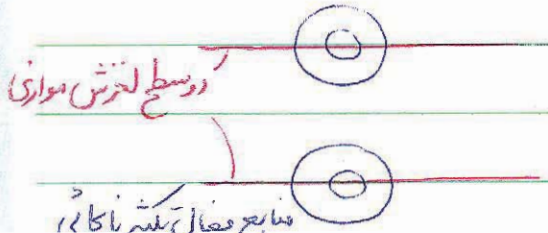
خزش کوبل:

شامل نفوذ اتمی یا یونی در طول مرزدانه‌ها (محدوده‌ی مرزدانه‌ها) است.

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{50 D_{GB} \sigma b^4}{KTd^3}$$

این رابطه به d (اندازه‌ی دانه) حساس‌تر است چون توان d، 3 است اما در رابطه‌ی قبلی 2

تئوری صعود: Weertman



در این مکانیزم خزش، حضور لغزش نیز در حین مرحله پایدار خزش با منابع مختلف فرانک - رید در صفحات لغزش مختلف و موازی توضیح داده می‌شود.

در دماها و تنش‌های پایین، حلقه‌های صادره توسط منابع فرانک - رید بعلت نیروی دافعه حلقه‌ها متوقف شده و منبع نیز نابجایی بیشتری صادر نخواهد کرد. اما در دمای بالا حلقه‌های نابجایی قادر هستند عمل صعود را انجام داده و یا همدیگر را حذف کنند ← ارائه صدور حلقه‌های بیشتر امکان‌پذیر می‌شود.

در این تئوری فرایند کنترل کننده‌ی سرعت خزش، صعود نابجایی‌ها می‌باشد و رابطه زیر توسط Weertman ارائه شده است:

در تنش های کم: $\dot{\epsilon} = \frac{c\pi^2\tau^{4.5}D}{b^{0.5}N^{0.5}G^{3.5}KT}$ $c \sim 0.25$

هم در تنش های بالا و هم در تنش های کم:

$\dot{\epsilon} = \frac{c'\pi^2\tau^2}{G^2b^2}\sinh\left(\frac{\sqrt{3}\tau^{2.5}b^{1.5}}{8G^{1.5}N^{0.5}KT}\right)$ $c' \cong 1$

سایر مکانیزم های اجتماعی:

ممکن است در اثر برخورد نابجایی ها با هم، خط نابجایی جاگ دار شود. در مورد نابجایی پیچی، جاگ ها مجبورند بطور غیر Conservative حرکت کنند ← پشت آن نابجایی، تهی جای ایجاد می شود. این تهی جای ها حرکت نابجایی های جاگ دار را محدود می کنند مگر اینکه بتوانند آزادانه حرکت کنند. پس فرایند کنترل کننده، سرعت نفوذ تهی جای ها می باشد که در رمای بالا این نفوذ اتفاق خواهد افتاد.

۸۷/۲/۳۱

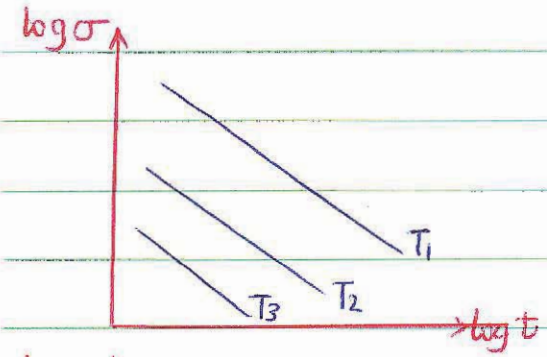
خزش در رمای پائین:

در مرحله ۱، خزش گذرا (لگاریتمی) داریم. بعد از تغییر شکل ناگهانی اگر عامل محرک (حرارتی) را ثابت باشیم می توانند نابجایی از موانع آزاد شوند و به حرکت ادامه دهند ← خزش در رمای پائین با لغزش معمولی رخ می دهد که با مانع کوچک هم نابجایی متوقف میشود. مانع کوچک: توده نابجایی، نابجایی ساکن در مجاورت این نابجایی ها، تنش اصطکاکی (پیرز - نابارو)

$\epsilon = \frac{KT}{\left(\frac{\partial\sigma}{\partial\epsilon}\right)bd\ell}\ln(\gamma_{t+1})$ or $\epsilon = \alpha\ln(\gamma_{t+1})$

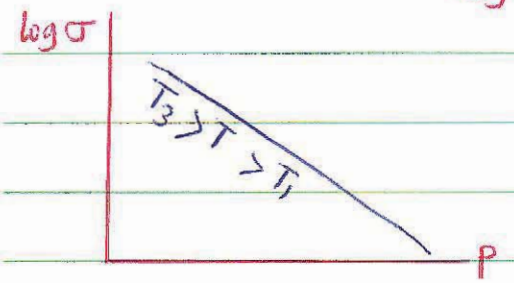
2000 For All

پارامترهای دما ـ زمان یا پارامترهای اصلاح:



فرض: در این دما در خطوط شکستگی وجود ندارد.

پارامتر لارسون ـ میلر

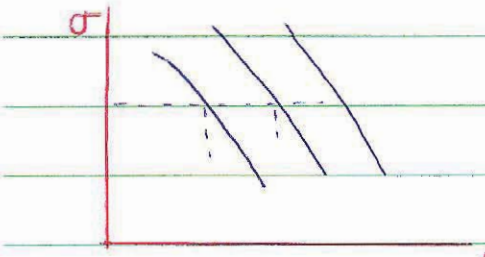


P در یک تنش ثابت مقدار ثابتی دارد.

$$P = T(C + \log t) \quad ; \quad C \sim 20$$

C ثابت و وابسته به ماده

پارامتر دیگر:



$$P = \log t_R - \int_0^T \left(\frac{\partial \log t_R}{\partial T}\right)_\sigma dT$$

t_R : زمان شکست ; P در تنش ثابت ثابت است.

$$P = \log t_R + 0.01T \qquad \left(\frac{\partial \log t_R}{\partial T}\right)_\sigma = 0.01 \ 1/^\circ F$$

رابطه‌ی دیگر: $P = \log t_R + (A + B\log\sigma)(C + DT)T$ = ثابت در تنش ثابت

رابطه‌ی دیگر: $P = \log t_R - \frac{\Delta H}{2.3RT}$ Sherby - Dorn

با داشتن این روابط، اگر عمر قطعه را در یک شرایط کاری داشته باشیم، می‌توان عمر را در شرایط دیگر بدست آورد.

مثال. ماده‌ای طراحی شده برای زمان بالا ($700^\circ K$) برای طول عمر 200 hr . در تنش اعمالی ثابت، اگر دمای کاری $900^\circ K$ شود، طول عمر را بدست آورید.

• بیشتر از پارامتر لارسون ـ میلر استفاده می‌کنیم.

$$P = T(C + \log t_R)$$

$$= 700(20 + \log 200) = 16100\ (K \cdot hr)$$

تنش ثابت است، پس P ثابت است.

$$16100 = 900(C + \log t_R) \quad ; \quad 20 + \log t_R = \frac{161}{9}$$

اعداد واقعی نیست.

اثبات رابطی لارسون ـ میلر در کتاب است. اگر C را نداشتیم با انجام آزمایش در دو مرحله می‌توان آن را بدست آورد.

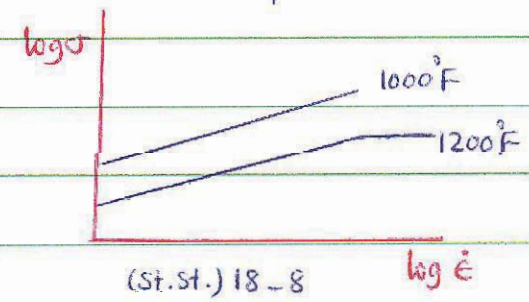
زمان شکست را در دو دمای T_1 و T_2 بدست می‌آوریم.

$$C = \frac{T_2 \log t_2 - T_1 \log t_1}{T_1 - T_2}$$

اثر تنش بر آهنگ خزش در دمای ثابت:

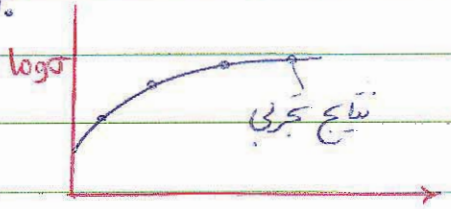
$\dot{\epsilon}_1$ ، σ_1 : ثابت

$$\dot{\epsilon} = c\,\sigma^n \quad ; \quad \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma_1}\right)^n$$



دمای $1000^\circ F$ رابطه صادق است اما برای $1200^\circ F$ صادق نیست.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \sinh \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad \text{or} \quad \dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \frac{\exp(\sigma/\sigma_0) - \exp(-\sigma/\sigma_0)}{2}$$



برمبنای انرژی تحریک بدست آمده است $\log\left(\frac{\dot{\epsilon}}{T}\right) = -\frac{a}{T} - b + \gamma\sigma$

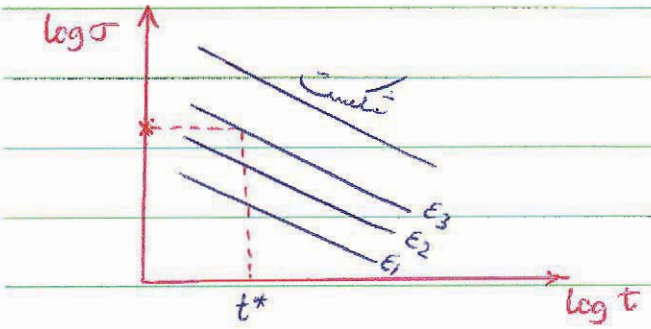
a, b : ثوابت مستقل γ = ثابت وابسته به دما $\rightarrow \dot{\epsilon} = K\exp(\gamma\sigma)$ (در T ثابت)

چه زمان از کدام فرمول استفاده می کنیم ؟

- در دمای بالا، تنش کاری کم میشود. در تنش های پائین از رابطه ی Sinh استفاده می کنیم چون توانی صادق نیست.
- در تنش های بالا، محاسبات Sinh و رابطه ی آخر (exp) یکسان میشود.
- اگر مقدار تنش خیلی کم باشد : $\sinh x \approx x$:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \frac{\sigma}{\sigma_0} = K\sigma \quad \text{(خطی)}$$

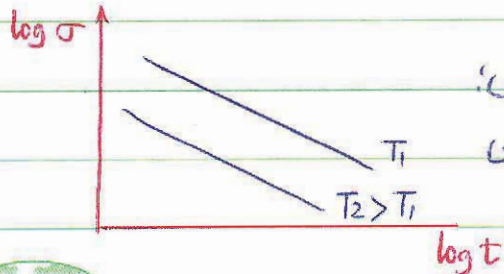
مبنای های طراحی در خزش :



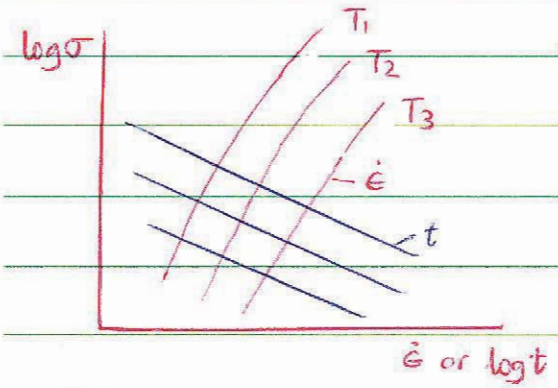
یکی از مبنای ها، $\sigma - t$ در مقیاس لگاریتمی است. قبلاً مبنای شکست را داشتیم.

قبل از اینکه قطعه به زمان t^* برسد باید قطعه عوض شود. اگر تنش مجاز به ما تحمیل شود.

اگر بخواهیم تنش مجاز را تعیین کنیم، باید در زمان t'، مثلاً کرنش ε_2 را در نظر بگیریم $\rightarrow \sigma$ بدست می آید.

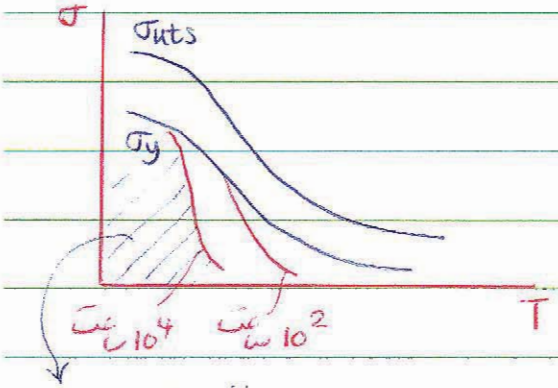


این مبنای ها مربوط به شکست هستند نه کرنش خاص؛ اگر زمان را داشتیم، σ را و اگر σ را داشتیم زمان شکست را تعیین می کنیم. قبل از رسیدن به این زمان، قطعه باید عوض شود.



در یک تنش معین و دمای معین، $\dot{\varepsilon}$ را بدست می آوریم و اگر کرنش معینی مد نظر است، زمان را می توان بدست آورد.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$



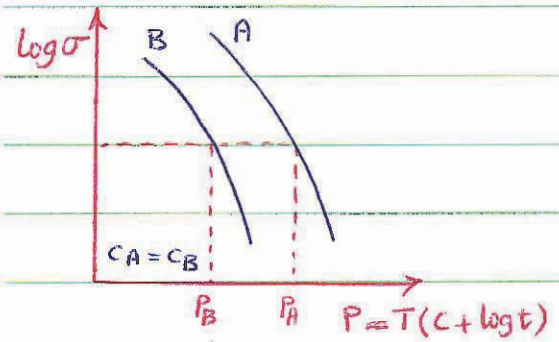
اگر زمان شکست در یک شرایط کاری خاص را داشته باشیم. یعنی σ_y را هم داریم تا طوری طراحی کنیم که ماده تسلیم نشود.

منطقه ی ایمن برای زمان 10^4 ساعت

2020 For All

حل مسئله از خودش:

۱) پارامتر اصلاح ـ مسئله حل شده کتاب

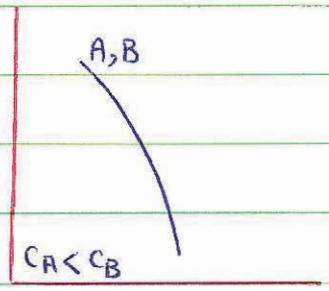


یک تنش ثابت یا یک طول عمر در نظر می‌گیریم.

$P_A > P_B$

$T(C_A + \log t_A) = T(C_B + \log t_B)$

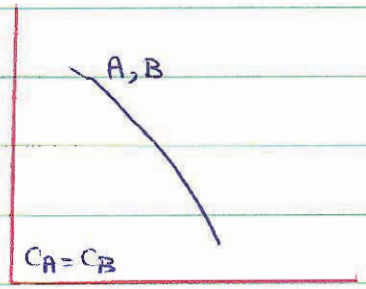
$\rightarrow t_A > t_B$ ماده A مناسب‌تر است



$C_A < C_B \rightarrow \log t_A > \log t_B$

$\rightarrow t_A > t_B$

طول عمر ماده‌ی A بیشتر است.



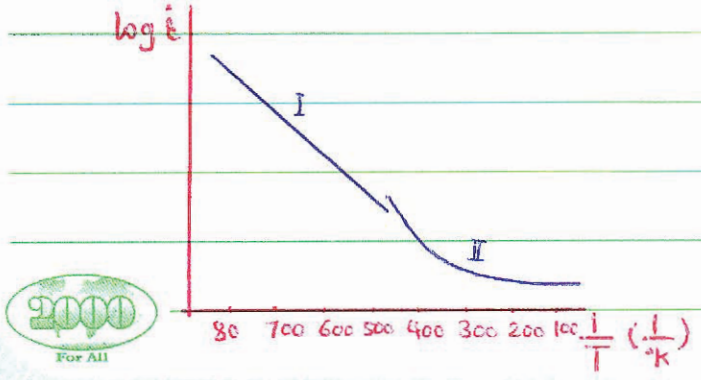
$P_A = P_B$ ، $C_A = C_B$

$\rightarrow \log t_A = \log t_B$

$\rightarrow t_A = t_B$

A و B فرقی نمی‌کنند.

۲) مسئله ۱ ـ فصل ۵



$\dot{\epsilon}_s = A \exp(-\frac{\Delta H}{RT})$

$T_m = 1000°K$

اعداد روی محور، خود دما است

کار کدامیک درست است؟

در مقیاس لگاریتمی، رابطه خطی است. تحقق II تایک جایی خطی است و از یک جدی به بعد غیرخطی می‌شود چون ΔH از آنجا به بعد ثابت نخواهد بود.

پس کارهرد و تحقق درست است.

شیب: $\frac{-\Delta H}{2.3R}$

3) مسئله 7 از فصل 5.

$$\dot{\varepsilon}_s = K\sigma^n \exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right)$$

در تنش ثابت: $\dot{\varepsilon}_s = A\exp\left(-\frac{\Delta H}{RT}\right)$ $T_1 = 550K$ $T_2 = 750K$

هر دوی این دماها، $T > 0.5T_m$ است ← ΔH ثابت خواهد بود. ΔH معلوم است.

با دو معادله دو مجهول، $\dot{\varepsilon}_i$ و A بدست می‌آید.

4) مسئله 9 از فصل 5.

A: $t_R = 800hr$ $T = 700^\circ C$

B: $t_R = 100hr$ $T = 725^\circ C$ $C = 20$

P ثابت خواهد بود.

$P_A = 973(20 + \log 800) = 22285$

$22285 = 998(20 + \log t_A) \rightarrow t_A = 213\ hr$

پس لازم است در مارده‌ی A تغییری ایجاد کنیم.

مسئله 7 از تمرین‌ها:

$10000\ psi$, $t = 3\ years$, $T = 427^\circ C$

$\dot{\varepsilon}_p = 3\times10^{-40}\ \sigma^8\ (psi)\ \frac{in}{hr}$, $E = 22.5\times10^6\ psi$

در واقع این مسئله خزش از تنش است.

$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p =$ عدد ثابت

$\rightarrow \varepsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_p =$ " $\rightarrow \frac{d\sigma}{Edt} = -\dot{\varepsilon}_p$

$3\times10^{-42}\ \sigma^8 = -\frac{1}{E}\frac{d\sigma}{dt}$

2000 For All

که رحسب زمان حل کرده

$$\sigma^{-8}\, d\sigma = -3\times10^{-42} \times 22.5\times10^{6}\, dt$$

$$\int_{10000}^{\sigma} \sigma^{-8}\, d\sigma = -3\times10^{-42} \times 22.5\times10^{6} \int_{0}^{3\times365\times24} dt \quad \rightarrow \text{برست می آید}$$

σ کمتر از 10 ksi خواهد شد چون دیاگرام است ← ناکائی ها از شیت موازنه آزاد می شوند.

دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی و علم مواد

نمونه مسائل

خواص مکانیکی (۲)

تدوین:

دکتر علی‌اکبر اکرامی

۸۴۱۰۴۳۲۸

شهریور ۸۵

فصل اول: مبحث شکست

۱-۱- صفحه‌ای بزرگ دارای ترکی بیضی‌شکل با مشخصه $\frac{a}{b}=4$ می‌باشد (a نصف قطر بزرگ و b نصف قطر کوچک است). اگر این صفحه تحت تنش σ عمود بر محور بزرگ ترک قرار گیرد

الف- تنش در راس ترک را بدست آورید

ب- اگر این ترک به یک ترک دایره‌ای شکل و به شعاع a تغییرکند، درصد تغییرات تنش در راس ترک را محاسبه کنید

۱-۲- فولادی دارای $G=200\frac{lb}{in}$ می‌باشد. میزان تنش شکست در یک صفحه نازک که $12in$ عرض دارد و شامل ترکی مرکزی به طول $2a=0.5in$ می‌باشد را حساب کنید ($P-Stress$)

الف- اگر طول ترک $2a=2in$ باشد، میزان تنش شکست چقدر است

ب- اگر ضخامت صفحه به $5in$ افزایش یابد، G به $100\frac{lb}{in}$ کاهش می‌یابد. تنش شکست را در این حالت برای ترکی به طول $0.5in$ بدست آورید

۱-۳- ورقی از فولاد دارای استحکام کششی $1950MPa$ می‌باشد. اگر این ورق دارای ترکی مرکزی به طول $2a=4mm$ و عمود بر جهت تنش باشد، درصد کاهش استحکام را برای این فولاد بدست آورید

$$E=200GPa,\gamma_s=2\frac{J}{m^2},\gamma_p=2\times10^4\frac{J}{m^2}$$

۱-٤- ورقی از شیشه به ابعاد $2m\times200mm\times2mm$ دارای ترکی مرکزی و به موازات عرض ورق می‌باشد. نیروی $500Kg$ که باعث تنش کششی می‌شود، عمود بر صفحه ترک اعمال می‌شود. مینیمم طول ترکی را که منجربه شکست قطعه می‌شود در دو حالت زیر بدست آورید

الف- حالت $P-Stress$

ب- حالت $P-Strain$

$$E=60GPa,\gamma_s=0.5\frac{J}{m^2},\upsilon=0.25,\sigma_F=170MPa$$

۱-۵- ماکزیمم تنش کششی ناشی از خمش ماده‌ای حدود $39KPa$ می‌باشد. اگر مدول الاستیسیته به سرعت کرنش وابسته باشد و رابطه $E_{(MPa)}=1.11\dot{\varepsilon}^{0.29}$ برقرار می‌باشد. طبق این رابطه و سرعت کرنش