

۱- تخریب و ازکار افتادگی قطعات در صنعت

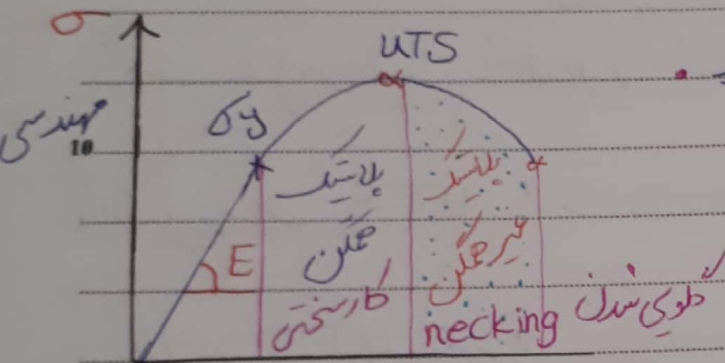
۲- تخریب مکانیکی

wear , Corrosion

سایش خوردگی

torrosion, Fatigue, Creep

ازکار افتادگی Failure می شود



Elastic zone

$$\Delta V = 0$$

$$V = CTE$$

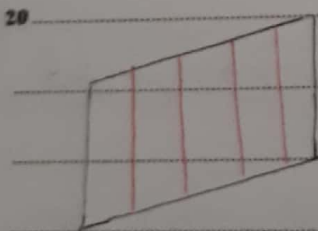
hardness سختی

stifness سفتی

Strength استحکام

مقاومت جسم در برابر فرورونده را سفتی می گویند

Functional graded Materials مواد مرتبشده



روش متالورژی بود P/M layer by layer

در کوره ها خواص لایه به لایه

اجزای درجا

Al SiO<sub>2</sub>

تغییر می کنند یا در صنایع هوافضا

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

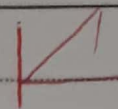
$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

حقیقی

هندسی

Fracture

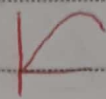
شکست ترد



شکست ترد

Rupture

شکست نرم



شکست نرم

Creep

خزش

تغییر شکل پلاستیک مواد در دماهای بالاتر ۰.۴ - ۰.۴۰۰ نقطه

زوب (بر حسب کلون) که این در دمای راهولوگ می نامند

و تنش زیر UTS است. تحت تنش ثابت

بالای UTS سریع می شکند اما زیر UTS بصورت تدریجی

می شکند. در خزش نیرو کم و دما بالاست و باعث کشش

ماده می شود. و تنش ثابت است تا تدریجی باشد.

خزش و خستگی تدریجی است.

دماهای اتاق برای بعضی مواد بالاست.

در دماهای بالا تنش تسلیم کاهش پیدا می کند و در تنش های پایین

شکل می گیرد. آزاد شدن فیل ها و لور کا تر آزاد شدن نا بجای ها

میزان مشخصه خزش (مختی کرنش زمان)



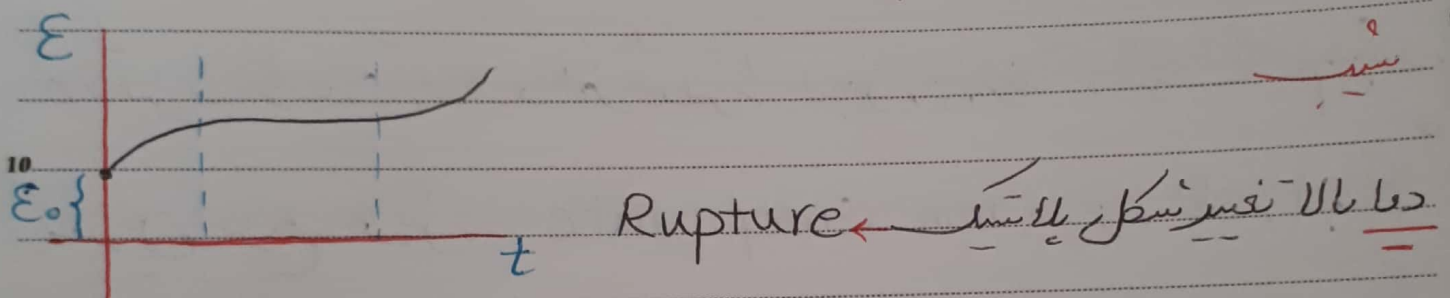
# Characteristic Curve

منحنی مشخصه

این منحنی تحت تنش و دمای ثابت به دست می آید و شامل سه

منطقه مجزا است در ابتدای بارگذاری با توجه به میزان نیروی اعمالی

یک مقدار کرنش اولیه انجام می شود که مقدار آن را با  $\epsilon_0$  نشان می دهند



نرخ تغییر شکل (از دیاد طول) را نرخ کرنش می گویند.

محاسن را در هر نقطه از نمودار به سیم  $\epsilon$  نرخ کرنش را به نامی دهد.

منطقه یک: (کرنش اولیه) این منطقه نشان دهنده کاهش سرعت

کرنش با زمان است. (چون سیم کم می شود)

کرنش اولیه یک دوره کرنش نابایاری است که در آن مقاومت کرنشی

جسم با تغییر شکل زیاد می شود. دما کار سختی را کم می کند تا به منطقه ۲ برسد

در دما و تنش ها کم کرنش اولیه قالب است و پس تر منطقه یک

رامی سیم. (کرنش سرب در دمای اتاق)

در این منطقه تولید ریزهای فرعی باعث ایجاد کاستی می شود که

مقدار حداقل نرخ خزش شروع منطقه دو است.

منطقه دو: (خزش ثانویه - خزش حالت پلنواخت)  $St. St. Creep$

سرعت خزش تقریباً ثابت است. کارستی و بازیابی (عابالالا)

هدیکر را موازنه می کنند و اگر هدیکر را از بین می برند و شب کم می شود.

کمترین نرخ خزش  $min creep rate$  در این منطقه است

به این منطقه خزش پایدار یا خزش با شیب ثابت هم می گویند.

منطقه سه: (خزش نهایی) نرخ کرنش رفته رفته زیاد می شود و

نمونه به سمت  $failure$  می رود.  $fail$  یعنی از کار افتادگی

هر سلسله از کار افتادگی است اما هر از کار افتادگی همراه با سلسله

نیست. مشکل ظاهری بعضی قطعات سالم است اما در آنها عیوب

پنهان وجود دارد که بدترین نوع عیوب هستند و با تست  $NDT$

قابل تشخیص می باشند.

در مرحله ۳ قفل ها و لور کاترول از بین می روند (خار ناجایی ها)

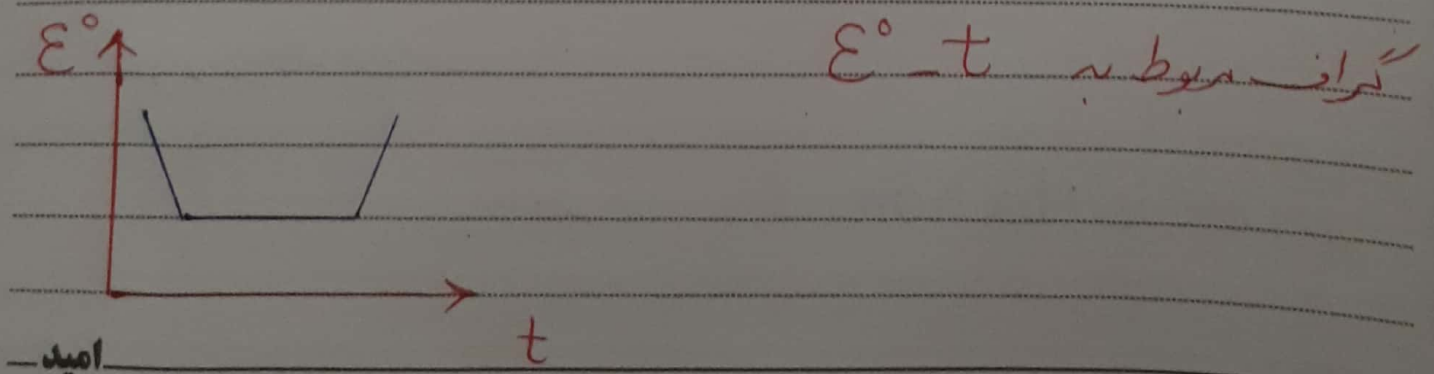


و خاصیت کار سختی هم از بین می رود و استحکام افت می کنند.

خزش سه مرحله سه زبانی رخ می دهد که کاهش موثری در سطح مقطع در اثر گزینی شدن با تشکیل حفره های داخلی وجود داشته باشد که معمولاً با تغییرات متالورژیکی نظیر درشت شدن ذرات رسوب تبلور مجدد (recrystallization) یا تغییرات نفوذی در فازهای موجود همراه است. در حین خزش سطح مقطع همراه کاهش می یابد در نتیجه رفته رفته تنش روی ماده افزایش خواهد یافت به عبارت دیگر قطعه رفته رفته دچار تغییر شکل های بیژتری می شود. شرایط ذکر شده بیان کننده انجام تست خزش تحت شرایط بار

ایجابی ثابت است. نیرو ثابت Constant force

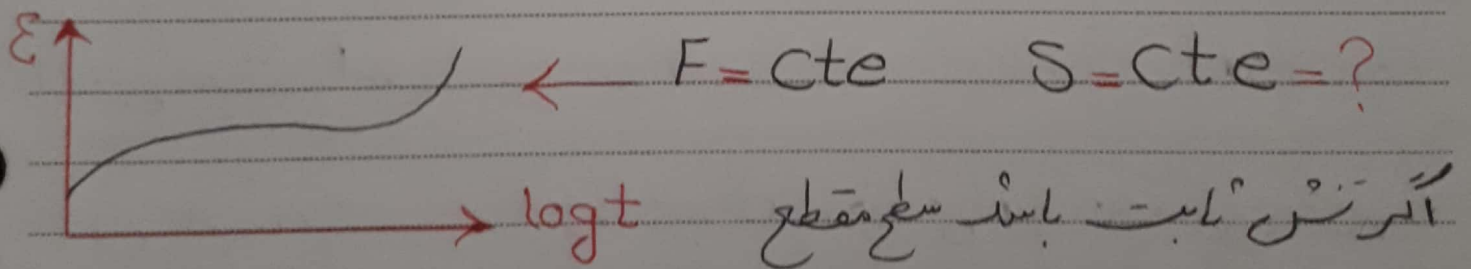
این بار ثابت کرنش اولیه را به وجود می آورد که به آن خزش ناگهانی می گویند. sudden creep



اثر تنش و دعا بر خزش.

همواره دعا و تنش، بالاتر باعث ایجاد پارگی زودتر در خزش می شوند.  
در تنش های پایین و دماهای خزشی پایین حتی ممکن است اصلاً  
مرحله سوم را نداشته باشیم و خزش در مرحله ۲ متوقف شود این در  
حالی است که با افزایش دما و تنش بتدریج مراحل اول و دوم  
کوتاه شده و بر مرحله سوم افزوده می شود حتی در سطح تنش و دمای  
بالا مراحل اولیه حذف می شوند.

فولاد در دمای پایین با نیروی کم می نهایت سیکل را طی می کند.  
مغنی خزش وقتی تنش ثابت باشد چه تغییری می کند؟



ثابت می ماند در مرحله ۳ اتفاق نمی افتد به مرحله ۲ وارد می شود و  
در همین مرحله می ماند.

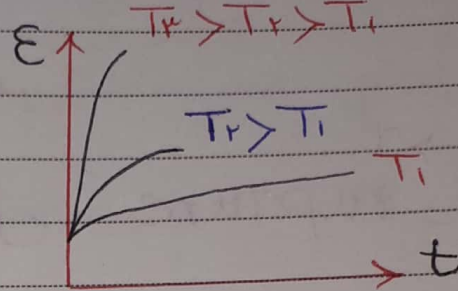
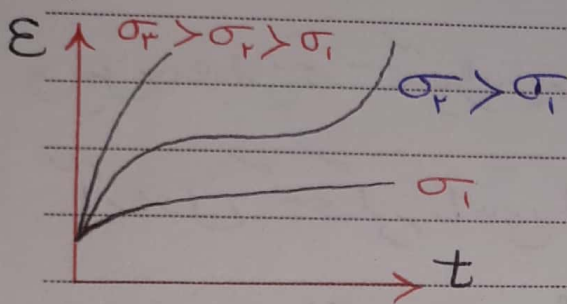
رسوب : precipitation



• مفاهیم علم متالورژیکی

تأثیر متغیرها: در حین تست هیچ دقت متغیرها را تغییر نمی دهیم

هر قدر دما زیاد شود از نمودارهای پائینی به سمت بالایی می رویم



دما و تنش پایین باشد مقاوم به خزش است و مرحله سوم دیده نمی شود

اگر شرایط بحرانی باشد یعنی هم دما و هم تنش بالا باشد نمودارهایی

بالایی دیده می شود

سرعت خزش min مهم ترین پارامتر طراحی می باشد که از معنی

خزش بدست می آید

minimum Creep rate

M C R

کمترین نرخ خزش در طراحی بسیار مهم است

۲ استاندارد در نظر می گیریم

۱- تنش لازم برای ایجاد یک سرعت خزش ۰/۰۰۰۵٪ در هر ساعت

یا یک درصد در ده هزار ساعت می باشد

MONTH: Day:   
 ۱٪ خزش در ۵۰ هزار ساعت (حدود ۵/۱۱ سال) داشته باشد در

مورد جت صنایع هوایضا توربین های گازی. (معیار ۲)

۲ یک صد هزارم درصد (۰/۰۰۰۰۱٪) یا یک درصد در هر صد هزار سال

این معیار سخت گیرانه تر است.

Stress rupture  $\rightarrow t$    
 آزمون گسیختگی ناشی از تنش

چون زمان آزمون خزش طولانی است نمی توانیم برای بعضی از آلیاژها

این تست را انجام دهیم. در بعضی مواقع به ۵۰٪ خزش هم   
 وقتی تنش ثابت باشد هر چه   
  $\sigma$    
 ۵۰۰   
 ۷۰۰   
 ۹۰۰

دوام بیشتر شود زمان  $\rightarrow$  rupture time

شکست کمتر می شود. وقتی RT بیان است هر چه تنش کمتر   
 باشد دوام بیشتر است.

خواه کشیدن نمودار: برای رسم نمودار از روش تجربی استفاده می کنیم

بر هر تعداد نقاط پس تر باشد وقت ترسیم هم بیشتر می شود.

برای رسم دوام را ثابت در نظر می گیریم و تنش را بالاترین حالت



در نظر می گیریم و هر وقت گسسته شد زبان مربوط به آن را بدست می آوریم  
چون ممکن است اعداد بدست آمده خیلی بزرگ باشند مورد RT  
را نگاریم در نظر می گیریم و تنش را کمتر می کنیم و نقاط دیگری را  
بدست می آوریم. وقتی به شکستگی می رسد خود را را افت می کند به همین  
ترتیب این نمودارها رسم می شوند.

علت شکست این است که در نظر تغییر ساختار به وجود می آید  
مثل تبلور مجدد، بازیابی و حل شدن رسوبات و غیره.  
علت شکست می تواند کروی شدن دانه ها فرآیند تراشت بازی و  
تشکیل فاز سیمینا باشند.

تغییر ساختار حین خزش.

فرآیندهای اصلی تغییر شکل در دماهای بالا عبارت است از:

لغزش، تشکیل دانه های فرعی، لغزش مرز دانه ای

تصادفی از فرآیندهای تغییر شکل ثانویه در دماهای بالا

تراش شده است این فرآیندها شامل لغزش چند گانه تشکیل

مانده‌های لغزش درشت، مانده‌های کُتک و مهارت زردانه‌ای است. چون مطالعات در دهه‌های بالا انجام می‌شود محققین معمولاً از ورق Al استفاده می‌کنند چون اسید آلومینوم  $Al_2O_3$  که روی سطح ایجاد می‌شود از اسید سیون مجدد Al در دهه‌های بالا جلوگیری می‌کند.

مهم‌ترین عامل مقابله با کارستگی در بازبازی تشکیل رزهای فرعی است. رز فرعی: در اثر قرار گرفتن نایجابی‌های لبه‌ای روی هم رز فرعی تشکیل می‌شود. مرحله یک: فرسایش این فرآیند اتفاق می‌افتد.

مرحله ۲: علاوه بر لغزش درون زردانه، لغزش زردانه هم مطرح است. قانون اسمیت: لغزش در زاویه  $45^\circ$  اتفاق می‌افتد.

در مرحله یک کارستگی بر بازبازی غلبه می‌کند و در مرحله ۳ بازبازی بر کارستگی غلبه می‌کند.

مرحله ۳: یک سری ترک ایجاد می‌شوند و رشد می‌کنند و در نهایت Rupture اتفاق می‌افتد.



علت غالبه بازیابی در کارسختی در مرحله ۳ ایجاد دو نوع ترک ناشی از خزش است:

۱- ترک گوه‌ای شکل (w-type) wedge shape crack

وقتی سه دانه به هم می‌رسند و رشد می‌کنند یک فضای خالی بین شان به وجود می‌آید که گوه‌ای شکل هستند. علت به وجود آمدن این ترک‌ها لغزش برز دانه‌ها است و در سه گوشه برز دانه‌ها به وجود می‌آیند.

در تنش‌های بالا و دماهای کم و متوسط این نوع ترک دیده می‌شود.

۲- ترک‌های کروی شکل (R-type) Round type

در تنش‌های کم و دماهای بالا اتفاق می‌افتد. مهم‌ترین مکانیزم

تشکیل این نوع ترک تجمع حباب‌های خالی است.

معمولاً ترک‌های کروی شکل در برز دانه‌ها ایجاد می‌شود و عمود بر

تنش کششی اعمالی است و مهم‌ترین مکانیزم آن تجمع حباب‌های خالی

و نفوذ آبراب برز دانه است که در ابتدا تولید حفره کرده و سپس از به هم

پیوستن حفره‌ها ترک ایجاد می‌شود.

به دلیل اینکه تولید ترک های گوه ای و کروی سطوح تنشی و دماهای متفاوتی دارند در نتیجه در دماهای خیلی بالا یا تنش های بالا می توان صرفاً مقدار بیش تری از یکی از این نوع ترک را داشت اما در دما و بارهای متوسط هم پوشانی بین هر دو ترک وجود دارد.

با خالص و آخال ها در مرز دانه ترک کروی را ترجیح می دهند و اگر با خالص و آخال در محل تقاطع چند دانه باشد ترک گوه ای فعال می شود. هر چه ساختار درشت دانه تر باشد احتمال ترک گوه ای بیش تر است.

\* ساختار دانه های فرعی در فلزاتی که SFE بیش تری دارد راحت تر انجام می شود. ساختار دانه های فرعی معمولاً با اسفم ایلیس و متالورژی و میکروسکوپ الکترونی قابل مشاهده است.

انرژی محرکه خزشی. Creep rate equation

$$\text{Creep rate} = \dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

$\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش در مرحله ۲ می باشد.



A ثابتی است که به سختی ماده وابسته است.

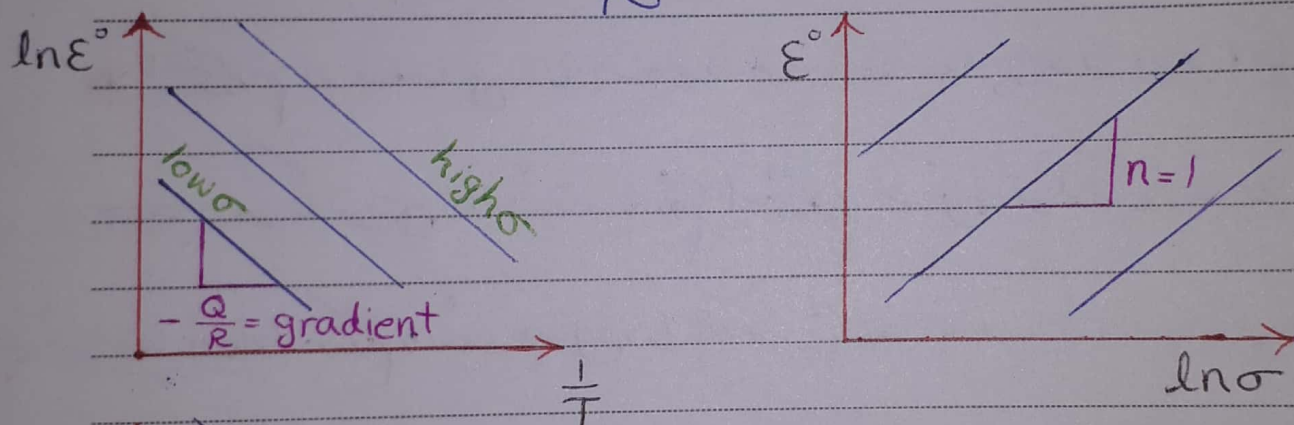
Q: انرژی فعال سازی خزش، انرژی محرکه خزشی وابسته به  $\Delta H^c$  می باشد.

T: دمای مورد بررسی R: ثابت گازها

انرژی محرکه خزشی با انرژی محرکه نفوذ در خود یا خودی برابر است.

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln \sigma - \frac{Q}{RT}$$

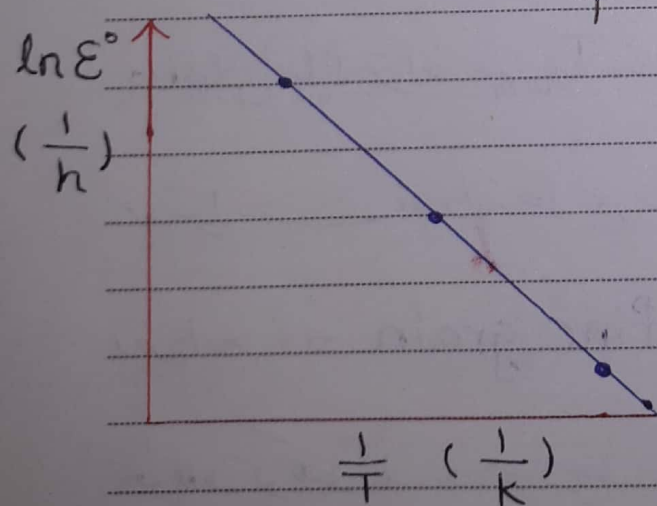
عرض از مبدا:  $\ln A$  شیب:  $-\frac{Q}{R}$



Inconel 718

$\sigma = 750 \text{ MPa}$

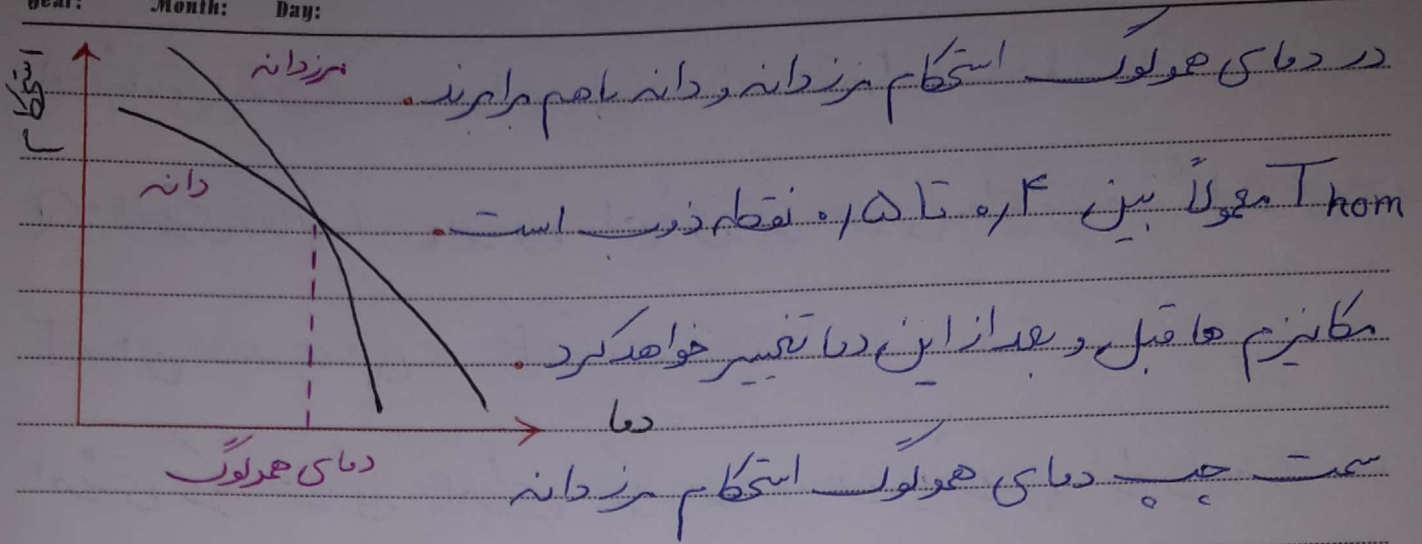
$Q = 512,97 \text{ kJ/mol}$



تأثیر عوامل مختلف بر خزش

باتوجه به نمودار زیر تغییرات استحکام با دما نشان داده شده است:

امید



بین تر از دانه است و سمت راست  $T_{hom}$  استقامت دانه بین تر از تر است.

\* استقامت در دماهای بالا در نیز دانه ضعیف می شود در دماهای بالا هر چه بزرگتری داشته باشیم استقامت بین تر است. در خزش باید نیز دانه کم باشد چون دما بالاست.

دماهای بالاتر از  $T_{hom}$  به علت بالاتر بودن استقامت دانه از نیز دانه بهتر است از دانه های درست تر در ساختار استفاده کنیم.

fine grain = درشت دانه Coarse grain = ریز دانه

فولاد پوکتلنید در دمای  $723 + 8$  شروع به آستن سازی می کند. اگر بخواهیم فولاد پوکتلنید می مقاومت به خزش با ساختار درست داشته



باشیم باید چه کنیم؟ برای اینکه فولاد مقاوم به خزش باشد باید پرلیت درست دانه داشته باشیم اگر زمان بیش تری بدهیم یعنی آرام سرد کنیم فرآیند آستنیت زایی بطور کامل انجام می شود و دانه ها درست ترمی شوند و وقتی سرد کنیم پرلیت درست دانه Coarse perlite خواهیم داشت.

**عوامل مؤثر بر دمای هو لوگ:**

**سرعت خزش:** هر چه سرعت خزش بیش تر باشد استحکام در نزد دانه بیش تر است و دمای هو لوگ افزایش می یابد.

**خلوص ماده:** هر چه ماده خالص تر باشد اختلاف استحکام نزد دانه با درون

دانه کم می شود و دمای هم انجمایی از یک نقطه به یک ریج دمای تبدیل می شود

**تأثیر عناصر آلیاژی:** عناصر آلیاژی معمولاً مقادیرت به خزش را افزایش می دهند.

**افزایش جابده:** باعث افزایش مقادیرت به خزش می شود تأثیر عنصر

Mo از همه بیش تر است و Al کمترین اثر را دارد تأثیر Cr و V

متوسط است. اتم های حل شده در ساختار باعث قفل شدن

نایجایی هادی شوند (اصورت جانشینی). اتم های محلول تن اصطکاک

ایجاد می کنند که باعث می شود نایجایی ها قفل شوند و تحرک کمتری داشته

باشند. هرچه توزیع اتم های محلول هگن تر باشد (نظم بین تر باشد)

محرزنی بین ترمی شود و مقاومت به خزش بین ترمی شود.

۲- رسوب: به شرط اینکه در دمای مورد نظر حل نشوند مقاومت به

خزش را زیاد می کنند. هرچه رسوب ریز تر باشد و توزیع رسوب هگن تر

باشد مقاومت به خزش بین ترمی شود.

تأثیر دمای ذوب بر خزش: هرچه نقطه ذوب بین تر باشد مقاومت

ماده در برابر نفوذ بین تراست و مقاومت به خزش بین تراست.

دمای ذوب بالاتر باعث استحکام بین ترمی شود و دمای هوک

( $T_m$  - ۵۰۰ - ۴۰۰) بالاتر می رود و مقاومت به خزش بین ترمی شود.

در حله یک هرچه SFE بین تر باشد نرخ خشی بین ترمی شود و

مقاومت به خزش بین ترمی شود اما در کل در فرآیند خزش ترجیح

می دهیم از مواد با SFE کمتر استفاده کنیم چون در این حالت نایجایی



سخت تر با هم ترکیب می شوند و کرنش دیرتر اتفاق می افتد. بنابراین

آلیاژسازی هم باعث می شود انرژی نقص در چیده شدن کم شود و

مقاومت به خزش افزایش می یابد.

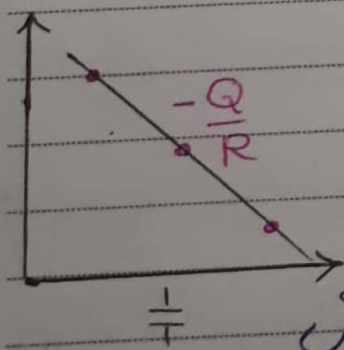
انرژی فعالسازی برای خزش.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = A e^{-\frac{Q}{RT}}$$

$\dot{\epsilon}$  = Arrhenius type rate equation

دفاع حسب کولین  $R = k \times N$

$\ln \dot{\epsilon}$



یکی از فالتورهای مهم در انرژی فعالسازی، نفوذ در خود

(Self diffusion) است.

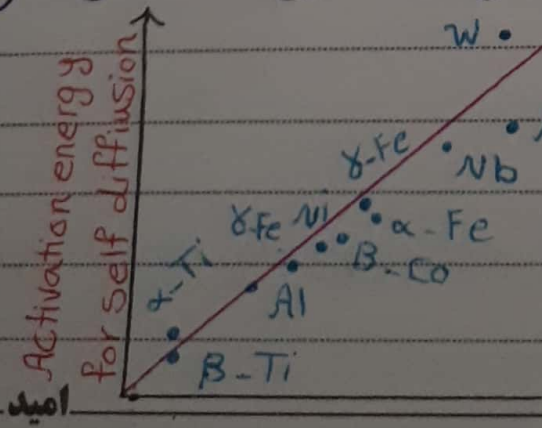
فلزات دیرگداز مثل Mo، W و Cr مقاوم به خزش

هستند و در دفاعهای بالا استفاده می شوند چون (self diffusion) نفوذ در

خود این مواد پایین است و این باعث می شود انرژی فعال سازی شان

بالا برود. در این نمودار هر چه نقطه ذوب

مواد بیش تر باشد انرژی فعال سازی نفوذ



Activation energy for high temperature creep

در خودشان پس، ترد انژی، فعالیت برای خزش این موادم

پس، تراست و مقاوم به خزش هستند (نفوذ در خود کمی دارند)  
 $d_v = \text{self diffusion} \downarrow$

معمولاً سرامیک هایی که نقطه ذوبشان بالاست و پیوندشان کووالانسی است در دمای بالا کاربرد دارند.

مکانیزم های تغییر شکل خزشی.

1. dislocation glide لغزش نابجایی (سریش نابجایی)

2. dislocation creep خزش نابجایی

3. diffusion creep خزش نفوذی

4. grain boundary glide لغزش مرز دانه ای

(۱) از مکانیزم هایی است که معمولاً در تنش های بالا اتفاق می افتد و

سرعت خزش وابسته است به راحتی عبور نابجایی ها از مواضعی که

وجود دارد مثل فکل های لویر کاترل، انتم های گلول، رسوبات.

$$\frac{\sigma}{G} > 10^{-2}$$

(۲) وابسته به لغزش نابجایی به کمک نفوذ جا های خالی انجام می شود.



دانشمندی به نام Bailey این توضیحات را مطرح کرده است.

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{AD_v G b}{kT} \left( \frac{\sigma}{G} \right)^n \quad D_v = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)$$

$$* \dot{\epsilon}_s = B \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad 10^{-4} < \frac{\sigma}{G} < 10^{-2}$$

A and n are material constant.

G = Shear modulus     $\sigma$  = applied stress

$D_v$  = bulk or lattice self diffusion coefficient.

b = burgers vector of dislocation.

k = Boltzmann's Constant    T = absolute temperature

حرکت مرگشت نابینمایایی ها در اثر نفوذ جاهای خالی (منجر به صعود

نابجایی هامی شود) یا الفزین تقاطعی رخ می دهد به عبارت دیگر هم

نابجایی های پله ای با نفوذ جاهای خالی و هم نابجایی های پچی با الفزین

مقاطع از موانع آزاد شده و خزش را ادامه می دهند.

$$* \dot{\epsilon} = k \sigma^n \quad n \text{ ثابت خزش نابجایی}$$

n درش های متوسط بین ۴ تا ۶ است و درش های بالا و پایین بین

۱۲.۸ است.

(۳)  $\frac{\sigma}{G} < 10^{-4}$  است جا‌های خالی و اتم‌های بین‌شین باید تحت

تنش اعمالی جریان داشته باشند و حرکت کنند. در این مکانیزم بی‌تر

دعا غالب است. در اینجا ۲ مکانیزم خزشی وجود دارد:

1. Nabarro Herring

2. Coble

در دانه و مرز دانه گزش ایجاد می‌شود.

(۱) خراشید خزشی بوسیله نفوذ اتمی که به واسطه تنش ایجاد می‌شود کنترل

می‌گردد. معمولاً در تنش‌های کمتری و در دماهای بالا اتفاق می‌افتد.

نفوذ داخل دانه را تحت صورت می‌گیرد معمولاً دعا غالب است و تنش‌ها

معمولاً پایین‌ترند. این نوع خزش شامل مهاجرت جا‌های خالی از

مرز دانه‌های تحت کشش به مرز دانه‌های تحت فشار است و به دلیل

حفظ پیوستگی ماده اتم‌ها در جهت عکس حرکت می‌کنند بنابراین

مهاجرت و نفوذ باعث افزایش طول دانه و خزش می‌شود.

(۲) دما کمتر است این مکانیزم خزشی نسبت به مکانیزم Nabarro



herring در دماهای بحرانی اتفاق می افتد و شامل نفوذ اتمی یا یونی در طول مرز دانه ها است. در مکانیزم Coble حساسیت نرخ کرنش به اندازه دانه بیش تر است. برای ایجاد یک نرخ کرنش مشخص در مکانیزم کوپل به سطح تنش بیش تری نیاز داریم چون در کرنش ۲ فالتور دما و تنش مهم است و در مکانیزم کوپل چون دما کمتر است برای داشتن نرخ کرنش مشخص باید تنش بیش تر باشد.

### - Nabarro Herring

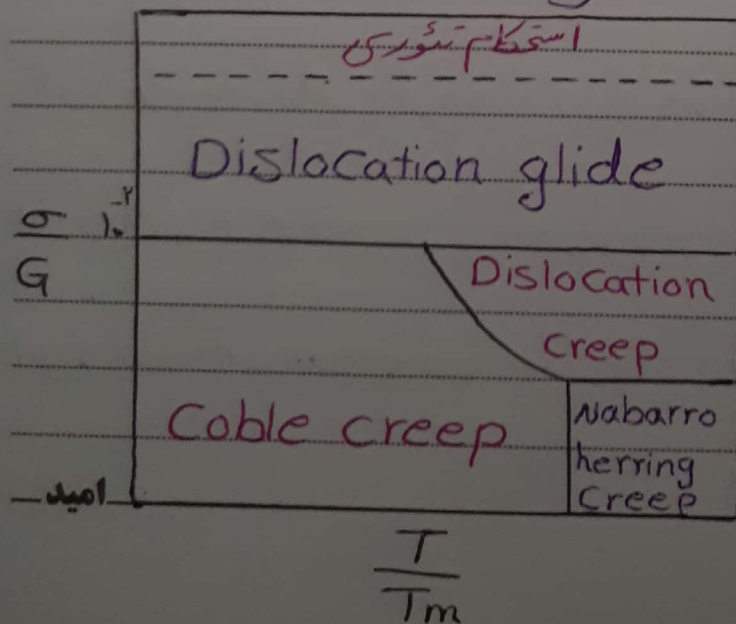
$$\dot{\epsilon} = A \frac{D_r G b}{kT} \left( \frac{b}{d} \right)^2 \left( \frac{\sigma}{G} \right) \quad d: \text{اندازه دانه}$$

### - Coble

$D_v$ : ضریب نفوذی

$$\dot{\epsilon} = A_c \frac{G b}{kT} \left( \frac{\delta}{b} \right) \left( \frac{b}{d} \right)^3 \left( \frac{\sigma}{G} \right) \quad \delta: \text{ضخامت مؤثر مرز دانه}$$

نقشه های مکانیزم تغییر شکل در کرنش.



استحکام تنوری: کرنش در این

قسمت مطرح نیست.

$W$ : منطقه کوپل کوچک

$Al$ : کوپل بزرگ

## خزش در آلیاژها. Creep in alloys

موادی که در دماهای بالا استفاده می‌شوند مواد پدیدهای هستند که برای کاربردهای خاصی تهیه شده‌اند.

آلیاژهای دگداز - فولادهای فریتی - فولادهای آستنیتی (مهم‌ترین آلیاژ ۳۱۶ است که مقدار Mo و Cr آن زیاد است) - سوپر آلیاژهای

پایه نیکل (Inconel 718 که مقدار زیادی Cr دارد) - سوپر آلیاژهای

پایه کبالت - سوپر آلیاژهای پدید - جدول کتاب

مقدار کربن در آلیاژها بسیار مهم است و باید دقیقاً مورد مطالعه قرار گیرد

و اگر مقدار کربن از مقدار بحرانی بیش‌تر باشد ذرات کاربیدی ایجاد

می‌کنند و باعث می‌شود استحکام گتنگی افزایش یابد. اگر ذرات

کاربیدی بیش از حد زیاد باشد نتیجه عکس می‌دهد.

آلیاژهای دگداز: بر پایه عناصر با نقطه ذوب بالا هستند (مثل Mo،

W، Al و...) و مقاومت به خزش آن‌ها زیاد است. وقتی دما بالا می‌رود

این مواد اکسید می‌شوند (سرعت اکسیداسیون آلیاژها دگداز بالاست)



آلیاژهای دیرپایز باید در اتمفرکتورل شده استفاده شوند.

**سوپر آلیاژ:** آلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت هستند. این آلیاژها نسبت

به استیل سیون مقاومند. برای اینله مقاومت به خوردگی افزایش باید

CR را بصورت محلول جامد به سوپر آلیاژها اضافه می کنیم. سوپر آلیاژهای

پایه نیکل، Al و Ti زیادی دارند به همین خاطر ترکیبات بین فلزی

Ni<sub>3</sub>Al, Ni<sub>3</sub>Ti تشکیل می شوند و باعث می شوند استحکام فزینی

پس تر شود. (Al<sub>3</sub>Ni و Ni<sub>3</sub>Ti بصورت رسوب هستند و باعث می شوند

مقاومت به فزینی افزایش پیدا کنند)

اگر شرایط مجرانی نباشد (دماوش خیلی زیاد نباشد) می توانیم از

آلیاژهای پایه تی تانیوم و Stainless Steel استفاده کنیم.

رسوبات گال می کنند مقاومت به فزینی افزایش باید. هرچه رسوبات

رفیقتر باشند و توزیع شان ممکن تر باشد محلولدشان بهتر می شود البته

اگر رسوبات پس از حد ریز باشند ممکن است در دمای بالا حل شوند

و خاصیت قفل کردن مرز دانه ها را از دست بدهند.

اگر از هیدروژن در سوپر آلیاژها استفاده کنیم باعث افزایش استحکام و کاهش چقرمگی و چسبندگی می شود.

یکی از فاکتورهای تأثیرگذار در دمای بالا اندازه دانه است. مواد با اندازه دانه بزرگ در دماهای بالا مقاومت به خزش بیشتری دارند. پره های توربین راسعی می کنند به صورت تک کریستال طراحی کنند تا مزایای نداشته باشیم.

از فلزات خالص در دمای بالا استفاده نمی کنیم چون آلیاژها البته سوپر آلیاژها استحکام خزش بیشتری دارند.

محلول جامد در فرآیند خزش: عناصر آلیاژی فرآیند بازیابی را کند می کنند روی سرعت کارستی تأثیر می گذارند.

استحکام بخشی که محلول جامد دارد: ۱- فیل های لومر کنترل ۲- واکنش یا سرتتر

برهم کنش ناچگایی ها با محلول جامد است که کنش پارتنر نابارور را افزایش

می دهد ۳- نقص در چیده شدن روی خزش تأثیرگذار است ۴- حباب های

خاکریز ناچگایی ها ۵- تقم بلند دامنه و کوتاه دامنه ۶- حباب های روی مرز دانه که



روی لغزش برزدهانه در نهایتاً روی فرسش تأثیر گذار است.

عواملی که روی محلول جامد در نهایت روی فرسش تأثیر می گذارد ۴ مورد

بالاست.

اگر غلظت اتم ها در محلول جامد زیاد شود انرژی نقص در چیده شدن

اتم حلال کم می شود و در نتیجه فرآیند صعود ناچجایی و لغزش متقاطع سخت

می شود. انرژی نقص در چیده شدن آهن لا از کمتر است.

اضافه کردن کروم به آلیاژ باعث افزایش مقاومت به خوردگی و کاهش

انرژی نقص در چیده شدن می شود.

منظم شدن **ordering**: وقتی ماده منظم می شود استحکام فرسشی

پس تر می شود چون انرژی فعال سازی نفوذ پس تر می شود.

رسوبات **Precipitation**:

کاربید وانادیم **VC** - **TiC** - **NbC** - **Mo<sub>2</sub>C** -

**Cr<sub>23</sub>C<sub>8</sub>** این کاربیدها در فولاد مورد استفاده قرار می گیرند.

کاربیدها تا قبل دارند روی ناچجایی ها جوانه فرشته و باعث قفل شدن

ناجایبی‌ها می‌شوند ولی اگر دفا خیلی زیاد شود خاصیت قفل کردن ناجایبی‌ها ضعیف می‌شود و برزخانه‌ها رشد می‌کنند و دیگر مؤثر نیستند. اندازه ذرات کاربردی می‌تواند تا  $5 \mu m$  هم برسد اما باید در دماهای پایین ۹۰۰-۷۰۰ درجه استفاده شوند.

مواردی که باعث می‌شود مقاومت به خزش بیش‌تر شود:

۱- از موادی که  $T_m$  بالاتری دارند استفاده کنیم مثل  $Mo$  و ...

۲- از رسوبات استفاده کنیم (رسوب سختی)

۳- اندازه دانه ۴- کم کردن انرژی نقص در حید شدن

۵- از موادی مثل سوپر آلیاژها استفاده کنیم.

۶- استفاده از CMC (Ceramic Matrix Composite)

کاربدها در مراحل اولیه که شکل می‌شوند خیلی ریز و نزدیک به هم هستند و

حرکات یکنواخت تأثیر قرار می‌دهند ولی هر چه دما بالاتر می‌رود و

رسوبات رشد می‌کنند خاصیت قفل کردن برزخانه‌ها از دست می‌دهند

و ناجایبی می‌تواند از بین رسوبات فرار کند به همین دلیل باید از رسوباتی



که سرعت رشدشان (Growth rate) کم تر است استفاده کنیم

به عنوان مثال در فولادهای آلیاژی از VC، TiC و NbC استفاده

می شود. ذرات با قطرهای کمتر از  $1 \mu m$  می توانند در دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰

درجه با Growth rate مقابله کند و سرعت رشدشان کمتر می شود.

در شرایط دمای بالا نایجایی ها توسط مکانیزم صعود یا لغزش متقاطع از رسوبات

فرار می کنند در نتیجه هاکم صعود نایجایی ها مکانیزم ارجح است و درش های

بالا لغزش متقاطع مکانیزم ارجح است.

دانشمندی به نام Ansel بیان کرده است که درش های بالا مکانیزم

ادروان شکل می گیرد. یعنی نایجایی ها ذرات را دور می زنند و از بین آنها با

خم شدن خط نایجایی عبور می کنند.

پروفسور lenel سری آنالیز روی Al های درست دانه ای که

در آن  $Al_2O_3$  وجود دارد (کامپوزیت  $Al/Al_2O_3$ ) انجام داد و رفتار

خزشی این کامپوزیت را در محدوده دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه بررسی کرد.

انرژی فعال سازی برای خزش  $55 \frac{kJ}{mol}$  بود که نزدیک به انرژی فعال سازی

نفوذ در خود آلومینیوم است و نتیجه گیری کردند که صعود ناگجایی فرآیند کنترل شونده توسط نفوذ ذرات است. در آلیاژهای پرزداخته مشاهده کردند که انرژی فعال سازی بین ۴۰۰ رسیده است. اگر فاصله بین ذرات رسوب حدوداً  $10^{-9}$  سانتی متر باشد از فرار ناگجایی ها جلوگیری می کنند.

محلل جادهاشینی: براساس تحقیقات Hume - Rothery عوامل متعددی وجود دارند که میزان حلاطت در سیستم های آلیاژی را کنترل می کنند:

۱. ساختار بلوری
۲. اندازه شنی
۳. عامل به تشکیل ترکیب شیمیایی
۴. ظرفیت شنی

محاسبه طول عمر خزشی.

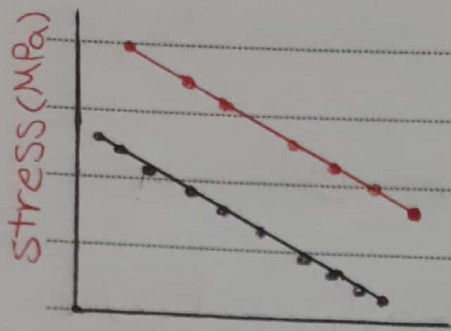
یکی از معادلاتی که برای پیش بینی Rupture time وجود دارد پارامتر لارسون میلر می باشد:

$$LM = P(\sigma) = T [\log t + C_{LM}]$$

$t$ : عمر خزشی یا زمان مقاومت قطعه  
 $T$ : دما بر حسب کلوین

$C$  عددی بین ۱۷ تا ۲۳ است. اگر  $C$  در صورت سوال داده نشود





آنرا ۲۰ در نظر می گیریم.

پارامتر لارسون میلر به دفاعش بستگی دارد.

$$\text{Larson Miller Parameter} = T (\log t_R + 20) 10^{-3}$$

هرچه پارامتر لارسون میلر کمتر باشد عمر خزشی کمتر است.

C ثابت لارسون میلر به انرژی فعال سازی ظاهری بستگی دارد هرچه C بزرگتر

تر باشد انرژی فعال سازی هم بزرگتر می شود.

مثال) مطلوبیت محاسبی زمان شکست قطعه ای که در شرایط  $\sigma = 55 \frac{N}{mm^2}$

و دمای  $C = 400$  است اگر افزایش خزش روی همان فلز در دمای  $400$  درجه

سیاست گیرد و همان میزان خزش انجام شود زمان شکست قطعه  $100 \text{ hr}$  می باشد.

$$LM = T [\log t + C]$$

$$1073 [\log 100 + 20] = 1173 [\log t + 20] \quad t = 10^{7/104}$$

مثال) برای آلیاژی پارامتر لارسون میلر  $2200$  است اگر ثابت لارسون میلر

$20$  باشد و دمای کاری قطعه از  $1000$  به  $550$  افزایش یابد عمر قطعه چند

$$\text{ساعت کاهش می یابد؟} \quad t = 100 \text{ h} \quad 2200 = 1000 [\log t + 20]$$

$$22000 = 1050 [\log t + 20] + 9 \quad \Delta t = 100 - 9 = 91$$

در صورت افزایش مقاومت به خزش شکل پذیری کاهش می یابد.

**مثال:** آزمایش خزش بر روی آلیاژ Al در دمای 400K و تحت اثر تنش

10 MPa نشان می دهد که نمونه پس از گذشت 100 ساعت از کار می افتد. اگر

دمای کاری را تا 500K کاهش دهیم تحت همان میزان تنش زمان شکست

چند ساعت خواهد بود؟

$$400 [\log 100 + 20] = 500 [\log t + 20] \quad \log t = 4.6 \quad t = 10^{4.6}$$

**خستگی.** Fatigue

حدود 1/90 انهدام ها و از کار افتادگی قطعات فلزی حین کار ناشی از

خستگی تخمین زده شده است. نهایتاً تنش که باعث Failure می شود کمتر از

تنش تسلیم و استحکام کششی <sup>UTS</sup> قطعه است.

چرخه زنی ترک (Crack nucleation) ← اشاعه ترک (Crack propagation)

رشد ترک ← انهدام قطعه.

در پروهای توربین، پل ها، کشتی ها، محورها، توربین، فنرهای معلق، میل گردان



وفزهای سوباب خستگی طرح است.

به دلیل شکل پذیری ضعیف سرامیک ها بحث خستگی خنثی طرح نیست.

در خستگی هر چه تنش به تنش تسلیم نزدیک شود شرایط بدتر می شود.

تعریف خستگی: شکست قطعات در اثر اعمال تنش های متغیر متناوب

با ایجاد ترک های پیش رونده در محدوده تنش های کمتر از حد تسلیم که نهایتاً

منجر به شکست قطعه می گردد.

تنش های متغیر متناوب: fluctuate stress - cyclic stress

آزمون های خستگی معمولاً شامل سیکل های تنش های کششی و فشاری

است که ممکن است تنش متوسط صفر باشد و یا صفر نباشد.

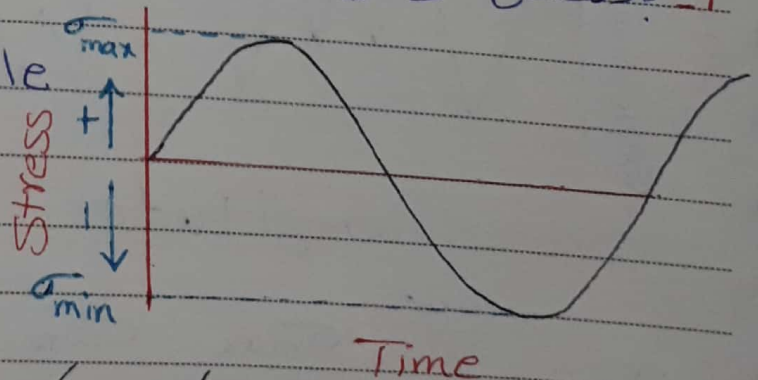
انواع بارگذاری خستگی.

۱- بارگذاری تکراری: (تنش متغیر بر کششی - بارگذاری تکراری منگوس)

Riversed stress cycle

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}} \quad R = -1$$

range



این نوع بارگذاری یک تنش کششی بازرغم  $(\sigma_{\max})$  و یک تنش فشاری امید

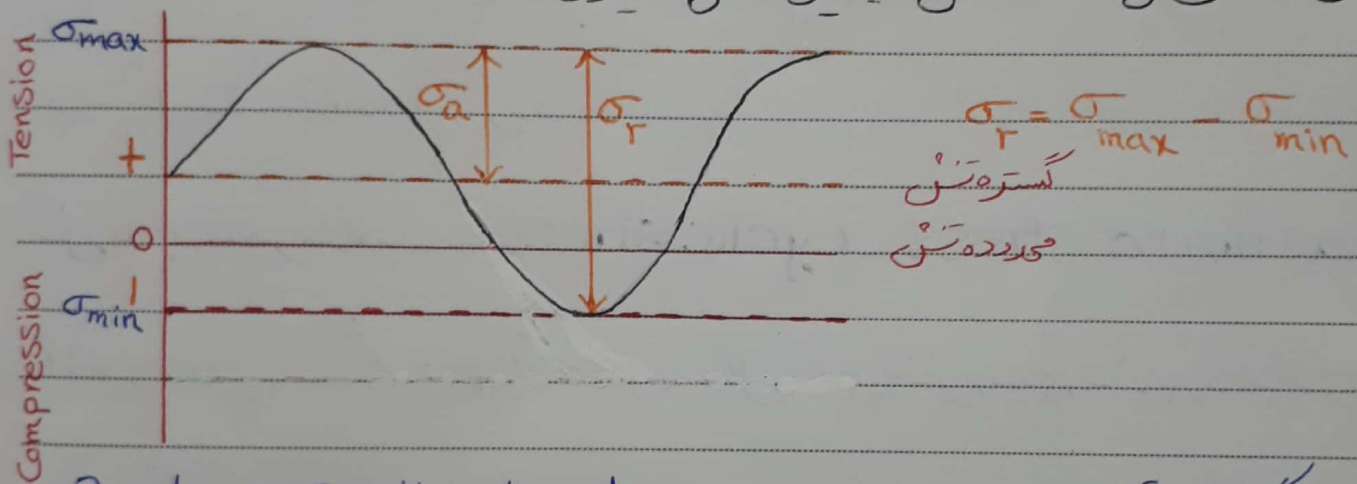
( $\sigma_{min}$ ) که از نظر اندازه با هم برابر هستند انجام می شود.

۲- بارگذاری تناوبی: (تن متغیر تکراری) Repeated Stress cycle

این نوع بارگذاری دارای یک دوره تناوب خاص بین یک تنش بالایی و پایینی

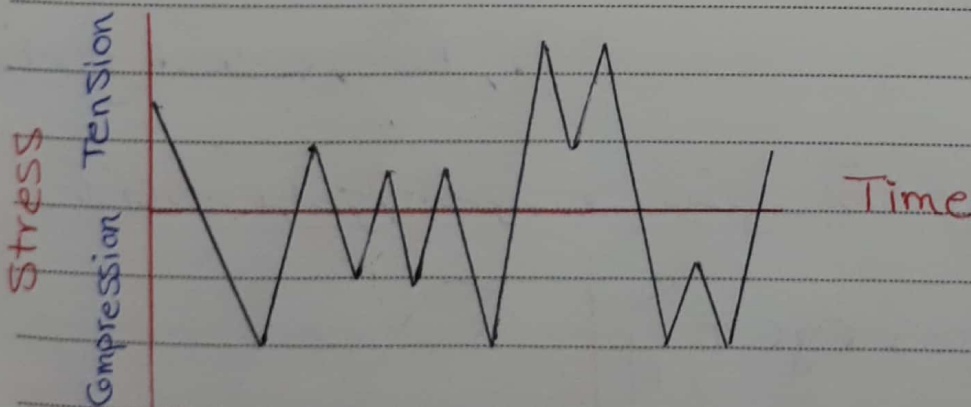
ثابت است که تکرار می شود اما این دو تنش لزوماً برابر نیستند.

هر دو تنش می توانند کششی یا یکی کششی و دیگری فشاری باشند.



Random Cyclic load

۳- بارگذاری تصادفی:



Stress amplitude

دامنه تنش:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$



Stress ratio

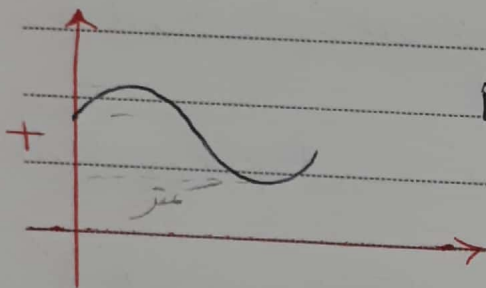
نسبت تنش:

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

average stress (medium)

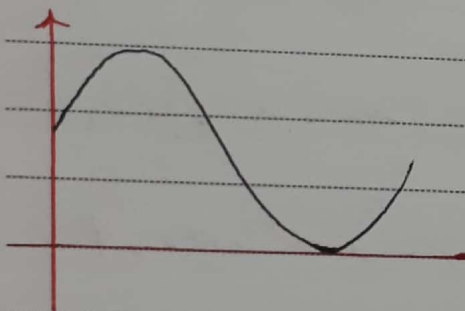
تنش متوسط استاتیکی:

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



$R = ?$

$$0 < R < 1$$



رابطه بین  $\sigma_m$  و  $\sigma_a$ ؟ با هم برابرند

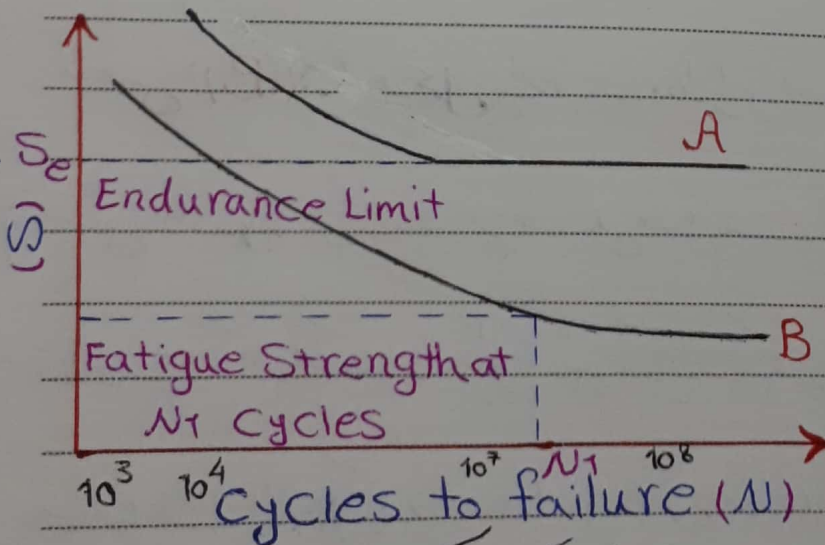
$$\sigma_m = \sigma_a = \frac{\sigma_{\max}}{2}$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0$$

S - N curve

منحنی تنش - تعداد سیکل

Stress Amplitude (S)



N: تعداد سیکل

S: تنش

نام دیگر این منحنی

vohler curve

تعداد سیکل شکست

## حد تحمل : Endurance limit

اگر حد تحمل آلیاژ A ۲۰۰ مگا پاسکال باشد و ۲۰۰ مگا پاسکال به آن تنش وارد کنیم آلیاژ بی نهایت سیکل را تحمل می کند.

آلیاژهای پایه آهن، تیتانیوم و منیزیم حد تحمل دارند. چون تعداد سیکل ها زیاد است محور افقی را گزینشی در نظر می گیرند. منحنی های S-N برای بارگذاری های است که تنش متوسط آن صفر باشد.

اگر دامنه تنش از مقدار مشخصی کمتر باشد قطعه می تواند بی نهایت سیکل تنشی را تحمل کند. علت ایند بعضی آلیاژها حد تحمل دارند ممکن است بدلیل وجود اتمسفر کاترل یا حضور عناصر بین نشین مثل نیتروژن، بور و ... باشد.

**منحنی (A):** این منحنی مخصوص فلزاتی است که پس از گذشت از یک سطح تنش مشخص می توانند ترک خستگی بی نهایت داشته باشند. به عبارتی در این قطعات اگر از یک سطح تنش بارگذاری کمتری انجام شود می تواند تعداد سیکل بی نهایت را تحمل کند. به دامنه تنش مورد نظر حد خستگی گفته می شود. معمولاً



تمامی فلزات و آلیاژهای آهنی دارای حد خستگی هستند.

منحنی (B): این منحنی مخصوص فلزاتی است که حد خستگی نداشته باشند.

برای این فلزات یک استحکام خستگی خاص در تعداد سیکل حدوداً  $10^4$  تا

$10^7$  به عنوان استحکام خستگی (در برخی مواقع خاص حد خستگی) مشخص می‌شود.

استحکام خستگی تنشی که نمونه در آن  $10^4$  تا  $10^7$  سیکل را تحمل می‌کند.

طبقه بندی خستگی:

1. hcf (high cycle fatigue) خستگی پر چرخه

2. LCF (low cycle fatigue) خستگی کم چرخه

۱- به hcf خستگی الاستیک هم گفته می‌شود. اگر نمونه بتواند بیش از  $10^3$  تا

$10^6$  سیکل را تحمل کند نمونه hcf است.

۲- به LCF خستگی پلاستیکی هم گفته می‌شود. نمونه کمتر از  $10^3$  تا  $10^4$  تا

سیکل را تحمل می‌کند.

$N_f$ : تعداد چرخه لازم برای شکست کامل.

فرآیند خستگی: منبای کار تغییر شکل (مومسان) بر است - ناپدید

است.

مرحله (۱): مرحله سخت یا نرم شدن - به حالت اولیه، دامنه تنش و میزان کرنش که قطعه متحمل می شود بستگی دارد و مشاهده مربوط به زیر ساختار ماده بستگی دارد.

مرحله (۲): مرحله جوانه زنی ترک - ترک های ریز در سطح نمونه ایجاد می شود و تمام ترک های خستگی روی سطح جوانه زنی می کنند. بیشترین تمرکز تنش در شرایط خستگی در سطح قطعه است. (خرش کل ماده - خستگی سطح ماده)

مرحله (۳): اشاعه ترک - نهایتاً منجر به شکست قطعه می شود.

جوانه زنی ترک خستگی (مرحله ۲): حساسیت به سطح قطعه دارد. به عملیات سطحی، عملیات قلم کاری، Shot Blast، Sand Blast و ... بستگی دارد. ترک های خستگی همیشه از سطح آزاد فلزات جوانه زنی می کنند. در خستگی می دانیم باید چه قیمت هایی تقویت شود.

محل های مرجع جوانه زنی ترک خستگی:

۱- نوارهای لغزش خستگی ۲- نزدانه ها ۳- آخال سطحی

عوامل مؤثر بر جوانه زنی ترک:



۱. دامنه بارگذاری: با افزایش دامنه بارگذاری، تنش بیش تر می به قطعه وارد می شود در نتیجه مرحله جوانه زنی ترک کوتاه می شود و جوانه زنی ترک زودتر اتفاق می افتد. اگر  $\sigma_{min}$  و  $\sigma_{max}$  بیش تر باشد عمر خستگی کمتر است.
۲. دما: دما وابسته به محل جوانه زنی ترک خستگی است. اگر محل جوانه زنی نوارهای لغزشی باشد افزایش دما باعث می شود نایجابی ها راحت تر حرکت کنند و مرحله جوانه زنی ترک کوتاه می شود. در نزدیکی هم مانند نوارهای لغزشی با افزایش دما جوانه زنی سریع تر اتفاق می افتد. اگر محل جوانه زنی آخال ها و ناخالصی ها باشد با افزایش دما نایجابی ها راحت تر از ناخالصی ها رد می شوند و مرحله جوانه زنی ترک بیش تر می شود.
۳. اثر محیط: اگر محیط خورنده باشد یا قطعه نایجابی که فشار بالا دارد در تماس باشد جوانه زنی ترک زودتر اتفاق می افتد.
۴. وجود شکاف یا خراش: چون در این مکان ها تمرکز تنش ایجاد می شود مرحله جوانه زنی ترک کوتاه می شود.
۵. تنش های پسماند: اگر تنش پسماند کششی باشد باعث افزایش جوانه زنی و

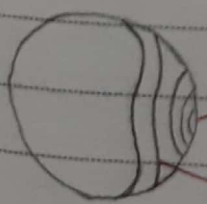
اسماعه ترک می شود ولی اگر از نوع فشاری باشد جوانه زنی ترک را به تأخیر می اندازد.

۴- عوامل شیمیایی: اگر روی سطح قطعه فولادی ساختار آسیدی داشته باشیم مرحله جوانه زنی ترک کوتاه می شود و اگر عملیات حرارتی کربوره و سیتزیده کردن انجام شده باشد جوانه زنی ترک به تأخیر می افتد.

۷- زبری سطح Roughness: اگر سطح قطعه زبر باشد دلیل وجود مناطقی که تمرکز تنش در آن زیاد است مرحله جوانه زنی ترک کوتاه می شود.

۸- استحکام سطح: هر چه استحکام سطحی قطعه بیشتر باشد جوانه زنی ترک دیرتر اتفاق می افتد.

پیش روی ترک مرحله (۳): ترک هایی که روی سطح بوجود می آیند در امتداد صفحات لغزش رشد می کنند پس از اینکه طول ترک به مقدار بحرانی رسید ترک تغییر جهت می دهد و در جهت عمود بر اعمال تنش شروع به



مرکز خطوط

origin of fracture

Beachmarks

شد کردن می کند و نهایتاً قطعه می شکند.  
منطقه پیدایش ترک

ناحیه بلاق - ظاهر پوسته صدفی - خطوط ساحلی

Fatigue Fracture

امید



گسترش، محددش

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

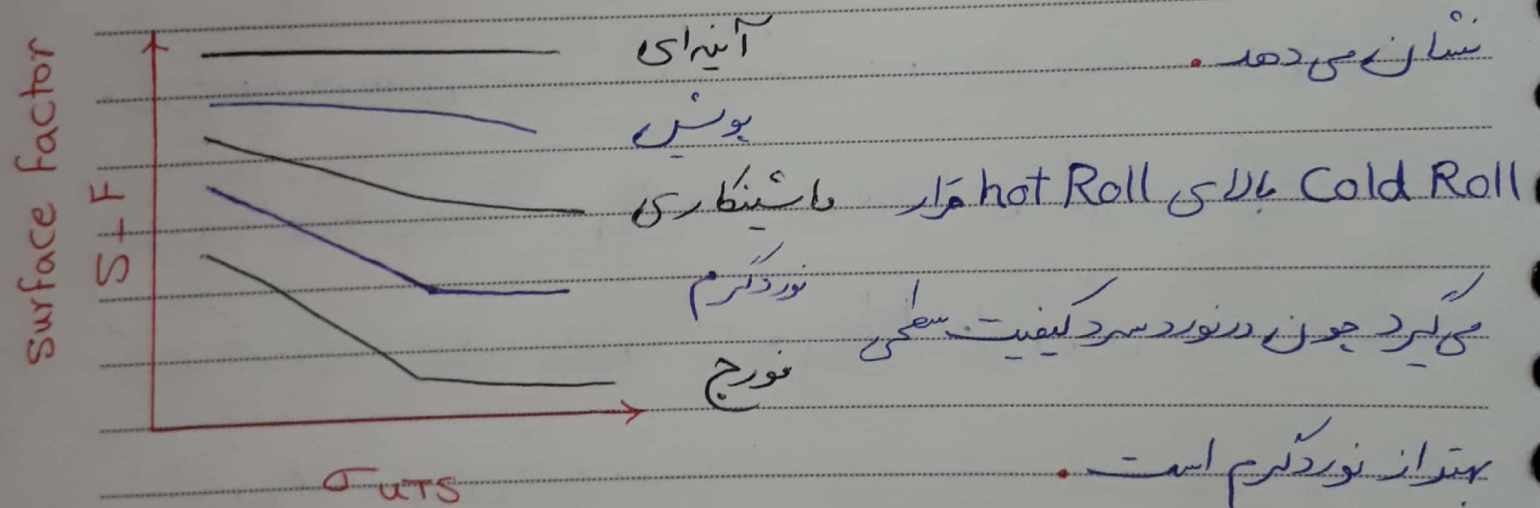
عوامل مؤثر بر خستگی

محیط: استحکام خستگی در صورتیکه محیط با خوردگی بالا داشته باشیم کاهش

می یابد. هرچه زبری سطح بیشتر باشد عمر خستگی قطعه کاهش می یابد.

نکته: عمل زبری سطح باید از یک حدی بیشتر نباشد تا در استحکام خستگی تأثیر

نگذارد. هرچه استحکام ماده بیشتر باشد حساسیت بیشتر قوی نسبت به زبری



تنش پسماند: تنش پسماند کششی عمر خستگی را کم می کند و تنش پسماند فشاری عمر خستگی

را زیاد می کند. تنش پسماند فشاری جوانه زنی در شدت یک رله تأخیر می اندازد.

استحکام فشاری سرانجام ها خیلی بیشتر از استحکام کششی آنهاست.

Surface treatment

عملیات سطحی.

فرآیند ساجه زنی Shot Blast: تنش های پسماند فشاری در قطعه ایجاد

می کنند و عمر خستگی را افزایش می دهد. فرآیند ساجه زنی روی سطح نا همواری ایجاد

می کنند و عمر خستگی را کاهش می دهد برای اینکه این شکل پس نباید باید بار کمتر

ها طوری تعیین شوند که تنش های پسماند فشاری در نا همواری های سطح قالب

شوند به همین دلیل نباید از تمام توان دستگاه های Sand Blast, Shot Blast

استفاده کنیم تا نا همواری زیادی ایجاد نشود. به طور کلی اثر منفی نا همواری ها در اکثر

تمرکز تنش به حدی نیست که تأثیر مثبت تنش های پسماند فشاری را از بین

ببرد. روش های جدیدی هم ابداع شده است که نا همواری سطحی ایجاد نمی کنند.

گروته کردن و شتریده کردن: استحکام سطح را افزایش می دهند و باعث

افزایش عمر خستگی می شوند.

نورد: نورد عمر خستگی قطعات را افزایش می دهد اما تجهیزات نورد گران

است و قطعاتی که نورد می شوند باید هندسه خاصی داشته باشند.

اندازه قطعه: هر چه قطعه بزرگتر باشد احتمال اینکه عیب در آن پس تر باشد

افزایش می یابد. اگر هیچ عیبی در قطعه نباشد ابعاد قطعه تأثیری در عمر خستگی ندارد.



فرکانس بارگذاری: فرکانس تعداد سبکی است که در واحد زمان به قطع دارد می شود. افزایش فرکانس عملکرد را کمتر می کند (اگر محیط خورنده نباشد).

اثر هم افزایی (synergistic effect): وقتی چند عامل روی یک فرآیند

تأثیر گذار است. اثر هم افزایی (یعنی اثر هر یک از چند عامل با هم) باید بررسی شود.

برای مثال اگر محیط خورنده باشد و فرکانس بارگذاری افزایش یابد عملکرد <sup>قوی</sup> افزایش می یابد.

دما: افزایش دما عملکرد را کاهش می دهد.

نوع ریز ساختار: ریز ساختارهای پرستی در فولادها کمترین حد تحمل خستگی را

دارند و ریز ساختارهای دانه بندی قوی شده بهترین حد تحمل خستگی را دارند.

ساختار سوزنی شکل دانه بندی مانع رشد ترک می شود.

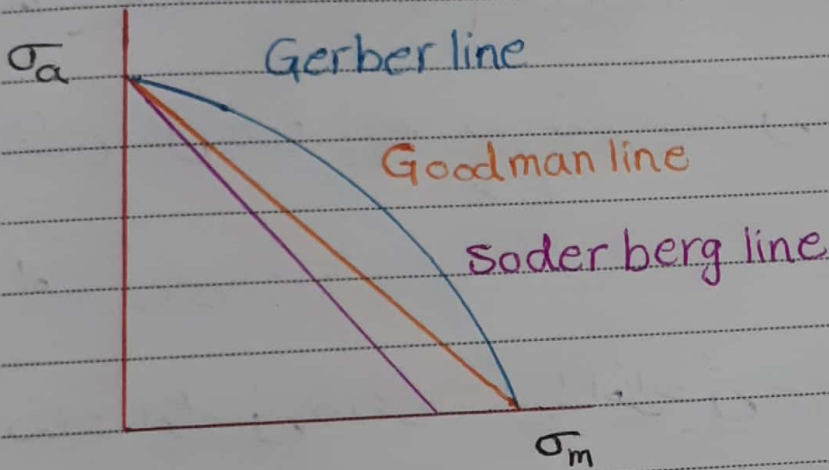
نوع بارگذاری: استحکام خستگی هنگام بارگذاری تک محوره تقریباً ۵۰٪ تا ۱۰۰٪

بارگذاری خمشی و پیچشی است. هنگامی که هم تحت بارگذاری تک محوره

قرار می گیرد نسبت به خمش در معرض تنش بالاتری قرار می گیرد. (سعی می شود در

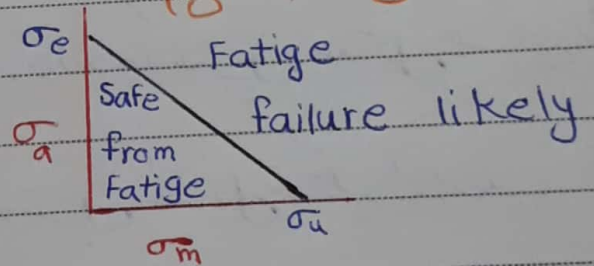
معرض تنش قرار می گیرد)

اثر تنش متوسط: هرچه تنش متوسط مثبت تر باشد نشان دهنده این است که تنش کششی موجود در پایداری بیش تر است و در نتیجه استحکام خستگی کاهش می یابد و هرچه تنش متوسط منفی تر باشد عمر خستگی بیش تر می شود.  
 روابط استحکام خستگی.



رابطه گودمن: (خطی)

$$\sigma_a = \sigma_e \left[ 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right]$$



رابطه گودمن، اصلی ترین رابطه است و برای فلزات معمولاً جواب درستی می دهد.  $\sigma_e$  حد خستگی از فائید که  $\sigma_m$  برابر صفر است بدست می آورند. (شرط)

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1$$

رابطه جریر: (تقریب غیر خطی)

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1$$

این رابطه مشابه رابطه گودمن است فقط توان

۲ دارد.



رابطه سودر برگ:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1$$

رابطه سودر برگ برای فلزاتی مناسب است که

تنش تسلیم شان بزرگ باشد و تغییر شکل پلاستیک آن ها کم باشد و نرخ کار سختی شان هم کم باشد.

نکته: رابطه گودمن و جریبر برای موادی که تغییر شکل پلاستیک زیادی می دهند مناسب است.

ضریب ایمنی • Safety Factor

$$\frac{n \sigma_a}{\sigma_e} + \left( \frac{n \sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1$$

اصل ایستادگی (مجموع خسارت ناشی از خستگی)

miner's rule

قانون ماینر

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

$n_i$ : تعداد بارگذاری انجام شده در

$N_i$ : تعداد سیکل که می تواند تحمل کند.

یک سیکل مشخص

damage accumulation

مجموع خسارت ←

رابطه سودر برگ :

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1$$

رابطه سودر برگ برای فلزاتی مناسب است که تنش تسلیم شان نزدیک باشد و تغییر شکل پلاستیک آن ها کم باشد و نرخ کار سختی شان هم کم باشد.

نکته : رابطه گودمن و جریس برای موادی که تغییر شکل پلاستیک زیادی می دهند مناسب است.

ضریب ایمنی • Safety Factor

$$\frac{n \sigma_a}{\sigma_e} + \left( \frac{n \sigma_m}{\sigma_u} \right)^2 = 1$$

اصل ایمنی است حسابات خستگی (مجموع حسابات ناشی از خستگی)

قانون ماینر miner's rule

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

$n_i$  : تعداد بارگذاری انجام شده در

یک سیکل مشخص  $N_i$  : تعداد سیکلی که می تواند تحمل کند.

مجموع خرابی ← damage accumulation



# Fracture

شکست عبارت است از جدا شدن و چند تکه شدن ماده در اثر تغییر شکل ناشی از تنش های اعمالی.

انواع شکست: ۱. شکست ترد ۲. شکست نرم

۱. شکست ترد: (brittle fracture, cleavage,

granular) شکست ترد در حالتی است که ماده قابلیت تغییر

شکل پلاستیک نداشته باشد. سرعت اشاعه ترک زیاد است و از نظر

فاکتور سکوپی تغییرات شکل پلاستیک دیده نمی شود.

۲. شکست نرم (ductile frac., shear,

fibrous, dimple) جواینه زنی و اشاعه ترک در این

نوع شکست وجود دارد تغییر شکل پلاستیک در مقیاس ماکروسکوپی

اتفاق می افتد و شکست برشی است و تغییر شکل در صفحات لغزش

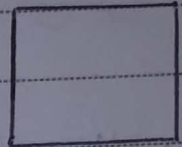
فعال می شود عامل اصلی در شکست های نرم تنش های برشی است

و معمولاً سطح شکست در دیرینه رنگ است. قبل از شکست انرژی

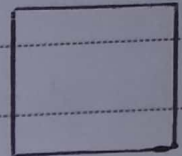
زیادتی جنب می کند.

**Brittle**

انرژی جنب شده کم است تغییر شکل پلاستیک



نظایم من شکشی فرمال و عمود بر صفحات بلور می باشد



شکست بصورت درون دانه ای اتفاق می افتد.

مثل شیشه ناگهانی اتفاق می افتد و حصار نمی دهد و غیر قابل پیش بینی

است. وقتی شکست اتفاق می افتد به تکه های کوچک با تعداد زیاد

تقسیم می شود.

شکست ترد اغلب در BCC و hcp اتفاق می افتد و در FCC کمتر این

شکست اتفاق می افتد مگر در شرایط خاص که منظور از شرایط خاص دما پایین

باشد و نرخ کرنش زیاد باشد. در شکست ترد dimple دیده نمی شود

در شکست ترد هم ترک ها به سمت مبدأ ترک جهت گیری می کنند.

هر چه دما کمتر باشد و نرخ کرنش بیشتر باشد به سمت شکست ترد می رود که به

این شرایط اصطلاحاً شرایط سخت می گویند. برای فلزاتی است که قابلیت

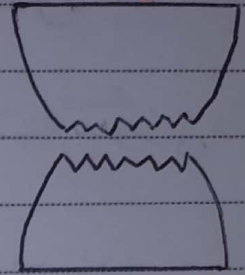
تغییر شکل پلاستیک کمی دارند و سطح شکست در حدود ۹۰ درجه است.



نام هادیگر شکست ترد شکست براق و دانه‌ای می‌باشد.

Moderately Ductile

این شکست معمولاً در فلزات پلی کریستال



اتفاق می‌افتد. در اینجا گویی شدن اتفاق می‌افتد

و باعث ترک‌خوردن می‌شود و یک سری حفرات ایجاد

می‌شود و حفرات رشد می‌کنند و به هم می‌پیوندند و ترک ایجاد می‌کنند این

ترک در نمونه شروع به رشد کردن می‌کند و سطوح جدیدی ایجاد می‌شود (وقتی

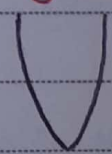
شکست اتفاق می‌افتد دو سطح جدید ایجاد می‌شود) و باعث می‌شود شکست

اتفاق بیفتد. معمولاً شکست در جهات  $45^\circ$  برشی اتفاق می‌افتد و به

این نوع شکست فنجان و مخروط می‌گویند (Cup and cone fracture)

Very Ductile

التر فلزات را خیلی گرم بین این نوع شکست دیده



می‌شود. حتی در شیشه ها <sup>d</sup> Semi solid, Semi liquid

وجود دارد که اگر آن‌ها را به سیم خیلی نازک می‌شوند و



می‌توانیم از آن‌ها فیبر داشته باشیم و فلزات چقرمه و چکش خوار را اگر

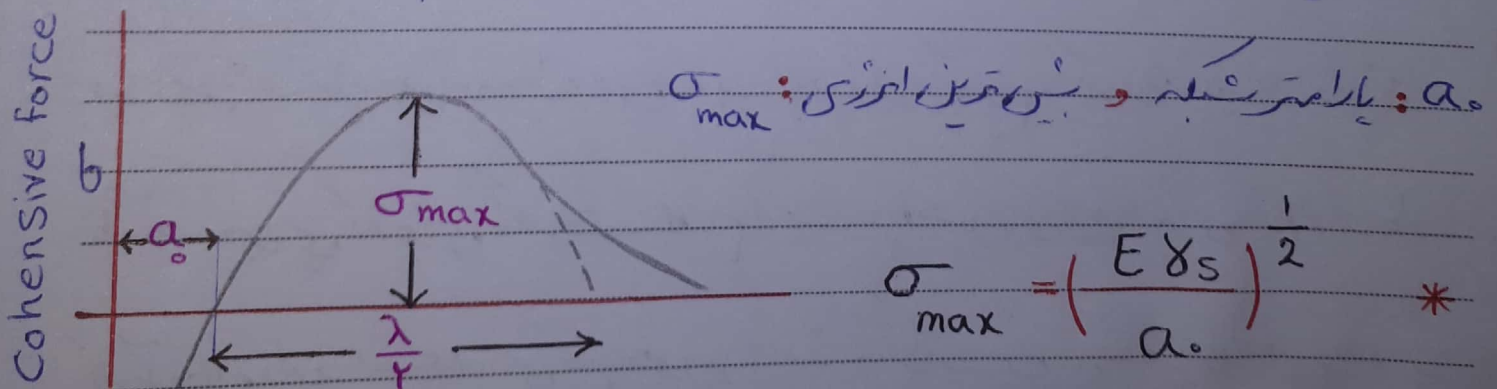
حرارت زیاد به هم قبل از شکست خیلی نازک می‌شوند (به اندازه نازک)

در شکست نرم یا داکتیل، قبل از شکست، حصار می دهد و شکست قابل پیش بینی است چون به تدریج قطر قطعه کم می شود و متوجه می شویم.

در شکست داکتیل، قطعه وقتی تغییر شکل پلاستیک پیدا می کند خرد می شود و یک تکه باقی می ماند. در شکست نرم سطح شکست تیره دلدار است و به سطح مقطع شکست Cup and cone می گویند. در اینجا ساختار بصورت dimple می باشد یعنی ساختار حفره حفره یا شکله شکله که در هم غور گرفته اند ایجاد می شود. در ساختار دیمپل های گردی دیده می شود. موادی که ساختار بلوری FCC دارند مانند طلا و مس رفتارشان به شکست داکتیل می رود.

استحکام تنوری مواد.

خودارزیر نیز انرژی یا تنش را بر حسب فاصله بین اتم ها نشان می دهد.



seperation between atoms, x

$a_0$ : پارامتر شبکه و بیشترین انرژی:  $\sigma_{max}$

$$\sigma_{max} = \left( \frac{E \epsilon_s}{a_0} \right)^{\frac{1}{2}} *$$

$\epsilon_s$ : انرژی جبهه سطوح شکست

مقدار انرژی سطوح الاستیک  $\left( \frac{\text{Erg}}{\text{cm}^2} \right)$



دقتی قطعه می‌شکند سطوح جدید ایجاد می‌شود و انرژی بالایی رود و معادلات  
شکست را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

چه زمان بیشترین استحکام تئوری را دارد؟ زمانی که هیچ عیبی در نمونه  
نباشد بیشترین استحکام تئوری را دارد قطعه‌ای وجود ندارد که استحکامش به  
استحکام تئوری اش برسد.

### E: مدل الاستیسته

مقدار کمی که برای ایجاد شکست در ماده بدون نقص داریم برابر انرژی  
مورد نیاز در جهت ایجاد دو سطح جدید است.

به انرژی مورد نیاز برای تولید سطوح جدید چقرمگی شکست گفته می‌شود.

الته انرژی مورد نیاز برای تولید سطوح جدیدی که ناشی از شکست است.

در جهت تئوری نمونه را بدون عیب در نظر می‌گیریم. اگر نمونه عیب داشته

باشد نیرویی که برای شکست لازم است کاهش می‌یابد برای مثال از قطعه‌ای

که آخال دارد استفاده نمی‌کنیم چون باعث تمرکز تنش می‌شود. نواقصی که وجود

دارد ممکن است نواقص شده باشد که شامل نواقص نقطه‌ای، خطی، سطحی و

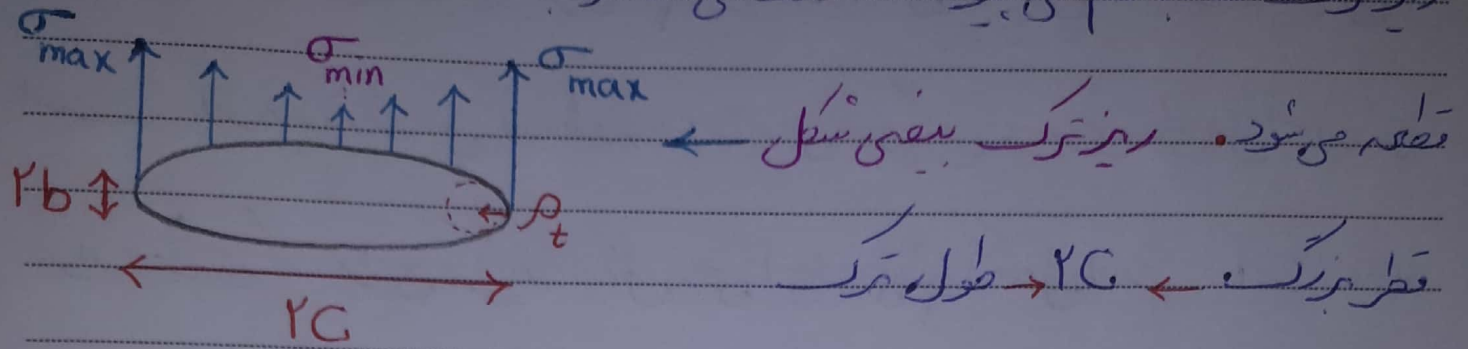
حجمی است. عیوب دیگری هم وجود دارد مثل نواقص ساخت، ممکن است با توجه به روشی که قطعه ساخته می شود یک سری نواقص ایجاد شود مگر آنقدری که برای فرآیند شکل دهی ایجاد می شود ممکن است باعث ایجاد نقص در قطعه شود مثل متالورژی پودر، شکل دهی سرد گرم و... در متالورژی پودر ممکن است آلودگی ها یا حفره ها در تخلخل ها باعث عیب شوند. نواقص ناشی از طراحی هم وجود دارد، طراحی ممکن است باعث کاهش استحکام قطعه شود مثلاً نقاط نوک نیز وجود داشته باشد یا حفره داخل قطعه باشد که اینها باعث تمرکز تنش می شود. در طراحی سعی می شود نقاط نوک نیز حذف شود و سطوح کروی جایگزین شود. نواقص متناثر هم وجود دارد این نقص در قطعاتی است که ما هم ترکیب می شوند و یک میوه طراحی سازند و برای اتصالات از پیچ و مهره برج یا جوشکاری استفاده می کنند. محل اتصالات ضعف دارند و ممکن است باعث شکست شوند.

**اثر ترک.**

مهم ترین عامل ایجاد شکست در قطعات وجود ترک ها می باشد که



در ترک های هم می پیوندند رشد می کنند و باعث شکست و از کار افتادگی



متمرکز شدن و انحراف در لبه های ترک اتفاق می افتد.

$\sigma_{app}$ : تنش ظاهری

$$\sigma_{max} = \sigma_{app} \left( 1 + \frac{2C}{b} \right) *$$

تئوری گریفیث

$$\sigma = \left[ \frac{2E\gamma_s}{(1-\nu^2)\pi C} \right]^{\frac{1}{2}} *$$

$\gamma_s$ : تغییر شکل الاستیک

$\gamma_p$ : ضربه پلاستیک

این رابطه برای مواد ترد مناسب است ولی برای مواد نرم جواب نمی دهد.

دانشمندی به نام اوردان بیان کرد که تئوری گریفیث با موادی که تغییر

شکل پلاستیک دارند و شکست نرم در آنها اتفاق می افتد تطابق ندارد و اوردان

رابطه ی زیر را تعریف کرد:

$$\sigma = \left[ \frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi C} \right]^{\frac{1}{2}} \approx \left( \frac{E\gamma_p}{C} \right)^{\frac{1}{2}}$$

امید

نرخ انرژی کرنشی آزاد شده

$$G_i = \frac{1}{2} (\gamma_s + \gamma_p) \text{ اتفاق می افتد سطوح جدیدی}$$

که ایجاد می شوند انرژی ایجاد می کنند این فرمول مجموع انرژی هارانشان می دهد.

نرخ بحرانی انرژی کرنشی آزاد شده

زمانی که اشاعه ترک داریم و ترک می خواهد رشد کند  $G_{IC}$

فالتور کرنزش

فالتور کرنزش در رأس ترک در محاسبات مورد استفاده قرار می گیرد.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{app}} = 1 + 2 \sqrt{\frac{C}{\rho_t}}$$

هر موقع تن در رأس ترک به استحکام شکست برسد شکست قطعه اتفاق

می افتد. اگر در مواد ترد مثل شیشه ترک ایجاد شود دور ترک دایره می کشند

این دایره مسیر رشد ترک را می بندد و  $K_t$  را کاهش می دهد هر چه شعاع دایره

یا انحناش تر باشد کرنزش کمتر می شود.  $\rho_t \uparrow \rightarrow K_t \downarrow \rightarrow C \downarrow$

حجم مای شکست (فالتور نشدیش)

حالت های مختلفی از اعمال نیرو وجود دارد:



mode I : opening or tensile mode.

حالت باز شدن یا کشش ترک

mode II : Sliding mode.

حالت سریشی یا لغزش

mode III : tearing mode.

حالت پارگی

$$K_{IC} = \frac{Y_S C (\rho_a)^{\frac{1}{2}}}{\sigma_S} \quad \text{یا} \quad K_{IC} = m \sigma_c \sqrt{\pi C}$$

فالتور یا ضریب شدت تنش بیان کننده چگونگی توزیع تنش حول

یک نقص است و به هندسه نقص (شکل نقص) وابسته است.

$K_{IC}$  از تابعی از تنش و طول ترک در نظر می گیریم. اگر  $K_I$  به  $K_{IC}$  یعنی

حالت بحرانی برسد ترک شروع به رشد کردن می کند و نهایتاً می شکند.

$K_{IC}$  زمانی است که مطمئناً قطعه می شکند و fail می شود.  $K_{IC}$  برای

mode I تعریف می شود.  $K_{IC}$  جزء ثوابت داده است و با دما

و تغییرات متالورژیکی تغییر می کند.

$$K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi C} \quad \boxed{0} \quad m=1 \quad \leftarrow \text{ترک داخلی یا برکزی}$$

$$m = \frac{2}{\pi} \quad \leftarrow \text{ترک سه ای} \quad m = \frac{1}{12} \quad \leftarrow \text{ترک سطحی}$$

رابطه  $G_{1C}$  با  $K_{1C}$ :

$$G_{1C} = \frac{K_{1C}^2}{E} \rightarrow K_{1C} = \sqrt{E G_{1C}}$$

در حالت تنش صفحه‌ای

$$G_{1C} = \frac{K_{1C}^2}{E} (1 - \nu^2)$$

حالت کرنش صفحه‌ای

برای توزیع تنش در رأس ترک دو حالت در نظر می‌گیریم:

۱- تنش صفحه‌ای

۲- کرنش صفحه‌ای

ترک وقتی ایجاد می‌شود و اشاعه پیدا می‌کند احتمالاً منطقه‌ای جلوی ترک ایجاد می‌شود

که بر روی خواص شکست ماده تأثیر می‌گذارد.



جبرانی ترین حالت رشد ترک در نور ترک است.

شعاع منطقه پلاستیک نوک ترک  $r_y$

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

plane stress

تنش صفحه‌ای

$$r_y = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{K_{1C}}{\sigma_y} \right)^2$$

Plane Strain

کرنش صفحه‌ای

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

مقاومت  $r_y < 1/10 B$  کرنش صفحه‌ای

$$r_y = B$$

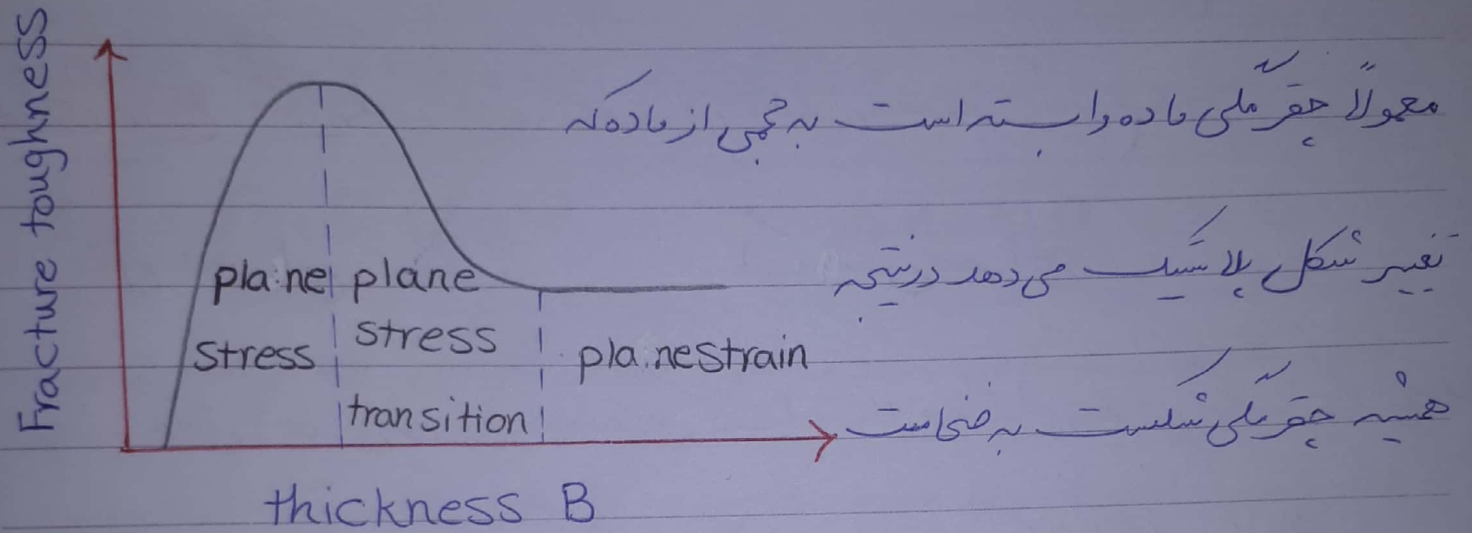
تنش صفحه‌ای



$$K_{eff} = m \sigma \sqrt{\pi (a + r_y)} \quad \text{تأثیر منطقه پلاستیک در این}$$

فرمول لحاظ شده است.

تغییر چقرمگی شکست با ضخامت  $K_{IC}$



ماده وابسته است.

در منطقه (1) با افزایش ضخامت چقرمگی شکست افزایش پیدا می کند و چقرمگی

شکست از جنس انرژی است و بعد از آن به Max می رسد پس افت می کند

و نهایتاً نمودار ثابت می شود. چقرمگی شکست به ضخامت بستگی دارد.

اصف رسید ترک: برای ترک های خستگی و ترک هایی که در شکست

وجود می آیند یا شکست می باشد. دانشمندی به نام بارین این روابط را بدست آورد:

$$da = C (\Delta K)^n \quad \text{A یا C ثابت}$$

$dN$

افزایش طول  
ترک در یک سیکل

سرعت رشد ترک به دو عامل بستگی دارد :

۱- بارگذاری (تنش) ۲- طول ترک اولیه

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

گستره ضربه شدت تنش

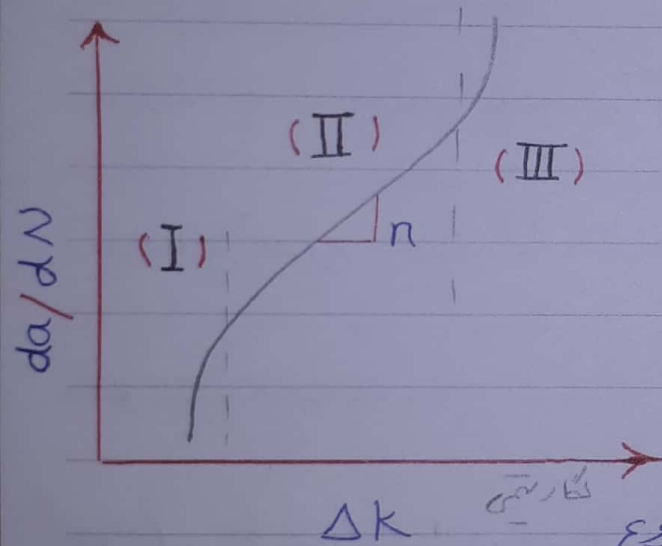
$$K_{max} = m \sigma \sqrt{\pi a_f}$$

فالتور شدت تنش مربوط به تنش یا الزیم

$$K_{min} = m \sigma \sqrt{\pi a_0}$$

فالتور ~ ~ به تنش منبهم

a: طول ترک



منطقه ۱: ترک قادر به رشد کردن نیست و

اشباع ترک نداریم.

منطقه ۲: ترک با نرخ رشد تقریباً ثابت شروع

به اشباع پدید آمدن می کند. منطقه ۳: ترک به شدت رشد می کند تا شکست

لا تعداد سیکل خستگی

n شب منطقه ۲

اتفاق بیفتد.

impact test

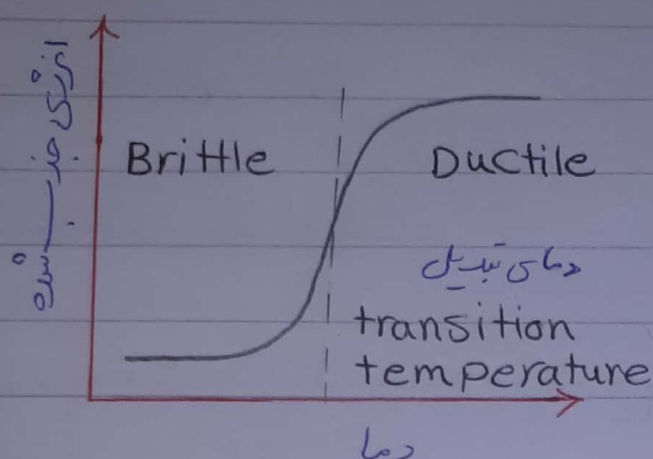
تست ضربه

charpy impact test or charpy V-notch test

AND



بالین تست رفتار شکست ماده پیش بینی می شود.



دمای تبدیل : دمای که رفتار ماده در

شکست تغییر می کند قبل از دمای تبدیل

شکست سرد و بعد از دمای تبدیل شکست

داکتیل وجود دارد. هر چه دمای تبدیل کمتر باشد بهتر است وقتی دمای تبدیل به

سمت چپ می رود ناحیه ی داکتیل بیش تر می شود منطقه Brittle کوچک تر می شود.

اگر دمای تبدیل به سمت راست باید محدوده دمای کاری را کمتر می کنند و این

مطلوب نیست.

عوامل مؤثر بر دمای تبدیل :

۱- ضخامت : با افزایش ضخامت منحنی به سمت راست می رود و دمای

تبدیل زیاد می شود که مطلوب نیست چون دمای کاری را محدود می کند.

۲- عناصر آلیاژی : اگر درصد کربن زیاد شود دمای تبدیل زیاد می شود چون

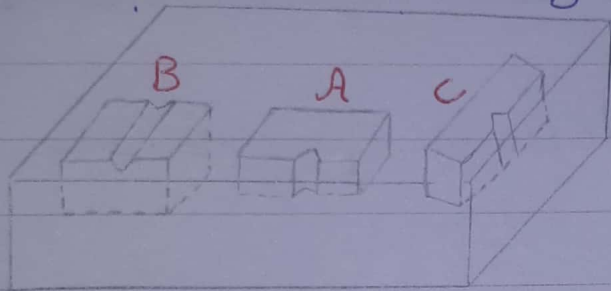
استحکام بالا می رود و رفتار ضربه ای ماده ضعیف می شود.

AND

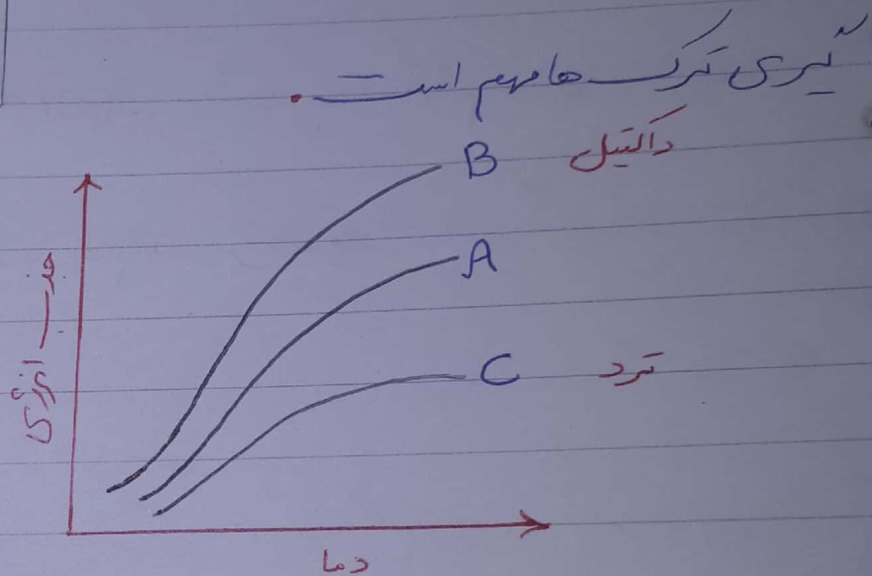
۳- جهت نمونه : مخصوصاً قطعاتی که روش کار انجام شده است کاربرد کارتریج

راستایی که کار انجام شده است رفتارش با سایر راستاها فرق می‌ند مثل کامپوزیت

که جهت تقویت کننده هاروی استحکام تأثیر می‌ندارد جهت نمونه و جهت قرار



Rolling direction



۴- اندازه دانه : با کاهش اندازه دانه‌ها بدلیل اینکه مرز دانه بیش‌تر می‌شود رفتار

ضربه‌ای را بهبود می‌دهند مرز دانه‌ها عواملی برای رشد ترک هستند. منطقه دائیل ↑

بهبود چقرمگی شکست  $K_{IC}$  :

۱- نوع پیوند : سخت‌ترین نوع پیوند یونی و کووالانسی است و پیوند فلزی انعطاف

پذیری بالایی دارد هرچه از پیوند کووالانسی و یونی دور شویم به سمت چقرمگی شکست

بالا تر می‌رویم یعنی منطقه دائیل بزرگ‌تر و منطقه Brittle کوچک‌تر می‌شود.



پیوند الکترونی ← فلزی ← یونی ← کووالانسی ← قابل به شکست تردیش نرمی شود.

۲. ساختار بلوری: هرچه تقارن ساختار کمتر باشد چقرمگی کم و شکست تردی می شود.

معمولاً بلورهای فشرده شکست نرم دارند.

۳. ساختارهای منظم (ordering): ساختارهای منظم تر معمولاً به سمت

شکست تردی روند هرچه به سمت <sup>ساختار</sup> نظم بلند دامنه برود قابل به شکست تردیش تر می شود.

۴. استحکام: هرچه استحکام زیاد شود چقرمگی شکست کم می شود. افزایش استحکام باعث ضعیف شدن خواص ضربه می شود. اما:

الف) رنزیدانه سازی: وقتی ساختار ریزدانه می شود هم استحکام زیاد می شود هم انعطاف پذیری زیاد می شود.

ب) ایجاد محلول جامد: محلول جامد باعث افزایش استحکام می شود و معمولاً

انعطاف پذیری را کاهش می دهد ولی در مجموع خواص ضربه ای را مطلوب

می کند و خواص ضربه ای را تخریب نمی کند. در فولاد عناصر آلیاژی مثل سی

اکثرین فنر خواص ضربه را به شدت کاهش می دهند.

هرچه ساختار کهن تر باشد یعنی پراگندگی رسوب و فازهای ثانویه کهن تر

باشد خواص ضربه ای بهتر می شود.