(۵۸) ۸۷/۱/۲۰

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

۸۷/۱/۲۵ علت نرم شدن و سخت شدن خستگی:

علت تغییر ساختار نابجایی‌هاست. در سیکل‌های زیاد ساختار سلولی نابجایی شکل می‌گیرد ($N=2000$) در $N=0$ نابجایی دیده نمی‌شود. در مورد Fe در $N=1000$، دانه‌های جزئی هم تشکیل می‌شود.

یک دانه

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

در مراحل ۱ و ۳ تغییر شکل ایجاد کرده‌ایم. ۳: تودهٔ نابجایی‌ها

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

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

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

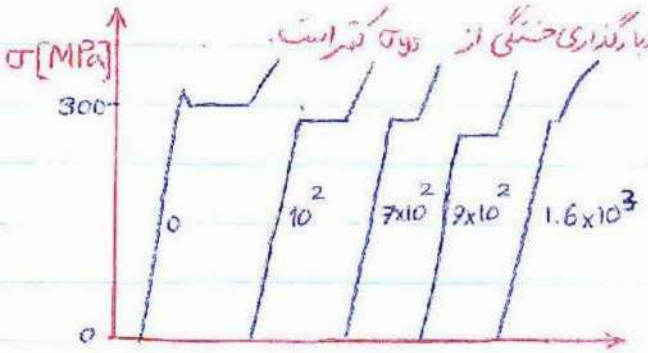
از مرحله ۴ تا ۵: ناصدمه ترین لغزش در ۵ بیشتر است (موانع کمتری وجود دارد)

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

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

(۵۹) ۸۷/۱/۲۵

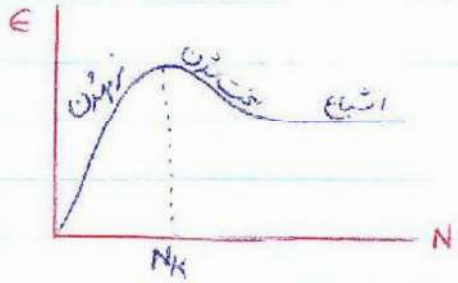
برخی مواد در مراحل اولیه هم سخت میشوند و هم نرم . این مواد استحکام تسلیم نامیده دارند (فولاد کم کربن)



(تنش اعمالی کمتر از تنش اصلی) تنش دوباره گذاری خستگی از روی کمتر است.

یعنی بعد از N سیکل بارگذاری خستگی حد کشش نمونه رسم شده است .

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



در کنترل تنش :

تا N_K نرم شدن داریم

از N_K تا حد استحکام سخت شدن داریم

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

علت این رفتار (نرم شدن و سخت شدن) :

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

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

(۶۰) ۸۷/۱/۲۵

از موانع آزاد میشوند و شروع به حرکت کرده ← تغییر شکل پلاستیک. با افزایش تعداد سیکل‌ها تعداد دانه‌هایی که نابجایی‌ها از آن‌ها آزاد شده، زیاد میشود و همزمان تغییر شکل پلاستیک هم افزایش خواهد داشت. با افزایش تغییر شکل پلاستیک، کارسختی نیز افزایش می‌یابد. تا وقتیکه آزاد شدن نابجایی‌ها بر کاهش تغییر شکل در اثر کارسختی غلبه کند ← عمل نرم شدن انجام میشود.

تغییر شکل ناشی از

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

اگر دامنه‌ی بارگذاری از تنش تسلیم بیشتر باشد:

در هان نیم سیکل اول از این منطقه رد شده‌ایم و باید انتظار نرم شدن داشته باشیم چون در نیم سیکل اول قسمت نرم شدن و یا حتی قسمتی از سخت شدن و یا حتی ممکن است ← مرحله اشباع رسیده باشیم که این به دامنه‌ی بارگذاری ربط دارد.

بازگشت این اتم‌ها به نابجایی‌ها و قفل مجدد بعد از رهایی، در دمای اتاق همینطور ماندگار می‌شود.

* خواندرنی ترک:

- محل‌های جوانه‌زنی ترک:

۱- نوارهای لغزش خستگی: معمولترین روش جوانه‌زنی است و ماهیت آن تمرکز لغزش در دانه‌ها است.

۲- مرز دانه‌ها: جوانه‌زنی در مرز دانه‌ها مخصوص خستگی با کرنش بالاست مخصوصاً در دمای بالا

۳- آخال‌های سطحی: این نوع جوانه‌زنی مخصوص بعضی آلیاژهای تجاری است که دارای ذرات... اندازه

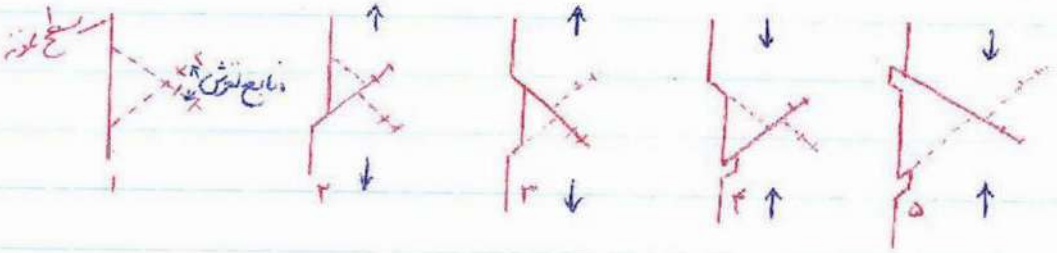
کافی

(۷۱) ۸۷/۱/۲۵

مکانیزم های هوازدگی ترک :

هوازدگی ترک در اثر تغییر شکل موسان می باشد و نوارهای تغییر شکل هایی مناسب می باشند . معمولاً ترک ها از ناحیه فرورفتگی های سطح هوازده می زنند . یعنی از ریز ناقص هایی که در اثر تغییر شکل موسان چرخه ای تشکیل میشوند .

مکانیزم ۱ - کاترل - هال :



در سیستم متقاطع در نظر میگیریم .

۱و۲ : نیم سیکل کشش : یکی از سیستم ها شروع به تغییر شکل می کند ← لایه در سطح بالاخره سیستم بعدی هم تغییر شکل خواهد کرد .

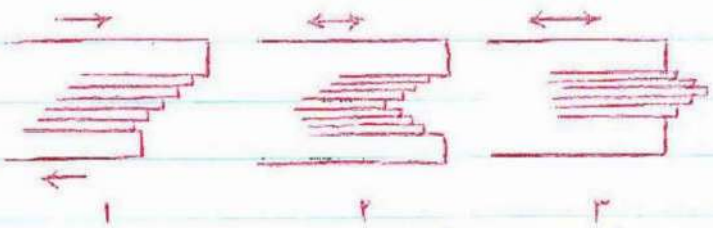
۳ : در فشار ابتدا سیستمی فعال میشود که در کشش فعال شده بود در فشار، تغییر شکل عکس کشش است ← فرورفتگی ایجاد میشود . (intrusion)

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

کاترل و هال معتقدند ، این برآمدگی و فرورفتگی ها باعث تمرکز تنش در سطح میشوند ← از این محل ها هوازدگی ترک شروع میشود .

موسسه مواد شریف

مکانیزم ۲ ـ ورود :



تشکیل ریز ترک بارشته شدن لایه های فرورفتگی ها با حرکت نسبی لایه های موازی است

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

درانتهای فرورفتگی راتحریک می کند .

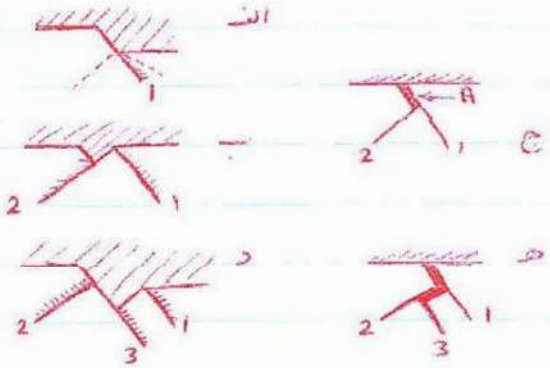
۱ : لغزش صفحات ۲و۳ : بارگذاری خستگی

۲ ← فرورفتگی ، عمیق وعمیق تر شده ← ترک شکل می گیرد [حفره فرورفتگی عمیق شده

وترک میشود و تمرکز تنش داریم]

۳ ← برآمدگی جلوی رود و ادامه خواهد داد

مکانیزم ۳ ـ نوبان : فشار کشش



برمبنای لغزش برشت درصفحات

لغزش موازی ومتوالی . ترک

از یله های لغزش برشت شروع

میشود . این مکانیزم برمبنای کاهش چسبندگی است . در فشار هم چیز مثل حالت اول پیش میرود

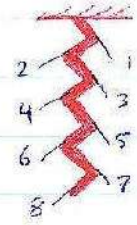
اما در منطقه ی A ، کاهش چسبندگی داریم . در "د" سیستم سوم هم فعال میشود .

در نهایت ... گ خواهیم داشت .

موسسه مواد شریف

مکانیزم شوران هم بر مبنای لغزش است، منتها لغزشی که عدم جبندگی ایجاد می‌کند.

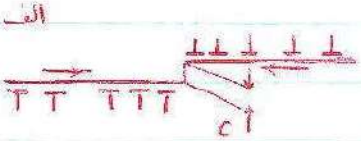
در اثر تغییر شکل پلاستیک دگرهای بوجود آمده موجب تشکیل اکسید میشود. در برگشت این لایه‌ی اکسیدی موجب عدم جبندگی کامل میشود.

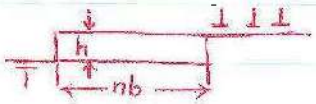


در شکل چنین چیزی دیده میشود (لایه‌ی اکسیدی)

۸۷/۲/۱

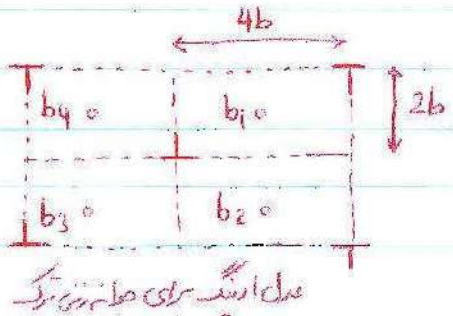
کاهش چقرمگی در صفحه لغزش: ۱- الگوی فوجیتا





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

۲- الگوی اشنگ:



مدل اشنگ برای جانه‌زنی ترک

نابجائی مثبت و منفی داریم. در نقاط b_1 تا b_4 ،

(۹۴) ۸۷/۲/۱

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

سایر مکانیسم ها:

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

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

جوانه زنی در مرز دانه ها :

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

2. از آنجا که مرزها تغییر شکل مومسان را متوقف می کند در مقیاس میکروسکوپی ناپایداری مومسانی رخ میدهد و یک ریز فاق ایجاد می شود . با افزایش چرخه ها ریز فاق عمیق تر میشود تا حدی که تمرکز تنش در ریز فاق ایجاد ترک می کند .

(۲۵) ۸۷/۲/۱

عوامل موثر بر جوانه زنی :

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

* عوامل موثر بر جوانه زنی :

1_ دامنه بارگذاری ↑ ← کوتاه شدن مرحله جوانه زنی

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

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

جوانه زنی در آخال ها : بیشتر بوجود می آید اگر دما بالا رود چون ناپیوستگی هایی تولید شده در

فلز ← اثر عکس قبلی دارد.

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

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

5_ حالت نهایی سطح قطعه ، مثال تنش های پسماند ، تفاوت در ترکیب شیمیایی، کارسختی لایه های سطحی،

زبری سطح : چون ترک خستگی از سطح شروع میشود.

تنش های پسماند کششی مضر هستند ولی اگر فشاری باشند در خستگی مفید هستند . اگر تنش اعمالی

باشد و تنش پسماند کششی باشد ← مثل اندازش دامنه بارگذاری است .

(۴۶) ۸۷/۲/۱

تقاومت در ترکیب شیمیایی : در اثر اعمال عملیات سطح مثل کربوره کردن یا دی کربوره شدن. این تقاومت اگر با مانع از ایراش استحکام لایه سطحی شود ، مقاومت به جوانه زنی ترک را افزایش می دهد (تغییر شکل پلاستیک در زیر سطح ← تاخیر extrusion و intrusion)

کارسختی لایه های سطح : توسط فیری عملیات ، تغییر شکل پلاستیک لایه های سطحی ← کارسختی ← افزایش مقاومت به جوانه زنی ترک .

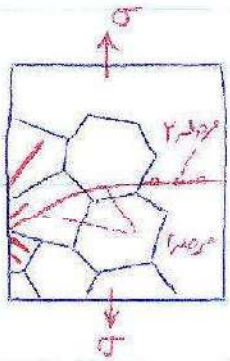
زبری سطح : سطح زبرتر ← تمرکز تنش بیشتر ← کوتاه تر شدن مرحله جوانه زنی .

پیشروی ترک خستگی :

- مکانیسم های رشد ترک

- مراحل رشد ترک

مراحل گسترش ترک :



طول ترک در مرحله انتقال از مرحله ۱ به مرحله ۲ بسیار کوتاه و تنش اعمالی زیاد است اما بندرت از چند دهم mm تجاوز میکند.

گاهی ممکن است مرحله سومی نیز وجود داشته باشد و منجر به قطعات ناگهانی شود که میشود بعلت تغییر گرنش صفحه ای به تنش صفحه ای . تنش اعمالی کمتر ← طول ترک در منطقه انتقال طولانی تر.

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

موسسه مواد شریف

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

مدل‌های گسترش ترک: مرحله‌ی ۱

در تک بلور notch ، 45° قرار دارند و

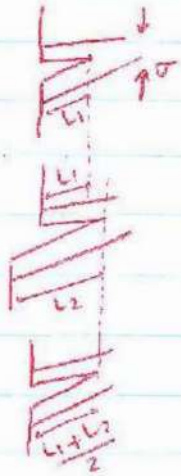
تنش فشاری اعمال کردند اما ترک رشد نکرد

← تنش فشاری در اشاعه ترک نقش دارد

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

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

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



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

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

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

مولفه برشی اعمال تنش

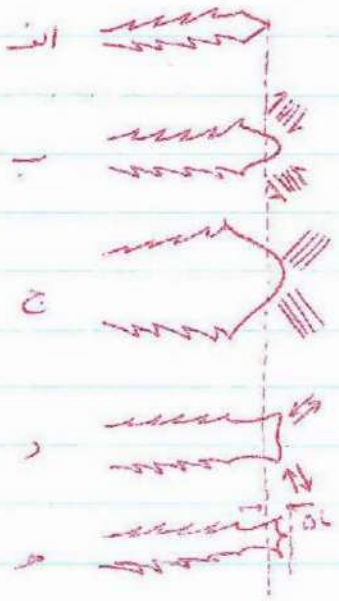
فشار صفحات در جهت عکس حرکت می‌کند و ترکی با طول

$\frac{L_1+L_2}{2}$ ایجاد میشود که از L1 بزرگتر است. (ب)

موسسه مواد شریف

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

گسترش ترک مرحله‌ی 2 :



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

تغییر شکل پلاستیک ← زیاد شدن شعاع رأس ترک

ج : نیم سیکل کشش : افزایش شعاع رأس ترک و

رشد ترک (همزمان با ب)

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

ترک نیم دایره‌ای است buckling شده و شعاع

رأس ترک کم می‌شود . (P↓)

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

معمولاً برای پیشروی ترک خستگی

سطح مقطع شکست : ماکروسکوپی :

دو قسمت دارد : براق و کدر

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

ترک در سطح رشد می‌کند تا $K = K_{IC}$ برسد . در سطح، سطوح ترک روی هم می‌لغزند

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

(99) ۸۷/۲/۱

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

۱ ـ دامنه‌ی تنش کمتر ← منطقه‌ی خستگی طولانی‌تر .

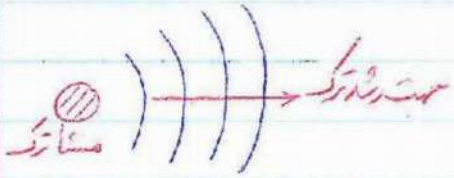
۲ ـ میزان تمرکز تنش ← تأثیرگذار دارد .

۳ ـ نوع بارگذاری ← مثل Rotating bending

شکست خستگی

سطح شکست میکروسکوپی :

از TEM و SEM استفاده میشود :

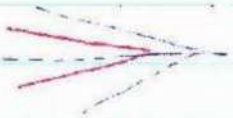


نمونه‌ی خطوط خستگی دیده میشود :

در داخل آنها باید دنبال مبدا ترک گشت

علت ایجاد خطوط خستگی :

۱) عمود بر صفحه : جهت‌ی ترک



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

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

ترک در مرحله‌ی اول ، مقاومت لایه‌ی اکسیدی بیشتر است .

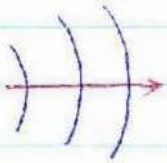
اگر خط مماس باشد ← یعنی تنش در همه جهات یکسان است

موسسه مواد شریف

(۷۰) ۸۷/۲/۱

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

قطعه p-strain داریم :

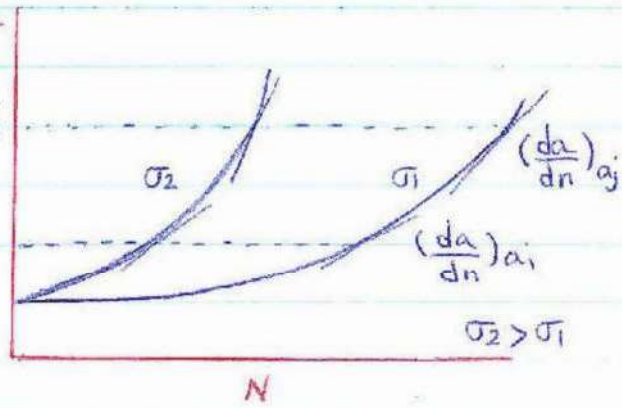


یکی از کاربردهای این خطوط : سرعت اشاعه‌ی ترک را در آن ماده می‌توان ۸۷/۲/۳

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

مرحله‌ی اول را نشان نمی‌دهد .

سرعت اشاعه‌ی ترک :



تغییر طول ترک ـ سیکل

سرعت اشاعه‌ی ترک ـ طول

ترک بستگی دارد .

تنش هم در سرعت اشاعه‌ی ترک نقش دارد ؛ پس :

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

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

K : عدد ثابت

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

* رابطه‌ی دیگر : (پاریس)

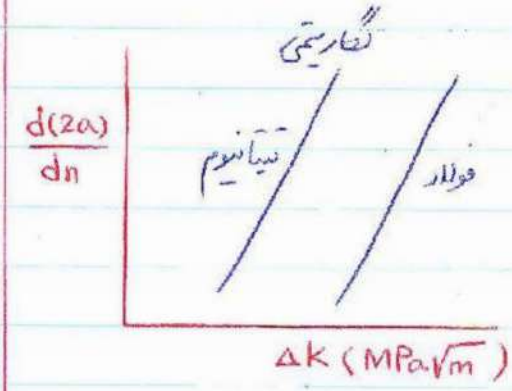
$$\frac{da}{dN} = A \Delta K^m$$

$\frac{da}{dN}$: آهنگ رشد ترک خستگی $\quad \Delta K$: گستره‌ی ضریب شدت تنش

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

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

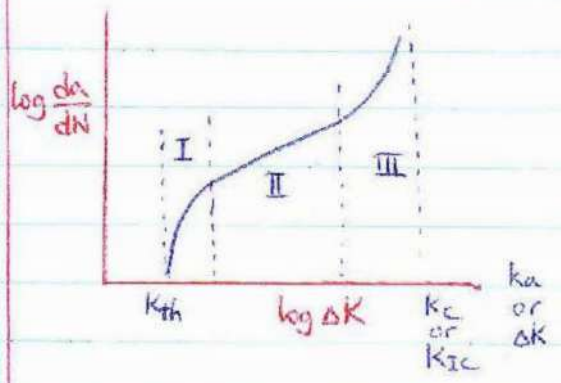
(V1) ۸۷،۲،۳



نتایج تجربی آهنگ رشد ترک :

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

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



برای مواد نرم می‌توان از K_c استفاده کرد .

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

K_{ath} آستانه‌ای threshold

این روابط برای مواد نرم صادق نیست .

شعاع منطقه‌ی پلاستیک و فاصله خطوط خستگی :

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

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

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

اگر A را داشتیم، تقریباً 6 را برمی‌گرداندیم.

مسئله ۱۷ از فصل ۱۳:

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

$\Delta\sigma = 180\ MPa$ $\quad \sigma_m = 90\ MPa$ $\quad \frac{da}{dN} = 4\times10^{-37}(\Delta K)^m$

$\frac{da}{dN}$: $\frac{m}{cycle}$ ، ΔK: $MPa\sqrt{m}$

$\frac{da_{fm}}{dN} \propto r_y^2$

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

پس: $m = 4$.

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

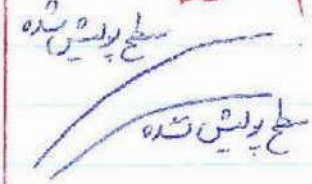
$K_a = m\sigma_a\sqrt{\pi a}$: $5 = 1\times\sigma_a\sqrt{\pi\cdot a}$; $a = 0.1\times10^{-3}$

$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2}$ $\quad \longmapsto \sigma_a^2 = 8\times10^4$

با این بارگذاری، ترک انتشار نمی‌یابد.

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

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



۱. زبری سطحی.

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

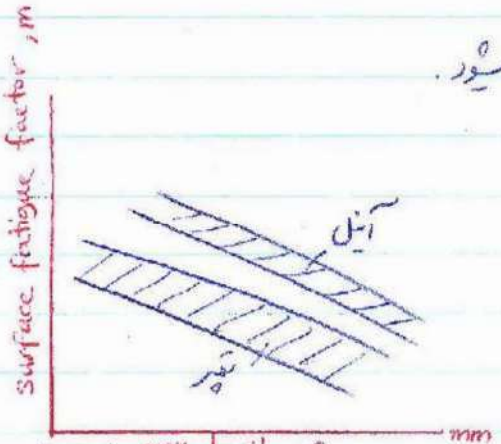
موسسه مواد شریف

(۷۳) ۸۷/۲/۲۴

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

بارگذاری : (Alternating)

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

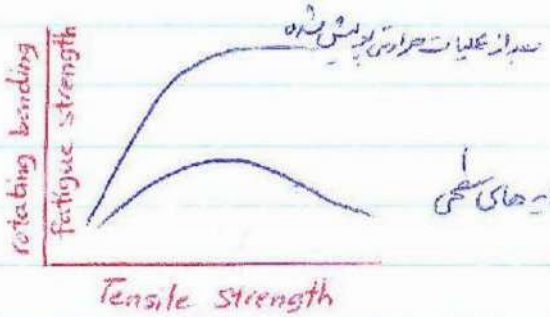


1. تاثیر زبری از یک عمق به بعد خواهد بود (وابسته به ماده)

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

2. کاهش کربن لایه‌های سطحی: Decarburizing

[استحکام لایه‌های سطحی]



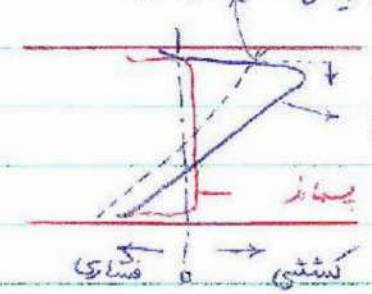
سوخته و اکسیده شده میشود.

در یک استحکام مشخص، نمونه‌ی پولیش شده، عمر خستگی بیشتری دارد

نمونه خوب شده بوده و این کاهش مربوط به اکسیداسیون لایه‌های سطحی است

3. تنش های پسماند:

اگر کشش باشد مضر هستند و اگر فشاری باشد مفیداست و طول عمر را زیاد می‌کند. تنش اعمالی



پس در یک جا هائی به نفع ماست

در یک جایی به ضرر - اما در کل تنش پسماند کششی به ضرر است.

موسسه مواد شریف

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

اعمال ساچمه باشی بر روی سطحی که تحت خستگی است ، دلایل زیر عمر خستگی را افزایش می دهد:

1. ایجاد تنش های پسماند فشاری در سطح.

2. تغییر شکل پلاستیک و کارسختی در سطح (استحکام بالاتر می رود)

3. این فرایند معمولاً در مواردی که کارسختی می رود.

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

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

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

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

5. نورد کردن سطحی:

این روش مؤثر از ساچمه باشی است زیرا میزان اعمال فشار دست خودمان است:

1. میزان کارسختی بیشتری میدهد

2. تنش های پسماند فشاری بیشتری ایجاد کرد.

افزایش استحکام به 20-80 گزارش شده است.

(۷۵) ۸۷/۲/۱۳

6. سایر روش‌ها:

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

7. پوشش های سطحی:

* پوشش های نرم
مثل روی بسرب تأثیر چندانی ندارند بر روی مدو استحکام خستگی

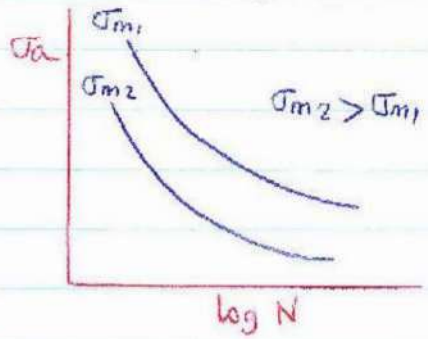
* پوشش های سخت
مثل کروم باعث کاهش مدو استحکام خستگی میشود.

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

2. اثر تنش متوسط:

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

- تنش های متوسط فشاری عکس بالاست.



(۷۹) ۸۷ ،۲،۳

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

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

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

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

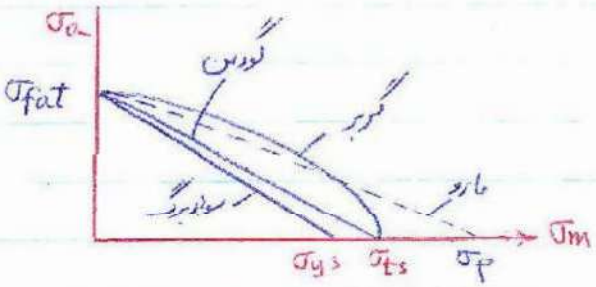
σ_a : حد یا استحکام خستگی در حضور تنش متوسط
(آخی ↓ بزاهی ↓)

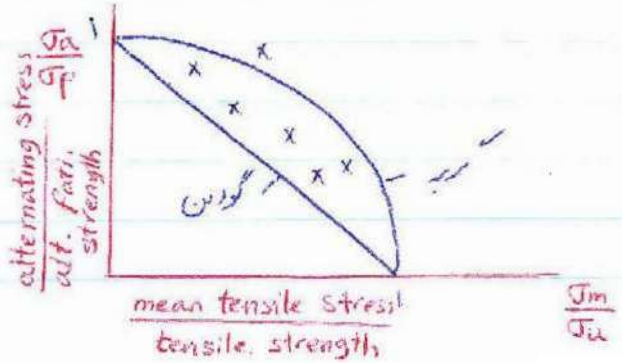
σ_{fat} : حد یا استحکام خستگی دقتی $\sigma_m = 0$ (غیاب تنش متوسط)

σ_m : تنش متوسط $\quad$ σ_{ts} : استحکام کششی

σ_{ys} : استحکام تسلیم $\quad$ σ_f : تنش شکست

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

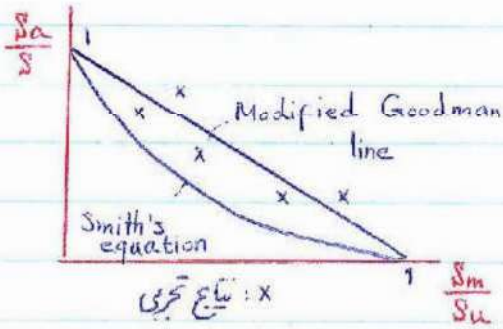




فولادها (نتایج تجربی)

از معیار گودمن برای طراحی استفاده می‌کنیم.

چدن‌ها:



گرانولیت‌ها بعنوان تمرکز تنش عمل می‌کنند.

$$S_a = S\left(\frac{1-\frac{S_m}{S_u}}{1+\frac{S_m}{S_u}}\right)$$

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

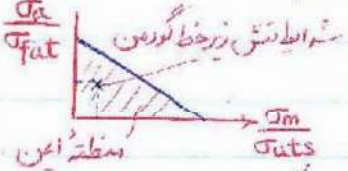
مسئله.

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

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

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

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



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

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

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

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

اثر اندازه: شرایط بارگذاری تأثیر دارد:

* بارگذاری همگن
* بارگذاری ناهمگن

σ: تنش خمشی $\quad M$: گشتاور خمشی

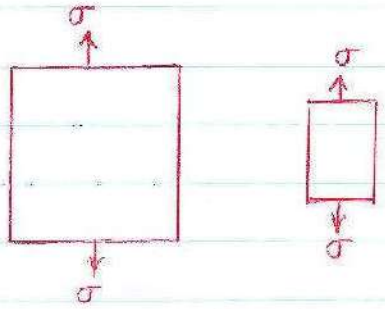
$$\sigma = \frac{Mr}{I}$$

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

موسسه مواد شریف

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 ، سه 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 برابر Δr طبق رابطه ی بالا 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 سنیت]

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

اگر محیط خورنده نباشد ، فرکانس تأثیری ندارد.

ریک سیکل معین ، تنش لازم برای شکست :

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

اثر تغییرات دامنه تنش :

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

■ اصل خسارت جمع پذیر یا اصل مایر: $\sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = 1$

اگر مجموع خسارات به ۱ برسد ، شکست خستگی خواهیم داشت

k : تعداد سطوح تنش در بارگذاری σ_i : سطح تنش iام

n_i : تعداد چرخه اعمال شده در σ_i N_i : عمر خستگی در σ_i

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

↓ استفاده از اصل مایر ضرری ندارد.

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

(۸۰) - ۸۷ ، ۲/۱

مسئله 8 از فصل 12 :

$n_1 = 2500$ $N_1 = 10^4$ σ_1

$n_2 = 10000$ $N_2 = 5\times10^4$ σ_2

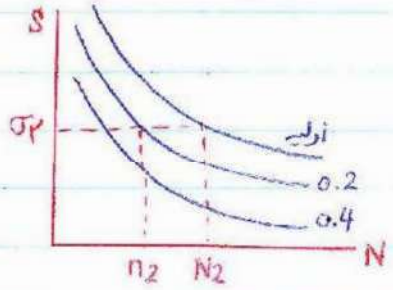
n_3 $N_3 = 5\times10^5$ σ_3

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

$\sigma_1 > \sigma_2$ 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 ... .

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

$$0.2 + \frac{n_2}{N_2} = 1 \qquad N_2 \text{ را داریم} \rightarrow n_2 \text{ بدست می‌آید}$$

n_2 را با نمودار مقایسه می‌کنیم .

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

(1) : تنشی زیر حد خستگی ← تعداد زیادی سیکل اعمال می‌کنیم (0.6×10^8 cyc) : اگر دوباره

آنرا بارگذاری خستگی کنیم ، حد خستگی زیاد می‌شود

موسسه مواد شریف

(81) ۸۷/۲/۸

(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 رخ می‌دهد . (نفوذ اتم‌های نیتروژن و کربن قفل ناجایی‌ها)

اثر شیار :

■ فاکتور شیار در خستگی :

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

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

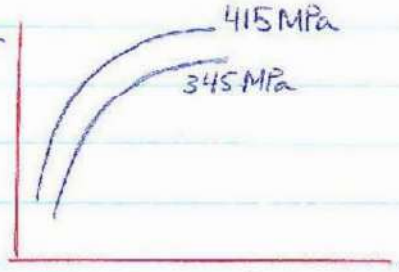
P : ثابت یا م r : شعاع راس شیار

K_t : فاکتور تمرکز تنش الاستیکی در جسم سالم

q : ضریب حساسیت به شیار : بین صفر تا 1

- اثر عوامل مختلف :

الف) استحکام کششی و r :



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

موسسه مواد شریف

(۸۲) - ۸۷/۲/۸

ب) سایر عوامل:

۱. اثر اندازه: کمک p_stress و p_strain . در قطعات بزرگ حساسیت به خاک بیشتر است.

۲. شعاع رأس خاک: در شعاع رأس خاک های کمتر، تأثیر بیشتری دارد.

ادامه اثر خاک:

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

K_b همان K_f متناظر $\sigma_m = 0$.

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

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

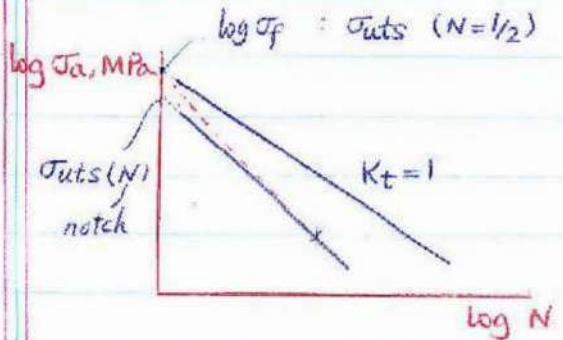
* با استفاده از تنش و کرنش رأس ترک

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

2. تنش و کرنش در رأس ترک

(۸۲) ۸۷/۲/۱۰

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 .

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

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

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 رأس ترک :

$\sigma_N = K_t \sigma_{app}$

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

$\sigma_N < \sigma_y$

$K_t = K_\sigma = K_\varepsilon$

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

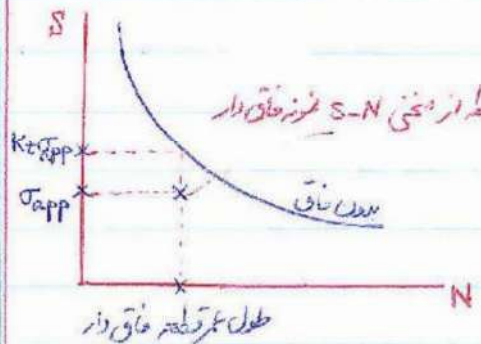
(۸۴) ۸۷/۲/۱۰

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

$K_t = 1 + \frac{2a}{b}$ $\qquad$ σ_{app}: اعمالی $\qquad$ N: در راس شکاف

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

K_t: تنش در راس شکاف به تنش اعمالی.



حالت دوم: تنش در راس شکاف بزرگتر از تنش تسلیم (پلاستیک‌ها):

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

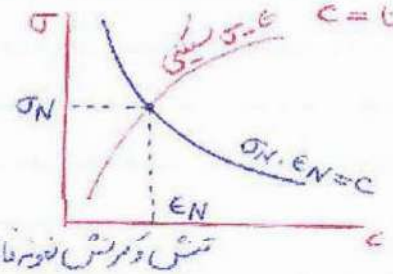
$\epsilon_N > \epsilon_y$

(معادله نیوبر)

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

عدد ثابت برای بارگذاری اعین $= C$

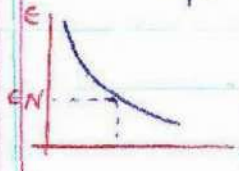
$\rightarrow \sigma_N . \epsilon_N = C$



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

σ_N را به منحنی $S-N$ نمونه بدون شکاف منتقل می‌کنیم و طول عمر را می‌خوانیم.

اگر منحنی $\epsilon - N$ را داشتیم: ϵ_N را منتقل می‌کنیم و طول عمر را می‌خوانیم.



(۸۵) ۸۷،۲،۱۰

(روش سوم) با استفاده از آهنگ گسترش ترک:

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

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

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

جواب زمانی ترک سطح نیست چون تخمینی از طول ترک است.

a_0: طول اولیه ترک — a_f: طول نهایی ترک (با داشتن K_{IC} درست 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 نامتقارن بود در رابطه $\Delta\sigma = 250 - (-50) = 300$ نه $\Delta\sigma = 250$.

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 خستگی

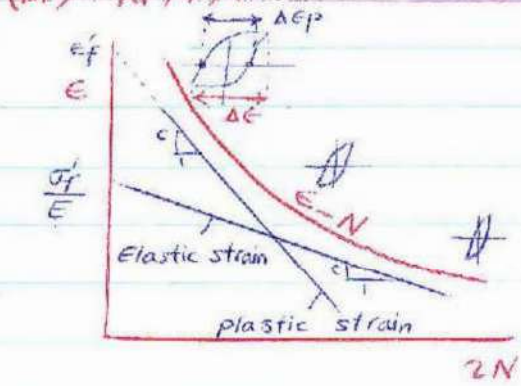
$$\frac{\Delta\epsilon_T}{2} = \frac{\Delta\epsilon_e}{2} + \frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \frac{\sigma_f'}{E}(2N_f)^b + \epsilon_f'(2N_f)^c$$

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

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

$$+\ \sigma_a = E\epsilon_a$$

(۸۹) ۸۷/۲/۱۰



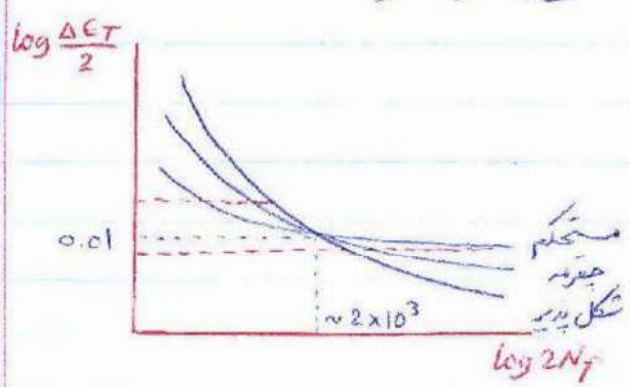
در مقیاس لگاریتمی بصورت خطی می‌شوند.

مجموع این دو خط، $\epsilon - N$ 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 $\epsilon = 0.01$.

پس $\epsilon > 0.01$ (دامنه کرنش) : کرنش پلاستیک کنترل کننده است.



$\epsilon > 0.01$: ماده شکل پذیر مقاومت

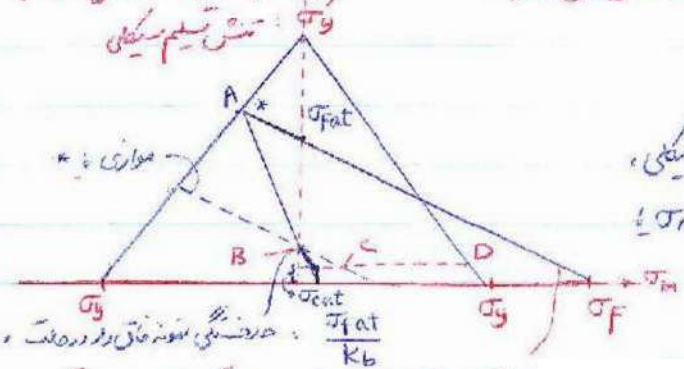
خستگی بیشتری دارد. (ϵ_p کنترل کننده)

$\epsilon < 0.01$: ماده مستحکم تر مقاومت

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

اثر تنش متوسط بر حد خستگی نمونه‌های فاقد دار :

(نمودار Haigh)



σ_{at} = : اثر تنش متوسط بر حد خستگی نمونه بدون ناق

اطلاعات لازم برای رسم

تنش تسلیم در کشش، تنش تسلیم سیکلی،

حد خستگی نمونه بدون ناق وقتی $\sigma_m = 0$!

σ_{fat} ، K_f یا K_b ، σ_{cat}

و σ_f (تنش شکست کششی کرنیز)

(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 به صورت اندازه‌ی σ_{cat} جدا کرده و A وصل می‌کنیم. محل تلاقی آن با خط موازی دوم = B

A ، B ، C ، D : حد خستگی نمونه خاص 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 داده کمتر است. محیط خورنده ← حفره‌های خوردگی ← نقاط تمرکز تنش زیاد

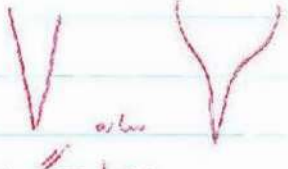
← جوانه‌زنی ترک سریع می‌شود حضور تنش سیکلی ← آهنگ خوردگی زیاد می‌شود.

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 ترک‌های خستگی نسبت به محیط ساده؛ ظاهر (شکل ظاهری ترک‌ها)

ابتدای ترک پس تراست بدلیل حفره‌ای شدن



موسسه مواد شریف

خستگی گرمایی: 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

(الاستیک) $\ell = \ell_0 (1+\alpha\Delta T)$ $\quad \frac{\Delta\ell}{\ell_0} = \epsilon = \alpha\Delta T$ $\quad \sigma = E\alpha\Delta T$

$\uparrow \Delta T, \alpha, E \leftarrow$ تنش ایجاد شده $\uparrow$

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)

موسسه مواد شریف

Subject. (۸۹) Date. ۸۷/۲/۱۵

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

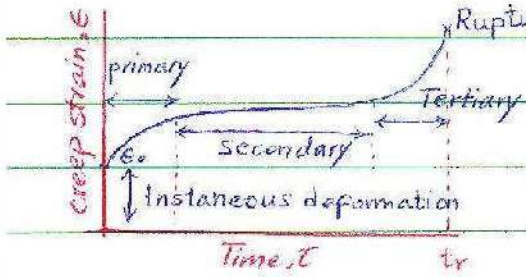
خزش: تغییر شکل تدریجی در یک ماده فلزی این ماده در دمای بالا تحت تنش ثابت قرار بگیرد. در دمای اتاق با اعمال تنش، بعد از مدتی تغییر شکل متوقف میشود یعنی وابسته به زمان نیست؛ اما در دمای بالا خزش وابسته به زمان است و ادامه پیدا می کند.

منظور از دمای بالا: حدود $0.4-0.5T_m$ ـ بعد اهمیت دارد. (T_m: نقطه ذوب بر مقیاس کلوین)

میله سربی، در دمای اتاق برای آن دمای بالایی است در تحت وزن خود، دچار خزش می شود.

در دمای بالا سرامیک عوض میشود: تعداد سیستم های لغزش بیشتر، تحرک اتم ها بیشتر، انرژی فعال سازی کمتر، صعود نابجایی راحت تر، ممکن است استحاله فازی صورت بگیرد و...

منحنی $\varepsilon - t$:



یک دما و تنش ثابت

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

موسسه مواد شریف

Subject. (۹۰) Date. ۸۷/۲/۱۵

مرحله‌ی اول : خزش گذرا یا لگاریتمی : شیب منحنی (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)

مرحله‌ 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 رشد میکنند (در صورت وجود) نابجائی‌ها راحت‌تر حرکت می‌کنند (فاصله مؤثر لغزش زیاد میشود) اگر دما طوری باشد که رسوب ایجاد میشود 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)

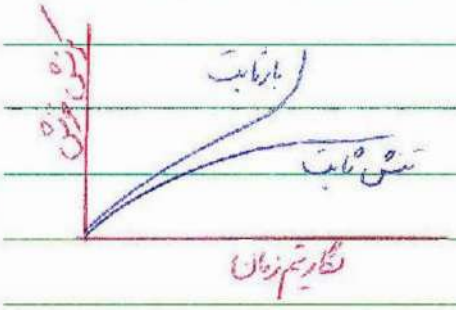
در مرحله‌ی ۲ : توازن بین کارسختی و بازیابی برقرار شده ← آهنگ خزش ثابت است.

در مرحله‌ی ۳ : افزایش آهنگ خزش ← کنترل کننده خزه‌ها ترک های ریز داخلی هستند که موجب افزایش آهنگ خزش میشود. این عوامل در مراحل قبلی ایجاد شده‌اند اما در مرحله‌ی سوم خودشان را نشان می‌دهند.

موسسه مواد شریف

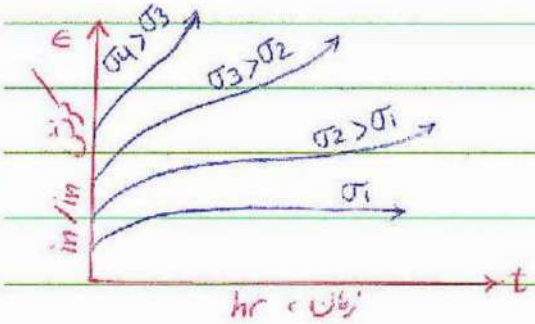
Subject. (91) Date. ۸۷/۲/۱۵

خزش تحت نیروی ثابت و تنش ثابت:



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

اثر تنش و دما:

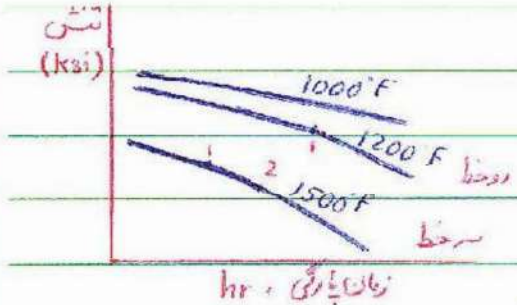


اثر دما بر مکانیزم خزش مشابه با اثر تنش می‌باشد.

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

با افزایش تنش طول مراحل کوتاه می‌شود. در σ_4 از همان ابتدا وارد مرحله‌ی سوم می‌شویم.
در σ_1 شکست نداریم. در شرایط زیر 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: کند سال‌ها طول می‌کشد ← تنش بالاتر در نظر می‌گیریم تا زودتر اتفاق افتد: یعنی گسیختگی تنشی. شرط خطی بودن می‌توان عمر تقریبی خزش را به دست آورد. خزش واقعی 10000hr خزش آزمایشگاهی: 2000hr
(Stress Rupture) (2000-10000 hr)

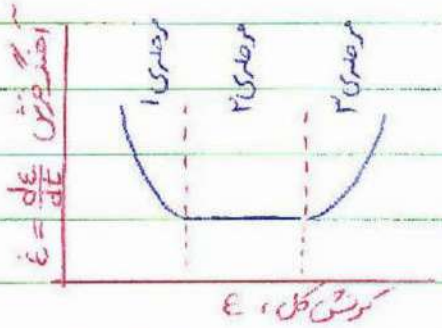
موسسه مواد شریف

Subject. (۹۲) Date. ۸۷/۲/۱۵

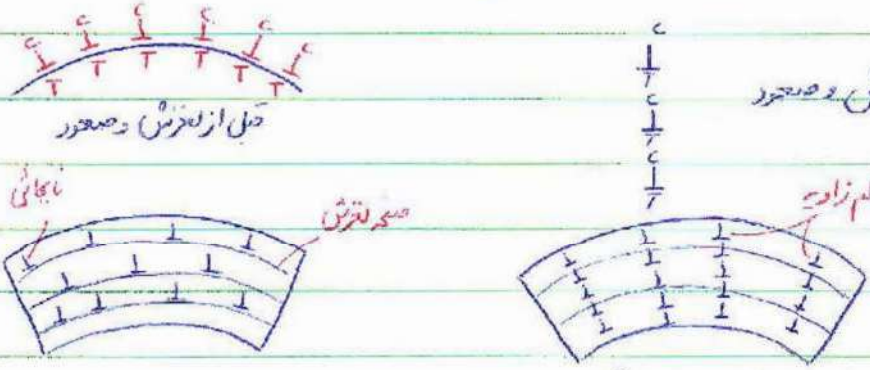
اما در آزمایش مکانیکی هیچ کدام نبود. در خزش واقعی تغییر شکل در محدوده‌ی ۱٪ است اما در stress Rupture تغییر شکل به ۵۰٪ هم می‌رسد. ← ابزار برای اندازه‌گیری کرنش در حالت واقعی گران‌تر است. از نظر زمان stress Rupture بهینه‌تر است.

شکستگی در سختی: تغییر مسیر اشاعه ترک از داخل دانه‌ها به مرز دانه‌ها. از یک زمان درمانی به بعد مسیر از داخل دانه‌ها به مرز دانه‌ها می‌آید.

تغییرات ساختاری هنگام خزش:



مرحله‌ی اول: علت اصلی: غلبه کارسختی بر بازیابی.



ناپیوستگی‌های مثبت دیگر همدیگر را دفع می‌کنند ← بازیابی

در خزش (بارگذاری ناهمگن) ایجاد ناپیوستگی از یک نوع (مثبت) ← مرزهای عرضی و کم زاویه با مرتب شدن ناپیوستگی‌ها

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

موسسه مواد شریف

Subject. (۹۳) Date. ۸۷/۲/۱۵

کارسختی در مرحله‌ی اول ← ایجاد مرزهای فرعی که آرایش ازنابجایی‌ها 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 جگالی مرزدانه‌های فرعی نسبت به مرحله‌ی اول زیاد می‌شود و پس از مدتی ثابت می‌شود.

تنش کنترل‌کننده با لاتر ← 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 ۴۵° داشته باشند.

روش‌های اندازه‌گیری کرنش مرزدانه‌ها

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

کرنش حرارتی ↓ لغزش ↓ مرزدانه‌ها ↓

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

A: ثابت n: تعداد مرزها در واحد طول

$\bar{t}$: 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.

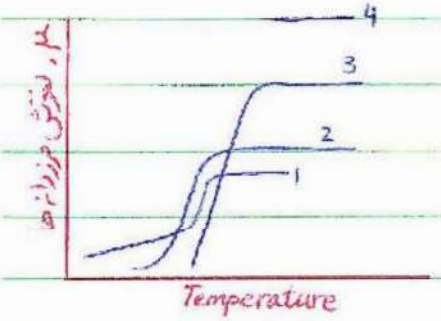
$\epsilon_{GB} = \epsilon_t - \epsilon_s$ $\epsilon_s = (1+\sqrt{2np}+n^2p^2)-1$

n: تعداد نوار لغزش P: تغییر مکان نوارهای لغزش

موسسه مواد شریف

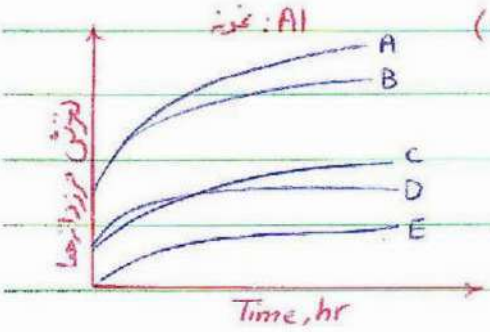
Subject. (۹۴) Date. ۸۷/۲/۱۷

مرحله‌ی دوم: لغزش مرزدانه‌ها



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

از ۱ به ۴ دانه‌ها ریزتر میشود.



خوزه: Al (دما ثابت)

A: 4.5 grain/mm, 1650 psi

B: 10 grain/mm, 1100 psi

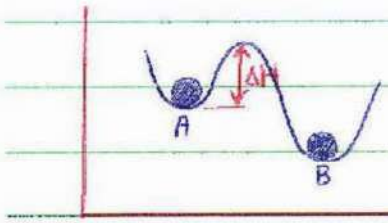
C: 9.2 grain/mm, 1100 psi

D: 4.5 grain/mm, 1100 psi

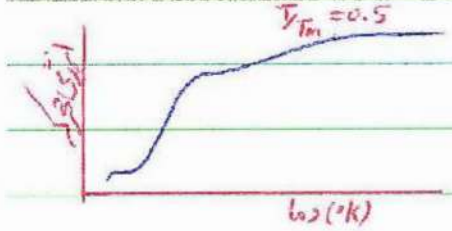
E: 4.5 grain/mm, 750 psi

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

انرژی محرکه خزش:



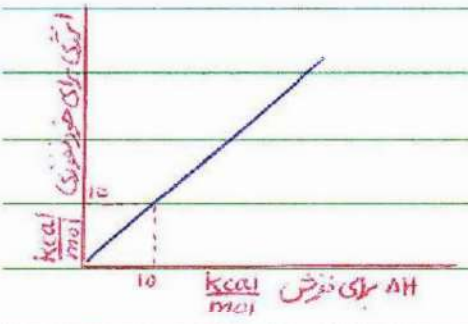
فرایند نیاز به انرژی محرکه دارد چون در دماهای بالا سطح است. انرژی برای غلبه بر قله انرژی، انرژی محرکه است.



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

موسسه مواد شریف

Subject. (۹۵) Date. ۸۷/۲/۱۷



انرژی محرکه خزش با انرژی self diffusion با 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 اعمالی ε: کرنش

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

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

غ : آهنگ خزش در مرحله‌ی دوم

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

روش‌های اندازه‌گیری انرژی محرکه :

* روش اول : Dorn et al

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

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

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

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

زمان رسیدن به کرنش معین مدنظر است.

$$\varepsilon = \alpha \left(t \exp\left(\frac{-\Delta H}{RT}\right)\right)^n$$

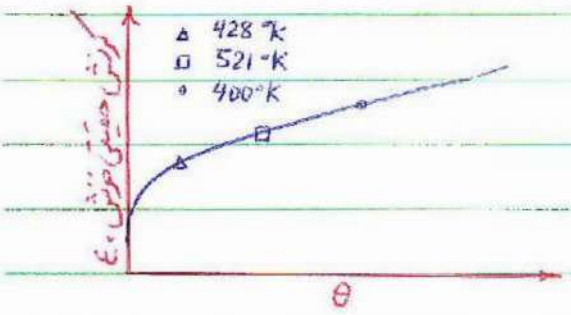
موسسه مواد شریف

Subject. (۹۴) Date. ۸۷/۱۲/۱۷

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

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

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



مرحله‌ی سوم : ایجاد ترک‌ها و منبع‌های مرزدانه‌ای :

درخزش دو نوع ترک وجود دارد :

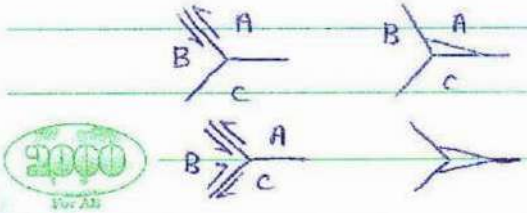
۱) ترک های گوه‌ای شکل یا نوع W (Wedge cracks)

2) ترک های کروی شکل یا نوع ۲

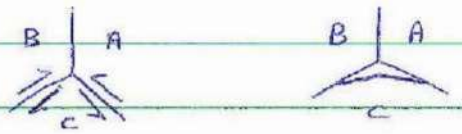
ترک‌های نوع W : معمولاً در تنش های بالا و دماهای کم و در اثر لغزش مرزدانه‌ها و در نقاط سه‌گوش مرزها بوجود می‌آیند. (در اثر تمرکز تنش و باز شدن مرزدانه‌ها).

عکس ترک های W ، ترک های ۲ است . نقاط سه‌گوش مرزدانه : ۳ تا مرز به هم می‌رسند.

ترک های نوع W :



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



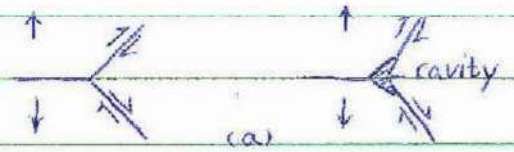
رشد ترک ها در جهت عمود بر تنش اعمالی است . در تنش $\sigma \uparrow \downarrow \sigma$ ، نوع a رشد می کند ولی c رشد نمی کند.

ترک های نوع ۳ :

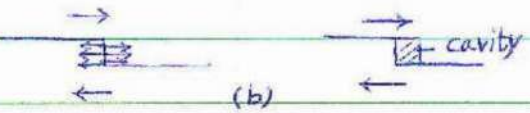
■ در تنش های کم و دماهای بالا ■ از مرزدانه ها

1- تجمع تهی جای ها 2- در اثر لغزش مرزدانه ها 3- آخال ها، ذرات فاز دوم ...

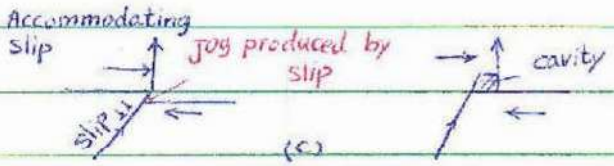
شل نوع W .



یک مرزدانه یا ناپیوستگی یا صفحه لغزش ، پدید آمده است



جاگ ایجاد میشود .



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

عوامل مؤثر بر نوع ترک :

۱- تبلور مجدد : اگر حین تنش 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 لذا نوع ۲ زیاد میشود.

۳ـ غیرهمگن بودن ساختار میکروسکوپی (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 τ_{max} است)

۵ـ دما: نوع W جایی که دما 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

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

L: طول مؤثر لغزش یا طول مرز دانه

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 اره در مرز

$2d$: فاصله مرز دانه ها از هم = قطر دانه

زمان لازم برای شکست بر مبنای آهنگ خزش مرحله دوم

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

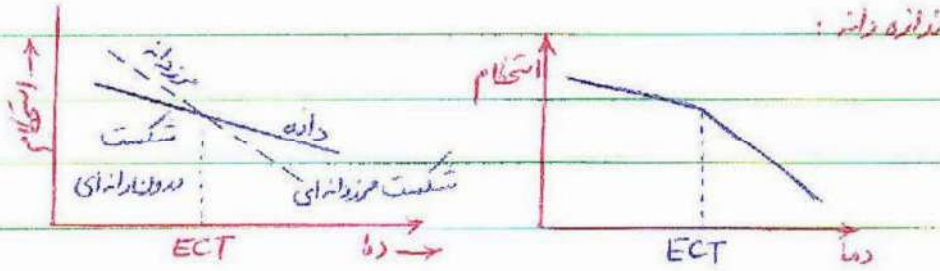
d: قطر دانه

موسسه مواد شریف

Subject. (99) Date. ۸۷/۲/۱۷

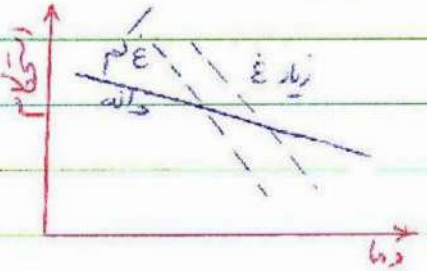
اثر عوامل مختلف بر خزش :

۱- 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 دانه های درشت استحکام بیشتری دارند.

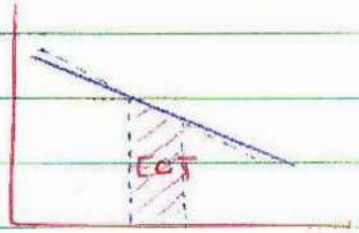
ECT : دمایی که استحکام مرز دانه و دانه مساوی باشد. ECT با یکسری پارامترها تغییر می کند. از جمله این پارامترها، $\dot{\varepsilon}$ است (آهنگ خزش)



$\dot{\varepsilon}$ 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 می رود.

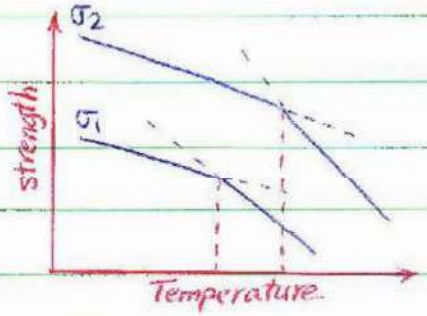
پارامتر درگیر، خلوص است :



در خلوص زیاد، دمای هم استحکامی برای یک نقطه، یک رنج نمیشود.
در خلوص خیلی زیاد ECT معنایی ندارد.

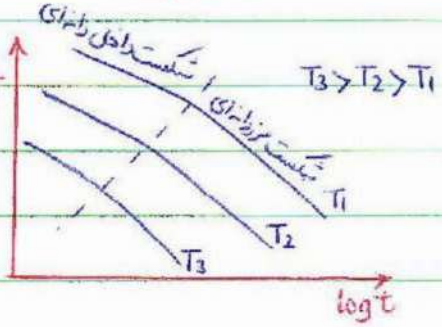
2000 For All

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



$\sigma_2 > \sigma_1$

۸۷/۲/۲۲

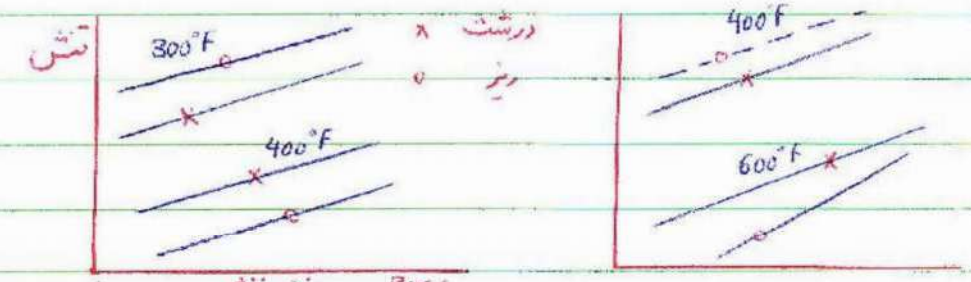


$T_3 > T_2 > T_1$

تغییرات تنش شکست برحسب زمان شکست در دمای T_1

با افزایش دما، زمان شکست مرز دانه‌ای کم میشود.

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

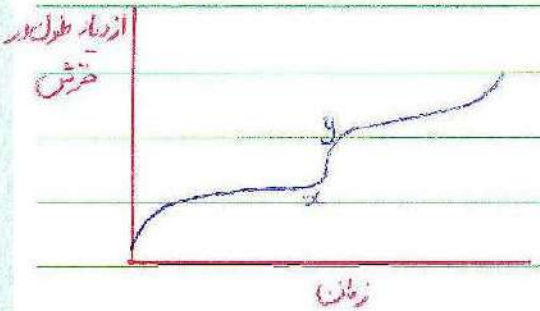


در شکل راست: در ۴۰۰°F نرخ خزش دانه درشت بیشتر است. چون دمای تبلور مجدد این آلیاژ بین 300°-400° است، آهنگ خزش تغییر کرده است.
پس در دمای کمتر از تبلور مجدد از دانه های ریز و در دماهای بیشتر از تبلور مجدد از دانه های درشت استفاده می کنیم.

موسسه مواد شریف

Subject. (۱۰۱) Date. ۸۷/۲/۲۲

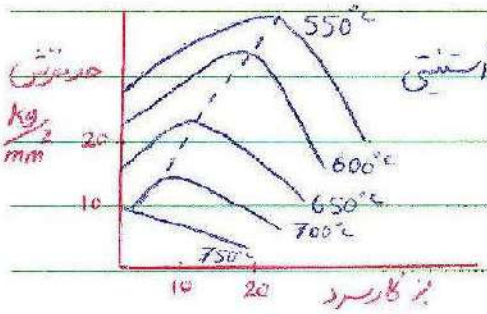
اثر بازیابی و تبلور مجدد :



در اثر کارسرد و معرض حرارت بالا : آمیل ... اگر
حین خزش این فرایند اتفاق بیفتد، چه تغییری در
مقاومت خزش دیده می‌شود؟

در فاصله x تا y یک دفعه $\dot{\varepsilon}$ زیاد شده است.
برخی اعتقاد دارند در این فاصله تبلور مجدد رخ داده است . دانه‌های جدید بدون تغییر شکل اند
و آماده‌ی تغییر شکل هستند ... ← $\dot{\varepsilon}$ زیاد میشود .

اثر پیش کرنش :



فولاد آستنیتی (8-18)

تغییرات حد خزش نسبت به میزان کارسرد
حد خزش : بیشترین های کمتر از آن، خزش
رخ ندهد (یا خزش قابل ملاحظه)

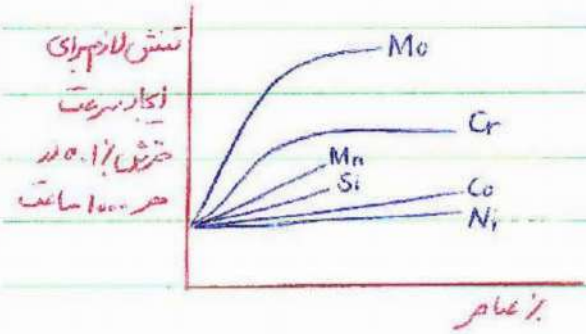
در 750°C از همان ابتدا کاهش داریم . در دمای 550°C به حد اعلی کرنش نیاز داریم تا تبلور مجدد
رخ دهد که مربوط به یک قله است . بعد از این حد اعلی کرنش ، مقاومت به خزش کم میشود
و پیش کرنش مضر میشود
در 750°C ، پیش کرنش کاملاً مضر است .

اثر عناصر آلیاژی :

عناصر آلیاژی بصورت های مختلف هستند :

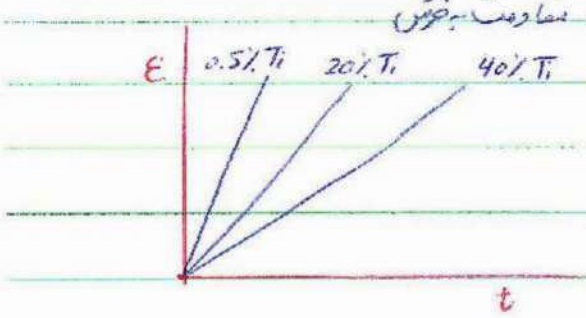
1- محلول جامد :

- مقاومت به خزش را زیاد می کند. - میزان کرنش اولیه را کاهش می دهد.
- عناصری که بازهای دیفوزیون را تأخیر بیندازند مؤثرترند.
- اثر آنها در دماهای بالا نزولاً به اندازه اثر آن ها در دماهای پایین نیست.



اثر هر عنصر مقاومت 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

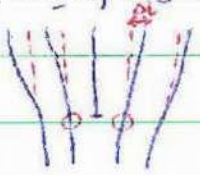
۴- واکنش با تهی جای ها و نابجائی های جاگذار

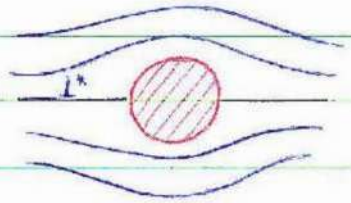
۵- تشکیل نظم کوتاه برد و دور برد

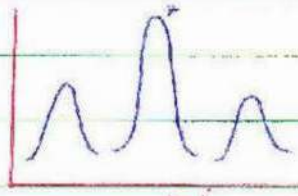
۶- جدایش در مرز دانه ها

* عناصر آلیاژی زیر خط نابجائی ← در محدوده نابجائی ها، لایه های اتمی جمع تر فشرده تر میشوند.

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





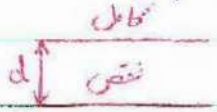


بستگی به محل ناجائی، نیرو متفاوت است.

این دو مکانیزم مربوط به اثر الاستیک سر ناجائی هاست.

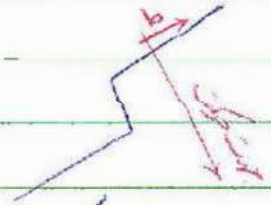
۳) تقابل چیدن در شکلهای فشرده بوجود می آید. محدوده مناطق نقص و مناطق کامل در ناجائی های جوش تشکیل می دهد که این ناجائی ها در فرایند تغییر شکل (صعود و ...) حرکت نمی کند. اگر فاصله منطقه نقص کوتاه تر باشد احتمال ترکیب دو ناجائی جوش وجود دارد ← ناجائی کامل ← مقاومت به تغییر شکل کم میشود.

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 ناجائی جوش کم میشود و مقاومت به جوش 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 جوش بیشتر میشود.

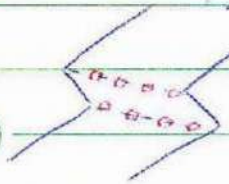


جاگ در ناجائی پیچی ← پله مانع حرکت ناجائی است.

در ناجائی مارپیچ این اتفاق نمی افتد چون واحد جاگ هم اندازه است.

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

با صعود ناجائی، Vacancy تغلیظ می کند - این منطقه با وجود اتم بصورت محلول جامد این تغلیظ مشکل میشود و حرکت جاگ مشکل خواهد شد.



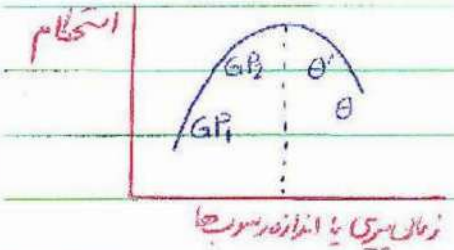
موسسه مواد شریف

Subject. (۱۰۴) Date. ۸۷/۲/۲۲

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

2- رسوب‌ها:

اتم حل شونده بصورت رسوب باشد. انتظار می‌رود مقاومت به خزش زیاد شود. کنت 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 به GP_2 تعداد رسوب زیاد و d کم ← استحکام زیاد

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

(پیش 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- ذرات پراکنده: dispersion hardening

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

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

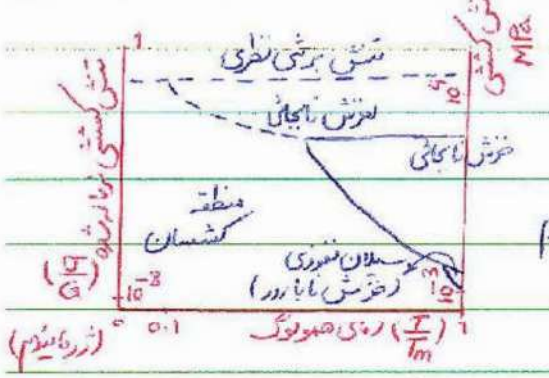
ذرات پراکنده در دمای بالا مقاومتشان به حل شدن بیشتر است ← اثرشان بیشتر از رسوب‌هاست. یعنی در دمای بالا مقاومتشان را حفظ می‌کند.

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

موسسه مواد شریف

Subject. (۱۰۵) Date. ۸۷/۱۲/۲۴

مکانیزم های خزش :



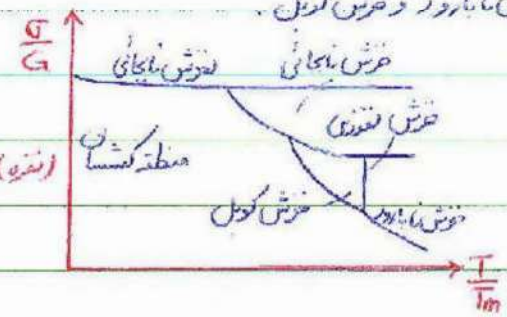
مکانیزم هایی تواند مستقل باشند. سریع ترین مکانیزم در این حالت کنترل کننده است. کندترین مکانیزم اما اگر مکانیزم ها هم وابسته باشند، کندترین مکانیزم کنترل کننده است.

با توجه به وابستگی آهنگ خزش به دما می توان سختی 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 کشسان تحولی نداریم.

خود تنش نظری به دو منطقه تقسیم می شود: خزش ناپایا رو و خزش کوبل.



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

این نقشه برای زمینه بری های متفاوت، فرق می کند.

خزش ناپایا :

با حرکت برگشت ناپذیر ناپایا ها در اثر نفوذ تو جای ها یا لغزش تقاطعی رخ می دهد (یا صعود یا تقاطعی شته - ناپایا : پله ای یا پیچی). تو جای ها با نفوذ توئی در دماهای متوسط یا با نفوذ حجمی در دماهای بالاتر نفوذ می کند. نفوذ توئی : در محدوده ی خط ناپایا / نفوذ حجمی : از کل بالک.

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

n : بین 4 تا 6 در تنش های متوسط

n : بین 8 تا 12 در تنش های بیشتر

n تا الان 40 هم گزارش شده است.

خزش ناپایا نسبت به نفوذی در دماهای کمتری تواند اتفاق بیفتد.

در مورد ناپایا ساده ← صعود ناپایا 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 دمای 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 به صورتی می‌گیرند و فرض می‌کنند فرایند خزش با بازیابی و کارسختی که بطور پی در پی اتفاق می‌افتند کنترل می‌شود. چون ما بالاست ممکن است نابجایی آزاد شود یعنی بازیابی ← تغییر شکل انجام می‌شود. وقتی ماده گرم می‌شود در اثر نوسانات گرمایی تعدادی از این تقاطع‌ها شکست می‌شوند (آزاد شدن نابجایی) و معمولاً در تقاطع‌هایی که نابجایی‌های بلند دارند این اتفاق می‌افتد. نابجایی آزاد شده تا رسیدن به تقاطع بعدی حرکت می‌کند ← تغییر شکل (کرنش) ← کارسختی این فرایند به دوام انجام می‌شود.

3 ← برخی نتایج نشان می‌دهد در بعضی حالت‌ها خزش نابجایی اتفاق می‌افتد اما $\dot{\epsilon}$ با σ رابطه‌ی خطی دارد نه توانی. این پدیده در ابتدا توسط این دو نفر ارائه شده و در مورد Pb و Al دیده شده.

مکانیزم: خزش در تحت شرایطی رخ می‌دهد که چگالی نابجایی‌ها با تنش تغییر نمی‌کند.

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

موسسه مواد شریف

Subject. (۱۰۷) Date. ۸۷/۲/۲۴

م: چگالی نابجایی D_{eff} : ضریب نفوذ حجمی G: مدول برشی Ω: حجم اتمی

این پدیده دمای بالا و تنش کم اتفاق می‌افتد.

۹ ← در تنش‌های باندازه‌ی کافی بالا، مشاهده شده که قانون توانی صادق نیست و آهنگ خزش 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.

$$\dot{\epsilon} \propto \exp(B\sigma) \qquad (10^{-3}\,G)$$

* خزش نفوذی:

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

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.

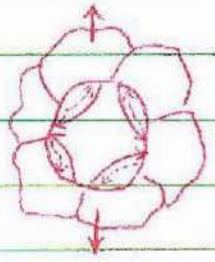
d: قطر دانه D_V: ضریب نفوذ حجمی D_B: ضریب نفوذ مرزدانه‌ای

δ_B: سطح مقطع مؤثر مرزدانه‌ای برای انتقال نفوذی.

اگر جدایی دوم بزرگتر از ۱ باشد، مکانیزم کوبل حاکم است. (جلد داخل پراتز)

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

خزش نابارو - هرینگ:



--- : جهت حرکت مواد

— : جهت حرکت نابجایی‌ها

در تنش‌های پائین و دماهای بالا (جایکه آهنگ خزش با تنش اعمالی تغییر می‌کند) این مدل فرض کرده که فرایند خزش با نفوذ اتمی ناشی از تنش کنترل شود. این نفوذ شامل مهاجرت اتم‌ها جای‌ها

For All

از مرزهای کَت کِشش 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 کِشش و افزایش انرژی در مرزهای تحت فشاری باشد.

$$\dot{\epsilon}_S \approx \frac{7\sigma D_{Yb} b^3}{KTd^2}$$

b: بردار برگرز

روابط مربوط به مرحله‌ی دوم است.

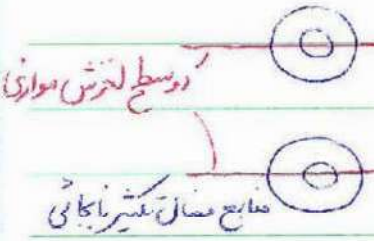
خزش کوبل:

شامل نفوذ اتمی یا یونی در طول مرزدانه‌ها (فرورو 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 حالی 2.

تئوری صعود Weertman:



در این مکانیزم خزش، حضور لغزش نیز در همین 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 رانش حلقه‌ها متوقف شده و منبع نیز نابجایی بیشتری صادر نخواهد کرد. اما در دمای بالا حلقه‌های نابجایی قادرند عمل صعود را انجام داده و یا همدیگر را خنثی کنند ← ادامه صدور حلقه‌های بیشتر امکان‌پذیر می‌شود.

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