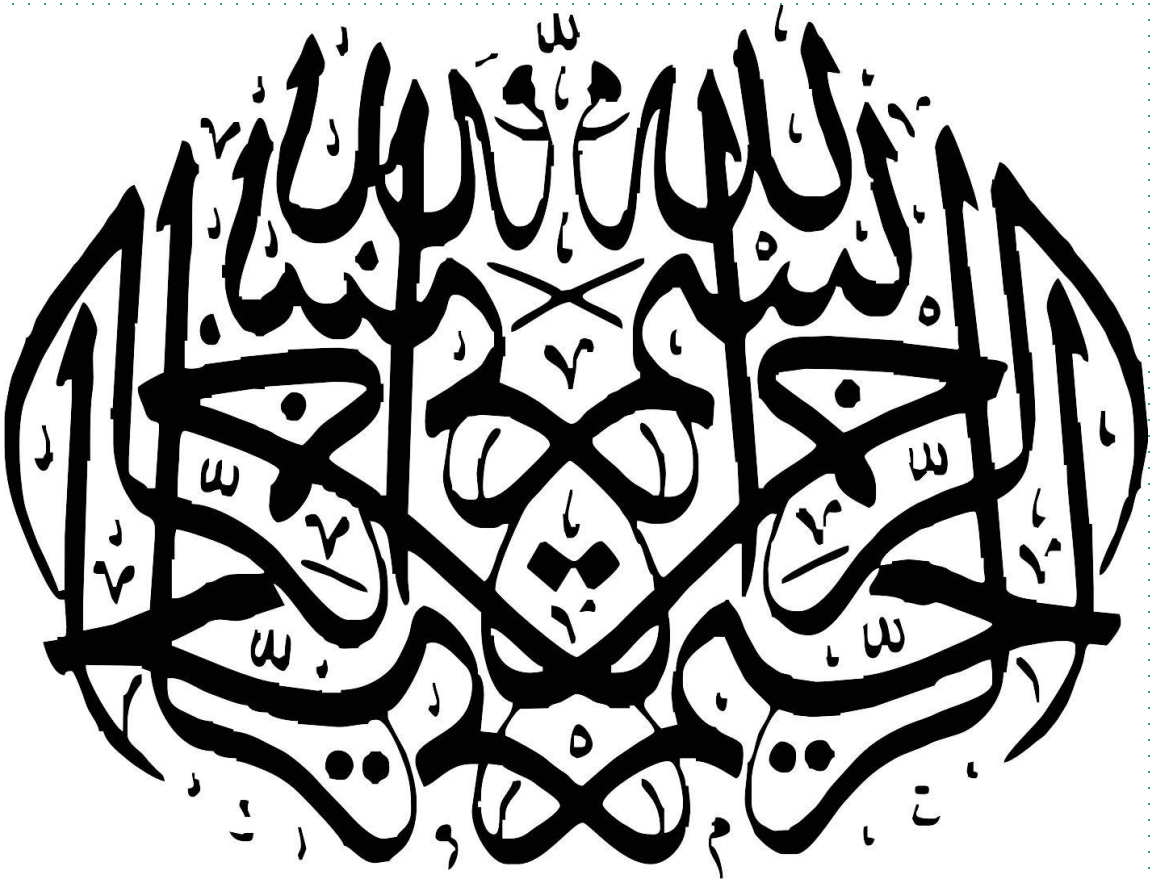
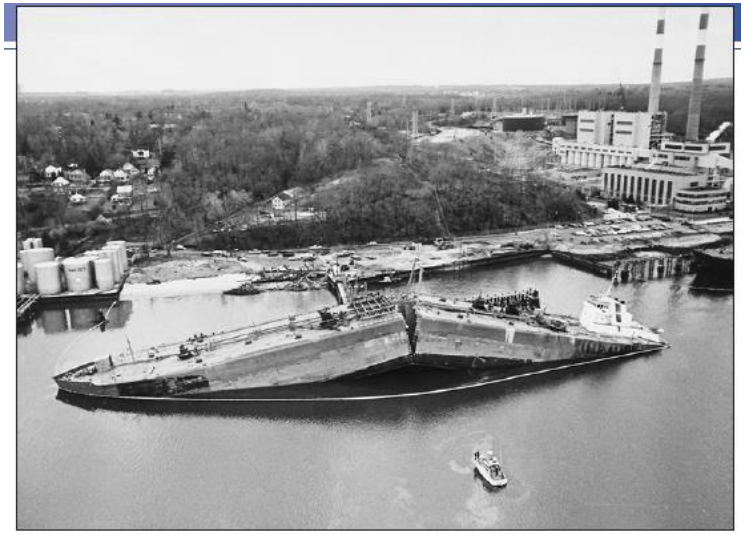
شکست مواد صنعتی

دکتر علیرضا امیری اسفرجانی





مکانیک شکست Fracture Mechanics

از انجایی که پدیده شکست پدیده ای مخرب و خطرناک در طراحی سازه‌ها است لازم است که از رابطه بین تنش خارجی و طول ترک موجود در قطعه-خواص ماده و... اگاه باشیم.

فهم این روابط در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر شکست و کنترل این پدیده بسیار مهم است.

علمی‌که رابطه بین خواص مواد- مقدار و حالت تنش – ترک‌ها و مکانیزم رشد ترک را بررسی می‌کند مکانیک شکست نامیده می‌شود.

شکست Fracture

جدایش یک جسم به دو یا چند قطعه تحت تنش اعمالی و در شرایط کاری (دما- سرعت بار گذاری و....)

شکست همواره شامل دو مرحله است

۱- جوانه زنی ترک (Crack Nucleation):

در این مرحله ترک ایجاد می‌شود

۲- رشد ترک:(Crack Growth)

در این مرحله طول ترک زیاد می‌شود یا به اصطلاح ترک رشد می‌کند.

۳- رشد کامل ترک:

منجر به شکست میگردد.

Fracture Classification دسته بندی شکست

در کل می‌توان شکست را به دو دسته تقسیم کرد

۱- شکست نرم (Ductile Fracture):

شکستی است که در ان ماده قبل از وقوع شکست تغییر شکل زیادی می‌دهد

۲- شکست ترد :(Brittle Fracture)

شکستی است که در ان ماده قبل از وقوع شکست تغییر شکل کمی‌می‌دهد

درصد افزایش طول یا کاهش سطح مقطع قبل از شکست به عنوان معیاری جهت نوع شکست می‌باشد.

باید توجه داشت که تغییر شرایط کاری قطعه مانند دما، سرعت بارگذاری و... می‌تواند باعث تغییر نوع شکست شود.

مکانیزم شکست

هر کدام از انواع شکست مکانیزم خاص خود را دارد.

اما نکته مهم این است که

رشد ترک در شکست نرم رشد ترک ناپیوسته و معمولا اهسته است

ولی در شکست ترد رشد ترک پیوسته و سریع است.

در شکست ترد پس از اینکه ترک به یک طول بحرانی رسید سریع (با سرعت صوت در جامدات) رشد می‌کند و قطعه به شکست نهایی می‌رسد

که برای طراحی سازه‌ها اهمیت زیادی دارد

شکست ترد بسیار خطرناک است چرا؟

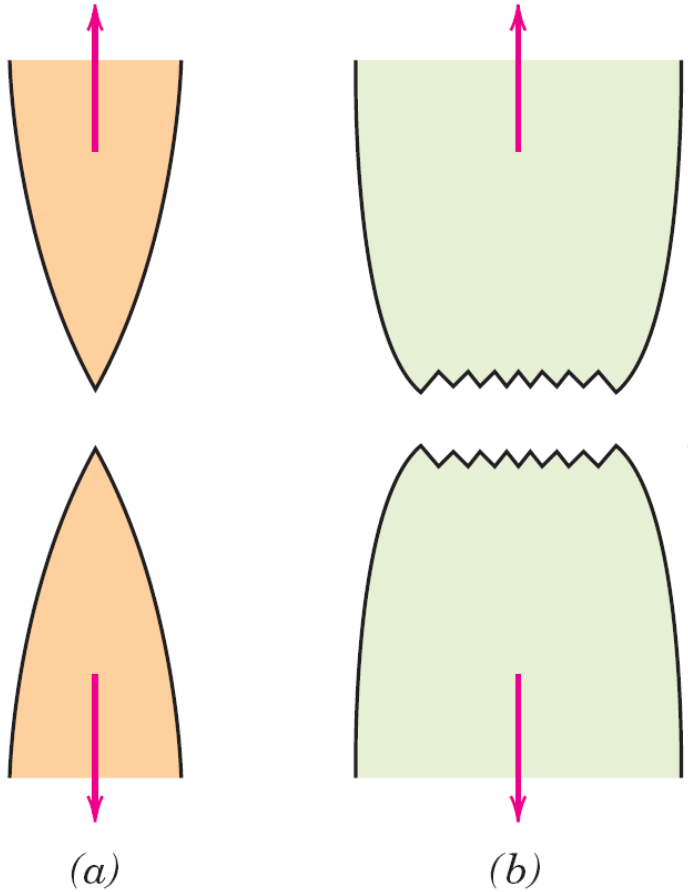
مکانیزم شکست

شکست ترد بسیار خطرناک است چرا؟

Ductile Fracture شکست نرم

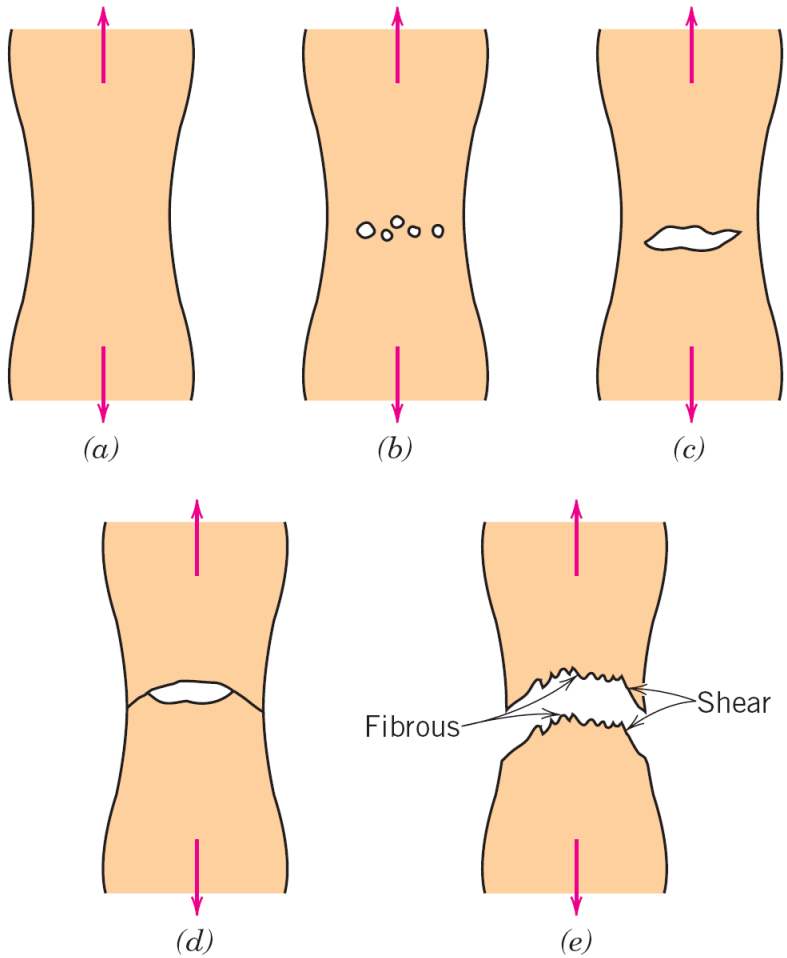
شکستی است که در ان ماده قبل از وقوع شکست تغییر شکل زیادی می‌دهد.

مواد بسیار نرم مانند طلا وسرب
در دمای اتاق



سطح مقطع شکست
مواد نرم

مکانیزم شکست نرم



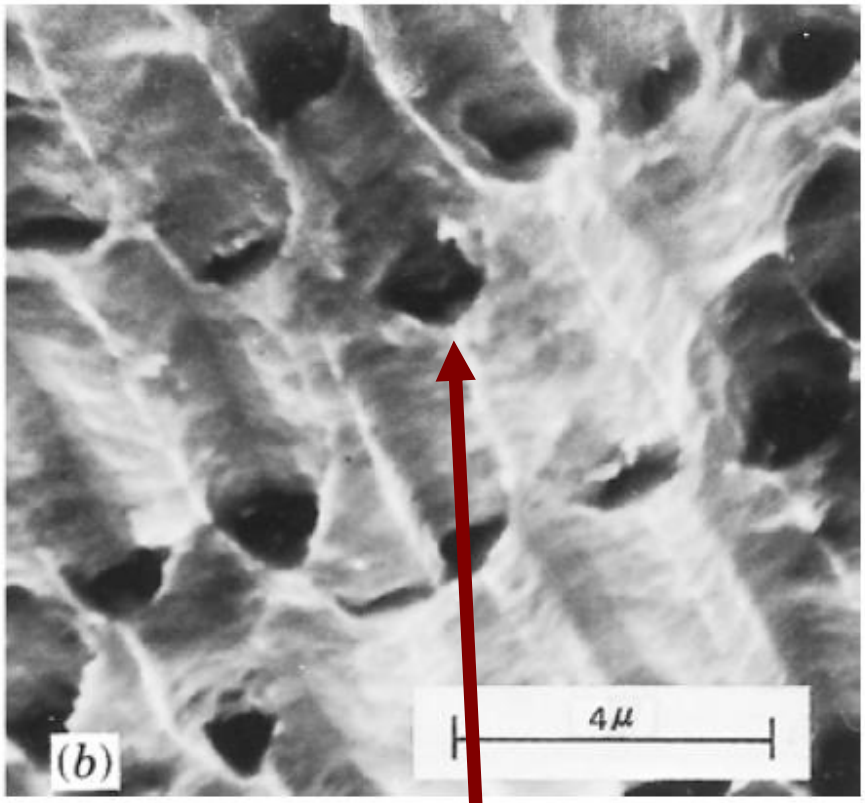
در شکست نرم در ناحیه گلـویی ابتـدا حفره‌هـایی جوانـه می‌زنـد (b) و سپس این حفره‌ها به هـم می‌پیوندند و ترک ایجاد می‌شود (c). با تکرار این عملیات(جوانـه زنی حفره‌ها و پیوسـتن انهـا بـه ترک) ترک رشد کرده و پس از رسـیدن بـه طـول بحرانـی بـه سرعت رشد کرده و باعـث تـرک می‌شود.

از انجایی که رشد ترک به جوانه زنی حفره‌هـا بسـتگی دارد رشـد تـرک در شکسـت نـرم آهسـته و ناپیوسته است

سطح مقطع شکست نرم

Cup

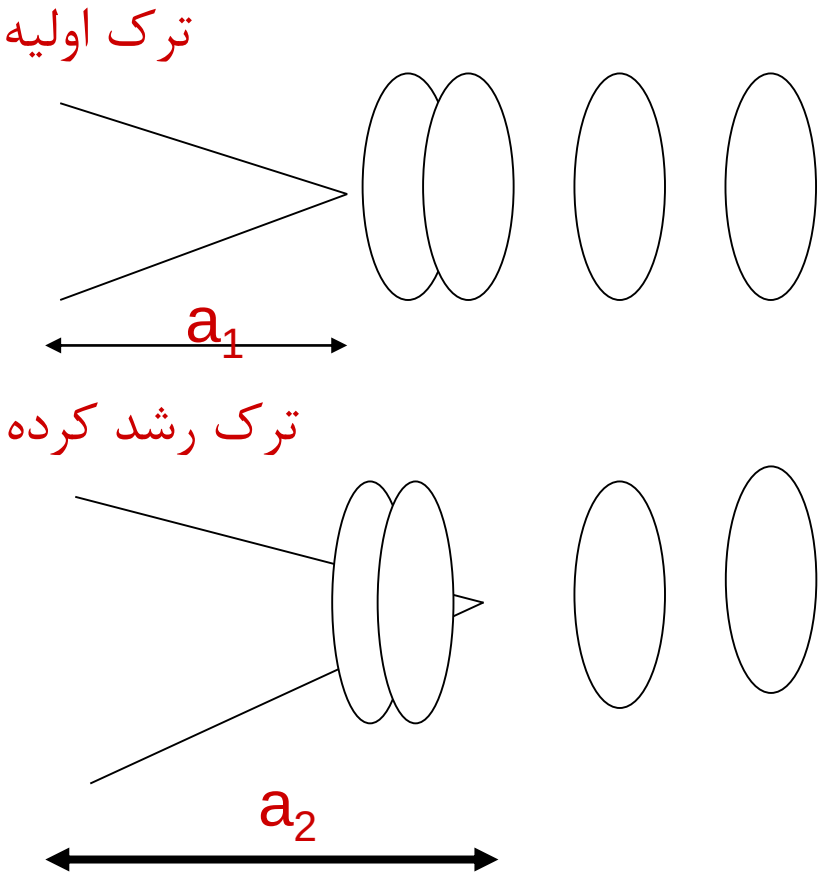
cone



سطح مفطع شکست نرم به صورت **Cup and Cone** است

حفره‌ها

حفره‌های جوانه زده در نوک ترک



مرحله ۱

مرحله ۲

شکست ترد

شکست ترد بدون تغییر شکل زیاد و با رشد سریع ترک صورت می‌گیرد.

رشد ترک عمود بر تنش اعمالی صورت می‌گیرد که باعث می‌شود سطح شکست به صورت **سطحی صاف** باشد.

سطح مقطع شکست ترد

سطح شکست شامل خطوطی است که از نوک ترک به سمت اطراف گسترده می‌شوند

(a)

در شکست ترد معمولا پس از اینکه ترک به اندازه بحرانی برسد، ترک با سرعت زیاد پیوندهای اتمی‌را پی در پی می‌شکنند و پدیده شکست کامل می‌شود. به این پدیده Cleavage گفته می‌شود.

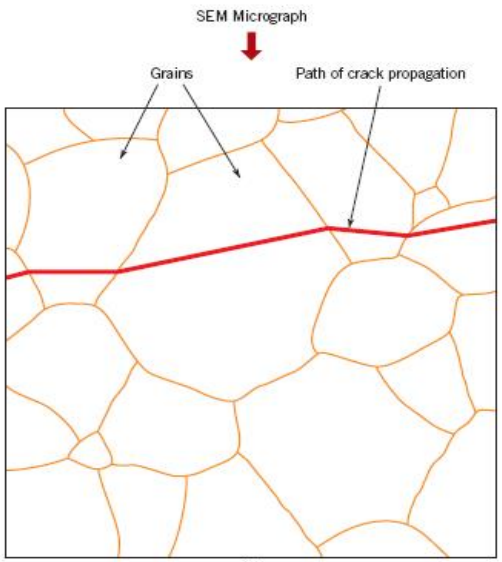
ترک هنگام پیش روی می‌تواند دو مسیر را انتخاب کند

۱- ترک درون دانه‌ها

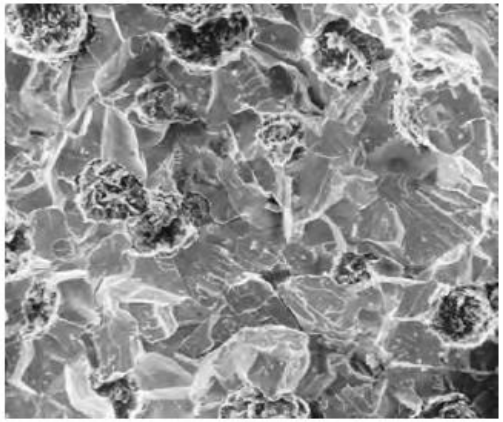
۲- ترک درون مرزدانه

۱- ترک درون دانه‌ها

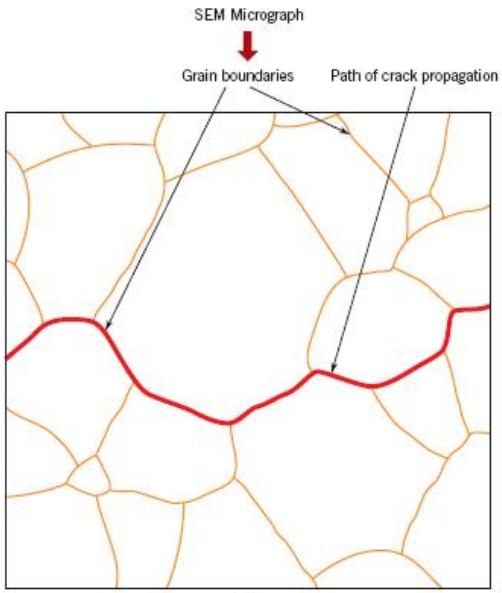
پیش روی کند که در این حالت شکست
درون دانه ای صورت گرفته است
(Transgranular Fracture)



(a)


(b)

۲- ترک درون مرزدانه



(a)

(b)

شکست بین دانه ای Intergranular Fracture

تمرکز تنش Stress Concentration

هنگام شکست تنش اعمالی پیوندهای اتمی را می‌شکنند از جهت تئوری تنش اعمالی باید بر نیروهای بین اتمی‌غلبه کند، بنابر این از نظر تئوری تنش زیادی برای شکست لازم است اما مشاهده می‌شود که در عمل تنش بسیار کمتری برای شکست مواد لازم است.

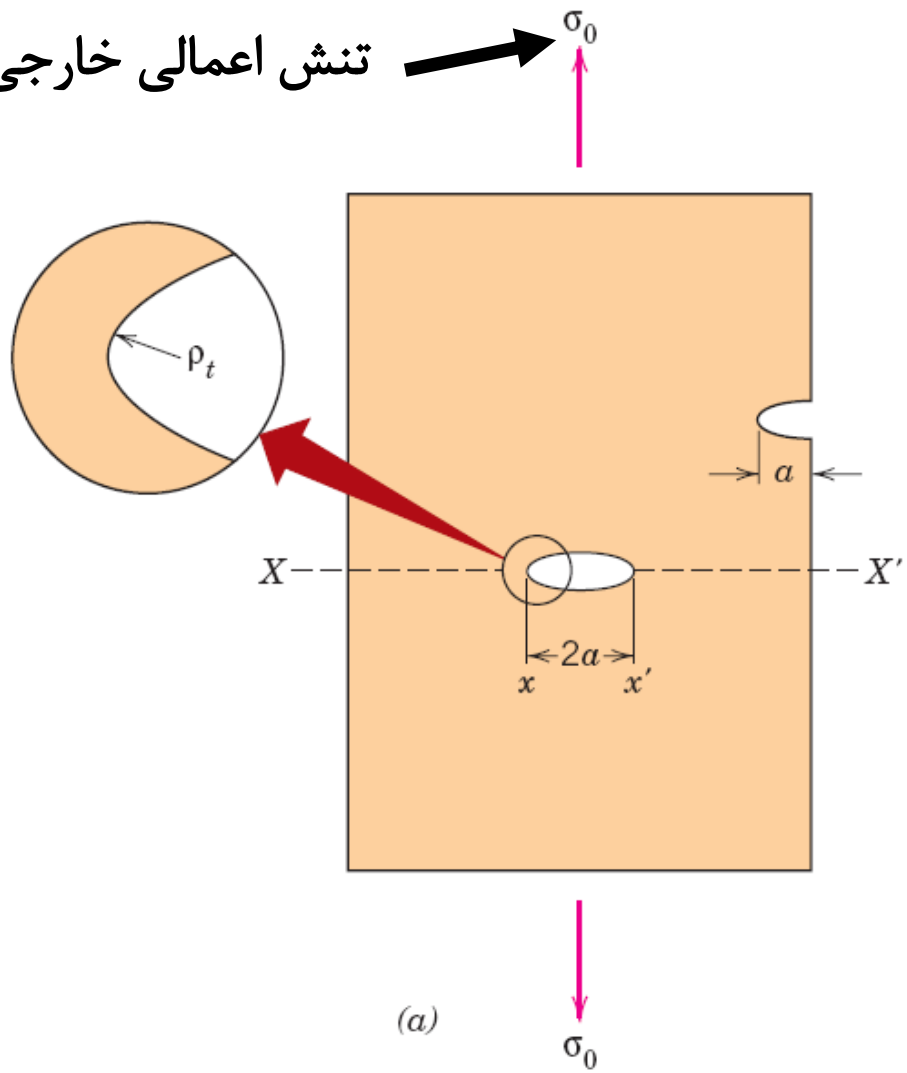
- علت این عدم تطابق وجود ترکها ریز و میکروسکپی در ماده است.
- و نیز اینکه در بسیاری از موارد تمرکز تنش اعمالی سبب غلبه بر پیوندها می‌گردد.

این ترک‌ها در ماده از قبل وجود دارند یا حین اعمال تنش ایجاد می‌شوند. ترک‌ها باعث افزایش تنش در ناحیه اطراف ترک می‌شود.

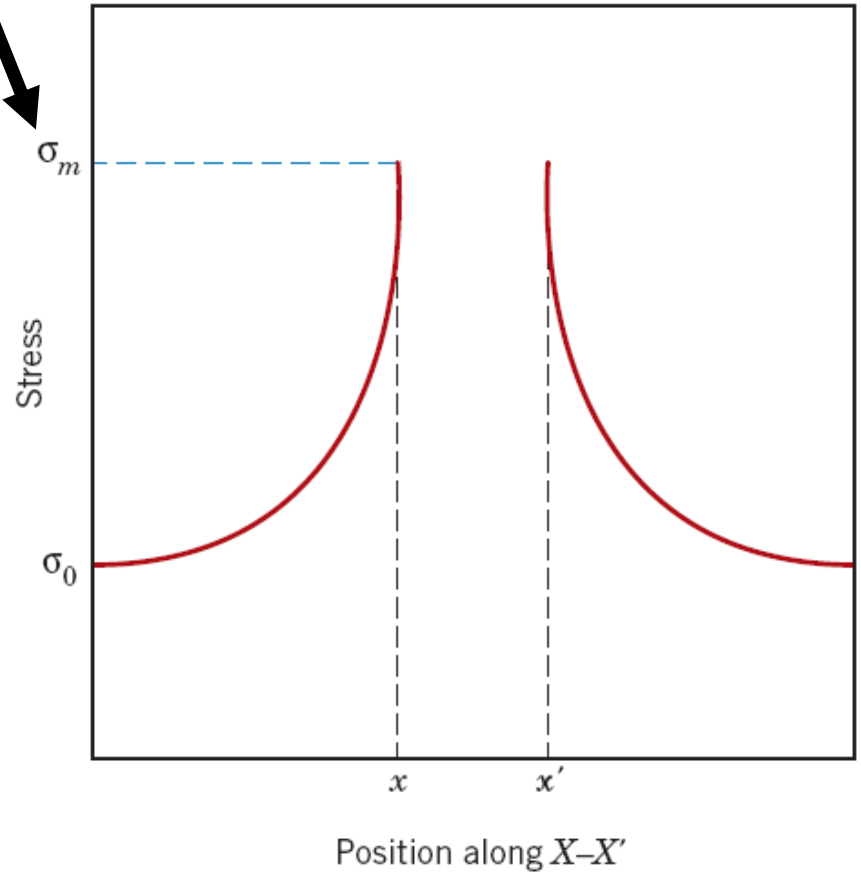
- ✓ به عبارت دیگر ترک‌ها به عنوان تنش افزا (Stress Raisers) عمل می‌کنند.

تنش اعمالی خارجی

تنش در نوک ترک



(a)



(b)

توزیع تنش در نوک ترک

مقدار و توریع نتش در توک ترک به عومل زیادی مانند شکل و طول ترک و... بستگی دارد.

به عنوان مثال برای یک ترک به شکل بیضی در داخل ورق که در جهت عمود بر تنش اعمالی قرار گرفته باشد تنش ماکزیمم در نوک ترک از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\sigma_m = 2\sigma_0\left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{1/2}$$

تنش ماکزیمم در توک ترک

تنش اعمالی خارجی

a: طول ترک لبه ای یا نصف طول ترک داخلی

ρ: شعاع انحنای توک ترک

ضریب تمرکز تنش Stress Concentration Factor

گاهی نسبت تنش ماکزیمم در نوک ترک به تنش اعمالی را ضریب تمرکز تنش می‌نامیم

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2\left(\frac{a}{\rho_t}\right)^{1/2}$$

باید به یاد داشت که تمرکز تنش می‌تواند توسط عواملی نظیر تغییر سطح مقطع- حفره‌ها و میکروترک‌ها ایجاد شود

اما ماده هنگامی‌می‌شکند که تنش ایجاد شده در نوک ترک به مقدار تنش لازم جهت شکست پیوندهای اتمی برسد

از لحاظ تئوری تنش لازم برای شکست پیوندها و رشد ترک برابر است با

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a}\right)^{1/2}$$

E: مدول یانگ

γ: انرژی سطحی

پس شکست هنگامی‌اتفاق می‌افتد که

$$\sigma_m = \sigma_c$$

روش دیگر جهت پیش بینی تنش شکست

روش دیگر جهت پیش بینی تنش شکست استفاده از انرژی جذب شده توسط ماده است.

در این روش انرژی جذب شده توسط ماده باید به انرژی شکست برسد.

انرژی جذب شده توسط ماده = انرژی شکست

با استفاده از اصول مکانیک شکست رابطه ای بین تنش بحرانی لازم برای پیش روی ترک و تافنس شکست ارائه شده است.

$$K_c = Y\sigma_c\sqrt{\pi a}$$

σ_c: تنش بحرانی لازم برای پیش روی ترک با طول a

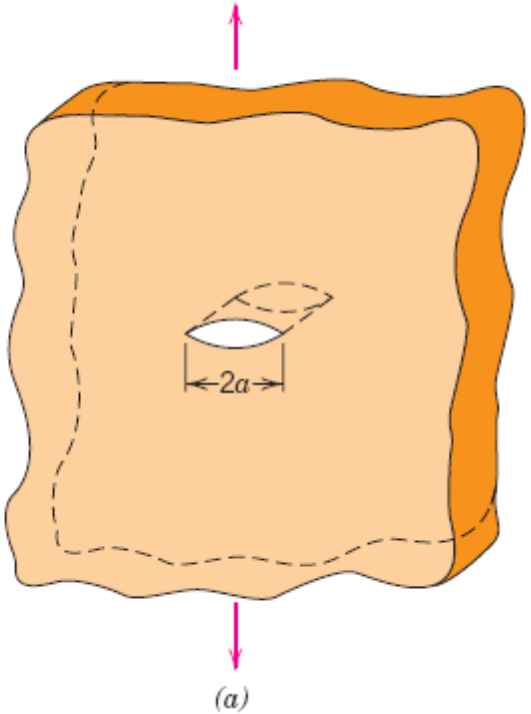
K_c: Fracture toughness

تافنس شکست یک خاصیت ماده است که نشان دهنده مقاومت جسم در مقابل شکست ترد در حضور ترک است.

واحد آن $\mathrm{MPa}\sqrt{\mathrm{m}}$

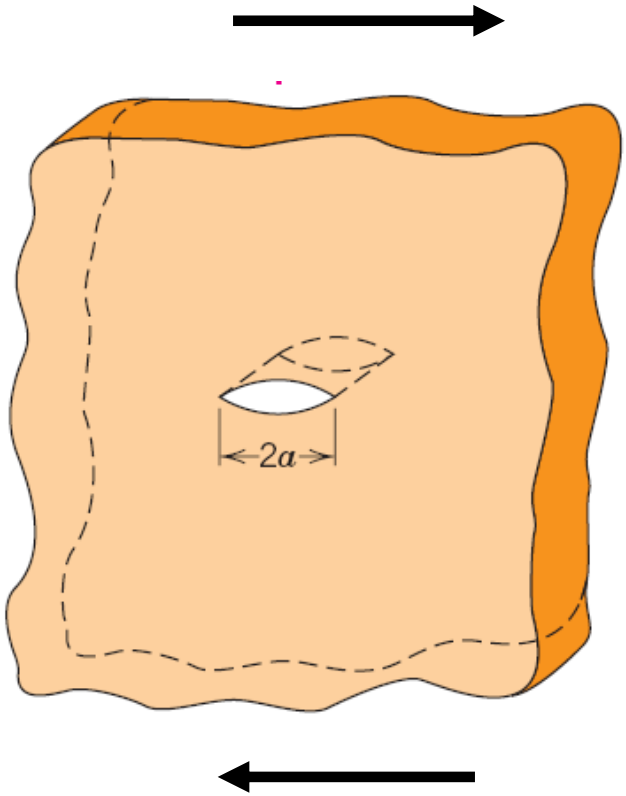
Y یک پارامتر بدون بعد است که تابع هندسه و اندازه قطعه و ترک و... بستگی دارد که مقادیر ان و روابط ریاضی ان معلوم است.

تنش اعمالی نسبت به ترک می‌تواند زوایای مختلفی داشته باشد که هر کدام از این حالات K خاص خود را دارد



تنش عمود بر ترک است

Mode I



تنش در امتداد ترک است

بهترین حالت برای رشد ترک حالتی است که تنش عمود بر ترک است Mode I بنابراین معمولا طراحی‌ها بر اساس این حالت بارگذاری انجام می‌شود تا در برابر سایر حالات هم سازه در برابر شکست ایمن باشد بنابر این

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

K_{IC}

K_{IC} خاصیتی از ماده است که به عوامل متعددی بستگی دارد که مهمترین انها عبارتند از دما- سرعت کرنش و ریز ساختار

با کاهش دما – افزایش سرعت کرنش و افزایش اندازه دانه K_{IC} کاهش می‌یابد.

چند نکته

۱- شکست ترد از شکست نرم خطرناک تر است

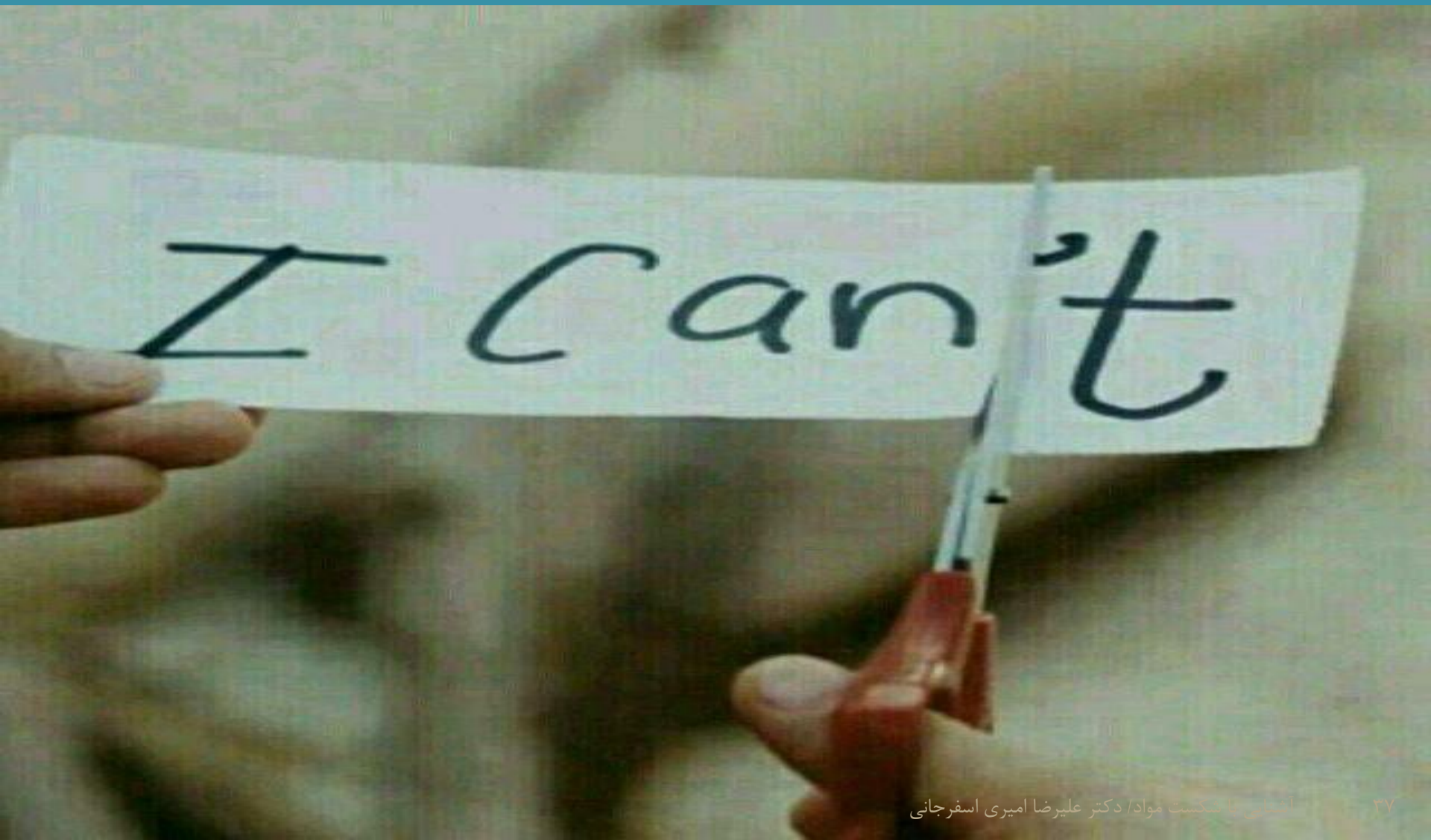
۲- علم مکانیک شکست و روابط مربوطه بیشتر برای مواد ترد یا ductility متوسط کاربرد دارد.

۳- مواد با ductility بالا K_{IC} بالاتری دارند. چرا؟

Material	Yield Strength MPa	Yield Strength ksi	K_{Ic} $MPa\sqrt{m}$	K_{Ic} $ksi\sqrt{in.}$
Metals				
Aluminum Alloy[a] (7075-T651)	495	72	24	22
Aluminum Alloy[a] (2024-T3)	345	50	44	40
Titanium Alloy[a] (Ti-6Al-4V)	910	132	55	50
Alloy Steel[a] (4340 tempered @ 260°C)	1640	238	50.0	45.8
Alloy Steel[a] (4340 tempered @ 425°C)	1420	206	87.4	80.0
Ceramics				
Concrete	—	—	0.2–1.4	0.18–1.27
Soda-Lime Glass	—	—	0.7–0.8	0.64–0.73
Aluminum Oxide	—	—	2.7–5.0	2.5–4.6
Polymers				
Polystyrene (PS)	—	—	0.7–1.1	0.64–1.0
Poly(methyl methacrylate) (PMMA)	53.8–73.1	7.8–10.6	0.7–1.6	0.64–1.5
Polycarbonate (PC)	62.1	9.0	2.2	2.0

فلزات K_{IC} بالاتری نسبت به سرامیک‌ها دارند چرا؟

Design base on Fracture



طراحی بر اساس شکست

با توجه به فرمول چون Y و K_{IC} معلوم هستند دو پارامتر داریم a و σ

بر این اساس طراحی بر اساس شکست به دو دسته تقسیم می‌شود

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

۱- در قطعه ترک‌هایی با طول معلوم وجود دارد:

در این حالت به کمک رابطه می‌توان حد اکثر تنش مجاز اعمالی را تعیین کرد.

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{Y\sqrt{\pi a}}$$

۲- قطعه یا سازه تحت تنش اعمالی است:

لذا حداکثر طول ترک مجاز در قطعه تعیین می‌شود.

$$a_c = \frac{1}{\pi}\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma Y}\right)^2$$