بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد

شکل دادن فلزات

جلسه سوم
(کلیات- ۲)

دکتر رضا اسلامی فارسانی

واماندگی

واماندگی یا انهدام یا از کارافتادگی (Failure)

فرآیندی است که منجر به بدون استفاده شدن جسم در کاربرد موردنظر می شود. در این حالت ممکن است شکل ظاهری قطعه یا سازه کاملا بدون نقص باشد، ولی توانایی استفاده برای کارهای مهندسی را نداشته باشد. در کل، از کار افتادگی یعنی ماده توانایی عمل تحت بار در شرایط موردنظر را از دست داده و از نظر ساختاری برای شرایط مورد نظر قابل استفاده نیست، ولی ممکن است همین ماده در جای دیگر قابل استفاده باشد.

از کار افتادگی به ۳ صورت روی می دهد:

الف) تغییرشکل الاستیک بیش از حد

ب) تغییرشکل پلاستیک بیش از حد

ج) شکست

انواع واماندگی

الف) تغییرشکل الاستیک بیش از حد:

- ✓ **در حالت تعادل پایدار:** بار اعمالی روی ماده سبب تغییر شکل الاستیک بیش از حد به صورت همگن می شود. یعنی میزان کرنش الاستیک از میزان لازم بیشتر است و سازه کارایی خود را از دست می دهد. منظور آن است که طراحی یا شرایط به گونه ای بوده که تغییرشکل الاستیک برای آن کاربرد خاص از حد موردنظر گذشته است.
- ✓ **در حالت نامتعادل یا کمانش:** تغییرشکل الاستیک به صورت ناهمگن است و تغییرشکل موضعی داریم.

در هر دو حالت فوق، با افزایش مدول، احتمال از کارافتادگی کاهش می یابد.

انواع واماندگی

ب) تغییرشکل پلاستیک بیش از حد:

- ✓ در دمای پایین: اگر بیش از حد مجاز تغییرکل پلاستیک روی دهد، این تغییرشکل ناهمگن است و جسم ناپایدار می شود که ناپایداری پلاستیک در حالت تک محوری، گردنی شدن نام دارد. این حالت، وقتی که تنش از حد ماکزیمم (استحکام کششی) بیشتر شود، روی می دهد.
- ✓ در دمای بالا: ماده در تنش یا بار ثابت در طول زمان کرنش می کند که خزش نام دارد. این خزش باعث واماندگی می شود، ولی منجر به گسیخته شدن و ۲ یا چند تکه شدن نمی شود، ولی خزش در حالت شکست منجر به این پدیده می شود.

تغییرشکل و شکست

انواع تغییرشکل:

الف: مستقل از زمان (الاستیک و پلاستیک)

ب: وابسته به زمان (خزش)

انواع شکست:

الف: تحت بار غیرسیکلی

۱.ترد ۲.نرم ۳.پارگی (گسستگی)

ب: تحت بار سیکلی

۱. سیکل زیاد ۲.سیکل کم ۳.خستگی خوردگی ٤.خستگی سایشی ٥.خستگی خزشی

انواع واماندگی

ج) شکست:

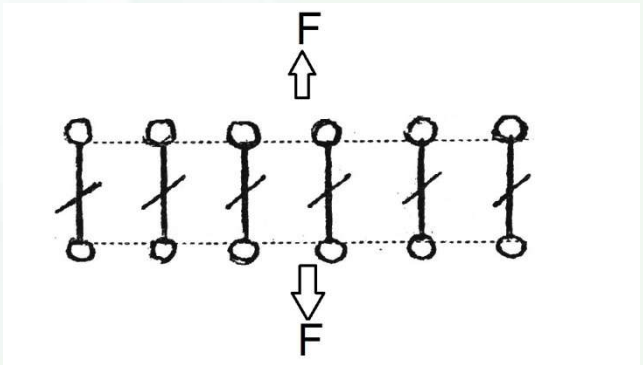
شکست، گسیخته شدن پیوندهایِ اتمی در ماده است و سبب می شود ماده، پیوستگی خود را از دست بدهد که عموماً با ایجاد ترک و رشد آن شروع می شود.

انواع شکست:

- ✓ شکست ناشی از افزایش پیوسته تنش
  - الف) شکست ترد
  - ب) شکست نرم
- ✓ شکست تدریجی پیش رونده ناشی از تنش های متناوب پایین تر از حد تنش شکست ماده (خستگی)
- ✓ شکست با تاخیر ناشی از تنش های طولانی در دمای بالا (خزش)

شکست

شکست، جدایش یا مجزا شدن یک جسم جامد به دو یا چند قسمت تحت اعمال تنش می باشد. در یک فلز ایده آل که فاقد هر گونه عیب یا نقص باشد، شکست زمانی روی می دهد که تنش اعمالی بر جسم بتواند در عرض یک صفحه اتمی عمود بر نیروی کشش بر نیروی پیوند اتم ها غلبه کند. اما در عمل فلزات در تنش های بسیار کمتر از تنش تئوری یا استحکام تئوری می شکنند. علت آن وجود ناخالصی ها و ناپیوستگی ها در ساختار فلزات و طبیعت پلی کریستالی بودن آنها و انباشت نابجایی ها در مرزدانه یا نزدیک مرزدانه است.



انواع شکست

انواع شکست:

- ✓ ترد یا کلیواژ (**Brittle**): نظیر شیشه و چدن و سنگ و پلاستیک
- ✓ نرم یا چکش خوار (**Ductile**): نظیر اکثر فلزات (فولاد، سرب، آهن و بسیاری از پلاستیک ها نظیر پلی اتیلن)

انواع شکست

شکست نرم:

- ✓ تغییرشکل پلاستیک قابل ملاحظه جسم قبل و در حین انتشار ترک
- ✓ وجود مقدار قابل ملاحظه ای از تغییرشکل در سطوح شکست نرم
- ✓ انجام شکست در ناحیه پلاستیک
- ✓ ناشی از لغزش زیاد اتم ها روی صفحات لغزش فعال و حرکت نابجایی ها در امتداد صفحات لغزش
- ✓ ناشی از تنش های برشی

انواع شکست

شکست ترد:

- ✓ سرعت انتشار سریع ترک بدون تغییرشکل
- ✓ جدایش ناگهانی و کامل اتم ها ناشی از جدایش پیوندهای اتمی روی صفحات اتمی
- ✓ تغییرشکل پلاستیک ناچیز قبل از شکست
- ✓ انجام شکست در محدوده الاستیک
- ✓ سطح شکست عمود بر جهت اعمال نیرو
- ✓ ناشی از تنش های کششی عمود بر صفحه کلیواژ

انواع شکست

شکست ترد:

- ✓ انجام شکست در صفحات خاص کریستالوگرافی (صفحات کلیواژ)
- ✓ در فلزات با ساختار **bcc** و **hcp** و آلیاژهای آنها در دماهای پایین، سرعت کرنش بالا و تنش سه بعدی. در فلزات **fcc** مشاهده نشده، مگر آن که عواملی وجود داشته باشند که به شکنندگی مرزدانه ای کمک کنند.
- ✓ صفحات کلیواژ در **bbc** و **hcp** به ترتیب {۱۰۰} و {۰۰۰۱} هستند (در **fcc** صفحه کلیواژ نداریم).

انواع شکست

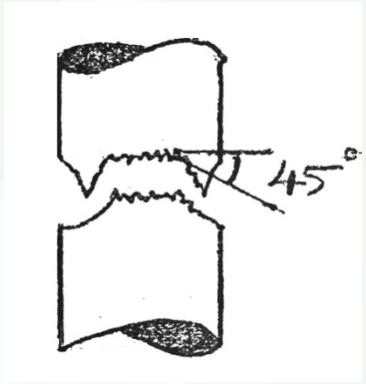
مواد با ساختار fcc (شکست نرم)	Cu, Ag, Au, Al, Ni, Sn , Pd و Fe (استنیت)
مواد با ساختار bcc (شکست نرم)	V, Mo, Cr, W, Na, Li, Ca, Rb, Cs, Ti (B) و Fe (فریت)
مواد با ساختار hcp (شکست نرم)	Mg, Zn, Ti, Zr, Br, Cd

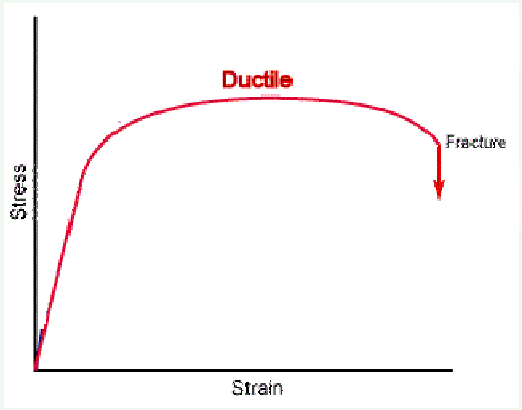
انواع شکست

شکست نرم:

بوسیله ایجاد فنجان و مخروط قابل تشخیص است.

انرژی جذب شده پیش از شکست زیاد است

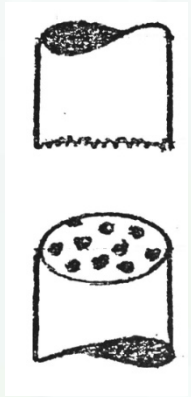


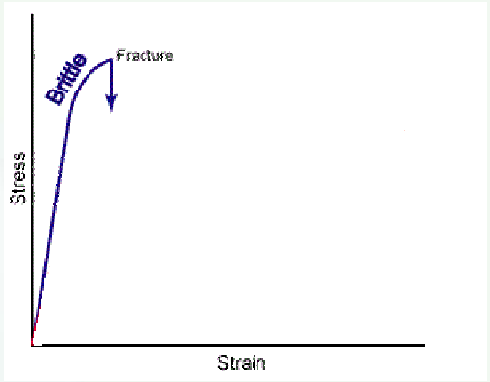


شکست ترد:

نمای کاملا کریستالی دارد.

انرژی جذب شده پیش از شکست کم است





انواع شکست

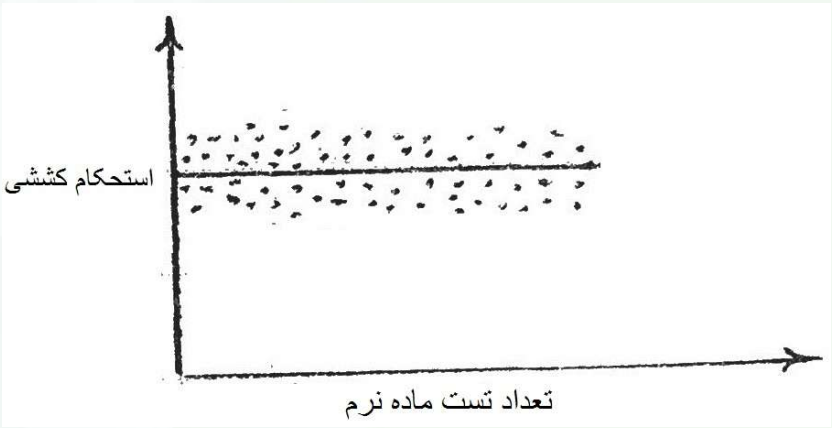
- ✓ شکست نرم: ظاهر شدن سطح شکست ناشی از برش در بزرگ نمایی کم به صورت خاکستری و رشته ای

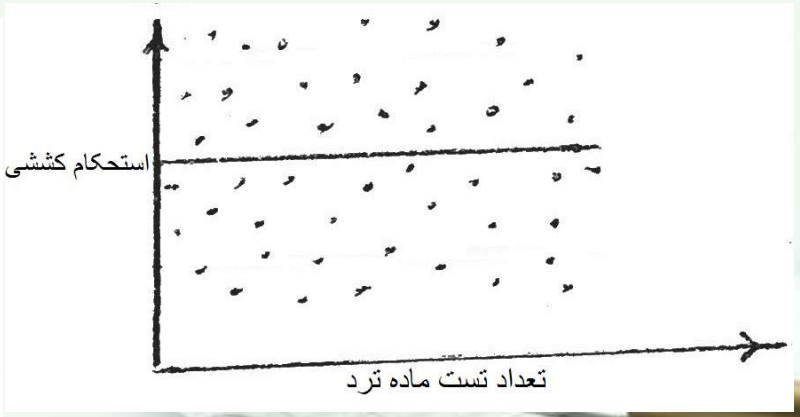
- ✓ شکست ترد: سطح شکست براق روشن و دانه ای ناشی از انعکاس زیاد نور از سطح صاف کلیواژ

سطوح شکست غالباً مخلوطی از شکست رشته‌ای و دانه ای است و آن را به صورت درصد بیان می کنند. در فلزات با توجه به فلز، دما، حالت تنش و سرعت بارگذاری انواع شکست روی می‌دهد.

انواع شکست

نتایج بدست آمده در اندازه گیری استحکام کششی در نمونه های ترد بسیار پراکنده و گسترده بوده و برای نمونه چکش خوار یکنواخت تر است. این موضوع نشان می دهد که در مواد ترد فاکتورهایی وجود دارند که منجر به اختلاف در نتایج می شوند.





انواع شکست

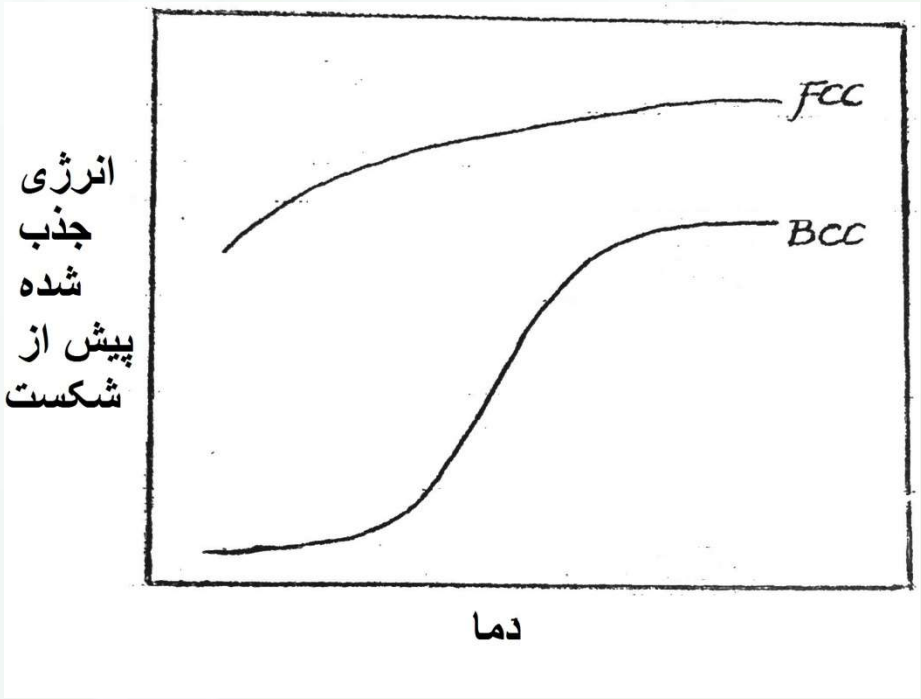
شکست ترد می تواند درون یا برون دانه ای باشد:

- ✓ درون دانه‌ای: ترک ها در داخل دانه‌ها گسترش می‌یابند که با کاهش دما و افزایش سرعت تغییرشکل افزایش می‌یابد.
- ✓ برون دانه‌ای: در بین دانه‌ها و امتداد مرزها انجام می‌شود که ناشی از وجود ناخالصی‌ها یا جدایش و رسوب عناصر یا فازهای ترد در امتداد مرزدانه‌ها است.

در فلزات، شکست ترد بیشتر درون دانه‌ای است، چون مرزدانه در حالت معمولی خود مانع است.

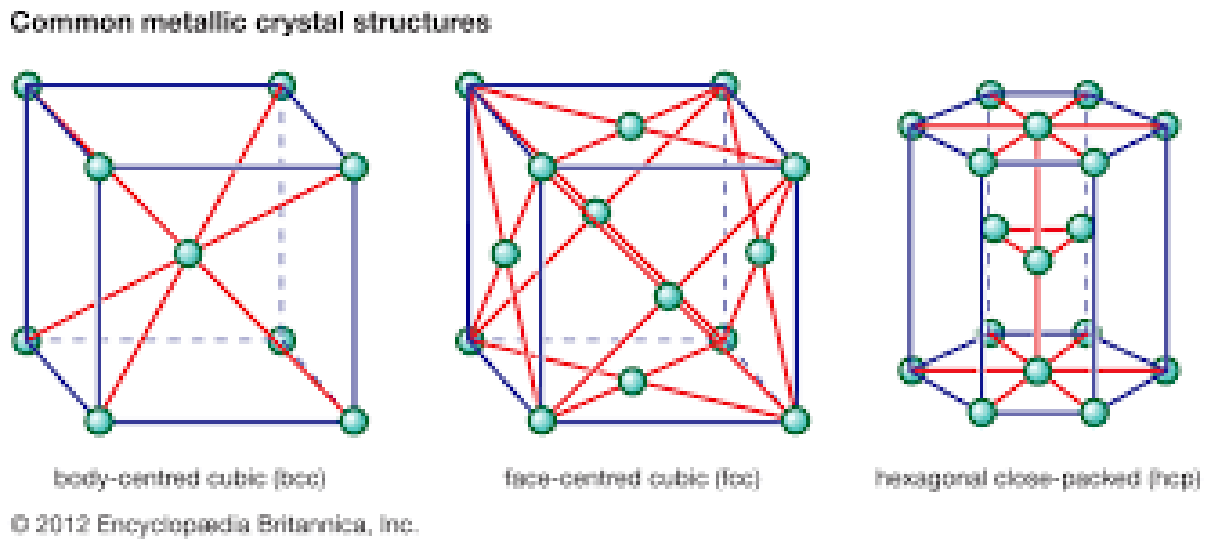
انواع شکست

مواد با ساختار **fcc**، رفتار شکست ثابتی دارند، اما مواد با ساختارهای **bcc** و **hcp** دارای دمای تبدیل ترِدی به نرِمی هستند. در این دما، رفتار ماده از نرِم به ترِد تبدیل می‌شود و دمایی است که ظاهرِ شکست، ۵۰٪ ترِد است. شکست بدنه کشتی‌های فولادی در آب های قطبی در قدیم به علت عدم آگاهی از وجود این دما بوده است.



انواع شکست

ساختارهای بلوری مرسوم فلزات (bcc، fcc و hcp)



برای برخی پلیمرها نیز دمای مشابه ای (دمای تبدیل شیشه ای) وجود دارد که پلیمر در پایین تر از این دما، جامد تردد و بالاتر از آن انعطاف پذیر است.

اثرات ترکیبی در واماندگی

ترکیب ۲ یا چند نوع از واماندگی ها همراه با هم دارای اثر بیشتری نسبت به تاثیر مجموع آنها بطور مجزا از هم دارد که اثر سینرژیستیک (**synergistic effect**) نام دارد.

انواع شرایط ترکیبی:

- ✓ خزش و خستگی
- ✓ سایش و خستگی
- ✓ خوردگی خستگی

انواع شرایط ترکیبی در واماندگی

- ✓ خزش و خستگی: بارهای سیکلی در دمای بالا نظیر توربین های بخار در نیروگاه های برق و توربین های موتور هواپیما
- ✓ سایش و خستگی: سائیدگی ناشی از حرکت های جزئی بین قطعات فیت شده همراه با بار سیکلی سبب آسیب سطحی و سپس ایجاد ترک می شود که خستگی سایشی (fretting fatigue) نام دارد. این پدیده می تواند سبب واماندگی در تنش های بسیار کم شود.
- ✓ خوردگی خستگی: ترکیب توام خوردگی و بار سیکلی مثلاً برای فولادهای تحت بار سیکلی در محیط آب دریا (نظیر اسکله های نفتی در دریا)

اثرات محیطی بر واماندگی

اثرات محیطی نیز در طول زمان می توانند تاثیر منفی بر خواص داشته باشند. مثلا اشعه ماوراء بنفش نور خورشید سبب شکنندگی برخی پلاستیک ها می شود. چوب نیز با گذشت زمان کاهش استحکام دارد، بخصوص اگر در معرض رطوبت هم باشد. فولاد اگر در معرض تابش نوترون باشد، برای مدت طولانی، شکننده می شود (مثلا در راکتورهای هسته ای).

در مجموع می توان گفت اثرات محیطی (نظیر نوع محیط، دما، رطوبت و ...) بخصوص در طول زمان می توانند سبب شوند که ماده بدون آن که تحت تنش های ایجاد کننده پدیده های شکست، خستگی، خزش، تغییرشکل الاستیک و یا پلاستیک بیش از حد قرار گیرد، دچار واماندگی شود.

اثرات ترکیبی در واماندگی

بنابراین در پدیده های منجر به واماندگی باید بحث اثرات محیطی را نیز به ۲ عامل اصلی شکست و تغییر شکل اضافه کرد. در بسیاری موارد نیز اثرات محیطی سبب می شوند که واماندگی ناشی از تغییرشکل بیش از حد یا شکست به ازای تنش های پایین تر یا در زمان زودتر اتفاق افتد. پس اثرات محیطی بطور مستقل (در مواردی) سبب واماندگی شده، اما اکثراً فرآیند واماندگی ناشی از سایر پدیده ها را تشدید می کنند. بنابراین اثرات محیطی در طول زمان، سبب واماندگی شده یا سبب تسریع در واماندگی می شوند.

تمرکز تنش

وجود هر نوع ناپیوستگی هندسی در یک جسم مانند یک سوراخ یا شیار، منجر به توزیع غیریکنواخت تنش در مجاورت آن نقص می شود. در ناحیه نزدیک این ناپیوستگی، تنش بیش از تنش متوسط در فواصل دور از ناپیوستگی است. بنابراین هر نوع ناپیوستگی، مکان تمرکز تنش یا منبع تنش نام دارد.

$$k_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{\text{اسمی}}}$$

برای تمرکز تنش، از ضریب تمرکز تنش استفاده می شود که

نسبت تنش حداکثر به تنش اسمی (بر مبنای سطح مقطع خالص) است.

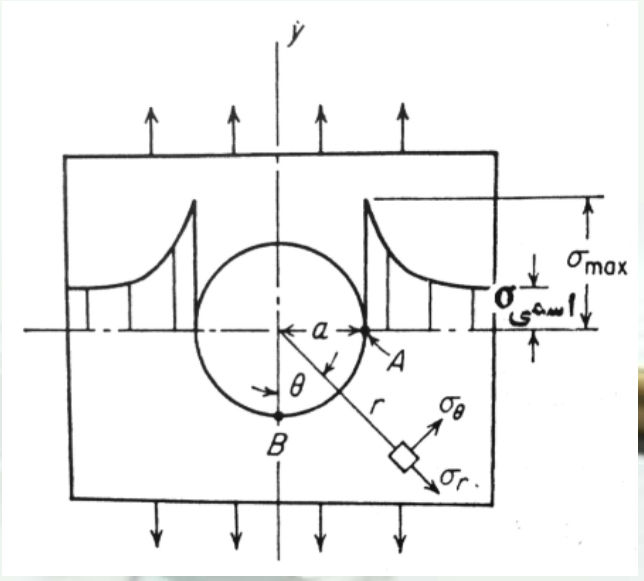
تمرکز تنش

شیار علاوه بر ایجاد تمرکز تنش، تنش های موضعی دو بعدی و سه بعدی هم ایجاد می کند. مثلاً برای سوراخ دایره ای شکل در یک ورق تخت که تحت اعمال بار محور است، علاوه بر تنش طولی، تنش شعاعی هم ایجاد می شود. تنش های ایجاد شده در یک ورق عریض نامحدود با سوراخ دایره ای شکل که تحت بار محوری است، شامل موارد زیر است:

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{2}\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)+\frac{\sigma}{2}\left(1+3\frac{a^4}{r^4}-4\frac{a^2}{r^2}\right)\cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma}{2}\left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)-\frac{\sigma}{2}\left(1+3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos 2\theta$$

$$\tau = -\frac{\sigma}{2}\left(1-3\frac{a^4}{r^4}+2\frac{a^2}{r^2}\right)\sin 2\theta$$

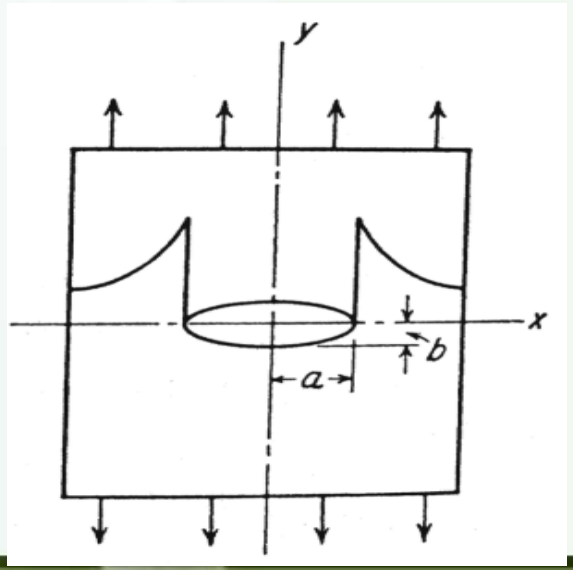


تمرکز تنش

تنش حداکثر در نقطه **A** ($\theta = \frac{\pi}{2}$ و $r = a$) روی می دهد که $\sigma_\theta = 3\sigma = \sigma_{max}$ است. لذا ضریب نظری تمرکز تنش ورقی با سوراخ دایره ای شکل برابر ۳ است.

در $r = a$ و $\theta = 0$، مقدار $\sigma_\theta = -\sigma$ است. لذا هنگامی که به ورق تنش کششی وارد می شود، تنش فشاری به همان مقدار نیز در لبه سوراخ در نقطه **B** در جهت عمود بر محور بارگذاری در صفحه ورق بوجود می آید.

هر گاه صفحه ای حاوی یک حفره به شکل بیضی با اقطار **2a** و **2b** در معرض تنش تک محوری باشند، حداکثر تنش در کناره های حفره عبارت است از:



$$\sigma_{max} = \sigma(1 + 2\frac{a}{b})$$

تمرکز تنش

اگر سوراخ وجود نداشته باشد، توزیع تنش در سطح مقطع ورق، یکنواخت و برابر بار وارده تقسیم بر مساحت ورق است. اما سوراخ سبب می شود که در لبه های سوراخ، تنش محوری زیاد و با دورشدن از سوراخ کاهش یابد.

برای یک حفره دایره شکل که a=b داریم: $3\sigma = \sigma_{max}$

σ، تنش کششی اعمالی در کناره های ورق است. معادله نشان می دهد که تنش با افزایش $\frac{a}{b}$ زیاد می شود. لذا سوراخ بسیار نازک نظیر ترک عمود بر جهت کششی، منجر به تمرکز تنش بسیار زیادی می شود.