دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد

شکست، خزش و خستگی

جلسه پنجم
(چقرمگی شکست)

دکتر رضا اسلامی فارسانی

چقرمگی شکست

- مقدار انرژی لازم جهت شکستن قطعه را چقرمگی (Toughness) گویند. به عبارتی، معیاری است برای انرژی که یک ماده می تواند قبل از پارگی یا شکست جذب کند. برای مثال اگر باری ناگهان روی قطعه ای از فولاد نرم و سپس روی یک شیشه اعمال شود، فولاد انرژی بسیار بیشتری را قبل از شکسته شدن جذب خواهد کرد. بنابراین فولاد از شیشه چقرتر است.
- چقرمگی یک ماده قابلیت آن برای تحمل تغییرشکل های الاستیک و پلاستیک است. بنابراین برای قطعات سازه و قطعاتی که باید شوک و لرزش را تحمل کنند، بسیار حائز اهمیت است.

چقرمگی شکست

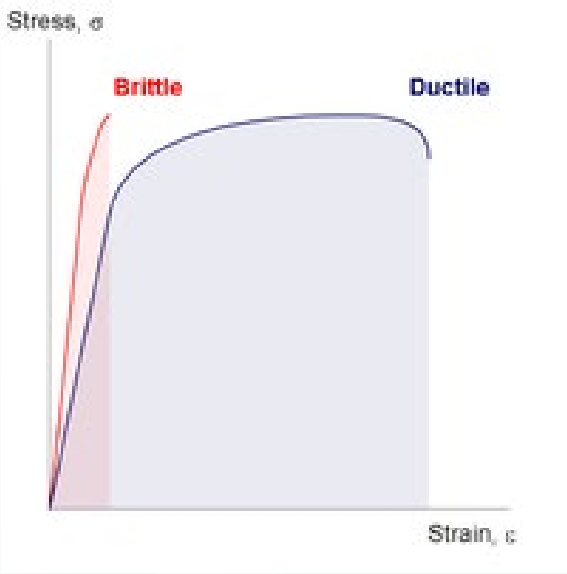
چقرمگی، سطح زیر منحنی تنش- کرنش است.

$$\int_0^{\varepsilon} \sigma \, d\varepsilon$$

نیرو× فاصله = انرژی

مقدار کار لازم برای آن که واحد حجم ماده را از تنش صفر به تنش پارگی برساند، چقرمگی نام دارد.

انرژی لازم برای شکست ماده چقرمه بیشتر از ماده ترد است.



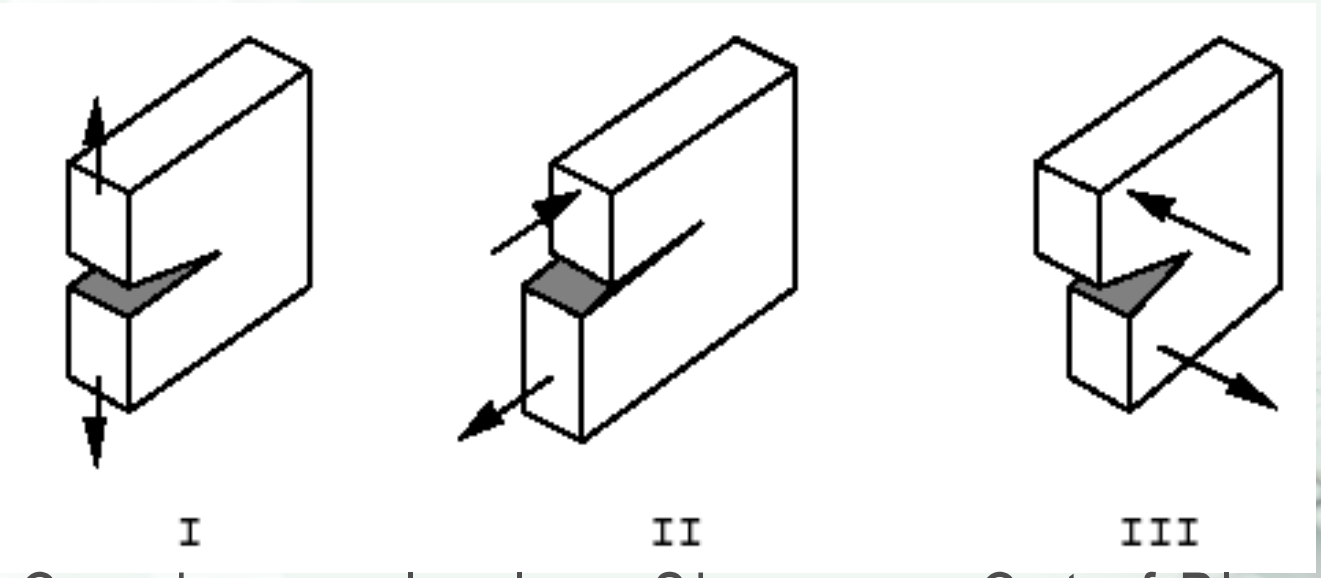
مودهای شکست

یک ترک می تواند به ۳ طریق می تواند تحت تنش واقع شده و گسترش یابد:

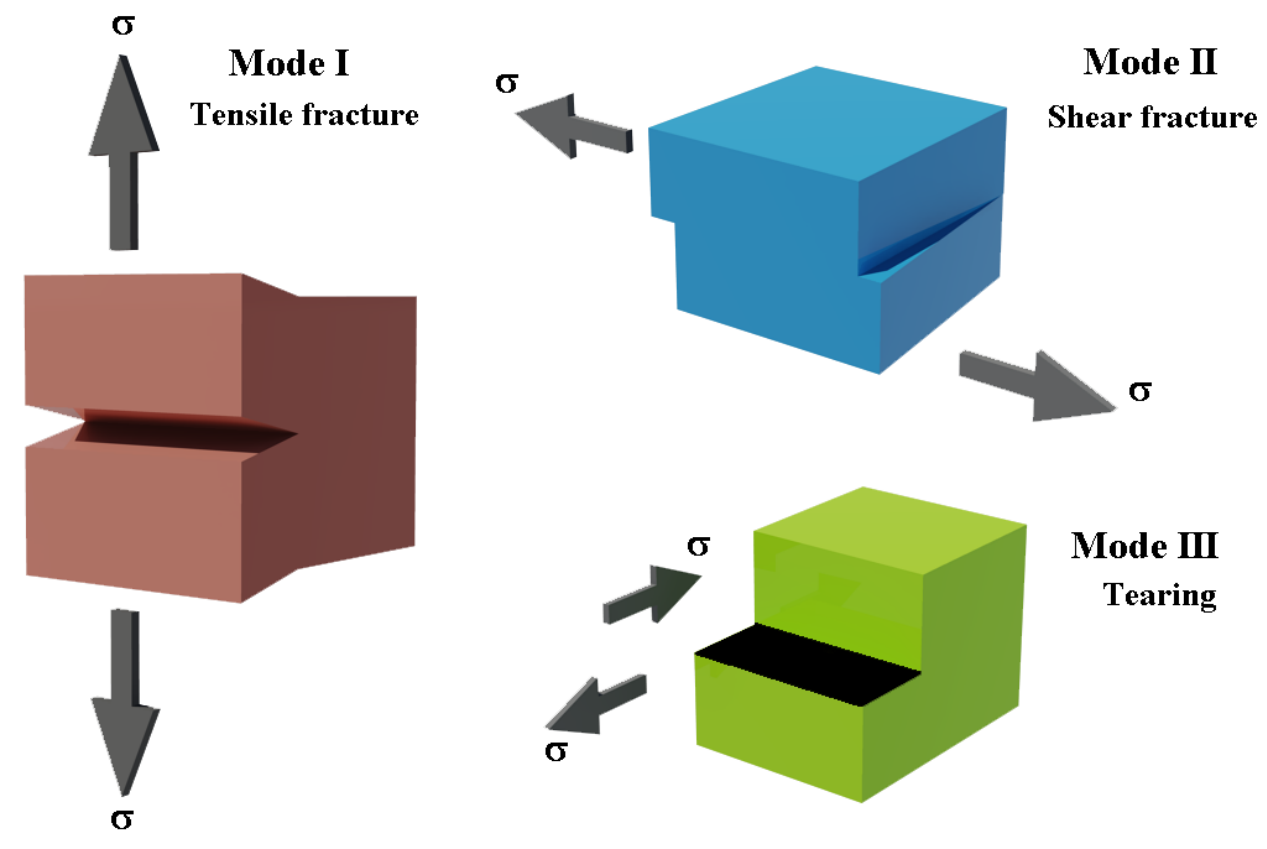
۱- بازشونده (Opening Mode): Mode I (ناشی از تنش کششی عمود بر سطح ترک)

۲- لغزشی (Sliding Mode): Mode II (ناشی از تنش برشی موازی با سطح ترک و عمود بر بخش جلویی ترک)

۳- پارگی (Tearing Mode): Mode III (ناشی از تنش برشی موازی با سطح ترک و موازی با بخش جلویی ترک)

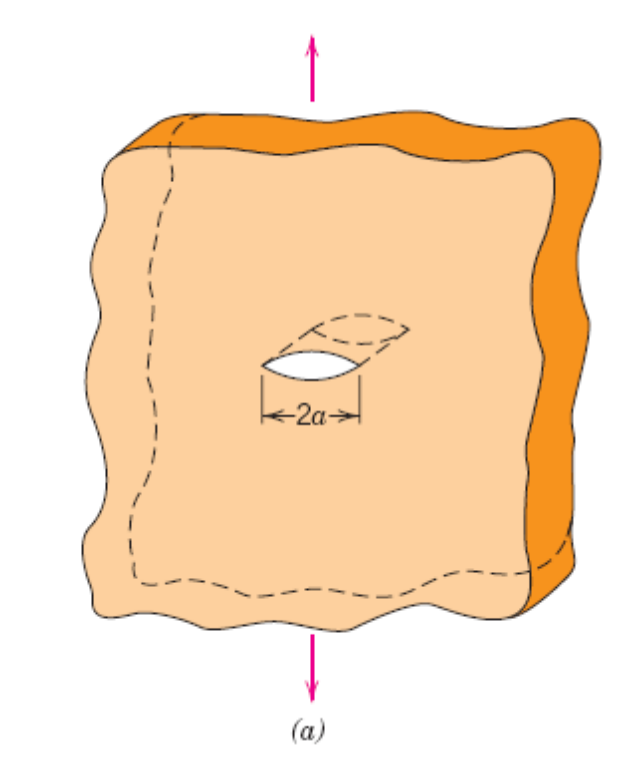


مودهای شکست

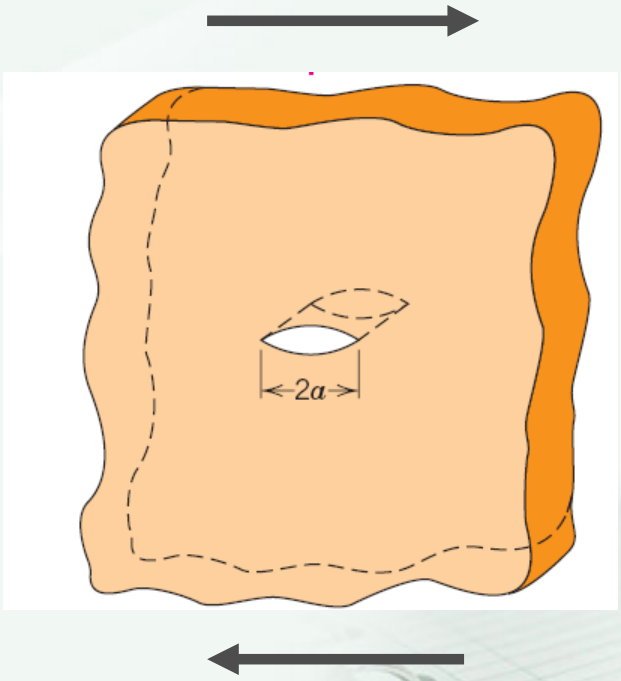

σ
Mode I
Tensile fracture
σ
σ
Mode II
Shear fracture
σ
σ
σ
Mode III
Tearing

چقرمگی شکست

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



تنش عمود بر ترک است



تنش در امتداد ترک است

چقرمگی شکست

بهترین حالت برای رشد ترک حالتی است که تنش عمود بر ترک است (Mode I).

بنابراین معمولاً طراحی براساس این حالت بارگذاری انجام می شود تا در برابر سایر حالات نیز سازه در برابر شکست ایمن باشد، بنابر این:

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

K_C، بالاترین سطح K_I قابل تحمل ماده بدون شکست است و پس از آن شکست ناگهانی رخ می دهد.

چقرمگی شکست

برای مود اول :

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

برای مود دوم:

Mode II

$$K_{II} = \tau\sqrt{\pi a}$$

$$\begin{cases} \sigma_x = \dfrac{-K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\theta/2 \left(2 + \cos\theta/2 \cos 3\theta/2\right) \\ \sigma_y = \dfrac{+K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\theta/2 \cos\theta/2 \cos 3\theta/2 \\ \tau_{xy} = \dfrac{+K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\theta/2 \left(1 - \sin\theta/2 \sin 3\theta/2\right) . \end{cases}$$

برای مود سوم:

Mode III

$$K_{III} = \tau\sqrt{\pi a}$$

$$\begin{cases} \tau_{xz} = \dfrac{-K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\theta/2 \\ \tau_{yz} = \dfrac{+K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\theta/2 . \end{cases}$$

چقرمگی شکست

K_I (چقرمگی شکست)، به خواص ذاتی ماده باز می گردد و به جنس ماده بستگی دارد. هنگامی که K_I به حد بحرانی برسد (K_{IC})، شکست داریم. چقرمگی شکست بیانگر مقاومت ماده در برابر ترک است. برای تعیین K_{IC} در یک ماده مثلاً یک فولاد خاص، کافی است تعدادی ورق با یک ضخامت مشخص از آن تهیه شده و در هر کدام ترکی با طول معین بطور مصنوعی ایجاد شده و تحت تنش قرار گیرد. با رسم نمودار σ_c برحسب معکوس جذر πc، شیب خط راست حاصل، همان K_{IC} است.

چقرمگی شکست

اگر دو ماده با چقرمگی شکست های متفاوت داشته باشیم، احتمال شکست در ماده با چقرمگی کم، بیشتر است. هر چه چقرمگی شکست ماده بالاتر باشد، مقاومت در برابر شکست بالاتر است.

در ماده ترد، شکست ترد و ناگهانی داریم. ترک، ایجاد شده، اما بسرعت رشد نموده و منجر به شکست می شود. علت آن همان پدیده گریفیث است که براساس رابطه آن با افزایش طول ترک، تنش در نوک ترک افزایش یافته وشرایط برای شکست سریع فراهم می گردد.

چقرمگی شکست

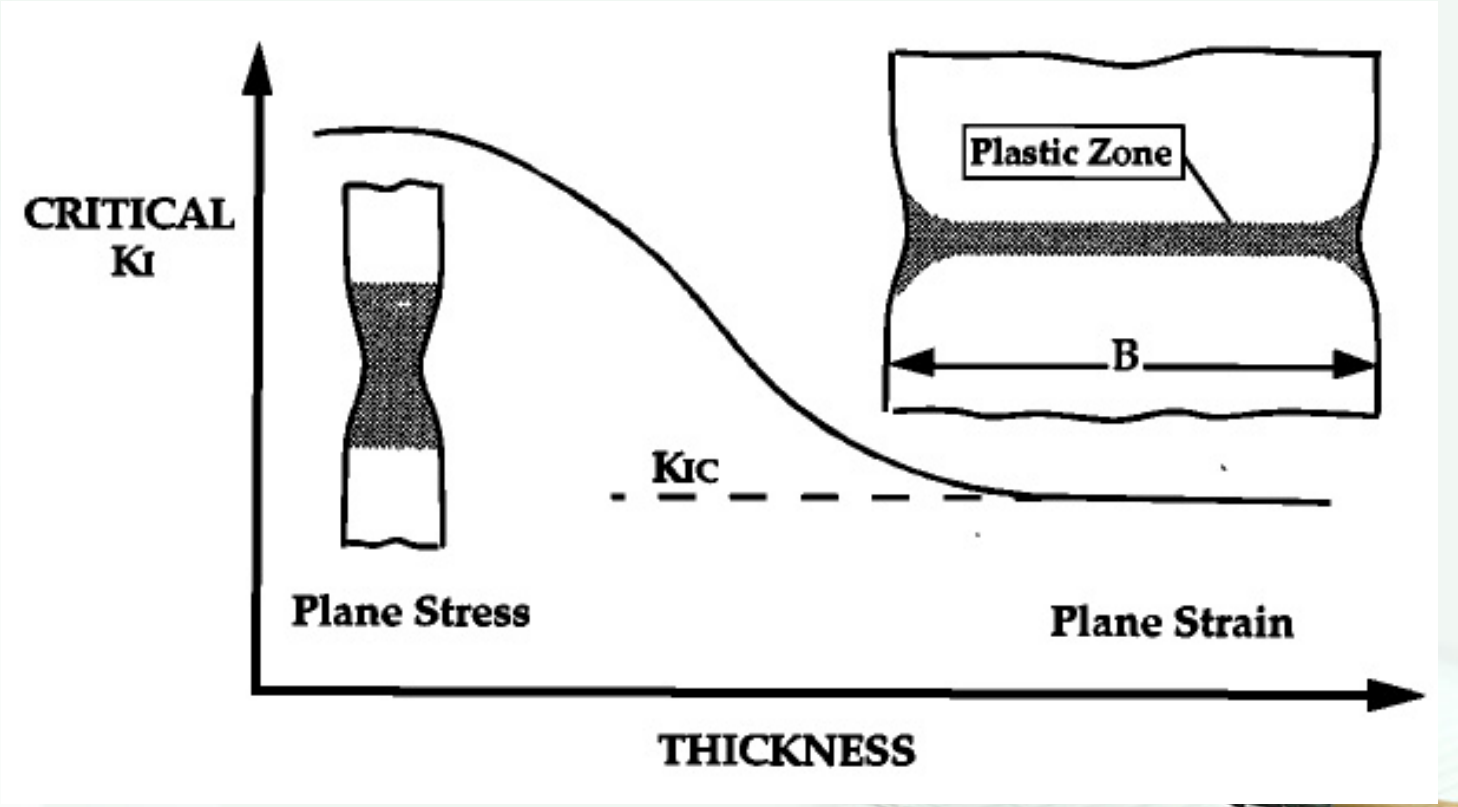
اگر ماده ترد بجای کشش تحت فشار قرار گیرد، این تنش تمایل به بستن ترک های موجود در ماده دارد. لذا تمرکز تنش نداشته و احتمال شکست کاهش می یابد. بنابراین استحکام فشاری این مواد همواره از استحکام کششی آنها بیشتر است. مثلاً چدن که در حالت تنش کششی نسبتاً ضعیف است، در فشار مستحکم می باشد. شکست در هنگام فشار زمانی روی می دهد که نیروی فشاری به حدی زیاد باشد که این نیروها سبب ایجاد مولفه کششی درامتداد صفحات بلوری در منطقه نوک ترک نمایند.

چقرمگی شکست

چقرمگی شکست علاوه بر جنس ماده به ضخامت قطعه نیز وابسته است. در جلوی یک ترک تیز در یک ورق ضخیم، حالت تنش سه بعدی ایجاد شده، لذا استحکام شکست کاهش می یابد. بنابراین هر چند چقرمگی شکست خاصیتی ذاتی است، اما استحکام شکست قطعات ضخیم از قطعات نازک برای یک ماده مشخص کمتر است. با ازدیاد ضخامت، شرایط کرنش صفحه ای ایجاد شده و چقرمگی شکست (K_I) کاهش می یابد و به مقدار حداقل و ثابت خود (K_{IC}) می رسد. ضخامتی که به ازای آن شرایط کرنش صفحه ای حاصل می شود، به چقرمگی شکست و استحکام کششی ماده وابسته است.

$$t= 2/5 (K_{ic} / Ys)^2$$

چقرمگی شکست


CRITICAL
KI
Plastic Zone
B
KIC
Plane Stress
Plane Strain
THICKNESS

چقرمگی شکست

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

پارامترهای موثر بر چقرمگی شکست

چقرمگی شکست، خاصیتی از ماده است که به عوامل متعددی بستگی دارد.

- ✓ با کاهش دما، افزایش سرعت کرنش و افزایش اندازه دانه، K_{IC} کاهش می یابد.
- ✓ مواد با K_{IC} بالاتر می توانند ترک های با طول بیشتر در یک سطح تنش معین یا تنش های بیشتر به ازای ترک با طول معین را تحمل کنند.
- ✓ مواد چکش خوار، K_{IC} بالاتری دارند.

پارامترهای موثر بر چقرمگی شکست

چقرمگی شکست، خاصیتی از ماده است که به عوامل متعددی بستگی دارد.

- ✓ افزایش استحکام تسلیم و کششی ماده عموماً سبب کاهش K_{IC} می شوند. اما با تغییر ساختار می توان در کنار استحکام نسبتاً بالا چقرمگی مطلوب نیز داشت. اگر ماده دانه ریز شود، استحکام و چقرمگی شکست مناسب خواهیم داشت.

پارامترهای موثر بر چقرمگی شکست

- بسیاری از آلیاژها در کاربردهای مهندسی پیش از کاربرد باید تحت مجموعه ای از فرآیندها قرار گیرند. نمونه ای از این فرآیندها شامل کار مکانیکی در دمای بالا و متوسط است. کار گرم می تواند ایجاد ساختار دانه ای جهت دار (مثلاً در آلیاژهای آلومینیوم) و میزان بالای بافت (مثلاً در آلیاژهای تیتانیم) کند. چقرمگی شکست در هر دو حالت تحت تاثیر قرار می گیرد. عموماً چقرمگی شکست در جهاتی که دانه ها عمود بر صفحه ترک طویل شده اند، زیاد است و برای صفحات ترک موازی دانه های طویل شده، کم خواهد بود.

پارامترهای موثر بر چقرمگی شکست

فرآیندهای ساخت واتصال قطعات به یکدیگر نیز بر چقرمگی تاثیر منفی دارند، اما می توان با کنترل دقیق فرآیند این تاثیرات را کاهش داد.

- ✓ در متالورژی پودر، امکان آلودگی سطح ذرات با عناصر گازی نظیر اکسیژن وجود دارد. به علت اکسید شدن سطح پودر و یا جذب گازها در روی سطوح پودرها، فصل مشترک مناسبی در حین فشردن و سینتر بین آنها ایجاد نشده که بر چقرمگی اثر منفی دارند.

پارامترهای موثر بر چقرمگی شکست

- در ریخته گری با افزایش میزان حفرات، تخلخل و ناخالصی ها، میزان چقرمگی کاهش می یابد.
- ماشین کاری عموماً سبب کاهش چقرمگی نمی شود. البته تحت شرایط نامناسب، ماشین کاری می تواند باعث آسیب به سطح یک جسم نیمه ترد به اندازه ای شود که شکست در زیر تنش تسلیم رخ دهد.
- در ماشین کاری اگر باربرداری با سرعت وبه میزان زیاد انجام شود، چقرمگی کاهش می یابد.

پارامترهای موثر بر چقرمگی شکست

- جوشکاری در شکست موثر است. در فولادها همواره احتمال توسعه یک ساختار مارتنزیتی یا یک الگوی تنش شدید که منجر به تشکیل ترک های ریز می شود، وجود دارد. در فولادهای آلیاژی، جوشکاری تمایل به تشکیل ترک را زیاد می کند.
- همچنین جوشکاری ساختار میکروسکوپی را به گونه ای تغییر می دهد که منجر به کاهش چقرمگی جسم شود. این موضوع ممکن است ناشی از تجمع در داخل ساختار منجمد شده جوش و یا تشکیل دانه های دشت باشد.

پارامترهای موثر بر چقرمگی شکست

- در فولادهایی با مقاطع ضخیم، احتمال تشکیل ترک به علت جوشکاری ناشی از تغییر ساختار زیاد است، اما در آلیاژهای تیتانیم نوع آلفا-بتا، جوشکاری مقاطع نسبتاً ضخیم منجر به سرد شدن سریع و تشکیل نوعی ساختار میکروسکوپی می شود که برای چقرمگی شکست مفید است.
- درمجموع در جوشکاری، تخلخل ها، نقایص و ترک های ایجاد شده دراطراف ناحیه جوش بر چقرمگی اثر منفی دارند.

پارامترهای موثر بر چقرمگی شکست

- عناصر افزودنی و نوع ترکیبات و فازها بر چقرمگی تاثیر گذارند. مثلاً افزایش درصد کربن، آخال های ترد و دانه های بزرگ تر در فولاد باعث کاهش چقرمگی می شوند. ایجاد فولاد دانه ریز با افزودن برخی عناصر آلیاژی و عملیات نورد امکان دارد. یک فولاد کاملاً اکسیژن زدایی شده، مقدار آخال غیرفلزی کمتر و چقرمگی بالاتری دارد.
- در آلیاژهای آلومینیم و تیتانیم نیز عموماً با افزایش استحکام، چقرمگی کاهش می یابد.

پارامترهای موثر بر چقرمگی شکست

- سرعت بار گذاری نیز بر چقرمگی موثر است. رفتار چقرمه یک ماده در هنگام بارگذاری آهسته می تواند به رفتاری ترد در هنگام بارگذاری ضربه ای و ناگهانی تبدیل شود.
- نوع بارگذاری نیز موثر است. هر چه شرایط از حالت تنش صفحه ای به سمت کرنش صفحه ای میل کند، ماده رفتار تردتری از خود نشان می دهد.

پارامترهای موثر بر چقرمگی شکست

- فلزات چقرمگی بالاتری نسبت به سرامیک ها و پلیمرها دارند.
- سرامیک ها ذاتاً ترد بوده و چقرمگی شکست پایینی دارند.
- پلیمرها مشابه برخی فلزات با تغییرات دما، رفتارهای متفاوتی ارائه می دهند. اکثر پلیمرها دمای انتقال شیشه ای شدن داشته که پایین تر از این دما، ماده جامد الاستیک ترد بوده وبالاتر از این دما، ماده الاستیک انعطاف پذیر محسوب می شوند.

پارامترهای موثر بر چقرمگی شکست

- استحکام کششی سرامیک ها در مقایسه با استحکام فشاری آن ها بسیار کمتر است. در حالت کششی، تمرکز تنش شدیدی در ترک های میکروسکوپی موجود ایجاد شده و جسم به سرعت می شکند. اما در حالت فشاری نیروی اعمالی مانع باز شدن نوک ترک شده و استحکام زیاد می شود. براین اساس عموماً سرامیک ها در کاربردهای تحت فشار بکار می روند. در صورت نیاز به بکارگیری در کاربردهای تحت کشش، لازم است تا تقویت شوند.

روش های بهبود چقرمگی شکست

روش ها بهبود چقرمگی پلیمرها:

- ✓ استفاده از تقویت کننده با مقاومت به ضربه بیشتر (نظیر الیاف) در زمینه پلیمری و به عبارتی ساخت کامپوزیت زمینه پلیمری
- ✓ آلیاژ کردن با یک فاز دیگر که مقاومت به ضربه بالاتری داشته باشد (نظیر فازهای لاستیکی یا نایلون آلیاژ شده با پلی اولفین)
- ✓ کوپلیمریزاسیون جهت ایجاد ساختار شیمیایی چقرمه تر در پلیمرها

پارامترهای موثر بر چقرمگی شکست

روش ها بهبود چقرمگی سرامیک ها:

- ✓ تقویت سرامیک ها با ذرات یا الیاف (کامپوزیت زمینه سرامیکی)
- ✓ ایجاد دگرگونی فازی در ناحیه اعمال تنش، به گونه‌ای که این تغییر باعث جذب انرژی بیشتر در نوک ترک در حال گسترش شده و ضمن توقف رشد ترک باعث افزایش چقرمگی شود.
- ✓ ایجاد تنش های فشاری پسماند جهت بستن ترک ها
- ✓ استفاده از ذرات فاز دوم به عنوان مانع جهت جلوگیری از رشد نوک