دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد

شکست، خزش و خستگی

جلسه ششم
(عوامل موثر بر شکست ترد)

دکتر رضا اسلامی فارسانی

تغییر رفتار شکست

دمای کاری قطعه یکی از مهمترین عواملی است که بر ماهیت شکست تاثیر می گذارد. در بسیاری از مواد مهندسی، عموماً کاهش دما سبب افت چقرمگی می شود و شرایط به سمت تردی میل می کند. به عبارتی، شکست ترد عمدتاً در دماهای پایین رخ می دهد.

تبدیل رفتار نرم به ترد در گستره باریک دما، تنها مخصوص فلزات bcc و hcp است و برای مواد با ساختار fcc این رفتار وجود ندارد. فلزات fcc رفتار شکست ثابتی دارند، اما انواع bcc و hcp دارای دمای تبدیل تردی به نرمی (DBTT) هستند. در این دما، رفتار ماده از نرم به ترد تبدیل می شود.

Ductile-to-Brittle Transition Temperature (DBTT)

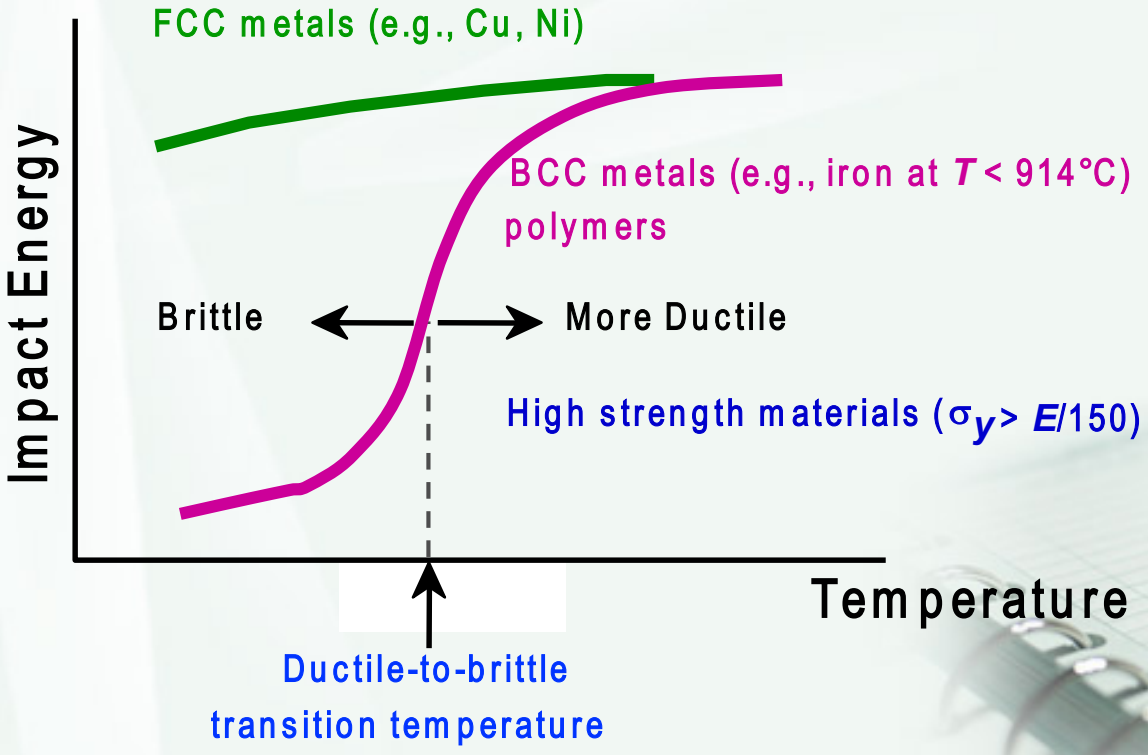
تغییر رفتار شکست

دمای تبدیل، دمایی است که ظاهر شکست ۵۰ درصد ترد است. برای تعیین دمای تبدیل از آزمون شارپی و ایزود استفاده می کنند. دمای تبدیل و تغییر از رفتار نرم به ترد تابع استحکام، ترکیب شیمیایی، ساختار، روش ساخت، حالت تنش و سرعت بارگذاری است.

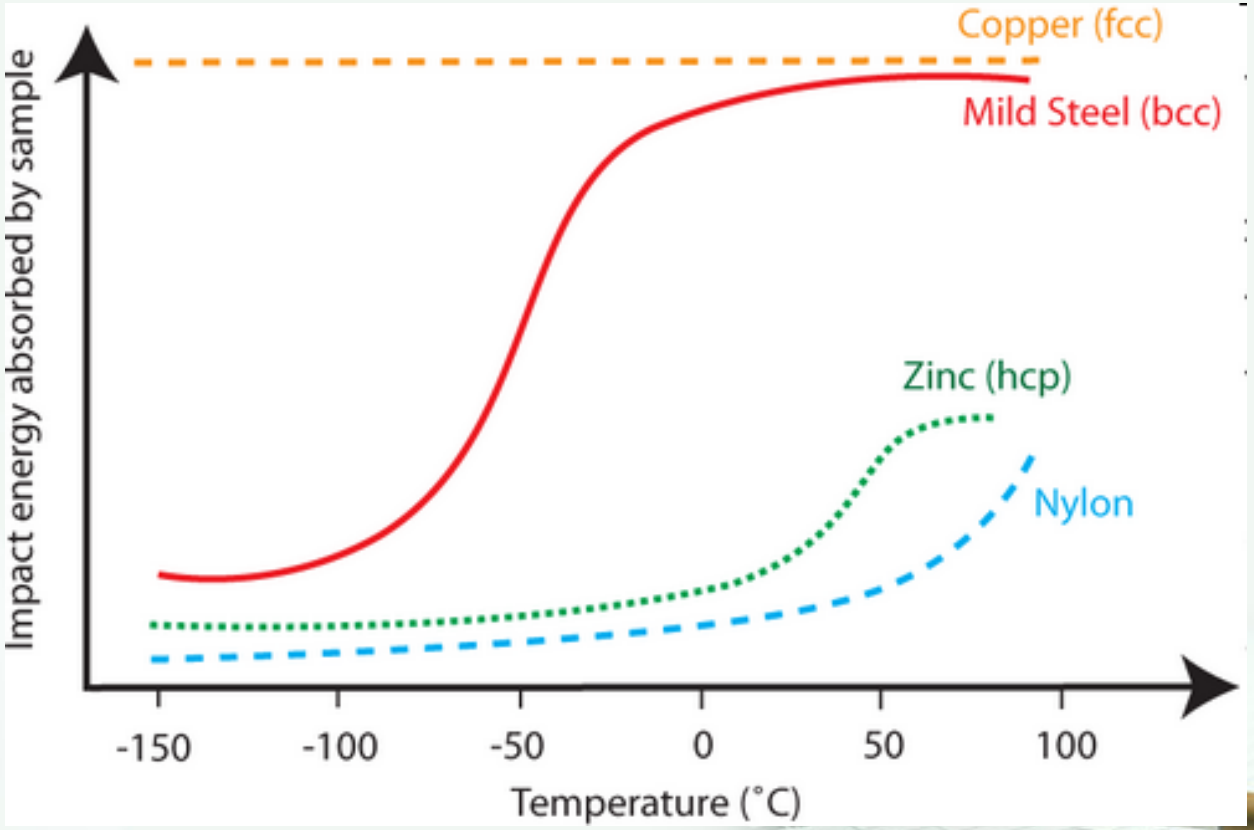
گزینه های مناسب برای انتخاب مواد در دماهای پایین، فولادهای آستنیتی و فلزات غیرآهنی با ساختار fcc (نظیر آلیاژهای Al، Ti، Cu و Ni) می باشند.

تغییر رفتار شکست

- Increasing temperature ⟹ increases $El\%$ and K_c



تغییر رفتار شکست



عوامل موثر بر تردی و نرمی مواد مهندسی

عموماً صحیح نیست که بگوییم یک ماده همواره ترد یا همواره نرم است. تردی یا نرمی به عوامل متعددی به شرح زیر وابسته است:

- ✓ درجه حرارت: فولادهای bcc دارای درجه حرارت تبدیل نرمی به تردی می باشند، در حالی که آلومینیوم این دما را نداشته و همواره نرم هستند. لذا این فلز در صنعت هواپیماسازی که قطعات آن در دماهای مختلف کار می کنند، بکار می رود.
- ✓ جنس و بافت قطعه: چگونگی دانه بندی در ماده بشدت در نرم یا ترد بودن آن موثر است.

عوامل موثر بر تردی و نرمی مواد مهندسی

- ✓ تغییر ترکیب شیمیایی و ریزساختار می توانند دمای تبدیل تردی به نرمی را تغییر دهد. مثلاً افزایش درصد کربن و منگنز در فولاد می توانند تا ۵۵ درجه سانتیگراد این دما را افزایش دهند که مناسب نیست.
- ✓ هر ۰/۰۱ درصد فسفر نیز حدود ۷ درجه سانتیگراد دمای تبدیل را زیاد می کند. نیکل و آلومینیوم برای کاهش این دما مفید هستند. مولیبدن اثری مشابه کربن و سیلیسیم نیز اثر منفی دارد. وجود اکسیژن در فولاد بشدت دمای تبدل را بالا می برد. فولادهای ناآرام (اکسیژن زدایی نشده) و حاوی اکسید آهن دارای دمای تبدیل بالاتر از دمای محیط می باشند.

عوامل موثر بر تردی و نرمی مواد مهندسی

- ✓ حالت تنش: هر چه وضعیت بارگذاری از تنش صفحه ای به کرنش صفحه ای نزدیکتر شود، جسم رفتار تردتری از خود نشان می دهد. چون در تنش صفحه ای، منطقه پلاستیک نوک ترک بیشتر از کرنش صفحه ای است.
- ✓ نرخ کرنش (سرعت بارگذاری): هر چه سرعت تغییرشکل افزایش یابد، رفتار ماده تردتر می شود و هر چه سرعت کرنش کمتر شود، جسم رفتار نرم تری از خود نشان می دهد.

تمهیدات جلوگیری از شکست ترد در هنگام طراحی

- ✓ از تغییرات شدید مقطع به منظور جلوگیری از تمرکز تنش پرهیز شود و ضخامت مقطع حداقل ممکن باشد تا تنش های سه بعدی کاهش یابد.
- ✓ از گوشه های تیز و طراحی به گونه ای که محل های تمرکز تنش را افزایش دهد، اجتناب شود.
- ✓ جوش ها به دور از محل های تمرکز تنش و دور از هم بوده و برای بازرسی به سادگی در دسترس باشند.

تمهیدات جلوگیری از شکست ترد در هنگام طراحی

- ✓ فرآیندهای ساخت و تولید مختلف می توانند بر چقرمگی و رفتار شکست ماده تاثیرگذار باشند (نظیر تاثیر نورد، آهنگری، متالورژی پودر و...).
- ✓ در عملیات تکمیلی در تولید قطعه دقت شود تا عیوب و نواقص جدیدی که تاثیر منفی بر چقرمگی شکست دارند، ایجاد نشوند (نظیر ماشین کاری و جوشکاری).
- ✓ عناصر افزونی مختلف می توانند تاثیر مثبت یا منفی بر چقرمگی داشته باشند.

انواع شکست ترد

- شکست ترد، عموماً درون دانه ای است، اما در مواردی این نوع شکست در اثر انتشار ترک در امتداد مرزدانه ها روی می دهد که شکست مرزدانه ای نام دارد. این نوع شکست در برخی حالات به علت حضور لایه های نازک فاز ثانویه سخت و ترد و وجود ناخالصی ها و جدایش و رسوب عناصر در مرزدانه ها ایجاد می شود.
- این موارد می توانند در اثر تجمع در حین انجماد تشکیل شوند، لذا عموماً در قطعات ریخته گری شده معمولی این نوع شکست متداول است. مثلاً لایه های نازک و ترد بیسموت در مرزدانه های مس تجمع می کنند که این لایه ها به میزان کم (کمتر از ۰/۰۱ درصد) می توانند باعث تردی زیاد مس شوند.

طراحی با مواد ترد

- پیشرفت ترک و افزایش طول آن نه تنها وضعیت را بهتر نمی کند که آن را بدتر می کند.

بنابراین اگر در قطعه ای ترک شروع به پیشرفت کند، غالباً تا حد شکست ادامه می یابد.

پیشرفت ترک، سریع و شکست ترد آن ناگهانی است و هیچگونه اخطاری پیش از شکست وجود ندارد. این رفتار نقطه مقابل رفتار مواد شکل پذیر است.

- تنشی که در آن شکست ترد بروز می کند، تابع طولانی ترین ترک موجود در ماده است. هر قطعه از یک ماده، حاوی تعدادی ترک های میکروسکوپی است که درون آن منتشر شده اند.

طراحی با مواد ترد

- با افزایش اندازه قطعه، احتمال وجود ترک بزرگتر افزایش می یابد. لذا قطعات بزرگ مواد ترد در مقایسه با قطعات کوچکتر همان مواد در تنش های پایین تر (نه نیروهای کمتر) می شکنند. بر این اساس، آزمایش مقیاس کوچک دستگاه های ساخته شده از مواد ترد و تعمیم نتیجه آزمایش به اندازه واقعی، متضمن خطر و حتی می تواند فاجعه آمیز باشد.

طراحی با مواد ترد

- مواد ترد به علت عدم قابلیت جذب انرژی مناسب پیش از شکست، در برابر بارهای ضربه ای تحمل خوبی ندارند، لذا باید در طراحی آنها دقت زیاد نمود. البته دسته ای از مواد ترد قادر به جذب مقادیر زیادی انرژی در هنگام شکست و نه پیش از آن هستند. این مواد کاربردهای متعددی دارند. آنها در موقع شکست، ریز ریز می شوند که حاصل آن تعداد زیادی دانه های کوچک است که سطح بسیار زیادی ایجاد کرده و قسمت عمده انرژی ذخیره شده در آنها به صورت انرژی سطحی ظاهر می شود.

طراحی با مواد ترد

- ✓ نمونه ای از مواد با قابلیت جذب مقادیر زیاد انرژی در هنگام شکست، سرامیک های سبک وزن برای جلیقه های ضدگلوله است. در این مواد، بخش اعظم انرژی جنبشی گلوله صرف ایجاد سطوح جدید در سرامیک می شود. شیشه های ایمنی اتومبیل نیز که در تصادف ریز ریز می شوند، از همین نوع هستند. البته در بیشتر کاربردهای مهندسی بحث شکست یا ریز ریز شدن مطرح نبوده و موضوع شکنندگی ماده ترد مطرح است.

طراحی با مواد ترد

- در هنگام طراحی با مواد ترد، باید شرایط کاری و محیطی و اندازه قطعه به دقت بررسی شود.
- از نواحی تمرکز تنش اجتناب شود و تا حد امکان از بارهای ضربه ای جلوگیری شود.
- می توان از مواد ترد با دقت لازم در طراحی استفاده کرد. چدن، سیمان، بتن و آجر، نمونه های مواد ترد هستند که عموماً بکار می روند.

طراحی با مواد ترد

- بدنه موتور خودرو بخاطر ارزانی از چدن ساخته می شود. البته اگر آب سرد بر روی موتور بسیار گرم ریخته شود، ماهیت ترد آن معلوم می شود. در این حالت در اثر انقباض حرارتی، تنش حاصل می شود که این تنش می تواند برای شکست ترد کافی بوده و سبب شکست بدنه موتور شود.

طراحی با مواد ترد

- پیش از این گفته شد که استحکام فشاری مواد ترد بالاتر از استحکام کششی آنهاست. لذا مواد ترد را اکثراً برای کاربردهای فشاری بکار می برند. نظیر بتن و آجر که نیروهای عمودی وارد بر آنها فشاری است. اگر نیروهای کششی مورد نظر باشد، این مواد را تقویت می کنند. مثلاً بتن را با میله های فولادی تقویت کرده تا استحکام کششی و نه فشاری بهبود یابد.

طراحی با مواد ترد

- وجود شیار نیز باعث حالت تنش سه بعدی کششی و تنش های موضعی بزرگ شده و با ایجاد ترک، تمایل به شکست ترد را زیاد می کند. اما تنش های فشاری سه بعدی (فشار هیدرواستاتیک) در برابر شکست مقاومت کرده و نرمی را زیاد می کند. از فشار هیدرواستاتیک می توان در بسیاری از عملیات فلزکاری نظیر کشش سیم و فشارکاری به منظور ایجاد تغییرشکل پلاستیک زیاد، استفاده کرد. تنش هیدرواستاتیک بر شروع ترک اثر نداشته، بلکه فرایند اشاعه را مشکل تر می کند.

طراحی با مواد ترد

- ✓ به منظور بررسی اثر فشار هیدرواستاتیک بر نرمی شکست در کشش، نمونه هایی از مواد مختلف تحت آزمایش کشش به همراه فشار هیدرواستاتیک قرار گرفته اند.

1) ماده ای با نرمی معمولی نظیر مس و آلومینیوم که حدود ۱۰۰٪ کاهش سطح مقطع داشته است.
2) ماده ای با نرمی کم (ترد معمولی) مانند چدن یا روی
3) ماده ای ترد (بسیار ترد) مانند تنگستن و سنگ مرمر