بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد

طراحی و انتخاب مواد مهندسی

جلسه هفتم
(فرآیند انتخاب مواد-۵)

دکتر رضا اسلامی فارسانی

انتخاب مواد براساس معیار چقرمگی

- ✓ چقرمگی شکست با دیگر خواص مکانیکی مواد مرتبط است.
- ✓ برای بسیاری از مواد، با افزایش استحکام، چقرمگی (Toughness) کاهش می یابد.
- ✓ ترکیب شیمیایی و ریزساختار مواد بر چقرمگی شکست موثر هستند. برای مثال در فولادها مقدار بیشتر آخال های ترد، اندازه دانه بزرگتر و افزایش درصد کربن، کاهش چقرمگی را به دنبال دارد.
- ✓ حضور عناصر اکسیژن زدا نظیر آلومینیوم نیز به دانه ریز کردن و بهبود چقرمگی شکست کمک می کند.
- ✓ دمای انتقال فولادهای دانه ریز اکسیژن زدایی شده پایین می باشد و این مواد به شکست ترد مقاوم تر هستند.

انتخاب مواد براساس معیار چقرمگی

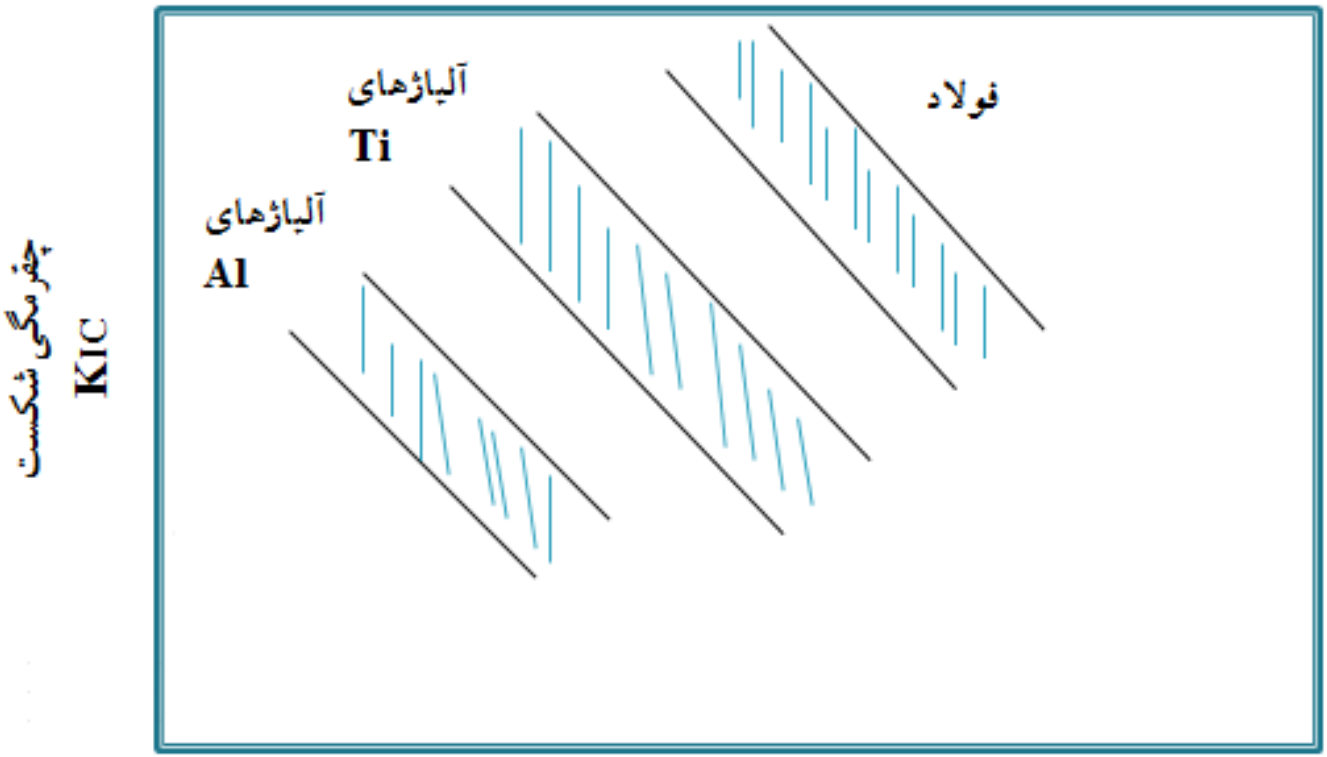
- ✓ فرآیند ساخت بر چقرمگی بسیار موثر است.
- ✓ منشاء بسیاری از شکست های ترد، منطقه جوش و نواحی مجاور آن است.
- ✓ تنش های پسماند ایجاد شده هنگام جوشکاری و وجود عیوب در ناحیه جوش از عوامل این شکست ها هستند.
- ✓ سرعت بارگذاری آرام نیز سبب رفتار چقرمه در مقایسه با رفتار ترد برای بارگذاری ضربه ای و آنی می شود.

انتخاب مواد براساس معیار چقرمگی

- ✓ کاهش دمای محیط کار بر افت چقرمگی موثر است. این پدیده برای فلزات با ساختار BCC و HCP که دمای تبدیل ترد دارند، بسیار حائز اهمیت است (نظیر برخی فولادهای کربنی). برای مثال در مواردی کشتی های فولادی جوشکاری شده با ساختار BCC با کاهش دمای محیط کاری دچار شکست ترد شده اند.
- ✓ مواد با ساختار BCC و HCP برای دمای پایین مناسب نیستند و باید از فلزات غیرآهنی نظیر آلیاژهای مس، تیتانیم، آلومینیم و نیکل با ساختار FCC و همچنین فولادهای آستنیتی استفاده کرد.

انتخاب مواد براساس معیار چقرمگی

نمودار تغییرات چقرمگی شکست برحسب استحکام تسلیم



انتخاب مواد براساس معیار چقرمگی

- در بحث انتخاب مواد براساس چقرمگی، آشکارسازی ترک ها پیش از رسیدن به مقدار بحرانی، از جنبه های مهم است. ترک های بزرگتر به سادگی مشخص شده، لذا کاربرد موادی که قادر به تحمل ترک بحرانی بزرگتری باشند، ارجحیت دارد.

- حداکثر ترک قابل تحمل در یک ماده، با نسبت چقرمگی شکست به استحکام تسلیم آن ماده در یک دما و آهنگ بارگذاری معین متناسب است.

انتخاب مواد براساس معیار چقرمگی

- ✓ مقدار بالاتر نسبت چقرمگی شکست به استحکام تسلیم گویای قابلیت تحمل ترک بزرگ تر است. بنابراین در انتخاب مواد، تلفیق مناسب چقرمگی شکست و استحکام تسلیم با ترک بحرانی قابل تشخیص با روش های غیرمخرب ضروری است.

- ✓ ترکیب چقرمگی شکست، تنش اعمالی و طول ترک، بر شکست یک قطعه موثر هستند.

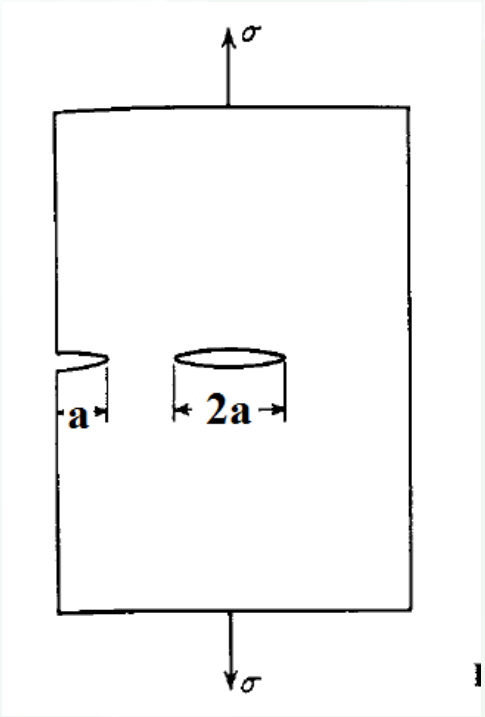
انتخاب مواد براساس معیار چقرمگی

ارتباط بین میزان تنش، اندازه ترک و چقرمگی شکست

σ_f: تنش شکست

α: ضریب تصحیح، تابع هندسه قطعه (ضخامت، پهنا و طول ترک)

a: طول ترک (برای ترک های داخلی، طول ترک ۲ برابر a و برای ترک های لبه ای، طول ترک برابر a است)



ترکیب های مختلفی از تنش و طول ترک می توانند سبب شکست سازه ای با چقرمگی شکست (K_{IC}) مشخص شوند.

$$K_{IC} = \alpha \sigma_f \sqrt{\pi . a}$$

انتخاب مواد براساس معیار چقرمگی

- ✓ اگر ماده ای با K_{IC} مشخص برای کاربرد معینی در نظر گرفته شود، می توان اندازه ترکی را که در سطح تنش مورد انتظار موجب شکست شود، پیش بینی کرد.
- ✓ با داشتن تنش طراحی قطعه و K_{IC}، طول بحرانی ترک بدست می آید (مثلاً a_1). بنابراین اگر ترکی با طول بزرگتر از a_1 وجود نداشته باشد، شکست در اثر بارگذاری رخ نمی دهد.
- ✓ اگر در آزمون تنش، نمونه آزمون تا سطح تنشی بالاتر از تنش مورد انتظار هنگام کار بارگذاری شده و سالم بماند، ترک های بزرگتر از a_1 در آن وجود ندارند.

انتخاب مواد براساس معیار چقرمگی

- با توجه به رابطه بین تنش، چقرمگی و طول ترک می توان نتیجه گرفت که اگر K_{IC} و تنش تسلیم در شرایط آهنگ بارگذاری و دمای کار اندازه گیری شوند، بزرگترین ترک مجاز با نسبت $(K_{IC}/Y_s)^2$ متناسب است.

- این بدان معناست که K_{IC}/Y_s شاخصی برای مقایسه چقرمگی مواد سازه ای است و مقادیر بالاتر آن مطلوب تر هستند. در این حالت، ترک های بزرگتر قابل تحمل هستند.

انتخاب مواد براساس معیار چقرمگی

پلیمرها

- ✓ پلیمرها مشابه برخی فلزات دارای دمای تبدیل تردی هستند که دمای انتقال شیشه ای شدن T_g (Transition Glass Temperature) نامیده می شود.
- ✓ در دمای کمتر از Tg، پلیمر حالت جامد الاستیک ترد و در دماهای بالاتر از آن ماده الاستیک قابل انعطاف است.
- ✓ برای بهبود چقرمگی و استحکام ضربه پلیمرها روش های زیر اعمال می شود:
  - آلیاژکردن با یک فاز دیگر که مقاومت به ضربه بالاتری داشته باشد (نظیر فازهای لاستیکی) برای مثال نایلون آلیاژشده با پلی اولفین
  - کوپلیمریزاسیون جهت ایجاد ساختار شیمیایی چقرمه تر
  - استفاده از تقویت کننده های با مقاومت به ضربه بیشتر (نظیر الیاف) در زمینه های پلیمری و به عبارتی تهیه کامپوزیت.

انتخاب مواد براساس معیار چقرمگی

سرامیک ها

- ✓ سرامیک ها ذاتاً ترد هستند. برای بهبود چقرمگی آنها روش های زیر اعمال می شود:

• تقویت با مواد الیافی (کامپوزیت های زمینه سرامیکی)

• ایجاد دگرگونی فازی (استحاله) در ناحیه اعمال تنش درون ماده. این دگرگونی باعث جذب انرژی در نوک ترک در حال گسترش شده و پیشرفت را متوقف و استحکام و چقرمگی را بالا می برد.

انتخاب مواد برای مقاومت در برابر حرارت

- ✓ خزش عامل محدود کننده عمر کارکرد قطعات یا سازه ها در دمای بالاست.
- ✓ بسیاری از روش های استحکام بخشی فلزات در دماهای کم، اثر خود را در دماهای بالاتر از نصف نقطه ذوب (در مقیاس کلوین)، از دست می دهند.
- ✓ در دماهای بالا تحرک اتم ها سبب نرم شدن ساختارهای کارسرد شده و درشت شدن رسوب های ناپایدار می شوند.

انتخاب مواد برای مقاومت در برابر حرارت

- ✓ بهترین روش بهبود استحکام خزشی، وارد کردن ذرات فاز دوم پایدار به صورت توزیع بسیار ریز و پراکنده در درون دانه هاست.
- ✓ با پیچیده کردن ترکیب شیمیایی رسوب ها و کاهش انرژی فصل مشترک بین رسوب و زمینه به منظور کاهش نیروی رانش رشد ذرات می توان به رسوب های پایدارتری با تمایل کمتری به رشد دست یافت.
- ✓ رسوب گذاری در مرزدانه ها باعث کند شدن لغزش در مرزدانه ها شده و با کنترل شکل پذیری، از گسیختگی خزشی و شکست زودرس ماده جلوگیری می کند.

انتخاب مواد برای مقاومت در برابر حرارت

- ✓ مواد براساس محدوده دمایی مجاز کاربرد طبقه بندی می شوند تا مواد مناسب برای هر دمایی مشخص شود:

دمای محیط تا دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد

۴۰۰-۱۵۰ درجه سانتیگراد

۶۰۰-۴۰۰ درجه سانتیگراد

۱۰۰۰- ۶۰۰ درجه سانتیگراد

بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

دمایdبالاترdاز 1000dدرجهdسانتیگراد

عملکرد مواد در دمای بالا

دمای محیط تا دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد

- ✓ کلیه فلزات وآلیاژهای مهندسی بجز سرب را می توان در این محدوده دمایی بکار گرفت. برخی از پلاستیک های گرما نرم را نیز می توان به مدت طولانی در دمای بالاتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد استفاده کرد.
- ✓ پلی کربنات ها، پلی اتراتر کتون و پلی پروپیلن را تا دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد می توان بکار گرفت.
- ✓ برخی پلاستیک های مسلح به الیاف نظیر نایلون- الیاف شیشه نیز در این محدوده دمایی بکار می روند.

عملکرد مواد در دمای بالا

دمای ۱۵۰ تا دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد

- ✓ فولادهای ساده کربنی یا فولادهای کربنی منگنزدار برای این محدوده مناسب هستند، اما برای زمان های طولانی (بیش از۲۰ سال) باید از فولادهای کم آلیاژ استفاده کرد.
- ✓ قطعات ریختگی موتورها برای کار تا دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد را می توان از چدن های آلیاژی ساخت.
- ✓ آلیاژهای آلومینیوم نیز تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد قابل استفاده هستند.

عملکرد مواد در دمای بالا

دمای ۱۵۰ تا دمای ٤۰۰ درجه سانتیگراد

- ✓ پلاستیک های دمای بالا تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد و برای زمان های کوتاه تا ۳۰۰ درجه سانتیگراد کاربرد دارند.
- ✓ پلی سولفون ها، پلی فنیلین سولفیدها و پلی اتر سولفون ها از این جمله هستند. پلاستیک های مرکب نظیر پلی ایمیدهای گرما سخت– الیاف گرافیت در محدوده ۲۹۰–۲٦۰ درجه سانتیگراد استفاده می شوند.
- ✓ برخی پلاستیک های جدید نظیر پلی پارافنیلین بنزوبیستازول ها برای کار طولانی مدت تا دمای ۳۷۰ درجه سانتیگراد طراحی شده اند.

عملکرد مواد در دمای بالا

دمای ۴۰۰ تا دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد

- ✓ در این محدوده دمایی فولادهای کم آلیاژ و آلیاژهای تیتانیم بهترین انتخاب هستند. اگر محدودیت وزنی نداشته باشیم، به علت ارزانی، فولادهای کم آلیاژ (حاوی کروم، مولیبدن و وانادیم) بکار می روند.
- ✓ برای بهبود مقاومت خزشی، فولاد با ۱۲-۵ درصد کروم و مقداری مولیبدن توصیه می شود.
- ✓ آلیاژهای تیتانیم با ساختار فاز آلفا نسبت به بتا مقاومت خزشی بهتری دارند. آلیاژهای نزدیک به آلفا را می توان تا دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد بکار گرفت.

عملکرد مواد در دمای بالا

دمای ۶۰۰ تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

- ✓ چهار دسته آلیاژ برای این محدوده دمایی بکار می روند: فولادهای زنگ نزن، سوپرآلیاژهای پایه آهن- نیکل، پایه نیکل و پایه کبالت.
- ✓ با افزایش دمای کار اهمیت مقاومت به خوردگی و اکسایش در آلیاژها زیاد می شود. مقاومت به اکسایش تابعی از مقدار کروم بوده و آلومینیم نیز سبب بهبود آن بخصوص در دماهای بالاتر می شود. کروم سبب مقاومت به خوردگی داغ نیز می شود که بالاترین مقاومت با بیش از ۲۰ درصد کروم حاصل می شود.
- ✓ در مواردی که مقاومت به اکسایش و خوردگی داغ آلیاژ کافی نباشد، پوشش های محافظ بکار می روند. پوشش های نفوذی **CoAl** و **NiAl** و غیرنفوذی **FeCrAl**، **CoNiAl** و **CoNiAly** که به صورت لایه مجزا روی سطح افزوده می شوند، در این موارد بکار می روند.

عملکرد مواد در دمای بالا

دمای ۶۰۰ تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

فولادهای زنگ نزن

- ✓نوع فریتی گروه ۴۰۰ برای کاربردهای با تنش کم و تا دمای ۶۵۰ درجه سانتیگراد بکار می روند.
- ✓نوع آستینی تا دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد استفاده شده که انواع ۲۰۰ و ۳۰۰ آستینی گران تر از فریتی است.
- ✓انواع پرآلیاژ 9DL-19 و 9DX-19 حاوی مولیبدن و تیتانیم دارای استحکام بالاتر بوده و تا دمای ۸۱۵ درجه سانتیگراد کارایی دارند.

عملکرد مواد در دمای بالا

دمای ۶۰۰ تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

سوپرآلیاژهای پایه آهن- نیکل

- ✓ عمدتاً حاوی محلول جامد با شبکه FCC هستند که با رسوب های ترکیبات بین فلزی و کاربیدها مستحکم شده اند. رسوب معمول در این آلیاژها، $Ni_3(AlTi)$ است. رسوب های دیگر، کاربیدی نیتریدی هستند.

عملکرد مواد در دمای بالا

دمای ۶۰۰ تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

سوپرآلیاژهای پایه نیکل و پایه کبالت

- ✓ در سوپرآلیاژهای پایه نیکل، زمینه با شبکه FCC با رسوب های ترکیبات بین فلزی مستحکم شده است. در این حالت نیز رسوب $Ni_3(AlTi)$ یا ذرات اکسیدی یا رسوب هایی کاربیدی سبب استحکام می شوند. در سوپرآلیاژهای پایه کبالت، از عوامل استحکام دهی محلول جامد و رسوب های کاربیدی استفاده شده است.

عملکرد مواد در دمای بالا

دمای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

مولیبدن، نایوبیم، تانتالیم و تنگستن

- ✓ تنها فلزات دیرگداز نظیر مولیبدن، نایوبیم، تانتالیم و تنگستن را می توان در قطعات تحت بار بالاتر از دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد بکار گرفت.
- ✓ از نایوبیم برای تماس با مذاب لیتیم و آلیاژهای K-Na در دمای حتی بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتیگراد استفاده می کنند. افزودن ۱٪ زیرکنیم به نایوبیم مقاومت به تردی ناشی از جذب اکسیژن را افزایش می دهد.
- ✓ تانتالیم برای مصارف سازه ای در محدوده دمایی ۱۹۸۰-۱۳۷۰ درجه سانتیگراد بکار می رود، اما به علت مقاومت کم به اکسایش، محافظت سطح آن ضروری است. این فلز به عنوان سپر حرارتی و المان های حرارتی در کوره های خلاء بکار می رود.

عملکرد مواد در دمای بالا

دمای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

مولیبدن، نایوبیم، تانتالیم و تنگستن

- ✓ تنگستن به علت بالاترین نقطه ذوب نسبت به نایوبیم و تانتالیم، تنها انتخاب برای کاربردهای سازه ای در دمای بسیار بالاست. در رشته سیم تنگستن لامپ، مولیبدن برای بهبود قابلیت ماشین کاری و رنیم برای مقاومت به شکست ترد بکار می رود.
- ✓ محافظت سطحی فلزات دیرگذار مورد استفاده در دمای بالا و محیط اکسید کننده، بزرگترین مانع استفاده گسترده از آنهاست. پوشش های متنوعی از نوع آلومینیدها و سیلیسیدها وجود دارند که دمای مجاز کاری آنها کمتر از ۱۶۵۰ درجه سانتیگراد است.

عملکرد مواد در دمای بالا

پلاستیک ها

- ✓ استحکام پلاستیک ها در دمای بالا عموماً به کمک دمای خیز آنها تحت باری معین موسوم به DTUL

(Deflection Temperature under load)

ارزیابی می شود. این معیار دمایی است که خیزی به میزان ۰/۲۵ میلی متر در نمونه تحت بار ٤٥٥ یا ۱۸۲۰ کیلوپاسکال ایجاد می شود.

- ✓ سرعت گرمایش، مقدار ثابت ۲ درجه سانتیگراد بر دقیقه می باشد.

عملکرد مواد در دمای بالا

پلاستیک ها

- ✓ عموماً پلاستیک های گرماسخت نسبت به گرمانرم، در برابر حرارت مقاومتر هستند. البته بکارگیری الیاف کربنی یا شیشه ای یا معدنی و یا سرامیکی در انواع پلاستیک های گرمانرم سبب بهبود موثر DTUL می شود.
- ✓ وجود ۳۰٪ الیاف شیشه درنایلون، متغیر DTUL را از ۷۱ به ۲۴۹ درجه سانتیگراد می رساند. اکثر پلاستیک ها اگر به مدت طولانی در معرض دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد قرار بگیرند، افت شدید خواص مکانیکی و فروپاشی حرارتی را خواهند داشت.

دمای بالاتر از 1000 درجه سانتیگراد