



فصل ۳

انتخاب مواد مهندسی

جلسه	موضوع	مباحث قابل ارائه
اول	مفهوم مواد مهندسی	۱- تعریف ماده مهندسی ۲- خصوصیات ماده مهندسی
دوم و سوم	خواص سه گانه مواد مهندسی	۱- معرفی خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی مواد و کاربرد آنها
چهارم	آلیاژهای مهندسی	۱- تعریف آلیاژ ۲- معرفی اجمالی مشهورترین آلیاژهای مهندسی و کاربرد آنها
پنجم	آهن و آلیاژهای آن	۱- تاریخچه آهن ۲- تعریف فولاد و انواع آن ۳- انواع فولاد از نظر کربن
ششم	فولاد ساده کربنی	۱- معرفی فولاد ساده کربنی ۲- استانداردهای دسته‌بندی و نامگذاری فولادهای ساده کربنی
هفتم	کاربردهای فولاد ساده کربنی (۱)	معرفی فولاد ساده کربنی و مصادیق آن (جدول ۶)
هشتم	کاربردهای فولاد ساده کربنی (۲)	بررسی کاربرد فولادهای ساده کربنی (تمرین پس از جدول ۶)
نهم	فولادهای آلیاژی	۱- تعریف فولاد ۲- اثر عناصر آلیاژی در خواص فولاد ۳- محدوده عناصر آلیاژی در فولاد
دهم	فولادهای زنگ نزن	۱- مفهوم فولادهای زنگ نزن ۲- نامگذاری فولاد زنگ نزن
یازدهم	آلومینیم و آلیاژهای آن	۱- معرفی آلومینیم و کاربرد آن ۲- نامگذاری آلیاژهای آلومینیم
دوازدهم	مس و آلیاژهای آن	۱- معرفی مس و کاربرد آن ۲- نامگذاری آلیاژهای مس
سیزدهم	معرفی شکل‌های گوناگون محصولات فلزی	
چهاردهم	معرفی ورق و نحوه سفارش‌گذاری و خرید آن	
پانزدهم	امتحان پایان دوره	

همان گونه که در زندگی خود مشاهده می کنید فناوری‌ها بسیار در زندگی ما اثرگذار است. از صنعت نساجی، صنایع غذایی، ساختمان و خودرو گرفته تا الکترونیک و مخابرات و... عینیت یافتن فناوری در سایه استفاده از مواد مهندسی امکان پذیر است. در همه این مواد پیشرفت فناوری و پیشرفت مواد وابسته به یکدیگرند. به عنوان مثال حدود دهه ۵۰ میلادی ظروف بسته بندی نوشابه از جنس شیشه بود، علت این انتخاب مقاومت شیشه به خوردگی و واکنش ندادن با نوشابه که حاوی مواد خورنده شیمیایی است می باشد. با پیشرفت تکنولوژی پلیمرها کم کم شیشه های نوشابه با ظروف پلیمری که بسیار ارزان تر، سبک تر با قابلیت بازیافت و مقاوم به شکست بودند جایگزین شدند. علاوه بر آن پیشرفت تکنولوژی های شکل دهی فلزات باعث شد قوطی های آلومینیمی نیز بتوانند در این جایگزینی شرکت نمایند. که مزایایی از جمله ماندگاری طولانی تر نوشابه و مقاومت به شکست و سبکی را نسبت به شیشه دارا می باشند.

همان طور که می بینید پیشرفت تکنولوژی سبب تغییرات در مواد مهندسی در ساخت یک محصول می شوند.

در کلیه رشته های فنی و حرفه ای مواد مورد استفاده در تکمیل فن و حرفه انکارناشدنی است. در میان کلیه رشته های تحصیلی فنی، تنها دو رشته است که نامشان برگرفته از ماده اولیه مورد استفاده در آن رشته است این دو رشته عبارتند از: صنایع فلزی و سرامیک، همین مسئله سبب می شود در این دو رشته در کنار آموزش فناوری های مورد استفاده در ساخت مصنوعات، شناخت مواد اولیه نیز جایگاه و اهمیت ویژه داشته باشد.

مصنوعات زیر را در نظر بگیرید:

- ۱ سیخ کباب آلومینیمی
- ۲ ظروف یکبار مصرف آلومینیمی برای نگهداری مواد غذایی مانند برنج
- ۳ سه نظام چدنی دستگاه تراش
- ۴ ورق کانال کولر ورق گالوانیزه
- ۵ لوله ساخت دوچرخه فولادی
- ۶ سینک ظرفشویی فولاد زنگ نزن

به نظر شما علت انتخاب مواد نام برده شده در هر کاربرد چیست؟

در سؤال قبل فرض کنید مواد مورد استفاده جابه جا می شد، چه مشکلی پیش می آمد؟ به عنوان مثال:

- سیخ، ورق گالوانیزه
- کانال کولر، فولاد زنگ نزن
- دوچرخه، چدنی
- سینک ظرفشویی، آلومینیمی

همان‌گونه که می‌بینید انتخاب صحیح یک ماده برای ساخت یک مصنوع در مقبولیت و موفقیت فروش یک محصول به شدت مؤثر خواهد بود.

علاوه بر این شناخت ماده با کیفیت از ماده بی‌کیفیت نیز در ساخت یک محصول مناسب مؤثر است. مثلاً زمانی که حین خمکاری ورقی ترک می‌خورد یا پیچی در اثر وارد شدن بار می‌شکند می‌تواند به دلیل نامرغوب بودن و یا نامناسب بودن ماده مورد استفاده در ساخت مصنوعات فلزی باشد. در این پودمان تلاش بر آن است نگاهی کاربردی، هر چند مقدماتی نسبت به مواد در ذهن هنرجو ایجاد شود تا در آینده کاری بتواند با تکیه بر آن نسبت به انتخاب و تهیه ماده مناسب برای ساخت محصول موفق عمل نماید.

جلسه اول موضوع: مفهوم ماده مهندسی

هدف: آشنایی با مفهوم ماده مهندسی و شناخت تفاوت آن با سایر مواد

مفاهیم

مواد مهندسی نیازمند خواص مشخص و غیرقابل تغییر می‌باشند تا بر اساس آن بتوان کاربردی را طراحی نمود. همچنین باید غیرجاندار باشند، جانداران با گذشت زمان دائماً در حال تغییر خواص و ابعاد می‌باشند. از این رو اولین شرط یک ماده مهندسی غیرجاندار بودن آن است. مثلاً تا مادامی که چرم به عنوان پوست گاو بر روی بدن گاو باشد خواص ارتجاعی آن در حال تغییر است اما از زمانی که از بدن گاو جدا شود به دلیل عدم تغییر به عنوان ماده سخت، که به نام چرم شناخته می‌شود استفاده می‌گردد. به سختی که چرم دارد در لغت فارسی اصطلاحاً چقرمگی گفته می‌شود. از این رو پوست گاو از زمانی که می‌میرد ماده مهندسی محسوب می‌شود. همانند این مثال را برای تنه درخت و چوب، پيله کرم ابریشم و نخ ابریشم و نظایر آن می‌توان به کار برد.

نکته دیگری که قابل ذکر است آن که ماده مهندسی، ماده‌ای است که بتوان با آن مصنوعی را تولید نمود. از آنجایی که مصنوعات دارای شکل و ابعاد مشخصی هستند از این رو در دمایی که مصنوع استفاده می‌شود ماده اولیه مورد استفاده باید جامد باشد. به عنوان مثال یخ یک ماده مهندسی است زیرا با آن می‌توان مجسمه یا کلبه ساخت ولی زمانی که یخ ذوب شود و تبدیل به آب شود دیگر نمی‌توان با آن مصنوعی ساخت، بنابراین آب ماده مهندسی محسوب نمی‌شود.

روش تدریس

برای بیان مفاهیم این جلسه توجه داشته باشید هنرجو شناخت حسی دقیقی از مواد دارد زیرا آنها را لمس کرده است. بنابراین سعی کنید مفهوم ماده مهندسی را با ذکر مثال‌های موجود در زندگی عادی انسان به هنرجو بیاموزید. مثلاً با ذکر مثال از موادی که زمانی زنده بوده‌اند و الان در زندگی بشر به عنوان مصنوع استفاده می‌شوند مفهوم غیرجاندار بودن ماده مهندسی را باز نمایید. لازم به ذکر است که مواد مهندسی لزوماً از بدو آفرینش جاندار نبوده‌اند مانند فلزات و سرامیک‌ها.

از هنرجویان بخواهید مثال‌های گوناگونی از مواد کاربردی در زندگی خودشان نام ببرند. هدف از تمرین صفحه ۱۰۲ آن است تا ذهن هنرآموز با این نکته آشنا شود که در ساخت یک مصنوع مواد مختلف با خواص متفاوتی می‌توانند استفاده شوند که بعضاً به جای هم قابل استفاده نیستند مثلاً تیردروازه باید فلزی و مستحکم باشد. در صورتی که توپ باید چرم یا پلاستیک با قابلیت ارتجاعی مطلوب باشد. اگر توپ فلزی باشد علاوه بر سنگینی در اثر شوت کردن توپ فر می‌شود یا اگر تیر دروازه با چرم ساخته شود استحکام و پایداری خود را نمی‌تواند حفظ کند.

در تمرین صفحه ۱۰۳ کتاب درسی هدف آن است که هنرجو متوجه شود اولاً کلیه مواد مهندسی غیرجاندارند و البته برخی از مواد جاندار ساخته شده‌اند، مثلاً پارچه پشمی از پشم گوسفند و مقوا از درخت که هر دو زمانی موجود زنده بوده‌اند ساخته شده است. در تمرین صفحه ۱۰۴ کتاب درسی هدف آن است تا هنرجو متوجه شود تا ماده‌ای که برای ساخت یک محصول به کار می‌رود باید جامد و غیرجاندار باشد. بنابراین برگ درخت و آب اولی به دلیل جاندار بودن و تغییر خواص و دومی به دلیل مایع بودن قابل استفاده نمی‌باشند.

پس از حل این سه تمرین، تمرین صفحه ۱۰۵ کتاب درسی باید به این نتیجه منجر شود که ماده مهندسی دارای دو ویژگی است:

الف) غیرجاندار

ب) جامد

دانش افزایی

زمانی که صحبت از مواد مهندسی می‌شود، کلمه «مواد» به همه انواع مواد در جهان اشاره نمی‌کند. اگر این چنین بود، تمام علوم فیزیکی و علوم زیستی از نجوم تا جانورشناسی را شامل خواهد شد! با تعریف کلمه بی‌جان^۱، ما می‌توانیم علوم مربوط به موجودات زنده را از حوزه تعریف خود حذف کنیم. علاوه بر این، می‌توان تعریف را تنها به مواد مهم و کاربردی برای بشر محدود نمود. حتی در این حالت هم محدوده مواد برای مهندسان بسیار وسیع خواهد بود. برای مثال، می‌توانیم تعداد زیادی از

۱- Inanimate

چیزهایی را که برای انسان مفید است، مانند غذا، دارو، مواد منفجره، مواد شیمیایی، آب، فولاد، پلاستیک و بتن و... لیست کنیم که فقط چند مورد از آنها به عنوان مواد مهندسی شناخته شده‌اند. پس لازم است که به طور مشخص تر اصطلاح مواد را به عنوان بخشی از مواد غیرزنده تعریف کنیم که برای اهداف مهندسی کاربردی است. نکته دیگری که قابل ذکر است این است که اصطلاح مواد مهندسی، با وجود نمونه‌هایی از مواد مایع و گاز مانند اسید سولفوریک و بخار، که در مهندسی کاربرد دارد، فقط به مواد جامد اشاره می‌کند.

طبقه‌بندی مواد مهندسی

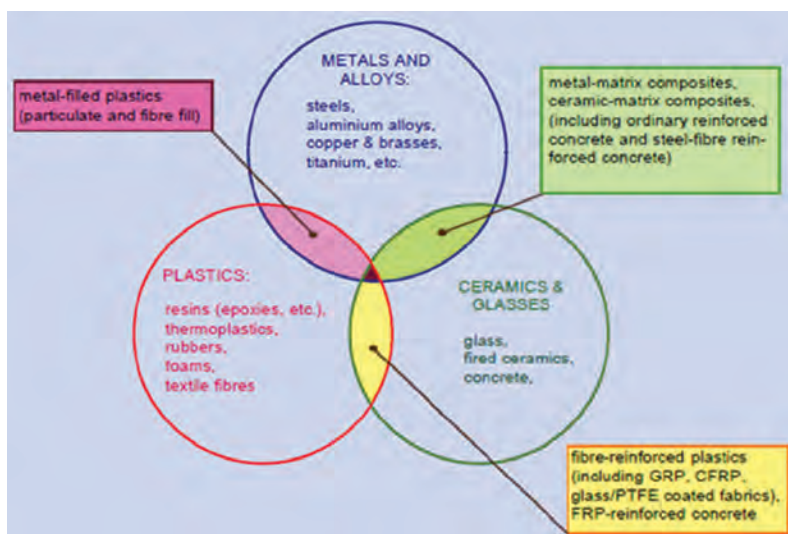
مواد مهندسی را با ویژگی‌هایی که تعریف شد در سه گروه گسترده مطابق زیر طبقه‌بندی می‌کنیم:

(i) فلزات و آلیاژها؛

(ii) سرامیک‌ها و شیشه‌ها؛

(iii) پلیمرهای آلی.

فلزات اشیا آشنا با ظاهر مشخص هستند، توانایی تغییر شکل دائمی و هدایت گرمایی و الکتریکی خوب خواص مشترک آنهاست. آلیاژ ترکیبی از بیش از یک فلز است. سرامیک و شیشه‌ها مواد معدنی غیرفلزی هستند که شکننده هستند و خواص حرارتی و الکتریکی عایق دارند. پلیمرهای آلی نسبتاً بی‌اثر و سبک هستند و به طور کلی دارای درجه بالایی از پلاستیسیته هستند. شکل زیر نمونه‌هایی از هر یک از این سه گروه مواد را نشان می‌دهد. علاوه بر این، تعدادی از مواد که از دو گروه مختلف تشکیل شده‌اند و کامپوزیت نامیده می‌شود، نیز نشان داده شده است.



تقسیم‌بندی مواد مهندسی

مواد را می‌توان به روش دیگری با توجه به زمینه اصلی کاربرد آنها طبقه‌بندی کرد. این زمینه‌ها عبارت‌اند از:

(i) سازه‌ها

(ii) ماشین‌آلات، و...

(iii) دستگاه‌ها

سازه‌ها به اجسامی بدون قطعات متحرک گفته می‌شود، مانند سد بتونی، کوره ذوب فولاد، پل معلق و برج پالایش نفت. ماشین‌آلات شامل تیغه‌ها، توربین بخار و گاز، موتور، موتور الکتریکی و ژنراتور است. دستگاه‌ها اخیراً بر مواد مهندسی افزوده شده‌اند و به نوآوری‌هایی مانند ترانزیستور، سلول‌های فوتوالکتریک، فشارسنج پیزوالکتریک، آهنرباهای سرامیکی و لیزرها اشاره دارد.

برای ساخت یک محصول ممکن است، از هر سه گروه بالا استفاده شود. برای نمونه، سازه هواپیما از آلیاژهای آلومینیم و پلاستیک ساخته شده است؛ یک کوره ذوب فولاد از مواد دیرگداز و فولاد سازه‌ای ساخته شده است. کلاه ایمنی از پلاستیک تقویت شده توسط رشته‌های شیشه‌ای ساخته شده است.

شناسایی و انتخاب مواد

کمیت و گستردگی کیفیت نیازهای بشر به انواع مواد و مصالح صنعتی فلزی و غیرفلزی، بسیار بدیهی و روشن است. با کمی تأمل می‌توانیم مثال‌های زیادی در این زمینه از زندگی روزمره خود بزنیم. بخش بزرگی از این مصالح صنعتی را فلزات و آلیاژ آنها تشکیل می‌دهند که در تمام فعالیت‌های صنعتی نقش کاربردی خود را یافته‌اند؛ به عنوان مثال در ساخت یک اتومبیل انواع مواد فولادی، چدنی، آلیاژهای آلومینیمی، شیشه و مواد سرامیکی لاستیکی، پلاستیکی و... به کار رفته است. با توجه به اینکه برای هر یک از این مواد، می‌توان هزاران نوع محصول در نظر گرفت، همگی بر اهمیت و ضرورت نیازهای بشر به مواد مختلف دلالت می‌کند؛ بنابراین، لزوم شناخت مواد و ویژگی‌های آنها به منظور انتخاب و گزینش صحیح و به کارگیری درست آنها بدیهی و روشن است امروزه مهندسان ما باید وسایل و قطعاتی طراحی کنند که بتوان از آنها در طیف وسیعی از وضعیت‌های محیطی استفاده کرد، به عنوان نمونه، بعضی از قطعاتی که در زیردریایی‌ها به کار می‌روند می‌باید بتوانند، فشار بسیار زیاد اعماق اقیانوس‌ها را تحمل کنند، یا قطعاتی که در سفینه‌های فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در فشار بسیار اندک خارج از جو زمین باید کارایی خود را حفظ نمایند یک مهندس پیش از کاربرد یک ماده لازم است ویژگی‌های آن را از قبیل حرارتی، استحکام، مغناطیسی، ساختاری، مقاوم بودن به خوردگی و همچنین روش‌های حفظ این خصوصیات را بداند.

عوامل مؤثر در انتخاب مواد

در انتخاب مواد، عوامل متعددی می‌تواند نقش داشته باشد که علاوه بر جنبه اقتصادی از دیدگاه‌های فنی، سیاسی، اجتماعی، فرهنگی و... نیز اهمیت دارد. عامل قیمت تمام شده یکی از مؤثرترین عوامل در گزینش ماده است. اصولاً تمامی تلاش‌های علمی و تکنولوژی در جهت کم کردن قیمت اقتصادی مواد به عمل می‌آید. البته عامل اقتصادی را نباید با از بین بردن کیفیت و از دست دادن ویژگی‌های کاربردی مورد انتظار، به حد مطلوب رسانید؛ یعنی ارزانی به تنهایی مطلوب نیست بلکه باید با بهینه کردن فرایندهای ساخت و تولید، مواد جایگزین، و کاهش مراحل تولید در جهت کاهش قیمت آنها تلاش نمود.

معیارهای انتخاب مواد

هنر مهندسان این است که انتخابی صحیح از به کارگیری مواد داشته باشند. اگر طراحان بخواهند با طرح وسایل یا سیستم‌های جدید به حل مسائل کمک کنند و به مواد جدید و راه‌حلی تازه دست یابند، لازم است به دانش مناسبی در زمینه خواص و رفتار مواد مورد استفاده دست یابند این دانش با کمک علمی همچون شیمی، فیزیک، متالورژی، مکانیک، دیگر علوم و دانش تجربی، فن، تکنولوژی و اطلاعات وسیع ثبت شده در زمینه رفتار مواد فراهم می‌شود؛ برای مثال انتخاب مواد برای هواپیما و صنایع فضایی بر اساس ملاحظات وزنی صورت می‌گیرد. البته دسته‌بندی کردن معیارهای انتخاب مواد، کاری دشوار است و باید در هر مورد با توجه به اصل بهینه نمودن به بررسی عوامل مؤثر پرداخت. صرفه‌جویی اقتصادی به دست آوردن خواص مورد نظر، به کارگیری فرایندها و روش‌های مناسب برای تولید در این مقوله اهمیت بسیاری دارد.

جلسه دوم و سوم موضوع: خواص سه گانه مواد مهندسی

هدف: آشنایی با مفهوم و انواع خواص مواد مهندسی

مفاهیم

مواد مهندسی دارای ویژگی‌های گوناگونی می‌باشند و کاربردهایشان به واسطه این ویژگی‌ها تعیین می‌شود.

مثلاً فلز سرب دارای کاربردهای گوناگونی است به عنوان مثال:

- ۱ منگوله‌های سندهای دفترچه‌ای
- ۲ صفحات باتری‌های سرب - اسیدی
- ۳ صفحات ثقل در ماشین‌های مرتفع (اتوبوس دو طبقه) یا ماشین‌های مسابقه
- ۴ دیوارهای محافظ پرتوهای پر انرژی مثل پرتو ایکس و گاما
- ۵ آلیاژ لچیم

در کاربرد اول علت به کارگیری سرب انعطاف‌پذیری و نرمی بسیار زیاد می‌باشد. در کاربرد دوم علت استفاده از سرب مقاومت عالی به خوردگی خصوصاً در برابر اسیدسولفوریک می‌باشد.

در کاربرد سوم علت استفاده از سرب چگالی بالای آن است. در کاربرد چهارم علت استفاده از سرب عدد اتمی بالا که باعث جذب پرتوهای پرنرژی می‌شود.

در کاربرد پنجم علت استفاده از سرب نقطه ذوب پایین آن است. همان‌گونه که ملاحظه شد سرب در ۵ کاربرد مختلف به دلیل ۵ ویژگی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همه مواد داری خواص متنوعی هستند و در نتیجه کاربردهای گوناگون خواهند داشت. از این‌رو شناخت خواص مواد گوناگون در انتخاب و استفاده از یک ماده مهندسی مناسب نقش مهم خواهد داشت عبارت‌اند از:

۱- فیزیکی: خواص ذاتی ماده که تابع ساختار بلوری، الکترونی مواد است مثلاً:

۱-۱- هدایت الکتریکی تابع تعداد الکترون‌های آزاد ماده است.

۱-۲- چگالی تابع عدد اتمی و فشردگی ساختار بلوری است مثلاً اغلب آلیاژها یا ساختار FCC به دلیل فشردگی بالا معمولاً دارای چگالی بیشتری هستند.

۱-۳ نقطه ذوب: تابع پیوند بین اتم‌های ماده است. هر اندازه پیوندهای بین اتم‌ها و مولکول‌ها قوی‌تر باشد برای جدا کردن اتم‌ها نیاز به انرژی حرارتی و پیرو آن دمای بیشتری می‌باشد.

شما می‌توانید با جست‌وجو در مراجع سایر خواص فیزیکی را استخراج نمایید.

۲- مکانیکی: خواصی هستند که حاصل عکس‌العمل ماده تحت اثر بارگذاری معنی پیدا می‌کنند و البته بیشتر تابع ساختار میکروسکوپی و تا حدی ساختار بلوری می‌باشند.

۳- خواص شیمیایی: حاصل عکس‌العمل (رد و بدل الکترونی) ماده با یون‌های موجود در سرویس کاری ماده می‌باشند.

روش تدریس

از هنرجو بخواهید پس از آشنایی با خواص سه گانه مواد انبوهی از مواد مورد استفاده حول و حوش خود را مورد تأمل قرار دهد تا بتواند نسبت به خاصیت کاربردی ماده در هر کاربرد نظر بدهد. در جدول ۱ سعی شده است تا دید نسبتاً جامعی نسبت به کاربرد هر خاصیت به هنرجو منتقل شود.

در جدول ۱ برای هر خاصیت کاربردهای دیگری علاوه بر جدول ۱ صفحه ۱۰۶ بیان شده است.

جدول ۱- مثال‌هایی از کاربرد مواد بر اساس خواص آنها

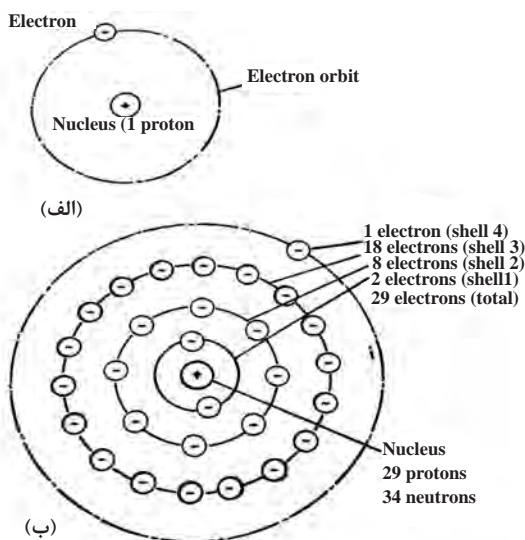
توضیح	سطح کیفیت	مثال	خاصیت
<p>آجر: به دلیل کیفیت ساختاری و وجود خلل و فرج ساختاری نمی‌تواند منعکس‌کننده نور باشد.</p> <p>آلومینیم: به دلیل اکسید تشکیل شده که دارای پستی و بلندی سطحی است. نور را متفرق می‌سازد و بازتابش معمولی دارد.</p> <p>طلا: به دلیل عدم وجود هر گونه لایه اکسیدی پس از پرداخت نور را به دلیل سطح خالص فلزی باز می‌گرداند.</p>	<p>بسیار کم</p> <p>متوسط</p> <p>عالی</p>	<p>آجر</p> <p>آلومینیم</p> <p>طلا</p>	<p>براقیت</p> <p>Brightness</p>
<p>فلزات: به دلیل الکترون‌های آزاد که حامل انرژی و الکتروسیسته می‌باشند به راحتی حرارت و الکتروسیسته را انتقال می‌دهند.</p> <p>حال هر اندازه تعداد این الکترون‌های آزاد بیشتر باشد هدایت مناسب‌تر است از این رو هر اندازه شماره گروه یک فلز در جدول تناوبی بیشتر باشد معمولاً هدایت حرارتی مناسب‌تری دارند.</p> <p>سرامیک‌ها: به دلیل پیوند کووالانسی یا یونی الکترون آزاد ندارند و از انتقال ضعیفی برخوردارند.</p>	<p>عالی</p> <p>خوب</p> <p>متوسط</p> <p>بسیار ضعیف</p>	<p>مس</p> <p>چدن</p> <p>گرافیت</p> <p>سرامیک</p>	<p>هدایت حرارتی</p> <p>Thermal Conductivity</p> <p>هدایت الکتریکی</p> <p>Electrical Conductivity</p>
<p>انبساط حرارتی تابع آزادی حرکت اتم‌ها و البته فشردگی آنها می‌باشد. فلزات به دلیل ساختار پیوند فلزی از آزادی حرکت الکترون‌ها و اتم‌ها برخوردارند به این دلیل در اثر افزایش یا کاهش دما، حرکت آزادانه اتم‌ها سبب انبساط یا انقباض شدید در ماده می‌شود. در میان فلزات، ساختارهای FCC به دلیل فشردگی بالاتر ضریب انبساط بیشتری دارند. در میان BCCها چدن از همه کمتر است علت آن نیز به دلیل وجود گرافیت در ساختار است که مانند آخال عمل می‌کند. در اثر انبساط فضای خالی بین گرافیت و زمینه پر شده و در نتیجه باعث کنترل انبساط طولی چدن می‌شود.</p> <p>سرامیک‌ها و پلیمرها: به دلیل پیوند کووالانسی و یونی مستحکم که در ساختار آنها حاکم است جلوی حرکت آزادانه اتم‌ها را در اثر افزایش یا کاهش دما می‌گیرند و نتیجه آن ضریب انبساط حرارتی اندک سرامیک‌ها می‌باشد. در این بین چون شیشه ساختار آمورف دارد نسبت به آجر یا آجر نسوز که دارای ساختار کووالانسی است دارای ضریب انبساط بیشتری است.</p>	<p>عالی</p> <p>عالی</p> <p>خوب</p> <p>متوسط</p> <p>کم</p> <p>خیلی کم</p> <p>ناچیز</p>	<p>آلومینیم</p> <p>مس</p> <p>فولاد</p> <p>چدن</p> <p>شیشه</p> <p>آجر معمولی</p> <p>آجر نسوز</p>	<p>انبساط حرارتی</p> <p>Thermal Expansion</p>
<p>هر اندازه پیوند اتمی بین اتم‌های ماده مستحکم‌تر باشد انرژی لازم برای افزایش نوسان حرارتی اتم‌ها افزایش می‌یابد. از این رو انرژی لازم برای افزایش دمای ماده بیشتر خواهد شد.</p>	<p>عالی</p> <p>عالی</p> <p>خوب</p> <p>متوسط</p>	<p>آجر نسوز</p> <p>شیشه</p> <p>آلومینیم</p> <p>فولاد</p>	<p>ظرفیت گرمایی ویژه</p>

استحکام	فولاد آلومینیم سرب	بالا کم کم	تابع ساختار میکروسکوپی و پیوند اتمی است.
سختی	سرامیک فلزات پلیمر	زیاد کم تا زیاد کم	مشابه استحکام
چقرمگی	فلزات سرامیک	بالا - متوسط ناچیز	هر اندازه ساختار منعطف تر باشد انرژی اعمال شده به ماده بیشتر صرف تغییر شکل شده و بنابراین مقدار انرژی کمتری برای گسست مواد باقی می ماند. البته عوامل ممانعت کننده رشد ترک مانند اندازه دانه نیز بر این مسئله مؤثرند.

دانش افزایی

علم پایه مواد

اتم‌ها را می‌توان به عنوان کوچک‌ترین ذرات سازنده ماده در نظر گرفت که دربرگیرنده همه خواص شیمیایی آن ماده است. یک اتم از نظر الکتریکی خنثی است چون در اتم تعداد الکترون‌های با بار منفی با پروتون‌های دارای بار مثبت برابر است. شکل (الف) یک اتم گاز هیدروژن (ساده‌ترین اتم) و شکل (ب) یک اتم از فلز مس را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شماتیک آرایش الکترونی اتم‌های الف) گاز هیدروژن ب) فلز مس

همان‌طور که مشاهده می‌کنید هر دو اتم در شکل ۲ از یک هسته تشکیل شده‌اند که یک یا چند الکترون در اطراف آن در حال چرخش هستند. اگر چه الکترون‌ها غالباً در مدار خود در حال گردش‌اند، اما الکترون‌ها آن‌گونه که در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است در مدار خود به صورت صلب حرکت نمی‌کنند و به این اندازه ثابت نیستند اکنون فرض می‌شود که الکترون‌های اطراف هسته اتم آزادانه به شکل «ابر الکترونی» حرکت می‌کنند. ساختار اصلی اتم به شرح زیر است:

■ **هسته:** این هسته مرکز اصلی اتم است که شامل پروتون‌ها و نوترون‌ها است.
■ **پروتون‌ها:** این ذرات دارای بار مثبت و جرمی بسیار بزرگ‌تر از الکترون‌ها دارند.
■ **نوترون‌ها:** این ذرات جرمی مشابه پروتون دارند اما هیچ بار الکتریکی ندارند. جرم اتم به طور کلی مجموع جرم پروتون‌ها و نوترون‌های موجود در هسته است زیرا جرم الکترون‌ها در مقایسه با آنها ناچیز است.

■ **الکترون‌ها:** این ذرات دارای بار منفی هستند و مانند سیاره‌های اطراف خورشید به دور هسته اتم می‌گردند. اگرچه الکترون‌ها بسیار کوچک هستند و فقط $1/1836$ جرم یک پروتون یا یک نوترون دارند، آنها بسیار مهم هستند زیرا با توجه به آنها چگونگی اتصال اتم‌ها به یکدیگر جهت تشکیل مولکول‌ها تعیین می‌شود. خواص شیمیایی یک اتم، این است که چگونه آن اتم‌ها با اتم‌های دیگر ترکیب می‌شوند و این خواص به وسیله تعداد الکترون‌های آن تعیین می‌شود. الکترون‌ها همچنین خواص الکتریکی و مغناطیسی یک ماده را تعیین می‌کنند.

■ **یون‌ها:** یون‌ها اتم‌هایی هستند که یک یا چند الکترون را از دست داده‌اند یا گرفته‌اند. با از دست دادن الکترون، اتم دارای بار الکتریکی مثبت می‌شود، زیرا در هسته اتم پروتون بدون بار منفی خنثی‌کننده باقی می‌ماند. چنین یونی یون مثبت نامیده می‌شود، به دست آوردن الکترون باعث می‌شود که اتم دارای بار الکتریکی منفی شود زیرا در هسته اتم پروتون اضافی خنثی‌کننده بار منفی الکترون وجود ندارد. چنین یونی یون منفی نامیده می‌شود.

■ **ایزوتوپ‌ها:** از آنجایی که الکترون در مقایسه با پروتون خیلی کوچک است، می‌توان گفت جرم اتم در هسته آن متمرکز شده است. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، نوترون ذره‌ای است که جرمی برابر پروتون دارد اما بار الکتریکی ندارد. بنابراین، اگر تعداد نوترون‌ها در هسته اتم تغییر کند، جرم آن تغییر خواهد کرد اما خواص شیمیایی آن تغییر نمی‌کند، زیرا هیچ تغییری در تعداد الکترون‌های آن رخ نداده است. اتم‌هایی که دارای خواص شیمیایی مشابهی هستند اما جرم آنها با هم متفاوت است، به عنوان ایزوتوپ‌های یک ماده در نظر گرفته می‌شوند.

■ **مولکول‌ها و شبکه‌های کریستالی:** تاکنون، اتم به عنوان یک ذره آزاد در نظر گرفته شده است. با این حال، جدا از گازهای نجیب مانند نئون (که در لوله‌های تخلیه الکتریکی استفاده می‌شود) و آرگون (که به عنوان یک گاز محافظ برای بعضی

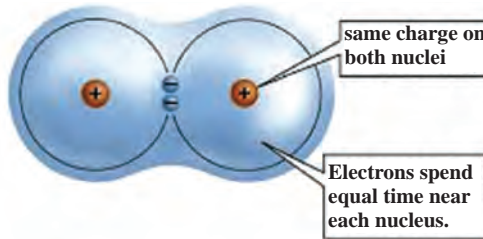
از فرایندهای جوشکاری استفاده می‌شود)، اتم‌ها به ندرت به صورت ذرات مجزا آرایش پیدا می‌کنند. معمولاً به شکل گروه‌های کوچک یا بزرگ همراه با دیگر اتم‌ها هستند و بسته به اینکه چگونه این اتم‌ها در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، مولکول‌ها یا شبکه‌های کریستالی را می‌سازند. معمولاً دو راه برای اتصال اتم‌ها به یکدیگر وجود دارد:

پیوند کووالانسی

شکل ۳ مولکول بسیار ساده‌ای که متشکل از دو اتم هیدروژن است را نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنید که اتم‌ها با به اشتراک گذاشتن الکترون‌هایشان پیوند ایجاد می‌کنند. الکترون‌هایی که توسط اتم‌ها به اشتراک گذاشته می‌شوند الکترون‌های لایه بیرونی هستند که به آنها الکترون لایه ظرفیت گفته می‌شود. از آنجا که پیوند با به اشتراک گذاشتن الکترون‌ها ایجاد شده است، به عنوان یک پیوند کووالانسی نامیده می‌شود.

Nonpolar covalent bonding

Hydrogen (H_2 or H-H)



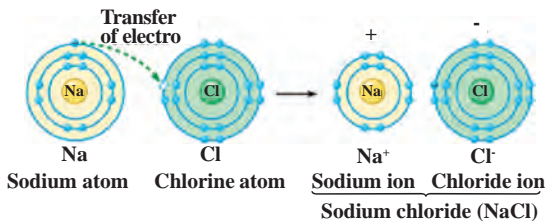
شما تیک پیوند کووالانسی

پیوند یونی (پیوند فلزی)

این پیوند توسط انتقال کامل یک الکترون از یک اتم به اتم دیگر تشکیل شده است. ترکیبات تولید شده توسط پیوند یونی مولکول‌ها را تشکیل نمی‌دهند، بلکه شبکه‌های کریستالی هستند، مانند جامدات بلورین، از جمله فلزات. به عنوان مثال، در نمک خوراکی (سدیم کلرید)، یک اتم سدیم تنها یک الکترون در لایه بیرونی (valency) دارد، اما در لایه قبلی خود هشت الکترون دارد. یک اتم کلر دارای ۷ الکترون در لایه بیرونی (valency) است.

برای تبدیل شدن به یک ترکیب پایدار هر دو اتم باید در لایه بیرونی خود هشت الکترون (لایه الکترونی کامل) داشته باشند. برای رسیدن به این هدف، اتم سدیم تنها یک الکترون لایه بیرونی خود را از دست می‌دهد و به یون مثبت (کاتیون) تبدیل می‌شود. اتم کلر این الکترون را می‌گیرد و لایه بیرونی آن تکمیل می‌شود و به یون منفی (آنیون) تبدیل می‌شود.

از آنجا که ذرات با بار الکتریکی متفاوت یکدیگر را جذب می‌کنند، یون سدیم به اتم کلر جذب می‌شود و پیوند یونی تشکیل می‌شود. در عین حال، هر دو اتم به لایه بیرونی کامل (هشت الکترون) می‌رسند. این پیوند در شکل زیر نشان داده شده است. همان‌طور که اتم‌ها توسط پیوندهای اولیه قدرتمند برای تشکیل مولکول‌ها به هم متصل می‌شوند، بنابراین مولکول‌ها نیز می‌توانند توسط نیروهای ضعیف‌تر الکترواستاتیک به هم متصل شوند. این نیروها پس از فیزیکدان هلندی، یوهانس دیبریک و ن وال، نیروهای وندروالس نامیده می‌شوند. این نیروهای الکترواستاتیک ثانویه با اتصال مولکول‌ها به یکدیگر بر خواصی مانند نقطه ذوب، حلالیت و استحکام کششی مواد (به ویژه پلیمرها) تأثیر می‌گذارد. گرچه نیروی جاذبه بین هر جفت مولکول نسبتاً ضعیف است، اما برآیند آنها قدرت زیادی را نشان می‌دهند.



شما تیک پیوند فلزی

■ **عناصر:** عنصر ماده‌ای است متشکل از یک نوع اتم (همه با همان تعداد الکترون‌ها). عناصر مواد خالصی هستند که امکان تجزیه به جز کوچک‌تری ندارند و می‌توانند متشکل از مولکول‌هایی باشند که به طور کامل از یک نوع اتم تشکیل شده است، به عنوان مثال، آهن، کربن، سدیم، کلر و مس. فولاد عنصر نیست، زیرا شامل اتم‌های آهن و کربن است. نمک خوراکی عنصر نیست، زیرا حاوی اتم‌های سدیم و کلر است. ۱۰۳ عنصر شناخته شده در حال حاضر وجود دارد.

دانش افزایی

انتخاب مواد مهندسی

با توجه به اینکه قطعات به کار گرفته شده در صنایع باید در وضعیت‌های متفاوتی مورد استفاده قرار گیرند لذا انتخاب جنس قطعه نقش عمده‌ای دارد که در ذیل، مواد مناسب برای کارهای مختلف ذکر شده است:

معیار استحکام

استحکام اولین خاصیت هر ماده مهندسی است که برای کاربردهای ساختمانی در نظر گرفته می‌شود.

الف) فلزات

خاصیت‌هایی از قبیل استحکام، هنگامی برای فلزات در نظر گرفته می‌شود که استحکام کششی و استحکام تسلیم آنها به هنگام کار بردشان مد نظر باشد، به این دلیل که نسبت میان این دو نوع استحکام به‌طور متوسط، برای هر گروه از فلزات ثابت است. گاهی فقط یک و یا دیگر مشخصات این دو نوع استحکام ذکر می‌شود. استحکام در فلزات معمولاً به جهت اندازه‌گیری تنش و درجه ناهمگونی مورد استفاده قرار می‌گیرد، و به‌طور بسیار زیادی به تاریخچه تولید قطعه بستگی دارد. فلزات از نظر استحکام به ۴ گروه تقسیم می‌شوند. (جدول ۲)

جدول ۲- استحکام تسلیم برخی مواد

فلز یا آلیاژ	استحکام تسلیم	M Pa ($\times 10^3$ Psi)
* استحکام بسیار زیاد		
کبالت و آلیاژهای آن		۱۸۰-۲۰۰۰ (۲۶-۲۹۰)
فولادهای کم آلیاژ سخت شده		۵۲۵-۱۹۸۵ (۷۶-۲۸۸)
فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیت		۴۱۵-۱۸۹۵ (۶۰-۲۷۵)
فولادهای با استحکام زیاد		۱۱۷۰-۱۸۶۰ (۱۷۰-۲۷۰)
نیکل و آلیاژهایش		۷۰-۱۵۸۵ (۱۰-۲۳۰)
* با استحکام زیاد		
تنگستن		۱۵۱۵ (۲۲۰)
مولیبدن و آلیاژهای آن		۵۶۵-۱۴۵۰ (۸۲-۲۱۰)
تیتانیوم و آلیاژهای آن		۱۸۵-۱۳۱۵ (۲۷-۱۹۱)
فولاد کربنی		۴۰۰-۱۲۹۵ (۵۸-۱۸۸)
سوپر آلیاژهای پایه نیکلی		۲۷۵-۱۱۸۵ (۴۰-۱۷۲)
فولادهای آلیاژی ریختگی		۷۷۰-۱۱۷۰ (۱۱۲-۱۷۰)
(Ta) تانتالم و آلیاژهای آن		۲۳۰-۱۰۹۰ (۴۸-۱۶۸)
فولادهای زنگ‌نزن ریختگی		۲۱۵-۰۱۱۴۰ (۳۱-۱۶۵)

۶۰-۹۶۵ (۹-۱۴۰)
۲۴۰-۹۲۵ (۴۰-۱۲۵)
۲۷۵-۹۲۵ (۴۰-۱۳۴)
۲۴۰-۸۰۰ (۳۵-۱۱۶)
۹۵-۷۸۵ (۱۴-۱۱۴)
۶۲۰-۷۶۰ (۹۰-۱۱۰)
۶۰-۷۶۰ (۹-۱۱۰)
۵۲۰-۱۲۴۰ (۷۵-۱۸۰)

۵۱۵-۶۹۰ (۷۵-۱۰۰)
۲۲۰-۶۶۰ (۳۲-۹۶)
۲۰۷-۶۵۵ (۳۰-۹۵)
۷۰-۶۴۰۰ (۱۰-۹۲/۵)
۹۵-۶۲۵ (۱۴-۹۱)
۱۲۵-۶۲۰ (۱۸-۹۰)
۹۰-۵۸۵ (۱۳-۸۵)
۳۱۰-۵۵۰ (۴۵-۸۰)
۲۹۰-۵۵۰ (۴۲-۸۰)
۳۱۵-۵۳۰ (۴۶-۷۷)
۷۰-۴۹۵ (۱۰-۷۲)
۷۰-۴۵۵ (۱۰-۶۶)
۱۹۵-۴۵۰ (۲۸-۶۵)
۱۷۰-۴۵۰ (۲۵-۶۵)
۴۰-۴۰۵ (۶-۵۹)
۳۳۰-۳۸۰ (۴۸-۵۵)
۵۰-۳۸۰ (۷-۵۵)
۲۷۵-۱۰۳۵ (۴۰-۱۵۰)
۱۰۵-۳۶۵ (۱۵-۵۳)

آلیاژهای ریختگی مس
نیوبیم و آلیاژهای آن
سوپر آلیاژهای پایه آهن، ریختگی
سوپر آلیاژهای پایه کبالت
برنزها
فولادهای ساختمانی کم آلیاژ
آلیاژهای فنی از مس
بریلیم برنزها (نوردی و پیرشده)
* استحکام متوسط
سوپر آلیاژهای ریختگی پایه کبالت
هافتیم
فولادهای زنگ‌زن آستینیتی
برنج‌ها
آلیاژهای آلومینیم سری ۷ xxx
آلیاژ (مس - نیکل - روی)
آلیاژهای مس - نیکل
فولادهای زنگ‌زن فریتی
فولادهای HSLA
فولادهای کربنی، کربونیترووره شده
مس‌های نوردی
آلیاژهای آلومینیم، سری ۲ xxx
چدن‌های داکتیل آستینیتی ریختگی
آلیاژهای غنی از بریلیم
آلیاژهای آلومینیم سری ۵ xxx
فولادهای کربنی ریختگی
آلیاژهای آلومینیم سری ۶ xxx
چدن داکتیل ریختگی
(Zr) زیرکنیم و آلیاژهای آن

۳۶۰ (۵۲)	آلیاژهای روی دایکاست شده
۲۴۰-۳۴۵ (۳۵-۵۰)	اورانیوم استخراج شده
۳۱۵ (۴۶)	آلیاژهای آلومینیم سری ۴xxx
۹۰-۳۰۵ (۱۲-۴۴)	آلیاژهای منیزیم
۵۵-۳۰۳ (۸-۴۴)	نقره
۲۶۰-۲۹۰ (۳۸-۴۲)	فولادهای کربنی ریختگی
۴۰-۲۵۰ (۶-۳۶)	آلیاژهای آلومینیم سری ۳xxx * استحکام کم
۲۰۵ (۳۰)	طلا
۸۵-۲۰۵ (۱۲-۳۰)	آلیاژهای منیزیم ریختگی
۱۵-۱۸۵ (۲-۲۷)	پلاتین
۳۰-۱۶۵ (۴-۲۴)	آلیاژهای آلومینیم سری ۱xxx
۱۰-۵۵ (۱/۶-۸)	سرب و آلیاژهای آن
۵-۴۵ (۱/۳-۶/۶)	قلع و آلیاژهای آن

۱- فلزات با استحکام کم ($\sigma_y < 250 \text{ Mpa}$): استحکام بیشتر فلزات خالص کم است و کاملاً به خلوص آنها بستگی دارد؛ برای مثال آلومینیم خالص ۹۹/۹۹٪ دارای استحکام کشش تسلیمی تنها برابر ۱۲ Mpa (1700 Psi) است اما آلومینیم خالص ۹۹٪ دارای استحکام کشش تسلیمی برابر با ۳۹ Mpa (5700 Psi) است.

۲- فلزات با استحکام متوسط ($250 < \sigma_y < 750 \text{ MPa}$): بیشتر فلزات برای رسیدن به محدوده استحکام متوسط باید به صورت آلیاژ درآیند. مس کار سخت شده و تیتانیوم تجاری آنیل شده جزء استثنائات است. آلومینیم خالص کار سخت شده و آلیاژهای محلول جامد آلومینیم در محدوده فلزات با استحکام متوسط قرار نمی‌گیرند. اما آلیاژهای آلومینیم سری ۲xxx و ۷xxx که قابلیت عملیات حرارتی شدن دارند در میانه محدوده آلیاژهای با استحکام متوسط قرار می‌گیرند. آلیاژهای سری ۷xxx (AL - Mg - Cu - Zn) بیشترین استحکام را در میان آلیاژهای آلومینیم دارا هستند.

۳- فلزات با استحکام زیاد ($750 < \sigma_y < 1500 \text{ MPa}$): از آلیاژهای غیر آهنی، فقط آلیاژهای مس با سختی رسوبی شونده و حاوی ۲٪ بریلیم و بیشتر آلیاژهای تیتانیوم در زمره آلیاژهای استحکام زیاد قرار می‌گیرند. بیشتر آلیاژهای تیتانیوم می‌توانند استحکامی بیش از ۷۹۵ MPa ($115 \times 10^3 \text{ Psi}$) به دست آورند. اساساً آلیاژهای

تیتانیوم مزیتی بر فولادهای با استحکام زیاد دارند؛ بدین علت که نسبت به فولاد دارای دانسیته پایین‌تری هستند (حدود ۶۰٪ دانسیته فولاد). در محدوده پایینی فلزات با استحکام زیاد، بسیاری از فولادهای کربن متوسط کم آلیاژ که «کوینچ» و «تمپر» شده‌اند وجود دارد.

۴- استحکام بسیار زیاد ($\sigma_y > 1500 \text{ MPa}$): شاید گسترده‌ترین استفاده فلزات با استحکام بسیار زیاد، استفاده از فولاد ASTM ۵۷۹ با شماره ۳۲ (UNS ۴۴۲۲۰) که حاوی Ni - Cr - Mo - V و شامل ۱/۶٪ سیلیسیم است. لازم است این نوع فولاد دوبار ذوب و دو بار «تمپر» شود تا استحکام تسلیمی برابر با ۱۵۵۰ MPa یا $(110 \times 10^3 \text{ Psi})$ به دست آورد.

محدودیت اصلی این نوع فولادها قابلیت ماشین‌کاری ضعیف بعد از عملیات حرارتی است. اگر چه فولادهای «ماربجینگ» می‌توانند بعد از ماشین‌کاری نهایی مورد عملیات حرارتی واقع شوند. در عین حال می‌توانند استحکامی بیشتر از فولادهای دیگر که در بالا ذکر شد، به دست آورند (تا 3500 MPa یا $500 \times 10^3 \text{ Psi}$)

ب) مواد مرکب با زمینه فلزی

فلزات ریختگی تقویت شده با الیاف از نظر استحکام بهبود می‌یابند، اما از نظر داکتیلیتی مقداری کاهش می‌یابند؛ برای مثال اضافه نمودن ۱۰٪ حجمی کاربید سیلیسیم به آلیاژ $AL - 4/5 \text{ Cu}$ استحکام تسلیم را به میزان ۷۲٪ یعنی تا 184 MPa ($26/4 \times 10^3 \text{ Psi}$) بالا می‌برد ضمن این که افزایش طول را از ۱۷٪ به ۵/۳٪ کاهش می‌دهد.

مواد مرکب با زمینه فلزی (MMC) از ترکیب‌های بسیار مختلفی در زمینه‌های فلزی و الیاف تقویت‌کننده ساخته می‌شوند که هر دسته از آنها برای به دست آوردن خواص مورد نظر و برای کاربردی معین ساخته می‌شوند. (جدول ۳)

جدول ۳- مواد مرکب با زمینه‌های متفاوت

کاربرد	الیاف	زمینه
ساختمان هلیکوپتر، موشک، شاتل‌های فضایی، صفحات باتری‌های انباره‌ای، اتصالات الکتریکی و یا یاتاقان‌ها	گرافیت	آلومینیم، مس، منیزیم، سرب
پرده‌های کمپرسورها، نگهدارنده‌های ساختمانی، ساختمان آنتن‌ها و پره‌های موتور جت	بور	آلومینیم، منیزیم، تیتانیوم
پره‌های موتور جت، پره‌های ملخ، دستگاه‌های با دمای زیاد	بور، کاربیدسیلیسیم	آلومینیم، تیتانیوم

فصل ۳: انتخاب مواد مهندسی

آلومینیم، سرب، منیزیم	آلومینا	فوق نارساها در کوره راکتورها، صفحات باتری‌های انبارهای
آلومینیم، تیتانیوم سوپر آلیاژ (پایه کبالت)	کاربید سیلیسیم	ساختارهای درجه حرارت زیاد، اجزای موتورهای در دمای زیاد
سوپر آلیاژ	مولیبدن	اجزای موتورهای در شرایط دمای زیاد
سوپر آلیاژ	تنگستن	اجزای موتورهای در شرایط دمای زیاد

ج) پلیمرها

رزین‌های پلیمری به منظور کاربردهای ساختمانی به کار برده می‌شوند، در ابتدا با مواد مرکب دیگری نظیر نرم‌کننده‌های پلاستیک، پرکننده‌ها، کلرانت‌ها و دیگر پلیمرها برای به وجود آوردن پلاستیک‌های مهندسی ترکیب می‌شوند. به دلیل ویژگی ویسکوالاستیک پلاستیک‌ها رفتار آنها تحت تنش، مشخصاً متفاوت و پیچیده‌تر از فلزات است؛ به عنوان مثال دما و زمان به‌طور قابل توجهی بر خواص پلیمرها تأثیر می‌گذارند.

■ **مقاومت پلاستیک‌ها:** عموماً ترموپلاستیک‌های مهندسی تقویت نشده استحکام کششی در محدوده ۵۵ تا ۱۰۳ مگاپاسکال ($8 \times 10^8 \text{ Psi}$) تا ($15 \times 10^8 \text{ Psi}$) دارا هستند. پلاستیک‌های مهندسی مقاوم و نایلون تقویت نشده دارای استحکام کششی در حدود 83 Mpa ($10^8 \times 12 \text{ Psi}$) و مدول کششی آنها در حدود 34 Gpa ($10^6 \times 55 \text{ Psi}$) است. جدول ۴ خواص مکانیکی برخی از رزین‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴- خواص مکانیکی برخی از رزین‌های پلیمری

ماده	استحکام کششی MPa	استحکام کششی $\times 10^8 \text{ Psi}$	مدول کششی GPa	مدول کششی $\times 10^6 \text{ Psi}$	استحکام خمشی MPa	استحکام خمشی $\times 10^8 \text{ Psi}$
اکریلونیتریل، بوتادی‌ان، استیرن (ABS)	۴۱	۶	۲/۳	۰/۳۳	۷۲/۴	۱۰/۵
پلی کریبات ABS	۵۹	۸/۵	۲/۶	۰/۳۸	۸۹/۶	۱۳
دی‌الیل فتالات (DAP)	۴۸	۷	۱۰/۳	۱/۵	۱۱۷	۱۷
پلیمر کریستال، مایع (LCP)	۱۱۰	۱۶	۱۱	۱/۶	۱۲۴	۱۸
ملامین فرم‌آلدئید (MF)	۵۲	۷/۵	۹/۶۵	۱/۴	۹۳/۱	۱۳/۵

۱۶/۴	۱۱۳	۰/۴	۲/۷۶	۱۱/۸	۸۱/۴	نایلون ۶ (پلی آمید)
۱۶	۱۱۰	۰/۴۱	۲/۸۳	۱۲	۸۲/۷	نایلون ۶/۶ (پلی آمید)
۱۶/۴	۱۱۳	۰/۳۴	۲/۳	۱۱/۸	۸۱/۴	نایلون ۱۲ (پلی آمید)
۱۴/۳	۹۸/۶	۰/۴۷	۳/۲	۱۰	۶۹	پلی استابال (POM)
۲۰	۱۳۸	۱/۳	۸/۹۶	۱۷/۶	۱۲۱	پلی آری لترکتون (PAEK)
۱۲	۸۲/۷	۰/۳	۲/۱	۹/۹	۶۸	پلی آریلات (PAR)
۱۲	۸۲/۷	۰/۳۴	۲/۳	۷/۵	۵۲	پلی بوتیلن تری فتالات (PBT)
۱۲/۵	۸۶/۲	۰/۳۲	۲/۲	۸	۵۵	PBT پلی کربنات، (PBT-PC)
۱۴	۹۶/۵	۰/۳۴	۲/۳	۱۰	۶۹	پلی کربنات (PC)
۱۶	۱۱۰	۰/۵۱	۳/۵	۱۳/۶	۹۳/۸	پلی اتاراتستون (PEEK)
۲۲	۱۵۲	۰/۴۳	۳	۱۵/۲	۱۰۵	پلی اتری ماید (PEI)
۱۸/۷	۱۲۹	۰/۳۸	۲/۶	۱۲/۲	۸۴/۱	پلی اتر سولفون (PESV)
۳۵/۵	۲۴۵	۱/۳	۸/۹۶	۲۳	۵۹	پلی اتیلن ترفتالات (PET)
۹	۶۲	۰/۸۵	۵/۹	۶	۴۱	فنل فرم آلدئید (PF)
۱۶	۱۱۰	۰/۴۳	۳	۱۰/۵	۷۲/۴	پلی متیل متاکریلات (PMMA)
۱۲/۸	۸۸/۳	۰/۳۶	۲/۵	۷/۸	۵۴	پلی فنیلین اصلاح شده (PPO'Mod)
۲۶	۱۷۹	۱/۷	۱۱/۷	۲۰	۱۳۸	پلی فنیلین سولفاید (PPS)
۱۰/۴	۱۰۶	۰/۳۶	۲/۵	۱۰/۷	۷۳/۸	پلی سولفون (PSO)
۸	۵۵	۰/۲۷	۱/۹	۴/۵	۳۱	استیرن مالنیک ان هیدرید (SMA)
۱۲	۸۲/۷	۰/۸	۵/۵	۶	۴۱	پلی استرهای اشباع نشده

د) سرامیک‌ها

استحکام سرامیک‌ها به روش آماده‌سازی نمونه عملیات سطحی و ماشینی و شرایط آزمایش آنها بستگی دارد. سرامیک‌ها در تنش‌های کششی ضعیف، اما در تنش‌های فشاری مقاوم هستند؛ در صورتی که در فلزات، استحکام فشاری در حدود استحکام کششی است. استحکام فشاری سرامیک‌ها ممکن است در حدود ۱۰ برابر بیشتر از استحکام کششی باشد. مثلاً آلومینا استحکام کششی در حدود ۱۳۸ Mpa (10^3Psi) دارد و استحکام فشاری آن در حدود ۲۴۰۰ Mpa (10^3Psi) است. این اختلاف میان استحکام‌های کششی و فشاری در سرامیک‌ها به دلیل شکننده بودن سرامیک‌ها است. همچنین اندازه دانه‌ها بر استحکام سرامیک‌ها مؤثر است. افزایش اندازه متوسط دانه‌ها سرامیک را ضعیف می‌نماید. این ضعیف شدن ممکن است بدان علت باشد که ترک‌های مویی بزرگ‌تری به وجود می‌آید. (جدول ۵).

جدول ۵- استحکام میانگین برخی از سرامیک‌های مهندسی

ماده	استحکام فشاری $\times 10^3 \text{Psi}$	استحکام کششی $\times 10^3 \text{Psi}$	استحکام خمشی $\times 10^3 \text{Psi}$
آلومینا ۸۵٪	۲۳۵	۱۸	۴۲/۵
” ۹۰٪	۳۵	۲۰	۴۶
” ۹۵٪	۳۵۰	۲۸	۴۹
” ۹۹٪	۳۷۵	۳۰	۵۰
سیلیکات آلومینیم	۴۰	۲/۵	۹
ZrO ₂ - Al ₂ O ₃	۳۵۰	-	-
۳٪ Y ₂ O ₃ PSZ *	۴۳۰	-	۱۷۰
زیرکونیم استحاله یافته، چقرمه شده	۲۵۵	۵۱	۹۲
۹٪ MgO PSZ	۲۷۰	-	۱۰۰
Si ₃ N ₄ ریخته‌گری لغزشی شده	۲۰	۳/۵	۱۰
Bonded - Reaction Sic	۱۰۰	۲۰	۳۷

۸۰	۲۵	۵۶۰	SiC زینتر شده پرس نشده
۴۷	۲۴	۱۵۰	SiC زینتر شده + سیلیسیم آزاد
۸	۵	۶۰	SiC زینتر شده + گرافیت
۳۰	-	۱۱۲	Bonded - Reaction Si ₃ N ₄
۱۲۵	-	۵۰۰	Si ₃ N ₄ پرس گرم شده

※ PSZ: زکونیم که به طور جزئی تثبیت شده است.

چنانچه مواد از قبل مورد تنش قرار بگیرند، می توانند خواص انعطاف پذیری و کششی بعدی سرامیک ها را بهبود بخشند. سریع سرد کردن آلومینا در روغن سیلیکون برای به دست آوردن تنش های فشاری سطحی، استحکام خمشی را افزایش می دهد. استحکام متوسط بعد از «کوینچ» کردن ۸۸۰ Mpa (۱۲۸×۱۰^۳ Psi) است که برای مقایسه در ماده «کوینچ» نشده این خاصیت ۵۹۰ Mpa (۸۵×۱۰^۳ Psi) است.

معیار حرارت

فلزات و آلیاژها می توانند در شرایط دمایی از دماهای بسیار کم تا بالای ۱۰۰۰°C به کار برده شوند. برخی از سرامیک های مهندسی می توانند تا دمای ۱۶۵۰°C استفاده شوند پلاستیک ها بیشترین دمایی که عموماً می توانند در آن عمل نمایند، ۲۹۰°C است.

الف) فلزات

ساختمان یاتاقان های بارگذاری شده برای ارائه سرویس در دمای محیط بر اساس خواص استحکام یا تسلیم ماده طراحی می شود که این خواص در دمای اتاق آزمایش استحکام، اندازه گیری شده اند. خواص کششی بیشتر فلزات مهندسی در دمای اتاق به زمان بستگی دارد؛ استحکام در درجه حرارت های زیاد به دو عامل آهنگ کرنش و زمان بستگی دارد.

فلزی که زیر بار ثابت زیاد قرار می گیرد موضوع بحث خزش مطرح است. خزش به دو عامل زمان و افزایش طول در شرایط معین بستگی دارد تا اینکه در قطعه گسیختگی ایجاد شود. موضوعاتی که در بحث خزش اهمیت دارند عبارتند از: تنش، درجه حرارت و زمان. عموماً هنگامی که درجه حرارت و میزان بارگذاری افزایش می یابد، زمان گسیختگی کوتاه تر و آهنگ خزش افزایش می یابد. منحنی مهندسی خزش

فلزات برای یک بار ثابت و درجه حرارت ثابت، که نمونه تحت کشش در این شرایط قرار می‌گیرد، رسم می‌شود و کرنش نمونه به صورت تابعی از زمان اندازه‌گیری می‌گردد. مدت زمان این آزمایش می‌تواند از چند ماه تا ده سال متغیر باشد.

■ **آلیاژهای مقاوم در برابر خزش:** روش‌های به کار رفته برای افزایش مقاومت در برابر خزش، مشابه همان‌هایی است که برای بهبود استحکام در دمای اتاق مورد استفاده قرار می‌گیرد. سخت شدن در اثر ایجاد محلول و استخدام‌دهی رسوبی از روش‌های ذکر شده است.

۱- فلزاتی که تا دمای زیر 150°C به کار برده می‌شوند: سرب تنها فلز صنعتی است که نمی‌تواند در دمایی بیش از دمای اتاق مورد استفاده قرار گیرد؛ حتی در دمای اتاق نیز می‌تواند مورد خزش قرار گیرد.

اگر مقاومت در برابر نرم شدن مورد نظر باشد، مس الکترولیتی آنیل شده با مقادیر کمی از کادمیم می‌تواند تا دمایی برابر 200°C مورد استفاده قرار گیرد.

۲- فلزاتی که از 150°C تا 400°C به کار برده می‌شوند: آلیاژهای منیزیم شامل (منیزیم - عناصر نادر خاکی - زیرکونیم)، (منیزیم - عناصر نادر خاکی، روی و زیرکونیم)، (منیزیم - تانتالیم - زیرکونیم)، (منیزیم - آلومینیم - روی) می‌توانند تا دمای 315°C مورد استفاده قرار گیرند. آلیاژهای شامل توریم بیشترین مقاومت را به خزش دارند در صورتی که آلیاژهای منیزیم - روی کمترین مقاومت را به خزش دارند. آلومینیم برنزه می‌تواند تا دمای 400°C برای مدت زمان کوتاهی بدون کاهش چشمگیری در استحکامشان به کار برده شوند.

۳- فلزات 400°C تا 600°C : فولادهایی که با مولیبدن آلیاژ شده باشند در دمای بیشتر از 400°C دارای مقاومت به خزش مناسبی هستند. برای دماهای حدود 500°C از آلیاژهای کروم - مولیبدن و کروم - مولیبدن - وانادیم استفاده می‌شوند.

آلیاژهای تیتانیوم (۴۷٪ - ۶۱٪ Ti) می‌توانند برای دماهای تا 600°C به کار برده شوند ولی در بیش از این دما این آلیاژ ترد شده و به‌طور سطحی اکسیده می‌شوند.

۴- فلزات مورد استفاده در فاصله دمایی 650°C - 600°C : در این محدوده هم مقاومت به خزش و هم مقاومت در برابر اکسیداسیون مهم است. برای افزایش مقاومت در برابر پوسته شدن به آهن، کرم اضافه می‌شود که برای شرایط کاربردی تا 650°C مقدار کرم کمتر از ۸٪ است.

۵- فلزات مورد استفاده در فاصله دمایی 1000°C - 6500°C : فولادهای زنگ نزن آستنیتی و آلیاژهای آهن - نیکل و سوپر آلیاژهای با پایه نیکل و کبالت چهار دسته از آلیاژهایی هستند که در این محدوده دمایی به کار برده می‌شوند.

۶- فلزات مورد استفاده از 1000°C به بالا: فلزات نسوز نظیر تنگستن، تانتالیم، نایبیوم و مولیبدن و آلیاژهای آنها می‌توانند تا دمای 1500°C به کار برده شود؛

پوشش‌های محافظی برای ارائه سرویس در محیط‌های اکسیدکننده با درجه حرارت‌های بسیار بالا باید به کار برده شوند که نوع پوشش بستگی به ماده دارد. کاربردهای ویژه فلزات نسوز عبارت است از: نازل‌های راکت، پوسته‌های تشعشعی، اجزای تیوب الکترونی و رشته‌های لامپ‌های حبابی. در جدول (۶) ماکزیمم جریان استفاده شده دما در برخی از فلزات آورده شده است.

جدول ۶- ماکزیمم جریان استفاده شده دما در برخی از فلزات

فلز	نقطه ذوب Tm K	نقطه ذوب °C	ماکزیمم دما در شرایط کار °K $T = \frac{2}{3} T_m$	ماکزیمم دما در شرایط کار °C	ماکزیمم $\frac{T}{T_m}$ واقعی قابل دسترس
آلومینیم	۹۳۳	۶۶۰	۶۲۰	۳۵۰	۰/۵۶ (RR ۵۸) در ۲۵۰ °C
مس	۱۳۵۶	۱۰۸۳	۹۰۰	۶۳۰	-
نیکل	۱۷۲۶	۱۴۵۳	۱۱۵۰	۸۰۸	۰/۷۴ (نیمونیک ۱۱۵ در ۹۸۰ °C)
آهن	۱۸۰۹	۱۵۳۶	۱۲۰۰	۹۳۰	۰/۴۷ (فولاد فریتی در ۵۷۵ °C)
تیتانیوم	۱۹۴۱	۱۶۶۸	۱۲۹۰	۱۰۲۰	~ ۰/۴
زیرکیم	۲۱۲۵	۱۸۵۲	۱۴۲۰	۱۱۵۰	-
کرم	۲۱۷۳	۱۹۰۰	۱۴۵۰	۱۱۸۰	۰/۶، اگر بتوان کرم را به اندازه کافی داکتیل تهیه نمود
هافنیم	۲۴۹۵	۲۲۲۲	۱۶۴۰	۱۳۷۰	-
نیویوم	۲۷۴۱	۲۴۶۸	۱۸۳۰	۱۵۵۰	۰/۵۴، اگر پوشش مناسبی روی آن ایجاد شود
مولیبدن	۲۸۸۳	۲۶۱۰	۱۹۲۳	۱۶۵۰	-
تالیم	۳۲۶۹	۲۹۹۶	۲۱۸۰	۱۹۱۰	-
تنگستن	۳۶۸۳	۳۴۱۰	۲۴۳۳	۲۱۶۰	۰/۷۶ (رشته‌های لامپ‌های الکترونیکی در ۲۵۰۰ °C)

ب) پلیمرها

پلاستیک‌ها و مواد باید تحت طیف وسیعی از نظر دما کاربرد داشته باشند. تقریباً تمام خواص مکانیکی، فیزیکی، الکتریکی و شیمیایی همگی به درجه حرارت بستگی دارند. در نتیجه درجه حرارت اغلب به عنوان یک عامل در طراحی پلیمرها به کار برده می‌شود. (جدول ۷)

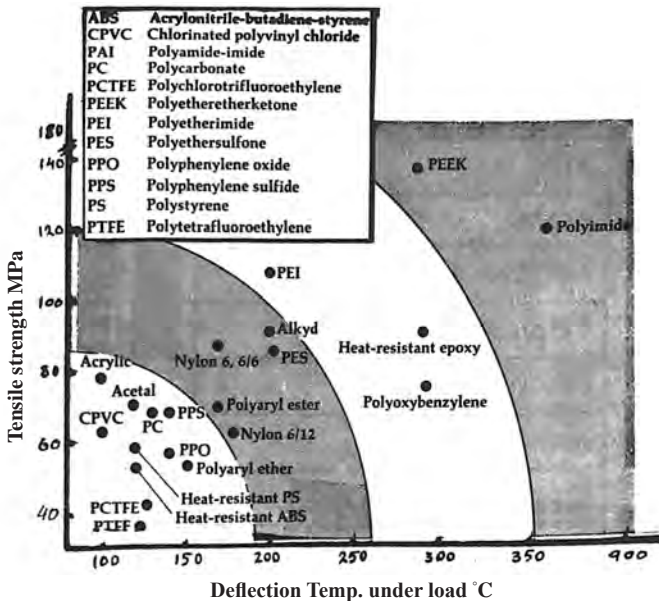
■ **قابلیت‌های حرارتی:** ترموستها معمولاً نسبت به ترموپلاستها در برابر حرارت مقاوم‌تر هستند. (شکل ۵)

پلیمرهای مایع - کریستال تقویت نشده (LCPS) که بر اساس استرهای آروماتیک هستند، خواص مکانیکی خوبی در درجه حرارت‌های بالاتر از 30°C دارند. LCPهایی که با روش تزریق و اکستروژن تهیه می‌شوند؛ در ابزارهایی که در فرایندهای شیمیایی با دمای بالا کار می‌کنند، به کار می‌روند. همچنین در اجزای الکتریکی، الکترونیکی نظیر اتصال دهنده‌ها و پریزها به کار برده می‌شوند.

جدول ۷ - محدوده مجاز دمایی برای استفاده از پلیمرها در شرایط بدون بارگذاری

		Temperature, $^{\circ}\text{C}$			
		0	100	200	300
Thermoplastic	ABS				
	Acetal				
	Acrylics				
	Cellulosics				
	Fluorocarbons				
	Nulons				
	Polysilomer				
	Polyarylether				
	Polyarylsulfone				
	Polycarbonate (PC)				
	Polyethylenes (PEs)				
	Polyimide				
	Polyphenylene sulfide (PPS)				

	Polypropylene (PP)				
	Polystyrene (PS)				
	Polyurethane (PUR)				
	Polyvinyl chlorides (PVCs)				
	Styrene-acrylonitrile				
	Polyphenylene oxide (PPO)				
	Polysulfone (PSO)				
	Polyethersulfone (PES)				
Thermoset	Alkyds				
	Aminos				
	Polyesters				
	Epoxies				
	Phenolics				
	Silicones				



استحکام کششی پلیمرهای زیر در دمای انحراف

ج) سرامیک‌ها

یکی از مزایای سرامیک‌های مهندسی نسبت به فلزات، توانایی و پایداری آنها در دماهایی تا 1650°C است.

پایداری حرارتی سرامیک‌ها با چند خاصیت حرارتی نظیر مقاومت به خزش، انبساط حرارتی، هدایت حرارتی و مقاومت در برابر شوک حرارتی مشخص می‌گردد. شکل ۶ استحکام سرامیک‌ها را نسبت به دما نشان می‌دهد.

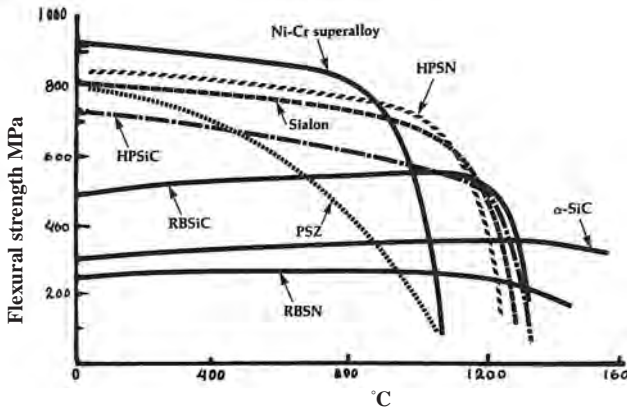
سرامیک‌های چند بلوری عموماً انرژی اکتیواسیون زیادی دارند که به دلیل خزش یا حرکات نابجایی‌ها است. از سوی دیگر شیشه‌ها و سرامیک‌های شیشه‌ای انرژی اکتیواسیون کمی دارند که علت این امر وجود فاز آمورفی (بی شکل) در این نوع سرامیک‌ها است. در نتیجه، نرخ خزش شیشه‌ای با «مورفولوژی» و ترکیب شیمیایی فاز کریستالی تعیین می‌شود. فازهای نسوز، تغییر شکل یا خزش را کاهش می‌دهند. اغلب فازهای شیشه‌ای در سرامیک‌های شیشه‌ای با عملیات حرارتی بیشتر و مواد جایگزین شونده بسیار شبیه به یک سرامیک پلی کریستالی عمل می‌کنند.

■ **انبساط حرارتی:** در مقایسه با اکسیدها سرامیک‌های با پایه سیلیکون، ضریب انبساط حرارتی کمتری دارند. این امر به مقاومت آنها در برابر شوک حرارتی کمک می‌کند. شبیه به مقاومت در برابر خزش، انبساط حرارتی برای سرامیک‌های بر مبنای سیلیکون تابعی از فاز جامد است و با تخلخل و ناخالصی‌های جزئی تحت تأثیر واقع نمی‌شود؛ به عنوان مثال کاربید سیلیسیم دارای انبساط حرارتی معادل با ۵۰٪ بیشتر از نیتريد سیلیسیم است.

ظرفیت حرارتی و هدایت حرارتی نیز برای کاربردهای با درجه حرارت بالا باید در نظر گرفته شود. در حالی که هر دو خاصیت ذکر شده در مورد مقاومت در برابر تنش حرارتی نیز صدق می‌کند.

هدایت حرارتی شیشه‌ها با کاهش درجه حرارت کاهش می‌یابد، این در صورتی است که با سرامیک‌های کریستالی و سرامیک‌های شیشه‌ای، هدایت حرارتی افزایش می‌یابد. مقادیر هدایت حرارتی برای سرامیک‌های شیشه‌ای از سرامیک‌های اکسیدی کمتر و از شیشه‌ها بیشتر است. هدایت حرارتی سرامیک‌های تک فاز از ساختمان و ترکیب شیمیایی آنها الهام گرفته است. مقاومت در برابر شوک حرارتی ناشی از توانایی و پایداری سرامیک در برابر تنش‌های حرارتی است که به واسطه شیب حرارتی زیاد به وجود آمده است.

مقاومت در برابر شوک حرارتی معمولاً به وسیله «کوینج» کردن نمونه گرم شده در آب اندازه‌گیری می‌شوند و برای سرامیک‌های ساختمانی مقاومت در برابر شوک حرارتی به نوع ماده و فرایند تولید قطعه بستگی دارد.



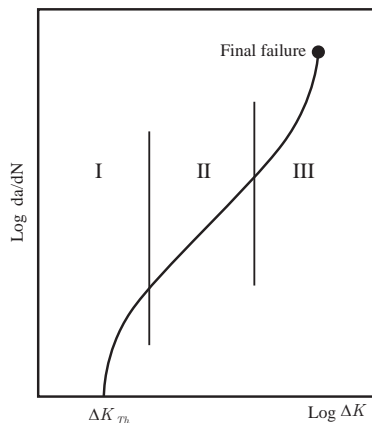
استحکام سرامیک‌های مهندسی در دماهای مختلف

معیار خستگی

گفته می‌شود که تقریباً ۸۰٪ گسیختگی‌ها در اجزای مهندسی ناشی از شکست خستگی است. صرف نظر از موادی خاص، شکست خستگی می‌تواند با طراحی دقیق و عملیات تولید کاهش یابد.

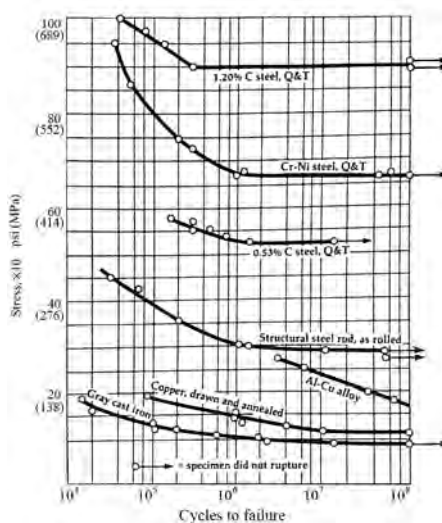
الف) فلزات

خستگی، شکل خطرناکی از شکست است که در مواد رخ می‌دهد به‌ویژه هنگامی که مواد زیر بارهای متناوب قرار می‌گیرند، خستگی با توسعه و پیشرفت رشد یک ترک در مراحل مختلف رخ می‌دهد (شکل زیر). شکست خستگی می‌تواند زیر بارهایی به مراتب کمتر از بارهای لازم برای شکست در شرایط ایستایی رخ دهد و ممکن است که نشانه خارجی قابل مشاهده‌ای نداشته باشد که دلالت بر ایجاد شکست در مدت زمان اعمال بار تا هنگام شکستن قطعه بکند.



سرعت رشد ترک خستگی در سه مرحله شکست خستگی

- آلیاژهای فلزی و طراحی‌های مناسب برای افزایش مقاومت در برابر خستگی عبارت‌اند از:
- ۱ تأثیر آلیاژسازها در لغزش متقاطع دو قلوپی‌ها یا خواص کار سختی است، که مقاومت در برابر جوانه‌زنی ترک را افزایش می‌دهند.
 - ۲ استحکام کششی از طریق آلیاژی کردن یا عملیات حرارتی برای به دست آوردن نسبت تنش بالا به تعداد سیکل‌ها افزایش می‌یابد.
 - ۳ به حداقل رسانیدن سطوح برش خورده روی قطعه کار
 - ۴ پولیش نمودن سطح قطعه کار به جای ماشین کاری و خشن کردن آن.
 - ۵ استفاده از تنش‌های کمتر از حد خستگی استاندارد ماده.
 - ۶ استفاده از قطعه‌ای که دانه‌بندی ریز دارد.
 - ۷ عدم حضور ناپیوستگی‌های متالورژیکی نظیر تخلخل، آخال یا جدایش عناصر آلیاژی برای به حداقل رساندن محل‌های مناسب برای جوانه‌زنی ترک.
 - ۸ حضور تنش باقیمانده فشاری در سطح که می‌تواند با فرایندهایی نظیر پرسکاری، نورد سطحی یا عمل ساچمه‌زنی صورت پذیرد.
 - ۹ شرایط محیطی و طراحی مناسب برای به حداقل رساندن عواملی که به خستگی حرارتی و خستگی خوردگی منجر می‌شوند.
 - ۱۰ خودداری از به کارگیری پوشش‌های فلزی نظیر کروم کاری، نیکل کاری یا پوشش‌های کادیم که می‌توانند عمر خستگی را در اثر ایجاد ترک‌های ریزی که در پوشش وجود دارند، کم کنند.
- شکل ۸ رفتار خستگی آلیاژهای آهنی و غیرآهنی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید آلیاژهای آهنی حد خستگی دارند.



رفتار خستگی آلیاژهای آهنی و غیر آهنی

ب) پلیمرها

خستگی از دلایل اصلی شکست فلزات شناخته شده است. همچنین به طور مشابه در مورد پلاستیک‌ها نیز نقش مهمی را در شکست آنها دارد. خستگی در پلاستیک‌ها ظاهراً شبیه خستگی در فلزات است اما به خوبی خستگی در فلزات شناخته نشده است، بنابراین تئوری خستگی آن چنان که در مورد فلزات پیشرفت کرده، توسعه نیافته است؛ به این دلیل که عواملی که در خستگی فلزات مهم در نظر گرفته نمی‌شوند در اینجا باید بررسی گردند. برخی از این عوامل عبارت‌اند از: وزن مولکولی، تأثیرات انتقالی و تأثیرات حرارتی و

خستگی در پلاستیک‌ها نسبت به فرکانس بارگذاری متناوب خیلی حساس است. علت این امر میرایی شدید و هدایت حرارتی کم پلاستیک‌هاست که در این صورت در طول هر دوره اعمال تنش حرارتی در ماده ایجاد می‌شود. این امر باعث می‌شود که مدول الاستیسیته کاهش یابد. سرانجام ماده نمی‌تواند بار اعمال شده را تحمل کند و شکست زود هنگام رخ می‌دهد. کمترین نرخ رشد ترک خستگی در پلاستیک‌های کریستالی نظیر نایلون و پلی استال رخ می‌دهد.

■ **تقویت با الیاف پیوسته:** عواملی که در مقاومت در برابر خستگی پلاستیک‌های تقویت شده مؤثر است شامل: نسبتی که الیاف در تقویت ماده مؤثر است، چگونگی قرار گرفتن الیاف (مثلاً الیاف به صورت اتفاقی یا همسو در یک جهت و یا به صورت پیچشی و متقاطع ممکن است در زمینه پخش شده باشند) و زمینه رزین است. (جدول ۸)

جدول ۸- استحکام خستگی ترموپلاستیک‌های تقویت شده (آزمایش در شرایط ۱۸۰۰ سیکل در دقیقه)

ماده	درصد الیاف شیشه	درصد الیاف کربن	استحکام 10^2 Psi برای 10^7 سیکل	استحکام 10^3 Psi برای 10^7 سیکل
استال کوپلیمر	۳۰	-	۹	۷
نایلون *۶	۳۰	-	۷	۵/۷
نایلون $\frac{۶}{۶}$	-	-	۶	۵
نایلون * $\frac{۶}{۶}$	-	-	۳/۲	۳
نایلون * $\frac{۶}{۶}$	۳۰	-	۸	۶
نایلون * $\frac{۶}{۶}$	۴۰	-	۹	۷
نایلون $\frac{۶}{۶}$	۴۰	-	۱۰/۵	۹

فصل ۳: انتخاب مواد مهندسی

۸	۱۳	۳۰	-	نایلون $\frac{۶}{۶}$ *
۸/۵	۱۵	۴۰	-	نایلون $\frac{۶}{۶}$ *
۵/۵	۷	-	۳۰	نایلون $\frac{۶}{۱۰}$ *
۷	۸	-	۴۰	نایلون $\frac{۶}{۱۰}$ *
۵	۹	-	۲۰	پلی کربنات
۶	۱۴/۵	-	۲۰	پلی کربنات
۵	۱۱	-	۳۰	پلی استر PBT
۶/۵	۱۳	۳۰	-	پلی استر PBT
۱۷/۵	۱۸	۳۰	-	پلی اترانزستون
۵	۱۶	-	۳۰	پلی اترسولفون
۶	۱۹	-	۴۰	پلی اترسولفون
۶/۷	۲۲	۳۰	-	پلی اترسولفون
۲/۷	-	-	۳۰	پلی اتیلن اکساید اصلاح شده
۹/۵	۱۴	۳۰	-	پلی فنیلین سولفید
۴/۵	۱۴	-	۳۰	پلی سولفون
۵/۵	۱۶	-	۲۰	پلی سولفون

* شرایط مرطوب، ۵۰ RH %

ج) سرامیک‌ها

خستگی در سرامیک‌ها آن گونه که در فلزات بررسی می‌شود، مورد بحث قرار نمی‌گیرد. گسیختگی در اثر گذشت زمان در مواد سرامیکی ترد رخ می‌دهد با وجود اینکه ترک‌های نوک تیز وجود ندارد ولی به دلیل پلاستیسیته ذاتی که در این مواد وجود دارد، شکست خستگی در سرامیک‌ها مشاهده شده است که در واقع ترک برداشتن در اثر خوردگی تحت تنش است و با وجود رطوبت تقویت می‌شود.

معیار چقرمگی

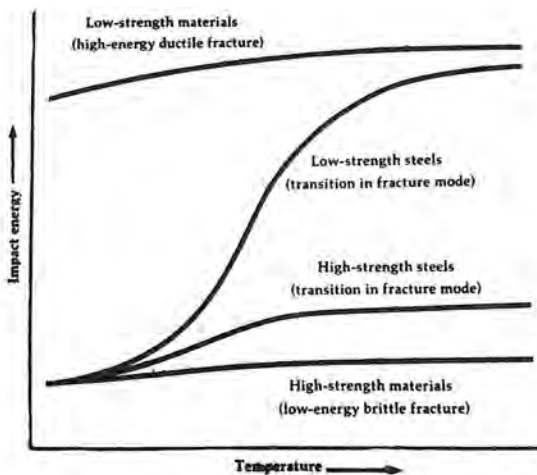
وقتی استحکام، خاصیت کنترل‌کننده داشته باشد و در صورتی که باید در برابر یک بار مشخص پایداری نماید، خاصیت چقرمگی محدودیت ایجاد می‌کند و این در صورتی است که آن قطعه باید قابلیت جذب مقدار مشخصی از انرژی مکانیکی را بدون شکست داشته باشد.

الف) فلزات

اگرچه استحکام اساساً عاملی اصلی برای طراحی است ولی عموماً یک ویژگی به تنهایی نمی‌تواند ماده مشخصی را برای کاربردی معین، مشخص کند، برای مثال در ساختار مهندسی اغلب استحکام و چقرمگی باید باهم در نظر گرفته شوند. چقرمگی یک فلز، توانایی جذب انرژی و تغییر فرم پلاستیکی قبل از شکستن قطعه است و مقدار انرژی جذب شده در طی تغییر شکل و شکست، میزانی از چقرمگی است.

فولادها در محدوده کم استحکام، دارای یک انتقال در چقرمگی هستند که این انتقال از رفتار «داکتیل» در دماهای بالا تا رفتار «ترد» در دماهای کم ادامه می‌یابد. بنابراین برای جلوگیری از شکست ترد دمای کاری اجزای ساختمان باید بیشتر از دمایی باشد که در آن دما شکست ماده از داکتیل به ترد تبدیل می‌شود. (شکل زیر)

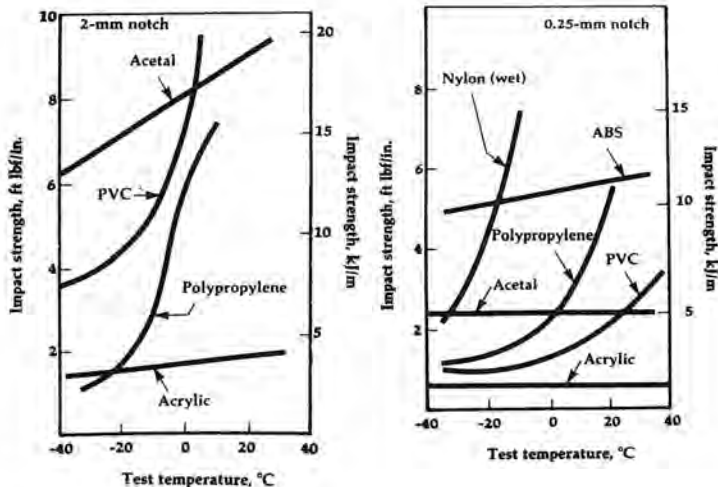
ترکیب شیمیایی یک فولاد به همان اندازه که ریزساختار و تاریخچه تولید بر روی Tc (دمای بحرانی) و انرژی جذب شده در طی شکست تأثیر می‌گذارد، مؤثر است. فولادهایی که دارای کربن کمتر و دانه‌بندی ریزتر هستند به‌طور طبیعی دارای Tc پایین‌تری نیز هستند.



تغییرات انرژی جذب شده در هنگام ضربه برای چند آلیاژ نمونه نسبت به دما

ب) پلیمرها

رفتار شکست پلاستیک‌ها عموماً با استفاده از آزمایش‌های تجربی نظیر آزمایش‌های ضربه «شارپی» و «آیزود» تعیین شده‌اند که اصولاً برای مواد مختلف به کار برده می‌شود. استحکام ضربه‌ای مشخص توسط عواملی نظیر درجه حرارت، عوامل محیطی مثل رطوبت جذب شده و عواملی نظیر روش به کار رفته برای تهیه نمونه، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. عوامل مختلف ذکر شده باعث می‌شوند که در آزمایش‌های مختلف از یک نمونه مقادیر عددی متفاوتی به دست آید لذا عوامل طراحی باید به دقت مورد بررسی قرار گیرند. به دست آوردن چقرمگی بیشتر در پلاستیک‌ها: اگر چه پلاستیک‌های تقویت نشده استحکام ضربه‌ای کمتری نسبت به بیشتر مواد فلزی دارند، ولی از روش‌های متفاوتی برای بهبود چقرمگی آنها استفاده می‌شود. که عبارت‌اند از: آلیاژی کردن با یک فاز کائوچویی یا فاز دیگری که مقاومت در برابر ضربه بیشتری داشته باشد، کوپلیمر یزاسیون برای ایجاد ساختار شیمیایی چقرمه تر و همچنین شرکت دادن الیافی که دارای مقاومت در برابر ضربه بیشتری هستند. وجود زمینه ترموپلاستیکی در مواد مرکب باعث افزایش چقرمگی نسبت به همان مواد با زمینه ترموست شده است. اصلاح زمینه پلاستیک‌ها و مواد مرکب با یک فاز کائوچویی احتمالاً بهترین روش برای افزایش مقاومت در برابر ضربه است. مواد کائوچویی به پلاستیک اجازه می‌دهد که انرژی بیشتری را جذب کند. مشابه آلیاژسازی یا مخلوط کردن یک پلیمر با پلیمر دیگری است که مقاومت به ضربه بیشتری داشته باشد که در نتیجه مقاومت در برابر ضربه مجموعه بهبود می‌یابد؛ به عنوان مثال چقرمه کردن نایلون‌ها با استفاده از یک پلی‌اولفن یا دیگر پلیمرهای اصلاح‌کننده، شکل زیر تغییرات استحکام ضربه‌ای از ترموپلاستیک‌ها نسبت به دما را نشان می‌دهد.



تغییرات استحکام ضربه‌ای از ترموپلاستیک‌ها نسبت به دما

ج) سرامیک‌ها

در گذشته اندازه‌گیری مقدارهای چقرمگی دقیق برای سرامیک‌ها مشکل بود؛ نه تنها به خاطر بی‌ثباتی مواد بلکه ابزار اندازه‌گیری برای آزمایش‌ها نیز دقت کافی را نداشت. امروزه بیشتر این مشکلات برطرف شده آن هم به علت درک بهتر شرایط ایجاد ترک اولیه و تکثیر آن در سرامیک‌ها است. اگر چه افزایش استحکام مفید است ولی هدف اصلی توسعه سرامیک‌های تقویت شده با الیاف، افزایش چقرمگی شکست برای جلوگیری از گسیختگی ترد که ناگهانی، و در سرامیک‌های معمولی مرسوم است، می‌باشد. شکست سرامیک‌ها به اندازه ترک بحرانی بستگی دارد که تابعی از چقرمگی شکست است. یک ترک در اندازه‌های بزرگ‌تر از اندازه بحرانی ترک کافی است تا باعث شکست شود. یک روش مهم استفاده شده برای بهبود چقرمگی سرامیک {نظیر زیرکونیا (ZrO_2)، آلومینا (Al_2O_3) و نیتريد سیلیسیم (Si_3N_4)} غالب کردن استحاله یک فاز در نواحی تنش‌های به کار رفته در ماده است. نشان داده شده است که تنش ایجاد شده استحاله مارتنزیتی به‌طور ذاتی چقرمگی شکست را در این مواد افزایش می‌دهد. تکنیک‌های دیگر استفاده شده برای افزایش چقرمگی استفاده از الیاف جهت تولید محصولات باند شده با الیاف، انحراف ترک یا بیرون آوردن الیاف به محض ایجاد ترک است. تنش‌های داخلی که در اثر اختلالات انبساط حرارتی مابین الیاف و زمینه به وجود می‌آیند، همچنین می‌توانند بر چقرمگی تأثیر بگذارند.

معيار سایش

مواد مقاوم در برابر سایش در محدوده‌ای مشخص و متعارفی به کار می‌روند، اگر چه پلاستیک‌های خود روانکار جایگزین فلزات در مواردی نظیر یاتاقان‌ها، بادامک و چرخ‌دنده‌ها شده‌اند، بیشترین توجه به عملیات سطحی و پوشش‌کاری سطوح در تماس با هم، معطوف می‌شود. متغیرهای زیر در معیار سایش مواد مؤثرند:

- ۱ متغیرهای متالورژیکی. (سختی، چقرمگی، ریزساختار و ترکیب شیمیایی)
- ۲ شرایط کارکرد (مواد در حال تماس، فشار، سرعت، دما، پرداخت سطح، روانکاری و خوردگی)

فصل ۳: انتخاب مواد مهندسی

جدول ۹ استحکام و چقرمگی برخی از مواد مهندسی را نشان می‌دهد.
جدول ۹- استحکام و چقرمگی برخی از مواد مهندسی

KIC/YS		KIC		استحکام تسلیم		ماده	
۱/۳	۰/۲۱	۲۹	۵۲	۳۷/۷	۲۶۰	فولادهای کربن متوسط	فولادها
۲/۵۱	۰/۴	۱۸۲	۲۰۰	۷۲/۵	۵۰۰	T ASTMAS333BQ	
۰/۱۹	۰/۰۳	۲۵/۸	۵۰	۲۳۸	۱۶۲۰	AISI 4340(T260°C)	
۰/۳۹	۰/۰۶	۸۰	۸۷/۴	۲۰۶	۱۲۲۰	AISI 4340(T225°C)	
۰/۳۳	۰/۰۵	۸۲	۹۰	۲۵۰	۱۷۳۰	مارچینگ ۳۰۰	
۰/۳۳	۰/۰۵	۲۲	۲۲	۶۶	۲۵۵	2024-T6S1	آلیاژهای آلومینیم
۰/۸	۰/۱۲	۲۰	۲۲	۵۰	۳۲۵	2024-T3	
۰/۳۱	۰/۰۵	۲۲	۲۲	۷۲	۲۹۵	7075-T6S1	
۰/۶۲	۰/۱	۲۳	۲۷	۶۷	۲۶۲	7075-T6S1	
۰/۲۹	۰/۰۲	۲۲	۲۳	۷۵	۵۱۷	7178-T6S1	
۰/۲۲	۰/۰۶	۵۰	۵۵	۱۲۰	۸۳۰	Ti-6AL-4V	آلیاژهای تیتانیوم
۰/۲۶	۰/۰۳	۴۰	۲۲	۱۵۵	۱۰۸۵	Ti-6AL-4V-2Sn	
۰/۲۹	۰/۰۵	۴۰	۲۵	۱۳۹	۹۶۰	Ti-4Al-4MO-2Sn-0/5Si	
۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۹	۱	۳	۳۰	PMMA	پلاستیک‌ها
۰/۳۶	۰/۰۵	۳	۳/۳	۸/۴	۶۳	پلی کربنات	
-	-	۱/۸	۲	-	-	ورقه‌های اکریلیک	
۰/۰۷	۰/۰۱	۲/۶	۵	۶۳/۳	۲۵۰	Reaction Bonded Si3N2	سرامیک‌ها
۰/۱۱	۰/۰۲	۲/۱	۲/۵	۳۶/۹	۲۶۲	AL ₂ O ₃	
۰/۱۷	۰/۰۳	۳/۲	۳/۷	۱۹/۷	۱۲۰	SiC خود پیوندی	

مقاومت در برابر سایش همیشه نمی‌تواند تنها با بهبود یک خاصیت حاصل شود؛ اگر چه استحکام، سختی، داکتیلیتی و چقرمگی از عوامل مهم هستند.

■ **کاهش دادن سایش:** یکی از مهم‌ترین راه‌های کاهش سایش، روانکاری است. روانکاری مقدار انرژی لازم برای غلبه بر اصطکاک را کاهش می‌دهد و همچنین سطوح در تماس با یکدیگر را محافظت می‌کند.

راه‌های دیگر برای کاهش سایش عبارت‌اند از عملیات سطحی که خود شامل پوشش‌کاری، آلیاژی کردن در سطح و برخی از عملیات حرارتی معین است. یک روش دیگر برای روانکاری، استفاده از مواد جامد نظیر گرافیت و سرب است.

برخی از مواد مقاوم در برابر سایش

الف) فلزات: زواید و فرورفتگی‌های میکروسکوپی حتی در سطوح فلزی کاملاً پرداخت شده نیز وجود دارند. هنگامی که در فلز برای تماس با یکدیگر زیر یک بار طبیعی به هم نزدیک می‌شوند، سطوح خشن با یکدیگر برخورد کرده و به‌طور الاستیکی یا پلاستیکی تغییر شکل می‌دهند. وقتی محل تماس نتواند بار اعمال شده را تحمل کند، پیوندی میان سطوح ایجاد می‌شود. در اثر حرکت نسبی میان سطوح، فلز ضعیف‌تر از سطح تماس جدا شده، جابجا می‌شود. این فرایند با عنوان سایش چسبنده شناخته شده است. فولادهایی که برای کاربردهای مقاوم در برابر سایش مناسب هستند، عبارت‌اند از:

۱ فولادهای کم کربن

۲ فولادهای با کربن زیاد

۳ فولادهای مستقیم سخت شده یا کم آلیاژ (که به‌طور شعله‌ای یا القایی سطح‌شان سخت شده است).

۴ فولادهای با کربن متوسط کرم‌دار یا آلومینیم کرم‌دار که به‌وسیله نیتروتره کردن سخت شده‌اند.

۵ فولادهای پرآلیاژ مستقیماً سخت شده نظیر AISI 2 که یک فولاد ابزار پرکربن و پرکرم (کربن ۱/۵٪ و ۱۲٪ کرم) با کاربیدهای آزاد می‌باشد.

۶ فولادهای زنگ نزن رسوب سختی شونده

۷ فولادهای مخصوص که به‌روش متالورژی پودر یا به‌طور مکانیکی آلیاژی شده‌اند.

۸ کاربیدهایی که به وسیله زمینه فولادی به هم متصل شده‌اند.

در مقایسه با بسیاری از آلیاژهای آهنی مقاوم در برابر سایش فولادهای منگن‌دار از چقرمگی بیشتری برخوردار هستند. این نوع فولادها معمولاً مقاومت در برابر سایش کمتری نسبت به چدن‌های سفید مارتنزیتی و فولادهای پرکربن مارتنزیتی دارا هستند اما مقاومت به سایش آنها از چدن‌های سفید پرلیتی و فولادهای پرلیتی بیشتر است.

■ **چدن‌ها:** چدن خاکستری ریختگی برای کاربرد در قسمت‌هایی از ماشین‌ها که روی هم می‌لغزند، مقاومت به سایش مناسبی دارند. چدن‌ها سخت شده در جاهایی که مقاومت در برابر سایش بیشتری مورد نیاز باشد نظیر سیلندر موتورهای دیزل، به کار برده می‌شوند. ساختار و سختی چدن‌های مالیبیل پرلیتی و مارتنزیتی مقاومت به سایش بسیار خوبی ارائه می‌دهند. چدن‌های سفید آلیاژی نشده معمولاً از چدن‌های آلیاژی ارزان‌تر است و همچنین مقاومت به سایش کمتری دارد.

■ **آلیاژهای غیر آهنی:** آلومینیم برنرها (با روغن کاری کافی) برای استفاده در قسمت‌هایی به کار می‌رود که شامل بارگذاری‌های زیاد و سرعت‌های متوسط تا کم است. مقاومت به سایش این آلیاژها عموماً از سایر آلیاژهای مس بهتر است در صورتی که به‌طور صحیح و مناسب عمل روغن کاری انجام شده باشد، مقاومت به سایش آلومینیم برنرها از آلیاژهای مس و خیلی از آلیاژهای آهنی بهتر است.

(ب) پلیمرها

وقتی ترکیبات پلیمری در برابر فلزات قرار می‌گیرند، رفتار اولیه آنها به‌وسیله سایش، مشخص می‌شود که این مسئله به چگونگی اتصال دو ماده ذکر شده به‌هم بستگی دارد. سایش در مورد سیستم‌های پلیمر - پلیمر از سیستم‌های پلیمر - فلزی شدیدتر است. ضریب اصطکاک، فاکتور سایش، نرخ حجمی سایش و نرخ (فشار، سرعت) برای توضیح مقاومت به سایش پلیمرها استفاده شده‌اند.

ضریب اصطکاک فلزات به سطح تماس سرعت و دما تا حدود 200°C بستگی داشته، و در مقایسه، خواص اصطکاکی پلیمرها به‌میزان بار، سرعت، درجه حرارت و پرداخت سطح بستگی دارد. عوامل سایش می‌توانند آهنگ سایش را پیشگویی نمایند، اگر شرایط ارائه سرویس قطعه که متغیر است در آزمایش به‌خوبی شبیه‌سازی شده باشد. فاکتور سایش (K) با معادله زیر اندازه‌گیری می‌شود.

$$K = \frac{W}{t} \cdot V \cdot t$$

به‌طوری که W حجم ساییده شده برحسب اینچ مکعب، l بار نیروی استفاده شده برحسب پوند نیرو و V سرعت برحسب فوت بر دقیقه و t زمان آزمایش برحسب ساعت است. فاکتور سایش کوچک‌تر بیانگر مقاومت به سایش بهتر است. انواع پوشش‌های مورد استفاده برای افزایش مقاومت سایشی در قطعات مورد استفاده در صنایع:

۱ کرم کاری سخت

۲ آبکاری شیمیایی نیکل

۳ سخت کاری سطحی کبالت و فولاد

۴ Al_2O_3 و سایر سرامیک‌ها

- ۵ کاربیدها و کاربیدهای متصل شده به فلز
- ۶ فیلم‌های واکنش اکسیدی
- ۷ نیتروزه کردن
- ۸ کربوره کردن
- ۹ بریزاسیون
- ۱۰ سولفیده کردن
- ۱۱ کرم کاری
- ۱۲ MoS_2 و پوشش‌های باند شده با گرافیت
- ۱۳ فلوتور و پلیمر، نایلون و پوشش‌های پلی اتیلنی
- ۱۴ الکترولیز فلزات نجیب

انواع تکنیک‌ها و فرایندهای کاربردی مورد استفاده در صنعت برای ایجاد پوشش به شرح زیر است:

- ۱ آبکاری الکتریکی
 - ۲ آبکاری شیمیایی
 - ۳ سخت کاری سطح
 - ۴ اسپری کردن شعله‌ای
 - ۵ اسپری کردن پلاسمایی
 - ۶ اسپری کردن با تفنگ انفجاری
 - ۷ نفوذ
 - ۸ واکنش‌های سطحی
 - ۹ عملیات مالشی (انتقالی)
 - ۱۰ ذوب کردن
 - ۱۱ انحلال بخار
 - ۱۲ انحلال پیرولیتی
 - ۱۳ رسوب بخار شیمیایی
 - ۱۴ آبکاری یونی
 - ۱۵ رسوب دادن بخار
 - ۱۶ یون پرانی (اتم پاشی)
- در جدول ۱۰ خواص برخی از پوشش‌ها ذکر شده است.

جدول ۱۰- خواص برخی از پوشش کاری ها

خواص	پوشش کاری
کاهش سایش	نیتريد و کاربید تیتانیوم
کاهش اصطکاک	فلوئور و پلیمر، MoS ₂
افزایش اصطکاک	ساینده‌های پیوند شده تیتانیوم
بهبود روغنکاری	مس، سرب
افزایش دما یا ظرفیت اعمال بار	آبکاری شیمیایی نیکل
جلوگیری از چسبندگی	آبکاری نقره - طلا
جذب کننده ذرات	ایندیوم، سرب
کاهش خوردگی سایشی	آبکاری یا نفوذ کروم
نگه‌داشتن مایعات روان کننده	فسفاته کردن، نایلون
ساخت مجدد سطح	سخت کاری سطحی فولاد
کاهش زبری سطح	آبکاری نقره
جلوگیری از سایش قطره‌ای	پلی اتان، نئوپرن
جلوگیری از سایش ذرات	آلیاژ کبالت، مولیبدن

آهنگ PV یا محدوده PV (سرعت سطح × فشار) روش دیگری برای اندازه‌گیری مقاومت به سایش ظاهری است.

PV به نرخ سایش بستگی دارد و بیان می‌کند که برای خواصی که یک یاتاقان باید داشته باشد، چه ترکیبی از فشار و سرعت، قابل قبول و بهینه است. PV را معمولاً تحت یک سرعت مشخص بیان می‌کنند.

پلاستیک‌های خودروان‌کار: پلاستیک‌هایی شامل استال‌ها، فلوئور و پلاستیک‌ها با وزن مولکولی زیاد، پلی‌اتیلن‌های پر دانسته، نایلون‌ها و پلی‌آمیدها روانکاری ذاتی را با ضرایب اصطکاک کمتر ترکیب کرده‌اند.

اضافه کردن عوامل روغن کاری به پلاستیک های دیگر می تواند آنها را به ترکیباتی مناسب برای کاربرد در یاتاقان ها تبدیل کند. برای به دست آوردن مقاومت به سایش بهینه، اغلب پلاستیک ها با اضافات روان کننده و الیاف ها ترکیب می شوند.

ج) سرامیک ها

سایش سرامیک ها با نیروهای پیوندی، که در یک سیستم سرامیک - سرامیک یا سرامیک - فلز به وجود آمده است، اندازه گیری می شود. پیوندهای اتمی قوی به وسیله تغییرات توده و خواص سطحی تحت تأثیر قرار می گیرند. فلزات عموماً به طور پلاستیکی تغییر شکل می دهند در صورتی که سرامیک ها ترد هستند و شکست در آنها با مقدار کمی تغییر فرم پلاستیکی یا هیچ گونه تغییر فرم پلاستیک رخ می دهد. جدول ۱۱ چقرمگی شکست سرامیک ها را نشان می دهد.

جدول ۱۱- چقرمگی شکست سرامیک ها

ماده	توضیحات	چقرمگی شکست $KIc, MPa\sqrt{m}$
فولاد با استحکام متوسط		۵۰/۰
NaCl	تک بلور	۰/۴
شیشه سودالایم	بی شکل	۰/۷۴ DCB
شیشه آلومینوسیلیکات	بی شکل	۰/۹۱ DCB
ZnSe	رسوب داده شده از حالت بخار	۰/۹
WC	Cobonded	۱۳
ZnS	رسوب داده شده از حالت بخار	۱
Si_3N_4	به صورت گرم پرس شده	۵
Al_2O_3	تقویت شده با MgO	۴
Al_2O_3 (یا قوت کبود)	تک بلور	۲/۱
SiC	به صورت گرم پرس شده	۴

۵	به صورت گرم پرس شده	SiC-ZrO ₂
۵/۹	به صورت گرم پرس شده	MgF ₂
۱/۲	به صورت گرم پرس شده	MgO
۶	به صورت گرم پرس شده	B ₂ C
۵/۶	تک بلور	Si
۷/۶ BCD	با کلسیم تثبیت شده	ZrO ₂

DCB: Doble Cantilever Beam.

بر خلاف فلزات، در سرامیک‌ها شکست ناخالص و تغییر فرم پلاستیکی هنگامی می‌تواند رخ دهد که تغییر فرم الاستیکی سرامیک محدود باشد. جریان ماده در پلاستیک‌ها الهام گرفته شده از ریزساختار، نابیایی‌ها، جاهای خالی و ... است، در صورتی که در سرامیک‌ها جریان ماده، تابعی از چسبندگی، اصطکاک و رفتارهای سطح سرامیک است. در سیستم‌های سرامیک - فلز اختلافات بزرگ در تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک می‌تواند سبب مخلوط شدن مواد، و باعث افزایش ساییش شود.

معیار خوردگی

خوردگی نتیجه یک سری فعالیت‌های شیمیایی یا الکتروشیمیایی میان یک ماده و محیط اطرافش است. شکل خوردگی می‌تواند به گونه وسیعی تغییر یابد که البته به ماده و شرایط تماس بستگی دارد.

الف) فلزات

خوردگی اغلب در نتیجه تشکیل محصولات خوردگی به وجود می‌آید؛ به عنوان مثال ایجاد زنگ بر روی آهن، اما لزومی ندارد که محصولات خوردگی قابل رؤیت باشد و همچنین کاهش وزن فلز مادر نیز لازم نیست. محسوس باشد. خوردگی همچنین می‌تواند به شکل‌های مختلف دیگری نظیر ترک خوردن، کاهش استحکام یا کاهش داکتیلیتی ظاهر شود. پنج شکل اصلی خوردگی وجود دارد که طبقه‌بندی براساس ظاهر خارجی یا مکانیزم خوردگی انجام گرفته است.

خوردگی عمومی: خوردگی عمومی به وسیله نازک شدن یکنواخت به وجود می‌آید و می‌تواند شامل زنگ زدن آهن، تیره شدن نقره، کدر شدن نیکل و اکسیداسیون فلزات در دمای زیاد باشد.

خوردگی یکنواخت به وسیله رسوب یا از دست دادن وزن فلز در واحد زمان اندازه گیری می شود. واحدهای معمول برای اندازه گیری نرخ خوردگی یکنواخت براساس واحدهای

$$\frac{\text{in}}{\text{yr}} \text{ یا } \frac{\text{mm}}{\text{yr}} \text{ تنظیم شده اند.}$$

خوردگی موضعی: تخریبی که به وسیله این نوع از خوردگی رخ می دهد، ترجیحاً در نواحی موضعی به وجود می آید تا اینکه در سطح روباز به طور یکنواخت خورده شود. دو نوع اساسی خوردگی موضعی عبارتند از: خوردگی شکافی و خوردگی حفره دار شدن. **خوردگی شکافی:** هنگامی رخ می دهد که قسمتی از سطح فلز پوشش داده شده، یا در مقایسه با سطح باقیمانده محدود شده، و همچنین در معرض حجم زیادی از الکترولیت قرار گرفته باشد.

خوردگی حفره دار شدن: حفره دار شدن، محل هایی از خوردگی را تولید می کند که سطح قابل رؤیت آنها در مقایسه با سطوح داخلی آنها، که از سطح به طرف داخل قطعه پیشرفت کرده است، بسیار کوچک است. این دو نوع خوردگی موضعی با روش های مشابهی به وجود می آید.

خوردگی شکافی به وسیله تشکیل یک سلول غلظتی شروع می شود در صورتی که خوردگی حفره دار به عنوان نتیجه ای از ناپیوستگی متالورژیکی آغاز می گردد. **خوردگی گالوانیکی:** خوردگی گالوانیکی همچنین با عنوان خوردگی دو فلزی شناخته می شود و هنگامی رخ می دهد که یک فلز یا آلیاژ به طور الکتریکی با فلز یا آلیاژ دیگر در حضور یک الکترولیت کوپل می شود.

فلزی که مقاومت به خوردگی کمتری دارد، آند سلول خوردگی واقع شده، و با شتاب زیاد مورد حمله قرار می گیرد در صورتی که فلز مقاوم تر محافظت می شود. خوردگی های گالوانیکی می تواند مزایایی داشته باشد که از آن جمله می توان به سیستم های محافظت کاتدیک اشاره نمود که از یک آند مناسب برای جلوگیری یا کاهش خوردگی ساختار که باید محافظت شود، استفاده می شود.

فلززدایی: فلززدایی نوعی از خوردگی است و هنگامی رخ می دهد که آلیاژ متشکل از چند جزء باشد و یا با چند جزء از عناصر آلیاژی به طور ترجیحی خورده می شوند در نتیجه یک قطعه متخلخل از شکل اولیه بر جای می ماند که استحکام مکانیکی واقعی را ندارد. فلززدایی به سبب اختلاف پتانسیل های خوردگی عناصر در یک آلیاژ به وجود می آید.

عناصر نجیب تر در یک سلول گالوانیکی به عنوان کاتد عمل کرده در صورتی که عناصر فعال تر آند شده، به سرعت خورده می شوند. رایج ترین نوع فلززدایی، روی زدایی برنج است به عنوان مثال عمل روی زدایی در لوله های برنجی رخ می دهد.

خوردگی بین دانه ای: خوردگی بین دانه ای هنگامی رخ می دهد که مرزهای دانه ها

به‌طور ترجیحی مورد حمله واقع می‌شوند. این مسئله به دلیل وجود رسوب‌ها یا جدایش‌ها در این مناطق است. رسوبات مرزدانه‌ای در برابر سطوح گسترده دانه‌ها، آند واقع می‌شوند در نتیجه مرزهای دانه‌ها به‌سرعت مورد حمله قرار می‌گیرند و باعث ایجاد شکست ناگهانی می‌گردد. یکی از رایج‌ترین مثال‌ها برای خوردگی بین دانه‌ای در مورد فولادهای زنگ نزن آستنیتی رخ می‌دهد به‌طوری که یا جوشکاری شده، و یا به‌طور نامناسب عملیات حرارتی شده باشند.

■ **ترک برداشتن به علت تنش‌های محیطی:** ترک برداشتن در اثر تنش‌های محیطی، گسیختگی فلز در اثر قرار گرفتن آن در برابر ترکیبی از تنش و یک محیط خورنده است. هنگامی که تنش به‌طور تناوبی وارد شود ترک برداشتن در اثر خوردگی خستگی رخ می‌دهد. چنانچه ترک برداشتن در اثر تنش کششی به وجود آید، این نوع خوردگی با عنوان خوردگی تحت تنش نامیده می‌شوند. خوردگی تحت تنش پدیده‌ای پیچیده است که تقریباً تمامی فلزات در بعضی محیط‌ها دچار آن می‌شوند. ترک برداشتن می‌تواند به دو صورت «درون دانه‌ای» و یا «مرزدانه‌ای» باشد.

تنش کششی اولیه مورد نیاز برای گسترش خوردگی تحت تنش می‌تواند کوچک باشد و این تنش می‌تواند از طریق عوامل خارجی یا تنش‌های داخلی باقیمانده تأمین شود.

■ **قابلیت خوردگی:** به این دلیل که بسیاری از فلزات می‌توانند مقاصد استحکام، وزن، عمر خستگی و دیگر موارد مورد نیاز را تأمین کنند، برای یک محیط مشخص انتخاب نهایی فلز یا آلیاژ را مقاومت در برابر خوردگی تعیین می‌نماید. هنگامی که هیچ فلزی از نظر خواص مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی از نظر اقتصادی مناسب شناخته نشود، از یک فلز کم ارزش که تحت تدابیری محافظت می‌شود، استفاده می‌گردد.

روش‌های محافظت از خوردگی شامل بازدارنده‌های اضافه شده برای خوردگی‌های متوسط، پوشش‌های ارگانیکی آلی، پوشش‌های قربانی شونده، محافظت‌های کاتدیک یا آندیک و پوشش‌های ممانعت‌کننده (برای مثال پوشش‌هایی که در اثر اسپری کردن به‌وجود می‌آید یا نشاندن کرم روی فلز با روش الکترولیز) است.

مواد روکش شده همچنین می‌توانند از یک فلز مبنای کم ارزش، فلز مقاومی ایجاد کنند. جدول ۱۲ مقاومت در برابر خوردگی فلزات بدون پوشش را نشان می‌دهد.

جدول ۱۲- مقاومت در برابر خوردگی فلزات بدون پوشش

ماده	اتمسفر صنعتی	آب خالص	آب دریا	اسیدسولفوریک ۱۵-۱۰٪	محیط‌های قلیایی ۸٪
فولاد کم کربن	۱	۱	۱	۱	۱
فولاد گالوانیزه	۴	۲	۴	۱	۱
فولاد ۴ تا ۶٪ گرم	۳	۳	۳	۱	۴
فولاد زنگ نزن ۱۸-۸	۵	۵	۴	۲	۵
فولاد زنگ نزن ۱۸-۳۵	۵	۵	۴	۴	۴
مونل (۷۰ Ni - ۳۰ Cu)٪	۴	۵	۵	۴	۵
برنج قرمز (۸۵ Cu - ۱۵ Zn)٪	۴	۳	۴	۳	۱
آلومینیم برنز	۴	۴	۴	۳	۳
نیکل نقره (۶۵ Cu - ۱۸ Ni - ۱۷ ZnO)٪	۴	۴	۴	۴	۴
آلومینیم	۴	۲	۱	۳	۱
آلیاژهای Al-Cu دور آلومین	۳	۳	۱	۲	۱

راهنما: ۱- ضعیف ۲- استفاده زودگذر ۳- سرویس‌دهنده خوب ۴- سرویس‌دهنده قابل اعتماد ۵- سرویس‌دهنده عالی به‌طور نامحدود

ب) پلیمرها: پلاستیک‌ها و مواد مرکب با زمینه پلیمری (PMC) عموماً مقاومت خوبی به خوردگی دارند بعضی از پلاستیک‌ها نظیر PTFE (پلی تترافلوئورواتیلن) می‌توانند در محیط‌های شیمیایی بسیار خورنده، که فلزات به‌شدت مورد هجوم واقع می‌شوند، به‌خوبی کار کنند. همچنین پلاستیک‌هایی نظیر پلیمرهای کریستالی - مایع، پلی‌استن‌ها و سولفیدپلی‌فنیلین (PDS) در محیط‌های شیمیایی با درجه حرارت‌های زیاد، مقاومت بسیار خوبی دارند.

■ پلاستیک‌های برجسته: عموماً به این دلیل که پلاستیک‌ها موادی آلی هستند، می‌توانند به وسیله برخی از مواد شیمیایی یا حلال‌ها مورد هجوم قرار گرفته یا حل شوند، به‌ویژه در حلال‌های آلی.

ترموپلاستیک‌های مهندسی پلی کریستالی نظیر PTFE و نایلون، اغلب اوقات مقاومت شیمیایی بهتری نسبت به انواع بی شکل نظیر پلی کرنات‌ها دارند. با توجه به هر دو عامل طبیعت شیمیایی و نوع پلیمر، یک پلاستیک می‌تواند به وسیله یک واکنش شیمیایی، یا جذب عوامل شیمیایی حل شود. در حضور برخی مواد شیمیایی و تحت تأثیر تنش، پلاستیک‌ها می‌توانند تدریجاً ترک برداشته، شکسته شوند. این پدیده در حالتی که تنش وارد نمی‌شود رخ نمی‌دهد. پاک‌کننده‌ها و روغن‌ها می‌توانند سبب این نوع شکست در پلی اتیلن‌ها شوند.

ج) **سرامیک‌ها:** سرامیک‌ها نظیر پلاستیک‌ها و فلزات با محیط شان وارد واکنش می‌شوند. مقاومت در برابر حمله شیمیایی یک سرامیک به استحکام پیوندهای اتمی آن بستگی دارد. در این صورت سرامیک‌هایی با پیوند ضعیف مقاومت شیمیایی نسبتاً کمی دارند، در صورتی که سرامیک‌های یونی و دارای پیوند کووالانس نظیر آنهایی که برای مقاصد مهندسی به کار می‌روند، مقاومت خوبی دارند.

اکسیدکرم مثالی از یک سرامیک مقاوم در برابر خوردگی است. اکسیدکرم می‌تواند به شیشه متصل شوند که این ترکیب برای تعمیر جداره شیشه‌ای داخلی تانک‌های مواد شیمیایی بسیار مناسب است. همچنین مقاومت در برابر خوردگی و سایش اکسیدکرم مناسب است.

اکسیدهای مقاوم در برابر خوردگی دیگری، نظیر آلومینا و زیرکونیا نیز وجود دارد که این اکسیدها در محدوده‌های شیمیایی متفاوتی مقاومت می‌کنند اما برای کارکردن طی مدت‌های طولانی در برابر اسیدها یا بازهای قوی توصیه نمی‌شود. نمونه‌های دیگری از سرامیک‌های مقاوم در برابر خوردگی در جدول ۱۳ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. جدول ۱۳ تأثیر محلول‌های شیمیایی پلیمرها (بررسی شده در دو دمای 25°C و 95°C) را نشان می‌دهد.

جدول ۱۳- تأثیر محلول‌های شیمیایی پلیمرها (بررسی شده در دو دمای 25°C و 95°C)

ماده	هیدروکربن‌های آروماتیک		هیدروکربن‌های آلیفاتیک		حلال‌های هالوژنه		استرها و ستون‌ها		الکل‌ها		آمین‌ها		بازهای ضعیف و نمک‌ها		بازهای قوی		اسیدهای قوی		اکسیدان‌های قوی	
	۹۵	۲۵	۹۵	۲۵	۹۵	۲۵	۹۵	۲۵	۹۵	۲۵	۹۵	۲۵	۹۵	۲۵	۹۵	۲۵	۹۵	۲۵	۹۵	۲۵
نایلون (پلی‌امید)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۲	۳	۵	۵	۵	۵
پلی کرنات (PC)	۵	۵	۱	۱	۵	۵	۵	۵	-	-	-	-	۱	۵	۵	۵	۱	۱	۱	۱
پلی استر	۲	۵	۱	۱	۳-۵	۳	۵	۲	-	-	-	-	۱	۳-۴	۲	۵	۳	۴-۵	۲	۳-۵
پلی ترفلئورو اتیلن (PTFE)	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

۵	۲	۴	۳	۵	۴	۳	۲	-	-	-	-	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	پلی میدها	
۲	۱	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۵	-	۲/۵	-	۳	۲	۵	۴	۳	۲	۵	۴	اکسید پلی فنیلین (PPO)
۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱-۳	-	۱	۱	۱	۱	۲	۱	۱	۱	۲	۱	سولفید پلی فنیلین (PPS)
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۵	-	۱	۱	۴	۳	۵	۵	۱	۱	۴	۴	پلی سولفون (PSO)
۴	۲	۲-۳	۱-۲	۴	۲	۳	۲	-	-	-	-	۴-۵	۳-۴	۴	۲	۳	۲	۲-۴	۱-۲	فتالات دیالیل (DAP)
۵	۴	۱	۱	۵	۳	۳	۲	-	-	۱	۱	۲	۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	فنولیک ها

راهنما: ۱- بی تأثیر- خنثی ۲- کم تأثیر ۳- تأثیر متوسط ۴- نرم یا برجسته کننده ۵- احتیاط شدید

جدول ۱۴ سرعت خوردگی سرامیک‌ها در محلول‌های شیمیایی مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱۴- سرعت خوردگی سرامیک‌ها در محلول‌های شیمیایی

آزمایش در محیط % وزنی	دمای آزمایش °C(F)	Si/SiC%۱۲Si	کاربید تنگستن	آلومینا ۹۹%	کاربید سیلیکون (با سیلیس غیر آزاد)
اسید سولفوریک ۹۸%	۱۰۰(۲۱۲)	۵۵	>۱۰۰۰	۶۵	۱/۸
سود ۵۰%	۱۰۰(۲۱۲)	>۱۰۰۰	۵	۷۵	۲/۵
اسید فلئوئوریدیک ۵۳%	۲۵(۷۷)	۷۱	۸	۲۰	< ۰/۲
اسید فسفریک ۸۵%	۱۰۰(۲۱۲)	۸/۸	۵۵	>۱۰۰۰	< ۰/۲
پتاس ۴۵%	۱۰۰(۲۱۲)	>۱۰۰۰	۳	۶۰	< ۰/۲
اسید کلریدریک ۲۵%	۷۰(۱۵۸)	۰/۸	۸۵	۷۲	< ۰/۲
آمونیاک ۷۰%	۱۰۰(۲۱۲)	۰/۵	>۱۰۰۰	۷	< ۰/۲
اسید فلئوئوریدیک ۱۰% آمونیاک ۷۵%	۲۵(۷۷)	>۱۰۰۰	>۱۰۰۰	۱۶	< ۰/۲

زمان آزمایش: ۱۲۵ تا ۲۰۰ ساعت، آزمایش غوطه‌وری و محلول به‌طور مداوم به هم زده شده است.

سرعت نرخ	توضیحات
$> 1000 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} \text{ yr}$	در مدت چند روز کاملاً از بین می‌رود.
$> 1000 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} \text{ yr}$	برای ارائه سرویس بیش از یک ماه توصیه نمی‌شود.
$> 1000 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} \text{ yr}$	برای ارائه سرویس بیش از یک سال توصیه نمی‌شود.
$> 1000 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} \text{ yr}$	برای کاربرد موارد خاص، با در نظر گرفتن شرط احتیاط توصیه می‌شود.
$> 1000 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} \text{ yr}$	برای دوره‌های طولانی ارائه خدمت توصیه می‌شود.
$< 0.2 \frac{\text{mg}}{\text{cm}^2} \text{ yr}$	برای دوره‌های طولانی ارائه خدمت بدون خوردگی توصیه می‌شود.

جلسه چهارم موضوع: آلیاژهای مهندسی

هدف: آشنایی با مفهوم آلیاژ و بررسی اجمالی مهم‌ترین آلیاژهای مهندسی

مفاهیم

همان‌گونه که می‌دانید آلیاژ به مخلوط چند عنصری با خواص نهایی فلزی گفته می‌شود. مثلاً مخلوط آهن و کربن به نام فولاد یا چدن محسوب می‌شود لیکن اکسید آهن که مخلوط آهن و اکسیژن می‌باشد آلیاژ نیست. هدف از آلیاژسازی بهبود برخی از خواص یا نقاط ضعف یک فلز پایه است. مثلاً: افزودن کروم به آهن سبب بهبود مقاومت به خوردگی فولاد می‌شود. افزودن روی به مس سبب بهبود مقاومت به خوردگی و افزایش استحکام مس می‌شود. افزودن مس به آلومینیم سبب بهبود استحکام و سختی آلومینیم می‌شود.

روش تدریس

با ارائه مثال‌های کاربردی از آلیاژهای مهندسی موجود در اطراف خود ذهن هنرجویان را با مفهوم آلیاژهای گوناگون و کاربردهایشان آشنا نمایید.
مثلاً:

- ۱ قابلمه - دیگ و ظروف مسی (شکل پذیری - مقاومت به خوردگی - هدایت حرارتی)
 - ۲ سازه ساختمان، مخازن ذخیره آب، قطعات انتقال قدرت خودرو فولادی
 - ۳ درب و پنجره آلومینیمی (مقاومت به خوردگی - چگالی کم - شکل پذیری)
- از هنرجو بخواهید مثال‌های دیگری از محیط اطراف خود در هنرستان یا منزل بیان کنند.

دانش افزایی

تاریخچه متالورژی

اسناد مربوط به استفاده‌های اولیه بشر از فلزات به این واقعیت اشاره دارد که انسان ابتدایی آنها را برای اهداف خود متناسب کرده است. به عنوان مثال، اسنادی مربوط به اوایل عصر آهن وجود دارد، که نگاهی اجمالی به اولین قدم انسان در دنیای مرموز سنگ‌های معدنی و آتش شامل اکتشاف و به کارگیری آنها فراهم می‌کند. انسان اولیه به سنگ معدن از زیرزمین و آتش از اقدامات هوشمندانه خویش دست پیدا کرد.
این اسناد شامل موارد زیر است:

آهن از زمین خارج می‌شود و مس با ذوب سنگ آن به دست می‌آید. انسان پایانی برای عدم آگاهی خویش می‌یابد و دورترین مرزهای تاریکی عمیق را برای یافتن سنگ‌های معدنی جستجو کرد.

در مورد زمین: از لایه بیرونی آن نان می‌آید، اما زیر آن همچون آتش شعله ور است. با رفتن به زمان‌های دورتر، نوشته‌ها و مصنوعات روزهای ماقبل تاریخ نشان می‌دهد که غارنشینان ۲۰,۰۰۰ سال پیش با سنگ و استخوان برای ساخت ابزار و سلاح خود کار می‌کردند. بدون شک، انسان تا ۵۵۰۰ سال پیش به طور محدودی در خصوص استفاده از فلزات آموخته بود پس از آن از زمانی که مصریان دانه‌های مس را ساختند و در زیورآلات‌شان از آن استفاده کردند و حاکمان‌شان در آب انتقال یافته توسط لوله‌های مسی از رودخانه نیل در استخرهای خصوصی خود حمام کردند، دانش بشر در خصوص استفاده از فلزات افزایش یافت و قطعات مس و آهن شهاب سنگ، و همچنین طلا و نقره، مورد استفاده قرار گرفت. طلا، به شکل قطعاتی یافت می‌شد که در کف رودخانه‌ها قرار گرفته‌اند و به وسیله چکش سنگی به زیورآلات تبدیل می‌شدند. برخلاف مس، طلا با چکش کاری به طور قابل ملاحظه‌ای سخت نمی‌شود و بنابراین امکان استفاده از آن برای ساخت ابزار توسط انسان وجود نداشت. نقره خام نیز در حلقه‌ها، دستبند و سایر زیورآلات استفاده شده است، اما نه به میزان طلا.

امروزه می‌دانیم که طلاسازان از جمله اولین فلزکاران بودند، بعضی از قدیمی‌ترین کاوش‌های باستان‌شناسی مصر، ایران، عراق و یونان این موضوع را نشان داده‌اند.



چرخ گاو آهن برنزی تزئینی مربوط به قرن دوم قبل از میلاد



گلدان طلا پیدا شده در مارلیک ایران مربوط به ۱۰۰۰ سال قبل میلاد



شیر برنزی مربوط به قرن ۱۲ دوره سلجوقیان

انسان هنر استخراج سنگ‌های معدن برای تولید فلزات را در پایان عصر حجر آموخته و آنچه ما می‌دانیم این است که، این اکتشافات اولیه انسان در مورد مس، اولین فلز صنعتی، فقط مس را شامل نبوده و در واقع انسان را درگیر شیمی کرده است، که به او وجود نقره، سرب، قلع و احتمالاً آهن را نشان داده است. ما متوجه شدیم که پس از مطالعات طولانی و بدون شک غیرمعقول با ناخالصی‌هایی مانند آنتیموان و آرسنیک، قلع خود را به‌عنوان افزودنی ایده‌آل به برنز نشان داد.

به نظر می‌رسد کشف واقعی فلزات در هزاره ششم از زمانی که استفاده انسان از فلزات و ثبت اسناد آن پیشرفت کرد تا ۲۰۰ سال قبل میلاد آغاز شده است. این فقط در یک منطقه رخ نداده است، بلکه در ناحیه‌ای کشیده شده از آناتولی غربی و مرکزی (ترکیه) در امتداد رشته کوه‌های تاروس و زاگرس، تا بیابان مرکزی ایران.

متالورژی و آتش کاری

وقتی به فعالیت‌های اولیه انسان از نظر متالورژی و آتش کاری نگاه می‌کنیم، به آهنگران هزاره چهارم قبل از میلاد می‌رسیم. آنها بدون شک اثرات چکش کاری، حرارت دادن یا پختن، اکسیداسیون، ذوب و آلیاژ کردن را بر روی فلزات می‌دانستند و همچنین از پدیده تجزیه ساده سنگ‌های معدن، کاهش، تجزیه دوگانه و تصفیه آنها آگاه بوده است. بدون شک درخصوص انحلال پذیری و عدم انحلال پذیری محلول‌ها نیز اطلاعاتی داشته‌اند. مطالعه تاریخ اولیه متالورژی در قرن بیستم توجه ما را به دمای آتش کاری در آن زمان به‌عنوان کلید ظهور فلزات جلب می‌کند. بنابراین، با توجه به این نکته، عصر مس حدود ۴۰۰۰ یا ۵۰۰۰ سال قبل از عصر آهن است، زیرا مس تنها در ۱۰۸۳ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شود درحالی که نقطه ذوب آهن ۱۵۳۵ درجه سانتی‌گراد است. با این حال، آهنگران اولیه، یک عنصر را در یک درجه حرارت خاص استخراج نمی‌کردند، بلکه کل ماده را در دمای متغیر صعودی قرار می‌دادند.

تبدیل متالورژی از هنر به دانش

اگرچه انسان اولیه توانست مهارت‌های پیچیده‌ای از عملیات آتش کاری را مدیریت کند، اما درس‌های علمی آن برای هزاران سال سر بسته باقی ماند. ممکن است گفته شود که صنعت گران فلزات و فرایندهای متالورژی را به روش عملی کشف کرده‌اند، اما آنها را به صورت علمی درک نکرده‌اند. شبه علمی به نام کیمیاگری نتیجه طبیعی اولین موفقیت‌های خیره‌کننده در انتقال عناصر پایه به فلزات بود. حتی کارگران ساده هم اعتقاد داشتن که قلع، آنتیموان و آرسنیک ارتباطی با سرب دارند. لذا تا زمان Agricola (۱۴۹۴ تا ۱۵۵۵) از اسامی لاتینی به‌عنوان *plumbum candidum* (قلع) و *plumbum cinereum* (آنتیموان) استفاده می‌کردند.

فولاد در آن زمان شناخته نشده بود. کلمه *kassiteros* در ابتدا به معنی سنگ معدن حاوی قلع و همچنین سنگ معدن قلع بود.

اواخر قرن هجدهم میلادی، انسان به این نتیجه رسید تصورات غلط خود را کنار بگذارد و از شیمی پیچیده متالورژی بهره ببرد. حتی در آن زمان، بسیاری از محققان به نام همچنان به این موضوع که آهن و مس قابل تبدیل به یکدیگرند ادامه دادند. امروزه می‌دانیم که دانش ما در مورد خواص ساختاری و فیزیکی فلزات به آرامی در گذر زمان به‌دست آمده است.

عمر فرایند متالوگرافی تنها یک قرن است، و عمر پراش اشعه ایکس، که ساختار اتمی فلزات را برای ما روشن کرد، تنها پنجاه سال است.

اعتقاد بر این است که شروع واقعی عصر آهن در حدود ۱۵۰۰ سال قبل از میلاد مسیح با ذوب اولین سنگ آهن است. در طول این دوره، آهن ساخته شده به طور عمده برای سکه‌ها، ظروف پخت و پز و وسایل نظامی مورد استفاده قرار گرفت. بدون شک در سال‌های اولیه عصر آهن، متالورژها فرایندهای سمانتاسیون برای ساخت فولاد و هنر سریع سرد کردن فولاد برای سخت کردن و بازپخت آنرا برای ساخت سلاح کشف کرده‌اند.

پیشرفت متالورژی تا حدود سال ۱۳۰۰ بعد از میلاد مسیح آهسته بود، توسعه آهنگری کاتالان در اسپانیا نقطه عطفی در پیشرفت متالورژی است زیرا پیشگام کوره‌های باز امروزی ما بود و برای اولین بار در تاریخ، انسان توان تولید یک مقدار قابل توجه آهن در یک گرم را داشت.

پیشگام کوره‌های دمشی که امروزه آنها را می‌شناسیم، کوره مداوم عمودی بود که در حدود سال ۱۳۲۳ میلادی در آلمان توسعه یافت. محصول این کوره با محتوای کربن بالا، به عنوان «چدن» شناخته شد و استفاده از ریخته‌گری آهن را به میزان قابل توجهی گسترش داد.

اوایل قرن شانزدهم، کنجکاوای طبیعی انسان، علم مدرن متالورژی را به وجود آورد. با این حال، انتقال متالورژی از هنر به علم هنگامی که آن را با پیشرفت تکنولوژی در زمینه‌های دیگر در طول سال‌ها مقایسه می‌کنیم بسیار کند است. تحولات در معدن و فراوری سنگ‌های معدنی، با مانع وجود منابع معدنی را در مکان‌ها و عمق‌هایی که قبلاً برای انسان ناشناخته و غیر قابل دسترسی بودند، مواجه بود. اما اختراع موتور بخار توسط جیمز وات در سال ۱۷۸۰ به خروج آب معادن کمک کرد. به کمک پیشرفت ماشین بخار جیمز وات عصر قدرت و انقلاب صنعتی آغاز شد.

با آغاز عصر قدرت تقاضا برای فلزات بسیار بیشتر شد و در عین حال امکان ایجاد قدرت بیشتری برای تولید مقادیر بالاتر فراهم شد. مردی به نام هنری کورت، که قصد داشت انگلستان را از کشورهای خارجی برای تأمین آهن مستقل کند، در سال ۱۷۰۰ در سن ۳۹ سالگی یک آهنگری در Hampshire Gosport، ساخت، کورت فرایندهای خود را برای خرد کردن و نورد آهن بهبود بخشید. این آغاز تولید فرایند نورد بود و گامی بزرگ در تولید آهن و فولاد در میله‌ها، اشکال و ورق‌ها بود. از آنجا که روند سمانته سازی فولادها بسیار پرهزینه بود برای مصارف در مقیاس بزرگ، فلز غالب در آن روزها از آهن بود و تا زمان اختراع مبدل بسمر در سال ۱۸۵۵ توسط یکی دیگر از دانشمندان انگلیسی، هنری بسمر، نیز رایج بود. هنری بسمر در طول جستجوی خود برای بهبود مواد برای ساخت اسلحه فرایند خود را توسعه داد.

قبلاً فولاد کمیاب و گران بود و عمدتاً برای اهداف خاص از طریق فرایند بوته ساخته شده بود. درحالی که آهن، چدن و برنز برای سازه‌ها، موتور و سلاح گرم استفاده می‌شد. بسمر مقاله مهم خود را در انجمن بریتانیا در چلدن نام در ۱۳ اوت ۱۸۵۶ به عنوان «تولید چدن و فولاد بدون سوخت» خواند. فرایند او یک فرایند جدید و ارزان بود که با سرعت

زیادی از آهن خام به وسیله دمیدن هوا روی آن در حالت مذاب برای پاک کردن آن از کربن، و سپس اضافه کردن مقدار لازم کربن، فولاد تولید می‌نماید. در نتیجه این و سایر اختراعاتش، او به‌عنوان شوالیه دست پیدا کرد. درخواست بسمر برای ثبت اختراع فرایند او این مطلب را که ویلیام کلی، آمریکایی نیز از سال ۱۸۴۷ با روش مشابهی کار کرده است؛ را افشا کرد. پس از آن یک حق ثبت اختراع در سال ۱۸۵۷ نیز به کلی داده شد.

جلسه پنجم موضوع: آهن و آلیاژهای آن

هدف: آشنایی با آهن و فولاد (تاریخچه و کاربرد)

در این درس هدف آن است تا مهم‌ترین آلیاژ مهندسی یعنی فولاد به هنرجو معرفی شود.

روش تدریس

از هنرجو بخواهید (در جلسه قبل) با جست‌وجو در اینترنت راجع به تاریخچه آهن و تأثیر آن در زندگی بشر اطلاعاتی استخراج و در کلاس مطرح نمایند.

توضیح جدول ۳:

کربن تعیین‌کننده کاربرد فولاد است. علت این مسئله اثر کربن بر افزایش استحکام و سختی و کاهش شکل‌پذیری و چقرمگی است. از این رو اگر هدف از استفاده از فولاد شکل‌پذیری است باید کربن فولاد کم و اگر هدف از استفاده از فولاد استحکام و سختی است باید کربن فولاد زیاد باشد.

از این منظر فولادها دارای ۴ کلاس می‌باشند.

الف) فولادهای کم کربن $C < 0.1\%$

این فولادها بیشتر برای بحث شکل‌پذیری استفاده می‌شوند. ورق‌هایی از این جنس معمولاً از ۲ میلی‌متر هستند و به روش نورد سرد پرداخت می‌شوند.

مثال‌هایی مانند:

■ بدنه لوازم خانگی (یخچال و فریزر، ماشین لباسشویی، ماشین ظرفشویی، کانال کولر، بدنه کولر)

■ مفتول جوشکاری

■ سیم خاردار

■ ورق کف پل‌های عابر پیاده

■ بدنه خودرو

استحکام این فولادها کم و شکل‌پذیری، جوش‌پذیری و چقرمگی مطلوب دارند. کدهایی مانند

ST۱۲، ST۱۳، ST۱۴