

بناام خدا

ءانگاه فنی یاسوج

# جزوه درس مهندسی مواد

Engineering materials

كارشناسی عمران

مدرس : یوسف صیادی

# فصل اول

## مقدمه

## انواع مواد

مواد نام عام و وسیعی است که به هر چه از اتم ها یا مولکول ها تشکیل می شود، اطلاق می گردد و در این بیان موجودات جاندار و بی جان، گاز، مایع یا جامد، زیستی و غیر زیستی را در بر می گیرد که در مهندسی مواد فقط بخش کوچکی از آنها استفاده می شود.

مواد چه هستند، چگونه هستند، چه خواهند شد و با آن چه می توان کرد؟

از ابتدای حیات بشر تاکنون، مواد در کنار انرژی به طور پیوسته جهت بهبود سطح زندگی انسان ها مورد استفاده قرار گرفته است. با نگاهی به اطرافمان انواع مواد را می توان مشاهده نمود. منظور از مواد در اینجا مواد مهندسی است. یعنی موادی که در عمل و در کاربردهای حرفه ای مهندسان مورد استفاده قرار می گیرد. فولاد، پلاستیک، شیشه، چوب، بتون، مس، کاغذ و آلومینیم نمونه هایی از متداولترین این مواد مهندسی هستند. همچنین با توجه به تحقیقاتی که انجام می شود در حالیکه اغلب مواد قدیمی بهبود می یابند پیوسته مواد جدید دیگری نیز بر مجموعه آن ها افزوده می شود.

به چه موادی می توان "مواد مهندسی" گفت؟

برای اینکه یک ماده را بتوان ماده مهندسی نامید باید سه شرط زیر را همزمان دارا باشد:

۱. غیرزنده باشد. (به عنوان مثال پوست گاو تا زمانیکه گاو زنده است ماده مهندسی نیست اما پس از مرگ گاو، می توان آنرا ماده مهندسی به شمار آورد. زیرا زنده بودن سبب تغییر می شود. ماده مهندسی باید ثبات داشته باشد.)
۲. حالت جامد داشته باشد. (مایعات و گازها مواد مهندسی محسوب نمی شوند).
۳. کاربرد مهندسی داشته باشد.

## تاریخچه

هزاران سال مواد مظهر طبقه بندی دوره های تاریخی بوده است که برخی از آنها بلند است و از چندین ده هزار تجاوز میکند و برخی دیگر بسیار کوتاه است و به سرعت جای خود را به دوره دیگر و ماده دیگر سپرده است. دوره دیرینه سنگی، دوره نوسنگی، دوره سفال، دوره مفرغ و دوره آهن که زمان هایی از پیدایش انسان تا کمتر از دوهزار سال پیش را شامل می شوند تا دوره هایی نظیر عصر

الومینی، عصر اتم، عصر نیمه هادی ها، عصر کامپوزیت و دوره مواد سنتزیک که صدها و ده های اخیر را در بر می گیرند.

اگر دو میلیون سال تاریخ فعالیت های بشری در یک سال شمسی فهرست شود، مشخص می شود که عرصه تحولات و شناسایی مواد جدید به جای ماه ها به روزها و به جای روزها به دقیقه ها بستگی دارد و زمان وابستگی تحولات به ثانیه ها بسیار نزدیک است.

تاریخ زندگی بشر و پیشرفت های آن نیز با پیشرفت و توسعه مواد همراه است. عصر حجر، عصر برنز و عصر آهن نمونه هایی از طبقه بندی تاریخ پیشرفته بشر بر اساس مواد هستند. در حالیکه انقلاب صنعتی با پیدایش و کاربرد وسیع فولاد همراه بوده است، انقلاب الکترونیک نیز مبتنی بر پیدایش، ساخت و کاربرد مواد نیمه هادی، ابررساناها و مواد عایق بوده است. امروزه نیز در کنار کاربرد مواد قدیمی، در دنیای مواد نو مانند کامپوزیت ها (مواد مرکب)، مواد هوشمند، بیومواد (مواد زیستی)، سرامیک ها، پلیمرهای نوین مهندسی و سوپرآلیاژها قرار داریم. در نهایت اینکه حرکت به سمت نانو تکنولوژی در قرن بیست و یکم که پدید آورنده تحول دیگری در دنیای صنعتی خواهد بود، جز با پیشرفت در زمینه مواد هوشمند و نانو مواد امکان پذیر نخواهد بود.

حال با توجه به این مطالب و نقش روز افزون مواد در زندگی امروز، در این مقاله، انواع و مواد و نحوه طبقه بندی آن ها شناخت کلی پیدا خواهیم کرد.

## ۱. مواد و مهندسی

تولید و تحت فرآیند قرار دادن مواد جهت دستیابی به محصولات نهایی مناسب، بخش وسیعی از اقتصاد حال حاضر دنیا را تشکیل می دهد. مهندسان به طور پیوسته در حال طراحی محصولات تولیدی و سیستم های تولید نوینی بوده که تمامی آن ها نیازمند مواد هستند. بدین جهت آن ها باید با ساختار و خواص مواد مهندسی آشنا باشند تا قادر به انتخاب نمونه های مناسب برای هر کاربرد باشند و بتوانند روش های تولید بهتری را توسعه دهند.

یک مثال ساده در این زمینه، انتخاب ماده یک لوله به منظور کاربرد در یک سیستم انتقال سیالات است. در این زمینه مهندس طراح با دامنه وسیعی از مواد گوناگون جهت ساخت لوله، شامل انواع آلیاژهای فلزی همانند انواع فولادها و چدن ها (آلیاژهای آهنی)، انواع آلیاژهای غیرآهنی مانند

آلیاژهای آلومینیومی، مسی، تیتانیومی، نیکلی، انواع مواد پلیمری (پلی اتیلن و غیره) و مواد سرامیکی (کاربید سیلیکون و غیره)، انواع مواد مرکب و گرافیت روبرو است. زیرا که لوله های ساخته شده از تمامی این مواد در ابعاد و اندازه های مختلف در بازارهای تجاری در دسترس هستند. در نتیجه او باید با توجه به شرایط کاربرد لوله مذکور و خواص مورد نیاز برای آن، مانند مقاومت به انواع خوردگی، سبکی، مقاومت به ضربه، استحکام، دمای کاربرد و مقاومت به شوک های حرارتی همراه با در نظر گرفتن سایرموارد مانند قابلیت تولید، قابلیت اتصال دهی و هزینه های مرتبط، جنس (ماده) لوله مورد استفاده را انتخاب کند. بنابراین آشنایی مهندس طراح با ساختار و خواص مواد اجتناب ناپذیر خواهد بود.

مهندسان تحقیق و توسعه به طور گسترده ای در زمینه ابداع مواد مهندسی جدید یا اصلاح و بهبود خواص مواد موجود فعالیت می کنند، مهندسان طراح نیز در مرحله بعدی در کنار مواد موجود، این مواد اصلاح یافته و جدید را به منظور طراحی و خلق سیستم ها و محصولات نوین مورد استفاده قرار می دهند. گاهی این وضعیت بر عکس بوده و مهندسان طراح بدنبان برخورد با مسئله ای در طراحی شان، نیازمند آن هستند که مواد جدیدی توسط دانشمندان و مهندسان ایجاد شوند.

مثال در این زمینه توربین های گاز هستند که برای تبدیل انرژی حرارتی به مکانیکی استفاده می شوند و به انواع زمینی، هوایی و دریایی تقسیم می شوند. کاربرد اصلی این وسایل در ساخت موتورهای جت و توربین های نیروگاهی است. در طول نیم قرن اخیر مهندسان تلاش قابل توجهی به منظور افزایش بازدهی و کارایی آن ها انجام داده اند که در این بین، مواد نقش اساسی را بر عهده داشته اند. در حقیقت تاریخ پیشرفت توربین های گازی همان تاریخ توسعه مواد مقاوم در درجه حرارتهای بالا است. با توجه به اینکه امروزه کارایی سوپرآلیاژهای توسعه یافته به منظور استفاده در توربین های گازی به حد اشباع رسیده و سرعت افزایش کارایی آن ها رو به کاهش است، بنابراین زمان جایگزینی این فلزات در این زمینه رسیده و حرکت به سمت کاربرد مواد مرکب و ترکیب های بین فلزی آغاز شده است.

اتومبیل نمونه دیگری در این زمینه است. جهت کاهش وزن اتومبیل به منظور کاهش مصرف انرژی تجدید ناپذیر که اثرات مطلوبی بر روی بهبود شرایط زیست محیطی و کاهش هزینه انرژی مصرفی دارد، مهندسان بدنبال موادی با استحکام به وزن بالا، قابلیت شکل دهی مناسب و هزینه تولید

مطلوب برای جایگزینی با فولاد کم کربن هستند. برای تأمین این خواسته، در اواخر دهه هشتاد و اوایل دهه نود استفاده از فولادهای پر استحکام کم آلیاژ و آلیاژهای آلومینیوم و در اواخر دهه نود کاربرد آلیاژهای منیزیم و مواد مرکب در این زمینه توسعه یافت. این ها تنها نمونه هایی از موارد بیشمار تحقیق و توسعه در زمینه ابداع مواد مهندسی جدید و اصلاح مواد قبلی و کاربرد آنها در صنایع گوناگون است.

بنابراین جستجو برای مواد مهندسی جدید بطور پیوسته ادامه دارد. زیرا همانطور که قبلا هم بیان شد مهندسان مکانیک در جستجو برای مواد دمای بالایی هستند که بازدهی عملکرد موتورهای جت را افزایش دهند و مهندسان برق در جستجوی موادی هستند که با استفاده از آنها وسایل الکتریکی بتوانند سریعتر و در دماهای بالاتر عمل کنند. در حالیکه مهندسان هوافضا به دنبال موادی با نسبت استحکام به وزن بالاتر برای هواپیماها و فضاپیماها میباشند و مهندسان شیمی، موادی را می خواهند که مقاومت به خوردگی بالایی داشته باشد.

این مثال ها تنها تعداد موارد محدودی از تقاضای روزافزون مهندسان شاخه های گوناگون مهندسی برای مواد اصلاح شده و جدید جهت کاربردهای مختلف است. در این ارتباط بسیاری از موارد که دیروز غیر ممکن بود، امروزه در دسترس بوده و امکان پذیر است. بنابراین تاکنون دانستید که مهندسان در تمامی گرایش های مهندسی باید دارای دانش پایه و کاربردی در زمینه مواد مهندسی باشند تا با استفاده از مواد مطلوب بتوانند فعالیت های حرفه ای شان را با کارایی بهتر و بازدهی بیشتر انجام دهند. گرچه دانشمندان و مهندسان مواد متخصصانی هستند که کلا در زمینه تحقیق و طراحی مواد مهندسی فعالیت میکنند، با این حال آشنایی کلی سایر متخصصان با مواد مهندسی، در بسیاری زمینه ها مفید واقع می گردد.

## انواع مواد مهندسی

مواد بر اساس ساختار و خواص متفاوتی که شامل آن هستند به پنج گروه اصلی زیر تقسیم بندی می شوند:

۱. فلزات

۲. سرامیک ها

۳. پلیمرها

۴. کامپوزیت ها

۵. نیمه هادی ها

اما موادی نیز در این پنج گروه وجود دارند که اهداف کاربردی یکسان دارند بر این اساس آن ها را در گروه های فرعی دیگری طبقه بندی می کنند.

چهار گروه فرعی از این مواد:

۱. بیو مواد

۲. مواد اپتیک

۳. مواد مغناطیس

۴. مواد هوشمند

# فصل دوم

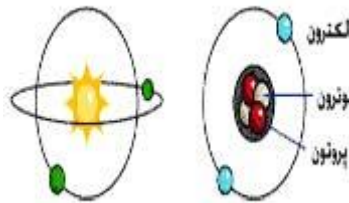
## ساختار اتمی مواد



## مشخصات و ساختار مواد

در این مطلب، برخی مشخصه های اصلی فیزیکی ماده که چگونگی واکنش ماده با تشعشع را تعیین می کند، مورد بررسی قرار می دهیم. اندرکنش های تابشی (هم تابش و هم جذب) برای اتم های منفرد اتفاق می افتد. بنابراین با یک مرور مختصر ساختار اتمی و با تأکید بر این که مشخصه های اتمی، اندرکنش های ماده را تحت تأثیر قرار می دهد، مطلب را شروع کرده و سپس خواص عمومی اتم ها را درون یک ماده مورد بحث قرار می دهیم.

اتم ها از دو قسمت عمده تشکیل شده اند: هسته و پوسته های الکترونی.



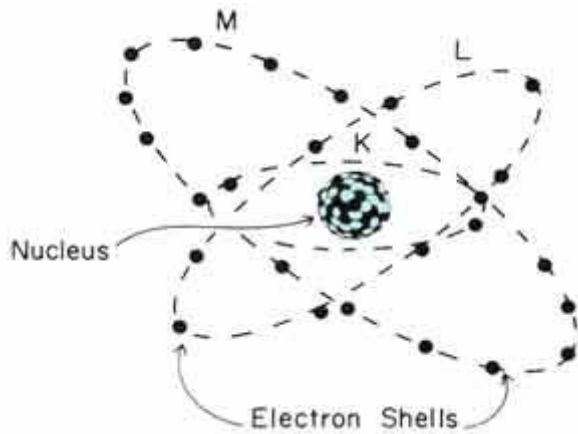
هر ناحیه در اندرکنش های تابشی نقش مهمی ایفا می کند. هسته، منبع انرژی برای تشعشع مورد استفاده در فرایندهای پزشکی هسته ای است. اگرچه هسته منبع انرژی اشعه ایکس نیست اما در تولید فوتون های اشعه ایکس نقش دارد. در بسیاری موارد، پرتو تابشی توسط اندرکنش با الکترون های مستقر در پوسته های اطراف هسته جذب می شود. نقل و انتقال در این الکترون های پوسته نیز یک نوع تابش اشعه ایکس تولید می کند.

## ساختار هسته ای

مدلی رایج و قراردادی از یک اتم، از هسته ای که شامل نوترون ها و پروتون هاست و توسط الکترون های مستقر در مدارها یا پوسته های خاصی احاطه شده، تشکیل شده است (در شکل ۱ این مدل را مشاهده می کنید). هسته ها به صورت یک توپ یا مجموعه ذراتی در مرکز اتم نشان داده شده اند. هسته در مقایسه با ابعاد کلی یک اتم، کاملاً کوچک است؛ با وجود این، بیش تر جرم اتم درون هسته ی آن جای گرفته است. اجزای اتم در شکل ۱ با مقیاس دقیق رسم نشده اند؛ در واقع الکترون ها در لایه های  $K$ ،  $L$  و  $M$  بسیار کوچک تر از پروتون ها و نوترون هایی هستند که هسته را می سازند و الکترون ها نسبت به آن چه در شکل نشان داده شده است، در فاصله ی بیش تری از هسته قرار دارند.

## ترکیب و نسبت اجزای سازنده ی اتم

تمامی هسته ها از دو ذره ی اساسی تشکیل شده اند: نوترون ها و پروتون ها. نوترون ها و پروتون ها تقریباً اندازه ی مشابهی دارند اما بار الکتریکی آن ها متفاوت است. نوترون ها هیچ باری ندارند و فقط در جرم هسته سهم دارند. هر پروتون، یک بار مثبت دارد که مساوی با قدرت بار منفی حمل شده توسط یک الکترون است.



شکل ۱: ساختار یک اتم

اکثر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی یک ماده به ترکیب پروتون-نوترون هسته مربوط است. تعداد پروتون‌ها در یک هسته، عدد اتمی ( $Z$ ) نام دارد و خصوصیات شیمیایی اتم را کنترل می‌کند. هر عدد اتمی با عنصر شیمیایی متفاوتی متناظر است؛ تا کنون تقریباً ۱۰۶ عنصر شیمیایی شناخته شده که با هسته‌هایی که شامل ۱ تا ۱۰۶ پروتون هستند، متناظرند.

به دلیل اندازه‌ی بسیار کوچک هسته، بیان جرم هسته‌ها و ذرات اتمی با واحد اندازه‌گیری رایج کیلوگرم، مناسب نیست. یک واحد مناسب‌تر، واحد جرم اتمی (amu) است؛ این واحد بر اساس مرجع بودن یک اتم کربن با عدد جرمی ۱۲ که با جرم ۱۲۰۰۰ amu مشخص می‌شود، پایه‌گذاری شده است. رابطه‌ی بین واحد جرم اتمی و کیلوگرم به صورت زیر است:

$$1 \text{ amu} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

تفاوت جرم یک نوترون و پروتون بسیار کوچک است: تقریباً ۰,۱٪. تفاوت بزرگ تر در جرم این دو ذره و جرم یک الکترون است. بیش تر از ۱۸۰۰ الکترون لازم است تا جرمی مساوی با جرم یک پروتون یا نوترون داشته باشد.

تعداد کل ذرات (نوترون ها و پروتون ها) در یک هسته، عدد جرمی (A) نام دارد. از آن جایی که پروتون ها و نوترون ها تقریباً جرم یکسانی دارند، جرم یا وزن کلی هسته (در حدود معینی) متناسب با عدد جرمی است. با این وجود و در حالت کلی، جرم هسته ای با عدد جرمی متناسب نیست زیرا نوترون ها و پروتون ها جرم واقعاً یکسانی ندارند و مقداری از جرم هنگام تشکیل هسته به انرژی تبدیل می شود. رابطه ی بین جرم و انرژی با جزئیات بیش تر در ادامه توضیح داده خواهد شد.

روش استاندارد برای نشانه گذاری و تعیین ترکیبات هسته ای مختلف وجود دارد: عدد جرمی یا با یک بالانویس قبل از نماد شیمیایی بیان می شود، مانند  $^{14}\text{C}$  یا  $^{131}\text{I}$  و یا توسط عددی که به دنبال نماد شیمیایی می آید، تعیین می شود، مانند C-14 یا I-131 و ... عدد اتمی به صورت یک زیرنویس پیش از نماد شیمیایی اضافه می شود؛ اما از آن جایی که تنها یک عدد اتمی به هر نماد یا عنصر شیمیایی وابسته است، افزودن عدد اتمی به نماد شیمیایی تا حدودی اضافی است.

به استثنای هیدروژن معمولی، تمام هسته ها شامل نوترون و پروتون هستند. عناصر سبک تر (با اعداد اتمی و جرم کم تر) تقریباً شامل تعداد مساوی پروتون و نوترون هستند. به همان ترتیب که اندازه ی

هسته افزایش پیدا می کند، نسبت نوترون ها به پروتون ها به یک مقدار بیشینه ای حدود ۱,۳ نوترون

به ازای هر پروتون برای موادی با اعداد اتمی بسیار بالا افزایش پیدا می کند. تعداد نوترون ها در یک

هسته ی خاص می تواند با کم کردن عدد اتمی از عدد جرمی به دست

یک عنصر شیمیایی ممکن است هسته هایی با تعداد متفاوت نوترون نیز داشته باشد که این تغییر در

ترکیب نوترونی معمولاً هنگامی که هسته، رادیواکتیو است، پیش می آید.

# فصل سوم

## ساختار کریستالی مواد

## مواد کریستالی

تک کریستال :

در یک کریستال جامد آرایش متناوب و تکراری اتمها کامل باشد و در کل نمونه بدون هیچ وقف یا گسستگی، بسط یافته باشد، ساختار حاصل را تک کریستال گویند . همه سلولهای واحد به همدیگر چفت شده دارای یک راستا و جهت هستند . تک کریستالها در طبیعت وجود دارند اما بصورت مصنوعی هم ساخته میشوند. کاربرد مهم تک کریستالها در تهیه پره توربینها و رشد نیمه هادیهای سیلیسیوم و ژرمانیوم است.

## مواد بسبلور

بسیاری از جامدهای از مجموعه ای از چندین کریستال کوچک یا دانه تشکیل شده اند، که به این مواد بسبلور گفته میشود .

انجماد ماده شامل مراحل زیر است :

۱. در ابتدا کریستالهای کوچک یا هسته در قسمتهای مختلف شکل میگیرد.
۲. هسته تشکیل شده کم کم بصورت شاخه ای رشد می کند.
۳. دانه تشکیل می شود.
۴. پایان انجماد و تشکیل مرز دانه، ناهمسانگردی برخی خواص تک کریستالها در برخی مواد بستگی به جهات کریستالی دارد.

# فصل چهارم

## عیب های داخلی مواد



## انواع عیوب نقطه ای

عیوب نقطه‌ای : به دسته‌ای از ناکاملی‌های بلوری گفته می‌شود که بسته به ماهیتشان منجر به وجود آمدن نقص در تعداد متناهی و کوچک اتم در شبکه بلوری می‌شوند. این تعداد مستقل از اندازه بلور و ریزساختار ماده است.

معمولاً از نشانه‌گذاری کروگر-وینک برای نمایش عیوب نقطه‌ای استفاده می‌شود. این عیوب را می‌توان با استفاده از روش‌هایی مشاهده کرد. از جمله این روش‌ها استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM است.

## انواع عیوب

- ۱- عیب جای خالی یا تهی جایی
- ۲- عیب بین نشینی
- ۳- عیب جانشین
- ۴- ناکاملی بلوری در فلزات
- ۵- ناکاملی بلوری در سرامیک‌ها
  - ۵,۱- عیب شاتکی
  - ۵,۲- عیب فرنکل

## عیب جای خالی یا تهی جایی

بین نشینی و خود بین نشینی - اگر اتم بین نشین از جنس اتم‌های کریستال باشد ، شاهد خود بین نشینی و در غیر اینصورت بین نشینی داریم.

تهی جایی زمانی اتفاق می‌افتد که اتمی در جای خود در شبکه بلوری وجود نداشته باشد . به‌طور مثال فقط در ۷ گوشه از ۸ گوشه یک مکعب، اتم وجود داشته باشد و جای یکی از آن‌ها در گوشه مکعب خالی باشد به این ترتیب این مکعب یک جای خالی دارد. این عیب ساده‌ترین و در عین حال رایج‌ترین

عیوب سطحی است. چنین عیوبی می‌تواند در موقع انجماد تغییر شکل دادن، اشعه دادن با انرژی زیاد ویا در درجه حرارت‌های بالا به وجود بیاید، وجود نقص جای خالی منجر به نزدیک شدن اتم‌های اطراف جای خالی می‌شود که این امر تنش کششی را میان اتم‌های مجاور جای خالی به وجود می‌آورد و لذا نظم اتمی به هم می‌ریزد.

در یک جسم در حالت تعادل همیشه تعدادی جای خالی وجود دارد که تعداد آن‌ها رابطه مستقیمی با درجه حرارت دارد. بنابراین با افزایش یا کاهش دما می‌توان تعداد جاهای خالی را در ساختار کریستال تغییر داد. لزوم حضور جاهای خالی را نیز با استفاده از اصول ترمودینامیک می‌توان اثبات نمود و تنها این عیوب هستند که در حالت حرارتی به وجود می‌آیند و بقیه عیوب کریستالی از نظر ترمودینامیکی در تعادل نیست و در اثر عوامل خارجی به وجود می‌آیند.

تعداد تعادلی جاهای خالی برای مقدار معینی از ماده، وابسته به دما بوده و طبق رابطه زیر با دما افزایش می‌یابد:

### عیب بین نشینی

بین نشینی قرار گرفتن اتمی اضافی در فضای خالی بین اتم‌های دیگر از ساختار کریستالی است که معمولاً باعث اعوجاج و بی‌نظمی در ساختار کریستالی می‌شود. این اتم‌ها می‌توانند از جنس اتم‌های ساختار کریستالی باشند که به صورت اتمی اضافی در ساختار نمود پیدا کرده‌است یا به صورت ناخالصی حل شده باشند. اتم‌های بین‌نشین معمولاً در حفراتی که در ساختار کریستالی وجود دارند قرار می‌گیرند و برای این منظور اغلب شعاع اتمی کمتری از اتم‌های اصلی موجود در ساختار دارند. این اتم اضافی موجب ایجاد تنش فشاری در ساختار اتم می‌گردد و در نتیجه موجب افزایش انرژی در آن نقطه می‌شود.

### عیب جاننشینی

عیب جاننشینی زمانی رخ می‌دهد که اتم حل‌شونده جایگزین یکی از اتم‌های شبکه بلور گردد. چون اندازه شعاع اتمی اتم حل‌شونده با اتم شبکه بلور متفاوت است، جاننشینی موجب بی‌نظمی و خمیدگی در ساختار شبکه بلور می‌شود. اگر اندازه شعاع اتمی اتم جاننشین شده کوچکتر از اتم‌های موجود در ساختار بلور باشد تنش کششی و در صورت بزرگتر بودن اندازه شعاع اتمی اتم جاننشین شده، تنش فشاری خواهد بود.

### ناکاملی بلوری در فلزات

در فلزات بسته به شرایط تمامی عیوب تهی جایی، بین نشینی و جاننشینی امکان وقوع دارند. در فلزات خالص نقص جای خالی یا خود بین نشینی رخ می‌دهد، خود بین نشینی از جابجایی یک اتم خودی در

شبکه بلور ایجاد می‌شود که با این جابجایی در قسمتی دیگر از کریستال تهی جایی ایجاد می‌شود. با اضافه کردن ناخالصی به فلز بسته به نسبت اندازه شعاع اتمی اتم حل شونده و شبکه بلور می‌توان انتظار داشت عیوب بین نشینی یا جانشینی اتفاق افتد. به عنوان مثال با اضافه کردن کربن به آهن، به علت کوچک بودن اندازه شعاع اتمی کربن در مئایسه با آهن، کربن می‌تواند در فضاهای خالی بین اتم‌های آهن قرار گیرد و به این ترتیب بین نشینی رخ دهد. در مقابل با اضافه کردن مس به بلور نیکل به علت اختلاف کمتر میان شعاع اتمی آن دو شاهد جانشینی خواهیم بود.

جانشینی و حل شدن جامدات در فلزات تحت شرایط خاصی رخ می‌دهد که از آن شرایط تحت عنوان قوانین هیوم-روتیری یاد می‌شود.

این شرایط عبارت است از:

۱- تفاوت شعاع اتمی حل شونده و اتم‌های موجود در شبکه کمتر از ۱۵ درصد شعاع اتمی آن‌ها باشد.

۲- اتم‌های حلال و حل شونده دارای الکترونگاتیوی مشابه باشند.

۳- ساختار کریستالی فلزات خالص هر دو ماده شبیه یکدیگر باشند.

۴- دو ماده دارای الکترون‌های ظرفیت یکسان باشند یا در صورت متفاوت بودن، فلزات تمایل بیشتری برای حل کردن فلز دیگری با ظرفیت الکترونی بیشتر دارد.

در محلول‌های جامد بین نشینی، اتم‌های ناخالصی حفره‌ها یا مکان‌های بین نشینی موجود در بین اتم‌های میزبان را پر می‌کنند. برای مواد فلزی که دارای فاکتور تراکم اتمی بالا هستند، این موقعیت‌های بین نشینی نسبتاً کوچک می‌باشند. در نتیجه، قطر اتمی یک ناخالص بین نشینی باید به اندازه کافی کوچکتر از قطر اتم‌های میزبان باشد.

## ناکاملی بلوری در سرامیک‌ها

سرامیک‌ها دارای ساختار یونی هستند. بنابراین باید در تمامی قسمت‌های بلور سرامیک‌ها شرایط الکترو خنثایی در نظر گرفته شود. در سرامیک‌ها مانند فلزات نقص تهی جایی می‌تواند به وجود آید. یعنی در شبکه بلور سرامیک‌ها ممکن است به جای کاتیون یا آنیون حفره باشد. این عیب زمانی می‌تواند به وجود آید که آنیون یا کاتیونی بین نشینی نیز در سرامیک‌ها مشاهده می‌شود. بین نشینی در سرامیک‌ها با جابجایی یکی از کاتیون‌ها و قرارگیری آن در یک موقعیت بین نشینی رخ می‌دهد و

به این صورت در یک نقطه شاهد تراکم کاتیون و در نقطه دیگر شاهد جای خالی در بلور سرامیک خواهیم بود .

بر این اساس در سرامیک‌ها دو عیب دیگر را نیز می‌توان طبقه بندی کرد .

### عیب شاتکی

اگر در ساختار شبکه بلور یک سرامیک هم‌زمان با یکدیگر یک کاتیون و آنیون موجود نباشد، در آن ساختار عیب شاتکی خواهیم داشت عیب شاتکی می‌تواند بدین طریق به وجود بیاید که یک اتم باردار شبکه به وسیله یک اتم با بار (ظرفیت) کمتر یا بیشتر جایگزین شود.

### عیب فرنکل

عیب فرنکل زمانی به وجود می‌آید که یک کاتیون از موقعیت خود به یک موقعیت بین نشینی برود. در شرایط عادی یک آنیون به علت اندازه بزرگتر در مقایسه با کاتیون، به هیچ عنوان نمی‌تواند از موقعیت خود به یک موقعیت بین نشینی نقل مکان کند و موجب عیب فرنکل گردد .

# فصل پنجم

## دیاگرام فاز

## دیاگرام فازی

دیاگرام فازی نمایش گرافیکی از داده است که اطلاعات قابل ملاحظه ای درباره یک ترکیب یا طبیعت تاثیرات متقابل بین بیش از یک ترکیب را فراهم می آورد. دیاگرام های فازی نقشه های راهنمایی هستند که به کمک آن ها تشکیل و پایداری فاز های مختلف بررسی می شوند. این نمودار ها در شرایط تعادلی به دست می آیند و به همین دلیل آن ها را نمودار های تعادلی فازی می نامند. اگر چه در بسیاری از فرآیند ها و تولیدات صنعتی شرایط تعادلی به طور کامل پدید نمی آید ولی با استفاده از دیاگرام های تعادلی فازی اطلاعات مفیدی از ترکیب، مقدار، تعداد و پایداری حرارتی فاز هایی که ریزساختار ماده را تشکیل می دهند به دست خواهد آمد. به جرات می توان گفت که بدون وجود دیاگرام های فازی پیش بینی رفتار مواد در مجاورت هم و در دما های بالا امکان پذیر نیست. بی هیچ تردیدی نمودار های فازی عامل مهمی در پیشرفت علم مواد و تولید قطعات مهندسی به شمار می آیند.

## فاز

هر بخشی از سیستم، از جمله کل سیستم که در درون خود همگن بوده و توسط سطحی احاطه شده باشد، به طوری که بتوان از نظر مکانیکی آن را از دیگر بخش ها جدا نمود فاز نامیده می شود. لازم نیست که بخش قابل تمایز یکپارچه باشد. به عنوان مثال یک مایع پخش شده در مایع دیگر نیز یک سیستم دو فازی را تشکیل می دهد. هر سیستم ممکن است شامل یک یا چند فاز باشد. فازها توسط ویژگی های متفاوت فیزیکی از هم جدا می شوند. ویژگی های فیزیکی ماده در حالت های مختلف مانند گاز، مایع و بلور متفاوت است، بنابراین حالت های فیزیکی ماده فازهای متفاوتی را نشان می دهد.

گازها به طور کامل در یکدیگر حل می شوند و بنابراین فقط یک فاز به حساب می آیند. اما مایعات و بلورها ممکن است دارای فازهای گوناگونی باشند که هر فاز به طور فیزیکی از دیگری جداست. به عنوان مثال آب و جیوه هر دو مایع هستند و دو فاز مختلف را نشان می دهند. چون فازها را به طور عمده می توان به کمک ویژگی های فیزیکی متمایز کرد، بنابراین ویژگی هایی مانند چگالی، الگوی پراش پرتو ایکس یا ویژگی های نوری برای شناسایی و متمایز کردن فازهای یک سیستم به کار

می روند. همگن بودن یک فاز به معنی وجود یک ترکیب معین و دقیق نیست، زیرا تغییر ترکیب شیمیایی فازهای مایع یا جامد، غالباً ویژگی همگن بودن آن ها را به هم نمی زند یا باعث ایجاد تغییرات ناگهانی و بارز در ساختار فیزیکی آن ها نمی گردد. به عنوان مثال این موضوع در محلول های مایع یا جامد صادق است.

## اطلاعات قابل استخراج از دیاگرام فازی

در لیست زیر، تعدادی از اطلاعاتی که می تواند مستقیماً از روی دیاگرام حاصل شود، آورده شده است:

- ۱- دمای ذوب هر ترکیب خالص.
- ۲- میزان کاهش دمای ذوب در حالتی که دو یا چند ترکیب مخلوط شوند.
- ۳- تاثیر متقابل دو ترکیب برای تشکیل ترکیب سوم.
- ۴- وجود و میزان محلول جامد.
- ۵- اثر دما بر روی میزان محلول جامد.
- ۶- دمایی که یک ترکیب از یک ساختار کریستالی به ساختار دیگر تبدیل می شود.
- ۷- مقدار و ترکیب شیمیایی فازهای جامد و مایع در دما و ترکیب مشخص.
- ۸- وجود مایعات (مذاب های) غیر قابل امتزاج در یکدیگر در دمای بالا یا مایعاتی که در یکدیگر حل نمی شوند.

## انواع دیاگرام فازی

دیاگرام های فازی بر اساس تعداد اجزا به انواع تک جزئی، دو جزئی و سه جزئی تقسیم بندی می شوند و مهمترین شرایط تعادلی بین فازها در آلیاژ های دوتایی به قرار زیر است:

۱- شرایطی که سازنده های آلیاژ به طور کامل در حالت مذاب در یکدیگر قابل حل باشند:

الف) دو جزء به طور کامل در حالت جامد در یکدیگر قابل حل شدن باشند (نوع I)

ب) دو جزء در حالت جامد در یکدیگر غیر قابل حل شدن باشند (واکنش یوتکتیک نوع II)

ج) دو جزء به طور جزئی در حالت جامد در یکدیگر حل شوند (واکنش یوتکتیک نوع III)

د) دو جزء تشکیل فاز واسطه بدهند (نوع IV)

ه) واکنش پری تکتیک (نوع V)

۲- دو جزء به طور جزئی در حالت مذاب در یکدیگر حل شوند.

۳- دو جزء در حالت مذاب و در حالت جامد در یکدیگر غیر قابل حل شدن باشند.

۴) دگرگونی های حالت جامد

الف) تغییرات {{{آلوتروپی}}}

ب) دگرگونی نامنظم - منظم

ج) واکنش یوتکتوئید

د) واکنش پری تکتوئید



# فصل ششم

## عملیات حرارتی

عملیات حرارتی : مجموعه ای از فرایندهای گرمایی، صنعتی و فلزکاری است که جهت تغییر خواص فیزیکی و گاهی شیمیایی مواد بر روی آنها انجام می‌شود. عملیات حرارتی عمدتاً در متالورژی استفاده می‌شود. از عملیات حرارتی برای ساخت مواد غیرفلزی مانند شیشه‌ها و شیشه-سرامیک‌ها نیز استفاده می‌شود. در عملیات حرارتی معمولاً از گرمایش یا سرمایش تا دماهای ویژه ای، برای رسیدن به خواص موردنظر برای مثال سخت کاری یا نرم کردن ماده استفاده می‌شود. تکنیک‌های عملیات حرارتی شامل این موارد می‌شود: بازپخت، سختکاری پوسته، پیرسختکاری، برگشت دادن، کرین دهی و نرمال سازی. با اینکه از عبارت «عملیات حرارتی» به صورت خاص برای گرمایش و سرمایش‌های هدفمند استفاده می‌شود، فرایندهایی مانند شکل دهی فلزات و جوشکاری نیز باعث گرمایش و سرمایش مواد و در نتیجه تغییر خواص آنها می‌شود.

## فرایندهای فیزیکی

مواد فلزی از ساختارهای بسیار ریزی به نام «دانه» و یا «کریستالیت» ساخته شده‌اند. طبیعت این دانه‌ها (یعنی اندازه و ترکیب آنها) مهم‌ترین عاملی است که خواص مکانیکی یک فلز را تعیین می‌کند. عملیات حرارتی کمک می‌کند که خواص فلز را با کنترل کردن نرخ واپخش و نرخ سرمایش در میکروساختار تغییر داد. عملیات حرارتی در فلزات معمولاً کمک می‌کند که خواص مکانیکی از قبیل سختی، استحکام، چقرمگی، شکل‌پذیری و الاستیسیته را تغییر داد.

دو مکانیزم در عملیات حرارتی آلیاژها باعث تغییر خواص مکانیکی می‌شود: شکل‌گیری مارتنزیت باعث می‌شود که کریستال‌ها به صورت ذاتی تغییر شکل دهند، و مکانیزم واپخش (یا دیفیوژن) باعث تغییر در همگن بودن ماده می‌شود.

ساختار بلوری متشکل از اتم‌هایی است که در یک ترتیب بسیار خاص دسته‌بندی شده‌اند، که یک شبکه نامیده می‌شود. در بیشتر عناصر، این چینش بسته به شرایطی مانند درجه حرارت و فشار به خودی خود تغییر خواهد کرد. این تغییر چینش، که آلوتروپی یا پلی مورفیسم نامیده می‌شود، برای یک فلز خاص ممکن است در دماهای مختلف چندین بار رخ دهد. در آلیاژها، این تغییر چینش ممکن است باعث شود یک عنصر که در حالت عادی قابل حل در فلز پایه نیست به‌طور ناگهانی در فلز انحلال پذیر شود، در حالیکه معکوس شدن آلوتروپی باعث شد این عناصر به صورت جزئی یا کامل غیرقابل انحلال شوند.

## تأثیر ترکیب شیمیایی

ترکیب شیمیایی دقیق یک آلیاژ در نتیجه عملیات حرارتی بسیار تأثیر گذار است. اگر درصد اجزای تشکیل دهنده دقیقاً به اندازه باشد، آلیاژ در هنگام خنک شدن یک ریزساختار کاملاً پیوسته و یکسان تشکیل خواهد داد. به چنین مخلوطی اصطلاحاً یوتکتوید گفته می‌شود. اما اگر درصد حل شونده‌ها با مخلوط یوتکتوید تفاوت داشته باشد، معمولاً دو یا تعداد بیشتری ریزساختار به صورت همزمان شکل خواهند گرفت. اگر میزان حل شونده‌ها کمتر از مخلوط یوتکتوید باشد به آن "هیپویوتکتوید" و اگر میزان حل شونده‌ها بیشتر از مخلوط یوتکتوید باشد به آن "هایپریوتکتوید" گفته می‌شود.

### آلیاژهای یوتکتوید

آلیاژ یوتکتیک آلیاژی است که نقطه ذوب یگانه دارد. این دمای ذوب کمتر از دمای ذوب هر کدام از مواد تشکیل دهنده است، و هیچ تغییری در درصد مواد تشکیل دهنده نمی‌تواند آن را بیشتر از این کاهش دهد. زمانی که یک سیستم یوتکتیک مذاب خنک شود، همه مواد تشکیل دهنده در دمایی یکسان به فاز مرتبط با خود کریستالیزه خواهند شد.

### آلیاژهای هیپویوتکتوید

یک آلیاژ هیپویوتکتوید دارای «دو نقطه ذوب جداگانه» است. هر دو بالاتر از نقطه ذوب یوتکتیک برای سیستم هستند، اما در زیر نقاط ذوب هر جزء تشکیل دهنده سیستم هستند. بین این دو نقطه ذوب، آلیاژ به صورت بخشی مایع و بخشی جامد وجود خواهد داشت. ابتدا ماده سازنده با نقطه ذوب پایین‌تر جامد می‌شود. معمولاً یک آلیاژ هیپویوتکتیک زمانی که کاملاً جامد شد در حالت محلول جامد خواهد بود.

آلیاژ هیپویوتکتوید همچنین دارای "دو دمای بحرانی" است، که اصطلاحاً به آن "بازداشت" می‌گویند. بین این دو دما، آلیاژ به صورت جزئی مایع و جزئی به صورت یک فاز کریستالی جداگانه به نام "فاز پرویوتکتوید" وجود خواهد داشت. این دو دما به ترتیب دمای تبدیل بالا ( $A_3$ ) و دمای تبدیل پایین ( $A_1$ ) نامیده می‌شوند. با خنک شدن محلول از دمای تبدیل بالا به سمت یک حالت غیرقابل انحلال، فلز پایه اضافی مجبور به تبلور و تبدیل به پرویوتکتوید می‌شود. این روند تا زمانی که غلظت باقیمانده املاح به سطح یوتکتوید برسد ادامه خواهد داشت، که بعداً به عنوان یک ریزساختار جداگانه متبلور می‌شود.

یک فولاد هیپویوتکتوید کمتر از ۰.۷۷٪ کربن دارد. پس از خنک کردن یک فولاد هیپویوتکتوید از دمای تبدیل آستنیت، جزایر کوچک از پرویوتکتوید-فریت تشکیل می‌شوند. تا زمانی که غلظت یوتکتوید در بقیه فولاد حاصل شود این جزایر به رشد خود ادامه خواهند داد و کربن عقب‌نشینی خواهد کرد. سپس این مخلوط یوتکتوید به صورت ریزساختار پرلیت، متبلور خواهد شد. از آنجایی که فریت از پرلیت نرم‌تر است، این دو ریزساختار برای افزایش قابلیت شکل‌پذیری ماده ترکیب خواهند شد. در نتیجه سختی ماده کاهش خواهد یافت.

## آلیاژهای هایپریوتکتیوید

آلیاژ هایپریوتکتیک نیز دارای نقاط ذوب مختلفی است. اما بین این نقاط، جز تشکیل دهنده ای که بالاترین دمای ذوب را دارد به صورت جامد وجود خواهد شد. به همین شکل، آلیاژ هایپریوتکتیوید نیز دارای دو دمای بحرانی است. هنگام خنک کردن یک آلیاژ هایپریوتکتیوید از دمای تبدیل بالا، معمولاً ابتدا اجزای حل شونده اضافی کریستاله خواهند شد، و پرویوتکتیوید ایجاد خواهند کرد. این روند تا زمانی که غلظت در آلیاژ باقیمانده یوتکتوئید شود ادامه می‌یابد، که سپس در یک ساختار جداگانه متبلور می‌شود.

یک فولاد هایپریوتکتیوید بیشتر از ۰.۷۷٪ کربن دارد. هنگامی که به آرامی یک فولاد هایپریوتکتیوید را خنک می‌کنید، ابتدا سمنتیت، شروع به تبلور می‌کند. زمانی که باقی فولاد در ترکیب یوتکتیوید می‌شود، به صورت پرلیت کریستاله می‌شود. از آنجایی که سمنتیت خیلی از پرلیت سخت‌تر است، آلیاژ در ازای از دست دادن قابلیت شکل دهی، سختی بالایی خواهد داشت.

## روش‌های عملیات حرارتی

### رنگ‌های آبدهی

زمانی که فولادی صیقل داده شده یا تازه ماشینکاری شده حرارت داده شود بر روی آن یک لایه اکسید شکل خواهد گرفت. در یک دمای خاص، لایه کسید آهن به ضخامت خاصی خواهد رسید که باعث تداخل لایه-نازک می‌گردد. این امر باعث شکل گرفتن لایه‌های رنگی بر روی فولاد خواهد شد. هر چه دما افزایش یابد ضخامت این لایه اکسید افزایش خواهد یافت و در نتیجه رنگ لایه عوض خواهد شد. قرن هاست متالورژیست‌ها از این رنگ‌ها که به آن رنگ‌های آبدهی می‌گویند، برای تشخیص دمای فولاد استفاده می‌کنند.

زرد روشن: ۱۷۶ درجه سلسیوس

کاهی روشن: ۲۰۴ درجه سلسیوس

کاهی تیره: ۲۲۶ درجه سلسیوس

قهوه‌ای: ۲۶۰ درجه سلسیوس

صورتی: ۲۸۲ درجه سلسیوس

آبی تیره: ۳۱۰ درجه سلسیوس

آب روشن: ۳۳۷ درجه سلسیوس

### عملیات حرارتی انتخابی:

بسیاری از روش‌های عملیات حرارتی فقط برای تغییر خواص قسمتی از یک قطعه ساخته شده‌اند. این کار با روش‌های مختلفی از قبیل خنک کاری قسمت‌های مختلف قطعه با نرخ‌های مختلف، گرمایش موضعی قطعه و کوئنچ کردن آن، واپخش ترموشیمیایی، یا برگشت دادن نواحی مختلف قطعه با دماهای مختلف (مانند برگشت دادن موضعی) قابل انجام است.

### عملیات حرارتی فولادها

سختی و دیگر خواص مکانیکی بسیاری از فولادها و برخی فلزات غیرآهنی را می‌توان توسط عملیات حرارتی تغییر داد. فولاد، آلیاژی ساخته شده از آهن و کربن است. درصد جرمی کربن تعیین‌کننده قابلیت انجام عملیات حرارتی بر روی فولادها است. فولادهای کم-کربن حاوی ۰.۳ تا ۰.۳ درصد کربن، فولادهای کربن-متوسط حاوی ۰.۳۵ تا ۰.۵۵ درصد کربن و فولادهای پر-کربن حاوی ۰.۶ تا ۱.۵ درصد کربن هستند (چدن‌ها حاوی بیش از ۲٪ کربن هستند). هرچه کربن فولاد بیشتر باشد قابلیت سختکاری آن بیشتر می‌شود. فولادهای کم-کربن حاوی مقدار کافی برای سختکاری مؤثر نیستند و باید از روش‌های دیگری برای افزایش سختی سطح آنها استفاده کرد. فولادهای کربن-متوسط و پر-کربن را می‌توان با روش‌های مناسب سختکاری کامل کرد.

کوئنچ کردن: برای سختکاری فولادهای کربن-متوسط یا پرکربن، ابتدا قطعه را تا بیشتر از یک دمای بحرانی (در حدود ۷۶۰ درجه سلسیوس) گرم کرده و اجازه می‌دهند برای رسیدن به تعادل مدتی در آن دما باقی بماند، و سپس به‌طور ناگهانی آن را به داخل حمامی از آب سرد یا روغن فرو می‌برند تا دمای قطعه به دمای محیط برسد. این سرد کردن ناگهانی باعث ایجاد محلولی فوق اشباع به نام «مارتنزیت» می‌گردد که بسیار سخت می‌باشد. متأسفانه این فاز بسیار ترد و شکننده است. در حقیقت با افزایش سختی قطعه، استحکام آن کاهش می‌یابد.

- برگشت دادن (تمپر کردن): پس از عملیات کوئنچینگ می‌توان قطعه را دوباره تا دمای کمتری گرم کرده (در حدود ۲۰۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس)، آن را **Heat-Soak** کرده، و سپس آن را به آهستگی خنک کرد. با تغییر متغیرهای دما و زمان در این فرایند می‌توان انواع مختلفی از فولادها با خواص مختلف تولید کرد. یک مهندس مواد باتجربه می‌تواند از این طریق فولاد مورد نیاز کاربردهای مختلف را تولید کند.

- بازپخت (آنیلینگ): فرایندهای کوئنچ کردن و برگشت دادن را می‌توان توسط بازپخت بازگردانی کرد. قطعه تا دمای بحرانی گرم می‌شود (مانند فرایند کوئنچ) اما اینبار اجازه داده می‌شود تا

قطعه به آهستگی خنک شود. اینکار باعث بازگردانی شرایط محلول و همچنین خواص مکانیکی قطعه قبل از عملیات سختکاری می‌شود. معمولاً حتی اگر قطعه سختکاری نشده باشد، برای حذف تنش‌های ایجاد شده در حین فرایند شکل دهی و ساخت قطعه آن را بازپخت می‌کنند. این کار باعث بازگشت قطعه به حالت «راحت» و بدون تنش می‌شود.

- نرماله کردن (نرمالیزاسیون): نرمالیزه کردن شبیه به فرایند بازپخت می‌باشد با این تفاوت که زمان کمتری به آن حرارت داده شده و سریع تر خنک کاری می‌شود. این کار باعث ایجاد فولادی نسبتاً مستحکم تر و سخت تر از فولاد بازپخت کامل شده می‌گردد اما شرایط آن به فولاد بازپخت شده نزدیکتر از فولاد برگشت داده شده می‌باشد.

- کربن دهی سطحی: در کربوریزه کردن یا کربن دهی فولاد کم-کربن در محیطی با گاز مونواکسید کربن یا در زیر زغال حرارت داده می‌شود، که باعث جذب کربن توسط سطح می‌گردد.

- نیتتریده کردن: در نیتتریده کردن فولاد کم-کربن در محیطی با گاز نیتروژن حرارت داده می‌شود که باعث ایجاد نیتتریدهای آهن سخت بر روی سطح می‌گردد.

- تنش زدایی: اعمال نیرو یا تغییرات دمایی می‌توانند در قطعه تنش ایجاد کنند که ممکن است بسیار زیان بار باشد. این تنش‌ها که «تنش‌های باقیمانده» نامیده می‌شوند، می‌توانند سبب تاب برداشتن، ترک برداشتن یا شکست زود هنگام در حین تولید یا در حین کار شوند. از عوامل تشکیل چنین تنش‌هایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: الف- وجود شیب حرارتی یا در واقع عدم سرد شدن یکنواخت قطعه. ب- ماشینکاری و کار سرد هدف از عملیات تنش گیری آن نیست که تغییرات عمده‌ای در خواص مکانیکی قطعه اتفاق بیفتد. در این عملیات از سازوکار بازیابی استفاده می‌شود و در واقع تبلور مجدد و تغییرات ریزساختاری در آن انجام نمی‌شود. به منظور تنش زدایی، قطعات را طی زمان مشخصی زیر دمای **A1** گرما می‌دهند. زمان گرما دهی بستگی به دمای عملیات و ابعاد قطعه دارد. هر چقدر که دمای تنش گیری بالاتر انتخاب شود نیاز به زمان کمتری برای عملیات وجود دارد. در این عملیات نرخ گرم شدن و سرد شدن قطعه باید آهسته باشد تا تنش‌های حرارتی جدیدی به قطعه اعمال نشود. این عملیات حرارتی به منظور کاهش یا برطرف کردن تمامی تنش‌های ایجاد شده در اثر عملیات تغییر شکل سرد یا در عملیات جوشکاری انجام می‌گیرد. درجه حرارت معمولاً در زیر درجه حرارت **A** و در حدود ۲۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد.

## عملیات حرارتی فولادهای زنگ‌نزن

فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی

میکروساختار این فولادها در هنگام تحویل معمولاً به صورت کاربید می‌باشد. به همین دلیل قبل از استفاده، برای مثال برای ساخت لوازم آشپزخانه، باید کوئنچ شده و برگشت داده شود. برای ساخت یک ساختار کاملاً مارتنزیتی، فولاد باید تا محدوده دمای فاز آستنیت خالص، بالای دمای نقطه تغییر AC<sub>3</sub>، در حدود ۹۰۰ درجه سلسیوس، بسته به درصد کروم آن، گرم شود. زمان نگهداری در دمای آستنیتی کردن بستگی به ضخامت فلز دارد و باید آنقدر در این دما نگه داشته شود تا همه کاربید کروم‌ها تبدیل به محلول شوند. سرمایش آن به دمای محیط برای اثرگذار بودن باید در زیر یک دقیقه انجام شود. برای ورق‌های نازک باد طبیعی یا فن کافی است در حالیکه برای ورق‌های ضخیم‌تر از ۵ میلی‌متر باید از کوئنچ کردن در آب یا روغن استفاده گردد. اگر پس از این فرایند باز هم کاربید کروم مشاهده شود یا دمای مربوطه کم بوده‌است یا زمان نگهداری آن.

در گریدهای با درصد کربن بالا خنک کردن تا دمای محیط به‌طور کامل اثرگذار نبوده و باید تا دماهای کرایونیک منفی ۸۰ درجه سلسیوس خنک کاری شود. شوک حرارتی ایجاد شده ممکن است باعث القای تردی در فلز شود. برای بازگرداندن خاصیت چکش خواری و چقرمگی باید عملیات تنش زدایی که گرم کردن به مدت چند ساعت در دمای ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس است، انجام شود. خیلی مهم است که از دماهای ۴۰۰-۶۰۰ درجه سلسیوس خودداری شود چرا که در این دماها رسوب کاربید کروم اتفاق می‌افتد که باعث ایجاد فضاهای خالی از کروم شده و می‌تواند منجر به خوردگی در مرز بین دانه‌ها شود.

### فولاد زنگ‌نزن فریتی

در متالورژی همه فولادهای فریتی یکسان نیستند چرا که بعضی در تمام دماها فریتی باقی می‌مانند ولی بعضی از گریدها که شبه-فریتی نیز خوانده می‌شوند در دماهای بالا تا ۳۰٪ آستنیت تشکیل می‌دهند که در هنگام خنک کاری به مارتنزیت تبدیل می‌شود.

گریدهای با بیش از ۲۵٪ کروم در دماهای ۵۰۰-۸۰۰ درجه سلسیوس مستعد شکل‌گیری فاز سیگمای غنی از کروم هستند. می‌توان این فاز را با گرم کردن تا دماهای ۱۰۰۰ درجه سلسیوس به مدت نیم ساعت و سپس خنک کاری سریع دوباره به محلول بازگرداند.<sup>[۱۰]</sup>

### فولاد زنگ‌نزن آستنیتی

#### بازپخت محلول

هدف از بازپخت محلول بدست آوردن یک ساختار آستنیتی همگن است. بازپخت در دمای ۱۰۰۰ تا ۱۱۵۰ درجه سلسیوس، بسته به گرید، و با زمان نگهداری ۱ الی ۳ دقیقه به ازای هر میلی‌متر ضخامت، و خنک کاری سریع با آب یا هوا انجام می‌شود.

عملیات «ضد-فریت»

مقدار مشخصی از دلتا فریت ( Delta Ferrite) دما-بلا می‌تواند در فولادهای زنگ نزن آستنیتی باقی بماند. این فاز معمولاً چندان خطرناک نیست، اما می‌تواند به دلیل شکل‌گیری فاز سیگما در دماهای ۵۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس باعث تردی شود. می‌توان این فریت باقی مانده را با نگهداری در دمای ۱۱۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۳۶ ساعت، و خنک کاری آهسته در کوره تا ۱۰۵۰ درجه سلسیوس و سپس خنک کاری سریع تا دمای اتاق از بین برد.

عملیات حذف تنش

دو نوع عملیات حذف تنش می‌توان انجام داد:

۱. نگهداری طولانی (۱۰ الی ۲۰ دقیقه به ازای هر میلی‌متر ضخامت) در دمایی بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس، و خنک کاری آهسته آن. مزیت این عملیات این است که هیچ فاز جدیدی شکل نمی‌گیرد.
۲. برای گریدهایی که مستعد خوردگی بین دانه ای نیستند، نگهداری کوتاه مدت (تقریباً ۳ دقیقه به ازای هر میلی‌متر ضخامت) در دمای تقریباً ۸۵۰ درجه سلسیوس.

## فولاد زنگ نزن دوپلکس

بازپخت محلول

در فولادهای دوپلکس آستنیت-فریتی هدف عملیات «بازپخت محلول» معمولاً رسیدن به درصد ۵۰٪ آستنیت ۵۰٪ فریت در دمای اتاق، و عدم وجود فازهای بین-فلزی یا ذرات رسوب می‌باشد. خیلی مهم است که از رسوب بین فلزی در هنگام خنک کاری جلوگیری شود، چرا که فریت در فولادهای دوپلکس می‌تواند دچار تردی ۴۷۵ درجه سلسیوس شود. زمان اقامت در دماهای ۷۰۰ تا ۹۵۰ درجه سلسیوس باید تا حد ممکن کوتاه باشد تا خطر شکل‌گیری فاز سیگما به حداقل برسد. در گریدهای حاوی مولیبدن محدوده خطر تا ۱۰۵۰ درجه سلسیوس ادامه می‌یابد. دمای بازپخت در گریدهای فاقد مولیبدن تا ۱۰۵۰ درجه بوده و در گریدهای دارای این عنصر دما ۱۱۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد.

عملیات حرارتی پس از جوشکاری

از آنجایی که فولادهای دوپلکس به خوردگی بین دانه ای حساس نیستند، نیاز به عملیات حرارتی پس از جوشکاری نیست. با این حال در فرایندهای جوشکاری تک پاس، به خصوص بدون استفاده از فیلر، بالانس بین آستنیت و فریت به هم خورده، و پیدا شدن درصد فریت ۹۰٪ و بالاتر در جوش معمول است. برای بازگردانی نسبت صحیح توصیه می‌شود «بازپخت محلول» انجام شود.

## عملیات حرارتی آلیاژهای غیر آهنی

عملیات حرارتی آلیاژهای آلومینیوم



در مورد آلیاژهای آلومینیوم، زمانیکه از کلمه «عملیات حرارتی» استفاده می‌شود، اغلب فرایندهایی منظور است که باعث افزایش استحکام و سختی آلیاژهای رسوب-سخت شونده و ریخته‌گری شده می‌گردد. به این آلیاژها معمولاً «عملیات حرارتی شونده» می‌گویند تا بتوان بین آن‌ها و آلیاژهایی که قابل عملیات حرارتی و افزایش استحکام نیستند تفاوت قائل شد. در این آلیاژها که معمولاً آلیاژهای «غیرقابل عملیات حرارتی» خوانده می‌شوند برای افزایش استحکام معمولاً از عملیات سرد استفاده می‌شود. از گرم کردن برای کاهش استحکام و افزایش چکش‌خواری (بازپخت) در مورد هر دو نوع آلیاژ استفاده می‌شود.

عملیات حرارتی افزایش استحکام آلیاژهای آلومینیوم شامل سه بخش است:

- **عملیات حرارتی محلول:** تجزیه فازهای قابل انحلال - برای عملیات پیرسخت کاری ابتدا باید یک محلول جامد ایجاد کرد. فرایندی که باعث تولید این محلول جامد می‌شود، **عملیات حرارتی محلول** نامیده می‌شود. هدف آن آوردن ماکزیمم مقدار عناصر آلیاژی حل شده قابل رسوب به داخل محلول جامد می‌باشد.
- **کوئنچ:** شکل‌گیری محلول فوق اشباع - مهم‌ترین مرحله در عملیات حرارتی می‌باشد. هدف آن حفظ شکل محلول جامد شکل گرفته در دمای عملیات حرارتی می‌باشد که این کار با سرد کردن سریع آن انجام می‌شود.
- **افزایش سختی عمری:** رسوب اتم‌های حل شده در دمای اتاق (افزایش عمر طبیعی)، یا در دماهای بالا (افزایش عمر مصنوعی یا عملیات پیرسخت کاری) - این عمل پس از مراحل عملیات حرارتی محلول و کوئنچ کردن انجام می‌شود. در بعضی آلیاژها سخت کاری عمری پس از گذشت چند روز در دمای اتاق - برای شکل گرفتن محصولات پایدار - اتفاق می‌افتد.

### تنش‌های داخلی و روش‌های کاهش آن‌ها در عملیات حرارتی

در عملیات حرارتی معمولاً با تنش‌های حاصل از انبساط و انقباض به نام "**تنش‌های حرارتی**" و همچنین با تنش‌های حاصل از تغییر یا تبدیل فاز، به ویژه در تبدیل‌های غیر تعادلی استنیت در فولادها، به نام "**تنش‌های تبدیلی**" مواجه خواهیم بود. عموماً این تنش‌ها تنش‌های داخلی نامیده می‌شوند.

#### تنش‌های داخلی

اندازه این تنش‌های داخلی به مقدار افت یا کاهش سریع دما در قطعه، شکل هندسی و ابعاد آن، سرعت سرد شدن و ضریب هدایتی حرارتی بستگی دارد.

تنش‌های داخلی می‌توانند به حدی برسند که حتی موجب تغییر شکل پلاستیکی و تاب برداشتن و ترک برداشتن و تخریب در حین عملیات حرارتی یا بعد از آن در حین کار شوند. در مواردی که تغییر دمایی بالا است و سریع از دماهای استنیتی به دماهای مارتنزیتی سرد شود توزیع این تنش‌ها، به ویژه در

قطعات با ابعاد نسبتاً زیاد، در نقاط مختلف حجم قطعه غیر یکنواخت خواهد بود. این غیر یکنواختی با اختلاف شیب حرارتی در لایه خارجی و قسمت داخلی قطعه، نوع فازهای تشکیل شده و فاصله زمانی تبدیل فازها بین لایه خارجی و قسمت داخلی ارتباط دارد؛ بنابراین حالت‌های مختلفی از لحاظ نوع تنش‌های داخلی می‌تواند وجود داشته باشد.

در مواردی که تنش‌های داخلی ایجاد شده در لایه خارجی از نوع کششی و تنش‌های داخلی از نوع فشاری باشد بعد از سرد شدن سریع ترک‌هایی در سطح به وجود می‌آیند یا یک نوع تغییر دیگر ممکن است که در حین تنش‌های کششی لایه خارجی به تنش‌های کششی اعمالی افزوده شده و استحکام کششی و حد تحمل کاهش یابد.

به منظور کاهش یا حذف تنش‌های داخلی و اثرات مضر آن به خاطر تشکیل‌های ترک‌های سطحی در قطعاتی که تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرند باید سرعت گرم و سرد کردن و زمان مورد نیاز برای سرد یا گرم کردن با توجه به نوع جنس، شکل هندسی و ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر کنترل شده و به نکات زیر توجه شود:

۱. ابتدا قطعه پیش گرم شود و بعد با سرعت خیلی کم گرم کردن قطعه ادامه یابد.
۲. در تبدیل مارتنزیتی که باید در مدت زمان کم افت دمای بالایی انجام داد می‌توان از دو روش زیر استفاده کرد:

روش اول: مارت‌پخت

در روش مارت‌پخت ابتدا قطعه فولادی را کاملاً آستنیتی کرده و بعد آن را سریع در ظرفی که حاوی روغن داغ یا نمک مذاب حدود ۱۵۰-۳۰۰ درجه سلسیوس یا با دمایی کمی بالاتر از دمای شروع مارتنزیت است سرد می‌کنیم. بعد قطعه مورد نظر به مدت زمان معینی در یکی از این دو محیط با دمای ثابت نگه داشته می‌شود.

زمان نگهداری به ابعاد قطعه بستگی دارد و باید در حدی باشد که دمای تمامی قطعه به آن دما برسد.

سپس قبل از اینکه تبدیل استنیت به باینیت شروع شود قطعه با سرعت متوسطی تا دمای اتاق سرد می‌شود، به گونه‌ای که از ایجاد اختلاف زیاد دما در آن جلوگیری شود.

سرانجام این قطعه فولادی تحت عملیات حرارتی بازپخت قرار می‌گیرد. بدین ترتیب یک ساختار مارتنزیتی باز پخت شده به دست می‌آید. این فرایند عملیات حرارتی مارت‌پرینگ یا سریع سرد کردن ناپیوسته نامیده می‌شود.

بازپخت در این روش به منظور افزایش چقرمگی صورت می‌گیرد.

تفاوت بین فولادهایی که مارتنزیتی شده و سپس عملیات حرارتی باز پخت معمول روی آنها انجام گرفته سختی برابر فولادهایی است که تحت عملیات حرارتی مارت پخت قرار گرفته‌اند، اما مقاومت به ضربه فولادهای که مارت پخت شده‌اند حدوداً سه برابر بیشتر از فولادهای عادی است.

روش دوم: آس پخت

آس پخت یا آستمپرینگ یک نوع عملیات حرارتی از نوع تبدیل هم دما یا ایزوترمال است که برای رسیدن به ساختار باینیتی در تعدادی از فولادهای کربنی ساده انجام می‌شود.

در این فرایند ابتدا فولاد استنیتی شده و سپس در حمام نمک مذاب با دمایی درست بالای دمای شروع تبدیل مارتنزیت سریع سرد شده و برای مدت زمان معینی در این دمای ثابت نگه داشته می‌شود. در بعضی موارد نیاز به دوباره گرم کردن می‌باشد چون ممکن است به حالت باینیت یا اسفریت تبدیل شده باشد و ساختار داخلی آن تفاوت‌هایی با هدف مورد نظر داشته باشد.

زمان مورد نیاز برای نگه داشتن در دمای ثابت که در بالا اشاره شد به نوع فولاد و ابعادان بستگی دارد و باید در حدی باشد که تبدیل استنیت به باینیت به طور کامل انجام شود و سرانجام قطعه فولادی تا دمای اتاق سرد می‌شود.

از مزایای این فرایند در مقابل روش سریع سرد کردن و بازپخت، افزایش مقاومت ضربه‌ای تا دو برابر بیشتر از روش عادی و کاهش تنش‌های داخلی و احتمال ترک برداشتن و تاب برداری است.

این فرایند روش دومی را برای جایگزینی فرایند سریع سرد کردن و بازپخت ارائه می‌دهد. از مزایای این روش بهبود مقاومت ضربه‌ای و انعطاف‌پذیری بعضی از فولادها در مقایسه با فرایند سریع سرد کردن و بازپخت و دیگری کاهش تنش‌های داخلی و نتیجتاً تاب و ترک برداری است. از معایب این روش نیاز داشتن به حمام نمک مذاب و دیگری محدودیت این روش برای تعدادی از فولادهای خاص است.

# فصل هفتم

فلزات، رابطه تنش – کرنش

و شکل پذیری، ضربه،

خستگی و خزش

## منحنی تنش - کرنش مهندسی

منحنی تنش - کرنش مهندسی از تست کشش بدست می آید. با آزمایش کشش یک فلز نرم می توان داده هایی اساسی درباره خواص مکانیکی آن به دست آورد. در این آزمایش یک نمونه با طرح ویژه در جهت محوری تحت بار گذاری قرار می گیرد و در اثر افزایش این نیرو می شکنند. در حین آزمایش مقدار افزایش طول در فواصل متناوب اندازه گیری شده و تنش و کرنش میانگین طبق معادلات بدست می آیند. داده های بدست آمده از آزمایش کشش به صورت نمودار تنش-کرنش رسم می شود.

پارامترهایی که از منحنی تنش - کرنش مهندسی بدست می آیند عبارتند از:

استحکام کششی

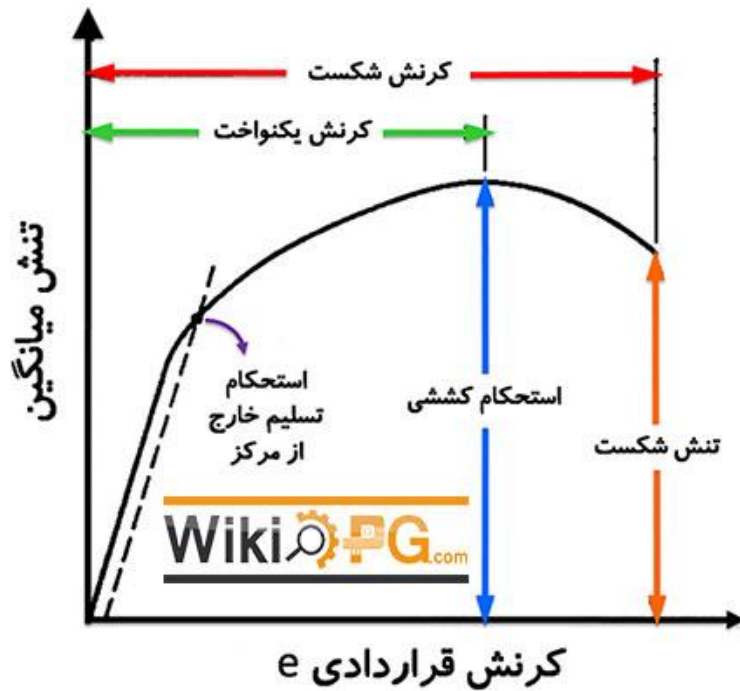
استحکام تسلیم

شکل پذیری

مدول کشسانی

جهش یا برجهنگی

تنش طولی میانگین از تقسیم بار بر سطح اولیه بدست می آید.



$$\delta = \frac{P}{A}$$

کرنش مورد استفاده در منحنی تنش - کرنش مهندسی، کرنش خطی میانگین است که از تقسیم ازدیاد طول مربوط به طول نمونه،  $\delta$ ، بر طول اولیه آن به دست می آید.

$$\delta = \frac{\Delta L}{L}$$

چون هم تنش و هم کرنش از تقسیم بار و ازدیاد طول بر عوامل ثابتی به دست می آیند، منحنی بار ازدیاد طول نیز شکلی مانند منحنی تنش - کرنش مهندسی دارد. هر دو منحنی معمولاً به جای هم مورد استفاده قرار می گیرند.

شکل و مقدار منحنی تنش - کرنش یک فلز به ترکیب شیمیایی، عملیات حرارتی، تاریخچه قبلی تغییر شکل پلاستیک (مومسان) و آهنگ کرنش، دما و حالت تنش وارده هنگام آزمایش بستگی دارد. استحکام کششی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع پارامترهایی هستند که در تشریح منحنی تنش - کرنش هر فلز به کار می روند. دو پارامتر اول معرف استحکام و دو تای بعدی معرف شکل پذیری هستند.

در ناحیه الاستیک منحنی تنش - کرنش مهندسی، تنش با کرنش رابطه خطی دارد. موقعی که مقدار تنش از استحکام تسلیم جسم بیشتر شود، نمونه تغییر شکل پلاستیک را تحمل می کند. پس از آن نیروی لازم برای ادامه تغییر شکل افزایش می یابد ولی این افزایش به صورت خطی نیست. اگر نیرو

بعد از تغییر شکل پلاستیک به صفر کاهش پیدا کند مقداری تغییر شکل دائمی در نمونه باقی خواهد ماند. نیرو یا تنش لازم برای ادامه تغییر شکل پلاستیک با افزایش کرنش پلاستیک زیاد می شود و به عبارت دیگر جسم کار سخت می شود. حجم نمونه یا حاصلضرب طول در سطح ، در حین تغییر شکل پلاستیک ثابت باقی می ماند ، یعنی:

$$AL = A_0L_0$$

که در آن:

سطح مقطع ثانویه **A:** : سطح مقطع اولیه **A<sub>0</sub>**

طول ثانویه **L:** طول اولیه **L<sub>0</sub>**

در نتیجه با ازدیاد طول نمونه ، مساحت سطح مقطع آن به طور یکنواخت در طول نمونه کاهش می یابد. در هنگام تست کشش دو عامل متضاد روی مقدار نیروی لازم برای ایجاد تغییر شکل تاثیر می گذارد ، یکی کار سختی است که موجب افزایش نیرو می شود و دیگری کاهش سطح است که باعث کاهش نیرو می شود. در ابتدا، کار سختی بیش از کاهش در سطح مقطع نمونه است. بنابراین، تنش مهندسی با افزایش کرنش به طور پیوسته زیاد می شود. در نهایت به نقطه ای می رسد که کاهش سطح مقطع نمونه و در نتیجه کاهش نیرو بیش از افزایش نیروی ناشی از کار سختی است. این شرایط ابتدا در نقطه ای در نمونه ایجاد می شود که ضعیف تر از بقیه نمونه است. از این رو تمام تغییر شکل پلاستیک بعدی در این ناحیه متمرکز می شود و نمونه شروع به گلویی شدن یا نازک شدن موضعی می کند. حال، چون مساحت سطح مقطع سریعتر از افزایش بار ناشی از کار سختی، کم می شود، یا به عبارت دیگر کار سختی قادر به جبران اثر کاهش سطح مقطع نیست، نیروی واقعی لازم برای تغییر شکل نمونه افت می کند و تنش مهندسی به طور پیوسته تا شکست نمونه کم می شود. به طور خلاصه ، می توان گفت که در ابتدا بعد از تغییر شکل الاستیک (کشسان)، مقدار کار سختی بیش از کاهش در سطح مقطع است و نیرو با ادامه تغییر شکل افزایش می یابد ولی در یک نقطه که مقدار کاهش در سطح مقطع بیش از کار سختی است، جسم شروع به گلویی شدن می کند و نیروی لازم برای ادامه تغییر شکل کاهش می یابد. ولی در واقع کرنش سختی یا کار سختی فلز تا لحظه شکست آن ادامه دارد. به طوری که تنش لازم برای ازدیاد طول باید زیاد شود، این پدیده در منحنی تنش - کرنش حقیقی دیده می شود.

سختی

سختی سنجی به بررسی سختی یک ماده می پردازد. سختی یکی از ویژگی های ماده است و به طور کلی می توان گفت که سختی معیاری است که مقاومت فلز را در برابر تغییر شکل پلاستیک موضعی و سایش نشان می دهد. در مجموع دو نوع مقیاس برای اندازه گیری سختی وجود دارد که عبارتند از:

#### ۱- سختی خراش

#### ۲- سختی فرورفتگی

روش هایی که نشان دهنده تغییر شکل پلاستیک موضعی هستند، تنها برای موادی مانند فلزات و پلاستیک های گرمانرم، به کار می روند که قابلیت تغییر شکل پلاستیک داشته باشند. اگر چه آزمون های سختی فرورفتگی، مقاومت در برابر سایش را اندازه گیری نمی کنند، ولی عموماً موادی که بر اساس این آزمون ها ارزیابی می شوند، مقاومت خوبی در مقابل سایش و فرسایش سطحی دارند. آزمون های فرورفتگی به نوع ایستا (استاتیک) و پویا (دینامیک) تقسیم بندی می شوند.

### سختی سنجی استاتیک و دینامیک

در آزمون ایستا، حفره ای تحت یک نیروی مشخص در ماده ایجاد می شود و ابعادهای آن اندازه گیری می شود. در آزمون های پویا، یک وزنه یا آونگ رها شده و به سطح نمونه برخورد می کند. بخشی از انرژی وزنه برخورد کننده منجر به تغییر شکل پلاستیک ماده شده و باقی آن سبب می شود تا وزنه از سطح نمونه به عقب باز گردد. ماده سخت انرژی زیادی جذب نمی کند، زیرا تغییر شکل پلاستیک زیادی پیدا نمی کند و در نتیجه وزنه پس از برخورد تا ارتفاع بیشتری بر می گردد. این آزمون، برای بررسی مواد فوق العاده سخت مناسب است.

این آزمون، گاهی برای لاستیک ها هم استفاده می شود. هنگامی که ضربه زننده با لاستیک برخورد می کند، نرخ بازیافت بسیار سریع کرنش الاستیک سبب می شود که ارتفاع بازگشت ضربه زننده زیاد باشد. علی رغم این تناقض ظاهری، که ارتفاع بازگشت ضربه زننده برای یک ماده نرم زیاد است و به معنی سختی بالا می باشد، این آزمون با موفقیت برای تعیین خواص مواد لاستیکی به کار می رود.

برای اندازه گیری سختی فولادها، می توان از نوعی روش برقی بدون تماس استفاده کرد. خاصیتی که در این روش اندازه گیری می شود، پسماند زدایی مغناطیس است. ولی برای هر نوع فولاد رابطه ای تقریباً خطی بین پسماند زدایی مغناطیسی و سختی وجود دارد. آزمون های سختی از نوع فرورفتگی در مقیاس وسیعی برای بررسی نمونه های فلزی به کار می روند؛ انجام این آزمون ها نسبتاً آسان



است و نیازی به نمونه های ماشینکاری شده ندارد. نتایج آزمون سختی شاخصی از استحکام فلز ها به دست می دهد. به علاوه روش مناسبی برای بررسی میزان تاثیرات عملیات حرارتی است.

بعضی مواد، به ویژه سرامیک ها و شیشه ها در اثر اعمال فشار تغییر شکل پلاستیک نمی دهند و در نتیجه نمی توان از آزمون های فرورفتگی، برای ارزیابی خواص این مواد استفاده کرد. برای این نوع مواد تنها آزمون سختی مناسب، آزمونی است که مقاومت در برابر سایش را اندازه گیری کند. معروف ترین نوع این آزمون مقیاس سختی موس است.

#### انواع روش های سختی سنجی

از معروف ترین روش های سختی سنجی می توان به روش های زیر اشاره نمود:

1- آزمون سختی سنجی موس

2- آزمون سختی سنجی برینل

3- آزمون سختی سنجی ویکرز

4- آزمون سختی سنجی راکول

5- آزمون میکروسختی ویکرز

6- آزمون سختی سنجی نوپ

7- آزمون شر اسکروسکوپ

#### ضربه

آزمون ضربه یکی از روشهای استاندارد برای تعیین انرژی شکست مواد در اثر تنش دینامیکی است. اساس آزمون ضربه تعیین مقدار انرژی لازم برای شکستن قطعه در اثر ضربه می باشد. اطلاعاتی که از این آزمون به دست می آید در درک چگونگی رفتار ماده در موقعیت های کاربردی واقعی بسیار مفید است. هدف آزمون ضربه شبیه سازی شرایط واقعی به منظور تلاش برای جلوگیری از شکست و پیش بینی شکست نمونه است.

از مهم ترین و متداول ترین روش های آزمایش ضربه، دو روش آیزود (Aizod) و چارپی (Charpy) می باشد. این دو روش تنها در طرز قرارگیری نمونه ها در دستگاه آزمایش ضربه با یکدیگر تفاوت دارند.

رفتار مواد در برابر بار لحظه ای (ضربه) در مقایسه با بار استاتیکی مشابه (کشش) بسیار متفاوت می باشد. تست ضربه معیار مناسبی برای تعیین و طبقه بندی تمایل پلاستیک های مختلف برای رفتار ترد است.

## خزش

تغییر شکل وابسته به زمان در دماهای بالاتر از نصف نقطه ذوب مواد و در تنش های زیر حد الاستیک را خزش می گویند. طی این شرایط، مکانیزم های تغییر شکل مختلفی با سرعت کرنش کم، فعال می شوند. خزش، عامل شکست اغلب قطعات در دمای بالای کاری می باشد. پدیده خزش در دماهای بالا از اهمیت بیشتری برخوردار است و از نظر عملی، خواص خزشی ماده تعیین کننده مناسب بودن آن برای کاربرد در دمای بالا است. لذا در طراحی تجهیزاتی مانند موتورها و کوره ها که برای طولانی مدت در این دماها فعالیت دارند، خزش به عنوان یک پارامتر مهم در نظر گرفته می شود. معمولاً در دماهای پایین تر از نصف نقطه ذوب می توان خزش را نادیده گرفت.

همان طور که می دانید استحکام فلزات با افزایش دما کاهش می یابد. این کاهش استحکام به دلیل فعال شدن چند عامل یا مکانیزم تغییر شکل در دماهای بالا است که در دماهای پایین غیرفعال یا کم فعال می باشند. برخی از این عوامل که موجب کاهش استحکام در اثر افزایش دما می شوند، عبارتند از:

- نفوذ و حرکت سریع اتم ها در دمای بالا
- افزایش تعداد تعادلی جاهای خالی اتمی با افزایش دما
- حرکت سریع نابجایی ها در دماهای بالا با مکانیزم صعود
- افزایش تغییر شکل ماده در اثر فعال شدن مکانیزم های لغزش یا مهاجرت مرزدانه ها
- فعال شدن مکانیزم های برش ذرات رسوبی در دماهای بالا
- واکنش فلز با محیط در دمای بالا، اکسیداسیون و خوردگی داغ

## مکانیزم های تغییر شکل

مکانیزم های تغییر شکل ناشی از خزش را می توان در موارد زیر خلاصه کرد:

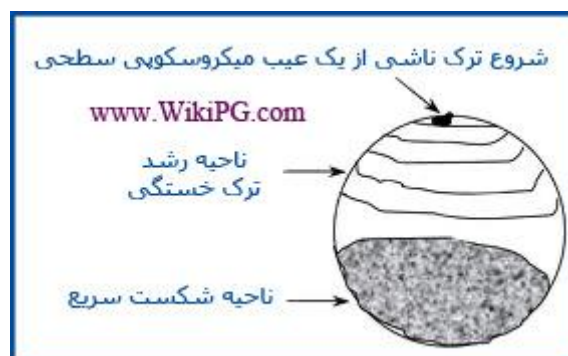
- 1- تغییر شکل در تنش برشی تئوری
- 2- لغزش و دوقلوبی شدن
- 3- خزش ناشی از نفوذ
- 4- لغزش مرزدانه ای
- 5- مهاجرت مرزدانه
- 6- خزش نابجایی

### خستگی

خستگی فلزات وقتی اتفاق می افتد که فلز تحت تنش تکراری یا نوسانی قرار گیرد که منجر به شکست ناگهانی قطعه می گردد. با پیشرفت صنعت و افزایش تعداد وسایلی از قبیل خودرو، هواپیما، کمپرسور، پمپ توربین و غیره که تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی هستند، خستگی بیشتر متداول شده و اکنون چنین برداشتی می شود که عامل حداقل ۹۰ درصد شکست های ناشی از دلایل مکانیکی حین کار، خستگی باشد.

به طور کلی شکست هایی که در شرایط بارگذاری دینامیک رخ می دهند، شکست های خستگی نامیده می شوند. هیچگونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می شکند، وجود ندارد تا بتوان به عنوان مدرکی برای شناخت دلایل خستگی از آن استفاده کرد.

دلیل عمده خطرناک بودن شکست خستگی این است که بدون آگاهی قبلی و قابل رویت بودن اتفاق می افتد. خستگی به صورت شکستی با ظاهر ترد، بدون هیچگونه تغییر شکل ناخالص در شکست، نتیجه می شود. معمولاً شکست خستگی از ظاهر سطح شکست تشخیص داده می شود، که از یک ناحیه همواره حاصل از عمل سایش با اشاعه ترک در مقطع و یک ناحیه ناهموار که در هنگام عدم تحمل بار توسط مقطع، در قطعه به صورت نرم شکسته شده است، تشکیل می شود. غالباً پیشرفت شکست توسط یک دسته حلقه نشان داده می شود، که از نقطه شروع شکست به طرف داخل پیشرفت می کند. شکل زیر چگونگی گسترش ترک و شکست ناگهانی یک نمونه را نشان می دهد.



مشخصه دیگر شکست خستگی این است که معمولاً شکست در نقطه وجود تمرکز تنش، مانند یک گوشه تیز یا شیار، یا در یک تمرکز تنش متالورژیکی مانند ناخالصی، رخ می دهد. سه عامل عمده برای وقوع شکست خستگی ضروری هستند. این عوامل عبارتند از:

- استحکام کششی حداکثری به مقدار بسیار زیاد
- تغییرات به حد کافی زیاد یا نوسانی در تنش وارده به قطعه
- زیاد بودن چرخه های تنش وارده به قطعه

علاوه بر این متغیرهای دیگری مانند تمرکز تنش، خوردگی، دما، بار اضافی، ساختار متالورژیکی، تنش های باقیمانده و تنش های مرکب هم وجود دارند که شرایط را برای ایجاد تنش خستگی تقویت می کنند.

## فصل هشتم

# مواد مرکب, مواد مرکب

## مسلح به الیاف FRP, مواد

### مرکب دانه ای

#### تعریف کامپوزیتها یا مواد مرکب

در رشته مهندسی مکانیک یکی از مباحث مهم مخصوصا در گرایش جامدات کامپوزیت ها می باشند که در ادامه به معرفی و آموزش مقدماتی کامپوزیت ها پرداخته می شود . کامپوزیت یا ماده مرکب چیست ؟ در رشته مهندسی مکانیک ترکیب دو یا چند ماده با یکدیگر به طوری که به صورت شیمیایی مجزا و غیر محلول در یکدیگر باشند و بازده و خواص سازه ای این ترکیب نسبت به هریک از اجزاء تشکیل دهنده آن به تنهایی ، در موقعیت برتری قرار بگیرد را Composite یا ماده مرکب می نامند . به عبارت دیگر کامپوزیت یا ماده مرکب به دسته ای از مواد اطلاق می شود که آمیزه ای از مواد مختلف و متفاوت در فرم و ترکیب باشند و اجزاء تشکیل دهنده آنها هویت خود را

حفظ کرده ، در یکدیگر حل نشده و با هم ممزوج نمی‌شوند . با توجه به این امر Composite و آلیاژ فلزی متفاوت می‌باشد . بنابراین کامپوزیت یا ماده مرکب ترکیبی از حداقل دو ماده مجزا با فصل مشترک مشخص بین هر جزء تشکیل دهنده است .

در مهندسی مواد این اصطلاح معمولاً به موادی اطلاق می‌شود که از یک فاز زمینه (ماتریس) و یک تقویت کننده (پرکننده) تشکیل شده باشند .

به ترکیب ماکروسکوپی دو یا چند ماده‌ی مجزا که سطح مشترک مشخصی بین آنها وجود داشته باشد، Composite گفته می‌شود.

کامپوزیت از دو قسمت اصلی ماتریس و تقویت کننده تشکیل شده است . ماتریس با احاطه کردن تقویت کننده آن را در محل نسبی خودش نگه می‌دارد . تقویت کننده موجب بهبود خواص مکانیکی ساختار میگردد . به طور کلی تقویت کننده میتواند به صورت فیبرهای کوتاه و یا بلند و پیوسته باشد .

الیاف‌های تقویت کننده ، تحمل کننده اصلی بارها می‌باشند و زمینه (ماتریس) فراهم سازی بستر مناسب جهت انتقال بار از الیافی به الیاف دیگر را بر عهده دارد .

امروزه Composite با توجه به فازهای زمینه و تقویت کننده‌ی متفاوت به دسته‌های مختلفی تقسیم بندی می‌شوند. مانند: کامپوزیت‌های با زمینه‌ی سرامیکی (CMC)، کامپوزیت‌های با زمینه‌ی پلیمری (PMC)، کامپوزیت‌های با زمینه‌ی فلزی (MMC) و یا کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف (FRC) (تک جهته یا چند جهته با الیاف کوتاه و بلند)، کامپوزیت‌های تقویت شده توسط ذرات (PRC). در ادامه آموزش به ویژگی‌های کامپوزیت‌ها اشاره می‌شود .

ویژگی‌ها:

مهم‌ترین مزیت مواد کامپوزیتی آن است که با توجه به نیازها ، می‌توان خواص آنها را کنترل کرد . به طور کلی مواد کامپوزیتی دارای مزایای زیر هستند :

- مقاومت مکانیکی بالا نسبت به وزن
- مقاومت بالا در برابر خوردگی
- خصوصیات خستگی مطلوب‌تر نسبت به فلزات
- خواص عایق حرارتی خوب

- به دلیل صلبیت بیشتر ، تحت یک بارگذاری معین ، خیز کمتری نسبت به فلزات دارند
- استحکام بالا
- هزینه کمتر و صرفه‌جویی اقتصادی

در ادامه این آموزش به کاربردهای کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف پرداخته می‌شود .

#### کاربرد کامپوزیت‌ها در صنایع:

کامپوزیت‌ها در رشته‌های مختلف مهندسی کاربرد فراوانی دارد و به همین خاطر بسیاری از دانشجویان با استفاده از آن به ارایه مقالات علمی و پایان نامه‌های کارشناسی ارشد و دکتری می‌پردازند . هم‌چنین در انجام پژوهش‌های فراوانی نیز قابل بررسی می‌باشد . امروزه در صنایع بسیاری همچون صنایع حمل و نقل شامل حمل و نقل هوایی ، جاده‌ای ، ریلی و دریایی ، صنایع نظامی و هوا-فضا ، صنعت ساخت و ساز شامل صنایع زیر بنایی و صنعت ساختمان ، صنایع خودرو و قطعه‌سازی ، وسایل خانگی ، لوازم ورزشی و غیره کاربردهای فراوانی دارد .

در علوم هوایی برای ساخت بدنه جنگنده‌های رادارگریز ، بدنه‌ی انواع پهبادها و قسمت‌های زیادی از بدنه‌ی هواپیماهای مسافر بری از کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود . همچنین در ساخت قطعات صنایع انرژی در حوزه‌های تولید و انتقال برق همچنین صنعت نفت ، گاز و پتروشیمی استفاده‌ی بالایی دارد همانند ساخت پره‌ی نیروگاه بادی ، ساخت کابل‌های انتقال برق با هسته‌ی کامپوزیتی ، از آنجا که امروزه یکی از روش‌های مناسب تعمیر در دنیا ، استفاده از کامپوزیت‌ها می‌باشد . از کامپوزیت‌ها به منظور ترمیم و تقویت سازه‌های فرسوده و ترمیم لوله‌های فرسوده نفت و گاز به استفاده می‌شود (لوله‌های انتقال گاز غالباً دچار مشکل خوردگی می‌گردند) . همچنین لوله‌های انتقال جدید نیز از جنس کامپوزیت‌ها ساخته شده است .

در صنایع ریلی از کامپوزیت‌ها در ساخت تراورس (چوب‌های عرضی که در زیر ریل راه آهن قرار می‌گیرند) استفاده می‌شود زیرا قیمتی معادل بهترین نوع چوبی آن دارد همچنین عمر طولانی‌تر و کاربری راحت‌تری دارد . برخلاف چوب این تراورس‌ها نمی‌شکنند ، ترک بر نمی‌دارند ، مستعد پوسیدگی نیستند ، حشرات نمی‌توانند به آنها آسیبی بزنند همچنین به علت عدم پوسیدگی ، استفاده از این تراورس‌ها در مناطق مرطوب به صرفه‌تر از نوع چوبی آن است . لازم به ذکر است که در کشور ما سالیانه مقادیر بسیار زیادی تراورس راه آهن تعویض یا بهسازی می‌گردد و این جدای از هزینه‌ی هنگفت بستن خط و تغییر ریل‌ها و زیرسازی‌های لازم است . اما اگر همین تراورس‌ها با کامپوزیت تقویت شوند عمر ۷ ساله تراورس‌ها را تا ۳۰ سال می‌توان افزایش داد و در ازای پرداخت هزینه‌ی اولیه دو یا سه برابر ، هزینه‌ی تعمیر و تعویض تا ۸ برابر کاهش می‌یابد و در نهایت صرفه‌ی اقتصادی دارد .

در صنایع دیگر می‌توان به استفاده از کامپوزیت در ساخت فایق‌های بزرگ تفریحی و مسافرتی ،  
قطعات ماشین‌های مسابقه ای ، خطوط لوله آبرسانی ، خطوط لوله و مخازن نگهداری ، ظروف  
نگهدارنده‌ی مواد شیمیایی ، کپسول‌های گاز CNG، کپسول‌های تنفسی آتش‌نشانی ، کپسول‌های  
اطفاء حریق ، تیرک‌ها و تیرهای حمل سقف ساختمان ، استفاده در ساخت و تقویت پلها ، نردبانها و  
چارچوب ، عایقها در صنایع الکترونیک مانند و بسیاری استفاده‌های دیگر در صنایع گسترده‌ی دیگر  
اشاره نمود