

# فصل سوم

## ساختار و خواص فلزات



**هدف‌های رفتاری :** با یادگیری این فصل هنرجو می‌تواند :

- ۱- ساختارهای بلوری فلزات صنعتی پرکاربرد را بیان کند.
- ۲- سه خاصیت مرتبط با ماهیت پیوند فلزی را بیان کند.
- ۳- تفاوت بین ساختارهای بلوری در فلزات را توضیح دهد.
- ۴- خواص فیزیکی فلزات را توضیح دهد.
- ۵- خواص مکانیکی فلزات را توضیح دهد.
- ۶- خواص تکنولوژیکی فلزات را بیان نماید.
- ۷- عوامل مؤثر روی خواص فلزات را بیان کند.

## ۱-۳- مقدمه

شاید تا به حال از خود پرسیده باشید که چرا مواد مختلف با هم متفاوتند؟ چرا برخی از آنها محکم‌تر از سایرین هستند؟ چرا برخی از مواد رسانا و برخی نارسانا می‌باشند؟ چرا نور می‌تواند از بعضی از مواد عبور کند و از بعضی دیگر نه؟

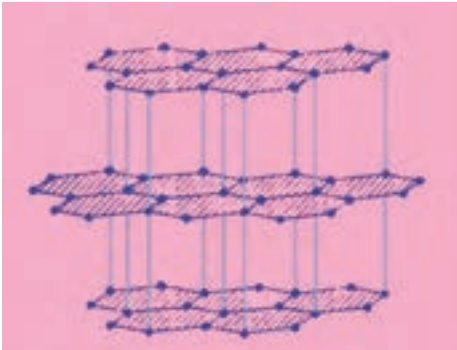
سؤال‌هایی از این دست ذهن را متوجه تفاوت‌های مواد از نظر خواص می‌کند و ما را در رابطه با علت این تفاوت‌ها، به تفکر بیشتر وادار می‌کند. با اطلاعاتی که ما از ساختمان عناصر و تفاوت‌های موجود در آنها داریم شاید گمان کنیم که تفاوت‌های موجود در مواد مختلف حاصل تفاوت‌های عناصر تشکیل دهنده آنها است. با این تفکر خواص مواد تنها متأثر از تنوع عناصر تشکیل دهنده آنها خواهد بود و تمامی ویژگی‌های رفتاری مواد باید با شناخت عناصر تشکیل دهنده آنها روشن شده و همه اسرار مربوط به خصوصیات مواد آشکار گردد. به‌راستی با دانستن ترکیب شیمیایی، خواص مواد معلوم می‌شود؟

با کمی دقت و توجه به ترکیبات شیمیایی مواد پیرامون خود درمی‌یابیم که بسیاری از آنها با وجود این‌که در رفتار و خواص با یکدیگر تفاوت دارند ولی دارای عناصر تشکیل دهنده و ترکیب شیمیایی یکسان می‌باشند و برخی دیگر از مواد با داشتن عناصر تشکیل دهنده متفاوت، دارای خواص و رفتار مشابهی هستند. پس چه چیزی به جز ترکیب شیمیایی موجب تفاوت در رفتار و خواص مواد می‌شود؟ برای جواب این سؤال لازم است کمی بیشتر با ساختار مواد آشنا شویم.

## ۲-۳- ساختار مواد

ساختار ماده چگونگی ارتباط بین اتم‌ها، یون‌ها و مولکول‌های تشکیل دهنده آن ماده را مشخص می‌کند. با پیوندهای شیمیایی که نحوه اتصال میان اتم‌ها و یون‌ها را مشخص می‌کنند، در درس‌های گذشته آشنا شده‌اید. در اینجا برای روشن شدن تأثیر ساختار روی خواص مواد مثال معروفی را ارائه می‌کنیم. همان‌طور که می‌دانید گرافیت و الماس هر دو از اتم‌های کربن تشکیل شده‌اند. اما چرا خواص گرافیت و الماس خیلی با یکدیگر متفاوت است؟ الماس به عنوان سخت‌ترین ماده طبیعی معرفی می‌گردد و گرافیت به دلیل نرمی بسیار، به عنوان ماده «روان‌ساز» به کار گرفته می‌شود! تفاوت خواص گرافیت و الماس مربوط به نحوه اتصال و آرایش فضایی اتم‌های کربن در ساختار آنها بستگی دارد. مطابق شکل (۱-۳) ملاحظه می‌کنید در گرافیت اتم‌های کربن شش ضلعی‌های پیوسته‌ای تشکیل می‌دهند که در یک سطح گسترده است. لایه‌های شش ضلعی متشکل از اتم‌های کربن با

قرار گرفتن روی هم، حجمی را تشکیل می‌دهند که به آن گرافیت می‌گوییم. در ساختار گرافیت دو نوع اتصال وجود دارد: یک نوع اتصال، اتصالی است که بین اتم‌های کربن هر لایه وجود دارد و از نوع پیوند کوالانسی است. نوع دوم اتصالی است که لایه‌ها را به یکدیگر وصل می‌کند و ضعیف‌تر از پیوند کوالانسی است. بنابراین می‌توان انتظار داشت که با اعمال نیرو لایه‌های کربنی بر روی یکدیگر بلغزند. در مقابل الماس دارای یک ساختار شبکه‌ای است. یعنی برخلاف گرافیت که پیوندهای اتمی تنها در یک سطح قرار دارند و ساختار لایه‌ای دارد، در ساختار الماس پیوندها به صورت شبکه‌ای سه بعدی فضا را پر می‌کنند. در ساختار گرافیت هر اتم کربن با سه اتم کربن دیگر اتصالی از جنس کوالانسی ایجاد می‌کند، در حالی که در ساختار الماس هر اتم کربن با چهار اتم کربن دیگر پیوندی از جنس کوالانسی برقرار می‌نماید (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۱- ساختار گرافیت



شکل ۳-۲- ساختار الماس

با این توضیحات مشخص شد دلیل نرمی گرافیت و سختی الماس در چیست. همان‌طور که دیدید ساختار (نوع، تعداد و چگونگی ایجاد پیوند) تأثیر زیادی روی خواص مواد دارد. بنابراین از طریق مطالعه و آشنایی با ساختار مواد، بسیاری از رفتارها و خواص آنها را می‌توان پیش‌بینی کرد. همچنین برای دستیابی به خواص مورد نظر می‌توان ساختاری متناسب با اهداف دلخواه طراحی و ایجاد نمود.

### ۳-۳- ریزساختار مواد

با شناختی که نسبت به ساختار مواد پیدا کرده‌اید، ممکن است گمان کنید توده موادی که ما در اطراف خود می‌بینیم از نظم گسترده در ساختار اولیه خود به وجود آمده‌اند. به عبارت دیگر شکل گسترش یافته ساختار اولیه خود هستند و بنابراین تمامی خواص و رفتار ساختار اولیه خود را دارا خواهند بود. این تصور با مشاهدات رفتار مواد متفاوت است. به عنوان مثال در ساختار گرافیت ما انتظار داریم که استحکام در راستاهای مختلف لایه‌ها متفاوت باشد زیرا ساختار اولیه در جهت صفحات لانه زنبوری دارای استحکام بالا و در جهت عمود بر این صفحات دارای استحکام کمی است. بنابراین گرافیت فقط در برخی جهات خاص می‌بایست قابلیت حرکت لایه‌ها بر روی یکدیگر را داشته باشد. می‌دانید از گرافیت به عنوان ماده اصلی مغز مداد استفاده می‌شود و اثری که از



شکل ۳-۳- مداد تحریر که با آن می‌نویسیم

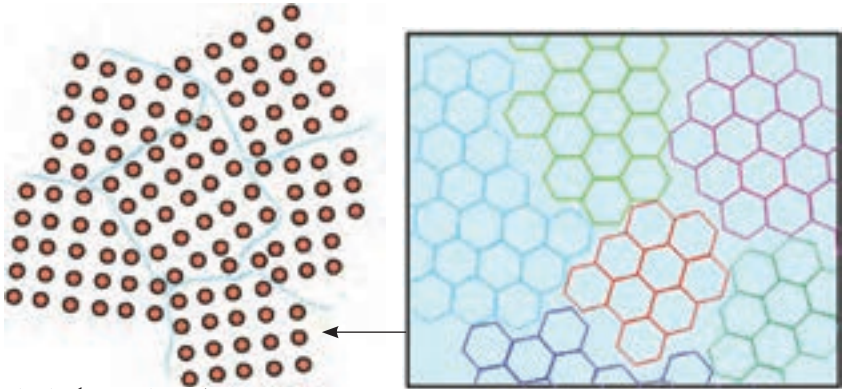
مداد بر روی کاغذ باقی می‌ماند در حقیقت لایه‌های نازک گرافیت است که با مالش نوک مداد بر روی کاغذ، از سطح آن کنده شده و بر روی کاغذ می‌چسبد و همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد لایه‌های گرافیت به دلیل پیوند ضعیف ثانویه امکان لغزش و حتی جدا شدن از یکدیگر را دارند.

حال سؤال اینجاست که اگر توده گرافیت گسترش همان ساختار اولیه گرافیت باشد، باید مداد تنها در یک جهت خاص قابلیت نوشتن داشته باشد زیرا ساختار گرافیت تنها لغزیدن و کنده شدن لایه‌ها از توده و چسبیدن‌شان به سطح کاغذ را در جهت خاصی میسر می‌سازد و در غیر از آن جهات خاص به دلیل وجود پیوندهای قوی درون هر لایه، امکان کنده شدن وجود نخواهد داشت.

این تعبیر به آن معنی است که مداد تنها در برخی جهات خاص می‌نویسد و در دیگر جهات مداد نخواهد نوشت؛ ولی این تصور با تجربه هر روزه ما از به کارگیری مداد متفاوت و متناقض است زیرا به تجربه دریافته‌ایم که مداد در تمامی جهات می‌نویسد. ما مداد را در هر زاویه و هر جهتی نسبت به کاغذ حرکت دهیم مداد خواهد نوشت. پس دلیل این تناقض چیست؟ آیا ساختار گرافیت آنگونه که گمان می‌کنیم نیست؟ و یا اینکه توده گرافیت چیزی غیر از گسترش یکنواخت و یکپارچه ساختار گرافیت است؟

برای درک درست از رفتار توده مواد لازم است که با ریزساختار آنها آشنا شویم. با بررسی میکروسکوپی گرافیت درمی‌یابیم که توده گرافیت یکپارچه نیست بلکه این توده متشکل از دانه‌های بسیار ریزی است که هر یک به صورت مستقل و جدا از یکدیگر در درون خود دارای نظم ساختار گرافیت هستند. به عبارت دیگر مطابق شکل (۳-۴) توده گرافیت را می‌توان اجتماع بی‌نظمی از

بخش‌هایی که هر یک دارای نظم ساختار گرافیت هستند، دانست.



(علی‌رغم وجود نظم در داخل هر یک از دانه‌ها ولی جهت‌گیری دانه‌های ماده با یکدیگر متفاوت است).

شکل ۴-۳- طرحی ساده از ریزساختار واقعی گرافیت

در تصور اول ما توده گرافیت را یک ساختار یکپارچه و منظم از ساختار گرافیت که در تمام توده گسترش یافته می‌دانستیم در این حالت نظم حاکم بر ساختار، یک نظم با دامنه بلند که تمام توده را می‌پوشاند در نظر گرفته می‌شود اما در عمل نظم ساختار گرافیت به صورت موضعی و با دامنه کوتاه مشاهده می‌شود. این بی‌نظمی در ساختار گرافیت باعث ایجاد تنوع و گوناگونی در جهت قرار گرفتن دانه‌ها در توده گرافیت می‌شود. بنابراین در موقع نوشتن همیشه بخش‌هایی که زاویه و جهت مناسب برای حرکت و کنده شدن داشته باشند، وجود خواهد داشت و ما بدون نگرانی از جهت و زاویه قرار گرفتن مداد می‌توانیم از نوشتن آن مطمئن شویم.

بدین ترتیب مشخص گردید که عوامل تأثیرگذار در خواص توده مواد عبارت بودند از:

۱- عناصر یا اتم‌های تشکیل دهنده

۲- ساختار

۳- ریزساختار

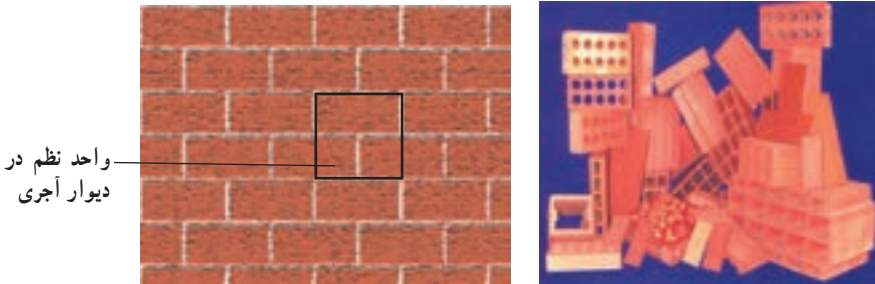
#### ۴-۳- ساختار بلوری فلزات

در حالت کلی مواد جامد دو نوع ساختار اتمی دارند. یک دسته ساختار کریستالی دارند؛ یعنی آرایش اتم‌ها در ساختمان داخلی آنها براساس یک نظم و الگوی تکرار شونده از واحدهایی به نام سلول

واحد می‌باشد. به عبارت دیگر ساختار مواد دارای شبکه کریستالی با کنار هم قرار گرفتن تعداد بسیار زیادی از سلولهای واحد تشکیل شده است. فلزات و آلیاژهای آنها جزء مواد با ساختار کریستالی هستند. برای درک بهتر موضوع به مثال زیر توجه کنید.

فرض کنید یک کامیون آجر توسط یک کمپرسی تخلیه شود و هریک از آجرها نماد یک اتم باشند، در این حالت شما بی نظمی را مشاهده می‌کنید.

اما اگر مطابق شکل (۵-۳) آجرها توسط یک بنا به صورت مرتب و منظم روی هم چیده شود شما یک ساختار منظم از آجرها را مشاهده می‌کنید که دارای نظم تکرار شونده از واحد نظم خود می‌باشند. این موضوع را به ساختار اتمی جامدات نیز می‌توان تعمیم داد.



شکل ۵-۳- واحد نظم در دیوار آجری

دسته دیگر مواد جامد آنهایی هستند که دارای نظم مشخصی در ساختار خود نیستند که در اصطلاح آمورف گفته می‌شوند. در این مواد قرار گرفتن اتم‌ها در کنار یکدیگر تقریباً بدون نظم و ترتیب خاصی است، مثل: شیشه، و بسیاری از مواد سرامیکی، پلاستیک و لاستیک به‌طور معمول دارای ساختار اتمی آمورف هستند.

فلزات و آلیاژهای آنها در حالت جامد همان‌طور که پیشتر گفته شد به‌طور معمول دارای ساختار کریستالی هستند و در چهارده شکل مختلف متبلور می‌شوند ولی اکثر فلزات صنعتی متداول دارای سه نوع نظم اتمی یا شبکه کریستالی هستند که در این فصل به معرفی مختصر این سه نوع شبکه کریستالی اکتفا می‌شود.

**الف) سلول واحد مکعبی مرکزدار (BCC) <sup>۱</sup>:** در این نوع شبکه بلوری، سلول واحد به‌صورت یک مکعب فرض می‌شود که در هر گوشه به اضافه مرکز مکعب یک اتم مستقر می‌باشد.

<sup>۱</sup> - Body Centered Cubic



همان‌طور که در شکل (۳-۴) بصورت شماتیک نمایش داده شده است در اینجا اتم‌های مستقر در هر گوشه مکعب با هشت سلول واحد مجاور خود مشترک هستند (اتم‌های آبی رنگ). سهم سلول واحد از هر اتم گوشه معادل  $\frac{1}{8}$  می‌باشد لذا با توجه به اینکه ۸ اتم در گوشه‌ها قرار دارند بنابراین سهم

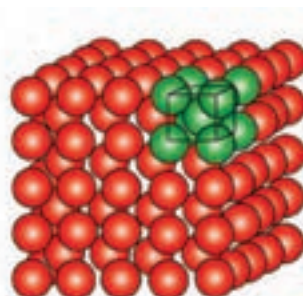
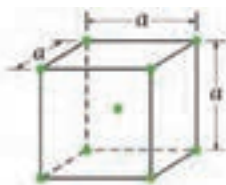
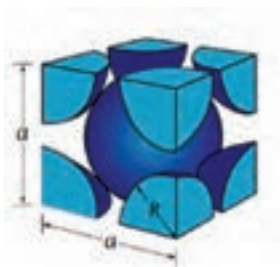
شبکه BCC از اتم‌های گوشه برابر یک اتم می‌باشد ( $8 \times \frac{1}{8} = 1$ ).

اتم واقع در مرکز مکعب تنها به این سلول واحد تعلق دارد (اتم قهوه‌ای رنگ). بدین ترتیب در فضای سلول واحد BCC معادل دو اتم قرار دارند و بقیه، فضای خالی بین اتم‌ها است. به عبارت دیگر حجم اشغال شده در شبکه کریستال BCC معادل ۶۸ درصد فضای سلول واحد می‌باشد.

$$\left(8 \times \frac{1}{8}\right) + 1 = 2$$

محاسبه تعداد اتم‌ها در شبکه کریستالی BCC

لازم به ذکر است بسیاری از فلزات نظیر: آهن، کرم، تنگستن، وانادیم و مولیبدن در دمای محیط دارای شبکه بلوری BCC می‌باشند.

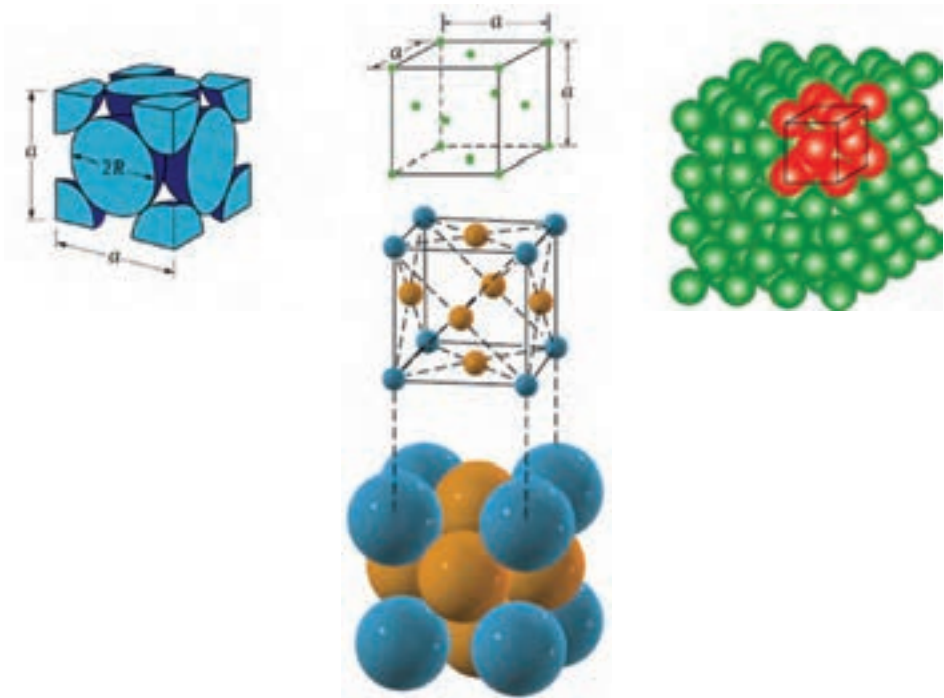


شکل ۳-۶- شبکه کریستالی مکعبی مرکز بر

ب) سلول واحد مکعبی با وجود مرکز پر (FCC)<sup>۱</sup>: در این نوع شبکه بلوری سلول واحد به صورت یک مکعب در نظر گرفته می شود که در هر گوشه و مرکز وجوه آن یک اتم قرار دارد. مطابق شکل (۳-۷) هر اتم گوشه با هشت سلول واحد مجاور خود مانند شبکه کریستالی BCC مشترک است (اتم های آبی رنگ) و هر اتم واقع در مراکز وجوه شش گانه مکعب تنها بین دو سلول واحد مجاور هم مشترک می باشند (اتم های قهوه ای رنگ). به عبارت دیگر حجم اشغال شده در شبکه کریستالی FCC معادل ۷۴ درصد فضای سلول واحد است:

$$\left(8 \times \frac{1}{8}\right) + \left(6 \times \frac{1}{2}\right) = 4$$

محاسبه تعداد اتم ها در شبکه کریستالی FCC: بنابراین در ساختار FCC حجم اشغال شده هر سلول واحد در مجموع معادل چهار اتم کامل است و بقیه فضای موجود، فضای خالی بین اتم ها است. فلزاتی مثل: مس، آلومینیوم، نقره، طلا، پلاتین، نیکل و سرب در دمای معمولی دارای شبکه کریستالی FCC می باشند.

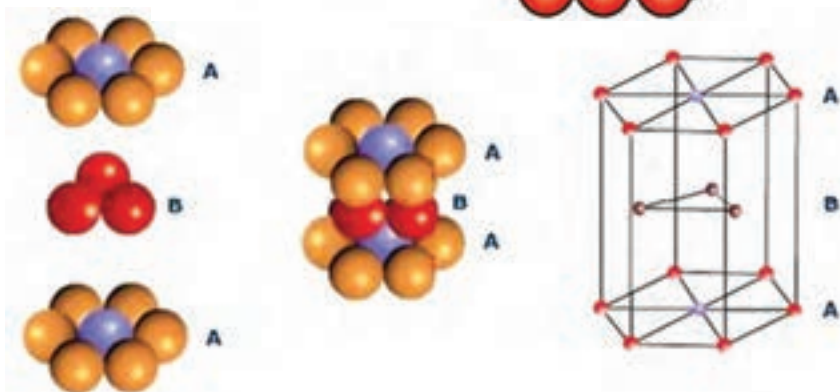
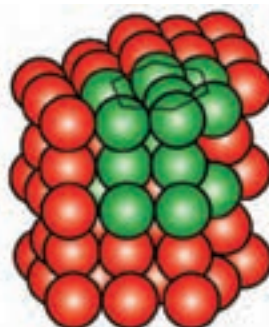
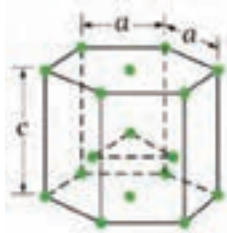


شکل ۳-۷- شبکه کریستالی مکعبی با وجوه مرکز پر

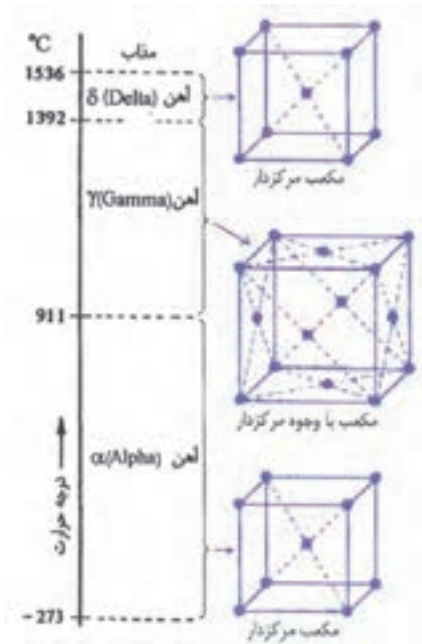


ج) سلول واحد منشور با قاعده شش ضلعی فشرده (HCP) <sup>۱</sup>: نمایش شماتیک این سلول واحد در شکل (۳-۸) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود سلول واحد به صورت یک منشور شش وجهی است که دوازده اتم در گوشه‌ها و دو اتم در وسط وجوه بالا و پایین آن قرار گرفته‌اند. اضافه بر این سه اتم در وسط صفحات میانی مستقر می‌باشند. بدین ترتیب تعداد اتم‌های متعلق به یک سلول واحد HCP در مجموع معادل شش است (یک ششم به ازاء هر یک از اتم‌های گوشه، یک دوم به ازاء اتم‌های وجوه بالا و پایین و سه اتم متعلق به صفحات میانی که مختص هر سلول واحد می‌باشند) و حجم اشغال شده در شبکه کریستالی HCP معادل ۷۴ درصد فضای سلول واحد است. فلزاتی مثل: روی، منگنز، کادمیم، تیتانیوم، کبالت و منیزیم در دمای محیط ساختار بلوری HCP دارند.

$$\text{محاسبه تعداد اتم‌ها در شبکه کریستالی HCP} \quad 6 = 3 + (2 \times \frac{1}{6}) + (12 \times \frac{1}{6})$$



شکل ۳-۸- شبکه کریستالی منشور شش ضلعی فشرده



شکل ۹-۳- تغییرات ساختار بلوری آهن برحسب دما

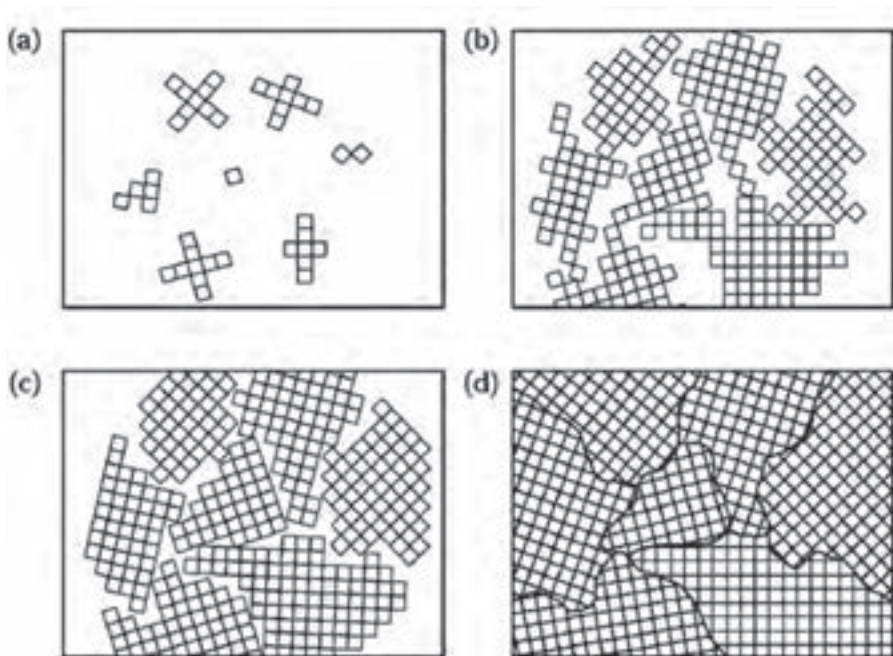
### ۱-۴-۳- ساختار بلوری آهن : ساختار

بلوری آهن در دمای پایین به صورت شبکه کریستالی مکعبی مرکز پر (BCC) است که به آن آهن آلفا می‌گویند. ولی همان‌طور که شکل (۹-۳) نشان می‌دهد با افزایش دمای آهن ساختار بلوری آن دچار تغییر می‌شود. در دمای ۷۲۱ درجه سانتیگراد ساختار آهن دچار تغییر می‌شود و به شکل مکعبی با وجوه مرکز پر (FCC) در می‌آید که به آن آهن گاما می‌گویند. با افزایش بیشتر دمای آهن مجدداً ساختار کریستالی آن متحول می‌شود و به حالت BCC تغییر شکل می‌دهد این تحول بلوری در دمای ۱۲۳۰ درجه سانتیگراد رخ می‌دهد و در نهایت با افزایش دمای آهن و رسیدن به حد نقطه ذوب (۱۵۳۲ درجه سانتیگراد) شبکه بلوری آهن درهم می‌ریزد و به حالت مذاب در می‌آید.

لازم به ذکر است با تغییر شبکه بلوری آهن نحوه آرایش اتم‌های آهن در ساختار آن تغییر می‌کنند. بنابراین خواص آن دچار تغییر می‌شود. به‌طور مثال با تبدیل ساختار آهن از حالت BCC به حالت FCC، حجم آن افزایش پیدا می‌کند، قابلیت هدایت حرارتی و رسانایی الکتریکی آن کم می‌شود و خاصیت مغناطیسی آهن از بین می‌رود. هم‌چنین به‌طور معمول اکثر فلزات در محدوده دمای محیط تا نقطه ذوب خود دچار یک یا چند تغییر ساختاری می‌شوند.

**ریز ساختار فلز آهن:** همان‌طور که در ابتدای فصل در مورد گرافیت بحث شده شبکه کریستالی توده مواد در حالت معمولی دارای نظم با دامنه بلند که تمام توده ماده را در بر می‌گیرد نمی‌باشند بلکه در همه ساختارها تعداد زیادی از نقص‌های مختلف با شکل و اندازه‌های متفاوت وجود دارند که خواص فیزیکی و مکانیکی فلزات و از جمله آهن و آلیاژهای آن را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. به‌طور مثال مطابق شکل (۱۰-۳) از زمانی که آهن و آلیاژهای آن از حالت مذاب شروع به انجماد می‌نمایند کریستال‌های آهن در نقاط مختلف مذاب تشکیل و رشد می‌نمایند و در نهایت ریزساختاری مشابه قسمت (d) شکل (۱۰-۳) ایجاد می‌شود که باعث تنوع و گوناگونی زیادی در

اندازه و جهت قرار گرفتن دانه‌ها در توده فلز می‌گردد.



شکل ۱-۳- نمایش شماتیک از تشکیل و رشد شبکه بلوری آهن و آلیاژهای آن

(a) شروع انجماد و تشکیل بلورها، (b) و (c) رشد بلورها در جهات مختلف، (d) تشکیل دانه‌های فلز با اندازه‌ها و جهت‌گیری‌های مختلف

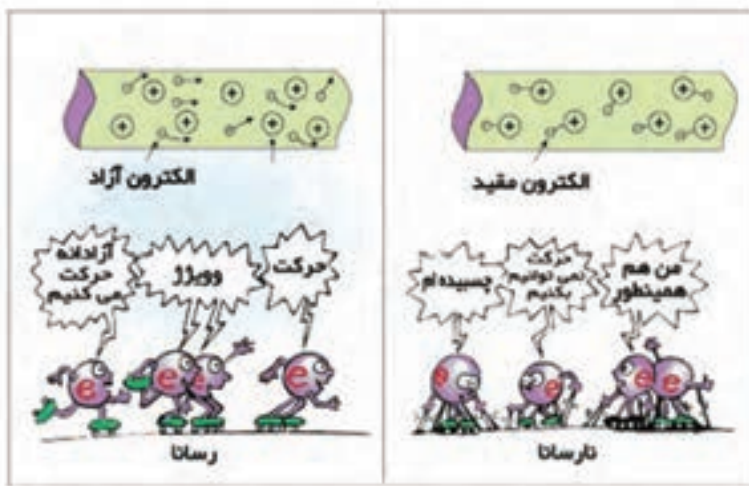
### ۳-۵- خواص فلزات

به ندرت ماده‌ای پیدا می‌شود که مجموعه ایده‌آلی از خواص مورد نظر را توأم با هم داشته باشد. به طور مثال کمتر ماده‌ای را می‌توان یافت که هم استحکام بالا و هم انعطاف‌پذیری خوبی داشته باشد. به طور معمول مواد مستحکم، انعطاف‌پذیری کمی دارند و برعکس. بنابراین شناخت خواص مواد و تغییر آنها در شرایط مختلف کاری، نکته مهمی است که می‌بایست به آن توجه شود. از این رو آشنایی با خواص فیزیکی، مکانیکی و تکنولوژیکی مواد نقش مهمی در شناسایی و انتخاب مواد به خصوص فلزات و آلیاژها که بیشترین کاربرد را در ساخت قطعات و انواع سازه‌های صنعتی دارند ایفا می‌کند.

#### ۱- ۳-۵- خواص فیزیکی: منظور از خواص فیزیکی خواصی هستند که باعث تغییر در

ساختمان شیمیایی ماده یا فلز نمی‌شوند مثل: قابلیت هدایت جریان الکتریسیته و حرارت، جرم مخصوص، نقطه ذوب و امثال آنها که در این بخش به معرفی مختصر آنها می‌پردازیم.

**هدایت الکتروسیسته:** این خاصیت عبارت است از قدرت هدایت واحد طول جسم بر واحد سطح مقطع آن که نشان دهنده توانمندی ماده در انتقال بار الکتریکی از یک محل به محل دیگر می باشد. مواد رسانا مثل فلزات در آخرین مدار الکترونی خود به طور معمول یک یا دو الکترون دارند که قادراند آزادانه از مدار خود خارج شده و در سرتاسر جسم رسانا حرکت کنند (شکل ۱۱-۳). فلزاتی مثل نقره، مس و آلومینیوم بیشترین هدایت الکتروسیسته را دارند. اما در مواد نارسانا مثل پلاستیک و نایلون به دلیل عدم وجود الکترونهایی که بتوانند آزادانه در سراسر جسم حرکت داشته باشند، قادر به هدایت جریان الکتروسیسته نیستند (شکل ۱۱-۳).

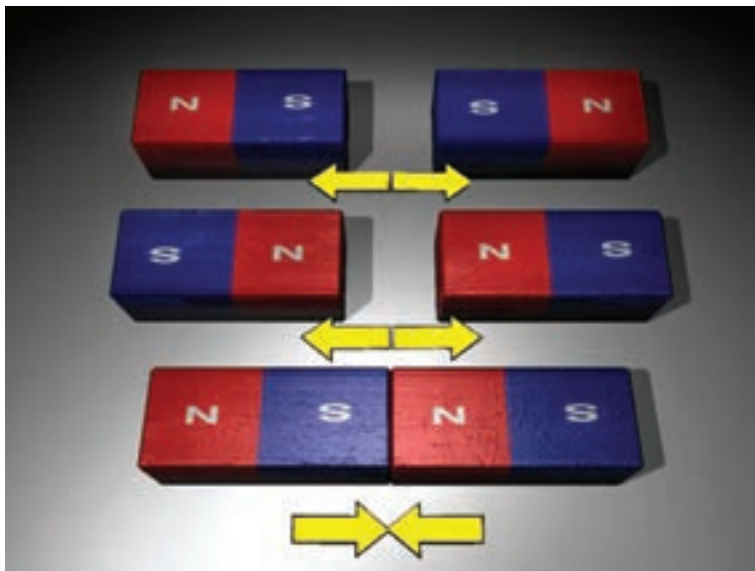


شکل ۱۱-۳ الکترونهای آزاد مسئولیت هدایت جریان الکتروسیسته را برعهده دارند.

**مغناطیسی:** همه شما با آهن ربا آشنا هستید. فلزاتی را که جذب آهن ربا می شوند فرومغناطیسی می نامند. این خاصیت مربوط به چگونگی حرکت الکترونها و جهت گیری آنها در میدان مغناطیسی ناشی می شود و فقط در بعضی فلزات دیده می شود. در حالیکه اغلب آلیاژهای آهن (به جز بعضی فولادهای زنگ نزن) و آلیاژهای نیکل و کبالت دارای خاصیت مغناطیسی هستند. ولی غیرفلزات و بسیاری از فلزات و آلیاژهای آنها دارای چنین خاصیتی نیستند. لذا جذب میدان مغناطیسی نمی شوند.

این خاصیت در توسعه بسیاری از صنایع از جمله صنعت سخت افزارهای رایانه ای نقش بسیار مهمی دارد زیرا یکی از روشهای ساخت حافظه های رایانه ای برای ذخیره اطلاعات، استفاده

از خاصیت مغناطیسی مواد است که در دیسکت و حافظه‌های قابل حمل از این خاصیت استفاده می‌شود.



شکل ۱۲-۳- چگونگی تأثیر دو آهن‌ربا بر یکدیگر

**هدایت حرارتی:** این خاصیت مشابه هدایت الکتریسیته به صورت قدرت هدایت حرارت واحد طول جسم بر واحد مساحت سطح مقطع آن تعریف می‌شود و به طور معمول فلزاتی که بیشترین قابلیت هدایت الکتریسیته را دارند از نظر هدایت حرارتی نیز بهترین هستند.

**انبساط حرارتی:** اتم‌های یک ماده به خصوص فلزات و آلیاژها با دریافت انرژی حرارتی شروع به ارتعاش و لرزش می‌کنند و فاصله بین اتم‌ها و در نتیجه ابعاد شبکه کریستالی ماده افزایش می‌یابد. هرچه پیوند بین اتم‌ها در شبکه فلز قوی‌تر باشد (فلزات با دمای ذوب بالا)، میزان انبساط حرارتی شبکه فلز کمتر است چون اتم‌ها در مقابل حرکت از خود مقاومت نشان می‌دهند. ضریب انبساط حرارتی که برحسب واحد طول یا واحد حجم ماده تعریف می‌شود معیاری برای نشان دادن تغییرات ناشی از انبساط حرارتی در مواد می‌باشد. در جدول (۱-۳) برای تعدادی از مواد صنعتی شامل فلزات و غیرفلزات ضریب انبساط حرارتی خطی و حجمی جهت مقایسه آورده شده است.

جدول ۱-۳- ضریب انبساط حرارتی مواد مختلف

ضریب انبساط حرارتی حجمی	ضریب انبساط حرارتی خطی	ماده
$\beta(\approx 3\alpha)$	$\alpha$	ماده
۸۷	۲۹	سرب
۶۹	۲۳	آلومینیوم
۵۷	۱۹	برنج
۵۴	۱۸	نقره
۵۱/۹	۱۷/۳	فولاد زنگ نزن
۲۷	۹	پلاتین
۲۵/۵	۸/۵	شیشه
۱۳/۵	۴/۵	تنگستن

**جرم مخصوص:** جرم واحد حجم از هر ماده را جرم مخصوص آن ماده می‌نامند. جرم مخصوص به نوع اتم‌های تشکیل دهنده ماده، اندازه و تراکم شبکه کریستالی بستگی دارد.

**نقطه ذوب:** درجه حرارتی که ماده از حالت جامد به حالت مایع تبدیل می‌شود نقطه ذوب ماده می‌گویند فلزات در حالت خالص نقطه ذوب معینی دارند ولی در صورت اضافه کردن عناصر آلیاژی یا آلیاژ شدن نقطه ذوب آنها تغییر می‌کند.

### بیشتر بدانیم

#### شوک حرارتی

ایجاد ترک در ماده به دلیل تنش حرارتی ناشی از تغییرات دمایی شدید را شوک حرارتی می‌گویند. تغییر دما سبب ایجاد انبساط و انقباض در ساختار اتمی مواد می‌شود. چنانچه تغییر دمایی جسم شدید باشد و یا مقدار انبساط یا انقباض زیاد باشد سبب ایجاد ترک در ماده می‌گردد.

مواد مختلف دارای ضریب انبساط حرارتی و قابلیت هدایت حرارتی متفاوت می‌باشند. از طرفی استحکام یا تنش لازم برای شکست مواد نیز با هم فرق می‌کند. بنابراین انبساط و انقباض داخلی ماده در اثر تغییر ناگهانی دما سبب ایجاد ترک‌های



ریز شده و رشد ترک‌ها موجب شکست می‌گردد. قطعات سرامیکی و شیشه‌ای به دلیل رسانایی حرارتی پایین، چقرمگی کم و ضریب انبساط حرارتی بالا مستعد این نوع شکست هستند. در اصطلاح گفته می‌شود این مواد در برابر شوک حرارتی حساس می‌باشند.

**۲-۵-۳- خواص مکانیکی:** رفتار مواد در برابر نیروهای مکانیکی وارد شده را خواص مکانیکی مواد می‌گویند. برخی از این خواص عبارتند از: سختی، استحکام، چقرمگی، خستگی، خزش و... که نشان‌دهنده رفتار مواد در برابر نیروهای خارجی وارده هستند. بنابراین در انتخاب مواد برای طراحی و ساخت سازه‌های صنعتی بیش از هر چیز خواص مکانیکی آنها مورد ارزیابی و توجه قرار می‌گیرد. به مثال‌های زیر توجه کنید.

از آنجا که چکش برای ضربه زدن به اجسام ساخته می‌شود، در نتیجه ماده انتخاب شده باید در مقابل نیروهای ضربه‌ای دارای مقاومت زیاد باشد. جک اتومبیل که برای بلند کردن اتومبیل استفاده می‌شود باید دارای مقاومت فشاری زیادی باشد و پیچ گوه‌شده باید در مقابل نیروهای پیچشی مقاومت کافی داشته باشد. حال چنانچه نیروی اعمالی از حد معین تجاوز کند، باعث تغییر شکل و شکست جسم می‌شود. بنابراین شناخت رفتار مواد در مقابل نیروهای مکانیکی در حقیقت همان شناخت خواص مکانیکی ماده می‌باشد که از طریق آزمایش‌های مخصوص در آزمایشگاه‌ها بدست می‌آیند. جدول (۲-۳) انواع مختلف نیروهای مکانیکی، خواص مکانیکی متناظر با هر نیرو و تأثیر نهایی آن را روی سازه صنعتی نشان می‌دهد.

اجزای یک سازه به‌طور معمول تحت تأثیر ترکیبی از چند نیرو یا تنش قرار می‌گیرند.

جدول ۲-۳- معرفی خواص مکانیکی

نمایش نیرو	شکل سازه صنعتی واردکننده نیرو	خاصیت مکانیکی	نمونه قطعات تحت بار	عکس‌العمل ماده زمانی که نیرو قابل تحمل نباشد	ردیف
		استحکام کششی: مقاومت ماده در برابر نیروی کششی	سیم بکسل	پاره شدن	۱

ادامه جدول ۲-۳

ردیف	نمایش نیرو	شکل سازه صنعتی واردکننده نیرو	خاصیت مکانیکی	نمونه قطعات تحت بار	عکس العمل ماده زمانی که نیرو قابل تحمل نباشد
۲			استحکام فشاری: مقاومت ماده در برابر نیروی فشاری	ماده زیردستگاه پرس	شکستن یا له شدن
۳			استحکام برشی: مقاومت ماده در برابر نیروی برشی	ورق در زیر تیغه قیچی یا گیوتین	بریدن
۴			مقاومت پیچشی: مقاومت ماده در برابر نیروی پیچشی	پیچ هنگام بسته یا باز شدن	شکستن
۵			مقاومت خمشی: مقاومت ماده در برابر نیروی خمشی	تیرآهن سقف ساختمان	خم شدن
۶	ضربه‌ای		چقرمگی: مقاومت ماده در برابر ضربه	چکش، سندان	شکستن

ادامه جدول ۲-۳

ردیف	نمایش نیرو	شکل سازه صنعتی واردکننده نیرو	خاصیت مکانیکی	نمونه قطعات تحت بار	عکس العمل ماده زمانی که نیرو قابل تحمل نباشد
۷	سیکلی - متناوب		استحکام خستگی: مقاومت ماده در برابر نیروی متناوب	بدنه پل ها و بال هوایما	شکستن
۸	سایشی		مقاومت سایشی: مقدار جرم کاهش یافته در یک زمان معین در اثر سایش	تیغه ادوات کشاورزی	سایش
۹	کششی در دمای بالا		مقاومت خزشی: مقاومت ماده در برابر نیروهای وارده در دمای بالا و زمان طولانی	مخازن و رآکتورهای تحت فشار که در دمای بالا کار می کند	خزش
۱۰	سختی		سختی: مقاومت جسم در مقابل نفوذ جسم خارجی است	سوزن، خط کش، یا دستگاه سختی سنج	سوراخ شدن یا خرایش برداشتن

### ۳-۵-۳- خواص تکنولوژیکی :

● **قابلیت چکش خواری :** قابلیت تغییر شکل مواد را به کمک نیروی فشاری و ضربه قابلیت چکش خواری می نامند. چکش خواری که شکل دیگری از قابلیت تغییر شکل پلاستیک است به قابلیت تغییر شکل دائم یک فلز تحت نیروی ضربه و فشاری بدون آنکه گسیخته شود، گفته می شود. به خاطر همین خاصیت است که می توان فلزات را به صورت ورق های نازک چکش کاری و نورد کرد. طلا، نقره، قلع و سرب از جمله فلزاتی هستند که قابلیت چکش خواری بالایی از خود نشان می دهند. طلا قابلیت چکش خواری استثنایی دارد و می تواند به صورت ورق های نازکی که برای عبور نور کافی است نورد شود. ولی برخلاف مواد ذکر شده، چدن قابلیت چکش خواری خوبی ندارد. شکل (۱۳-۳) ظروف مسی ساخته شده از فلز مس را به روش چکش کاری نشان می دهد.



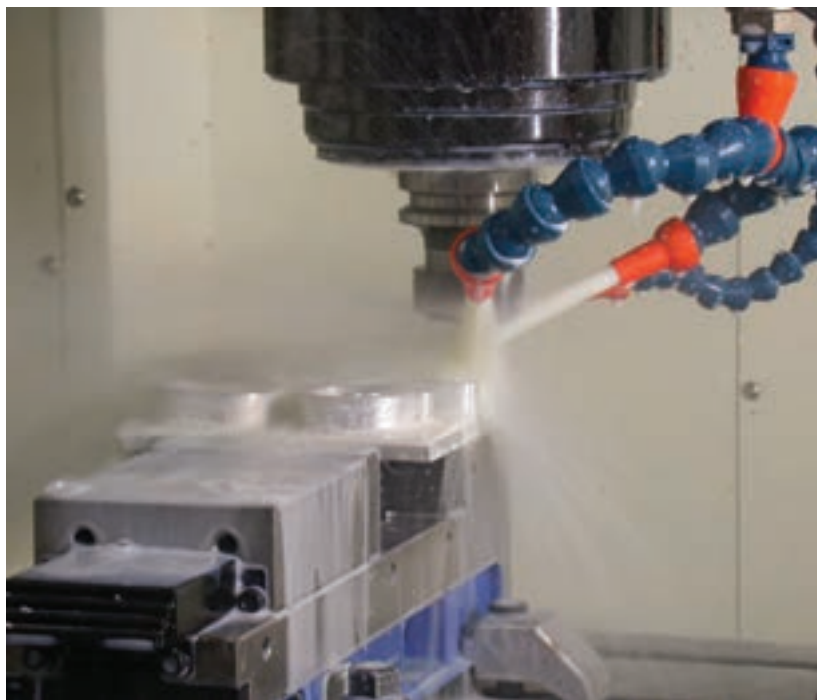
شکل ۱۳-۳- ظروف مسی ساخته شده به وسیله چکش کاری

- **قابلیت ریخته گری :** سهولت تولید قطعات صنعتی از مذاب ماده مورد نظر قابلیت ریخته گری نامیده می شود. چدن، آلومینیوم و مس به راحتی ریخته گری می شوند (شکل ۱۴-۳).
- **قابلیت جوشکاری :** موادی قابلیت جوشکاری دارند که بتوان آنها را به کمک حرارت و یا حرارت توأم با فشار در حالت مذاب یا جامد به یکدیگر متصل کرد. اکثر فولادها دارای قابلیت جوشکاری خوبی هستند.
- **قابلیت براده برداری یا ماشین کاری :** جسمی دارای قابلیت براده برداری خوبی است که

بتوان آن را با سرعت زیاد و نیروی کم براده برداری کرد و سطح آن نیز پس از براده برداری کاملاً صاف و پرداخت باشد. شکل (۳-۱۵) فرایند ماشین کاری یک قطعه صنعتی را نشان می دهد.



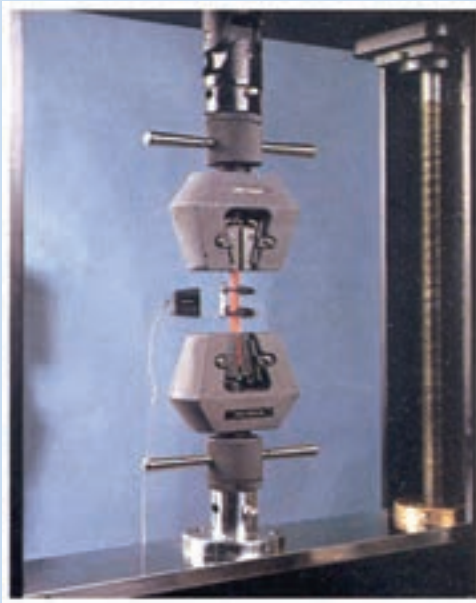
شکل ۳-۱۴ ذوب ریزی درون قالب ریخته گری



شکل ۳-۱۵ عملیات ماشین کاری قطعه فولادی

## اندازه‌گیری خواص مکانیکی

استحکام کششی : چنانچه مطابق شکل (۱۶-۳) یک نمونه با ابعاد و اندازه استاندارد مطابق تصویر تهیه و به فک دستگاه آزمایش کشش ببندیم (شکل ۱۷-۳) و به آن نیروی کششی محوری با سرعت ثابت و آرام اعمال کنیم، می‌توان اطلاعات مفیدی در خصوص رفتار الاستیک و پلاستیک ماده و بعضی از خواص مکانیکی مهم مواد نظیر استحکام کششی، شکست و تسلیم، انعطاف‌پذیری و مدول الاستیک که از نظر کاربردهای صنعتی بسیار حائز اهمیت می‌باشند به دست آورد.



شکل ۱۷-۳- دستگاه کشش

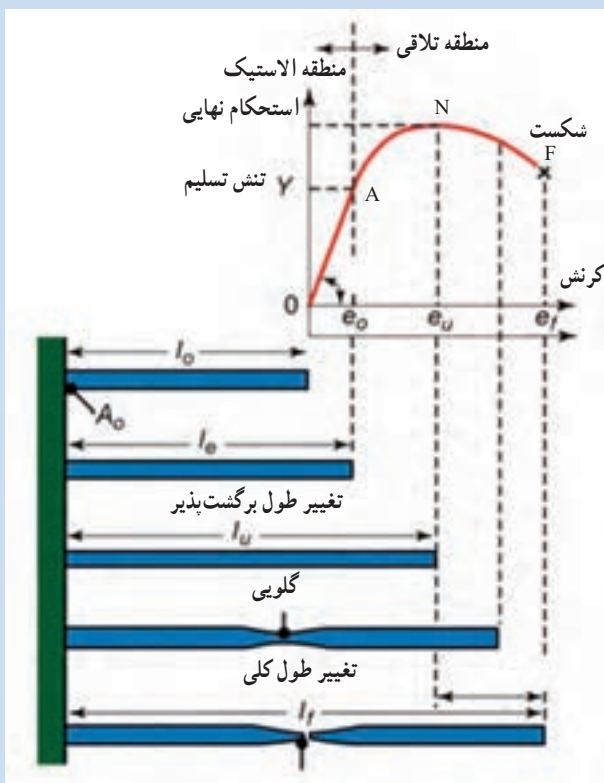


شکل ۱۶-۳- نمونه تست کشش طبق استاندارد ASTM A۳۷۰

لازم به یادآوری است نمونه آزمایشی علاوه بر ابعاد و اندازه استاندارد بایستی از نظر شرایط سطحی، صاف و بدون زدگی یا شیار باشد. به عبارت دیگر لازم است نیرو در یک راستا اعمال شده و به صورت یکنواخت در سطح مقطع نمونه توزیع شود یعنی محل‌های مساعد برای تمرکز تنش مانند گوشه‌های تیز نداشته باشیم.



چنانچه در طول آزمایش مقدار نیروی اعمال شده را برحسب تغییرات طول نمونه اندازه‌گیری و رسم نماییم نموداری مشابه شکل (۳-۱۸) به دست می‌آید که دارای چند منطقه ویژه می‌باشد. به این نمودارها، نمودارهای تنش - کرنش (تغییر طول نسبی) می‌گویند.



شکل ۳-۱۸- تغییر شکل ماده در نقاط مختلف نمودار تنش - کرنش

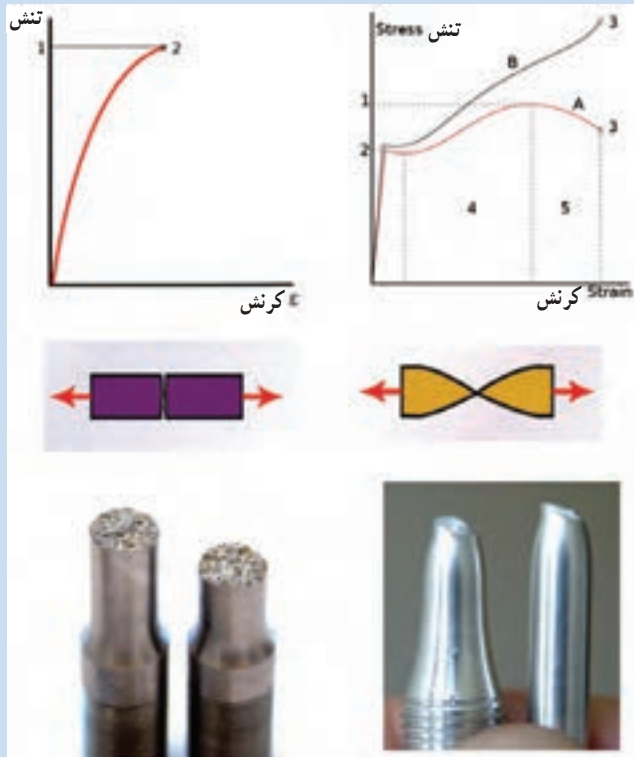
در محدوده OA با افزایش تنش تغییر طول نسبی نمونه یا کرنش آن به صورت خطی زیاد می‌شود و چنانچه تنش حذف شود نمونه به حالت اول برمی‌گردد که این منطقه الاستیک نامیده می‌شود. به علاوه شیب ناحیه خطی نمودار تنش - کرنش (OA) را مدول الاستیک می‌نامند.

در نقطه A تغییر شکل دائمی یا پلاستیک شروع می‌شود و رابطه بین تنش و تغییر طول نسبی از حالت خطی خارج می‌شود. بدین ترتیب نقطه A که شروع تغییر شکل

دائمی است نشان دهنده تنش تسلیم ماده می باشد.

در ناحیه AN تغییر شکل دائمی نمونه تحت کشش اتفاق می افتد نقطه N نشان دهنده بیشترین مقدار تنش یا نیروی است که نمونه می تواند تحمل کند و استحکام نهایی نامیده می شود.

از نقطه N به بعد در قسمتی از نمونه سطح مقطع شروع به باریک شدن می کند. تا اینکه در نقطه F نمونه می شکند. تنش معادل نقطه F را تنش شکست می گویند. لازم به ذکر است شکست در مواد به دو صورت ترد و نرم رخ می دهد. در شکست ترد، نمونه قبل از شکست تغییر شکل دائمی ندارد و نمودار تنش - کرنش و نمونه شکسته شده آن مانند تصویر سمت چپ شکل (۱۹-۳) می باشد در حالیکه در شکست نرم تغییر شکل پلاستیک قبل از شکست وجود دارد و نمودار تنش - کرنش و نمونه شکسته شده آن مانند سمت راست شکل (۱۹-۳) است.



شکل ۱۹-۳- تفاوت شکست ترد و نرم

لازم به ذکر است مقادیر مدول الاستیک، استحکام تسلیم و استحکام کششی با افزایش دما کاهش می‌یابد در صورتیکه انعطاف‌پذیری معمولاً با افزایش دما زیاد می‌شود.

### سختی

سختی، میزان مقاومت جسم در مقابل فرو رفتن جسم خارجی می‌باشد. سختی فلزات را توسط دستگاه سختی‌سنج که اساس آن فرو بردن جسمی سخت در جسم موردنظر است، اندازه‌گیری می‌کنند. شکل (۲۰-۳) نمونه‌هایی از دستگاه‌های اندازه‌گیری سختی رومیزی و قابل حمل را نشان می‌دهد.



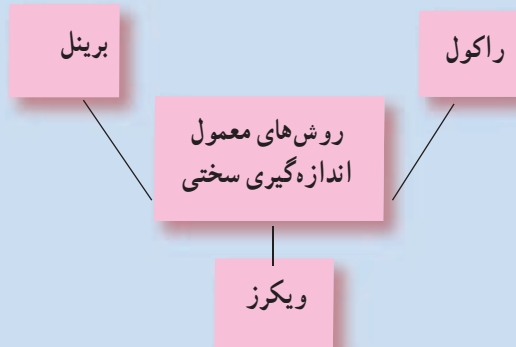
دستگاه سختی‌سنج قابل حمل

دستگاه سختی‌سنج رومیزی

شکل ۲۰-۳- دو نوع دستگاه سختی‌سنج

آزمایش سختی روشی ارزان، ساده و سریع می‌باشد و حتی در بعضی موارد دستگاه سختی‌سنج قابل حمل است، یکی از مزایای مهم تست سختی، غیر مخرب بودن آن می‌باشد به این معنی که نیاز به نمونه‌برداری و صدمه به جسم نیست. نمودار (۱-۳)

سه روش متداول اندازه‌گیری سختی را نشان می‌دهد.



نمودار ۱-۳- روش‌های متداول سختی سنج

تفاوت بین انواع سختی‌سنج، در نوع جسم اثرگذار<sup>۱</sup> (فرو رونده) و نیروی اعمالی می‌باشد. به عنوان مثال در روش راکول از یک گوی کرومی از جنس فولاد

سخت‌کاری شده و یا الماس مخروطی شکل

به عنوان فرورونده استفاده می‌کنند در حالی که در

روش ویکرز از یک الماس هرمی شکل به عنوان

فرورونده استفاده می‌شود و در روش برینل نیز

یک گوی فولادی مخصوص کرومی شکل که با

ذرات کاربید تنگستن سخت شده است بکار گرفته

می‌شود. شکل (۲۱-۳) تصویر جسم فرو رفته در

اندازه‌گیری سختی فلزات را نشان می‌دهد.



شکل ۲۱-۳- نمونه‌ای ابزار فرورونده جهت اندازه‌گیری سختی

## خستگی

به شکست مواد در اثر وارد شدن نیروهای سیکلی خستگی می‌گویند. در اینجا

مقدار نیروهای اعمالی کمتر از استحکام نهایی ماده می‌باشد. سازه‌هایی مثل: محور توربین،

میل‌گردان‌ها، سوپاپ‌های ماشین و نظایر آنها در شرایط کاری تحت تنش‌های متناوب قرار

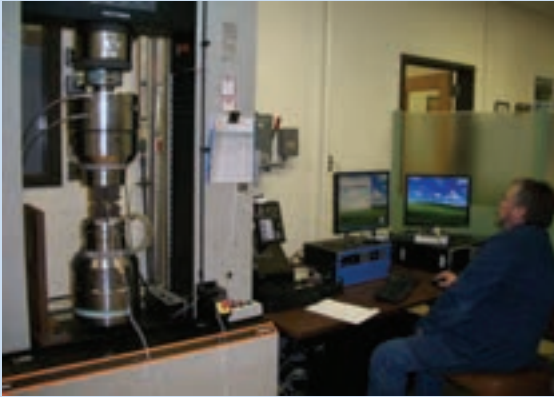
می‌گیرند. شکل (۲۲-۳) سطح مقطع قطعه شکسته شده در اثر خستگی و شکل (۲۳-۳)

نمایش ارزیابی مقاومت نمونه فلزی در مقابل شکست خستگی را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> indenter



شکل ۲۲-۳- شکست یک دسته میل لنگ آلومینیومی در اثر خستگی



شکل ۲۳-۳- آزمایش اندازه‌گیری مقاومت نمونه در برابر شکست خستگی

در حالت کلی تنش تسلیم و تنش شکست معیار طراحی قرار می‌گیرد ولی در شرایط اعمال نیروهای سیکلی باید استحکام خستگی یا حد خستگی ملاک عمل قرار گیرد. (طبق تعریف حداکثر تنشی که قطعه بتواند تعداد بسیار زیاد سیکل (حدوداً ۱۰<sup>۶</sup> دور) اعمال تنش را بدون شکست تحمل کند، استحکام خستگی یا حد خستگی می‌گویند.)

### خزش

چنانچه نمونه‌ای در دمای بالا (یعنی  $T < 0.5T_m$ )، که  $T_m$  نقطه ذوب برحسب درجه کلوین می‌باشد) تحت تأثیر تنش کششی قرار گیرد (هرچند که تنش کمتر از حد تسلیم باشد) با گذشت زمان ماده دچار تغییر شکل دائمی می‌شود و پس از مدتی شکست

اتفاق می افتد که این پدیده را خزش می گویند. پدیده خزش در قطعاتی که در دماهای بالا کاربرد دارند مثل : اجزاء موتورهای احتراق، دیگ های بخار، لوله های انتقال بخار، بره های توربین بخار و گازی، مخازن تحت فشار، راکتورهای شیمیایی و هسته ای و امثال آن اتفاق می افتد.

بنابراین در طراحی موادی که قرار است در دماهای بالا بکار گرفته شوند لازم است فاکتور مقاومت در برابر خزش نیز در نظر گرفته شود و مهم است که سرعت تغییر شکل قطعه صنعتی تحت شرایط کاری (دما و تنش اعمالی) از حد معینی تجاوز نکند.

## آزمون پایانی

- ۱- عوامل مؤثر در خواص فلزات را توضیح دهید.
- ۲- سلول واحد را تعریف نمایید.
- ۳- شبکه کریستالی فلزات متداول را نام برده و برای هر یک مثال بزنید.
- ۴- خواص فیزیکی مواد را نام ببرید.
- ۵- نیروهای مکانیکی را با مثال نام ببرید.
- ۶- چهار مورد از خواص تکنولوژیکی فلزات را نام ببرید.
- ۷- هر چه انرژی پیوند بین اتم های ماده ..... باشد نقطه ذوب ماده ..... می یابد.

۸- عامل رسانایی الکتریکی در فلزات چیست؟

۹- تعداد اتم متعلق به سلول واحد BCC چند است؟

۱-۱      ۲-۲      ۳-۳      ۴-۴

۱۰- تعداد اتم متعلق به هر سلول واحد FCC چند است؟

۱-۱      ۲-۲      ۳-۳      ۴-۴

۱۱- تعداد اتم متعلق به هر سلول واحد HCP چند است؟

۱-۱      ۲-۲      ۳-۳      ۴-۴

۱۲- فشردگی کدام یک از شبکه های بلوری بیشتر است؟

الف) BCC      ب) FCC      ج) HCP      د) FCC و HCP