

خواص مواد

۲-۱ خواص مکانیکی مواد

در عملیات تولیدی بسیاری از قطعات با اعمال فشارهای شدید توسط ابزارها و قالبها، به اشکال مختلف تغییر شکل می یابند. از آنجایی که تغییر شکل در این فرآیندها توسط ابزارهای مکانیکی انجام می شود، درک رفتار مواد در مقابل فشار این ابزارها مهم است. خواص مکانیکی نشانگر رفتار مواد تحت نیروی خارجی که اصطلاحاً بار^۱ نامیده می شود، است. این خواص معیاری برای مشخصه های استحکام و مقاومت در حین عمل به شمار می رود و از اهمیت به سزایی در طراحی ابزارها و ماشین ها و ساختارهای تولیدی برخوردار است. خواص مکانیکی به ساختار مولکولی و پیوند های مواد^۲ و به ویژه به طبیعت و رفتار نواقص مولکولی^۳ واقع در کریستال یا مرز دانه ها بستگی دارد. مهمترین خواص مواد عبارتند از:

۱- استحکام	۳- پلاستیسیته	۵- چکشخواری	۷- برجهنگی
۲- الاستیسیته	۴- سفتی	۶- تورق پذیری	۸- چقرمگی

یک طراح با در نظر گرفتن این مشخصه ها به سهولت و درستی قادر به انتخاب ماده مناسب برای ارائه طرح های تولیدی می باشد. همچنین جهت بررسی خواص فوق از تست هایی استفاده می شود که در این فصل به توضیح برخی از این تست ها می پردازیم.

۲-۱-۱ استحکام^۴

استحکام یک ماده یعنی ظرفیتی که آن ماده می تواند در برابر نیروهای مخرب بارهای خارجی تحمل نماید. هر قدر ماده مستحکم تر باشد، بارهای بزرگتری را می تواند تحمل کند. پس استحکام نشان دهنده ظرفیت مقاومت یک ماده در مقابل تنش می باشد، بدون آن که شکسته شود. از آنجایی که تنش ها بسته به نوع بارگذاری متفاوت هستند (تنش کششی، فشاری، برشی یا پیچشی)، می توان انواع استحکام کششی، فشاری، برشی یا پیچشی داشت. حداکثر تنشی که هر ماده می تواند قبل از شکست تحمل کند، استحکام نهایی^۵ نامیده می شود. قدرت کشش یک ماده، استحکام نهایی آن در کشش می باشد.

۲-۱-۲ الاستیسیته^۶ (قابلیت ارتجاعی، انعطاف پذیری)

خاصیتی است که طی آن تغییر شکل ناشی از اعمال بارهای خارجی وارده بر ماده پس از جدا شدن بارها رفع شده و ماده به حالت اولیه باز می گردد. یعنی الاستیسیته یک ماده قدرت بازگشت به حالت اولیه آن پس از تغییر شکل یافتن است، هنگامی که تنش ها یا بارهای خارجی وارد بر آن از ماده خارج شوند. این خاصیت، یک خاصیت کششی برای مواد محسوب می شود.

۲-۱-۳ تست کشش^۷

تست کشش متداول ترین تست برای مشخص کردن خواص مکانیکی مواد نظیر استحکام، چکشخواری^۸، چقرمگی^۹ و مدول الاستیسیته^{۱۰} است.

¹ Load

² Bond

³ Imperfections

⁴ Strength

⁵ Ultimate Strength

⁶ Elasticity

⁷ Tension Test

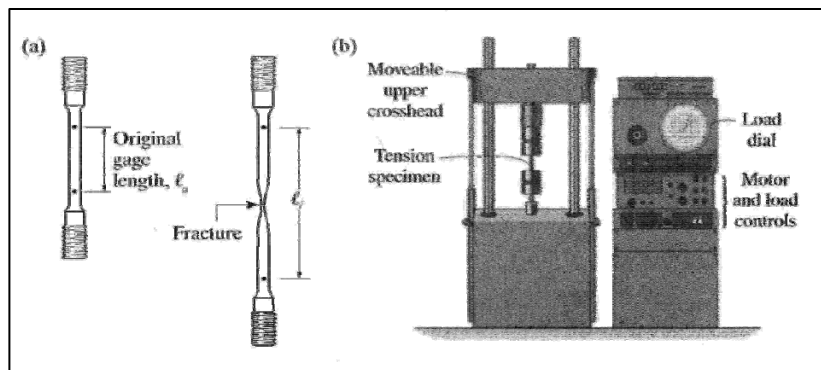
⁸ Ductility

⁹ Toughness

¹⁰ Elastic Modulus

در این تست ابتدا نمونه ای جهت تست^۱ همانند شکل (۲-۱) آماده می شود. این نمونه با توجه به استاندارد سازمانهای مرتبط هر کشور (در آمریکا با توجه به مشخصات ASTM)، آماده می شود.

معمولاً نمونه دارای اندازه اولیه، l_0 ، معمولاً ۵۰ میلیمتر (۲ اینچ)، و مساحت سطح مقطع اولیه، A_0 ، معمولاً ۱۲/۵ میلیمتر (۰/۵ اینچ)، است. نمونه بین دو فک ماشین تست کشش قرار داده می شود. این ماشین ها مجهز به کنترل هایی هستند تا نمونه در نرخهای متفاوت تغییر شکل و دما مورد بررسی قرار گیرد.



۲-۱-۴ منحنی های تنش^۲ - کرنش^۳

در (شکل ۲-۲) روند تغییر شکل نمونه در تست کشش نشان داده شده است. زمانی که بار بر نمونه وارد می شود، نمونه متناسب با بار وارد شده، افزایش طول می دهد. این اثر رفتار الاستیک خطی^۴ نامیده می شود. اگر در این محدوده بار از روی نمونه برداشته شود، نمونه به اندازه و شکل اولیه خود باز می گردد (همان اتفاقی که در زمان رها کردن کش می افتد).

تنش مهندسی^۵ یا تنش اسمی^۶ به عنوان نسبت بار وارد شده P به سطح مقطع اولیه A_0 نمونه تعریف می شود:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} = \text{تنش مهندسی}$$

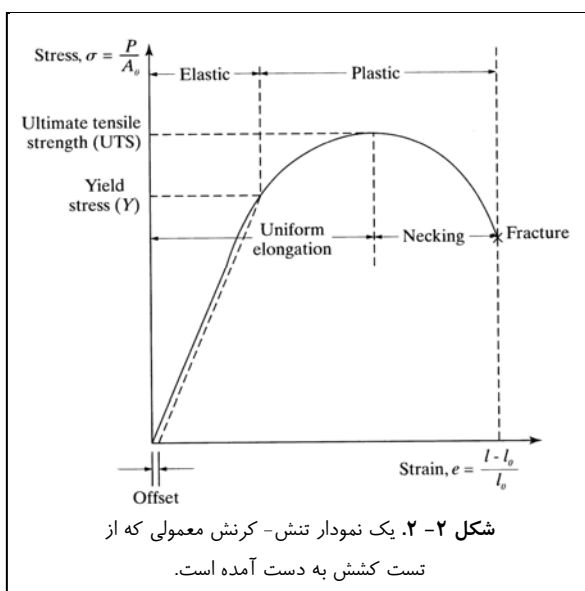
کرنش مهندسی^۷ به صورت زیر تعریف می شود:

$$e = \frac{(l - l_0)}{l_0} = \text{کرنش مهندسی}$$

که l طول لحظه ای نمونه است.

اکثر مواد می توانند مقداری تنش کششی تحمل کنند، به طوری که با حذف تنش به حالت اولیه برمی گردند. حداکثر تنش را که یک ماده بدون تغییر شکل می تواند تحمل کند را حد الاستیک^۸ نامند. بنابراین در این حد، ماده شکل اولیه خود را حفظ می کند (شکل ۲-۲). با افزایش بار، در سطحی از تنش، نمونه وارد تغییر شکل دائم (پلاستیک) می شود.

با گذشتن از این مرحله، دیگر تنش و کرنش همانند منطقه الاستیک متناسب نبوده و با هم تغییر نمی کنند. تنشی که در آن این پدیده رخ می دهد تنش تسلیم^۹ (γ) ماده، نامیده می شود.



¹ Test Specimen

² Stress

³ Strain

⁴ Linear Elastic Behavior

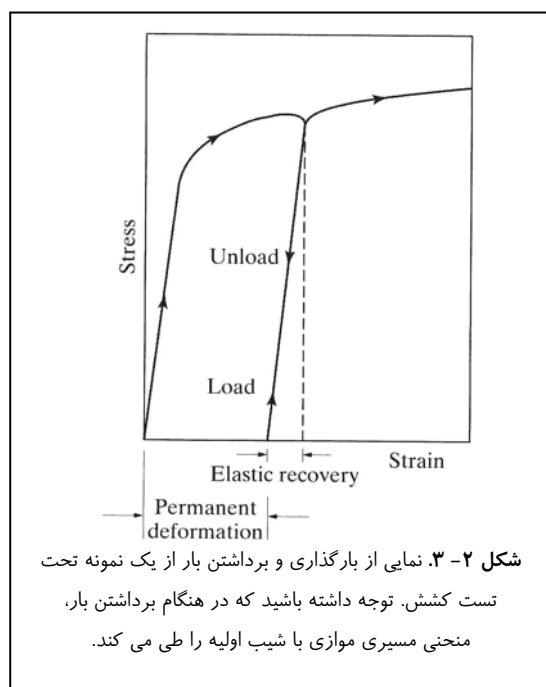
⁵ Engineering Stress

⁶ Nominal Stress

⁷ Engineering Strain

⁸ Elastic Limit

⁹ Yield Stress



حد تناسب^۱ نیز به نقطه ای اشاره دارد که از آن به بعد تنش و کرنش دیگر متناسب با هم تغییر نمی کنند. برای مواد نرم و چکشخوار، مشخص کردن دقیق محل نقطه تسلیم بر روی منحنی تنش-کرنش آسان نیست، زیرا شیب ناحیه خطی به آرامی کاهش پیدا می کند. در نتیجه معمولاً تنش تسلیم نقطه ای از منحنی تنش-کرنش تعریف می شود که به فصله ۰/۰۰۲ یا ۰/۲٪ موازی با شیب ناحیه الاستیک، افزایش طول می دهد (شکل ۲-۲).

با افزایش بار، پس از حد تسلیم سطح مقطع نمونه به صورت دائمی و یکنواخت در طول نمونه، کاهش پیدا می کند. اگر بار از روی نمونه ای که تنش آن بیشتر از حد تسلیم است برداشته شود، منحنی خط مستقیمی را موازی با شیب اولیه به سمت پایین طی می کند (شکل ۲-۳). با بیشتر شدن تدریجی بار، تنش مهندسی به بالاترین حد رسیده و سپس شروع به کاهش می کند (شکل ۲-۲). ماکزیمم اندازه تنش مهندسی، استحکام کششی^۲ (یا حد نهایت استحکام کششی^۳) ماده نامیده می شود. اگر پس از نقطه حد نهایی استحکام کششی، بار بیشتری به نمونه وارد شود، نمونه شروع به گلوبی شدن^۴ می کند. سطح مقطع نمونه دیگر در طول آن یکنواخت نبوده و در ناحیه گلوبی شده کمتر است. با ادامه تست، تنش مهندسی کمتر شده و نمونه نهایتاً در منطقه گلوبی شده شکسته می شود. تنش مهندسی در زمان شکست، تنش شکست^۵ نامیده می شود.

نکته: اکثر مواد چکشخوار به جای این که نقطه تسلیم مشخصی داشته باشند، تسلیم تدریجی و نیز معیاری دیگر از تنش تسلیم به نام تنش گواه^۶ را از خود نشان می دهند. تنش گواه، تنشی است که ماده می تواند بدون آن که تا حد کوچکی از طول نمونه اولیه (معمولاً ۰/۱ تا ۰/۲ درصد) تغییر طول بدهد، تحمل کند. نسبت تنش به کرنش در منطقه الاستیک به عنوان مدول الاستیسیته^۷، E ، یا مدول یانگ^۸ نامیده می شود:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \text{مدول الاستیسیته}$$

این رابطه خطی قانون هوک^۹ نامیده می شود. مدول الاستیسیته مقیاسی است از شیب منطقه الاستیک منحنی و در نتیجه سفتی ماده. در تساوی فوق، از آنجایی که کرنش مهندسی بدون بعد است، E دارای همان واحدی است که تنش (σ) دارد. هر چه مقدار E بزرگتر باشد، میزان باری که برای کشیدن نمونه لازم است به همان اندازه بیشتر می شود و در نتیجه ماده سفت تر است. برای مثال می توان یک تکه فلز را با یک تکه لاستیک مقایسه کرد. زمانی که می خواهید هر دو را به یک اندازه بکشید، میزان باری که با فلز وارد می کنید از لاستیک به مراتبی بیشتر است و در نتیجه می توانیم بگوییم که فلز سفت تر است. میزان افزایش طول قطعه کار تحت کشش با فشردهگی عرضی همراه است؛ می توان این اثر را با شیدن یک نوار لاستیکی مشاهده کرد. قدر مطلق نسبت کرنش عرضی به کرنش طولی، نسبت پواسون^{۱۰} خوانده شده و با ν نشان داده می شود.

۲-۱-۵ تنش-کرنش واقعی

در قسمت قبل دیدیم که تنش مهندسی بر اساس سطح مقطع اولیه (A_0) اندازه گیری می شود. می دانیم که سطح مقطع لحظه ای نمونه با افزایش طول نمونه کوچک می شود. در نتیجه تنش مهندسی نشان دهنده تنش واقعی وارد شده به نمونه نیست. تنش واقعی^{۱۱} به صورت نسبت بار P به سطح مقطع لحظه ای (A) نمونه تعریف می شود:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \text{تنش واقعی}$$

¹ Proportional Limit

² Tensile Strength

³ Ultimate Tensile Strength (UTS)

⁴ Necking

⁵ Breaking or Fracture Stress

⁶ Proof Stress

⁷ Modulus of Elasticity

⁸ Young Modulus

⁹ Hooke's Law

¹⁰ Poisson's Ratio

¹¹ True Stress

برای کرنش واقعی^۱، ابتدا افزایش طول نمونه را با افزایش لحظه ای طول در نظر می گیریم. سپس می توان با محاسبات ریاضی نشان داد که کرنش واقعی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\text{کرنش واقعی} = \varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

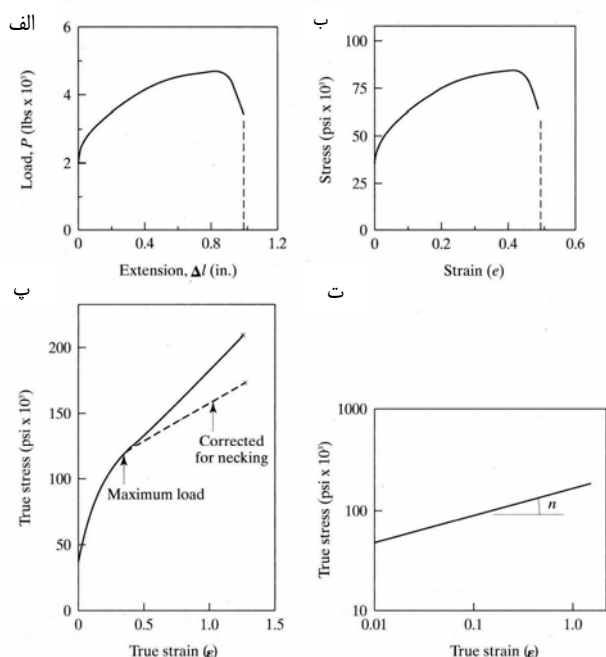
در تساوی های فوق، برای مقادیر کم کرنش، مقادیر کرنش واقعی و مهندسی تقریباً با هم برابرند. با این حال، با افزایش بار این دو مقدار سریعاً از هم فاصله می گیرند. برای مثال زمانی که $e = 0.1$ است $\varepsilon = 0.095$ و زمانی که $e = 1$ است $\varepsilon = 0.69$.

۲-۱-۶ ساختار منحنی های تنش-کرنش

رویه ایجاد یک منحنی تنش-کرنش مهندسی به این صورت است: ابتدا منحنی بار-افزایش طول (شکل ۲-۴ الف) را در نظر گرفته و سپس بار (محور عمودی) را بر اساس اندازه سطح مقطع اولیه، A_0 ، و افزایش طول (محور افقی) را بر اساس طول اولیه نمونه، l_0 ، تقسیم کنید. از آنجایی که این مقادیر هر دو به اعداد ثابت تقسیم شده اند، منحنی تنش-کرنش مهندسی به دست آمده (شکل ۲-۴ ب) دارای همان شکلی است که منحنی بار-افزایش طول دارد (شکل ۲-۴ الف). (در این منحنی ها $A_0 = 0.056$ اینچ مربع و $A_f = 0.016$ اینچ مربع).

منحنی های تنش-کرنش واقعی به همین صورت با تقسیم بار به سطح مقطع لحظه ای و کرنش واقعی از تساوی $\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l}$ ، به دست

می آیند. نتیجه در شکل (۲-۴ پ) نشان داده شده است. توجه داشته باشید که بر روی منحنی «تصحیحی» انجام شده است. این امر نشان دهنده این واقعیت است که منطقه گلوبی شده نمونه تحت تنشهای کششی سه بعدی قرار می گیرد. در این مقادیر تنش بالاتری نسبت به تنش واقعی به نمونه وارد می شود؛ به منظور کاهش این اثرات، منحنی می بایست به سمت پایین اصلاح شود.



شکل ۲-۴. (الف) منحنی بار-افزایش طول در تست کشش نمونه ای از جنس فولاد ضد زنگ؛ (ب) منحنی تنش-کرنش مهندسی کشیده شده با استفاده از اطلاعات موجود در منحنی (الف)؛ (پ) نمودار تنش-کرنش واقعی کشیده شده با استفاده از اطلاعات نمودار (ب). توجه داشته باشید که این منحنی دارای شیب مثبت است و این بدان معناست که ماده با افزایش کرنش، مقاوم تر می شود؛ (ت) منحنی تنش کرنش واقعی کشیده شده بر روی کاغذ لگاریتمی بر اساس اصلاح منحنی (ب).

می توانیم منحنی تنش واقعی-کرنش واقعی در شکل (۲-۴ پ) را توسط تساوی زیر نشان دهیم:

$$\sigma = k\varepsilon^n$$

که در آن K ضریب استحکام^۲ و n توان سخت کاری^۳-کرنش (یا سخت کاری قطعه کار) است. اگر منحنی اصلاح شده در شکل (۲-۴ پ) را بر روی یک صفحه لگاریتمی نشان دهیم، خواهیم دید که تقریباً به شکل یک خط (شکل ۲-۴ ت) است. شیب خط برابر توان n است. نتیجه هر چه شیب خط بیشتر باشد، ظرفیت کرنش-سخت کاری ماده بیشتر است (با بالا رفتن کرنش، ماده قوی تر و سخت تر می شود).

¹ True Strain

² Strength Coefficient

³ Strain- Hardening (or Work Hardening) Exponent

۲-۱-۷ کرنش در زمان شکست در تست کشش

همانطور که گفته شد، شروع گلوبی شدن نمونه در تست کشش به استحکام نهایی کشش ماده بستگی دارد. توجه داشته باشید که منحنی بار-افزایش طول در این نقطه صفر است و در این نقطه است که نمونه شروع به گلوبی شدن می کند. به دلیل کم شدن سطح مقطع با نرخ بالاتر از نرخ قوی شدن ماده (کرنش- سخت کاری) در زمان شکست، نمونه نمی تواند بار را تحمل کند.

کرنش واقعی در شروع گلوبی شدن از نظر عددی برابر با توان کرنش- سختکاری ماده، n ، است. در نتیجه هر چه مقدار n بیشتر باشد، کرنشی که یک نمونه ماده می تواند به صورت یکنواخت پیش از شروع گلوبی شدن تحمل کند، بالاتر می شود. این پدیده به خصوص در ارتباط با عملیات شکل دهی ورق های فلزی که با کشش ماده همراه است، بسیار مهم است. مس آیل شده، برنج و فولاد ضد زنگ دارای مقادیر n بالا هستند. این بدان معناست که این مواد نسبت به سایر فلزات می توانند به صورت یکنواخت به مقدار بیشتری کشیده شوند.

مثال (محاسبه حد نهایی استحکام کششی) تصور کنید منحنی کرنش واقعی ماده ای به میزان $\sigma = 100000 \cdot \varepsilon^{0.5}$ (Psi) داده شده است. میزان حد نهایی استحکام کششی و UTS مهندسی آن را محاسبه کنید.

حل از آنجایی که کرنش در زمان گلوبی شدن متناسب با بار است و کرنش در زمان گلوبی شدن برای این ماده برابر است با

$$\varepsilon = n = 0.5$$

برای استحکام نهایی کشش واقعی داریم:

$$\sigma = Kn^n = 100000(0.5)^{0.5} = 70710 \text{ (psi)}$$

منطقه واقعی شروع گلوبی شدن از رابطه زیر به دست می آید:

$$\ln\left(\frac{A_0}{A_{\text{گلوبی شدن}}}\right) = n = 0.5$$

در نتیجه

$$A_{\text{گلوبی شدن}} = A_0 \varepsilon^{-0.5}$$

و ماکزیموم بار برابر است با

$$P = \sigma A_{\text{گلوبی شدن}} = \sigma A_0 e^{-0.5}$$

که در آن σ مقدار واقعی حد نهایی استحکام است. در نتیجه

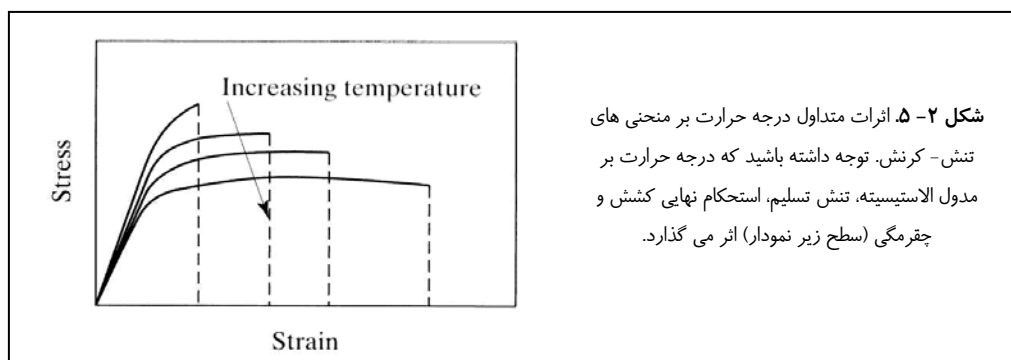
$$P = 70710 \times 0.606 \times A_0 = 42850 A_0 \text{ lb}$$

از آنجایی که $UTS = P/A_0$

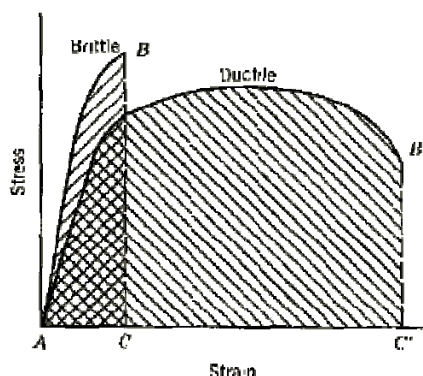
$$UTS = 42850 \text{ psi}$$

۲-۱-۸ اثرات عوامل مختلف بر خواص مکانیکی

اثرات حرارت بر فلزکاری: از جمله عواملی که اثر مهمی در شکل منحنی تنش-کرنش دارد، درجه حرارت است. گرچه برای تمام فلزات درجه حرارت به یک اندازه مؤثر نیست، ولی کلاً افزایش درجه حرارت چکشخواری، تورق پذیری و چقرمگی فلزات را افزایش می دهد؛ ولی مدول الاستیسیته، تنش تسلیم و حد نهایی استحکام کششی (UTS) فلزات را کاهش می دهد. درجه حرارت همچنین توان سخت کاری را کاهش می دهد (نسبت عکس دارد). اثرات درجه حرارت به مقدار زیاد به نوع ماده و ناخالصی های آن مربوط می شود. هر چه درجه حرارت افزایش یابد، توان سخت کاری کم می شود. یعنی فلز راحت تر تغییر شکل می دهد (شکی ۲-۵).



شکل ۲-۵. اثرات متداول درجه حرارت بر منحنی های تنش-کرنش. توجه داشته باشید که درجه حرارت بر مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، استحکام نهایی کشش و چقرمگی (سطح زیر نمودار) اثر می گذارد.



شکل ۲-۶. اثر درجه حرارت بر توان سخت کاری

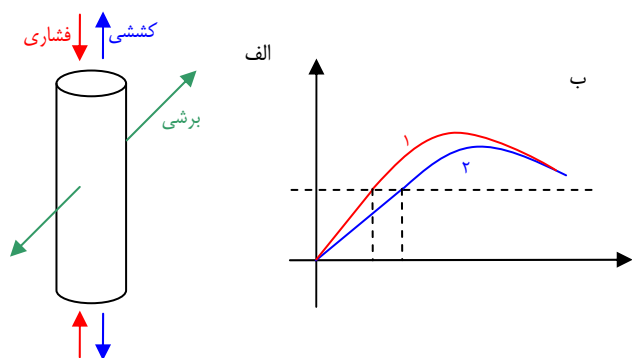
اثرات میزان سخت کاری در فلز کاری: بسته به روش و وسایل تولید یک قطعه فلز امکان دارد با سرعت زیاد یا کم شکل داده شود. خصوصیات ماده را در خمیدگی و تغییر شکل را می توان حین تست کشش تحقیق کرد. میزان خمیدگی ممکن است با واحد سرعت تعریف شود. میزان سختی فلزات بستگی به شکل فلزی قطعه مورد نظر دارد (شکل ۲-۶).

اثرات فشار هیدروستاتیک بر فلزات: در آزمایش های انجام شده در اتاقک تحت فشار تا فشار ۳/۵ گیگا پاسکال (۵۰۰ Ksi) اثرات فشار هیدروستاتیک در خصوصیات مکانیکی فلزات مطابق زیر بوده است؛ فشار هیدروستاتیک، کرنش شکست را به حد قابل ملاحظه ای افزایش می دهد (که از این خاصیت در هیدرو اکستروژن و فشردن پودرهای فلزی استفاده می شود). فشار هیدروستاتیک هیچ اثری در شکل منحنی تنش-کرنش واقعی فلزات ندارد و هیچ اثری در بار ماکزیمی که در اثر آن گلولی ایجاد می شود، ندارد.

اثر تشعشعات اتمی بر خصوصیات فلزات: برای استفاده از فلزات در تأسیسات اتمی در مورد اثرات تشعشعات اتمی در خصوصیات مکانیکی آن ها تحقیقات شده است. نتیجه آن که تغییرات به خصوصی در خصوصیات مکانیکی فولاد و سایر فلزات مورد آزمایش مشاهده شده است، به طوری که تنش تسلیم، مقاومت کششی و سختی مواد افزایش پیدا می کند؛ ولی چکشخواری و چقرمگی فلزات کاهش می یابد.

۲-۱-۹ سفتی^۱

مقاومت یک ماده نسبت به تغییر شکل یا خمیدگی الاستیکی را سفتی یا صلبی گویند. ماده ای که تغییر شکل کمی تحت بار نشان می دهد، سفتی بیشتری دارد. برای مثال تیرهای معلق فولادی و آلومینیومی ممکن است برای تحمل بار مقاومت داشته باشند اما تیر آلومینیومی پس از مدتی افت یا خمش پیدا می کند. به عبارت دیگر تیر فولادی سفت تر از تیر آلومینیومی است. اگر ماده از قانون هوک پیروی کند، یعنی نسبت تنش به کرنش خطی باشد، سفتی آن با مدول یانگ مشخص می شود. هر چقدر که E بزرگتر باشد، ماده سفت تر است. در تنش کششی و فشاری به E مدول سفتی یا مدول الاستیسیته گویند و در تنش برشی ضریب صلبیت^۲ نامند. ضریب صلبیت برای اکثر مواد مقداری حدود ۴۰ درصد مدول یانگ می باشد (شکل ۲-۷).



شکل ۲-۷. الف) جهت نیروهای کششی، فشاری و برشی؛ ب) منحنی ۱ نشان دهنده ماده ای است که از ماده نشان داده شده در نمودار ۲ سفتتر است؛ زیرا شیب قسمت خطی آن بیشتر از شیب قسمت خطی منحنی ۲ است.

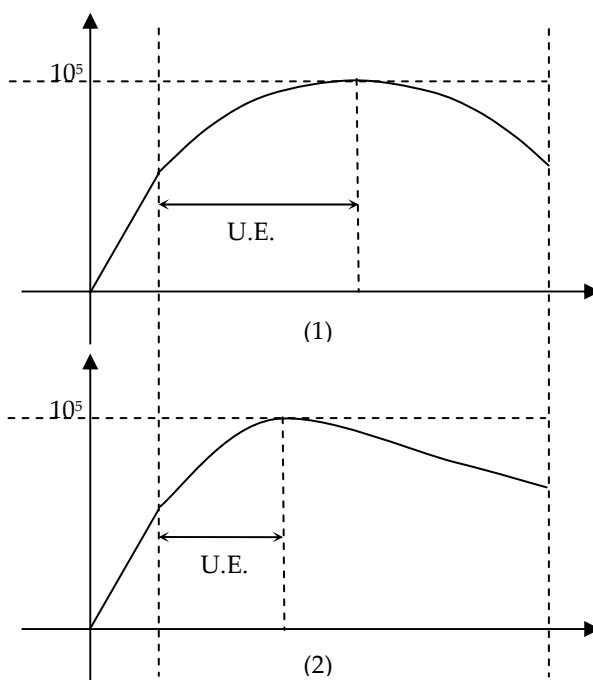
۲-۱-۱۰ پلاستیسیته یا خمیرایی^۳

پلاستیسیته یک ماده نشان دهنده توانایی آن در تحمل مقداری تغییر شکل دائمی است بدون آن که شکسته یا پاره شود. تغییر شکل پلاستیک تنها هنگامی روی می دهد که ناحیه الاستیک پشت سر گذاشته شود. پلاستیسیته در عملیات فرم دهی، شکل دهی، اکستروژن و بسیاری از فرآیندهای سردکاری و گرم کاری نقش مهمی دارد. موادی نظیر خاک رس، سرب و ... در درجه حرارت معمولی اتاق، و فولاد هنگام گرم شدن، پلاستیک می باشد. به طور کلی پلاستیسیته با افزایش درجه حرارت افزایش می یابد. در شکل ۲-۸، ماده (۱) نسبت به ماده (۲) تحمل بار بیشتری قبل از رسیدن به گلولی شدن دارد؛ در نتیجه پلاستیک تر است.

¹ Stiffness

² Modulus of Rigidity

³ Plasticity



شکل ۲-۸. ماده (۱) پلاستیک تر از ماده (۲) است زیرا تحمل بار بیشتری قبل از گلوبی شدن دارد.

۲-۱-۱۱ چکشخواری^۱

خاصیتی است که به ماده امکان می دهد به قدری کشیده شود که مانند یک سیم نازک شود. فولاد نرم ماده ای چکشخوار است. درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع در کشش غالباً به عنوان معیاری تجربی برای چکشخواری به شمار می آید.

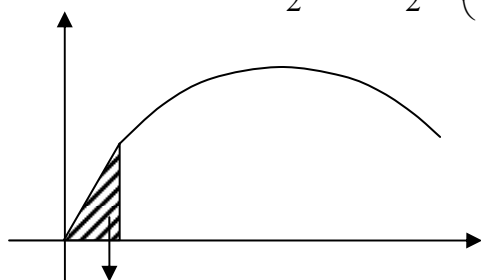
$$\text{درصد کاهش سطح مقطع: } \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$

$$\text{درصد افزایش طول: } \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100$$

۲-۱-۱۲ برجهندگی^۲

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma \cdot d\epsilon \quad (\text{ضریب برجهندگی})$$

$$\Rightarrow U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y = \frac{1}{2} \sigma_y \left(\frac{\sigma_y}{E} \right) = \frac{\sigma_y^2}{2E} \left(\frac{J}{m^3} \right)$$



ضریب برجهندگی

شکل ۲-۹. ضریب برجهندگی

برجهندگی عبارت است از ظرفیت یک ماده برای جذب انرژی به طور الاستیک. هنگامی که یک ماده تحت بار می باشد و بار اعمال شده از روی آن برداشته می شود، انرژی ذخیره شده در ماده آزاد می شود (همانگونه که در فنر این پدیده را مشاهده می کنیم). حداکثر انرژی که می تواند در یک جسم تا پایان مرحله الاستیک ذخیره شود، برجهندگی گواه^۳ نامیده می شود. برجهندگی گواه در واحد حجم را ضریب برجهندگی^۴ گویند.

به عبارت دیگر ضریب برجهندگی عبارت است از مقدار انرژی لازم برای این که تنش واحد حجم یک ماده به حد تناسب^۵ آن برسد. این مقدار ظرفیت تحمل ماده در برابر شوک ها و لرزش ها را نشان می دهد (شکل ۲-۹).

¹ Ductility

² Resilience

³ Proof Resilience

⁴ Modulus of Resilience

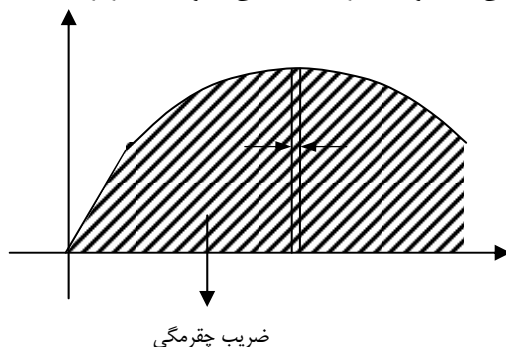
⁵ Proportional Limit

۲-۱-۱۳ تورق پذیری^۱

تورق پذیری یک ماده قابلیت آن برای تبدیل به ورق های نازک است بدون آن که ترک بردارد. آلومینیوم، مس، قلع و سرب فلزات تورق پذیرند. لازم به تذکر است که برخی مواد می توانند تورق پذیر بوده اما چکشخوار نباشند. برای مثال سرب به راحتی می تواند نورد و چکشخواری شود و به شکل ورقه ای نازک درآید؛ در حالی که نمی تواند به شکل سیم کشیده شود. گرچه چکشخواری و تورق پذیری به جای یکدیگر استفاده می شوند، اما باید توجه داشت که، چکشخواری یک خاصیت کششی است در حالی که تورق پذیری یک خاصیت فشاری محسوب می شود.

۲-۱-۱۴ چقرمگی^۲

معیاری است برای انرژی که یک ماده می تواند قبل از پارگی یا شکست جذب کند. برای مثال اگر باری ناگهان بر روی تکه ای فولاد نرم و سپس روی یک تکه شیشه اعمال شود، فولاد انرژی بسیار بیشتری را قبل از شکسته شدن جذب خواهد کرد. بنابراین فولاد از شیشه چقرمتر است. چقرمگی یک ماده قابلیت آن برای تحمل تغییر شکل های الاستیک و پلاستیک است. بنابراین برای قطعات سازه و قطعاتی که بایستی شوک و لرزش را تحمل کنند، کیفیت مطلوبی به شمار می آید. فولاد منگنز دار، آهن چکش کاری شده^۳ و فولاد نرم مواد چقرمی هستند. کار یا انرژی جذب شده توسط یک ماده گاهی ضریب چقرمگی^۴ گفته می شود. چقرمگی به مقاومت ضربه ای^۵، یعنی مقاومت در برابر بارگذاری نهایی مربوط می شود.



$$T = \int_0^{\epsilon_f} \sigma_T \cdot d\epsilon$$

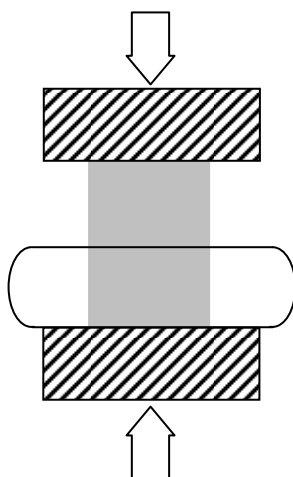
شکل ۲-۱۰. ضریب چقرمگی

۲-۱-۱۵ شکنندگی^۶

شکنندگی یک ماده قابلیت شکستن آن بدون تغییر شکل زیاد می باشد. مواد بسیاری وجود دارند که قبل از این که به حد کافی خم شوند، تحت بار شکسته می شوند. این گونه مواد شکننده نامیده می شوند؛ مثل شیشه و چدن. بنابراین این مواد غیر چکشخوار شکننده محسوب می شوند. معمولاً مقاومت کششی مواد شکننده بخش کوچکی از مقاومت فشاری آنان را تشکیل می دهد.

۲-۱-۱۶ تست فشار^۷

تست فشار معمولاً به وسیله ی فشردن یک نمونه استوانه ای صلب بین دو صفحه هموار انجام می گیرد. تحت فشار استوانه شروع به تغییر شکل نموده و قطر میانی آن از طرفین انتهایی بیشتر می شود و شکلی مانند بشکه به خود می گیرد (شکل ۲-۱۱).



شکل ۲-۱۱. قطعه پیش (خاکستری) و پس (سفید) از اعمال فشار

از آن جایی که در طرفین نمونه و در مجاورت صفحات فشار آورنده اصطکاک زیادی وجود دارد، طرفین فلز آزادانه نمی توانند مانند قسمت میانی آن در جهت عمود بر فشار گسترش یابند. از آن جایی که مساحت سطح مقطع در طول نمونه تغییر می یابد (در وسط حداکثر است)، به دست آوردن منحنی های تنش- کرنش در تست فشار دشوار است. هنگامی که نتایج تست های فشار و کشش برای فلزات چکشخوار با هم مقایسه می شوند، منحنی های تنش- کرنش واقعی برای هر دو تست با هم تلاقی می کنند؛ ولی برای مواد شکننده، که معمولاً مستحکم ترند، این

¹ Malleability

² Toughness

³ Wrought Iron

⁴ Modulus of Toughness

⁵ Impact Strength

⁶ Brittleness

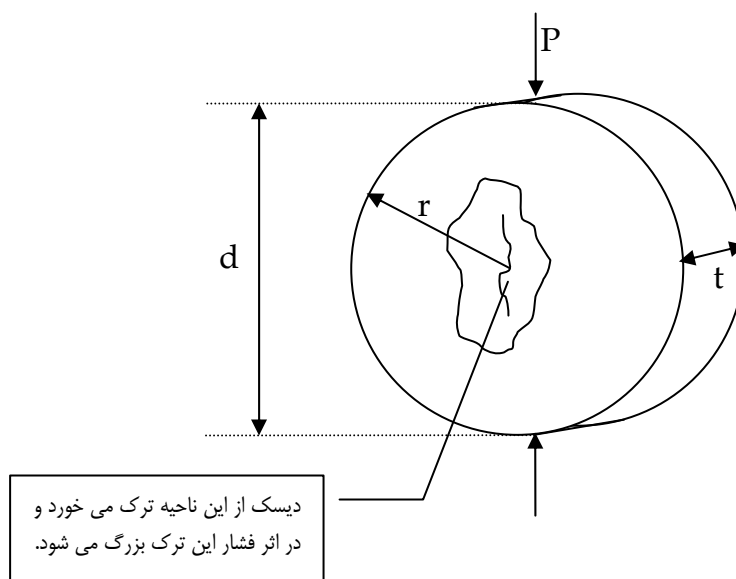
⁷ Compression Test

مطلب صادق نیست؛ چرا که آن ها در فشار چکشوارتر هستند تا در کشش. برای مواد شکننده مانند سرامیک ها و شیشه ها، تست دیسک توسعه داده شده است. در این تست، دیسک تحت فشار دو صفحه سخت شده پهن قرار می گیرد (شکل ۲-۱۲). زمانی که ماده به صورت نشان شده بارگذاری می شود، تنشهای کششی عمود بر خط مرکزی در طول دیسک وارد می شوند و شکست آغاز شده و دیسک به صورت عمودی به دو نیم تقسیم می شود. تنش کششی σ در دیسک در طول خط مرکزی یکنواخت بوده و می تواند از فرمول زیر محاسبه شود:

$$\sigma = \frac{2P}{\pi dt} \quad r \gg h$$

که در آن P بار شکست، d قطر صفحه و t ضخامت آن است. جهت جلوگیری از شکست پیش از موعد در نقاط تماس، باریکه هایی از فلزات نرم بین دیسک و صفحه قرار داده می شوند. این باریکه فلزات همچنین از آسیب دیدن فک های (صفحات) دستگاه تست، در طول انجام تست جلوگیری می کنند. شکست در مرکز نمونه در تولید لوله های بدون درز مورد استفاده قرار می گیرد.

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l_0}{l}\right) \quad e = \frac{l_0 - l_f}{l_0} \quad \text{در تست فشار:}$$



۲-۱-۱۷ پیچش^۱

علاوه بر کشش و فشار، قطعه کار ممکن است تحت کرنشهای برشی (شکل ۲-۱۳) قرار گیرد؛ مانند پیچش در حین پانچ سوراخها در صفحات فلزی و برش فلزات. تست مورد استفاده برای مشخص کردن این خواص در برش، تست پیچش است. به منظور توزیع یکنواخت تنش و کرنش در طول سطح مقطع، این تست معمولاً بر روی یک قطعه کار استوانه ای نازک انجام می شود. جهت محدود کردن تغییر شکل به منطقه ای باریک، نمونه تحت پیچش دارای سطح مقطع کم است. تنش برشی می تواند با استفاده از فرمول زیر محاسبه شود:

$$\tau = \frac{T}{2\pi r^2 t} \quad \text{تنش برشی:}$$

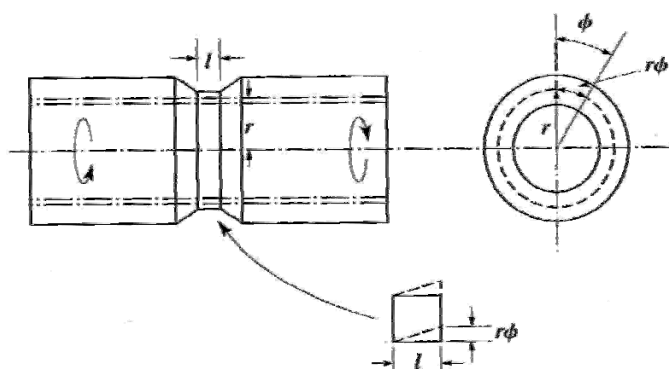
که در آن T گشتاور، r میانگین شعاع لوله و t ضخامت لوله است. کرنش برشی را می توان با استفاده از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$\gamma = \frac{r\phi}{l} \quad \text{کرنش برشی:}$$

که در آن l طول لوله تحت پیچش و ϕ زاویه پیچش به رادیان است. نسبت تنش برشی به کرنش برشی در بازه الاستیک به عنوان مدول برش^۲ یا مدول سختی^۱، G ، شناخته می شود که با مدول الاستیسیته، E در ارتباط است. زاویه چرخش، ϕ برای شکست میله های جامد در دماهای بالا، در تخمین قابلیت آهنگری فلزات مهم است. هر چه تعداد چرخشها پیش از شکست بیشتر باشد، قابلیت آهنگری بالاتر است.

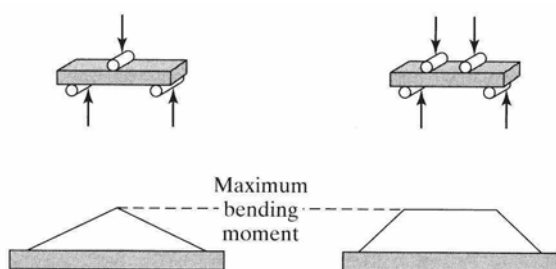
¹ Torsion

² Shear modulus



شکل ۲-۱۳. یک نمونه متداول جهت انجام تست پیچش؛ نمونه بین دو سر ماشین تست قرار گرفته و پیچانده می شود. به تغییر شکل پیچشی در بخش نازک شده قطعه توجه فرمایید.

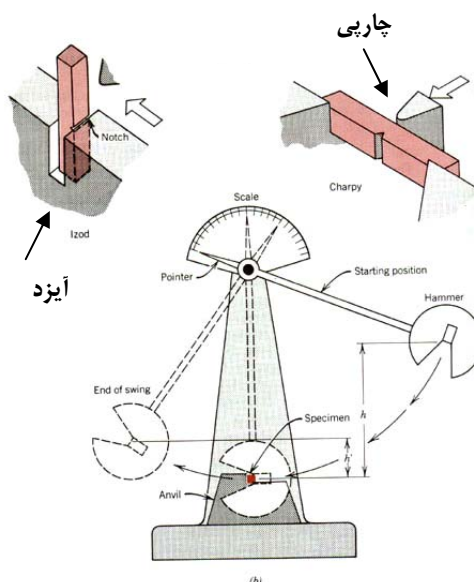
۲-۱-۱۸ خم کردن^۲



شکل ۲-۱۴. دو روش انجام تست خمش برای مواد شکننده؛ (الف) خم کردن سه نقطه ای؛ (ب) خم کردن چهار نقطه ای. فلش ها نشان دهنده گشتاورها است. به منطقه گشتاور ثابت خمشی ماکزیموم شکل (ب) توجه کنید؛ با مقایسه دیده می شود که گشتاور خمشی ماکزیموم در مرکز نمونه در شکل (الف) رخ می دهد.

آماده کردن نمونه هایی از مواد شکننده نظیر سرامیک ها و کاربیدها مشکل است. این امر به دلیل مشکلات موجود در شکل دادن و ماشینکاری آنها با ابعاد مناسب است. علاوه بر آن به علت حساسیت آنها به عیوب سطحی و شکافها، قرار دادن نمونه های شکننده در دستگاه تست دشوار است. قرار دادن نامناسب نمونه مورد تست ممکن است موجب توزیع غیر یکنواخت تنش در طول سطح مقطع نمونه شود. یکی از تستهای متداول برای مواد شکننده تست خم کردن است. در این تست نمونه ای با سطح مقطع مستطیلی مورد استفاده قرار می گیرد. نمونه از هر دو انتها نگه داشته می شود (شکل ۲-۱۴). بار به صورت عمودی در یک یا دو طرف نمونه وارد می شود. به ترتیب به این تستها، تستهای خمش سه یا چهار نقطه ای گفته می شود. تنشهای طولی در این نمونه ها، در سطوح پایینی آنها کششی و در سطوح بالایی فشاری است.

۲-۱-۱۹ تست ضربه^۲



شکل ۲-۱۵. تست ضربه

در بسیاری از عملیات تولیدی، و نیز در طول عمر قطعات، مواد تحت بارهای ضربه ای (یا دینامیک) قرار می گیرند؛ برای مثال در فرآیندهای فلزکاری با سرعت بالا نظیر آهنگری قطره ای. یک تست ضربه متداول عبارت است از قرار دادن یک نمونه شیار داده شده در دستگاه تست و پاندول تابان (به این شیار اصطلاحاً notch گفته می شود). تست ضربه انرژی لازم را برای شکستن یک میله شیار دار به وسیله اعمال بار لحظه ای را اندازه می گیرد. تست ضربه به دو روش انجام می گیرد: ۱- چارپی (Charpy)، ۲- آیزد (Izod).

در تست Charpy، نمونه از هر دو انتها نگه داشته می شود ولی در تست Izod نمونه از یک انتها همانند یک پاندول معلق نگه داشته می شود (شکل ۲-۱۵). با توجه به میزان تاب خوردن پاندول، انرژی آزاد شده در زمان شکسته شدن قطعه بدست می آید. این انرژی چقرمگی ضربه^۴ ماده است. هنوز هیچ رابطه ای بین تستهای Charpy و Izod بدست نیامده است.

تفاوت mgh ها نشان دهنده میزان انرژی است که آونگ از دست داده است

$$(E = mg(h_1 - h_2))$$

¹ Modulus of Rigidity

² Bending (Flexure)

³ Impact Test

⁴ Impact Toughness

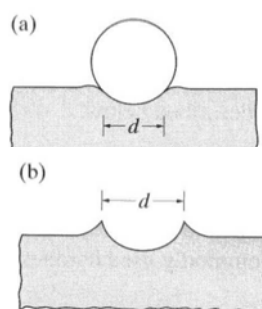
۲-۱-۲۰ تست سختی^۱

یکی از کاربردهای مهم سنجش سختی استفاده آن در کنترل کیفیت قطعات فلزی است. سختی یکی از خواص اصلی مواد است، که به استحکام آن وابستگی زیادی دارد. سختی معمولاً به صورت قابلیت مقاومت ماده در برابر خراش، ساییدگی، برش و نفوذ تعریف می شود. سختی پذیری^۲ نشانگر درجه سختی است که مواد در پروسه سخت کاری به خود می گیرند.

Test	Indenter	Shape of indentation		Load, P	Hardness number	
		Side view	Top view			
Brinell	10-mm steel or tungsten carbide ball			500 kg 1500 kg 3000 kg	$HB = \frac{2P}{(\pi D) (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	
Vickers	Diamond pyramid			1-120 kg	$HV = \frac{1.854P}{L^2}$	
Knoop	Diamond pyramid			25g-5kg	$HK = \frac{14.2P}{L^2}$	
Rockwell				kg		
A } C } D }	Diamond cone			60	HRA	} = 100 - 500t
				150	HRC	
				100	HRD	
B } F } G }	1/16 - in. diameter steel ball			100	HRB	} = 130 - 500t
				60	HRF	
				150	HRG	
E	1/8 - in. diameter steel ball			100	HRE	

شکل ۲-۱۶. خصوصیات، روش ها و فرمول های مربوط به انواع تست های سختی. P نشان دهنده بار وارد شده است.

روشهای بسیاری برای اندازه گیری سختی مواد با استفاده از مواد و اشکال مختلف بارگذاری توسعه داده شده اند. متداولترین تستهای سختی به شرح زیر هستند:



شکل ۲-۱۳. اثر بار در تست برینل؛ (a) فلز آنبیل شده؛ (b) فلز عملیات سخت کاری شده.

تست برینل^۳: این تست توسط J. A. Brinell در سال ۱۹۰۰ معرفی شد. در این تست توپی ۱۰ میلیمتری از جنس فولاد یا کاربید تنگستن بر روی سطحی با بارهای ۵۰۰ کیلوگرم، ۱۵۰۰ کیلوگرم یا ۳۰۰۰ کیلوگرم وارد می شود (شکل ۲-۱۶). عدد سختی برینل (HB یا BHN سابق) به عنوان نسبت بار P به سطح خم شده ناشی از بارگذاری محاسبه می شود. هر چه ماده سخت تر باشد، اثر وارده شده، کمتر است. در نتیجه برای اندازه گیری دقیق استفاده از بارهای ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ کیلوگرم جهت به دست آوردن اثرات عمیق تر توصیه می شود. با توجه به شرایط ماده دو نوع اثر پس از تست برینل یا هر نوع تست سختی دیگری که در این فصل توضیح داده می شود، به وجود می آید. اثر فشار بر روی فلزات آنبیل شده دارای اثری گرد است؛ در فلزات سخت کاری شده معمولاً شکل اثر به صورت تیر است. روش درست اندازه گیری قطر اثر، d ، در شکل نشان داده شده است (شکل ۲-۱۳).

¹ Hardness Test

² Hardenability

³ Brinell Test

مواد با توجه به مدول الاستیسیته خود، تحت تغییر شکل الاستیک قرار خواهند گرفت. در نتیجه، مقادیر سختی به دست آمده ممکن است به اندازه کافی دقیق نباشند. یکی از روشهای کاهش این اثر، استفاده از توپهایی با جنس کاربید تنگستن است. به دلیل مدول بالای الاستیسیته آنها، میزان تغییر شکل در آنها کمتر از توپهای فولادی است. توپهای کاربیدی معمولاً برای مقادیر برینل بالای ۵۰۰ توصیه می شوند.

تست راکول^۱: این تست توسط S. R. Rockwell در سال ۱۹۹۲ توسعه داده شد. این تست به جای اندازه گیری قطر اثر، عمق نفوذ شاخص را اندازه می گیرد. شاخص ابتدا با بار کم و سپس تحت بار بیشتر قرار می گیرد. تفاوت عمق نفوذ مقیاسی است برای سنجش سختی مواد. برخی از مقیاسهای متداول تست Rockwell (و شاخصهای مورد استفاده) در شکل (۲-۱۲) نشان داده شده است. تست های سختی سطحی Rockwell^۲ نیز با استفاده از همان شاخصها با بار کمتر توسعه داده شده اند.

تست ویکرز^۳: تست سختی ویکرز در سال ۱۹۹۲ توسعه داده شده و بیشتر به عنوان تست سختی هرم الماسی^۴ شناخته می شده است، که در آن از شاخص هرمی شکلی (شکل ۲-۱۲) و باری در بازه ۱ تا ۱۲۰ کیلوگرم استفاده می شده است. عدد سختی ویکرز با علامت اختصاری HV نشان داده می شود (بیشتر علامت اختصاری DPH). اثرات به دست آمده معمولاً قطری کمتر از ۰/۵ میلیمتر دارند. عدد سختی که از تست ویکرز به دست می آید، اساساً مستقل از بار بوده و برای تست مواد با بازه سختی وسیع، از جمله فولاد عملیات حرارتی شده، مناسب است.

تست Knoop^۵: در تست Knoop (توسعه داده شده در سال ۱۹۳۹ توسط F. Knoop). از الماسی به شکل هرم بلند (شکل ۲-۱۲) و بار در بازه ۲۵ گرم تا ۵ کیلوگرم استفاده می شود. عدد سختی Knoop با علامت اختصاری HK (بیشتر KHN) نشان داده می شود. به دلیل اندازه بار کم مورد استفاده، این تست یک نوع تست میکروسختی^۶ محسوب می شود. در نتیجه برای نمونه های مواد شکننده نازک یا کوچک، برای مثال کاربیدها، سرامیکها و شیشه، مناسب است. همچنین این تست برای اندازه گیری سختی دانه های منفرد و اجزای آلیاژهای فلزی مورد استفاده قرار می گیرد. اندازه اثر شاخص معمولاً در بازه ۰/۱ تا ۰/۱۰ میلیمتر است. در نتیجه آماده سازی سطح مورد تست بسیار پر اهمیت است. به دلیل اینکه عدد سختی به دست آمده به بار اعمال شده بستگی دارد، در اعلام نتایج تست Knoop می بایست اندازه بار ذکر شود.

Scleroscope: (گرفته شده از واژه یونانی Skleros، به معنای سخت) دستگاهی است که در آن یک شاخص با نوک الماس (چکش) که در محفظه شیشه ای قرار دارد، از ارتفاع معینی بر روی سطح قطعه نمونه رها می شود. میزان سختی به میزان بازگشت چکش پس از برخورد به سطح نمونه دارد. هر چه ارتفاع بازگشت چکش بیشتر باشد، ماده سخت تر است. اثرات ایجاد شده توسط Scleroscope بسیار کوچک است؛ در نتیجه برای سطوح ورقه ای مانند رول های فلز نورد شده و منگنه های هیدرولیکی مناسب است. این دستگاه قابل جابه جا کردن است و به سادگی بر روی سطح قطعه قرار می گیرد. در نتیجه برای اندازه گیری سختی اشیاء بزرگ که در دستگاه های تست سنتی قرار نمی گیرند مناسب است.

سختی Mohs^۷: این تست در سال ۱۸۲۲ توسط F. Mohs توسعه داده شد و بر مبنای قابلیت یک ماده به خراشیدن ماده دیگر بستگی دارد. سختی Mohs در بازه ای بر مبنای ۱ تا ۱۰ بیان می شود. عدد ۱ برای تالک و عدد ۱۰ برای الماس (سخت ترین ماده شناخته شده) است. ماده ای با عدد سختی Mohs بالا همواره ماده ای با عدد سختی Mohs پایینتر از خود را خراش می دهد. فلزات نرم دارای سختی Mohs، ۲ تا ۳، فولادهای سختکاری شده ۶، و اکسید آلومینیوم (مورد استفاده در ابزارهای برش و سایش در چرخ های سنگ زنی) ۹، هستند. با این که مقیاس Mohs کمی است و عمدتاً توسط کانی شناسان مورد استفاده قرار می گیرد، با سختی Knoop رابطه دارد.

۲-۱-۲۱ خستگی^۸

ساختارها و اجزای مختلفی مانند ابزارها، قالبها، شفتها و فنرها، تحت بارهای نوسانی (چرخه ای یا دوره ای) استاتیک قرار می گیرند. تنشهای چرخه ای^۹ ممکن است در اثر نوسان در بارهای مکانیکی یا به وسیله تنشهای حرارتی (برای مثال قالب سردی که در تماس مداوم با قطعات گرم

¹ Rockwell Test

² Rockwell Superficial Hardness Test

³ Vickers Test

⁴ Diamond pyramid Hardness Test

⁵ Knoop Test

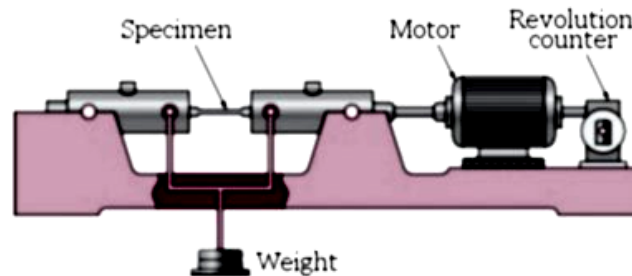
⁶ Micro hardness

⁷ Mohs Hardness

⁸ Fatigue

⁹ Cyclis stresses

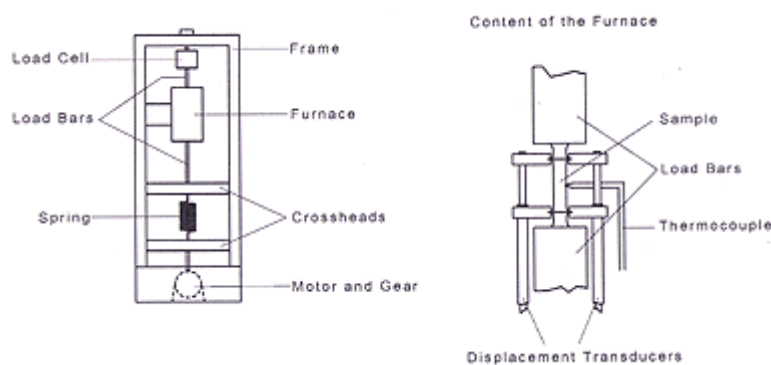
قرار می گیرد) به وجود آیند. تحت چنین شرایطی، قطعه در سطح تنش پایینتری نسبت به آنچه تحت بار استاتیکی رخ می دهد، دچار شکست می شود. این پدیده شکست، خستگی^۱ خوانده می شود و عامل عمده شکستها در قطعات مکانیکی است. روشهای تست خستگی شامل تست کردن نمونه ها تحت شرایط مختلف تنش است که معمولاً ترکیبی از کشش و فشار در پیچش است. تست در دامنه تنشهای مختلفی انجام می شود (S)؛ تعداد دورهایی (N) که منجر به شکست کامل نمونه یا قطعه می شود، گزارش می شود. دامنه تنش به عنوان تنش ماکزیمم، در کشش و فشار، که نمونه تحت آن قرار گرفته است، تعریف می شود.



شکل ۲-۱۴. شمایی از تست خستگی

۲-۱-۲۲ خزش^۲

خزش افزایش طول دائمی قطعه تحت بار استاتیکی در بازه ای از زمان است. این پدیده در فلزات و در برخی مواد غیر فلزی نظیر ترموپلاستیکها و لاستیکها رخ می دهد و می تواند در هر دمایی رخ دهد. برای مثال سرب، تحت بار کششی ثابتی در دمای اتاق خزش پیدا می کند. مکانیزم خزش در دمای بالا در فلزات عموماً در نتیجه حرکت مرز دانه است. خزش به خصوص در کاربردهایی که درجه حرارت بالاست، همانند پره های توربین و قطعات مشابه در موتورهای جت و راکتها، مهم است. خطوط بخار فشار قوی و اجزای سوختهای هسته نیز تحت خزش هستند. همچنین تغییر شکل خزشی می تواند در ابزارها و قالبهایی که در درجه حرارتهای بالا تحت تنشهای زیاد هستند، مانند آهنگری و اکستروژن، رخ دهد. تست خزش شامل قرار دادن نمونه تحت بار کششی ثابت (در نتیجه تنش مهندسی ثابت) در درجه حرارت ثابت و اندازه گیری تغییرات در بازه های زمانهای ثابت مختلف است.



شکل ۲-۱۵. شمایی از تست خزش

۲-۱-۲۳ شکست^۳

بررسی مکانیزم های ایجاد ترک و مکانیزم های متفاوت رشد سریع یا در حد بحرانی ترک و رشد آرام یا پایین تر از رشد بحرانی از اهمیت صنعتی ویژه ای برخوردارند. بررسی فعل و انفعالات فیزیکی که به هنگام شکست روی می دهد چندان ساده نیست، زیرا چگونگی ایجاد ترک و رشد آن و بالاخره نوع شکست در مواد کریستالی به جنس، ساختار شبکه کریستالی، ریز ساختار بستگی دارد. از آنجا که قطعات معمولاً به طور کامل سالم و بدون عیب نیستند به نوع، اندازه و موقعیت عیب، نوع و حالت تنش وارد بر آنها نیز بستگی خواهد داشت. معمولاً شکست در فلزات به شکست نرم و شکست ترد تقسیم می شود.

¹ Fatigue Failure

² Creep

³- Fracture

۲-۲ خواص فیزیکی

علاوه بر خواص مکانیکی، در انتخاب و تحت فرآیند قرار دادن مواد می بایست به خواص فیزیکی نیز توجه نمود. از جمله مهم ترین خواص فیزیکی می توان به چگالی، نقطه ذوب، گرمای مخصوص، رسانش گرمایی و انبساط، اشاره نمود. در جدول ۲-۱ خواص فیزیکی برخی از مواد در دمای اتاق آورده شده است.

جدول ۲-۱. خواص فیزیکی برخی از مواد در دمای اتاق

فلزات	چگالی (kg/m^3)	نقطه ذوب ($^{\circ}C$)	گرمای مخصوص (J/kgK)	رسانش گرمایی (W/mK)
آلمینیوم	۲۷۰۰	۶۶۰	۹۰۰	۲۲۲
آلیاژهای آلومینیوم	۲۸۲۰ - ۲۶۳۰	۶۵۴ - ۴۷۶	۹۲۰ - ۸۸۰	۲۳۹ - ۱۲۱
برلیوم	۱۸۵۴	۱۲۷۸	۱۸۸۴	۱۴۶
کلومیوم (نیوبوم)	۸۵۸۰	۲۴۶۸	۲۷۲	۵۲
مس	۸۹۷۰	۱۰۸۲	۳۸۵	۳۹۳
آلیاژهای مس	۸۹۴۰ - ۷۴۷۰	۱۲۶۰ - ۸۸۵	۳۴۵ - ۳۷۷	۲۳۴ - ۲۹
آهن	۷۸۶۰	۱۵۳۷	۴۶۰	۷۴
فولادها	۹۱۳۰ - ۶۹۲۰	۱۵۳۲ - ۱۳۷۱	۵۰۲ - ۴۴۸	۵۲ - ۱۵
سرب	۱۱۳۵۰	۳۲۷	۱۳۰	۳۵
آلیاژهای سرب	۱۱۳۵۰ - ۸۸۵۰	۳۲۶ - ۱۸۲	۱۸۸ - ۱۲۶	۴۶ - ۲۴
منیزیوم	۱۷۴۵	۶۵۰	۱۰۲۵	۱۵۴
آلیاژهای منیزیوم	۱۷۸۰ - ۱۷۷۰	۶۲۱ - ۶۱۰	۱۰۴۶	۱۳۸ - ۷۵
آلیاژهای مولیبدوم	۱۰۲۱۰	۲۶۱۰	۲۷۶	۱۴۲
نیکل	۸۹۱۰	۱۴۵۳	۴۴۰	۹۲
آلیاژهای نیکل	۸۸۵۰ - ۷۷۵۰	۱۴۵۴ - ۱۱۱۰	۵۴۴ - ۳۸۱	۶۳ - ۱۲
آلیاژهای تانتالیوم	۱۶۶۰۰	۲۹۹۶	۱۴۲	۵۴
تیتانیوم	۴۵۱۰	۱۶۶۸	۵۱۹	۱۷
آلیاژهای تیتانیوم	۴۷۰۰ - ۴۴۳۰	۱۶۴۹ - ۱۵۴۹	۵۴۴ - ۵۰۲	۱۲ - ۸
تنگستن	۱۹۲۹۰	۳۴۱۰	۱۳۸	۱۶۶
روی	۷۱۴۰	۴۱۹	۳۸۵	۱۱۳
آلیاژهای روی	۷۲۰۰ - ۶۶۴۰	۵۲۵ - ۳۸۶	۴۰۲	۱۱۳ - ۱۰۵

غیر فلزات	چگالی (kg/m^3)	نقطه ذوب ($^{\circ}C$)	گرمای مخصوص (J/kgK)	رسانش گرمایی (W/mK)
سرامیکها	۵۵۰۰ - ۲۳۰۰	-	۹۵۰ - ۷۵۰	۱۷ - ۱۰
شیشه ها	۲۷۰۰ - ۲۴۰۰	۱۵۴۰ - ۵۸۰	۸۵۰ - ۵۰۰	۱/۷ - ۰/۶
گرافیت	۲۲۰۰ - ۱۹۰۰	-	۸۴۰	۱۰ - ۵
پلاستیک ها	۲۰۰۰ - ۹۰۰	۳۳۰ - ۱۱۰	۲۰۰۰ - ۱۰۰۰	۰/۴ - ۰/۱
چوب	۷۰۰ - ۴۰۰	-	۲۸۰۰ - ۲۴۰۰	۰/۴ - ۰/۱

۲-۲-۱ چگالی^۱

چگالی یک ماده عبارت است از جرم به ازای واحد حجم. روش دیگر برای بیان چگالی یک ماده از طریق حجم آب جا به جا شده است که به آن گرانش مخصوص^۲ می گویند و دارای واحد نیست. کم کردن وزن ساختار هواپیما و سفینه های فضایی، بدنه و اجزای اتومبیل ها امر بسیار حیاتی است. کاهش مواد مصرفی به منظور کاهش وزن به لحاظ اقتصادی نیز از جمله فاکتورهای بسیار مهم در طراحی تجهیزات و ماشین آلات پیشرفته و محصولات است. اثر عمده چگالی در استحکام مخصوص^۳ (نسبت استحکام به وزن) و سفتی مخصوص^۴ (نسبت سفتی به وزن) مواد و ساختارهاست. در میان مواد، تیتانیوم و آلومینیوم با داشتن چگالی پایین و دارا بودن مقادیر استحکام و سفتی مخصوص بالا، در ساخت هواپیماها و ساختارهای هوایی به کار می روند. در دماهای بالا استحکام و سفتی مخصوص عوامل بسیار مهمی هستند؛ زیرا برخی اجزا و سیستم ها، مانند اتومبیلها، موتورهای جت و توربینهای گازی تحت دماهای بسیار بالا قرار دارند. در انتخاب موادی که تحت سرعت های بالا کار می کنند، چگالی

¹ Density

² Specific Gravity

³ Specific Strength

⁴ Specific Stiffness

نقش بسیار مهمی بازی می کند. برای مثال در صنایع چاپ و نساجی که سرعت اجزای ماشین ها بسیار بالا است، از منیزیم در ساخت این اجزا استفاده می شود. پایین بودن جرم در این موارد باعث کاهش نیروی اینرسی شده که در غیر این صورت منجر به لرزش و کاهش دقت و در نهایت شکست قطعه می شود. به دلیل پایین بودن چگالی سرامیک ها هم اکنون از آنها برای ساخت اجزای ماشینهای اتوماتیک پر سرعت و ابزارها استفاده می کنند. در مواردی نیز که بالا بودن وزن قطعه عامل مطلوب به حساب می آید، از سرب، فولاد و تنگستن در ساخت آنها استفاده می شود.

۲-۲-۲ نقطه ذوب^۱

نقطه ذوب ماده به انرژی لازم برای جداسازی اتمهای آنها بستگی دارد. آلیاژها برخلاف فلزات خالص که نقطه ذوب مشخصی دارند، دارای بازه ای برای نقطه ذوب هستند. نقطه ذوب آلیاژها به ترکیبات آنها بستگی دارد. نقطه ذوب مواد در مواردی که در حین کار دما بسیار بالا می رود، عامل بسیار مهمی است. مانند، موتورهای جت و کوره ها. به دلیل آنکه دمای کریستال شدن مجدد فلزات به دمای ذوب بستگی دارد، در حین انجام عملیاتی نظیر آیل کردن، عملیات حرارتی و کار گرم، دانستن نقطه ذوب مواد درگیر، مهم است. نقطه ذوب همچنین بر انتخاب ابزار و قالب در عملیات تولیدی اثر می گذارد. یکی دیگر از اثرات مهم دمای ذوب، انتخاب تجهیزات و نحوه انجام عملیات ریخته گری است. هر چه دمای ذوب ماده بیشتر باشد، انجام عملیات دشوارتر می شود. در ماشین کاری به وسیله تخلیه الکتریکی، نقاط ذوب مواد به نرخ برداشت مواد و فرسایش الکتروود بستگی دارد. بازه دمایی که تحت آن جز یا ساختاری تحت آن عمل می کند، در انتخاب مواد بسیار مهم است. برای مثال پلاستیک ها دارای پایین ترین بازه ها هستند و این در حالی است که گرافیک و آلیاژهای مواد نسوز دارای بالاترین بازه دمایی می باشند.

۲-۲-۳ گرمای مخصوص^۲

گرمای مخصوص یک ماده انرژی لازم برای بالا بردن دمای واحد جرم آن به اندازه یک درجه است. اثر عناصر آلیاژی بر روی گرمای مخصوص فلزات نسبتاً کم است. افزایش دمای قطعه در نتیجه آهنگری و عملیات ماشینکاری تابعی است از کار انجام شده بر روی قطعه و گرمای مخصوص. اگر افزایش دما در قطعه کار زیاد باشد می تواند منجر به کاهش کیفیت محصول شده و اثر نامطلوب بر روی پرداخت سطح و دقت ابعادی بگذارد. همچنین می تواند منجر به فرسایش شدید ابزار و قالب شده و اثرات نامطلوب متالورژیکی بر مواد داشته باشد.

۲-۲-۴ هدایت گرمایی^۳

هدایت (یا رسانش) گرمایی نشان دهنده نرخ است که در آن گرما درون و میان مواد جریان می یابد. مواد با پیوند فلزی (فلزات) دارای رسانش گرمایی بالا هستند و این در حالی است که مواد با پیوندهای یونی و کووالانسی (سرامیک ها و پلاستیک ها) دارای رسانش گرمایی ضعیفی هستند. در مقایسه فلزات با آلیاژهایشان، به دلیل اختلاف زیاد در رسانش گرمایی، فلزات آلیاژ شده می توانند بر رسانش گرمایی آلیاژها تأثیر چشم گیری داشته باشند. گرمای ایجاد شده در نتیجه تغییر شکل پلاستیک یا اصطکاک می بایست با نرخ بالا رسانش پیدا کرده تا از بالا رفتن شدید درجه حرارت جلوگیری کند. برای مثال مشکل عمده بر سر راه ماشینکاری تیتانیوم پایین بودن میزان رسانش گرمایی آن است. رسانش گرمایی پایین همچنین می تواند منجر به گرادیان های گرمایی بالا شده و به این طریق باعث تغییر شکل غیر همگن در فرآیندهای ماشینکاری فلزات شوند.

۲-۲-۵ انبساط گرمایی^۴

انبساط مواد می تواند اثرات متعددی داشته باشد. عموماً ضریب انبساط گرمایی با نقطه ذوب مواد ارتباط عکس دارد. عناصر آلیاژی به نسبت دارای اثر کمتری بر روی انبساط مواد هستند. یکی از مزایای استفاده از پدیده انبساط و انقباض، مونتاژ قطعات است. برای مثال قرار است قطعه سوراخداری بر روی شفتی سوار شود. به این قطعه گرما داده شده و سپس شفت را از درون سوراخ آن عبور می دهند. زمانی که این قطعه سرد می شود، منقبض شده و قطعات مونتاژ شده یکپارچه می شود. انتخاب نامناسب و مونتاژ نامناسب مواد می تواند منجر به تنشهای گرمایی^۵ شده که نتیجه آن شکست، اعوجاج یا شل شدن اجزا در ساختار در طول مدت سرویس آنها است. رسانش گرمایی همراه با انبساط گرمایی دو عاملی هستند که بیشترین نقش را در به وجود آوردن تنشهای گرمایی هم در اجزای تولید شده و هم در ابزارها و قالب ها بازی می کنند. این ملاحظات به خصوص در حین آهنگری بسیار مهم است. در آهنگری قطعه کار با دمای بسیار بالا بر روی قالب نسبتاً سردی قرار می گیرد و باعث می شود سطوح قالب تحت چرخه های گرمایی قرار گیرد. جهت کاهش تنشهای گرمایی، رسانش گرمایی بالا و انبساط گرمایی پایین مطلوب به نظر می رسد.

¹ Melting Point

² Specific Heat

³ Thermal Conductivity

⁴ Thermal Expansion

⁵ Thermal Stresses

تنش های گرمایی می تواند منجر به شکست در قطعات سرامیکی و در ابزارها و قالب های ساخته شده از مواد شکننده شود. خستگی گرمایی^۱ که در اثر چرخش گرمایی به وجود می آید باعث شکستهای سطحی در ابزارها و قالبهای ریخته گری و فلزکاری می شود. توسعه شکستها پس از یک چرخه گرمایی شوک گرمایی^۲ نامیده می شود. به منظور کاهش مشکلات ناشی از انبساط گرمایی، خانواده ای از آلیاژهای آهن- نیکل با ضرایب انبساط گرمایی پایین توسعه داده شده اند که به آنها آلیاژها با انبساط کم^۳ گفته می شود. این آلیاژها دارای مقاومت به خستگی گرمایی خوب بوده و نیز چکشخوارند. در نتیجه می توانند به سهولت به اشکال مختلف درآورده شوند. از جمله کاربردهای آنها عبارت است از:

۱. تولید نوارهایی از دو فلز که یکی از آنها از جنس آلیاژها با انبساط کم است که توسط روش های متالورژیکی به آلیاژ با انبساط بالا چسبانده شده است. این نوار با قرار گرفتن در معرض حرارت خم می شود.
۲. اتصال شیشه به فلزات که در اثر انبساط گرمایی با کیفیت بالا به هم چسبانده شده اند.

۲-۳ خواص شیمیایی مواد

۲-۳-۱ خوردگی^۴

تغییراتی را که در نتیجه واکنش های شیمیایی یا الکتروشیمیایی مواد با محیط اطراف آنها ایجاد شده و باعث تخریب تدریجی قطعات می شود، خوردگی می نامند. خوردگی واکنشی نامطلوب است که سبب جداسدن تدریجی اتم ها از سطح قطعات و تخریب آنها می شود، که خسارت هنگفتی در هر سال به بار خواهد آورد. پدیده خوردگی بیشتر در فلزات و آلیاژهای آنها ظاهر می شود. زیرا که اغلب فلزات و آلیاژهای تمایل به ایجاد ترکیباتی با اتم ها یا مولکول هایی از محیط اطراف خود (در بسیاری از حالات، محیط اکسید کننده اطراف از ناپایداری کمتری برخوردار است) که تحت شرایط موجود از لحاظ ترمودینامیکی پایدار است، دارند. تنها تعداد کمی از فلزات مانند طلا یا پلاتین تحت شرایط معمولی پایدار هستند و تمایلی به ایجاد واکنش با محیط اطراف ندارند. مواد غیر فلزی مانند مواد سرامیکی (به ویژه از نوع اکسید) و پلیمری، تحت تأثیر واکنش های الکتروشیمیایی قرار نمی گیرند. اما تحت شرایطی، واکنش های شیمیایی می توانند به طور مستقیم بر روی این مواد تأثیر گذاشته و موجب تخریب آنها شوند.

۲-۳-۲ انواع خوردگی

خوردگی حفره ای: خوردگی حفره ای نوعی از خوردگی موضعی است که به دنبال آن حفره هایی در سطح فلز ظاهر شده و با ادامه فعل و انفعال خوردگی حفره ها عمیقتر می شوند. این نوع خوردگی برای سازه های مهندسی بسیار مخرب است. ناخالصیهای غیر فلزی، ناهماهنگی های ساختاری و شیمیایی در سطح فلز، نقاط متداول مناسبی برای آغاز این نوع خوردگی و شروع ایجاد حفره است.

خوردگی تنشی: خوردگی تنشی نتیجه تأثیر همزمان تنشهای مکانیکی و محیط خوردنده مناسب بر روی فلز است. این تنشهای مکانیکی می توانند ناشی از تنشهای خارجی و یا داخلی (پسماند) باشند. تنش پسماند در حد بالا می تواند از تنشهای حرارتی در نتیجه سرد کردن غیر یکنواخت (سریع)، طراحی مکانیکی ضعیف برای تنشها، تبدیل فاز هنگام عملیات حرارتی، تغییر شکل سرد و جوشکاری باشد. خوردگی تنشی به وفور در آلیاژها و محیط های خوردنده معینی ظاهر می شود.

خوردگی فرسایشی^۵: فعل و انفعالی که به جدا شدن قسمتی از سطح فلز در نتیجه شتاب، و حرکت نسبی مایع و یا گاز خورنده با سطح فلز، خوردگی فرسایشی تعریف می شود. هر گاه حرکت نسبی مایع خورنده سریع باشد، اثر فرسایش مکانیکی می تواند شدید باشد. موقعی که لایه محافظ یا غیر فعال سطحی در اثر تماس با مایعات و یا گازهای جاری با سرعت بالا از سطح فلز جدا می شود خوردگی فرسایشی با سرعت زیادی انجام می پذیرد.

خوردگی سایشی^۶: این نوع خوردگی سایشی در سطح تماس بین قطعات فلزی تحت بار، که در معرض ارتعاش و لغزش قرار دارند، ظاهر می شود. در این نوع خوردگی تجمع ذرات اکسید شده و لایه های اکسیدی جدا شده، خود به عنوان ذرات ساینده عمل می کند.

۲-۳-۳ روش های حفاظت از خوردگی

برای حفاظت از خوردگی نسبت به نوع آن می توان از روش های مختلفی استفاده کرد. معمولاً عامل اقتصادی مهم ترین عامل تعیین کننده در انتخاب روش است. برای کنترل سرعت خوردگی و حفاظت از آن باید به نکات اساسی زیر همواره توجه شود:

¹ Thermal Fatigue

² Thermal Shock

³ Low- Expansion Alloys

⁴ Corrosion

⁵ Erosion Corrosion

⁶ Fretting corrosion

- عوامل قابل پیش بینی در طراحی که می تواند در فعل و انفعالات خوردگی مؤثر باشد.
- انتخاب مواد مناسب در ساخت قطعات از لحاظ مقاومت خوردگی در شرایط خاص محیط کار.
- ایجاد تغییرات مناسب در محیط خورنده برای کاهش هر چه بیشتر اثر خوردگی آن.
- انتخاب پوششهای حفاظتی مناسب.

۲-۳-۴ عوامل طراحی

در طراحی قطعه باید توجه شود که واکنش خوردگی تا حد امکان به طور یکنواخت بر روی تمامی سطوح صورت گیرد. بنابراین طراحی هایی که تحت تهاجم موضعی شدید خوردگی قرار می گیرد و موجب تخریب زودرس قطعه می شود، نامناسب است. مهمترین نکته قابل توجه در طراحی پرهیز از شکل گیری پیل های گالوانیکی، یعنی تماس فلزات مختلف در حضور مایع خورنده است.

۲-۴ خواص الکتریکی

رسانش الکتریکی^۱ و خواص دی الکتریکی مواد نه تنها در تجهیزات و ماشین های الکتریکی مهم است بلکه در مواردی نظیر شکلدهی پالسی مغناطیسی^۲ ورقه های فلزات، ماشینکاری با تخلیه الکتریکی^۳ و سنگ زنی الکتروشیمیایی^۴ نیز بسیار مهم است. واحدهای رسانش الکتریکی عبارتند از mho/m یا mho/ft که همان برگردان ohm واحد مقاومت الکتریکی است. اثر نوع پیوند اتمی بر رسانش الکتریکی مواد به همان صورتی است که در مورد رسانش گرمایی گفته شد. عناصر آلیاژی دارای اثرات عمده در میزان رسانش الکتریکی فلزات هستند. هر چه میزان رسانش عناصر آلیاژی بالاتر باشد، رسانش الکتریکی آلیاژ بالاتر است.

رساناها:^۵ مواد با رسانش بالا نظیر فلزات، رسانا خوانده می شوند. مقاومت الکتریکی عکس رسانش است. مواد با مقاومت بالا، دی الکتریک یا عایق خوانده می شوند.

مقاومت دی الکتریکی:^۶ مقاومت دی الکتریک یک ماده عبارت است از مقاومت به جریان الکتریکی مستقیم که به صورت ولتاژ لازم به ازای واحد طول

برای شکست الکتریکی تعریف می شود و واحدهای آن V/m یا V/ft است.

ابر رساناها:^۷ ابر رسانش پدیده ای است که تحت آن مقاومت الکتریکی در برخی از فلزات و آلیاژها تحت درجه حرارت بحرانی بسیار پایین به صفر می رسد. این دما تقریباً نزدیک صفر مطلق (صفر کلوین، $273^{\circ}C$ - $460^{\circ}F$) است. بالاترین دمایی که تحت آن پدیده ابر رسانایی رخ داده است ۱۵۰ درجه کلوین ($123^{\circ}C$ - $190^{\circ}F$) است. اما هم اکنون پیشرفت هایی در این زمینه به دست آمده است. این پیشرفت ها نشان دهنده آن است که اثربخشی اجزای الکتریکی نظیر آهنرباهای پر قدرت، خطوط فشار قوی و اجزای الکترونیکی و کامپیوتری می توانند به صورت تجاری بهبود یابند.

نیمه هادی ها:^۸ خواص الکتریکی نیمه هادی ها، مانند سیلیکون تک کریستالی، ژرمانیوم و آرسیند گالیوم، به درجه حرارت و وجود ناخالص ها بستگی بسیار دارد. در نتیجه با کنترل تمرکز ناخالصی ها (dopant) مانند فسفر و برم در سیلیکون، رسانش الکتریکی قابل کنترل است. این خاصیت در ساخت نیمه هادی هایی که در مدارهای الکترونیکی مینیاتوری به کار می روند، استفاده می شود.

اثر پیزوالکتریکی:^۹ اثر پیزوالکتریک (piezo) وارژه یونانی به معنای فشار) توسط برخی مواد، نظیر کریستال های کوارتز و برخی سرامیک ها، به وجود می آید. این اثر واکنش معکوسی است بین تنش الاستیک و میدان الکتریکی. در ابزارهایی که از این اثر استفاده می کنند تنش های ناشی از نیروهای خارجی به انرژی الکتریکی تبدیل می شوند. از جمله این ابزارها عبارتند از ترانسفورماتورها و میکروفون ها.

Magnetostriction: این پدیده عبارت است از انبساط یا انقباض مواد زمانی که تحت میدان مغناطیسی قرار می گیرند. برخی مواد، مانند نیکل خالص و برخی آلیاژهای نیکل- آهن، این رفتار را از خود نشان می دهند. اساس کار تجهیزات ماشین های ماوراء صوت^{۱۰} نیز همین پدیده است.

¹ Electrical Conductivity

² Magnetic- Pulse Forming

³ Electrical- Discharge Machining

⁴ Electrochemical Grinding

⁵ Conductors

⁶ Dielectric Strength

⁷ Super Conductors

⁸ Semiconductors

⁹ Piezoelectric Effect

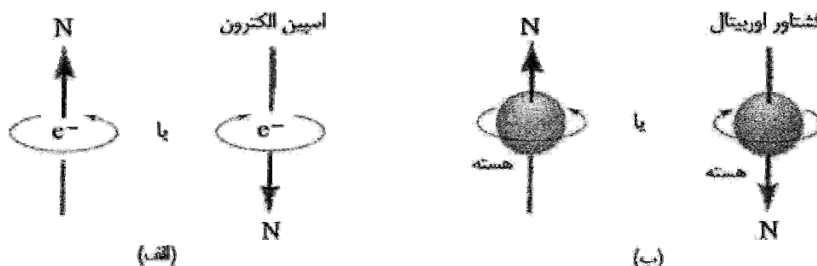
¹⁰ Ultrasonic

۲-۵ خواص مغناطیسی

رفتار مغناطیسی مواد عمدتاً به ساختار الکترونی آنها بستگی خواهد داشت که می توانند دو قطبی های مغناطیسی ارائه دهند. تأثیرات متقابل بین این دو قطبی ها نوع رفتار مغناطیسی را مشخص می کند.

۲-۵-۱ دو قطبیهها و گشتاورهای مغناطیسی

رفتار مغناطیسی مواد ناشی از حرکت الکترون هاست. هر چرخش الکترون حول محور خودش به عنوان یک دو قطبی است که مغناطیس بر^۱ نامیده می شود و مقدار آن برابر است با $M_B = \frac{eh}{4\pi m_e}$. در این رابطه m_e جرم الکترون، h ضریب پلانک و e بار الکترونیک یک الکترون است ($M_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$).



شکل ۲-۱۶. دو قطبی های مغناطیسی: (الف) الکترون تولید میدان مغناطیسی با امتدادی که به عدد کوانتومی m_s بستگی دارد، چرخش می کند، (ب) اوربیتالهای الکترونی در اطراف هسته ایجاد یک میدان مغناطیسی در اطراف اتم می کنند.

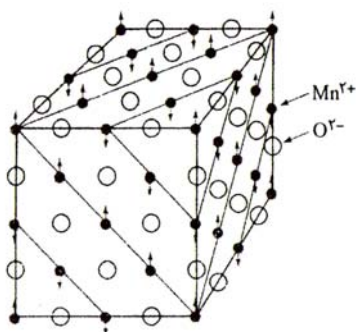
۲-۵-۲ واکنش بین دو قطبیههای مغناطیسی و میدان مغناطیسی

زمانی که ماده ای در میدان مغناطیسی قرار می گیرد اتم های آن ماده چند نوع رفتار می توانند از خود نشان دهند: رفتار **دیامغناطیسی**^۲: با تأثیر میدان مغناطیسی خارجی بر اتم های ماده ای که در این میدان قرار می گیرند، تعادل الکترونیهای آنها کمی بر هم می خورد و دو قطبیههای مغناطیسی کوچکی در داخل اتم ها ایجاد می شود. این دو قطبیهها با میدان مغناطیسی خارجی مخالفت می کنند. این کنش یک اثر مغناطیس منفی ایجاد می کند که رفتار دیامغناطیسی نامیده می شود.

رفتار **پارامغناطیسی**^۳: بعضی از عناصر واسطه و عناصر قلیایی خاکی، شامل لایه های داخلی با الکترون های منفرد هستند. موقعی که این الکترون ها با دیگر الکترون های ظرفیت ماده به حالت تعادل در نیایند، یک گشتاور مغناطیسی در نتیجه چرخش این الکترونها با هر اتم همراه می شود. وقتی این گونه مواد در یک میدان مغناطیسی قرار می گیرند، با هم ردیف شدن گشتاورهای دو قطبیههای مغناطیسی اتم ها یا مولکولها، یک ضریب حساسیت مغناطیس مثبت کوچک بدست می آید. رفتار پارامغناطیسی با حذف میدان مغناطیسی از بین می رود.

رفتار **فرو مغناطیسی**^۴: رفتار دیامغناطیسی و پارامغناطیسی با به کارگیری میدان مغناطیسی خارجی ایجاد می شود و فقط در مدت زمانی که میدان مغناطیسی حفظ می شود، خاصیت مغناطیسی باقی می ماند. اما رفتار فرومغناطیسی بدون اعمال میدان مغناطیسی خارجی در بعضی از مواد ظاهر می شود و اهمیت صنعتی فراوانی دارد. رفتار فرومغناطیسی ناشی از موجود الکترون های منفرد در سطوح انرژی $3d$ فلزات واسطه آهن، کبالت و نیکل است. درجه حرارتی که در آن رفتار فرومغناطیسی کاملاً ناپدید می شود دمای کوری T_C نامیده می شود.

رفتار **ضد فرومغناطیسی**^۵: در موادی مانند MnO ، Cr ، Mn و NiO گشتاورهای مغناطیسی ایجاد شده در دو قطبیههای مجاور در میدان مغناطیسی، حتی اگر قدرت تحمل هر دو قطبی بسیار بالا باشد، در مقابل یکدیگر صف می کشند. این اثر برای MnO در شکل ۲-۱۷ نمایش داده شده است. این مواد رفتار ضد مغناطیسی یا غیر مغناطیسی دارند.



شکل ۲-۱۷. ساختار کریستالی MnO ؛ با تکرار متناوب لایه های اتمی $\{111\}$ از یونهای اکسیژن و منگنز. گشتاور مغناطیسی یونهای منگنز در هر صفحه $\{111\}$ مخالف یکدیگر ردیف شده اند. نتیجتاً MnO ضد مغناطیسی است.

¹ Bohr Magnetons

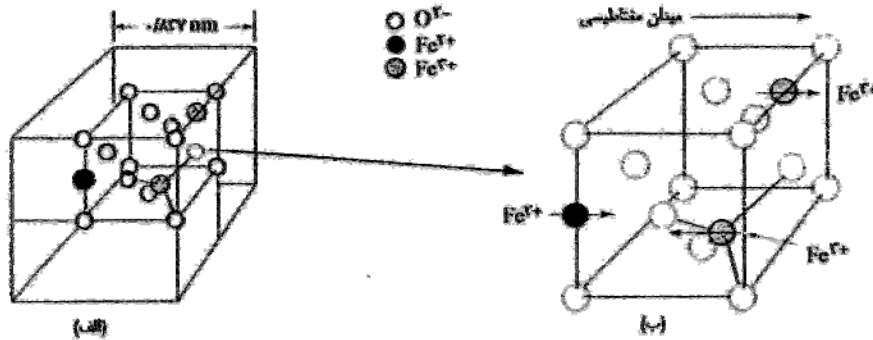
² Diamagnetic Behavior

³ Paramagnetism

⁴ Ferromagnetic Behavior

⁵ Antiferromagnetic Behavior

رفتار فری مغناطیسی^۱: در مواد سرامیکی، یونهای مختلف، گشتاورهای مغناطیسی متفاوتی دارند. دو قطبهای یون A در یک میدان مغناطیسی می توانند در جهت میدان ردیف شوند، در حالی که دو قطبهای یون B در خلاف جهت میدان صف می کشند (شکل ۲-۱۸). اما به دلیل اینکه قدرت تحمل دو قطبها برابر نیستند، نتیجه ظاهر شدن رفتار مغناطیسی و مغناطیسی شدن ماده است..



شکل ۲-۱۸. ساختار مگنتیت Fe₃O₄: (ب) شبکه فرعی مگنتیت. یونها در وجوه هشت وجهی در امتداد میدان مغناطیسی ردیف شده اند. اما یونهای موجود در وجوه چهار وجهی با میدان مخالفت می کنند.

¹ Ferrimagnetism