

مقدمه

در طراحی مهندسی قطعات صنعتی، برای تولید یک محصول بهینه با در نظر گرفتن الزامات طراحی و صرفه اقتصادی، دانستن خواص مکانیکی مواد ضروری است. برای این منظور بایستی رفتار ماده (محصول) در برابر نیروها و تنشهای خارجی و عوامل مؤثر بر آن مورد ارزیابی قرار گیرد.

در این درس ابتدا ساختار جامدات و عیوب ساختاری را بررسی کرده و مکانیزمهای جابجایی و تغییر شکل پلاستیک را در مواد بلوری و پلی کریستال را به اختصار تشریح می کنیم.

با طرح منحنی تنش- کرنش عکس العمل مواد را در برابر نیروهای کششی، فشاری و خمشی بررسی می کنیم و سپس انواع روشهای سختی سنجی را توضیح داده و رفتار مواد را نسبت به تنش های استاتیکی و دینامیکی در دمای بالا و پایین مقایسه می کنیم و در نهایت سعی خواهیم کرد با طرح فرضیه مکانیک شکست پارامترهای مؤثر در یک طراحی مهندسی برای تولید محصولات با کیفیت تر را مشخص نماییم.

تعریف خواص مکانیکی

عکس العمل مواد جامد در مقابل نیروها، گشتاورها و بطور کلی هر نوع تنشهای خارجی اعم از استاتیکی و یا دینامیکی در شرایط خاص محیط کار یا محیط آزمایشگاه را رفتار یا خواص مکانیکی می نامند. خواص مکانیکی رفتار ویژه مواد است؛ در حالیکه مقاومت مکانیکی به بررسی رفتار اجزای سازه مانند اجزای ماشین یا ساختارهای مهندسی عمران تحت بارهای مکانیکی می پردازد. مقاومت مکانیکی بخشی از مهندسی است که برای محاسبه تنش و تغییر شکل وارد شده به قطعات مهندسی طی کاربرد آنها از خواص ویژه مواد مانند مدول الاستیک یا مقاومت به شکست استفاده می کند. به این ترتیب ابعاد بهینه قطعات تضمین می شود، در حالیکه هدف از مطالعه خواص مکانیکی بررسی خواص ذاتی مواد تغییر شکل یافته است.

تأثیر عوامل خارجی بر خواص مکانیکی

مقدار تنش

سرعت و مدت زمان وارد آمدن تنش

درجه حرارت

نوع تنش (استاتیکی یا دینامیکی)

اثر شیمیایی

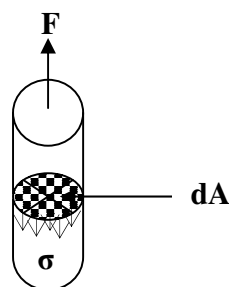
تعداد اعمال تنش

تعریف تنش

در اثر اعمال نیروی خارجی بر جسم، نیروی مخالف داخلی برای حفظ حالت اولیه بوجود می آید، کمیت واحد این نیروهای داخلی را تنش می نامند.

$$\text{تنش} = \frac{\text{نیرو}}{\text{سطح}}$$

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \Rightarrow \sigma = \frac{F}{A}$$



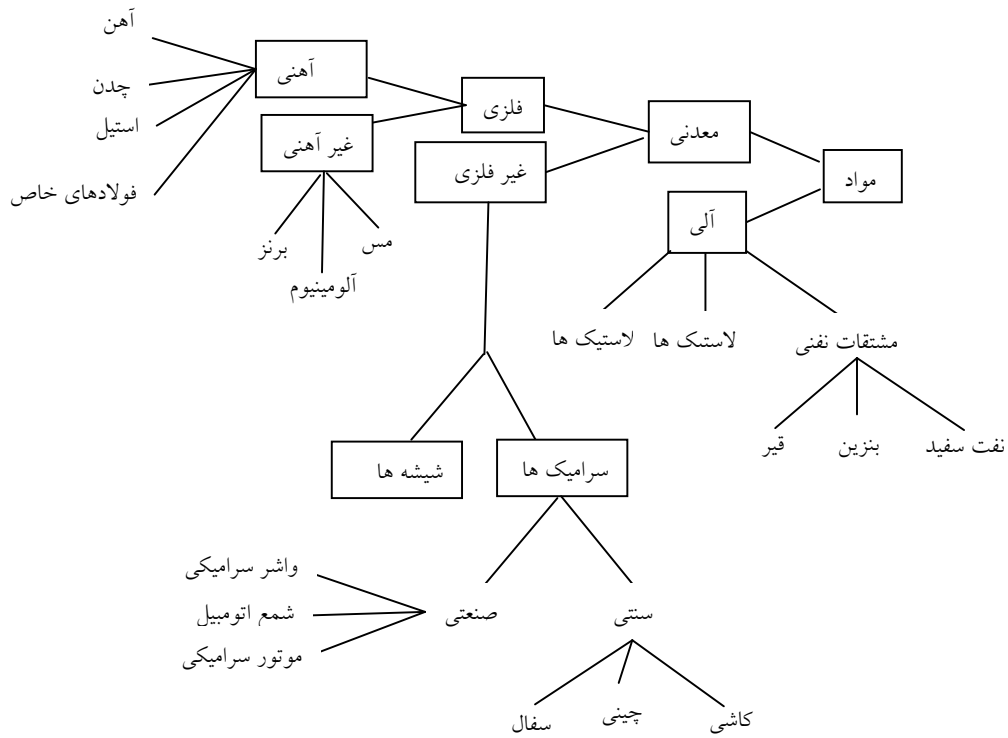
تنش کششی

تنش فشاری

تنش خمشی

تنش پیچشی

تقسیم بندی مواد



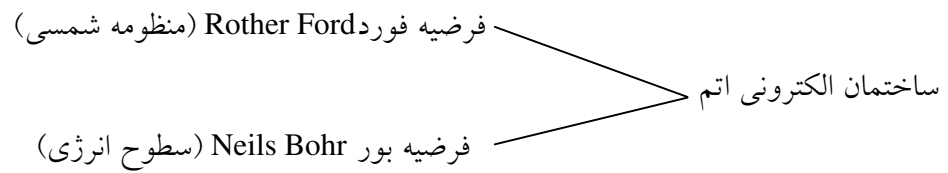
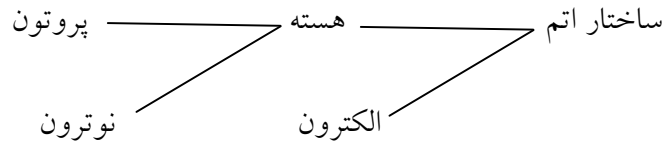
- کامپوزیت ها (مختلط)

ترکیبی از دو یا چند ماده از مواد هم گروه و یا غیر هم گروه فوق

هم گروه: برنج-برنز (آلیاژ)

غیر هم گروه: فایبر گلاس- بتن مسلح

مروری بر پیوندهای اتمی



پیوندهای اتمی در جامدات:

۳S از Na}^+	|	کاتیون	(NaCl)	۱- پیوند یونی:
۳P از Cl^-		آنیون		

⚡نیروی جاذبه کلمب سبب اصلی اتصال است.

۲- پیوند اشتراکی (کووالانسی)

⚡اشتراک الکترونهاي قشر خارجي $\text{H}_2, \text{O}_2, \text{F}_2, \text{Cl}_2$

۳- پیوندهای ثانویه (واندروالس)

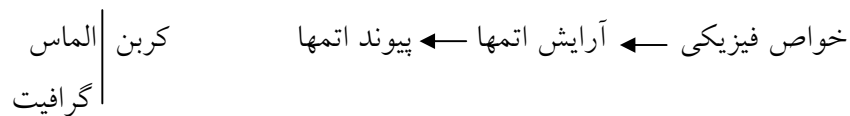
⚡پیوند بین گازهای نادر یا مولکولهای پایدار (متان و....)

۴- پیوند فلزی (شبه کووالانسی)

⚡دریای الکترون (الکترون آزاد)

ارتباط خواص مکانیکی مواد با پیوندهای اتمی

خواص فیزیکی و مکانیکی مواد به نوع آرایش و ساختمان اتمی و نوع پیوند بین اتمهای سازنده آن بستگی دارد. نوع ساختار بر تعداد زیادی از خواص از جمله چگالی، ضریب کشانی، ضریب انبساط حرارتی شکل پذیری و انرژی تصعید تأثیر دارد



ساختار جامدات

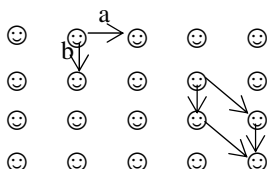
الف) بلورین Crystall (ب) بی شکل Amorph

در مواد جامد بلورین (کریستالی) اتمها بطور منظم و با ترتیب خاصی در کنار هم قرار گرفته و یک شبکه منظم فضایی (سه بعدی) را ایجاد می کنند؛ مانند بلور نمک در حالی که در مواد جامد بی شکل (آمورف) این نظم در مقیاس یک یا چند اتم یا مولکول وجود داشته و هر چه از آن دور می شویم بی نظمی بیشتر می شود؛ مانند شیشه و پلاستیکها.

- ✓ آن ایزوتروپ (ناهمسانگرد) اختلاف خواص در جهات مختلف.
- ✓ ایزوتروپ (همسانگرد) یکنواختی خواص در جهات مختلف.

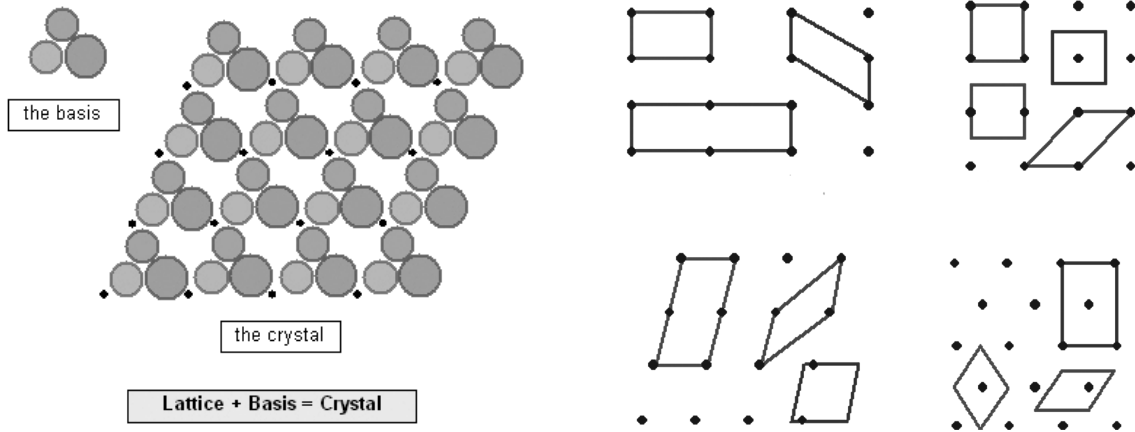
شبکه های فضایی و ساختار بلورین مواد

تعریف: شبکه فضایی مجموعه منظم سه بعدی از تعداد نامحدودی نقاط است که هر کدام از نظر وضع استقرار در بین نقاط مجاور خود کاملاً یکسانند.



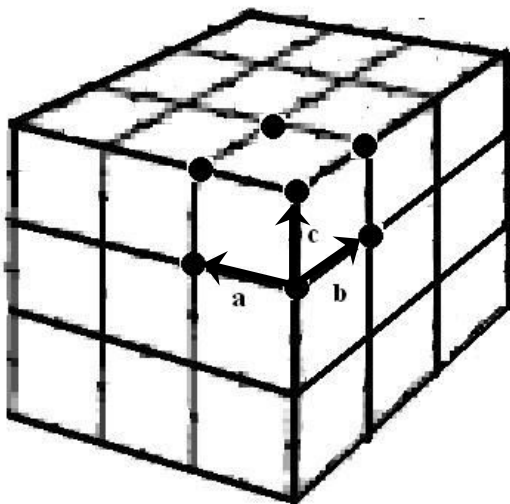
- شبکه فضایی دو بعدی را می توان به کمک یک نقطه ی شروع و دو بردار غیر موازی a, b که در یک نقطه همدیگر را قطع می کنند ایجاد کرد.
- بردارهای a, b منحصر به فرد نیستند؛ یعنی برای ایجاد یک شبکه فضایی می توان از تعداد بسیار زیادی زوج بردار استفاده کرد.

- بردارهای a, b بردارهای واحد نام دارند و شکل شبکه را معلوم می‌کنند. سلول‌های واحد متوازی‌الاضلاع‌هایی هستند که اضلاع آنها بردارهای a, b باشند. مناسبترین سلول واحد سلولی است که تقارن شبکه را به بهترین صورت بیان کند.

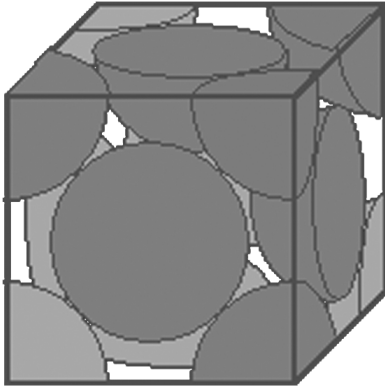


در هر گوشه‌ی سلول واحد یک نقطه شبکه وجود دارد و هریک از این نقاط به نوبه خود در گوشه‌های سه سلول واحد دیگر نیز قرار دارند زیرا هر نقطه‌ی شبکه محل تلاقی چهار سلول واحد است و این نقطه به تساوی بین چهار سلول مشترک است پس به هریک از سلول‌ها $1/4$ از این نقطه‌ی شبکه تعلق می‌گیرد. هر سلول چهار نقطه‌ی شبکه در چهار گوشه خود دارد و صاحب $1/4$ از هریک از نقاط است به عبارت دیگر هر سلول $4 \times 1/4 = 1$ نقطه از شبکه دارد. هر سلول واحد که دارای یک نقطه‌ی شبکه باشد سلول ابتدایی نامیده می‌شود و بردارهای مربوطه بردارهای ابتدایی نام دارند.

شبکه دو بعدی را به سادگی می‌توان به شبکه سه بعدی تعمیم داد فقط کافی است بردار سوم به نام c که در صفحه بردارهای a و b نباشد تعریف کرد و همان جریان تغییر مکان را برای این بردار در بعد سوم تکرار نمود.

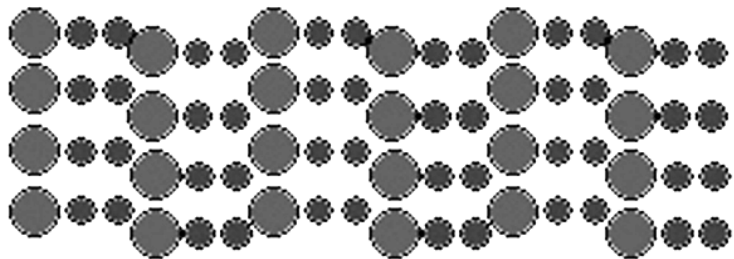
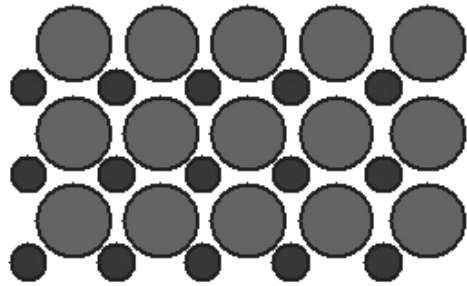
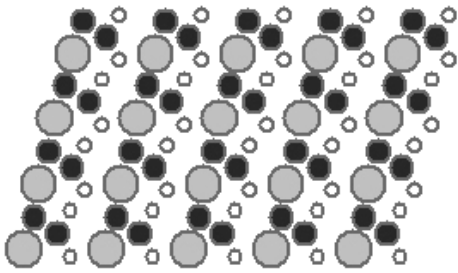


در شکل مقابل یک شبکه سه بعدی با بردارهای واحد a, b و c و سلول واحد مربوطه نشان داده شده است. این سلول واحد در هر گوشه‌ی خود بایک نقطه‌ی شبکه و مجموعاً با هشت نقطه‌ی شبکه در تماس است. اگر سلول‌های واحد دیگری در این شکل رسم کنیم مشاهده خواهد شد که هر نقطه در گوشه‌ی یک سلول واحد به هفت سلول دیگر نیز تعلق دارد. هشت سلول

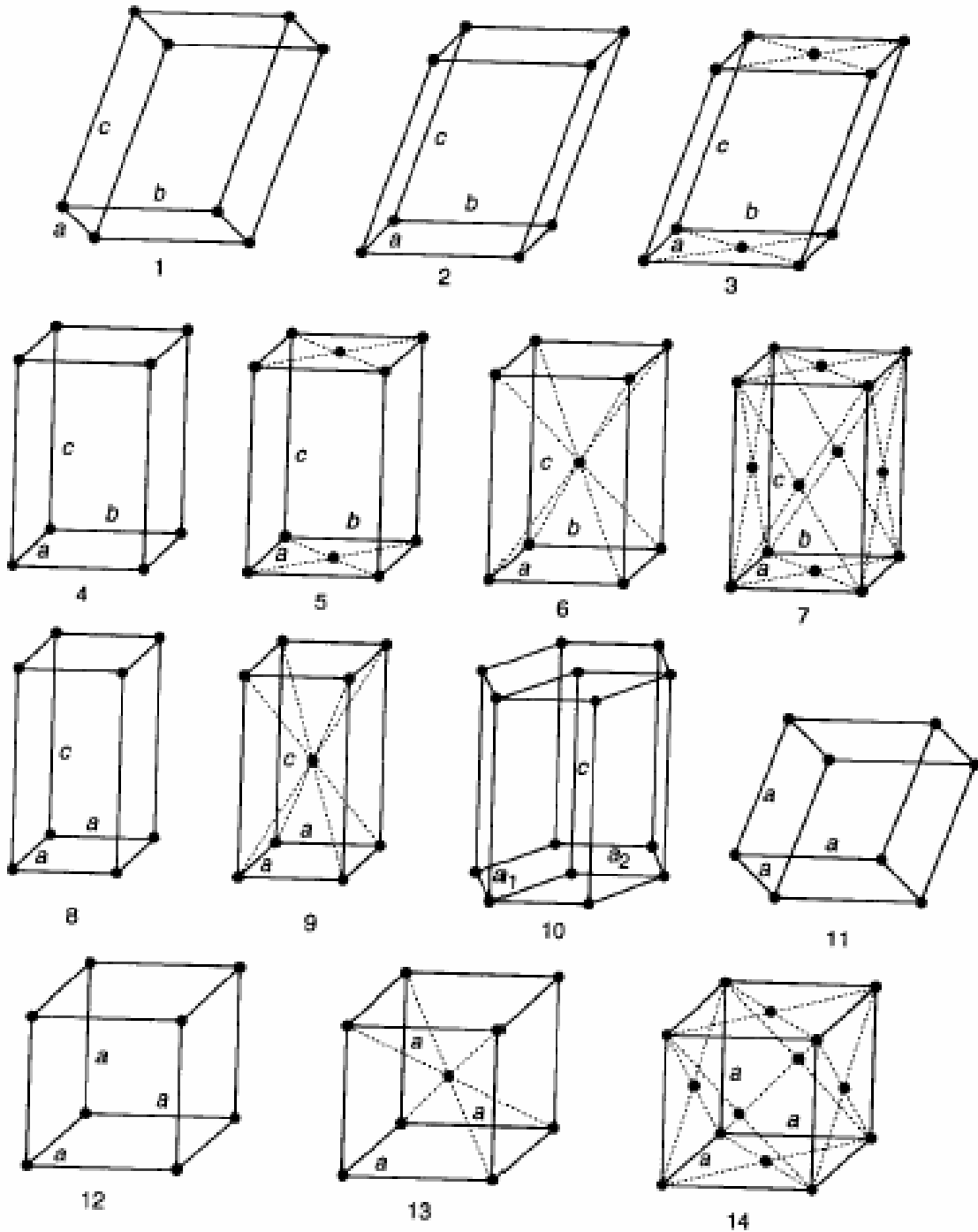


واحد در این نقطه تلاقی دارند لذا $1/8$ از هر نقطه مربوط به یک گوشه از سلول واحد است و چون سلول واحد هشت گوشه دارد لذا هر سلول واحد در شبکه سه بعدی $1 = 8 \times 1/8$ نقطه از شبکه دارد. مانند شبکه دو بعدی هر سلول واحد شبکه سه بعدی که دارای یک نقطه‌ی شبکه باشد سلول ابتدایی نامیده می‌شود و بردارهای مربوطه بردارهای ابتدایی نام دارند.

سؤال: در اشکال زیر سلول واحد و بردارهای آنرا رسم کنید.



طبق نظر بلورشناسان فقط ۱۴ ترکیب در فضا شرایط تقارن لازم برای شبکه های فضایی را ایجاد می کنند. این شبکه ها بنام شبکه های براویس (برای) در هفت گروه که هر گروه یک دستگاه نامیده می شود متبلور می شوند.



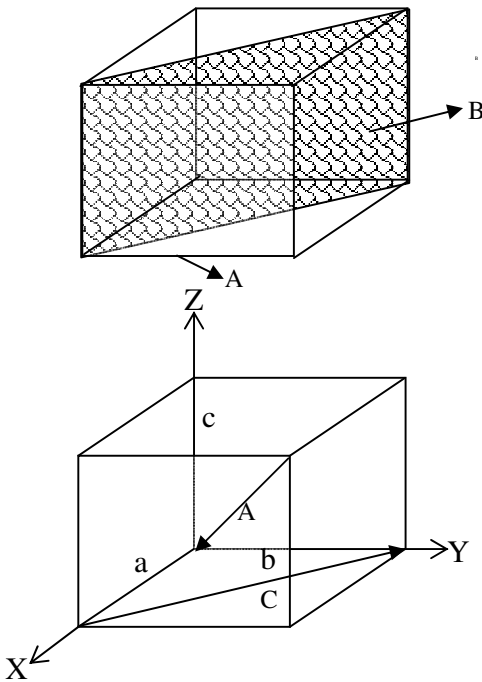
- چهارده شبکه ی براویس و هفت سیستم کریستالی

نوع شبکه	علامت	دستگاه کریستالی	بردارهای واحد
مکعبی ساده	P	مکعبی	$\alpha=\beta=\gamma=90$ و $a=b=c$
مکعبی مرکزپر (bcc)	I		
مکعبی باوجوه مرکزپر (fcc)	F		
مکعب مستطیل ساده	P	مکعب مستطیل	$\alpha=\beta=\gamma=90$ و $a\neq b\neq c$
مکعب مستطیل مرکزپر	I		
مکعب مستطیل با قاعده مرکزپر	C		
مکعب مستطیل وجوه مرکزپر	F		
راست وجهی ساده	P	راست وجهی	$\alpha=\beta=\gamma=90$ و $a=b\neq c$
راست وجهی مرکزپر	I		
تک مایل ساده	P	تک مایلی	$\alpha=\beta=90$ و $a\neq b\neq c$ $\gamma\neq 90$
تک مایلی با قاعده مرکزپر	C		
لوزوجهی ساده	P	لوزوجهی	$\alpha=\beta=\gamma\neq 90$ و $a=b=c$
سه مایلی ساده	P	سه مایلی ساده	$\alpha=\beta=\gamma\neq 90$ و $a\neq b\neq c$
منشور شش وجهی	P یا C	منشور شش وجهی	$\alpha=\beta=90$ و $a=b\neq c$ $\gamma=120$
<p>a, b, c: ثوابت شبکه؛ α و β و γ زوایای بین بردارها؛ P: ساده؛ C: یک نقطه شبکه در وسط دو وجه موازی؛ F: یک نقطه شبکه در وسط هر وجه و I: یک نقطه شبکه در مرکز سلول.</p>			

تعیین جهات در بلورها

برای بررسی اثر ساختار بلورین روی خواص مواد باید بتوانیم پیرامون جهات و صفحات گوناگون بلورها صحبت کنیم. فاصله بین اتمها بر حسب جهت اندازه گیری متفاوت است.

تعداد اتمهای موجود در سطح A و B برابر است (هر کدام $1/4 \times 4 = 1$) اما مساحت سطح B بیشتر از سطح A است لذا تعداد اتمهای واحد سطح A بیشتر از عدد اتمهای واحد سطح B است. خواص فیزیکی و مکانیکی مواد تابع تعداد پیوندهای بین اتمی و استحکام آنهاست، در نتیجه این خواص در جهات مختلف متفاوتند.



جهت بر حسب سلول واحد تعریف می شود. در شکل مقابل یک سلول واحد مکعبی ساده نشان داده شده است. محورهای مختصات در امتداد یالهای سلول واحد انتخاب می شوند. هر برداری که از مرکز مختصات به هر کدام از نقاط شبکه وصل شود بیانگر یک جهت است و چنین برداری را می توان بر حسب بردارهای واحد تعریف کرد.

مثال: برای تعیین جهت بردار C ابتدا مرکز محور مختصات را در نقطه

ابتدایی بردار فرض می کنیم و سپس طول آنرا بر حسب مقادیر ثوابت شبکه برای هر کدام از محورهای X, Y و Z را بدست می آوریم. در شکل بالا بردار C محور Xها را -۱ و محور Yها را در +۱ و محور Zها را در ۰ (صفر) قطع کرده است یعنی دارای مختصات (۱, ۰, -۱) می باشد. طبق قرارداد جهت بردار به صورت [uvw] مشخص می شود؛ بنابراین نمایش جهت بردار C بصورت $[\bar{1}10]$ می باشد.

سؤال:

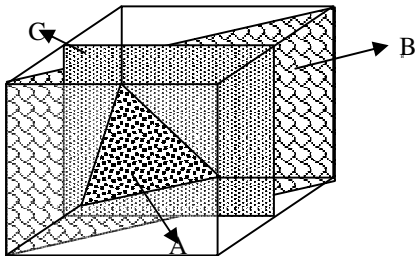
۱. جهت بردار A را مشخص کنید؟

۲. جهت [210] را رسم کنید؟

✓ تمام جهات $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$, $[\bar{1}\bar{1}1]$, $[\bar{1}1\bar{1}]$, $[\bar{1}11]$, $[1\bar{1}\bar{1}]$, $[1\bar{1}1]$, $[11\bar{1}]$, $[111]$ هم ارزند زیرا در واحد طول اتمهای مساوی دارند.

جهت هم ارز به شکل $[[111]]$ و یا $\langle 111 \rangle$ نمایش داده می شوند.

سؤال: علامت $[[110]]$ بیانگر کدام جهات در بلور مکعبی است؟



سطوح در بلورها و شاخصهای میلر

برای بدست آوردن مختصات سطوح در بلورها از شاخص (اندیس) میلر استفاده می شود.

مثال ۱: در شکل مقابل صفحه A محور X ها را در $1/3$ ، محور Y ها و

$$Z \text{ ها را در } 1/2 \text{ قطع کرده است. } X = \frac{a}{3}, Y = \frac{b}{2}, Z = \frac{c}{2}$$

طبق قرارداد، شاخصهای میلر، محل تلاقی صفحه با محورهای مختصات بدین ترتیب است:

$$X = \frac{a}{h}, Y = \frac{b}{k}, Z = \frac{c}{l}$$

و صفحه با علامت (hkl) نشان داده می شود. لذا اندیس میلر صفحه فوق (۳۲۲) می باشد.

مثال ۲: اندیس میلر صفحه ای که محورهای مختصات را در نقاط $X=3, Y=2, Z=1$ قطع می کند را پیدا کنید.

$$1 - \text{ابتدا عکس اعداد را بدست می آوریم. } \frac{1}{X} : \frac{1}{Y} : \frac{1}{Z} = \frac{1}{3} : \frac{1}{2} : \frac{1}{1}$$

$$\frac{6}{3} : \frac{6}{2} : \frac{6}{1} \rightarrow 2 : 3 : 6 \rightarrow (hkl) = (236) \text{ ک م م (۶)}$$

✓ صفحات (100), (010), (001), $(0\bar{1}0)$, $(00\bar{1})$... با هم هم ارزند و به صورت $((100))$ و یا {100} نمایش داده می شوند.

سؤال:

۱. اندیس صفحات کریستالی B, C در شکل های فوق را رسم کنید.

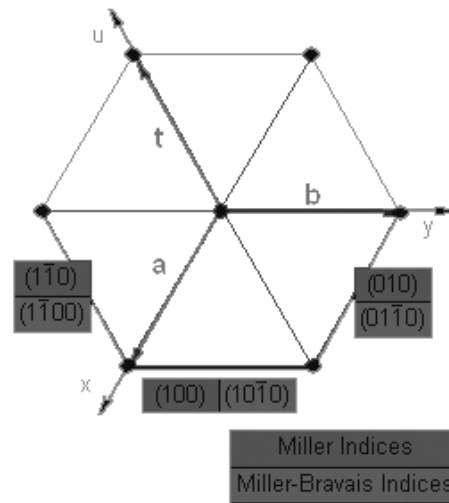
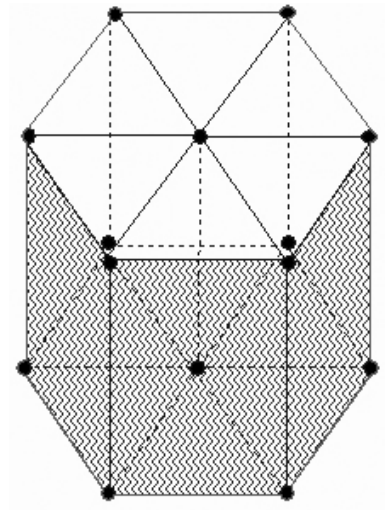
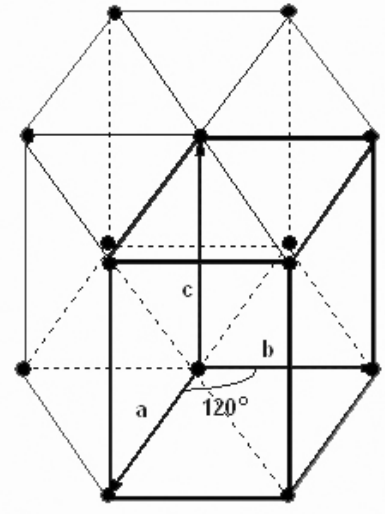
۲. صفحات و جهات ذیل را بر روی شکل رسم کنید.

$$[001] \quad (213)$$

$$[010] \quad (\bar{1}21)$$

$$[110] \quad (111)$$

برای تعیین اندیس صفحات کریستالی در سیستم شش‌وجهی یا هگزاگونال بهتر است از چهار محور مختصات (که به نام اندیس میلر-برایس معروف است) استفاده کرد. سه محور a, b و t در صفحه قاعده بوده و با هم زاویه 120° را می‌سازند و محور چهارم (c) عمود بر سه محور دیگر خواهد بود. بنابراین برای تعیین اندیس صفحه از چهار اندیس (abct) استفاده می‌شود که در آن $(a+b)=-t$.
 مثال: صفحه (0001) صفحه قاعده هگزاگونال است.



فاصله صفحات کریستالی

a: ثابت شبکه

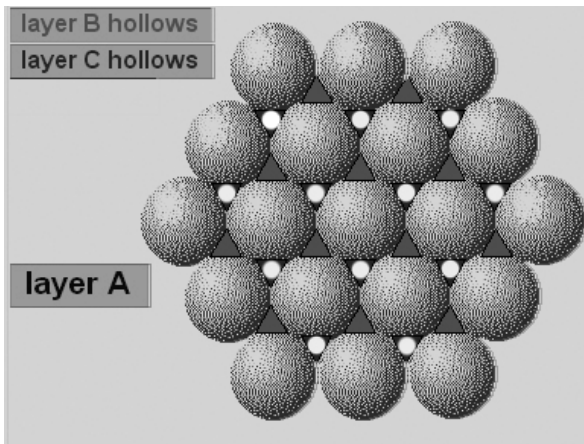
$$d_{hkl} \text{ مکعبی} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

$$\text{تتراگونال} \frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$$

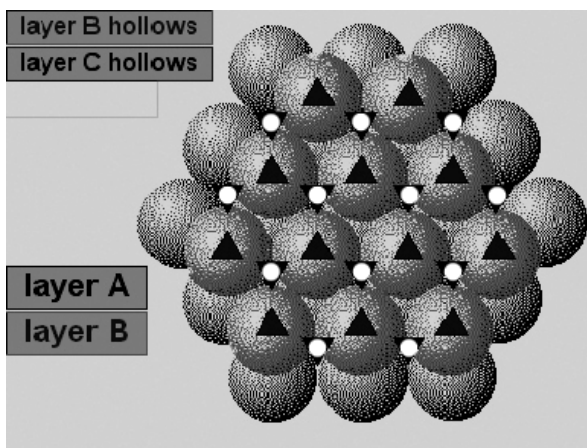
$$\text{هگزاگونال} \frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2}$$

ساختمان کریستالی فلزات و تکرار صفحات اتمی

در تشکیل ساختار اتمی یک فلز در نظر بگیرید که اتمهای هم اندازه سعی می کنند تا حد امکان اطراف خود را با اتمهای دیگر پر کنند. لذا پایدارترین حالت زمانی خواهد بود که بیشترین تعداد پیوند ممکن در واحد حجم ماده بوجود آید. چون در اینجا ساختمان کریستالی از یک عنصر تشکیل شده آنها را به صورت یک کره سفت در نظر می گیریم (بر مبنای الگوی توپ بیلارد). بنابراین در هنگام تماس فاصله بین مراکز کرهها برابر با طول پیوند است.

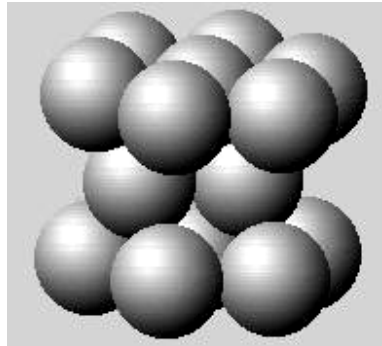


شکل مقابل صفحه ای از اتمها را در حداکثر فشردگی ممکن نشان می دهد. در این صفحه هر اتم دارای شش همسایه نزدیک است. این صفحه را صفحه A می نامیم. فضای خالی بین اتمها را می توان به دو دسته b و c تقسیم کرد. برای ایجاد فشرده ترین شبکه بایستی لایه های بعدی دقیقاً در فضای خالی بین اتمهای لایه های پایینی قرار بگیرد.

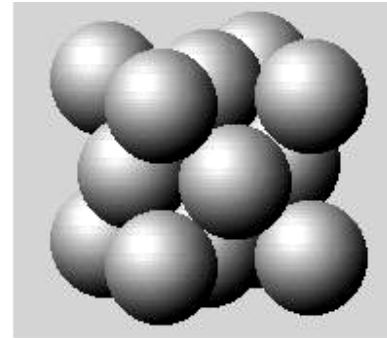


اتمهای صفحه بالایی می توانند در یکی از فضاهای b یا c قرار گیرند. فرض کنید لایه بعدی در وضعیت b قرار بگیرد. شکل مقابل مجموعه دو لایه A و B را نشان میدهد. علاوه بر دو جای خالی قبلی یک جای خالی دیگر نیز در بین اتمهای لایه B ایجاد شده است که در حقیقت همان مکان هندسی اتمهای لایه اول است لذا این فضای خالی را a می نامیم. در صورتی که لایه سوم در فضای a

قرار بگیرد آرایش صفحات به صورت ABABAB... خواهد بود این ساختار، منشور شش وجهی فشرده نام دارد که به اختصار آنرا hcp می نامند و اگر اتمهای لایه بعدی در فضای خالی c (▽) قرار بگیرد بیشترین فشردگی ممکن بدست می آید در این صورت آرایش صفحات به صورت ABCABCABC... خواهد بود. این ساختار، مکعب با وجوه مرکز پر نام دارد که به اختصار آنرا fcc می نامند.

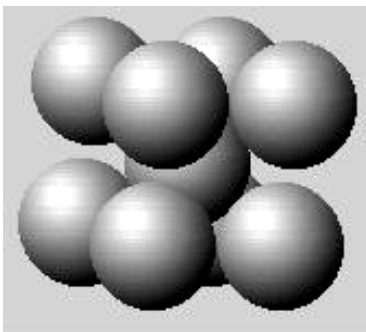


hcp



fcc

اشکال فوق شماتیک سه بعدی ساختارهای fcc^1 و hcp^2 را نشان می‌دهد که در آنها هر اتم دارای ۱۲ همسایه نزدیک است (عدد همسایگی برابر ۱۲ است). اکثر فلزات دارای ساختار fcc و یا hcp است. علاوه بر دو ساختار فوق ساختار سومی نیز وجود دارد که در آن هر اتم دارای ۸ همسایه نزدیک است (عدد همسایگی برابر ۸ است)، این ساختار مکعب مرکز پر (bcc^3) است.



bcc

همانطور که در شکل مقابل ملاحظه می‌شود مقدار فشردگی در این ساختار از دو ساختار فوق کمتر است. نوع ساختار کریستالی مواد بر بسیاری از خواص فیزیکی و مکانیکی آنها تأثیر می‌گذارد.

¹ Face Center Cubic

² Hexagonal Closed Packed

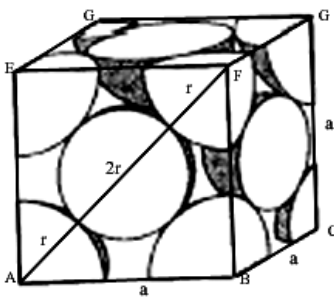
³ Body Center Cubic

ضریب تراکم

مقدار درصد حجم اشغال شده توسط اتمها در یک سلول واحد ضریب تراکم نامیده می شود.

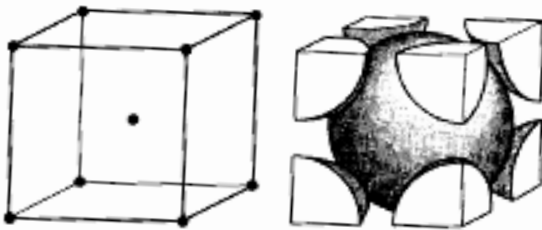
$$\text{ضریب تراکم} = \frac{\text{حجم اتمها}}{\text{حجم سلول}}$$

مثال: ضریب تراکم سلول fcc را تعیین کنید؟



$$\text{ضریب تراکم} = \frac{\text{حجم اتم ها}}{\text{حجم سلول}} = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi r_a^3}{(2\sqrt{2}r_a)^3} = \frac{16\pi}{48\sqrt{2}} = 0.74$$

سؤال: ضریب تراکم سلول bcc را تعیین کنید؟



دانسیته اتمی خطی

تعداد اتمها در واحد طول پاره خط را دانسیته اتمی خطی می نامند.

$$\text{دانسیته اتمی خطی} = \frac{\text{تعداد اتم های کامل موجود بر روی پاره خط}}{\text{طول پاره خط مورد نظر}}$$

مثال: دانسیته خطی اتم ها در امتداد [۱۱۰] در شبکه کریستالی مس را تعیین نمایید. (fcc)

$$r_{cu} = 1.278 \text{ \AA} = 1.278 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$d_l = \frac{2}{a\sqrt{2}} = \frac{2}{4r} = 3.9 \times 10^7 \text{ atoms / cm}$$

دانسیتته اتمی صفحه ای

تعداد اتمها در واحد سطح را دانسیته اتمی صفحه ای می نامند.

$$\text{دانسیتته اتمی صفحه ای} = \frac{\text{تعداد اتم های کامل موجود بر روی صفحه}}{\text{مساحت صفحه مورد نظر}}$$

مثال ۲: دانسیته صفحه (۱۰۰) را در شبکه کریستالی سرب (fcc) محاسبه کنید.

$$r_{pb} = 1.750 \text{ \AA} = 1.750 \times 10^{-8} \text{ cm} \Rightarrow a_{pb} = \frac{4r_{pb}}{\sqrt{2}} = 4.95 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$d_p = \frac{2}{a_{pb}^2} = 8.2 \times 10^{14} \text{ atom / cm}^2$$

دانسیتته اتمی حجمی (چگالی)

با استفاده از رابطه ضریب تراکم اتمی می توان چگالی و یا وزن مخصوص یک جامد کریستالی را بدست آورد و برعکس با داشتن چگالی و نوع ساختمان کریستالی می توان شعاع اتمی، واحد شبکه یا فواصل اتمی را محاسبه نمود. وزن اتمهای موجود در یک سلول واحد از رابطه زیر بدست می آید:

$$m = \frac{nM}{N_A}$$

در این رابطه M وزن اتمی؛ n تعداد اتمها در یک سلول واحد؛ m وزن سلول واحد و N_A عدد آووگادرو است. وقتی حجم سلول واحد a^3 باشد چگالی ماده (ρ) برابر وزن سلول واحد تقسیم بر حجم سلول واحد خواهد بود.

$$\rho = \frac{nM}{a^3 N_A}$$

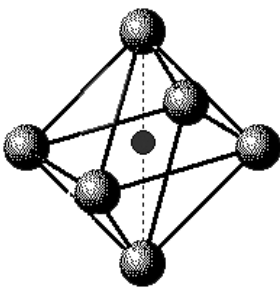
سؤال: چگالی (دانسیته) فلز نیکل را محاسبه کنید. (شعاع اتمی نیکل 0.124 nm ؛ ساختار fcc؛ جرم اتمی: 58.69 و عدد آووگادرو $1/\text{mol} = 6.023 \times 10^{23}$)

ساختن کریستالی مواد یونی

برعکس ساختمان کریستالی فلزات که از یک اتم تشکیل شده است ساختمان کریستالی موادی که دارای پیوند یونی می‌باشند دارای حداقل دو نوع اتم متفاوت می‌باشند. اندازه اتم های بلورهای یونی متفاوت است و توسط پیوندهای غیر جهتدار به هم متصل می‌شوند با این حال تمام بلور از نظر بار الکتریکی خنثی است. فرمول کلی آنها MX می‌باشد که در آن M نشان دهنده فلز و X یک غیر فلز است. این نوع مواد بر اساس عدد همسایگی (کوردیناسیون) یونهای تشکیل دهنده آنها تقسیم‌بندی می‌شود. در اینجا عدد همسایگی تعداد یونها با بار الکتریکی مخالف را نشان می‌دهد که در نزدیکترین فاصله با یک یون قرار دارد لذا این عدد توسط تعداد یونهای بزرگتر (آنیون) که در مجاورت یون کوچکتر (کاتیون) قرار گرفته استف تعیین می‌شود. $\frac{r^+}{r^-}$ شعاع یونی: شعاع کره ای است که به جای یون قرار داده ایم. باید توجه داشت که شعاع های یونی ممکن است بزرگتر یا کوچکتر از شعاع اتمی باشد.

در جدول زیر عدد همسایگی برای محدوده‌های معینی از نسبت شعاع کاتیون به شعاع آنیون ($\frac{r^+}{r^-}$) داده شده است. در هر محدوده کمترین مقدار نسبت شعاع کاتیون به آنیون که می‌تواند عدد همسایگی معینی ایجاد کند نسبت بحرانی شعاع نامیده می‌شود.

نوع ساختمان	عدد همسایگی	نسبت بحران شعاع ها	محدوده نسبت شعاع های یونی
خطی	۲	۰	$0 < \frac{r^+}{r^-} < 0.155$
مثلثی	۳	۰/۱۵۵	$0.155 < \frac{r^+}{r^-} < 0.225$
چهار وجهی	۴	۰/۲۲۵	$0.225 < \frac{r^+}{r^-} < 0.414$
هشت وجهی	۶	۰/۴۱۴	$0.414 < \frac{r^+}{r^-} < 0.732$
مکعبی	۸	۰/۷۳۲	$0.732 < \frac{r^+}{r^-} < 1$
fcc یا hcq	۱۲	۱	$\frac{r^+}{r^-} = 1$



سؤال: نسبت $\frac{r^+}{r^-}$ را برای عدد همسایگی ۶ محاسبه کنید. (شکل مقابل)

با توجه به اینکه نیروهای استاتیکی، که یونها را در کنار هم نگه میدارد، نیروهای نسبتاً قوی می‌باشند کریستالهای یونی نسبتاً سخت بوده و نقطه ذوب بالایی دارند. به عنوان مثال نقطه ذوب نمک طعام حدود 810°C می‌باشد. همچنین این مواد در مقابل نیرو تغییر شکل پلاستیکی نداده و می‌شکنند. سؤال: چرا یک کریستال یونی که از یونهای مثبت و منفی تشکیل شده است هادی الکتریسیته نمی‌باشد.

جدول زیر ساختمان شبکه کریستالی تعدادی از مواد را نشان می‌دهد.

نام ماده / عنصر	علامت اختصاری	عدد اتمی	نوع شبکه	شعاع اتمی $A^{\circ}(r)$	واحد شبکه $A^{\circ}(a)$
آلومینیوم	AL	۱۳	fcc	۱/۴۳	۴/۰۵
آهن	Fe	۲۶	bcc	۱/۲۴	۲/۸۶۶
آهن	Fe	۲۶	fcc	۱/۲۶	۳/۵۶۴
پلاتین	Pt	۷۸	fcc	۱/۳۹	۳/۹۳۱
روی	Zn	۳۰	hcp	۱/۳۳	$a=b=۲/۶۶۵$ $c=۵/۰۳۷$
سرب	Pb	۸۲	fcc	۱/۷۵	۴/۹۵
سیلیسیم	Si	۱۴	مکعب الماسی	۱/۱۷	۵/۴۳۱
طلا	Au	۷۹	fcc	۱/۳۹	۴/۰۷۸
فسفر	P	۱۵	اورتورومبیک	۱/۱	$a=۳/۳۱$ $b=۴/۳۸$ $c=۱۰/۵$
کربن (گرافیت)	C	۶	هگزاگونال	۰/۷۷	$a=۴/۲۵۵$ $c=۶/۷۰۴$
کربن (الماس)	C	۶	مکعب الماسی	۰/۷۷	۳/۵۶۷
مس	Cu	۲۹	fcc	۱/۲۸	۳/۶۱۵
نقره	Ag	۴۷	fcc	۱/۴۴	۴/۰۸۶
وانادیم	V	۲۳	bcc	۱/۳۶	۳/۰۳۹

عیوب کریستالی (ناجائیهها)

عملاً در طبیعت بلور ایده آل نداریم و عیب و نقص در ساختار مشاهده می‌شود که این عیوب روی خواص فیزیکی و مکانیکی تاثیر می‌گذارند. این عیوب از نظر موقعیت قرارگیری به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱. عیوب موجود در مرز بین تک بلورها

۲. عیوب موجود در داخل تک بلورها

ساختار یک فلز یا سرامیک از تعدادی تک بلور که بصورت تصادفی در کنار هم قرار گرفته اند تشکیل شده است و جهات متفاوتی دارند بین آنها مرز ایجاد می‌شود. هر کدام از این تک بلورها را بنام یک دانه و مرز بین آنها را مرز دانه می‌نامیم. این امر توسط میکروسکوپ قابل مشاهده است که به آن ساختار میکروسکوپی می‌گویند.

✓ ایجاد ریزساختار در مواد کریستالی نتیجه تشکیل مرز بین دانه هاست.

به همین دلیل به این مواد پلی کریستال می‌گوییم و خواص مکانیکی، متأثر از اندازه دانه و نحوه توزیع و یکنواختی آن است. از آنجائیکه مواد در یکی از مراحل تولید (طبیعی یا مصنوعی) بصورت مایع بوده است که به هنگام منجمد شدن ساختار دانه ای شکل گرفته است لذا سرعت انجماد روی نوع ساختار مؤثر است. با تغییر اندازه دانه ها می‌توان خواص مکانیکی را تغییر داد. این مسئله مربوط به عیوب بین تک بلورها یا دانه ها می‌باشد. ممکن است یک تک بلور (دانه) نیز در سطح اتمی دارای نواقصی باشد. مثلاً ممکن است یک یا چند اتم در محل خاص خود نباشد. رفتار پلاستیک (مومسان) و پدیده نفوذ به این عیوب بستگی دارد. مثال: در صورت وجود یک عیب سطحی امکان لغزش صفحات اتمی و جابجایی آنها وجود دارد.

انواع دیگر عیوب، عیوب درون تک کریستال هاست که با توجه به ابعاد آنها به ترتیب زیر تقسیم می‌شوند:

☞ نقطه ای (بدون بعد)

☞ خطی (یک بعدی)

☞ صفحه ای (دو بعدی)

☞ فضایی (سه بعدی)

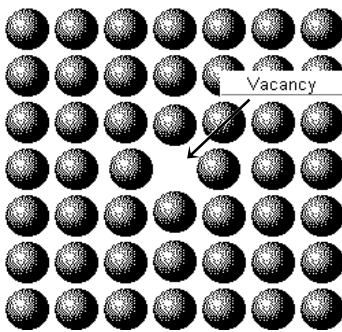
عیوب نقطه‌ای^۴

این نوع عیب تأثیر زیادی بر روی خواص مکانیکی و نفوذ ماده دارند و به صورتهای مختلفی وجود دارد.

⁴ Point defect

۱- عیوب جای خالی Vacancy

ممکن است در یک بلور جای یک اتم خالی باشد.



ایجاد جای خالی باعث افزایش انرژی داخلی سیستم و افزایش آنتروپی می‌شود و لذا انرژی آزاد کریستال معیوب از انرژی آزاد کریستال ایده آل کمتر است.

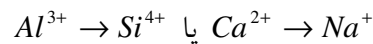
(بی نظمی) آنتروپی $F=U-TS$ انرژی آزاد کریستال

دما انرژی کریستال

با افزایش دما در یک تعادل ترمودینامیکی مقدار (غلظت جای خالی) افزایش می‌یابد.

۲- عیوب شاتکی Schottky

در کریستالهای با پیوند یونی مشاهده می‌شود که محل خالی می‌تواند یون مثبت یا منفی باشد. هرگاه بار الکتریکی کمتر یا بیشتر باشد صحبت از محل خالی آنیونی یا کاتیونی می‌شود.

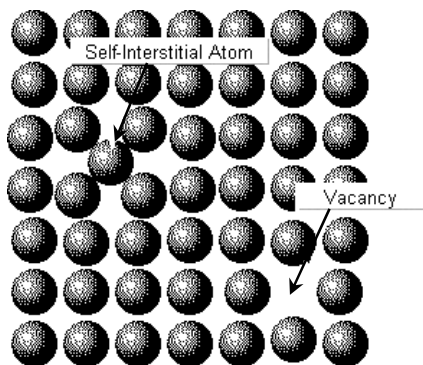
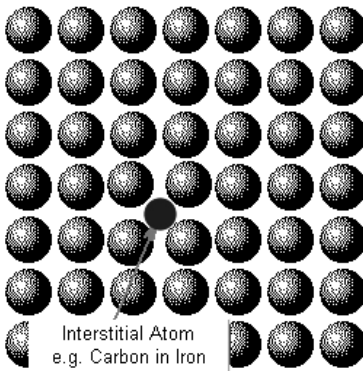


۳- عیب بین نشینی Interstitialcy

نشستن یک اتم در فضای خالی بین اتمهای شبکه که شرط اولیه کوچک بودن اندازه اتم بین نشینی است.

مثال: قرار گرفتن اتمهای کربن در شبکه مکعب با وجود مرکز پرآهن.

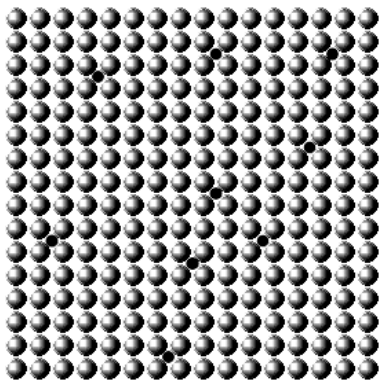
این عیب باعث تغییر شکل موضعی در ساختمان شبکه در موقعیت اتم بین نشین می‌شود. که بیشتر در ساختارهای با ضریب تراکم پایین دیده می‌شود.



۴- عیب فرنکل Frenkel

حضور هم زمان عیب جای خالی و عیب بین نشینی در یک شبکه کریستالی

مزایای عیوب نقطه ای

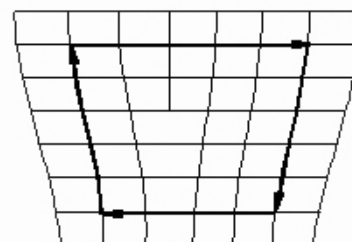
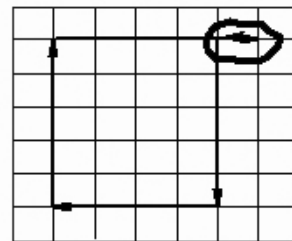
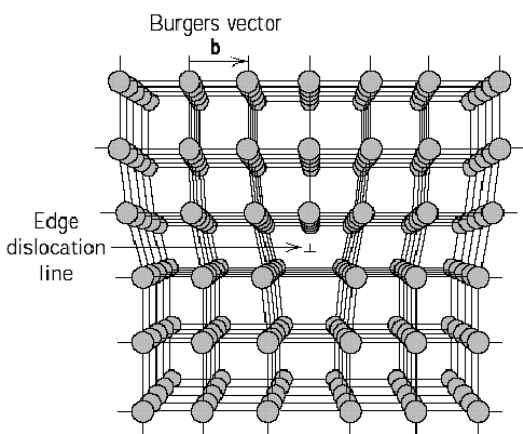
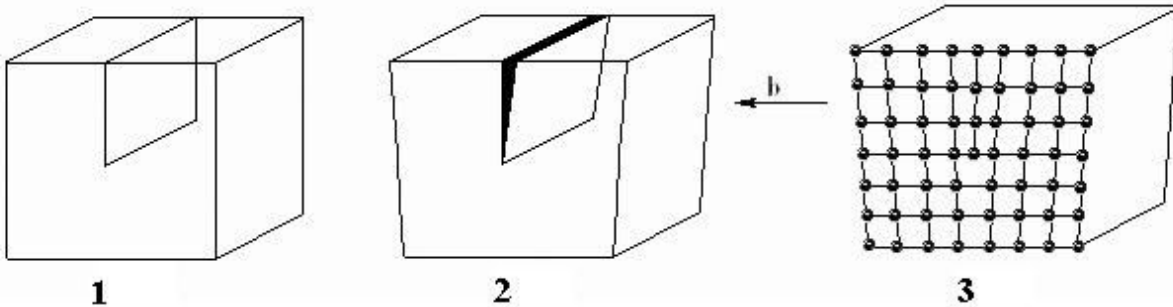


لکه محل‌های خالی پدیده نفوذ را آسانتر کرده و از آن در پدیده سخت کاری فلزات و آبکاری و پوشش استفاده می‌شود.
 لکه باعث تغییر در رنگ کریستال می‌شود (اثر آشکار سازی فیلم‌های رادیوگرافی) در اثر برخورد اشعه به AgCl یا AgBr عیب نقطه ای بوجود می‌آید. یون Ag^+ بین‌نشین می‌شود.
 لکه ساخت نیمه هادی‌ها (عنصر ژرمانیوم یا سیلیسیم در ساخت ترانزیستورها

عیوب خطی (ناجایی)^۵

ناجایی خطی یا لبه ای Edge Dislocations

ناجایی‌ها عیوبی هستند که در راستای یک خط در شبکه کریستالی وجود دارند. یعنی تقارن بلور در طول یک خط از بین می‌رود. میزان تغییر شکل بلور در این عیوب بیشتر از عیوب نقطه‌ای است. ناجایی در حقیقت انتهای یک نیم صفحه اتمی اضافی است که بین دو صفحه اتمی از یک شبکه قرار گرفته است. بدین صورت در شبکه



⁵ Line Defect (Dislocation)

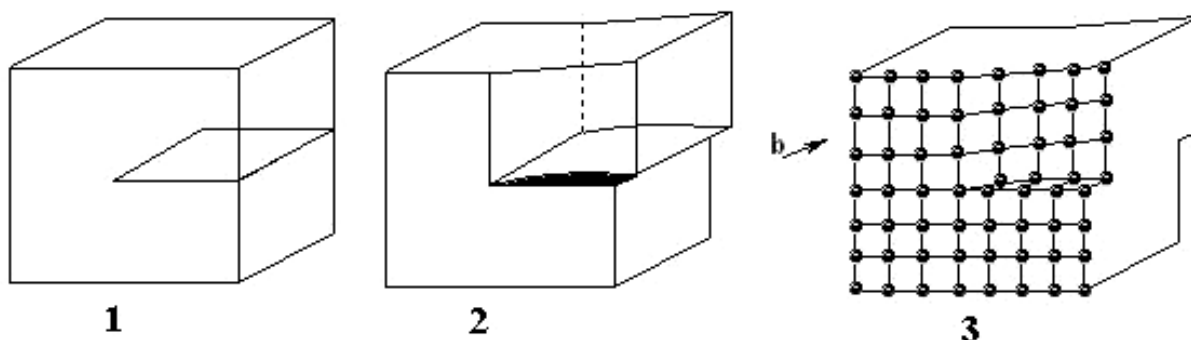
نواقصی به نام خطوط نابجایی بوجود می‌آید. خط نابجایی را با علامت (L) نشان می‌دهند که در آن خط عمود جهت نیم صفحه اضافی و خط افقی صفحه انمی شبکه را که عمود بر آن است نشان می‌دهد. خط نابجایی همان فصل مشترک این دو صفحه است.

بلور در حوالی نابجایی تغییر شکل می‌دهد که میزان تغییر شکل و جهت آن بوسیله یک کمیت برداری بنام بردار برگرز (b) اندازه‌گیری می‌شود. مقدار و جهت آن بوسیله طی مسیر حول خط نابجایی تعیین می‌شود به طوری که بردار برگرز مدار را کامل می‌کند و طول آن مضرب عدد صحیحی از فاصله اتمی و جهت آن عمود بر خط نابجایی است.

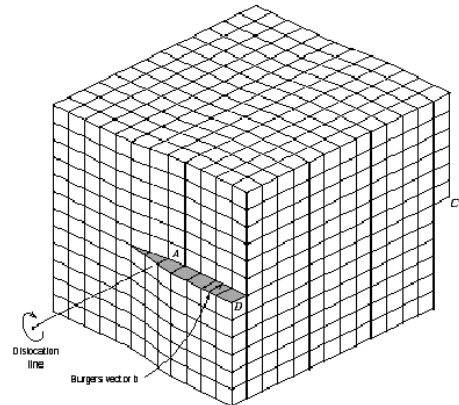
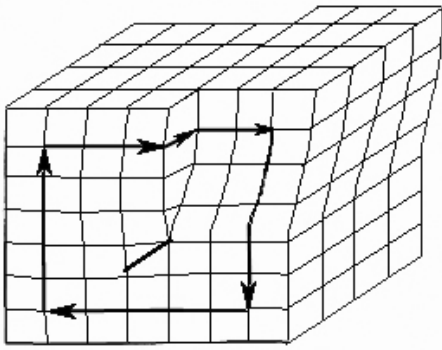
ایجاد عیوب نابجایی باعث تمرکز انرژی در نزدیکی محل نابجایی می‌گردد. یعنی فاصله اتمها در بالای نابجایی کمتر از فاصله تعادل (پارامتر شبکه) و در پایین نابجایی بیشتر است. بنابراین منطقه بالایی تحت کرنش فشاری و منطقه پایین تحت کرنش کشش است. در بحث خواص مکانیکی حرکت اینگونه نابجایی موجب لغزش در عملیات تغییر شکل پلاستیک می‌باشد.

نابجایی پیچی

در شکل زیر طرز تشکیل نابجایی پیچی نمایش داده شده است. فرض کنید اتمهای دو طرف صفحه لغزش نسبت به هم طوری بلغزند که یک قسمت بلور به یک طرف و قسمت دیگر به طرف مخالف حرکت کنند. جهت تغییر مکان با پیکان نشان داده شده است. هنگامی که لغزش به اندازه یک فاصله اتمی برسد آرایش مجدد اتمها انجام شده و نابجایی پیچی به وجود می‌آید. همانطور که ملاحظه می‌شود خط نابجایی لبه صفحه برش است.



بردار برگرز در این نابجایی به موازات خط نابجایی است. این مسئله باعث رشد مارپیچی بلور می‌شود مثل ویسکرها (مواد الیافی تک بلور) که استحکامی برابر ۱۰ تا ۳۰ برای مواد پلی کریستال دارند.



ناجایی مختلط

از پیوستن ناجایی های خطی لبه ای و پیچی با یکدیگر بوجود می آید. حالت مختلف آن بستگی به زاویه بین بردار برگرز با خط ناجایی دارد.

عیوب سطحی (دو بعدی)^۶

۱- عیوب لایه ای Stacking Fault

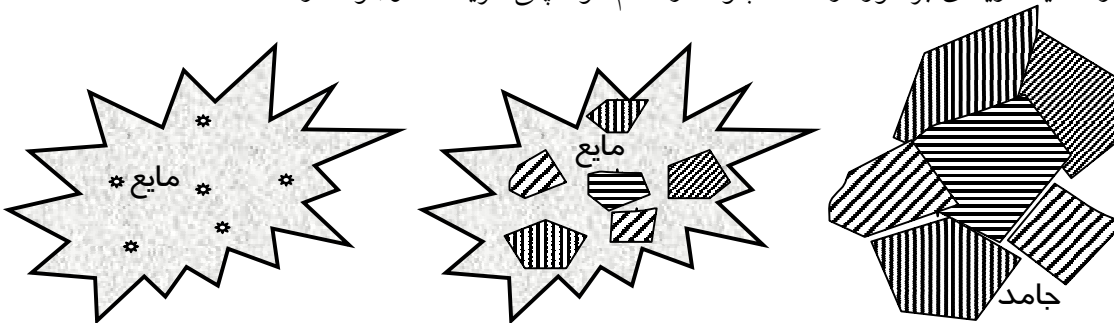
عیوب لایه ای حاصل قرارگیری بی نظم صفحات اتمی بر روی یکدیگر است.

مثال: در fcc به جای ABCABCA... داشته باشیم ABCBCABC

در hcp بجای ABABAB... داشته باشیم ABBAB...

۲- مرز دانه ها Grain Boundary

این عیب از اهمیت زیادی برخوردار است چون در تمام مواد پلی کریستال وجود دارد.



⁶ Planar Defect

با افزایش اندازه دانه استحکام شکست کاهش می‌یابد.

علت؟

۱- محدود شدن لغزش بلورها

۲- رشد ترک تا شکست با ممانعت کمتر

عیوب فضایی

عیوب سه بعدی در ساختار ماده را گوییم مانند ناخالصی‌ها، حفرات و....

مکانیزم تغییر شکل الاستیک در فلزات و آلیاژها

رفتار مکانیکی به موارد زیر بستگی دارد:

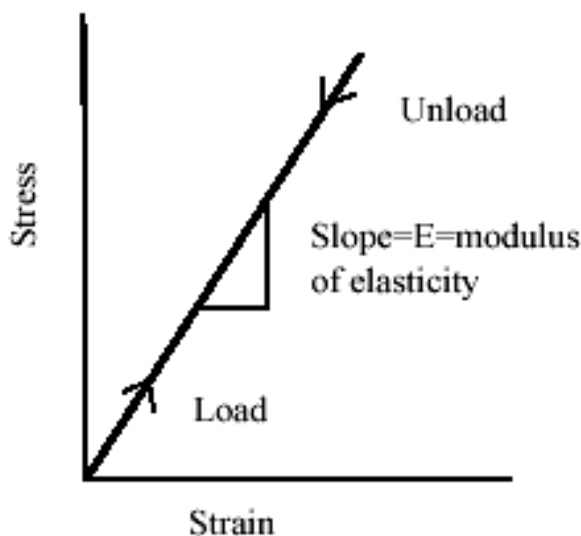
۱. نوع شبکه‌ی بلوری
۲. نیروهای بین اتمی
۳. فاصله‌های بین صفحات مختلف اتمی
۴. تراکم اتمها در صفحات مختلف

هرگاه به جسمی تنش وارد گردد در آن تغییر شکل بوجود می‌آید اگر بار اعمال شده نسبتاً کم باشد عکس العمل بلور بصورت زیاد شدن یا کم شدن فاصله‌های بین اتمها خواهد بود. در این صورت واحد اصلی شبکه تغییر نمی‌کند و اتم‌ها در محل اصلی خود نسبت به دیگری باقی می‌مانند. نیروی اعمال شده فقط صرف بر هم زدن تعادل نیروهای بین اتمی می‌شود و اتم‌ها تعادل جدیدی را به همراه نیروهای اعمال شده به عنوان یکی از اجزای نیرو می‌پذیرند. بعد از حذف نیرو تعادل اولیه برقرار می‌شود و شبکه به حالت و اندازه‌ی اولیه باز می‌گردد. ماهیت واکنش نسبت به چنین نیروهایی کشسان است و مقدار کشیدگی یا فشردگی (کرنش) با بار اعمال شده یا تنش تناسب دارد. خواص کشسان مستقل از عیوب کریستالی هستند و خواص غیر حساس به ساختار میکروسکوپی نام دارند. تعدادی ضرایب قابل اندازه‌گیری وجود دارند که بیانگر رفتار کشسان مواد هستند. این ضرایب (مدول) را به اختصار شرح می‌دهیم:

مدول الاستیک (ضریب یانگ)

در خاصیت الاستیکی تغییر شکل (ϵ) با تنش وارد

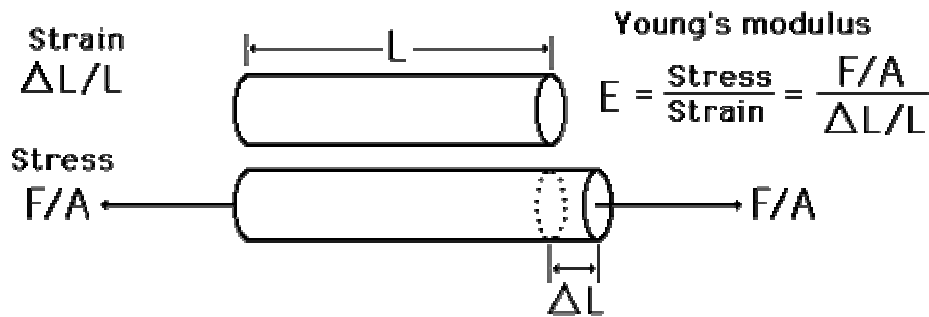
بر جسم (σ) رابطه خطی دارد. $\epsilon \propto \sigma$



$$\Delta L \propto \frac{FL}{A} \Rightarrow \Delta L \cdot E = \frac{FL}{A}$$

E ضریب تناسب، L طول اولیه، A سطح مقطع، ΔL

ازدیاد طول و F نیروی وارد بر جسم است.



طبق قانون هوک (رابطه خطی تنش - کرنش) داریم:

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta L}{L} \rightarrow \sigma = E \epsilon$$

واحد E: N/m^2

E ضریب کشسان (مدول یانگ) ماده است و تابع ابعاد نمونه نیست. E

مقاومت در برابر تغییر شکل ماده نشان می‌دهد.

مقادیر مدول یانگ (الاستیک) برای برخی از فلزات	
Metal	Elastic modulus (N/m ²)
آلومینیوم	6.96×10^{10}
برنج	9.02×10^{10}
مس	11.6×10^{10}
طلا	7.85×10^{10}
آهن خالص	9.1×10^{10}
آهن کار شده	19.3×10^{10}
سرب	1.57×10^{10}
پلاتین	16.7×10^{10}
نقره	7.75×10^{10}
0.38% C, فولاد	20.0×10^{10}
تنگستن	35.5×10^{10}
شیشه	6.5×10^{10}
بتن	3×10^{10}
چوب	1.3×10^{10}
استخوان	0.9×10^{10}
پلی استر	0.3×10^{10}

مثال: نیروی 4000 N بر یک میله از جنس برنج با طول 100 cm به قطر 1/16 cm بصورت کششی وارد می‌شود. طول نهایی و کرنش آنرا محاسبه کنید. (مدول الاستیک برنج $9.1 \times 10^{10} N/m^2$)

جواب = سطح تنش همان سطح مقطع میله است بنابراین:

$$A = \pi (1 \times 10^{-3} m)^2 = 2/0.107 \times 10^{-6} m^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{4000 N}{2.0106 \times 10^{-4} m^2} = 19.9 \times 10^6 N/m^2$$

$$\sigma = E \cdot \epsilon \Rightarrow \epsilon = \frac{19.9 \times 10^6 N/m^2}{9.1 \times 10^{10} N/m^2} = 2.2 \times 10^{-4}$$

و مقدار افزایش طول بعد اعمال نیرو:

$$\Delta l = (100 cm)(2.2 \times 10^{-4}) = 0.020 cm$$

در نتیجه طول نهایی معادل 100.02 cm خواهد شد.

سؤال: طول یک میله آهنی ۳۰ سانتی متر و قطر آن ۱۶ میلی متر است اگر نیروی معادل ۵۰ KN بصورت کششی بر آن وارد شود ازدیاد طول آن را محاسبه کنید. $E_{Fe} = 215GPa$

عوامل مؤثر بر مدول الاستیک

۱- جهات کریستالی

در یک ماده تک کریستال مقدار مدول الاستیک وابسته به جهت اعمال نیرو است چون در جهات مختلف بلور تراکم و دانسته سطحی متفاوت است. به طور مثال در بلور الماس شکست در راستای سطوح صفحات (۱۱۱) ساده تر از سایر جهات می باشد. اما در پلی کریستالها بدلیل آرایش تصادفی دانه‌ها؛ مقدار مدول الاستیک تقریباً برای تمام جهات یکسان است .

۲- درجه حرارت

مدول الاستیک در حقیقت بیان کننده قدرت پیوندی بین اتمهای یک ماده است . با افزایش دما (که باعث افزایش تحرک اتمها می شود) استحکام پیوند کاهش می یابد بنابراین مدول الاستیک نیز کاهش می یابد.

۳- عناصر آلیاژی

ترکیبات بسیار پایدار که نقطه ذوب بالا و وزن مخصوص کم دارند مانند کاربیدها، بریدها و اکسیدها دارای مدول الاستیک بسیار بالایی هستند و در صورتیکه در ترکیب با مواد نرمتر (مدول الاستیک کم) بکار روند مدول الاستیک کلی را افزایش می دهند. از این خاصیت در ساخت بسیاری از مصنوعات که نیاز به استحکام بالا و وزن کم دارند استفاده می شود (مانند اجزاء هواپیماها و سفینه‌ها).

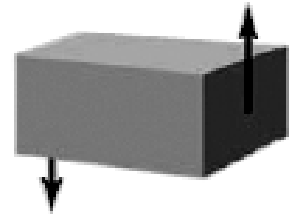
ضریب برشی

در صورتیکه دو نیروی موازی و خلاف جهت هم که باعث لغزش صفحات اتمی بر روی هم شود بر یک بلور وارد آید رابطه‌ای مشابه با $\sigma = E\varepsilon$ بین تنش برشی (τ) و تغییر شکل بدست آمده توسط آن (γ) وجود دارد.

$$\tau = \frac{F_s}{A}$$

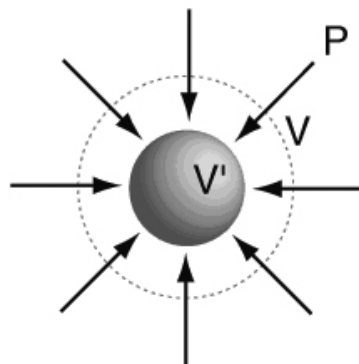
$$\tau = G \cdot \gamma$$

G ضریب برشی



ضریب حجمی

معیاری از تغییر شکل ماده در اثر فشار هیدرواستاتیک است و شدیداً وابسته به نیروهای دافعه بین اتمی است.



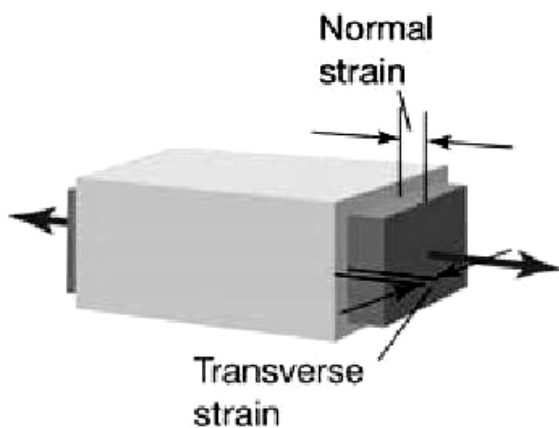
Bulk modulus:

$$B = \frac{\Delta P}{\Delta V/V}$$

P = pressure
V = volume

ضریب پواسان

نسبت بین کرنش عرضی به کرنش محوری ضریب پواسان نامیده می‌شود.



فشردگی یا کشش در جهت بارگذاری تغییری مخالف در ابعاد جهت عمود بر آن ایجاد می‌کند به عبارت ساده‌تر نسبت انقباض جانبی به کرنش کششی محوری ضریب (نسبت) پواسان نام دارد. که این مقدار همیشه کمتر از ۰/۵ و معمولاً در حدود ۰/۳ است.

$$\varepsilon_x = \frac{S_x}{L_x} \quad \varepsilon_y = \frac{S_y}{L_y} \quad \varepsilon_z = \frac{S_z}{L_z}$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$$

$$\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \text{ برای مواد همگن}$$

رابطه بین ضرایب برشی، حجمی و ضریب یانگ با ضریب پواسان

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{و} \quad B = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

مسائل:

۱- یک بلور فلزی fcc با پارامتر شبکه $3.6 \times 10^{-10} \text{m}$ دارای یک نابجایی لبه ای در صفحه (۱۱۱) می باشد؛ اندازه و جهت بردار برگر را تعیین کنید.

۲- دانسیته یک نمونه آهنی به طور تجربی برابر 7.875 gr/cm^3 بدست آمده است؛ اگر شعاع اتم آهن برابر $1.24 \times 10^{-10} \text{m}$ و ساختار بلور آن bcc باشد؛ درصد جای خالی را در این نمونه محاسبه کنید.

۳- مقدار ضریب پواسان چقدر باشد تا حجم قطعه در اثر تغییر شکل کشسان تغییر نکند؟

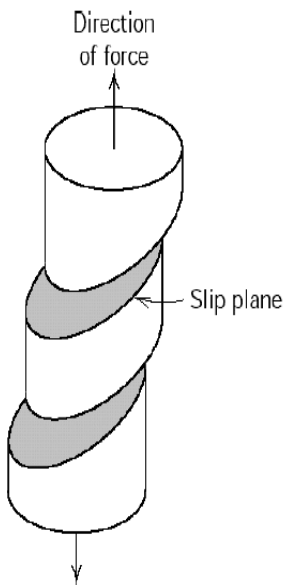
۴- تنش محوری 100 MPa بر سلول واحد نیکل ($r_{Ni} = 1.243 \text{ \AA}$) در جهت [100] وارد می شود، ابعاد سلول واحد را پس از اعمال تنش محاسبه کنید. ($E = 20 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $\nu = 0.32$)

تغییر شکل پلاستیک در مواد

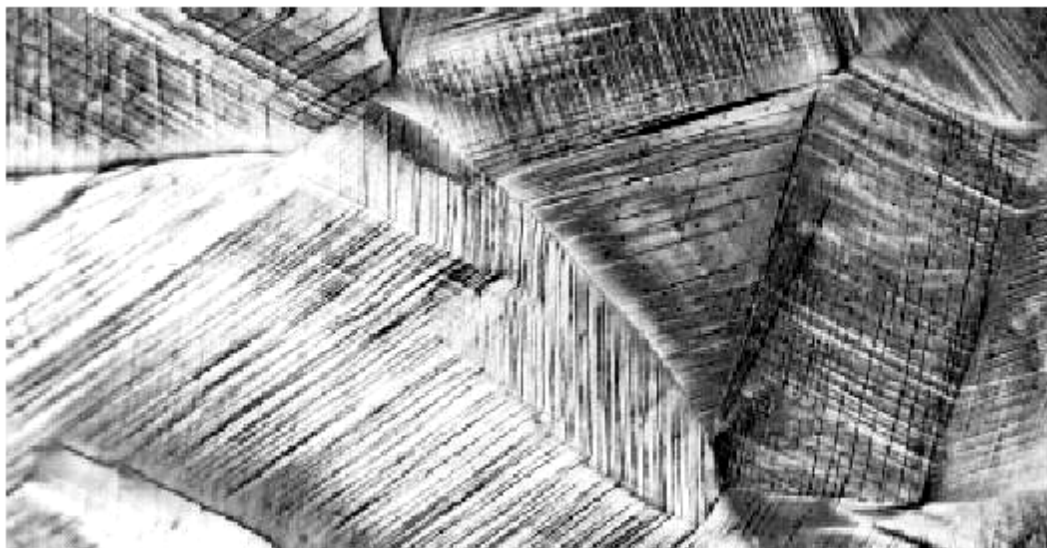
الف: مکانیزم تغییر شکل پلاستیک در مواد تک کریستال

لغزش

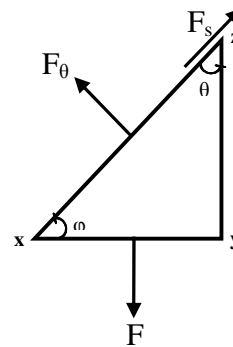
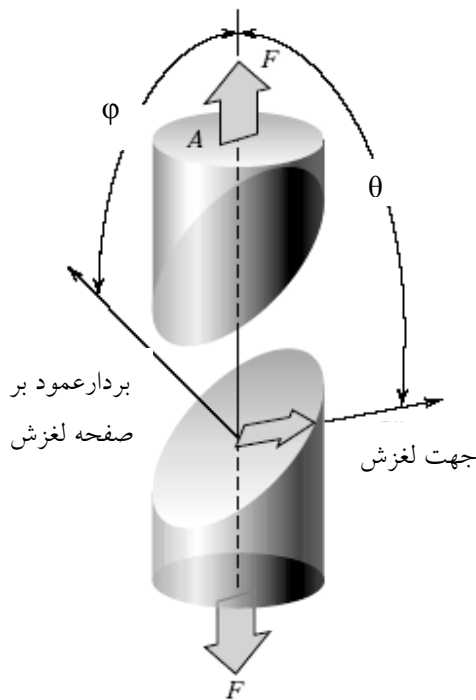
تغییر شکل پلاستیک در اثر لغزش صفحات اتمی در امتداد صفحات و جهات کریستالی معینی بنام دستگاه‌های (سیستم‌های) لغزشی انجام می‌شود. با توجه به اشکال زیر مشاهده می‌شود که بعضی از قسمتهای بلور روی سایر قسمتهای دیگر لغزیده است. شروع تغییر شکل دائمی همراه با ظهور سطوح لغزش است. لغزش در سطوحی اتفاق می‌افتد که دارای کمترین انرژی برای گسست پیوندهای بین آن با سایر سطوح هم‌ارزش باشد. هر دسته از این صفحات یک نوار لغزش نامیده می‌شود. شکل مقابل سیستم لغزش (صفحه لغزش + جهت لغزش) را بطور شماتیک و واقعی برای تک کریستال فلز روی نشان می‌دهد.



در مواد پلی‌کریستال نیز رفتار مشابهی اتفاق می‌افتد یعنی در تک تک کریستال‌ها لغزش انجام شده و در نهایت ماده شروع به تغییر شکل پلاستیک می‌کند. شکل زیر لغزش صفحات اتمی را در یک ماده پلی‌کریستال نشان می‌دهد.



مقدار لغزش در یک تک کریستال که تحت تاثیر نیروی کششی F قرار گرفته است بستگی به تنش برشی حاصل از F در سیستم لغزشی معین و فعال خواهد داشت. زمانی که مقدار تنش برشی موثر (τ) به اندازه معین که "تنش برشی بحرانی" نامیده می شود برسد لغزش اتفاق می افتد. تنش برشی بحرانی برای ایجاد تغییر شکل پلاستیک در یک تک کریستال وقتی تحت تنش مستقیم σ قرار بگیرد در تعدادی از صفحات (xz) که با آن زاویه θ می سازند تنش برشی موثر (τ) ایجاد خواهد شد.



فرض کنید ضخامت منشور xyz ؛ w باشد در این صورت:

$$F = \sigma(xy \times w), F_s = \tau(xz \times w), F_\theta = \sigma_\theta(xz \times w)$$

θ زاویه بین محور تنش مستقیم با جهت لغزش و ϕ زاویه بین محور تنش مستقیم با خط عمود بر صفحه لغزش است.

اگر در امتداد xz تجزیه کنیم:

$$F_s = F \cdot \cos\theta \rightarrow \tau(xz \times w) = \sigma(xy \times w) \cdot \cos\theta$$

$$\rightarrow \tau = \sigma \cdot (xy/xz) \cos\theta \rightarrow \tau = \sigma \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = 1/2 \sigma \sin 2\theta \rightarrow (\phi = 90 - \theta) \tau = \sigma \cos\phi \cdot \cos\theta$$

ضریب اشמיד نامیده می شود که به کمک آن می توان مقدار تنش برشی موثر را از تنش کششی σ محاسبه کرد.

سؤال:

- ۱- در چه صورتی ضریب اشمید به بیشترین مقدار خود می رسد و در این صورت مقدار تنش برشی بحرانی چقدر خواهد شد؟
- ۲- تنش معادل ۱۰۰۰ پوند بر اینچ مربع در جهت [۱۰۰] به یک بلور آهن (bcc) وارد می شود. تنش برشی در صفحه [۱۱۰] در جهت [۱۱۱] چقدر است؟ $R_{Fe} = 1.24^{A^\circ}$
- ۳- تنش برشی موثر (تجزیه شده بحرانی) برای سیستم لغزش $\{111\}[\bar{1}10]$ یک فلز fcc برابر ۱/۵ MPa میباشد. چه تنش باید در جهت [001] برای تولید لغزش تحت شرایط زیر اعمال شود:
 الف: در جهت [101] روی صفحه $(\bar{1}11)$
 ب: در جهت [011] روی صفحه $(\bar{1}11)$

مکانیزم لغزش

تغییر فرم پلاستیک در فلزات تک کریستال، تحت فرایند لغزش روی صفحات کریستالی ویژه و در اثر اعمال تنش برشی رخ می دهد. صفحات لغزش، صفحاتی هستند که دانسیته اتمی بالایی دارند و لغزش در امتداد یک صفحه لغزش و در جهات مخصوص اتفاق می افتد، یعنی راستای با بالاترین دانسیته اتمی.

دستگاههای لغزش

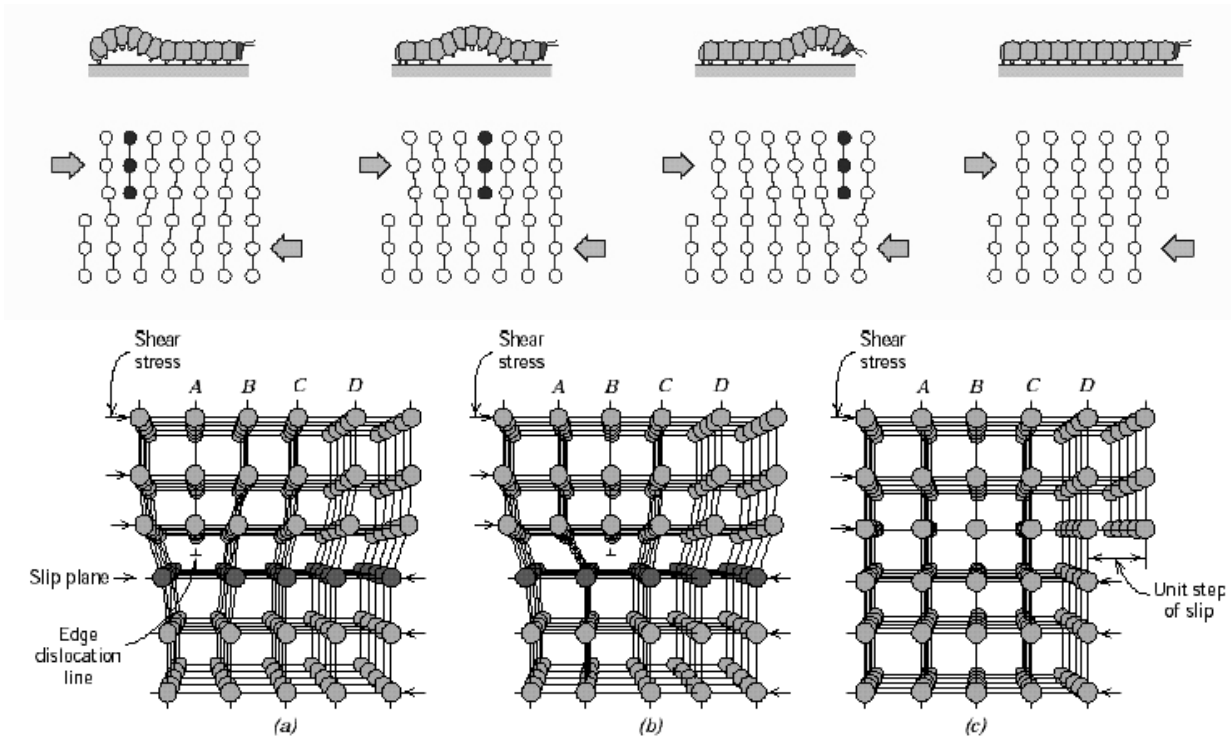
یک دستگاه لغزش شامل صفحه لغزش و جهت لغزش است. تعداد دستگاههای لغزش یک سیستم بلوری تأثیر زیادی روی رفتار پلاستیک آن دارد. هر چه تعداد آن در یک سیستم تبلور بیشتر باشد استعداد ماده‌ای که در آن سیستم تبلور شده است برای لغزش و در نتیجه تغییر فرم پلاستیک بیشتر است.

تعداد دستگاه	جهت لغزش	صفحه لغزش	ساختار
$4 \times 3 = 12$	$[\bar{1}\bar{1}0]$	$[(111)]$	Ag.Cu), γ Fe.Cu,Al.Ni.fcc (Pb
$6 \times 2 = 12$	$[\bar{1}11]$	$((110))$	β Cu), α Fe,W.bcc (Mo
$3 \times 1 = 3$	$[\bar{1}\bar{1}20]$	$((0001))$	Ti),Cd.Zn.Hcp(Mg

تغییر فرم پلاستیک تحت لغزش در بلورهای فلزی اغلب در اثر حرکت نابجایی‌ها در امتداد صفحات لغزشی، تحت تأثیر یک تنش برشی بوجود می آید. بردار برگر جهت لغزش و مقدار آنرا نشان می دهد.

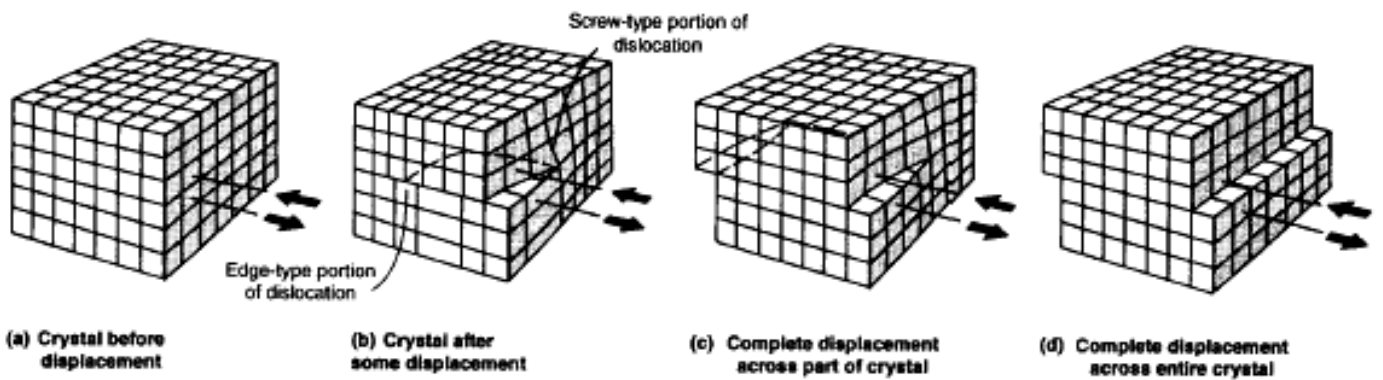
لغزش در اثر نابجایی لبه‌ای

صفحه لغزش: صفحه‌ای است که لغزش در آن صورت می‌گیرد.
 مقدار لغزش مضربی است از بردار برگرز.
 در نابجایی لبه‌ای جهت حرکت نابجایی موازی بردار برگرز و عمود بر خط نابجایی است.



لغزش در اثر نابجایی پیچی

در نابجایی پیچی بردار برگرز و خط نابجایی با هم موازی و بر جهت حرکت نابجایی عمودند.



- لغزش مختلط

در عمل ممکن است هر دو مکانیزم فوق رخ دهد. در حرکت این دو نابجایی حلقه‌های نابجایی تشکیل شده و یکی از عوامل رشد بلور در یک جهت معین است.

مقدار تئوری تنش برشی (τ_c) برای ایجاد کرنش اولیه در یک بلور ایده ال با رابطه $\tau = \frac{G}{2\pi}$ بیان می شود. (G مدول برشی) بطور تجربی مشاهده می شود که مقادیر تنش برشی برای شروع لغزش در فلزات بسیار کمتر از مقادیر تئوری است و این به دلیل حضور نابجایی ها در شبکه می باشد. البته عیوب نقطه ای با نابجایی ها واکنش داده و حرکت نابجایی ها را مشکلتر می سازد.

در حرکت نابجایی ها ممکن است صفحات لغزش به موانعی از قبیل عیوب نقطه ای، ناخالصی ها، مرزدانه ها و ... برخورد کند که برای ادامه حرکت نیاز به انرژی بیشتری می باشد. تغییر شکل پلاستیک در یک ماده تابع تحرک نابجایی ها است. و به عوامل زیر بستگی دارد:

۱- درجه خلوص بلور

۲- محل‌های مهار (ناخالصی ها، ترکها، مرزدانه ها و ...)

نمودار تنش برشی - لغزش

تغییر شکل پلاستیک در یک تک کریستال، یعنی تنش برشی لازم برای لغزش در مناسب ترین سیستم لغزش در نمودار شکل زیر مشاهده می شود.

این نمودار بستگی به نوع شبکه و جهات کریستالی دارد. نمودار فوق برای شبکه کریستالی fcc ترسیم شده است.

در ابتدا تنش برشی تا رسیدن به حد بحرانی افزایش می یابد، پس از گذشتن از حد بحرانی؛ لغزش در مستعدترین سیستم بر روی یکدسته از صفحات موازی شروع می گردد.

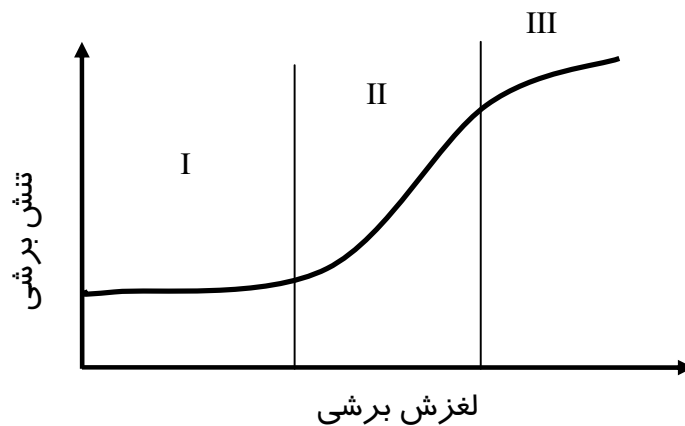
در قسمت اول (I) با افزایش مقدار کمی از تنش برشی افزایش زیادی در لغزش اتفاق می افتد. زیرا در این ناحیه سیستم فعال لغزش بدون برخورد با موانع می تواند به اندازه زیادی حرکت کنند.

در قسمت دوم (II) با افزایش تنش برشی سایر سیستم‌های لغزش نیز شروع به فعالیت می کنند به طوری که افزایش تنش با افزایش لغزش متناسب است. (به صورت خطی) حرکت نابجایی ها در جهات مختلف باعث برخورد با یکدیگر شده و از تحرک آنها کاهسته می شود. نابجایی های غیر متحرک موانعی در برابر ادامه حرکت نابجایی ها ایجاد کرده و باعث سفت شدن ماده می گردد به این پدیده سخت شدن کرنشی می گویند.

در قسمت (III) سختی تغییر شکل با افزایش تغییر شکل کاهش می یابد. پدیده ای که باعث کاهش سختی تغییر شکل (کاهش استحکام) می گردد بازیابی دینامیکی نامیده می شود. یعنی با افزایش تنش، نابجایی های غیرمتحرک و کم تحرک که در پشت موانع تجمع کرده اند می توانند با مکانیزم صعود و نابجایی پیچی با یک لغزش در یک سیستم جدید شروع به حرکت نمایند.

نکته:

- ۱- در فلزات دارای ساختار hcp لغزش در قسمت اول باقی می ماند. چون تداخل صفحات قاعده اتفاق نمی افتد و گره بوجود نمی آید.
- ۲- در فلزات با ساختار bcc مرحله (I), (II) سریعاً تمام شده و وارد مرحله (III) می شود؛ چون تعداد دستگاه های لغزش زیاد است و گره سریعاً رخ می دهد.



پدیده دوقلویی

علاوه بر لغزش در تعدادی از فلزات پدیده دیگری به نام دوقلویی (Twining) نیز عامل مهم تغییر شکل پلاستیک است. در مواردی که تغییر شکل پلاستیکی سرد در آنها به سختی انجام می شود از طریق این پدیده تغییر شکل با سرعت بالایی انجام می گیرد. در یک شبکه کریستالی دوقلویی هنگام انجماد و یا در تبلور مجدد ممکن است ایجاد گردد.

پدیده دوقلویی مکانیکی بدین صورت ایجاد می شود که اتمهای یک قسمت از کریستال به صورت دسته جمعی چنان حرکت می کنند قسمت تغییر شکل یافته با قسمت تغییر شکل نیافته کریستال یک شکل متفاوت و متقارن را بوجود می آورند. صفحه تقارن بین این قسمت مرز دوقلویی و یا صفحه دوقلویی نامیده می شود.

تغییر شکل پلاستیک در مواد پلی کریستال

منحنی تنش- کرنش

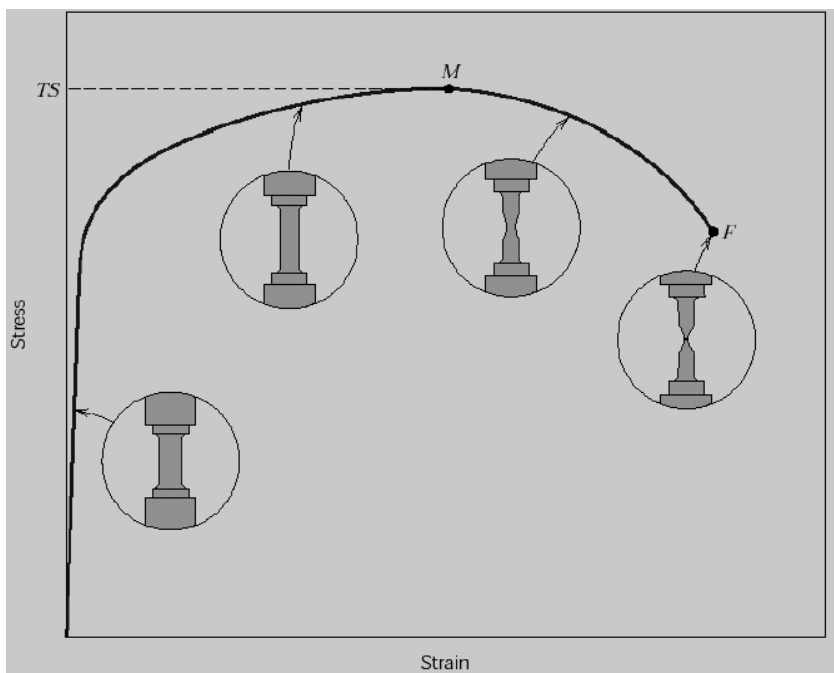
برای بسیاری از مواد، مانند فلزات در اثر اعمال نیرو یک تغییر فرم پلاستیک (برگشت ناپذیر) پس از عبور از تغییر فرم الاستیک (برگشت پذیر) اتفاق می افتد در این رفتار اغلب دو حد مقاومت قابل تشخیص است.

۱. $R_e(\sigma_p)$ که نشان دهنده مقاومت ماده در پایان محدوده الاستیک است.

۲. $R_m(U.T.S^7)$ که نشان دهنده بیشترین مقاومت کششی ماده قبل از شکست است.

برای برخی از مواد مانند سرامیک ها، که رفتار شکست کاملاً ترد دارند، دو حد فوق بر هم منطبق می شوند.

۱- رفتار مهندسی منحنی تنش کرنش



با توجه به شکل مقابل ملاحظه می شود که نمونه در اثر کشش ابتدا رفتار الاستیک (منطقه خطی نمودار) داشته و سپس دچار تغییر فرم پایدار (گلوئی شدن) شده و در نهایت شکسته می شود.

تا نقطه M تغییر شکل یکنواخت ایجاد شده و از این نقطه به بعد تغییر فرم موضعی اتفاق افتاده و گلوئی بوجود می آید.

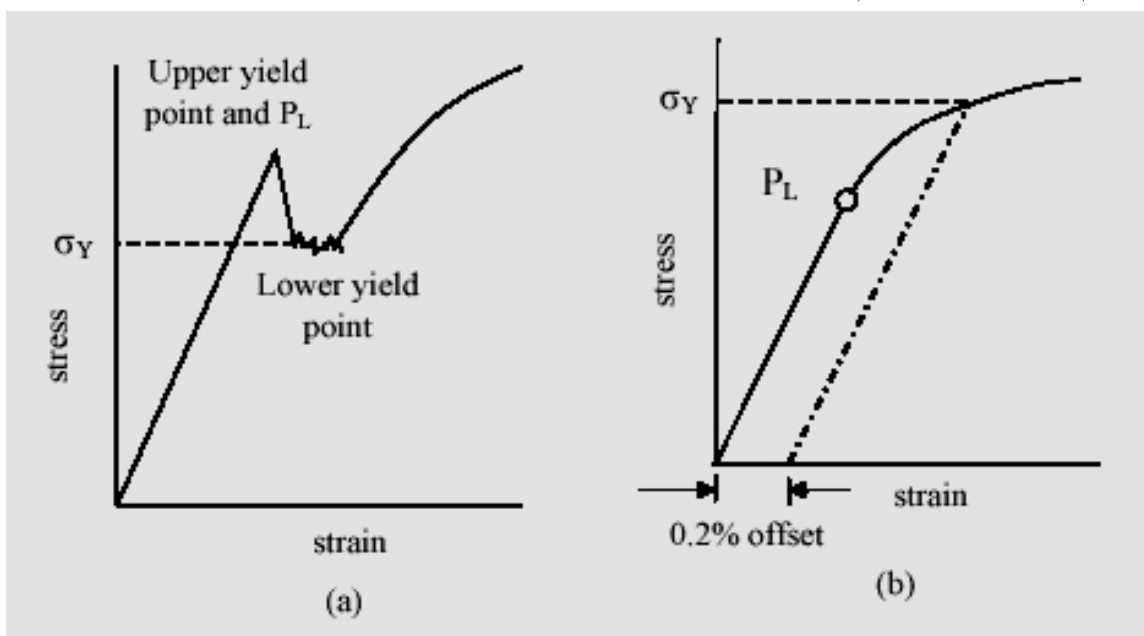
در عبور از منطقه الاستیک مواد

مختلف رفتارهای متفاوتی از خود بروز می دهند. در برخی از مواد تغییر ناگهانی شیب منحنی همراه با افت و خیز نیرو در منطقه انتقال است و در برخی دیگر با تغییر نامحسوس شیب، از منطقه الاستیک وارد منطقه پلاستیک می شود.

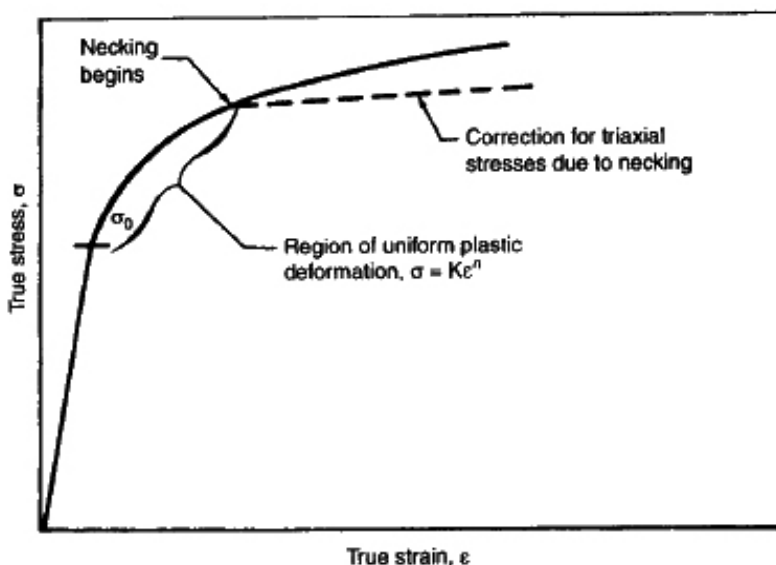
⁷ Ultimate Tensile Stress

با توجه به شکل زیر برای موادی که رفتاری شبیه منحنی (a) دارند می توان تنش تسلیم (حدالاستیک) بالایی و تنش تسلیم پایینی مشخص کرد.

برای موادی که دارای نقطه مشخصی در محدوده انتقال نیستند (منحنی b) براساس یک قرارداد از نقطه ۰/۲٪ کرنش خطی موازی منحنی در منطقه الاستیک رسم کرده و از محل تلاقی آن؛ خطی موازی محور کرنش رسم می کنیم تا مقدار تنش تسلیم قراردادی ($R_{0.2}$) بدست آید.



۲- رفتار واقعی (حقیقی) منحنی تنش کرنش



$$\sigma = \sigma_0 \frac{L_0 + \Delta L}{L_0}$$

$$\sigma = \sigma_0 (1 + \epsilon_0)$$

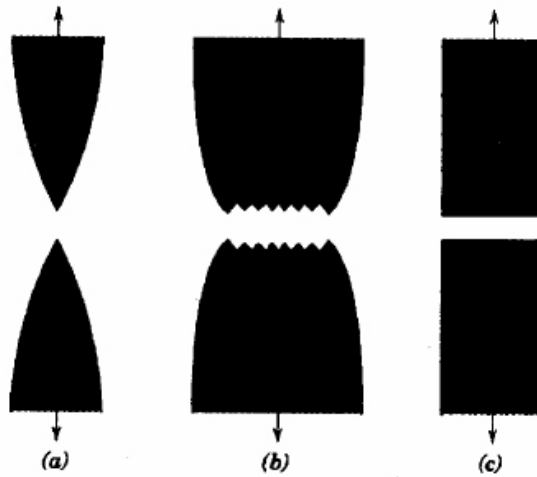
در نمودار تنش-کرنش حقیقی تنش تا لحظه شکست پیوسته افزایش می یابد و در این صورت

تنش در نقطه شکست، تنش حقیقی نامیده می‌شود.

انواع شکست

۱) ترد ۲) نرم ۳) مختلط

با توجه به نوع رفتار شکست مواد شکل منحنی تنش- کرنش نیز تفاوت می‌کند. مواد ترد فاقد منطقه پلاستیک بوده و برعکس مواد نرم محدوده وسیعی از منحنی را منطقه پلاستیک تشکیل می‌دهد. مواد مختلط نیز با آنکه دارای منطقه پلاستیک می‌باشند اما اغلب نقطه تنش تسلیم معینی ندارند و بایستی نقطه تنش تسلیم قراردادی را برای آنها محاسبه کرد.

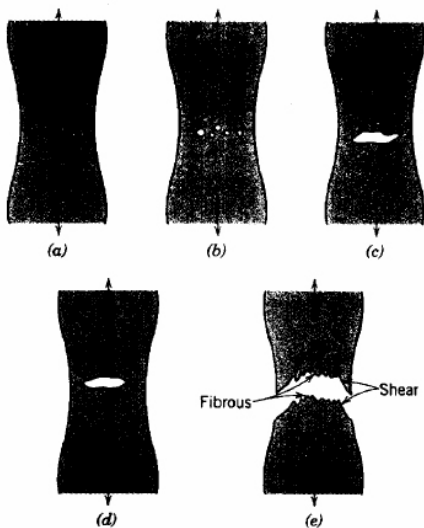


شکل بالا مقطع شکست مواد را در رفتارهای مختلف نشان می‌دهد:

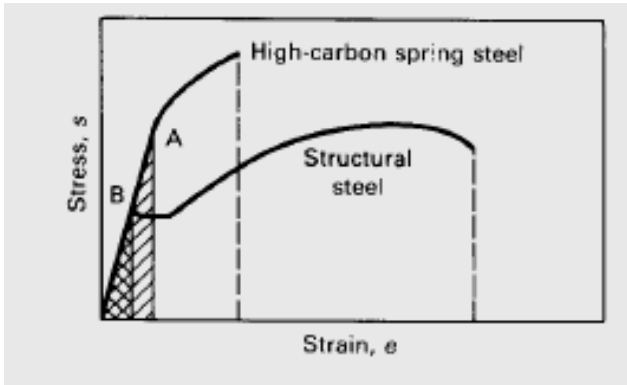
(a) رفتار شکست کاملاً نرم

(b) رفتار شکست مختلط (داکتیل)

(c) رفتار شکست کاملاً ترد



شکل مقابل مکانیزم شکست مختلط (داکتیل) را نشان می‌دهد.



رفتار فنری و سفتی یا تافنس^۸ (چقرمگی)

رفتار فنری:

قابلیت ذخیره سازی انرژی در محدوده الاستیک

$$U = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon = \frac{\sigma^2}{2E}$$

سطح زیر منحنی منطقه الاستیک

تافنس:

مقدار کار لازم برای تغییر شکل واحد حجم یک جسم (قابلیت ذخیره سازی انرژی در منطقه پلاستیک)

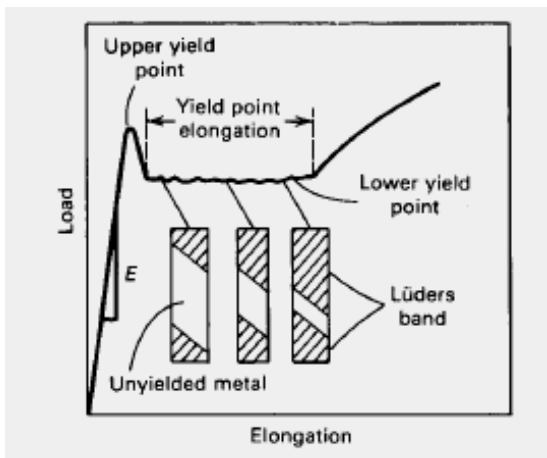
$$W = \int_{L^0}^L \frac{Fdl}{Al} = \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon$$

سطح کلی زیر نمودار تنش کرنش

رفتار منحنی تنش - کرنش فولاد کم کربن

- تنش تسلیم بالایی Upper Yield Stress

- تنش تسلیم پایینی Lower Yield Stress



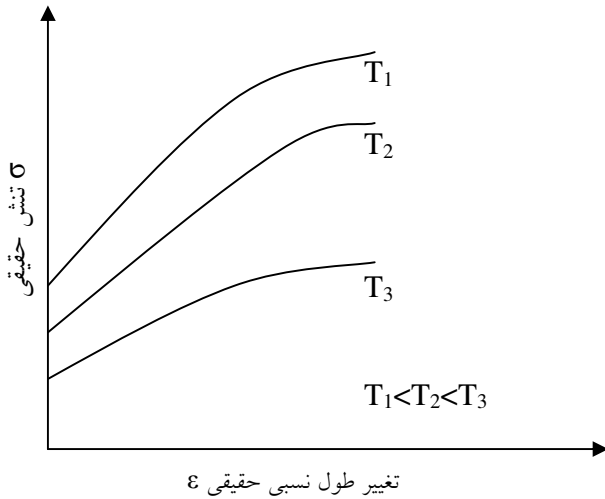
در این مواد در منطقه انتقال مقدری تغییر طول نسبی اتفاق می افتد که به آن تغییر طول نسبی لودرز می گویند این تغییر طول فقط در محدوده کوچکی اتفاق می افتد که در آن یک سری باندهای پیوندی معروف به باندهای لودرز شروع به حرکت می کنند. نوسان منحنی در این محدوده بدلیل

تشکیل باندهای لودرز جدید است و زمانی که حرکت باندهای لودرز در سرتاسر نمونه گسترش یافت رفتار منحنی عادی می شود.

* این رفتار بیشتر در فولادهای کم کربن، فلزات با شبکه bcc و آلیاژی که دارای مقدار کمی ناخالصی های محلول بصورت بین نشینی (مانند کربن- ازت- اکسیژن) می باشد دیده می شود در برخی فلزات دارای fcc و آلیاژهای جانشینی نیز مشاهده می شود. (مانند آلیاژهای آلومینیوم، منیزیم)

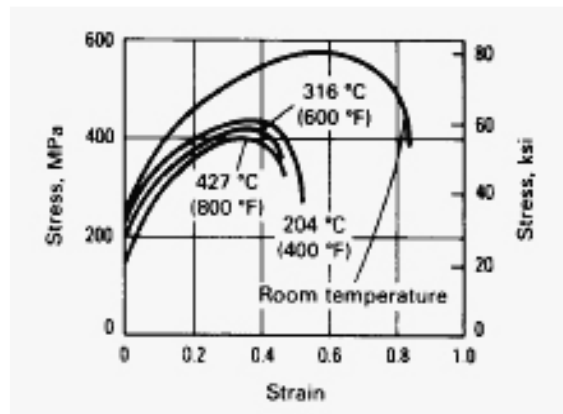
⁸ Toughness

تأثیر درجه حرارت و سرعت کشش بر روی نمودار تنش - کرنش



با افزایش دما حد تسلیم، استحکام کششی و سفتی کاهش می‌یابد و تغییر طول نسبی افزایش می‌یابد.

اثر افزایش سرعت تقریباً مانند اثر کاهش دماست یعنی با افزایش سرعت کشش حد تسلیم، استحکام کششی و سفتی افزایش و تغییر طول نسبی کاهش می‌یابد. شکل زیر اثر دما روی منحنی تنش-کرنش در یک نمونه فولادی را نشان می‌دهد.



کار سرد در تغییر شکل پلاستیک

با ازدیاد تغییر شکل پلاستیکی سرد و ایجاد نابجائیهای جدید چگالی نابجائیها افزایش می‌یابد. این افزایش سبب تجمع بیشتر نابجائیها در پشت موانع (ناخالصیها و مرزدانهها) و همچنین تلاقی بیشتر آنها در سیستمهای لغزش فعال می‌گردد. بطوریکه تحرک نابجائیها با افزایش تغییر شکل سخت تر می‌شود و در نتیجه استحکام، سختی و حد تسلیم افزایش می‌یابد و برعکس شکل پذیری کاهش می‌یابد.

* در تغییر شکل پلاستیکی معمولاً فقط قسمت بسیار کمی از کار یا انرژی صرف تغییر شکل می‌شود. (حدود ۵٪) و بقیه آن بصورت حرارت به هدر خواهد رفت.

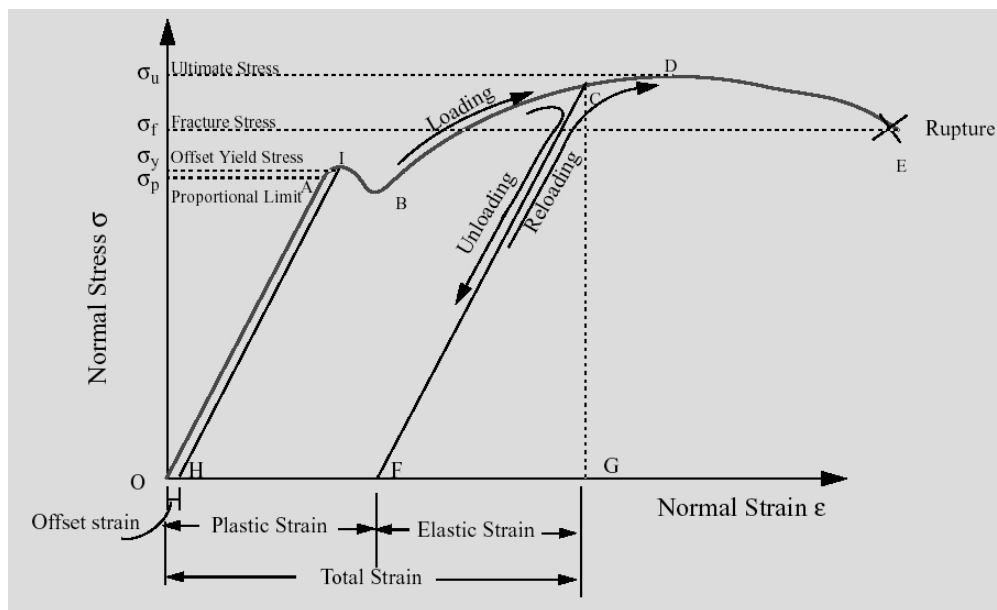
مقدار درصد تغییر شکل در دمای محیط (یعنی کاهش نسبی ضخامت یا کاهش نسبی سطح مقطع) به عنوان کار سرد^۹ بیان می‌گردد.

$$Cw\% = \frac{d_o^2 - d^2}{d_o^2} \times 100 \quad \text{یا} \quad Cw\% = \frac{A_o - A}{A_o} \times 100$$

مثال: برای تولید یک مفتول آهنی به قطر ۱۰ میلی متر با استحکام کششی ۲۵۰ MPa و ۴۰٪ کرنش از یک مفتول با قطر ۳۰ میلیمتر استفاده می‌شود حداقل قطر در مرحله شروع کار سرد را تعیین نمایید .

سخت شدن کرنشی

- بارگذاری و باربرداری های متوالی



بار گذاری نیرو در مسیر OABC تا نقطه C انجام شده سپس باربرداری انجام می‌شود مسیر CF در بارگذاری مجدد مسیر FCD ایجاد می‌شود که تفاوت اندکی دارد. با زیاد شدن نیرو رفتار کشسان تا نقطه D ادامه می‌یابد و از آن به بعد مجددا رفتار پلاستیک آغاز می‌شود. نقطه D تنش تسلیم جدید است که استحکام آن از نقطه A بیشتر است. اگر در نقطه E متوقف نشود نمونه تنش تسلیم بالاتری خواهد داشت. بعد از ناحیه کشسان منحنی تنش-کرنش حقیقی بیانگر (پوش) مکان هندسی تسلیم برای کرنش های مختلف است. فلزات هنگام تغییر شکل

^۹ Cold Work

پلاستیک سخت شدن کرنشی پیدا می‌کنند. بدین معنی که ماده بتدریج سخت‌تر می‌شود و این تغییر تدریجی است. این پدیده بطور پیوسته صورت می‌گیرد و با زیاد شدن نیرو ماده به تدریج تغییر شکل دائمی می‌یابد، در نتیجه برای تغییر شکل بیشتر مقدار زیادتری نیرو لازم است. میزان سخت شدن کرنشی برای مواد مختلف متفاوت است و به ساختار کریستالی آن ارتباط دارد.

قابلیت ضربه‌گیری

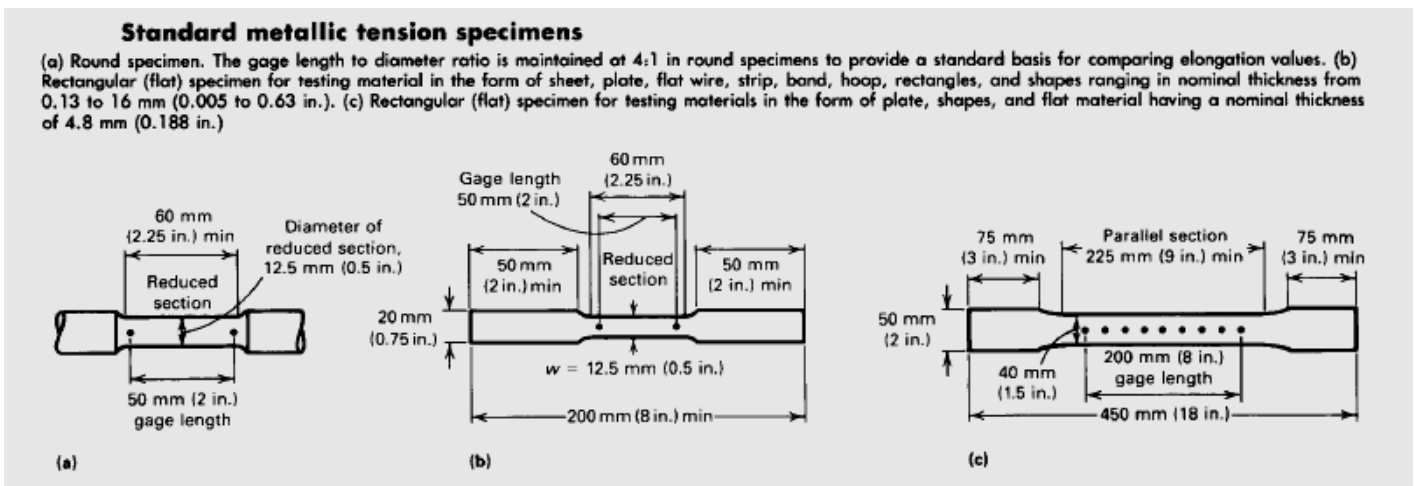
ناحیه بین دو منحنی (در شکل بالا) متناسب با مقدار انرژی مکانیکی تبدیل شده به گرمایی که توسط ماده جذب شده است، می‌باشد. هنگامی که این ناحیه بزرگ است ماده قابلیت ضربه‌گیری خوبی دارد و قادر به جذب و میراندن (از بین بردن) ضربه‌ها و نوسان‌های مکانیکی است. در موارد خاص مانند میل لنگ اتومبیل و یا دسته‌ی موتور این خاصیت دارای اهمیت فراوان است. مثلاً علت کاربرد چدن خاکستری در خیلی از مصارف صنعتی به سبب قابلیت میراندن ارتعاشات مکانیکی و ضربه‌گیری زیاد آن است. علت بوجود آمدن صدای زنگ‌دار هنگام اصابت ضربه به بعضی فلزات، چون فولاد و برنج، پایین بودن توانایی ضربه‌گیری آنهاست.

مشخصات نمونه و دستگاه آزمون کشش

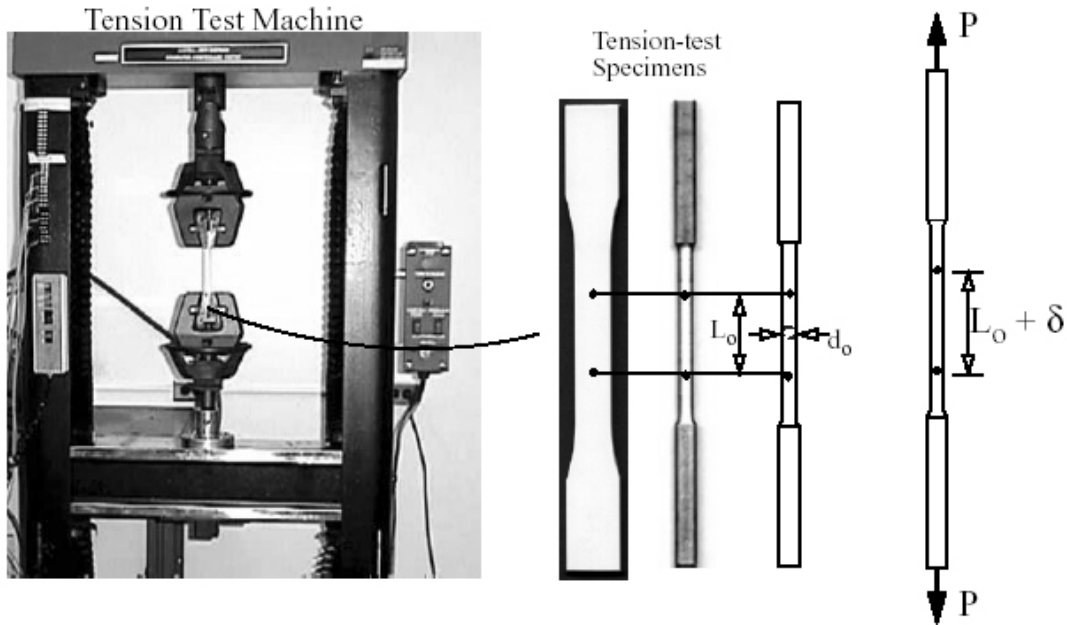
☞ شکل نمونه (از نظر استاندارد روش)

☞ نسبت قطر به طول اندازه‌گیری

☞ یکنواختی ابعاد در سرتاسر طول اندازه‌گیری (طول مشخصه^{۱۰})



¹⁰ Gage length

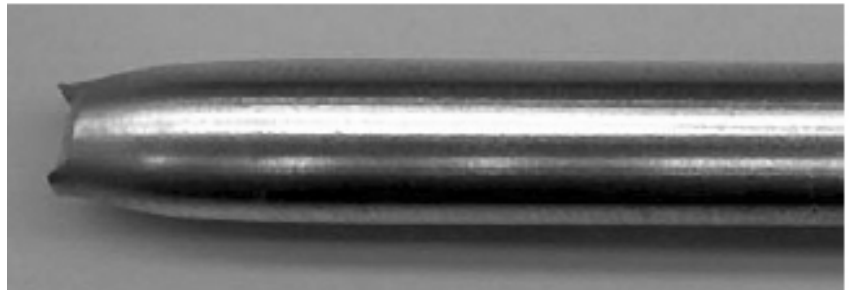
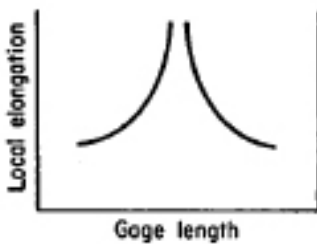


$$\epsilon = \frac{\delta}{L_o} \quad \sigma = \frac{P}{A_o} = \frac{P}{\pi d_o^2 / 4}$$

دستگاه آزمون کشش که معمولاً بصورت دستگاه‌های یونیورسال (چندمنظوره) وجود دارد علاوه بر آزمون کشش، آزمون‌های فشار و خمش را نیز اندازه‌گیری می‌کند.

اجزای اصلی این دستگاه (شکل زیر) عبارتند از:

- ✓ سیستم اعمال و حرکت انتقالی
- ✓ سیستم سنجش نیرو و اندازه‌گیری جابجایی
- ✓ فک‌های اتصال نمونه
- ✓ سیستم پردازش اطلاعات و رسم منحنی تنش-کرنش



رفتار مواد در برابر نیروهای فشاری

آزمون فشار

این آزمون بیشتر برای تعیین مقاومت مکانیکی مواد ترد استفاده می‌شود. استحکام چدن و مواد فلزی و آلیاژهای ترد از این روش بدست می‌آید. این روش برای سرامیک‌ها و بتن بسیار کاربرد دارد. \hookrightarrow مدول الاستیک در فشار و کشش برابر است.

\hookrightarrow در مواد نرم رفتار فشار و کشش تقریباً یکی است. در ابتدا فشرده شده و یا اصطلاحاً متورم می‌شوند و در نهایت با ایجاد ریزترکها و رشد آنها، شکست معمولاً بصورت زاویه 45° انجام می‌شود.

\hookrightarrow در مواد ترد رفتار ماده در برابر نیروهای کششی و فشاری تفاوت زیادی دارد.

\hookrightarrow در آزمون فشار صافی سطوح و توازی آنها اهمیت زیادی دارد.

کمیت‌های قابل اندازه‌گیری :

۱. تنش تسلیم؛ مانند روش کشش قابل محاسبه است.

۲. استحکام فشاری؛ تنشی که به ازاء اولین نشانه از ترک یا شکست ظاهر می‌گردد. $\sigma = \frac{F_{max}}{A}$

- برعکس آزمایش کشش نیرو بعد از آغاز تغییر شکل افزوده می‌شود.

استحکام فشاری حقیقی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0 h_0 / h} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{h}{h_0}$$

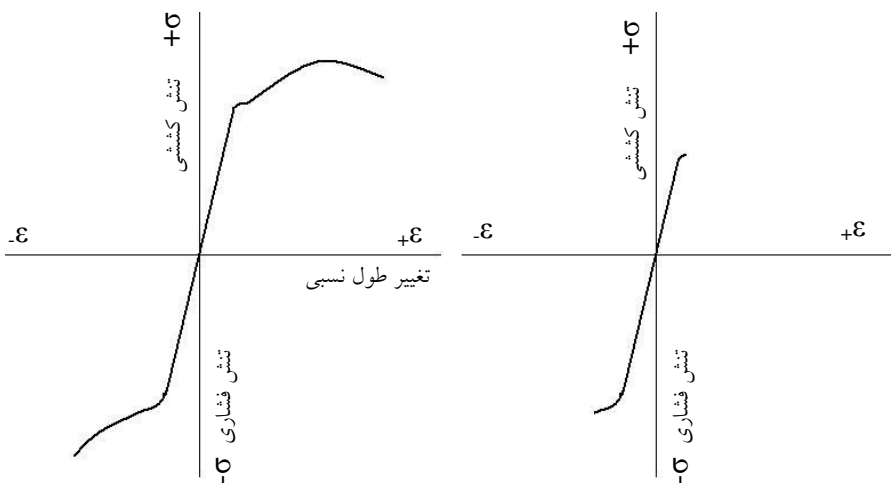
$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{\Delta h}{h_0} \right) = \sigma_0 (1 - e)$$

۳. فشردگی نسبی شکست (کاهش نسبی ارتفاع) $\epsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$

۴. افزایش نسبی سطح مقطع

شکست (درصد تورم)

$$e_A = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100$$



عوامل مؤثر بر نتایج آزمایش فشار

۱- تنش و اصطحکاک

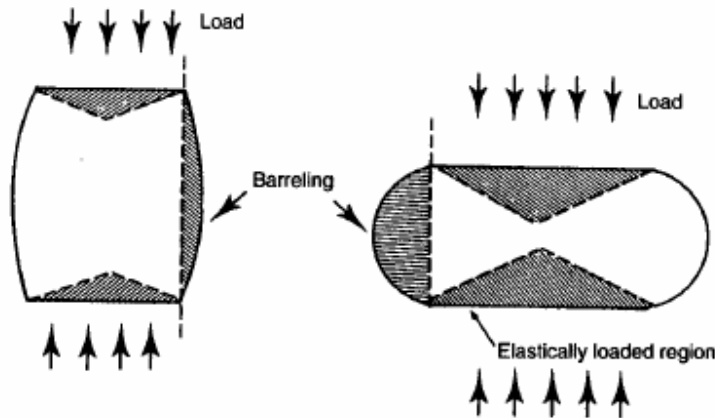
وجود اصطحکاک بین سطوح فک و نمونه

ایجاد نیروی تماس ← تنش های عرضی و مماسی ایجاد می شود.

سطوح در تماس با فکها تغییر نمی یابد ولی سطوح دیگر تغییر شکل پلاستیک می یابد.

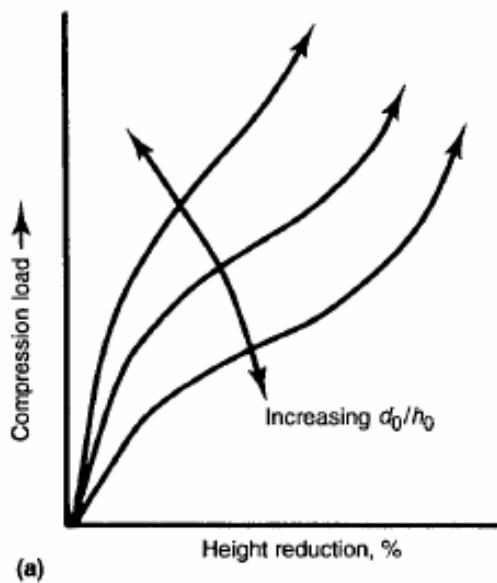
مخروط فشار، مخروط اصطحکاک یا منطقه سرده

نواحی نزدیک سطوح که در آنها تنش اعمال شده به حد تسلیم نرسیده است و با فاصله از سطوح تماس مقدار اثر آن کم می شود.



۲- نسبت ارتفاع به قطر نمونه $h = ad(1/a^3)$

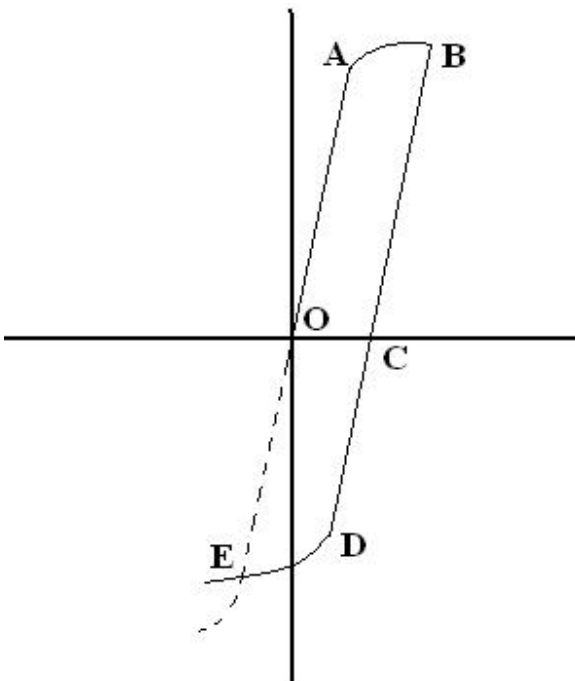
در یک قطر ثابت با افزایش d/h (یعنی کاهش ارتفاع) شکست در تنش های بالاتر اتفاق می افتد صیقل بودن سطوح نمونه روی استحکام اثر می گذارد زیرا اصطحکاک بین سطوح نمونه و فک های دستگاه آزمایش فشار باعث تغییر شکل غیر یکنواخت نمونه می شود.



۳- شکل نمونه

نمونه های استوانه ای استحکام فشاری بالاتری را نسبت به نمونه های مکعبی با همان قاعده نشان می دهند. ✓ علت: توزیع تنش در نمونه های استوانه ای مناسب تر است.

۳- اثر باوشینگر^{۱۱}



کشش تا نقطه B (قبل از UTS) A: تنش تسلیم در حالت کشش
 حذف نیروی کششی BC
 فشار (منحنی CDE)
 D: تنش تسلیم در حالت فشار
 نتیجه: تنش تسلیم در حالت فشار کمتر از حالت کششی است.

اختلاف بین حد تسلیم در حالت کششی و حد تسلیم در حالت فشاری را اثر باوشینگر می نامند. علت این امر وجود تنشهای پسماند در نمونه است که با حرارت دادن (آنیل یا بازپخت) می توان آن را از بین برد. این اثر برای تغییر شکل های کم است.

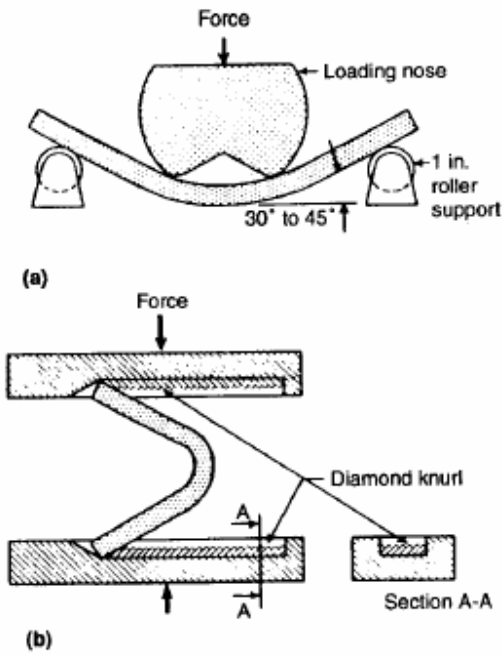
¹¹ Bauschinger effect

خمش

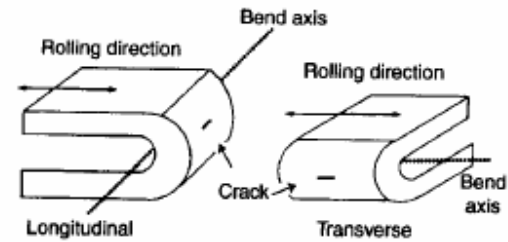
- تست خمش بر روی فلزات

↳ آزمون ماکروسکوپی

↳ خمش U و ترک در سطح بیرونی



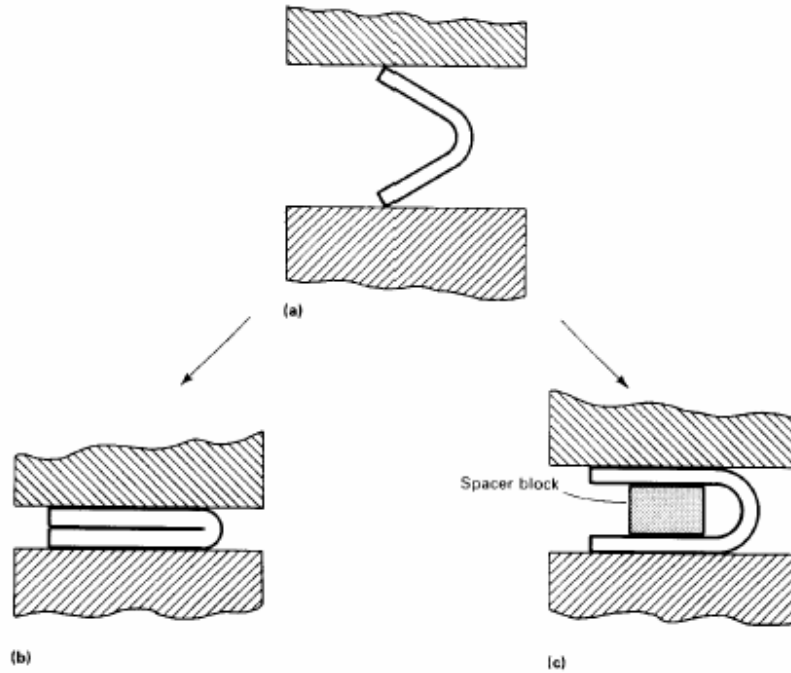
Free bend tests. (a) A partial bend is made with the specimen in a horizontal position. (b) The specimen is positioned vertically, and the two knurled jaws are forced together until the specimen fractures or makes a 180° U-bend.



Relative orientations of specimens for longitudinal and transverse bend tests. Arrows indicate direction of rolling. Source: Semi-Guided Bend Test for Ductility of Metallic Materials, ASTM E 290-80

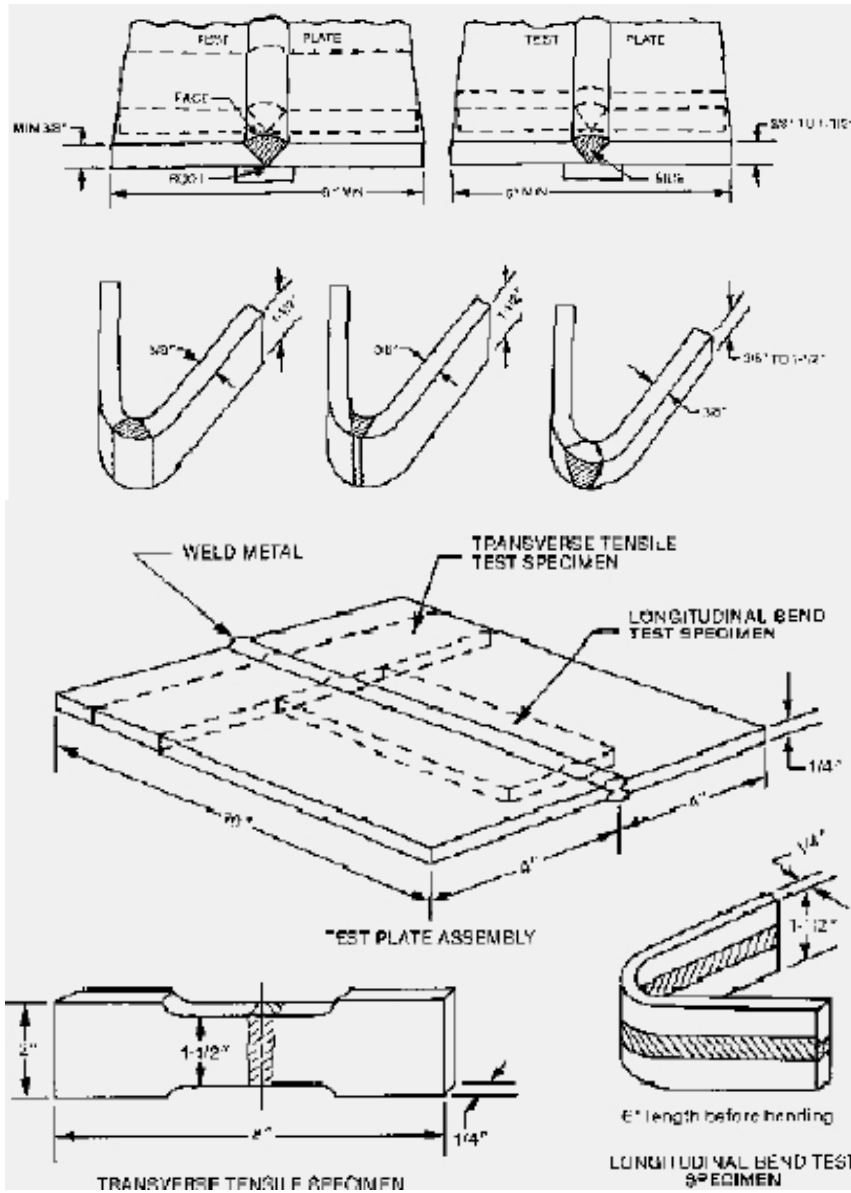
Methods used to develop 180° bend angles

(a) Bend sample from wipe or V-block placed between platens. (b) Sharp (180°) bend. (c) Bend with radius equal to one half the spacer-block thickness



کنترل کیفیت جوشها توسط آزمون خمش

- Face bend ↗
- Root bend ↗
- Side bend ↗



تعیین استحکام خمشی

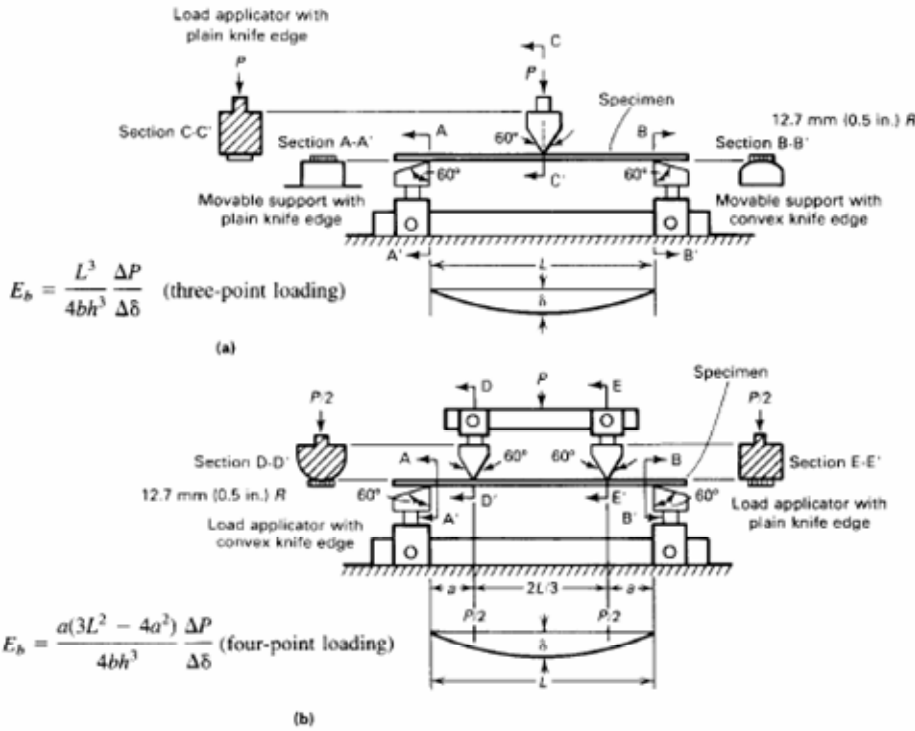
از این روش بیشتر برای تعیین استحکام خمشی مواد ترد و کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود و معمولاً به دو روش انجام می‌شود:

سه نقطه ای

$$\sigma = \frac{3}{2} \cdot \frac{Pl}{h^2 d}$$

چهار نقطه ای

$$\sigma = \frac{3PD}{h^2 d}$$

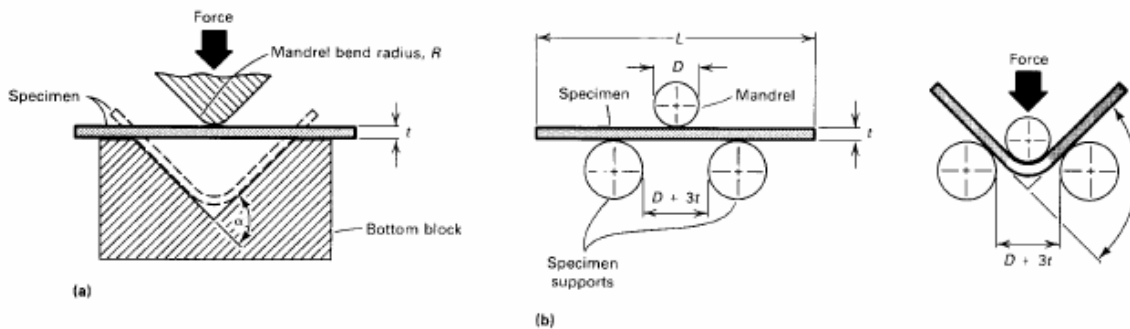


استانداردهای خمشی:

- ASTM
- DIN
- ISO
- AWS

V-block bending devices

(a) Closed V-block. (b) Open V-block



سختی سنجی^{۱۲}

تعریف: مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک در مقابل با جسم سخت تر از خود را سختی می‌نامند. سختی یک خاصیت فیزیکی و استاندارد شده نیست زیرا مقدار آن وابسته به روش اندازه گیری سختی است.

انواع روشهای سختی سنجی

سختی سنجی موهس^{۱۳} یا سختی خراش

در این روش سختی یک جسم توسط جسم سخت‌تر از خود بیان می‌شود بدین ترتیب که سختی مواد توسط ده ماده معدنی که از نرمترین (تالک) شروع و تا سخت‌ترین (الماس) ادامه می‌یابد؛ شماره گذاری شده‌اند.

تالک (سنگ صابون)	فلدسپات
ژیپس (سنگ گچ)	کوارتز (سنگ چخماق)
کلسیت (سنگ آهک)	یاقوت کبود (توپاز)
فلوریت	یاقوت سرخ (کوراندوم)
آپاتیت	الماس

بعدها درجه بندی عوض شد و در این درجه بندی جدید تالک، ۱ شیشه کوارتزی، ۷ کوارتز، ۸ توپاز، ۹ گارنات، ۱۰ زیرکن، ۱۱ کوراندوم، ۱۲ کاربید سیلیسیم (SiC)، ۱۳ کاربید بر (B₄C) و الماس ۱۵ تعیین گردید. مثال: سختی شیشه معمولی ۵/۵ و فولاد ۶/۵ است.

نکته: اندازه گیری سختی در این روش دقیق نیست و صرفاً جهت مقایسه مناسب است.

✓ ابزار مورد استفاده: قلم موهس

سختی سنجی برنیل^{۱۴}

یکی از قدیمترین روشهای دستگامی و استاندارد شده می‌باشد.

فلورونده^{۱۵}: ساچمه فولادی (قطر D)

روش کار: اعمال نیروی F بر سطح صیقلی شده‌ی قطعه مورد آزمایش بصورت عمودی

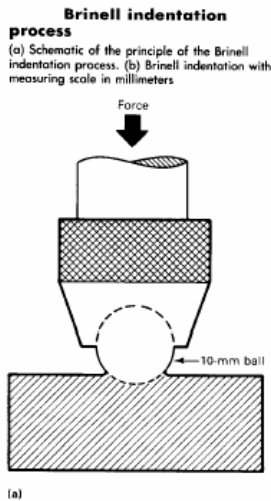
اندازه گیری: تعیین قطر حفره ایجاد شده و محاسبه عدد سختی از رابطه زیر:

¹²Hardness

¹³ Mohs

¹⁴ Brinell Hardness Number

¹⁵ Indentor



$$BHN = \frac{\text{نیرو}}{\text{سطح فرورفتگی}} = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi Dt}$$

D: قطر اثر t: عمق اثر F: نیروی اعمالی

$$t = \frac{1}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)$$

$$\Rightarrow BHN = \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

✓ در عمل عدد سختی پس از تعیین قطر اثر از روی جداول تنظیم شده به دست می‌آید.

نکته ۱: عدد سختی برنیل با تغییر قطر ساچمه و مقدار نیرو تغییر می‌کند.

با توجه به رابطه فوق $F = XD^2$ که $\frac{F}{D^2} = X$ را درجه نیرو می‌نامند.

درجه نیرو را با توجه به جنس نمونه مورد آزمایش و ضخامت آن طوری تعیین می‌نمایند که پس از انجام تست و قرائت قطر اثر ساچمه (d) بین ۰/۲ تا ۰/۷ قطر ساچمه (D) باشد. برای مقایسه بهتر سختی مواد مختلف؛ بایستی

در هر گروه از مواد $\frac{F}{D^2}$ ثابتی انتخاب کرد این مقدار برای چدن و فولادها ۳۰، برای مس و آلیاژهای آن ۱۰ و برای آلومینیوم و آلیاژ آن ۵ و برای سرب و آلیاژهای آن ۲/۵ است. مطابق جدول زیر:

قطر ساچمه D ^{mm}	30 D ²	10 D ²	5 D ²	2.5 D ²
10	3000	1000	500	250
5	750	250	125	62.5
2.5	187.5	62.5	31.25	15.625
علامت اختصاری	BHN ₃₀	BHN ₁₀	BHN ₅	BHN _{2.5}

نکته ۲. فواصل اندازه گیری‌ها بایستی حداقل از ۲d بیشتر باشد. تا روی هم اثر نگذارند در اطراف هر نفوذ در اثر تغییر شکل پلاستیکی مقداری کار سرد ایجاد می‌شود.

نکته ۳. مدت زمان اعمال نیرو باید به اندازه کافی باشد.

⌚ برای فلزات سخت حدود ۱۰ ثانیه

⌚ برای فلزات نرم حدود ۳۰ ثانیه

مزایای روش برنیل :

☞ سهولت اندازه گیری (روش آسان در اندازه گیری)

☞ بزرگ بودن اثر فرورفتگی

☞ استحکام کشش فولادهای ساختمانی را بطور تقریبی می توان بدست آورد .
 $\sigma = 3.5BHN^{N/mm^2}$

معایب روش برنیل

☞ برای مواد بسیار نرم و بسیار سخت مناسب نیست (سختی ساچمه فولادی)

☞ محدودیت ضخامت نمونه (کمتر از $2/5^{mm}$ نباشد، کمتر از ۱۰ برابر عمق فرورفتگی نباشد)

☞ لبه فرورفتگی دقیقاً قابل تشخیص نیست.

سختی سنجی راکول^{۱۶}

پرکاربردترین روش اندازه گیری سختی است و براس سختی سنجی اکثر مواد قابل استفاده است. براساس شکل و نوع فرورونده و نیز نیروی اعمالی به انواع مختلف تقسیم می شود:

راکول نوع: A,B,C,D,F,G,E و ...

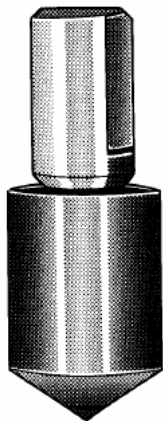
فرورونده:

☞ مخروط الماس با زاویه ۱۲۰ (راکول C,D,A)

☞ ساچمه فولادی سخت (راکول B,F,G,E)

روش کار: ابتدا نیروی اولیه ۱۰ کیلوگرمی بطور عمود بر سطح نمونه وارد می شود که تغییر فرم شکل جزئی ایجاد می شود سپس عقربه دستگاه را روی صفر تنظیم کرده و بار ۱۴۰ کیلوگرمی (در راکول C) و بار ۹۰ کیلوگرمی (راکول B) که به آن بار اصلی می گوئیم اعمال می شود. پس از حذف نیرو عدد سختی بوسیله عقربه صفحه مدرج روی دستگاه خوانده می شود. (در دستگاه های دیجیتالی بطور مستقیم عدد سختی نمایش داده می شود).

120° sphero-conical diamond indenter



نکته ۱: در گزارش آزمون همیشه بایستی عدد سختی همراه مقدار نیرو و شکل فرو رونده ذکر شود.

نکته ۲: در نمونه های نازکتر از $1/5$ میلیمتر (صفحات نازک و لایه های سختی) می توان از راکول سطحی استفاده کرد در این روش نیروی اولیه ۳Kg و بار اصلی ۱۵ تا ۴۵ کیلوگرم است.

¹⁶ Rockwell Hardness

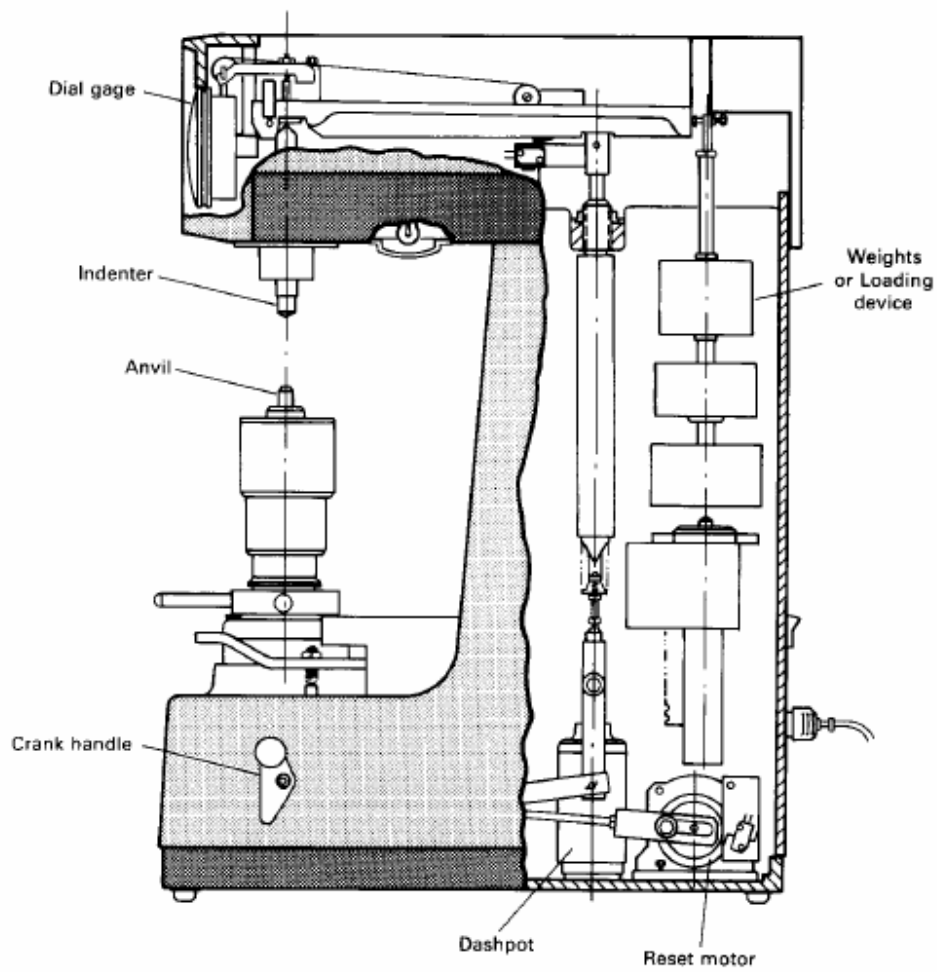
مزایای روش راکول:

↳ بالا بودن سرعت تست

↳ رنج وسیعی از مواد در بر می گیرد

↳ برای اندازه گیری سختی های بالا مناسب است (راکول C،A)

Schematic of Rockwell testing machine



سختی سنجی ویکرز

فرورونده: هرم مربع القاعده الماسی با زاویه سطوح ۱۳۶°

روش کار: نیرو بر سطح صیقل داده شده نمونه وارد شده و اندازه اش توسط میکروسکوپ تعبیه شده روی دستگاه اندازه گیری می شود.

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$

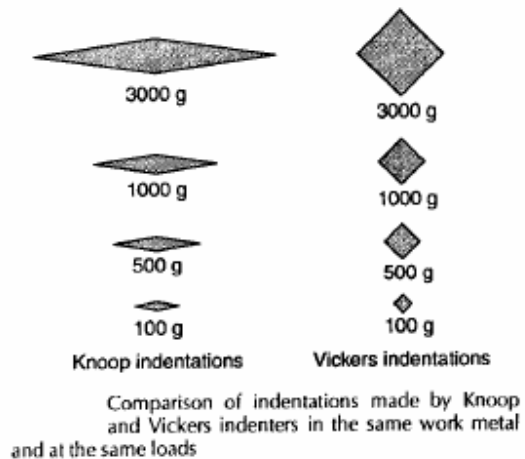
شکل اثر: لوزی نیرو: از ۵ گرم تا ۳۰ کیلوگرم

$$N/mm^2 VHN = \frac{F}{A} = \frac{2FSIN22}{d^2} = \frac{1.8544F}{d^2}$$

✓ در عمل مقادیر سختی از روی جداول سختی بدست می آید.

مزایای روش ویکرز

- ✦ مواد بسیار سخت
- ✦ اندازه گیری سختی لایه های بسیار نازک (لایه گالوانیزه - سطح سخت شده و...)
- ✦ معایب روش ویکرز
- ✦ گرانی دستگاه
- ✦ حساسیت فرورونده
- ✦ دقت در تهیه نمونه و اندازه گیری قطر



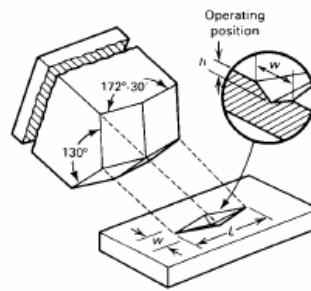
سختی سنجی نوپ^{۱۷}

لکه فرورونده: مخروط الماسی

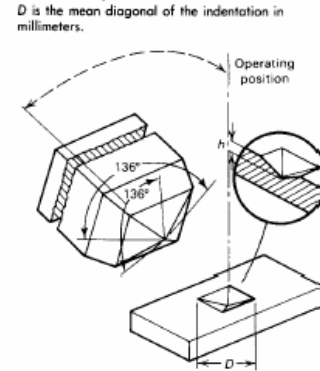
Knoop indentations in two microconstituents of quenched and tempered D2 tool steel



Pyramidal Knoop indenter and resulting indentation in the workpiece



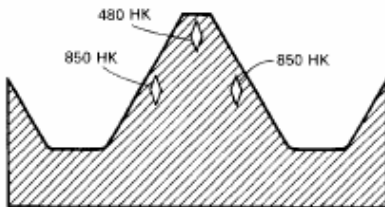
Diamond pyramid indenter used for the Vickers test and resulting indentation in the workpiece



$$HK = \frac{14.229F}{d^2}$$

لکه نیرو: ۱۵ گرم تا ۳۰ کیلوگرم

Cross section of tap tooth showing hardness variations caused by overheating during grinding



سختی سنجی شر یا اسکروسکوپ^{۱۸}

لکه سختی سنجی ارتجاعی

- میزان برگشت وزنه تا ارتفاع معین روی صفحه مدرج (به ۱۰۰ قسمت)

مزیت آن

لکه قابل حمل و نقل بودن آن است که می توان بصورت غیرمخرب قسمتهای مختلف یک سازه را سختی سنجی

نمود.

لکه تعیین سختی غلطکها و چرخدنده های بزرگ

¹⁷ Knoop hardness

¹⁸ Shore, Scleroscope

۷- سختی سنجی مافوق صوت^{۱۹}

لکه تغییر در فرکانس میله مغناطیسی که فرورونده الماسی در نوک آن نصب شده است. این تغییر بر حسب راکول یا ویکرز بیان می‌شود.

عیوب:

- ✓ میزان فرورفتگی کم است لذا برای تعیین سختی سطح استفاده می‌شود.
- ✓ خاصیت الاستیکی میله بر نوسان میله و در نتیجه عدد سختی اثر می‌گذارد.

مزیت: سرعت عمل و قابل حمل بودن

Comparison of indentation hardness tests

The minimum material thickness for a test is usually taken to be 10 times the indentation depth.

Test	Indenter(s)	Indent		Load(s)	Method of measurement	Surface preparation	Tests per hour	Applications	Remarks
		Diagonal or diameter	Depth						
Brinell	Ball indenter, 10 mm or 2.5 mm in diameter	1-7 mm	Up to 0.3 mm and 1 mm, respectively, with 2.5-mm and 10-mm-diam balls	3000 kgf for ferrous materials down to 100 kgf for soft metals	Measure diameter of indentation under microscope; read hardness from tables	Specially ground area for measurements of diameter	50 with diameter measurements	Large forged and cast parts	Damage to specimen minimized by use of lightly loaded ball indenter. Indent then less than Rockwell
Rockwell	120° diamond cone, 1/16- to 1/8-in.-diam ball	0.1-1.5 mm	25-375 μm	Major 60-150 kgf Minor 10 kgf	Read hardness directly from meter or digital display	No preparation necessary on many surfaces	300 manually 900 automatically	Forgings, castings, roughly machined parts	Measure depth of penetration, not diameter
Rockwell superficial	As for Rockwell	0.1-0.7 mm	10-110 μm	Major 15-45 kgf Minor 3 kgf	As for Rockwell	Machined surface, ground	As for Rockwell	Critical surfaces of finished parts	A surface test of case hardening and annealing
Vickers	136° diamond pyramid	Measure diagonal, not diameter	0.03-0.1 mm	1-120 kgf	Measure indent with low-power microscope; read hardness from tables	Smooth clean surface, symmetrical if not flat	Up to 180	Fine finished surfaces, thin specimens	Small indent but high local stresses
Microhardness	136° diamond indenter or a Knoop indenter	40 μm	1-4 μm minimum	1 gf-1 kgf	Measure indentation with low-power microscope; read hardness from tables	Polished surface	Up to 60	Surface layers, thin stock down to 200 μm	Laboratory test used on brittle materials or microstructural constituents
Ultrasonic	136° diamond pyramid	15-50 μm	4-18 μm	800 gf	Direct readout onto meter or digital display	Surface better than 1.2 μm for accurate work. Otherwise, up to 3 μm	1200 (limited by speed at which operator can read display)	Thin stock and finished surfaces in any position	Calibration for Young's modulus necessary. 100% testing of finished parts. Completely nondestructive

¹⁹Ultrasonic

نیروهای استاتیکی و دینامیکی

✓ استاتیکی

هرگاه نیروهای اعمال شده بر یک ماده کاملاً و یا تقریباً ثابت و ساکن باشند حالت حاصله را حالت استاتیکی می‌نامند. در بیشتر موارد نیروی وارد بر مواد عملاً استاتیکی است و بدین جهت رفتار مواد در حالت استاتیک اهمیت فراوانی دارد. در نتیجه آزمایش‌های استاندارد به منظور سنجش خواص استاتیکی مواد تعیین شده‌اند. با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها می‌توان موادی که شرایط کاری آنها به اندازه کافی مشابه با شرایط آزمایشگاهی است را انتخاب کرد. هنگامی که شرایط کار و آزمایش مثل هم نباشند می‌توان از نتیجه‌ی آزمایش برای ارزیابی مقایسه‌ای مواد مختلف کمک گرفت.

آزمایشات استاندارد شده استاتیکی عبارتند از: آزمایش کشش، فشار، خمش و سختی سنجی

✓ دینامیکی

در اکثر مصارف مهندسی، مواد تحت اثر نیروهای دینامیکی قرار می‌گیرند. در این حالت نیرو به انواع مختلف ذیل اعمال می‌شود:

۱- نیروها به سرعت اعمال و یا برداشته می‌شوند و تغییر مقدار آنها به سرعت صورت می‌گیرد.

۲- بارگذاری و باربرداری به دفعات انجام می‌شود.

۳- نوع بار تناوباً از کشش به فشاری تغییر می‌کند.

برای این قبیل مصارف، مهندس طراح باید علاوه بر خواصی که در آزمایش‌های استاتیکی بدست می‌آید از مشخصات دیگر ماده نیز اطلاع داشته باشد. بسیاری از آزمایش‌های دینامیکی قطعاتی استاندارد را مورد آزمایش قرار می‌دهند که دارای مجموعه‌ای از شرایط قابل کنترل باشد. از آنجا که کاربرد واقعی این محصول احتمالاً شامل مجموعه شرایط مختلفی خواهد بود، اطلاعات آزمایش ممکن است چندان برای طرح مفید نباشد. به هر صورت از آزمایش‌های دینامیکی اطلاعات ارزشمندی برای مقایسه‌ی پاسخ مواد به شرایط بارگذاری دینامیکی بدست می‌دهند. فرد باید همیشه از محدودیت‌های اطلاعات آزمایش آگاه باشد.

آزمایش‌های دینامیکی عبارتند از:

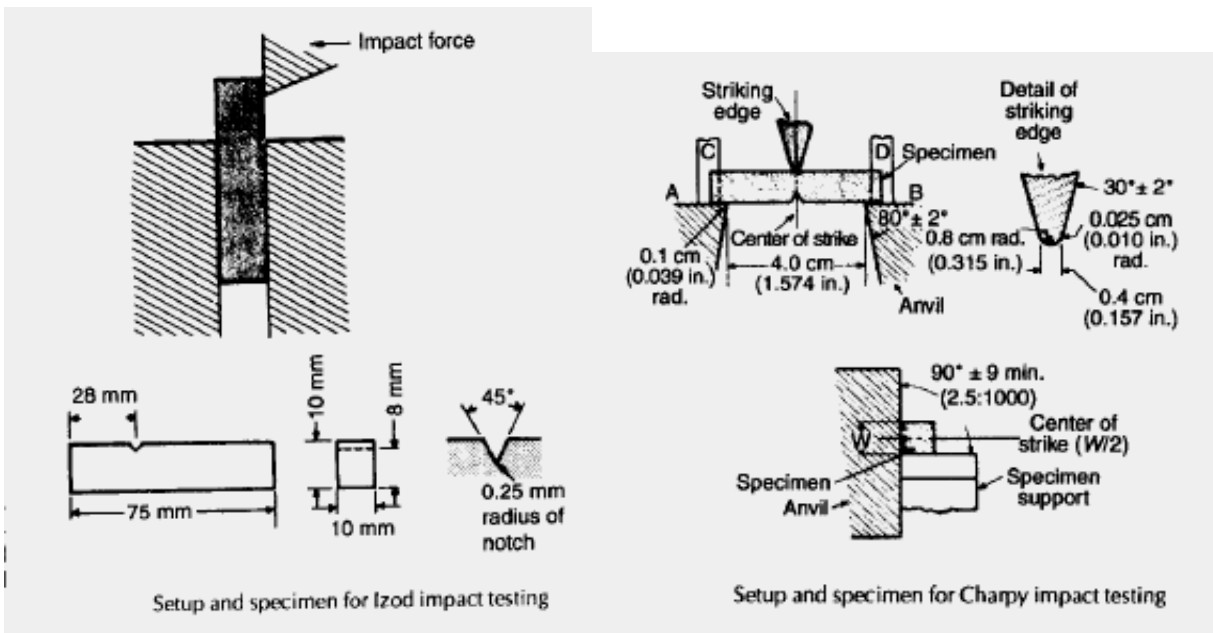
- آزمایش ضربه، خستگی و خزش

آزمایش ضربه

برای تشخیص حد مقاومت ماده در برابر ضربه های ناگهانی ناشی از بارهای دینامیکی، آزمایشهایی معمول است که از بین این آزمایشها، دو نوع اصلی متداول ترند:

- ۱- آزمایش خمش ضربه‌ای شامل آزمایشهای استاندارد، ایزود (Izod) چارپی (Charpy) (شارپی)
- ۲- آزمایش کشش ضربه‌ای

در آزمایش خمش ضربه‌ای از نمونه هایی به شکل تیر (مکعب مستطیل) استفاده می‌شود. تفاوت دو روش چارپی و ایزود در شکل نمونه و طرز قرارگیری آنها در دستگاه تست ضربه است. در آزمایش چارپی از نمونه هایی با شکاف های U، V و سوراخ کلید (U) استفاده می‌شود و نمونه مورد آزمایش به شکل یک تیر ساده روی دو تکیه گاه قرار داده می‌شود و جهت ایجاد خمش سه نقطه ای؛ ضربه به مرکز تیر درست مقابل شیار اعمال می‌گردد. در روش ایزود نمونه بصورت عمودی روی دستگاه ثابت شده و ضربه در سمت شیار و اندکی بالاتر از آن به نمونه وارد می‌شود.



در ماشین های آزمایش استاندارد، انرژی ضربه‌ی مشخص بوسیله آونگ به نمونه‌ی آزمایش وارد می‌شود و بعد از برخورد آونگ به نمونه و شکستن و یا تغییر شکل دادن آن با انرژی معادل انرژی اولیه منهای انرژی جذب شده در عمل شکستن به مسیر خود ادامه می‌دهد. این تغییر انرژی به کمک زاویه‌ی نهایی آونگ تعیین می‌شود.

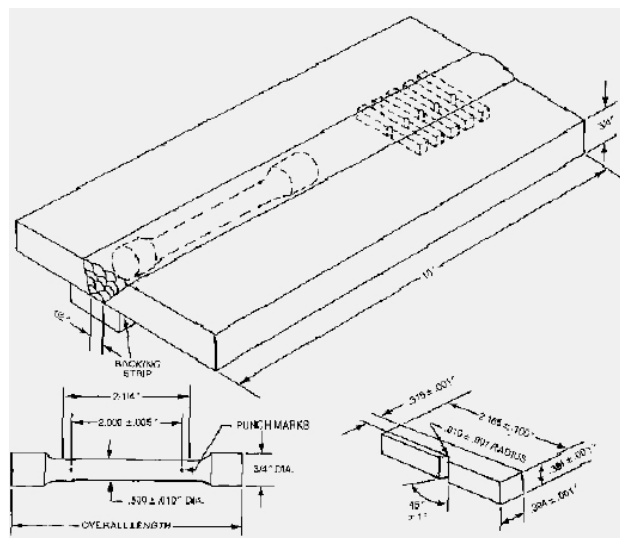
ابعاد نمونه ها و همچنین نوع شکل شیار (V یا U) و ابعاد آن استاندارد شده می باشد. از آنجائیکه انرژی لازم برای شکست به چگونگی حالت تنش در نمونه بستگی دارد بنابراین عواملی مانند شکل و اندازه نمونه نوع و عمق شیار به شعاع ته شیار و ضخامت مقطع شیار روی نتایج آزمون تأثیر می گذارد.



هنگام استفاده از داده های آزمایش ضربه برای مقاصد طراحی باید احتیاط کرد زیرا نتایج آزمایش فقط برای نمونه های استاندارد که شیارهای استاندارد دارند قابل استفاده اند. همچنین این آزمایش رفتار ماده را در شرایط خاصی از نظر سرعت ضربه تعیین می کند. تغییر شکل در شیار یا انحراف جزئی از شکل هندسی نمونه استاندارد یا سرعت های ضربه کند تر یا سریعتر (سرعت آونگ) باعث پراکندگی زیادی در نتایج آزمایش می شود. با تغییر شرایط آزمایش مانند افزایش سرعت اعمال ضربه، پهن تر کردن نمونه یا تیز تر شدن شیار، قابلیت جذب انرژی مواد کمتر می شود و رفتاری مشابه مواد ترد از خود نشان می دهند. نتایج آزمایش ضربه خمشی در سنجش مقاومت شکاف و یا شرایط تنش های چند محوری که در اطراف شکافها بوجود می آید ارزش زیادی دارد. به علاوه،

آزمایش می تواند در دماهای مختلف انجام گیرد و به طوری که بعداً خواهیم دید، چگونگی تغییر استحکام شکست مواد با تغییر دما می تواند در انتخاب مواد مهندسی ارزشمند باشد.

در آزمایش کشش ضربه ای استفاده از نمونه های شیار دار حذف شده و لذا دارای ایرادهای ذاتی آزمایشهای ایزود و چارپی نیست. در این آزمایش نمونه ها تحت ضربه تک محوری در اثر سقوط وزنه، آونگ های به شکل مناسب و چرخ لنگر با سرعت متغیر قرار می گیرند. (شکل مقابل)

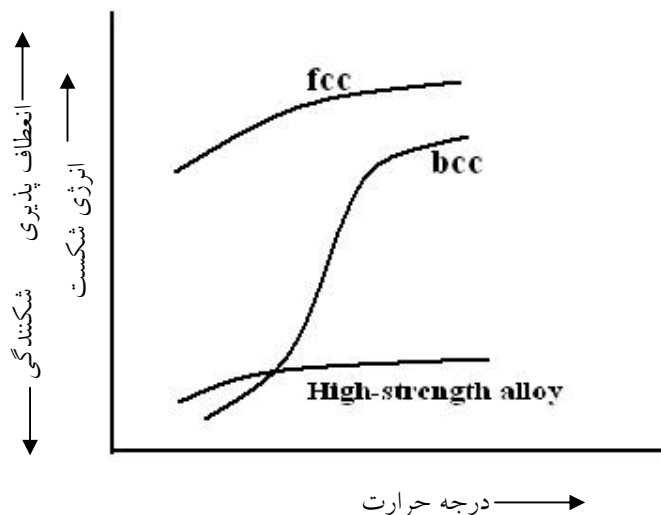


درجه حرارت تبدیل شکست در آزمایش ضربه

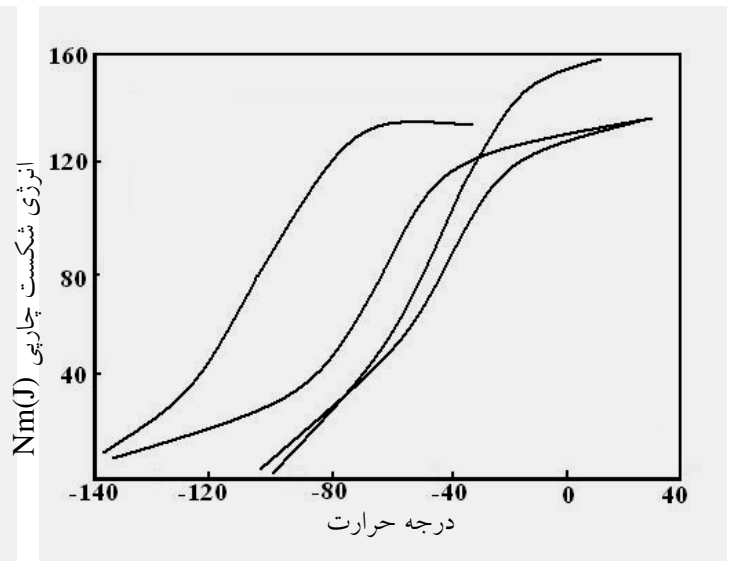
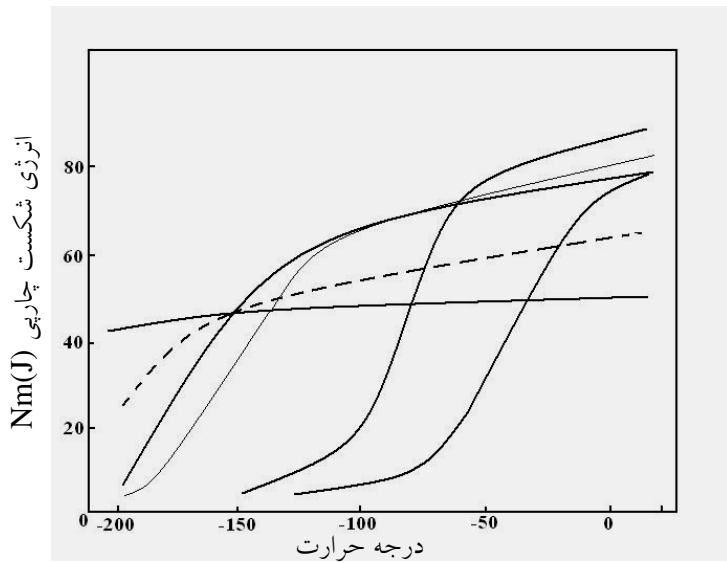
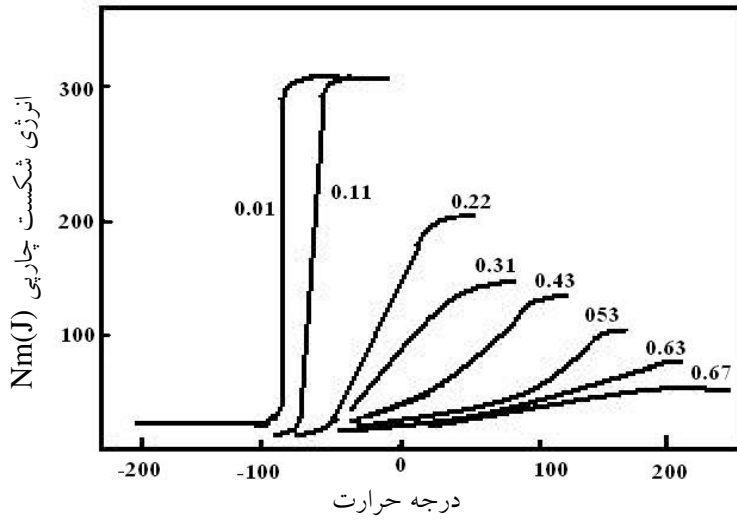
یک ماده با وجود رفتار پلاستیکی خوب و دارا بودن استحکام و سختی بالا می‌تواند تحت تأثیر عواملی از قبیل درجه حرارت های پایین (زیر صفر)، سرعت‌های بالای اعمال نیرو و ایجاد تنش سه محوری، ترد و شکننده گردد. علت رفتار ترد می‌تواند بخاطر تجمع رسوبات یا فازهای سخت در مرزخانه‌ها، نفوذ گاز، ایجاد عیوب نقطه‌ای یا خوردگی باشد. وجود این عوامل باعث ایجاد تنش موضعی می‌گردد که در آن از مقدار تنش شکست (UTS) بیشتر می‌شود و لذا در نمونه ترک ایجاد می‌گردد که در صورت تداوم تنش ترک رشد کرده و شکست اتفاق می‌افتد به کمک آزمایش ضربه می‌توان انرژی شکست نمونه را تعیین نمود. اگر مقدار انرژی شکست کم باشد ماده ترد بوده و حساسیت زیادی در برابر نیروهای ضربه‌ای دارد. و اگر مقدار آن زیاد باشد ماده نرم بوده و می‌تواند بار بیشتری را تحمل کند. و یا به عبارتی دیگر ماده سفت (چقرمه Toughness) است.

با کمک آزمایش ضربه می‌توان محدوده درجه حرارتی را که بعضی از مواد در آن محدوده تغییر رفتار دارد و از شکست نرم به شکست ترد تبدیل می‌گردد را تعیین نمود. به همین دلیل در صنایع هواپیما سازی، کشتی سازی، قطار سازی، پل سازی، مخزن سازی و غیره رفتار فلزات را در درجه حرارت‌های پایتتر مد نظر قرار می‌دهند. تعریف: درجه حرارتی را که در بعضی از فلزات و شبکه کریستالی bcc و hcp از حالت شکست نرم به شکست ترد تغییر می‌یابد، درجه حرارت تبدیل (درجه حرارت انتقال) می‌نامند.

نکته ۱: تمام مواد در درجه حرارت های پایین شکل ترد از خود نشان نمی‌دهند. فولادهای آستنیتی (با مقدار بالایی از Ni و Cr)، آلومینیوم و مس و آلیاژهای آنها با شبکه کریستال fcc در درجه حرارت های پایین هم نرم می‌باشند.



نکته ۲: با انتخاب آلیاژ مناسب و یا عملیات حرارت دقیق و مناسب می‌توان درجه حرارت تبدیل را به سمت درجه حرارت‌های پایین منتقل نمود.

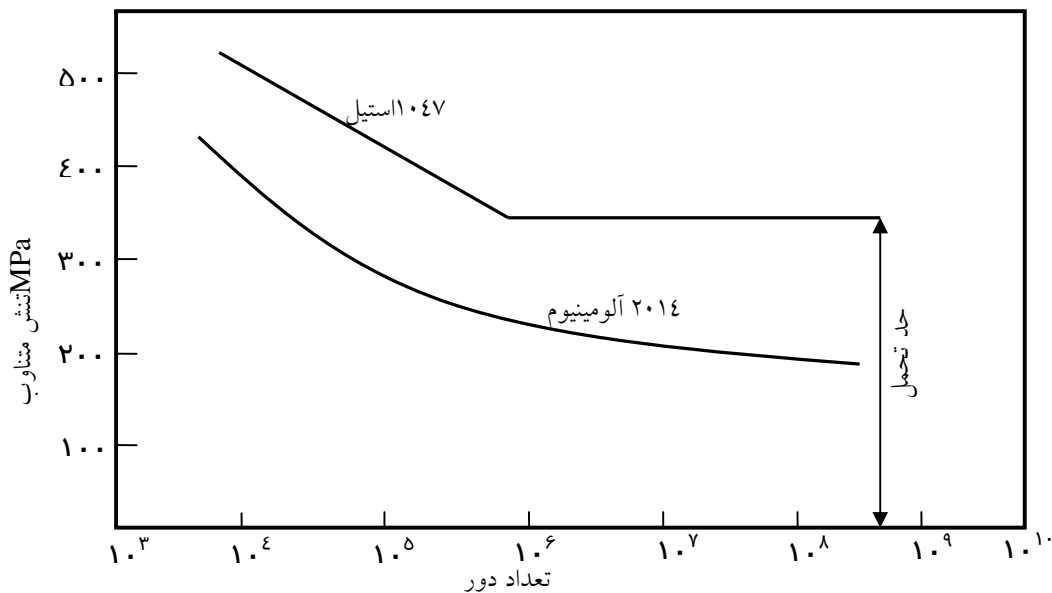


خستگی^{۲۰} (حد تحمل)

تعریف: اگر فلز را تحت اثر تنش هایی متغیر و متناوب قرار دهند پس از مدتی در اثر تنش های پایین تر از تنش که در آزمایش کشش بدست می آید می شکنند. به این پدیده خستگی فلز می گویند. همانطور که قبلا اشاره شد یکی از مهمترین کمیت ها در طراحی قطعات مهندسی تنش تسلیم است که در اثر بارهای استاتیکی از آزمایش کشش بدست می آید. برای اجزایی مانند محور توربین ها یا میل گاردانها، فنرهای سوپاپ و ... که تحت تنش های متناوب قرار می گیرند بررسی پدیده خستگی نیز اهمیت زیادی دارد زیرا در این موارد شکست در تنشهایی کمتر از حد تسلیم رخ می دهد (علت حدود ۹۰ درصد از کل گسست های مکانیکی از این نوع می باشد).

تعریف: بیشترین تنشی را که قطعه در اثناء تعداد تناوب های بسیار زیاد (نامحدود) بدون شکست تحمل نماید را حد تحمل یا حد دوام و یا حد خستگی می نامند.

شکل زیر منحنی "ولر" برای دو ماده که یکی دارای حد تحمل (استیل ۱۰۴۷) و دیگری بدون حد تحمل (آلومینیوم ۲۰۱۴) هستند را نشان می دهد در مورد موادی که حد تحمل معینی ندارند، تنشی که پس از حدود ۱۰۰ میلیون دور هنوز قابل دسترس باشد به عنوان حد تحمل انتخاب می گردد.



عوامل مؤثر بر استحکام خستگی

- ✎ مشخصات نمونه مورد آزمایش؛ (بایستی کاملاً صاف و صیقلی بوده و عاری از هرگونه عیب ظاهری باشد)
- ✎ طراحی درست و انتخاب عملیات تولید و روش عملیات حرارتی.
- ✎ محیط خورنده؛ که به آن خستگی خوردگی می‌گویند به شدت از عمر و حد تحمل می‌کاهد.
- ✎ فشار محیط (خلأ و اتمسفر)؛ رطوبت محیط و دمای کاربرد.
- ✎ وجود تنشهای پس‌ماند (مثل جوشکاری و ماشین‌کاری).

شکست در اثر خستگی

شکست قطعات فلزی که در نتیجه اعمال بارهای متناوب و پدیده‌ی خستگی از کار می‌افتد اصطلاحاً شکست در اثر خستگی نام دارد. یک عامل اصلی شکست می‌تواند به علت وجود شکاف ساختمانی به سبب تغییر شدید ساختار بلورین ماده باشند. شکست مواد تحت بارگذاری متناوب و کمتر از استحکام استاتیکی تابع زمان نیست بلکه به تاریخچه بارگذاری آن مواد بستگی دارد. اگر بسامد (فرکانس) بارگذاری شدید شود زمان شکست کاهش می‌یابد.

خستگی حرارتی

اگر تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در قطعه در اثر شیب دمایی به تعداد دفعات کافی تکرار شوند، امکان از کارافتادگی قطعه وجود دارد. تغییرات سریع دما، هدایت حرارتی کمتر ماده، ضریب کشسانی بالاتر، ضریب انبساط حرارتی بیشتر شکل‌پذیری کمتر و مقاطع ضخیم قطعه، معمولاً عوامل کوتاه‌کننده‌ی عمر کاری قطعه هستند. مواد سرامیکی بویژه به خاطر هدایت حرارتی کم و ترد بودن، مستعد خستگی حرارتی هستند. در کاربردهای دمای بالا محیط نقش مهمی در عملکرد قطعات دارد. انتخاب ماده‌ی مقاوم در محیط، کنترل محیط یا محافظت سطح از فعالیت‌های ضروری برای ازدیاد طول عمر هستند. مثال‌هایی از محیط خورنده، محیط‌های حاوی ترکیبات وانادیم، ترکیبات گوگرد یا نمک هستند.

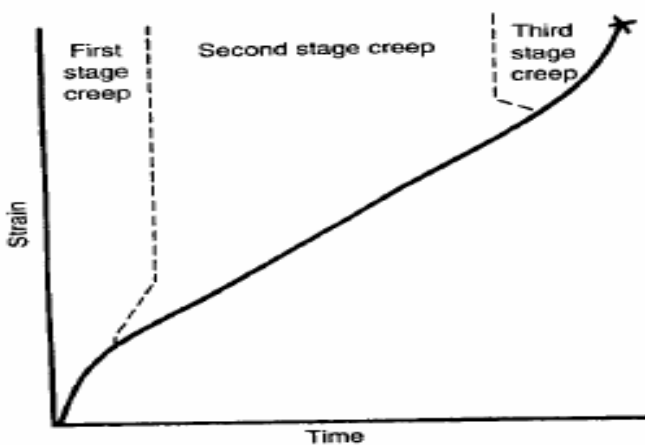
رفتار مواد در مقابل نیروهای استاتیکی در دماهای بالا

خزش

در آزمایش کشش در دماهای پایین تأثیر زمان بر روی حد تسلیم و استحکام کششی قابل توجه نیست در صورتیکه در دماهای بالا اثر زمان اهمیت می‌یابد. اگر یک نمونه فولادی تحت نیروی ثابتی در دمای بالا قرار گیرد با گذشت زمان تغییر طول نسبی در نمونه ایجاد می‌شود که به این پدیده خزش می‌گویند. تعریف: خزش تغییر شکل در اثر تنش در طول زمان است.

رفتار مواد در برابر خزش

این رفتار را می‌توان به کمک منحنی خزش که در آن چگونگی تغییر شکل نسبت به زمان برای یک درجه حرارت و تنش ثابت داده شده است بررسی کرد.



این منحنی از سه مرحله تشکیل شده است:

مرحله اول: $\frac{d\epsilon}{dt}$ کاهنده است.

در نتیجه در معرض کار سختی است.

مرحله دوم: $\frac{d\epsilon}{dt} = \epsilon_0$ ثابت است.

مرحله سوم: $\frac{d\epsilon}{dt}$ افزایشده است.

ایجاد گلویی و تشکیل حفره‌های درونی

سرعت خزش به دو عامل دما و تنش بستگی دارد.

✓ دما باعث فعال شدن فرآیندهای صعود و حرکت نابجاییها و لغزش آنها می‌شود.

✓ با افزایش تنش سرعت خزش افزایش می‌یابد.

نکته ۱: خزش در اثر حرکت نابجاییها درون دانه، چرخش مرزدانه ها و لغزش مرزدانه ها حاصل می‌شود.

نکته ۲: خزش به اندازه‌ی دانه، مواد آلیاژی افزوده شده، ریز ساختار و شرایط کاری حساس است.

ترکیب خزش و خستگی

در بسیاری از کاربردهای دمای بالا، عملاً بارهای وارده متناوب هستند و می‌توانند منجر به از کار افتادگی مرکب خزش - خستگی شوند.

مکانیک شکست و چقرمگی شکست

بحث خواص مکانیکی مواد بدون انجام آزمایش‌ها و نظریه‌های طراحی که بر پایه‌ی مکانیک شکست استوارند، کامل نیست. به جای در نظر گرفتن نمونه‌های آزمایش به صورت قطعات بدون عیب، در روش مکانیک شکست فرض بر این است که تمام قطعات شامل عیوب و نقص با اندازه‌ی معلوم هستند. این نقایص می‌تواند شامل عیوب مواد مانند ترک‌ها، سوراخ‌های ریز، ناخالصی‌ها یا آخال و عیوب مربوط به تولید، مانند آثار ابزار ماشین‌کاری، برخورد جرقه و صدمات ناشی از برخورد سطوح خارجی، یا عیوب طراحی مانند تغییر ناگهانی مقاطع، شعاع خم و وجود سوراخ در مقاطع نامناسب باشد. هنگامی که نمونه تحت بارگذاری قرار گیرد، تنش اعمال شده در اطراف عیوب تشدید می‌شود و در نتیجه آن؛ تسریع در شکست یا شکست غیر منتظره رخ می‌دهد. مکانیک شکست در صدد مشخص کردن شرایط رشد و گسترش عیب تا مرحله شکست جسم و در صورت امکان پیدا کردن سرعت پیشروی عیب یا ترک است.

در عمل روش‌های آزمایش به سه کمیت اصلی توجه دارند.

۱) اندازه بزرگترین یا بحرانی‌ترین عیب

۲) تنش اعمال شده

۳) چقرمگی شکست؛ یعنی کمیتی که بیان‌کننده‌ی استحکام گسیختگی مواد با شرایط لازم برای پیشروی ترک است و معمولاً با علامت K نمایش داده می‌شود.

با روش‌های غیر مخرب اندازه بزرگترین نقص ممکن معلوم می‌شود و اگر به صورت ریاضی این نقص را در بدترین محل و بدترین جهت قرار دهیم، با دانستن تنش اعمال شده در آن محل، مهندس طراح می‌تواند چقرمگی شکست لازم برای جلوگیری از پیشروی نقص در مدت کار را محاسبه نماید و برعکس اگر شرایط ماده و تنش معلوم باشد، می‌توان اندازه‌ی بزرگترین نقص مجاز را محاسبه کرد و شرایط بازرسی را طوری تعیین نمود که بتوان به نبود نقص‌هایی بزرگتر از این اندازه مطمئن شد؛ یعنی اگر در قطعه‌ای از جنس معلوم، ترک قابل توجهی پیدا شد، می‌توان بیشترین تنش قابل تحمل را با اطمینان از عدم پیشرفت ترک معلوم کرد.

بنابراین؛ طبق فلسفه مکانیک شکست، تمام مواد عیب و نقص دارند، ولی این عیوب می‌توانند بی اثر یا مؤثر باشند. عیوب بی اثر مجاز هستند و هدف مکانیک شکست تعریف شرایطی است که تحت آن، عیب بی اثر باقی می‌ماند.

در سال ۱۹۸۳ زیان سالیانه در آمریکا بیش از ۱۱۹ میلیارد دلار برآورد شده بود که بیش از ۸۰٪ آن در ارتباط با روش جلوگیری از شکست از طریق ضریب اطمینان بالا، بازرسی‌های بیش از حد و استفاده از مواد مرغوب‌تر از حد نیاز بوده است. مشخص شد که با استفاده از روش مکانیک شکست می‌توان ۳۰٪ از ۱۱۹ میلیارد دلار را صرفه‌جویی می‌شود.

ضمیمه : جدول تبدیل واحدها

طول

imperial ->		metric	metric ->		imperial
1 inch [in]		2.54 cm	1 millimetre [mm]		0.03937 in
1 foot [ft]	12 in	0.3048 m	1 centimetre [cm]	10 mm	0.3937 in
1 yard [yd]	3 ft	0.9144 m	1 metre [m]	100 cm	1.0936 yd
1 mile	1760 yd	1.6093 km	1 kilometre [km]	1000 m	0.6214 mile
1 int nautical mile	2025.4 yd	1.853 km			

سطح

imperial ->		metric	metric ->		imperial
1 sq inch [in ²]		6.4516 cm ²	1 sq cm [cm ²]	100 mm ²	0.1550 in ²
1 sq foot [ft ²]	144 in ²	0.0929 m ²	1 sq m [m ²]	10,000 cm ²	1.1960 yd ²
1 sq yd [yd ²]	9 ft ²	0.8361 m ²	1 hectare [ha]	10,000 m ²	2.4711 acres
1 acre	4840 yd ²	4046.9 m ²	1 sq km [km ²]	100 ha	0.3861 mile ²
1 sq mile [mile ²]	640 acres	2.59 km ²			

حجم

imperial ->		metric	metric ->		imperial
1 cu inch [in ³]		16.387 cm ³	1 cu cm [cm ³]		0.0610 in ³
1 cu foot [ft ³]	1,728 in ³	0.0283 m ³	1 cu decimetre [dm ³]	1,000 cm ³	0.0353 ft ³
1 fluid ounce [fl oz]		28.413 ml	1 cu metre [m ³]	1,000 dm ³	1.3080 yd ³
1 pint [pt]	20 fl oz	0.5683 l	1 litre [l]	1 dm ³	1.76 pt
1 gallon [gal]	8 pt	4.5461 l	1 hectolitre [hl]	100 l	21.997 gal

USA measure ->

USA measure ->	metric
1 fluid ounce	1.0408 UK fl oz 29.574 ml
1 pint (16 fl oz)	0.8327 UK pt 0.4731 l
1 gallon	0.8327 UK gal 3.7854 l

جرم

imperial ->		metric	metric ->		imperial
1 ounce [oz]	437.5 grain	28.35 g	1 milligram [mg]		0.0154 grain
1 pound [lb]	16 oz	0.4536 kg	1 gram [g]	1,000 mg	0.0353 oz
1 stone	14 lb	6.3503 kg	1 kilogram [kg]	1,000 g	2.2046 lb
1 hundredweight [cwt]	112 lb	50.802 kg	1 tonne [t]	1,000 kg	0.9842 ton
1 long ton (UK)	20 cwt	1.016 t			

بسمه تعالی

عنوان

صفحه

۱	مقدمه
۲	تعریف خواص مکانیکی
۲	تأثیر عوامل خارجی بر خواص مکانیکی
۲	تعریف تنش
۳	تقسیم بندی مواد
۴	مروری بر پیوندهای اتمی
۵	ارتباط خواص مکانیکی مواد با پیوندهای اتمی
۵	ساختار جامدات
۵	شبکه های فضایی و ساختار بلورین مواد
۱۰	تعیین جهات در بلورها
۱۱	سطوح در بلورها و شاخصهای میلر
۱۲	فاصله صفحات کریستالی
۱۳	ساختمان کریستالی فلزات و تکرار صفحات اتمی
۱۵	ضریب تراکم
۱۵	دانسیته اتمی خطی
۱۵	دانسیته اتمی صفحه ای
۱۶	دانسیته اتمی حجمی (چگالی)
۱۷	ساختان کریستالی مواد یونی
۱۹	عیوب کریستالی (نابجائیهها)
۱۹	عیوب نقطه ای
۲۱	مزایای عیوب نقطه ای
۲۱	عیوب خطی (نابجایی)
۲۱	نابجایی خطی یا لبه ای
۲۲	نابجایی پیچی
۲۳	نابجایی مختلط
۲۳	عیوب سطحی (دو بعدی)
۲۴	عیوب فضایی

عنوان

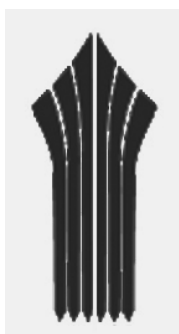
صفحه

۲۵	مکانیزم تغییر شکل الاستیک در فلزات و آلیاژها
۲۵	مدول الاستیک (ضریب یانگ)
۲۷	عوامل مؤثر بر مدول الاستیک
۲۸	ضریب برشی
۲۸	ضریب حجمی
۲۸	ضریب پواسان
۳۰	تغییر شکل پلاستیک در مواد
۳۰	لغزش
۳۲	مکانیزم لغزش
۳۲	دستگاههای لغزش
۳۶	تغییر شکل پلاستیک در مواد پلی کریستال
۳۶	منحنی تنش- کرنش
۳۸	انواع شکست
۳۹	رفتار فتری و سفتی یا تافنس (چقرمگی)
۳۹	رفتار منحنی تنش- کرنش فولاد کم کربن
۴۰	تأثیر درجه حرارت و سرعت کشش بر روی نمودار تنش- کرنش
۴۰	کار سرد در تغییر شکل پلاستیک
۴۱	سخت شدن کرنشی
۴۲	قابلیت ضربه گیری
۴۴	رفتار مواد در برابر نیروهای فشاری
۴۴	آزمون فشار
۴۵	عوامل مؤثر بر نتایج آزمایش فشار
۴۷	خمش
۴۹	تعیین استحکام خمشی
۴۹	سختی سنجی
۵۰	سختی سنجی
۵۰	انواع روشهای سختی سنجی
۵۰	سختی سنجی موهس

عنوان

صفحه

۵۰	.....	سختی سنجی برنیل
۵۲	.....	سختی سنجی راکول
۵۴	.....	سختی سنجی ویکرز
۵۵	.....	سختی سنجی نوپ
۵۵	.....	سختی سنجی شر یا اسکروسکوپ
۵۷	.....	نیروهای استاتیکی و دینامیکی
۵۸	.....	آزمایش ضربه
۵۹	.....	درجه حرارت تبدیل شکست در آزمایش ضربه
۶۰	.....	درجه حرارت تبدیل شکست در آزمایش ضربه
۶۲	.....	خستگی (حد تحمل)
۶۴	.....	رفتار مواد در مقابل نیروهای استاتیکی در دماهای بالا
۶۴	.....	خزش
۶۵	.....	مکانیک شکست و چقرمگی شکست



دانشگاه جامع علمی کاربردی

مرکز آموزش علمی کاربردی تصمیم یارتوس

خواص مکانیکی مواد

اکبر امینی