علم مواد

خواص مکانیکی مواد

تهیه کننده
سید مهدی هاشمی

بهار ۹۲

خواص مکانیکی مواد

عکس العمل مواد جامد در مقابل نیروها، گشتاورها و یا به طور کلی هر نوع تنش های خارجی وارد بر آن اعم از استاتیکی و یا دینامیکی رفتار یا خواص مکانیکی مواد نامیده میشود . در واقع رابطه بین نیروها و بارهای اعمال شده تغییر شکل ایجاد شده در آن رفتار مکانیکی را نشان میدهند. بارها ممکن است کششی، فشاری، خمشی، برشی و مقادیر آن ثابت و یا متغیر با زمان باشد . دمای محیط بر رفتار مکانیکی ماده اثر دارد.

تنش و کرنش

تنش : (Stress)

عبارت است از مقدار نیروی وارد شده بر واحد سطح جسم .

کرنش: (Strain)

عکس العمل یا تغییر شکلی را که جسم در مقابل اعمال تنش از خود نشان میدهد را کرنش میگویند .

انواع کرنش :

الاستیک : با قطع اعمال نیرو، جسم به شکل اولیه برمیگردد .

پلاستیک: با قطع اعمال نیرو، جسم به شکل اولیه برنمیگردد.

تنش و کرنش

اگر نیرو بر سطح مقطع اولیه منظور شود..... تنش مهندسی

$$S=\Delta F/A_0$$

اگر نیرو برسطح مقطع لحظه ای منظور شود.....تنش حقیقی

$$\sigma=\Delta F/A$$

اگر تغییر طول بر طول اولیه باشد..... کرنش مهندسی

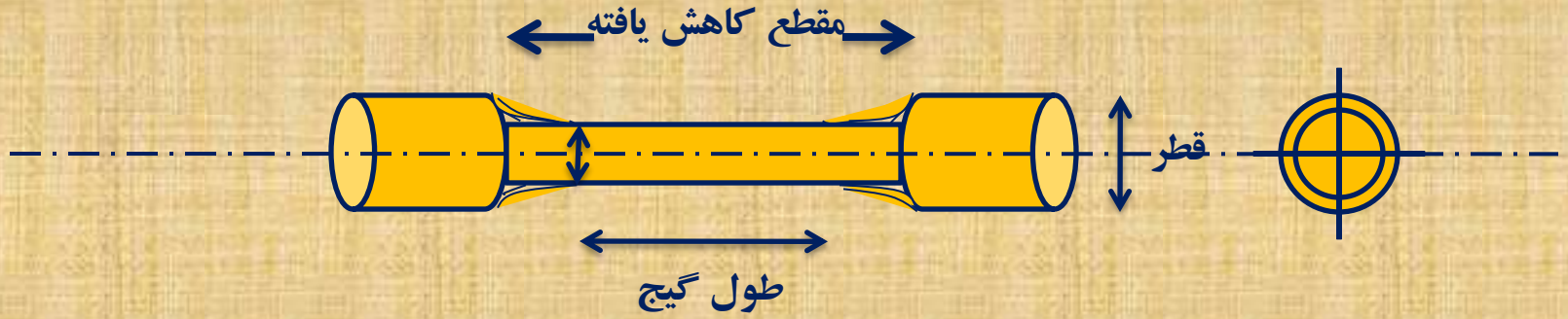
$$\varepsilon_0=\Delta L/L_0$$

اگر تغییر طول بر طول لحظه ای باشد..... کرنش حقیقی

$$\varepsilon=\Delta L/L$$

آزمایش کشش

یکی از آزمایش های مکانیکی تنش-کرنش این آزمایش است.یک نمونه با بار کششی که به تدریج افزایش میابد تا مرحله ی شکست تغییر شکل میابد به صورت شکل مقابل است.



از دو انتها نمونه در داخل نگه دارنده دستگاه آزمایش قرار گرفته است .این دستگاه به گونه ای طراحی شده که طول نمونه را با سرعت ثابت افزایش میدهد و بطور پیوسته و همزمان بار لحظه ای بکار رفته را اندازه گیری میکند . این آزمایش چندین دقیقه طول میکشد که مخرب است زیرا نمونه نهایتا به مرحله شکست میرسد.تنش و کرنش مهندسی با روابط زیر تعریف میشود .

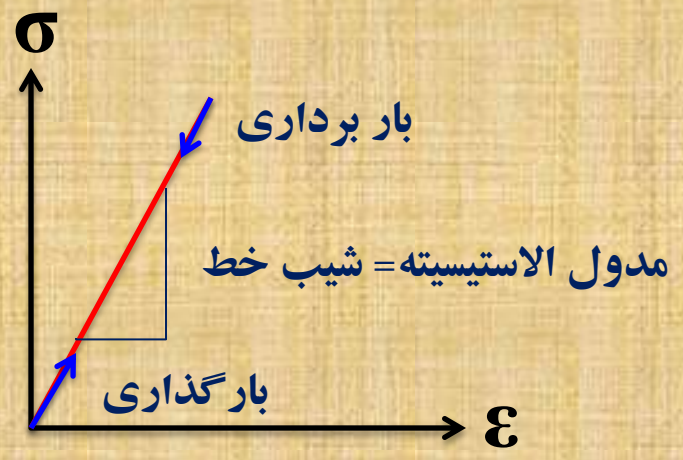
دستگاه تست کشش

تغییر شکل کشسان (الاستیک)

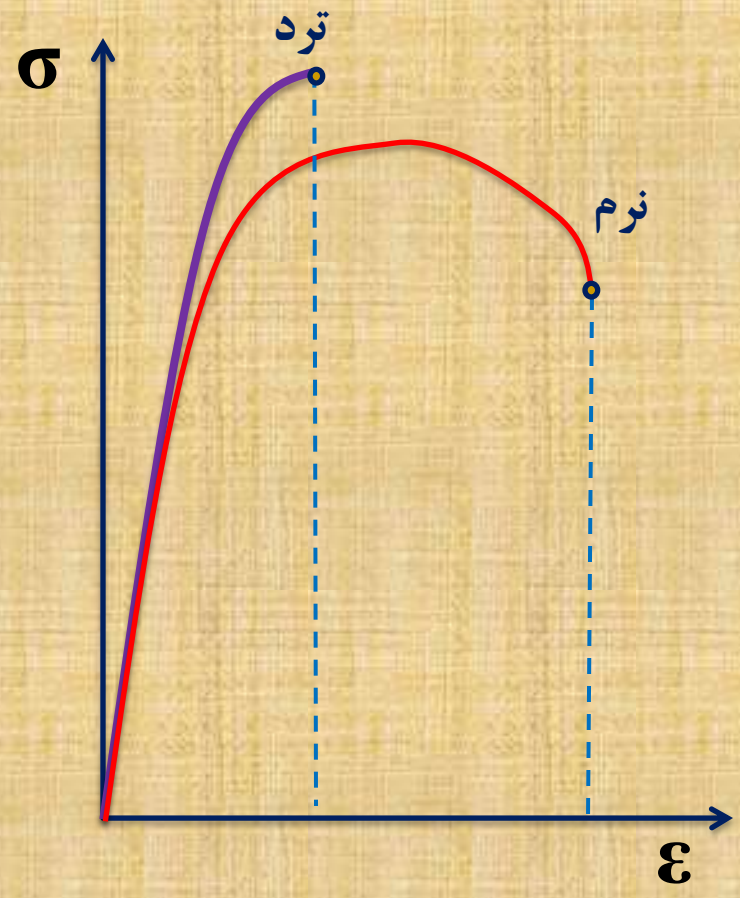
میزان تغییر شکل یا تغییر طول بستگی به مقدار تنش اعمال شده دارد . از رابطه ی زیر به هم وابسته اند :

$$\sigma = E.\varepsilon$$

قانون فوق به قانون هوک معروف است و ثابت E مدول الاسیسیته یا مدول یانگ نام دارد.
تغییر شکلی که در آن تنش و کرنش متناسبند تغییر شکل کشسان یا الاستیک نام دارد.
منحنی تغییرات تنش نسبت به کرنش بصورت خطی میباشد . که شیب آن برابر مدول یانگ بوده که نشانگر سفتی یا ایستادگی ماده در مقابل تغییر فرم الاستیک میباشد.



خواص کششی- انعطاف پذیری



انعطاف پذیری

انعطاف ناپذیریا ترد فلزیست که تغییر شکل پلاستیکی کمی دارد یا در آن این وجود ندارد.
انعطاف پذیری به دو صورت درصد ازدیاد طول و درصد کاهش سطح بیان میشود :

درصد تغییر طول :

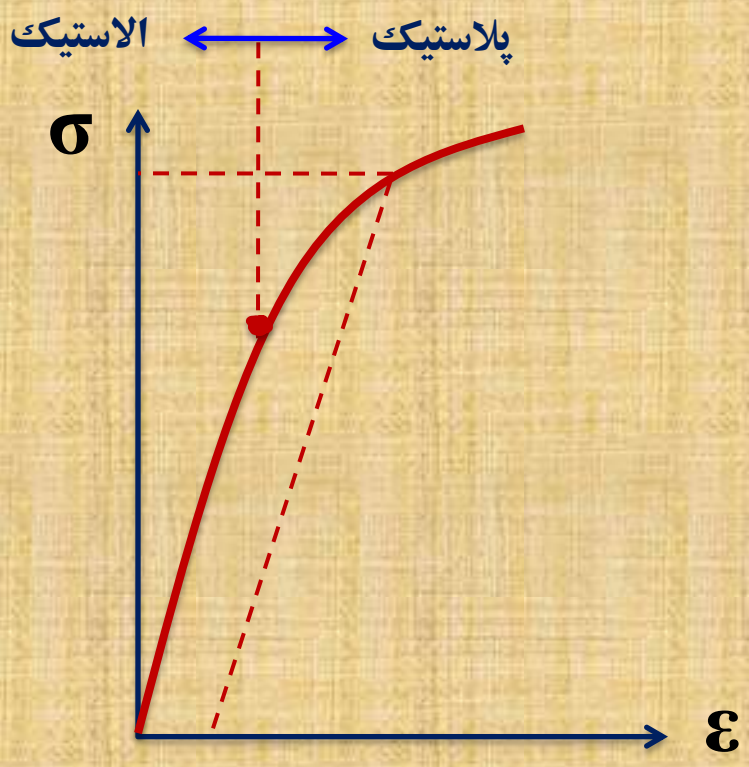
$$\%El = (L_f - L_o) / L_o \times 100$$

درصد کاهش سطح :

$$\%RA = (A_o - A_f / A_o) \times 100$$

بسیاری فلزات در درجه حرارت اتاق مقداری انعطاف پذیری دارند و برخی با کاهش درجه حرارت ترد میشوند.
از دو جهت دانستن انعطاف پذیری مهم است : اول میزان تغییر شکل پلاستیک قبل از شکست را برای طراح مشخص میکند و دوم میزان تغییر شکل مجاز را برای ماده در زمان تولید تعیین میکند.

خواص کششی – استحکام تسلیم



استحکام تسلیم

بیشتر مواد به نحوی طراحی میشوند که اطمینان داشته باشیم که فقط تغییر فرم الاستیک در نتیجه اعمال تنش رخ خواهد داد، پس باید بدانیم مرحله ای که در آن تغییر فرم پلاستیک آغاز و رویداد تسلیم صورت میگیرد بسیار مهم است. نقطه تسلیم نقطه تغییر فرم الاستیک به تغییر فرم پلاستیک است.

خواص کششی – استحکام تسلیم

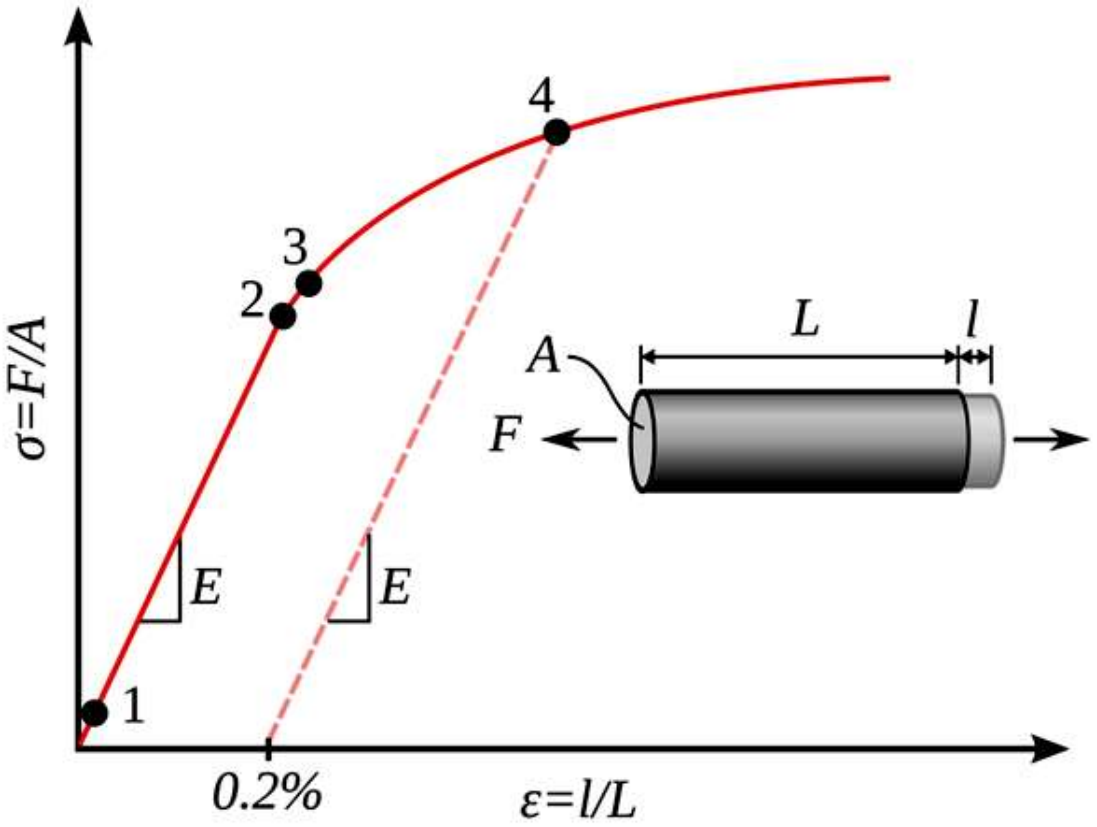


Illustration of offset yield point. Key:

1: True elastic limit

2: Proportionality limit

3: Elastic limit

4: Offset yield strength, usually defined at e=0.2%

σ: Engineering stress

ε: Engineering strain

A: Undeformed cross-sectional area

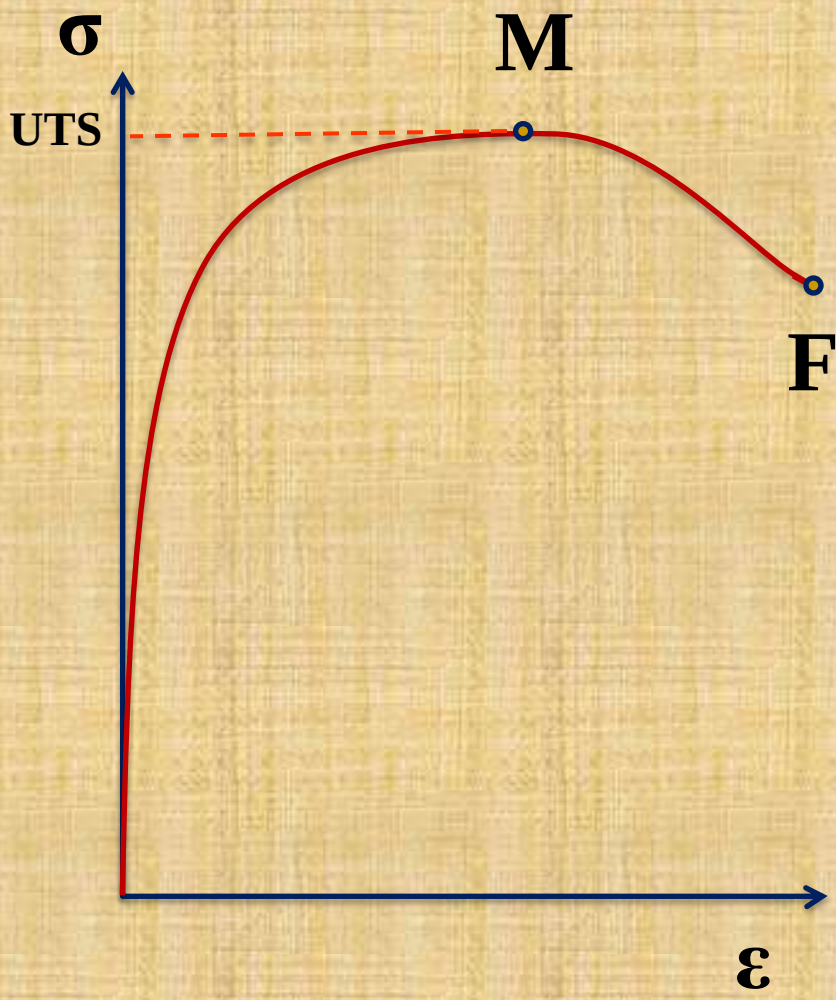
F: Uniaxial load

L: Undeformed length

l: Elongation

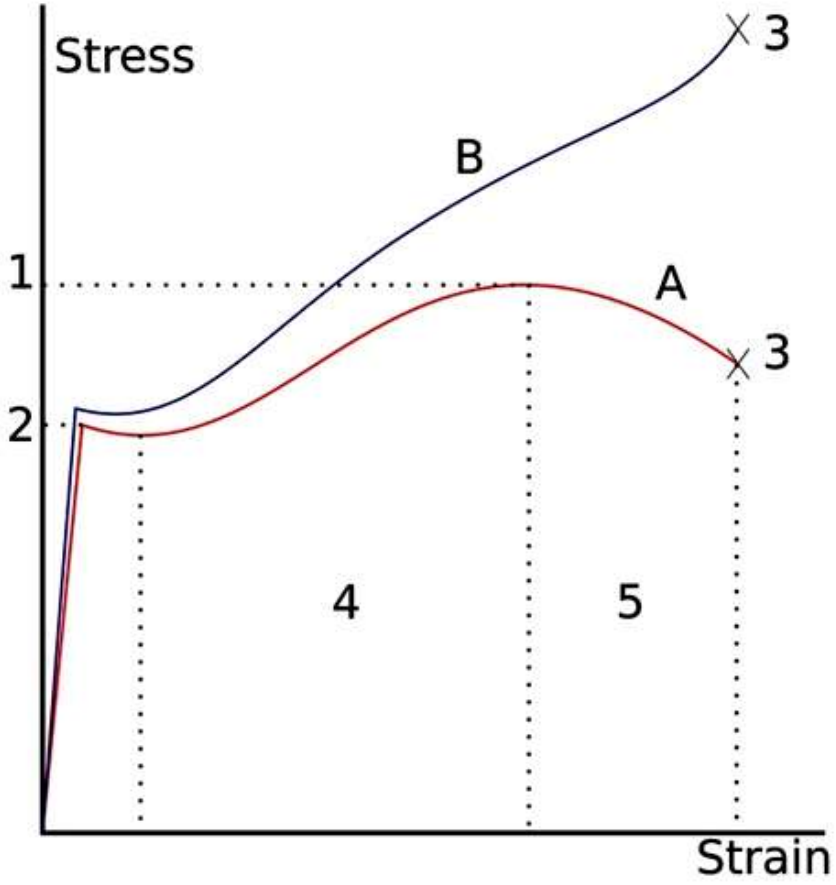
خواص کششی – استحکام کششی

استحکام کششی **UTS (Ultimate Tensile Strength)**



پس از مرحله تسلیم تنش مورد نیاز برای ادامه تغییر فرم پلاستیک به نقطه ای مانند M در شکل به بالاترین حد خود میرسد و پس از آن کاهش میابد تا به نقطه شکست F برسیم .مقاومت کششی TSحداکثر تنش در نمودارهای تنش کرنشی مهندسی و حداکثرتنشی است که میتواند بوسیله کشش ایجاد شود میباشد که اگر باقی بماند تغییر شکل به شکست منجر خواهد شد. به خاطر این تنش ماکزیمم فرایند باریک شدن در طول موثر نمونه آغاز میشود ومرحله گلویی ایجاد شده که در نهایت منجر به شکست میشود.

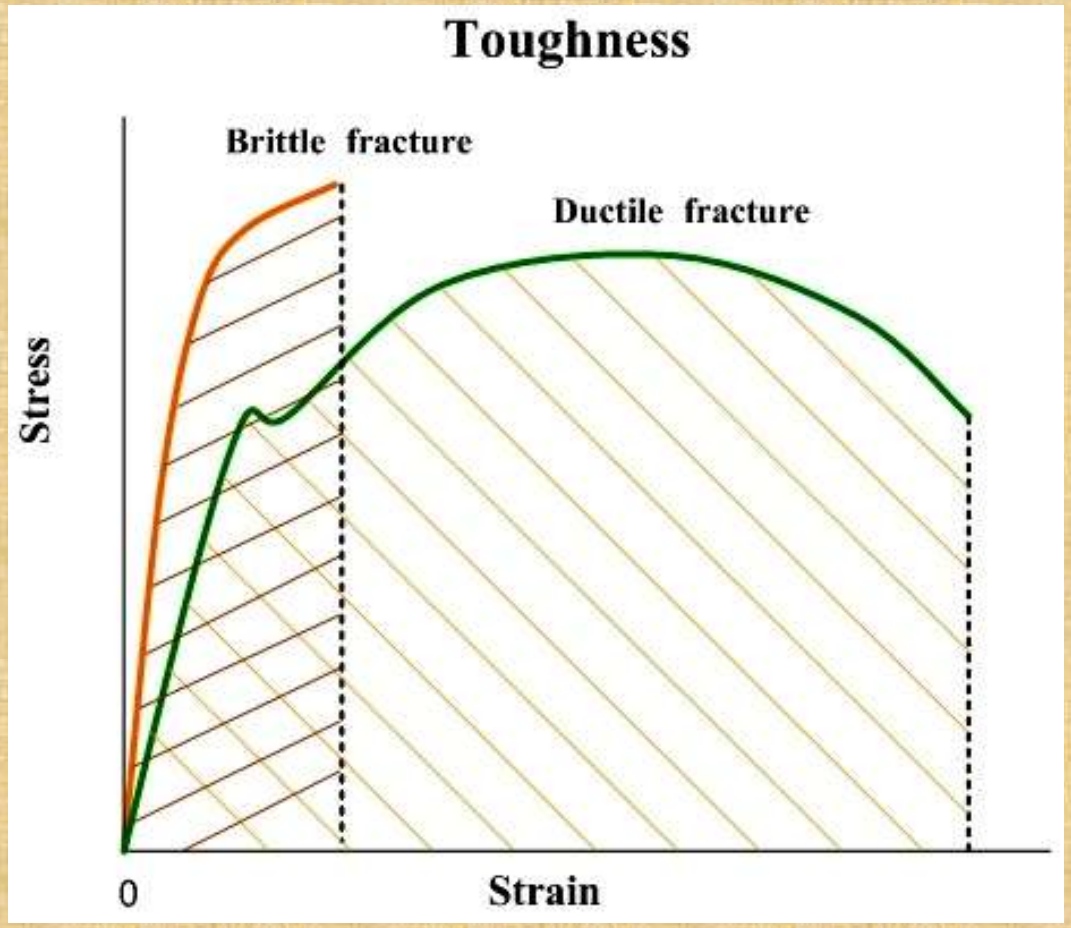
خواص کششی – استحکام کششی



Stress vs. Strain curve for structural steel. Reference numbers are:

- *1 - Ultimate Strength*
- *2 - Yield Strength(elastic limit)*
- *3 - Rupture*
- *4 - Strain hardening region*
- *5 - Necking region*
- *A: Apparent stress (F/A_0)*
- *B: Actual stress (F/A)*

خواص کششی- چقرمگی



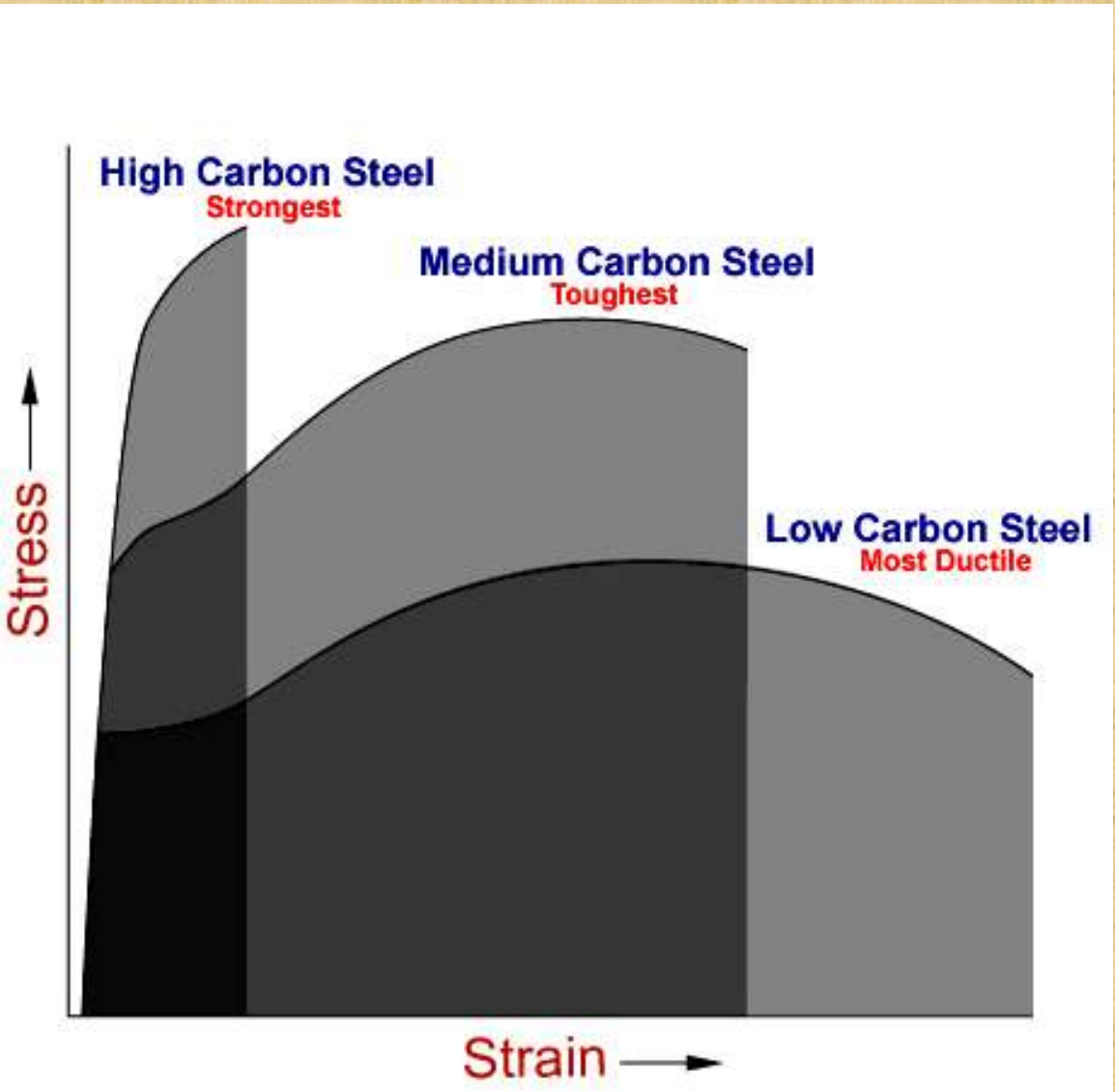
چقرمگی

چقرمگی در علم مواد به مقاومت مواد در برابر شکست در اثر اعمال تنش گفته می‌شود. چقرمگی بصورت میزان انرژی جذب شده قبل از انهدام قطعه در واحد حجم مواد تعریف می‌شود.

به عبارت دیگر چقرمگی انرژی سطح زیر منحنی تنش کرنش است .

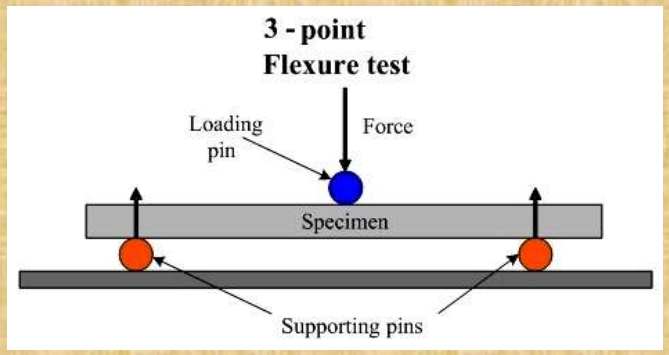
چقرمگی یک حسن محسوب می شود هر چقدر ماده ای چقرمگی آن بیشتر باشد انرژی بیشتری برای شکست آن نیاز است.

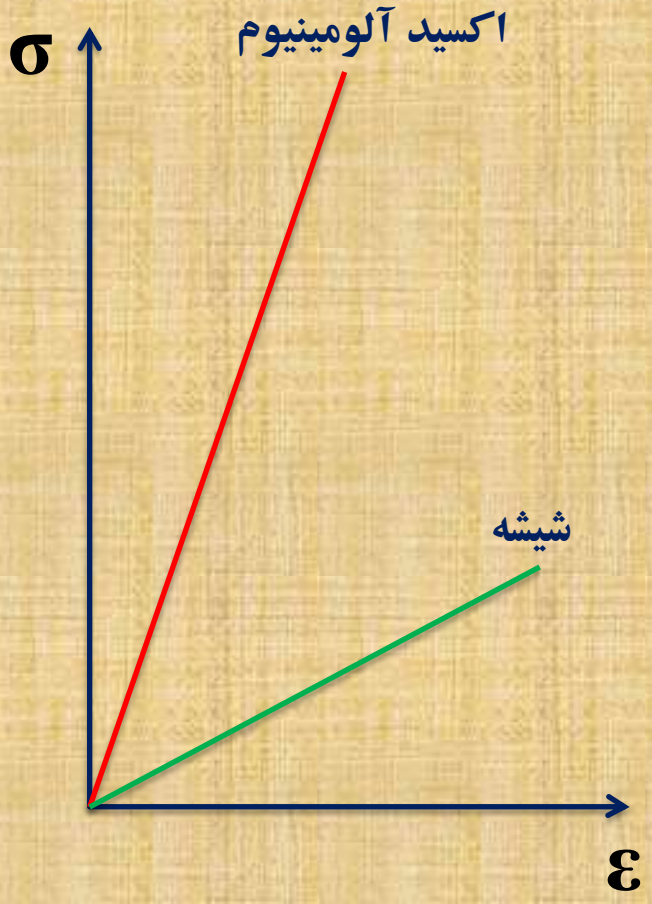
خواص کششی- چقرمگی



رفتار الاستیک ماده

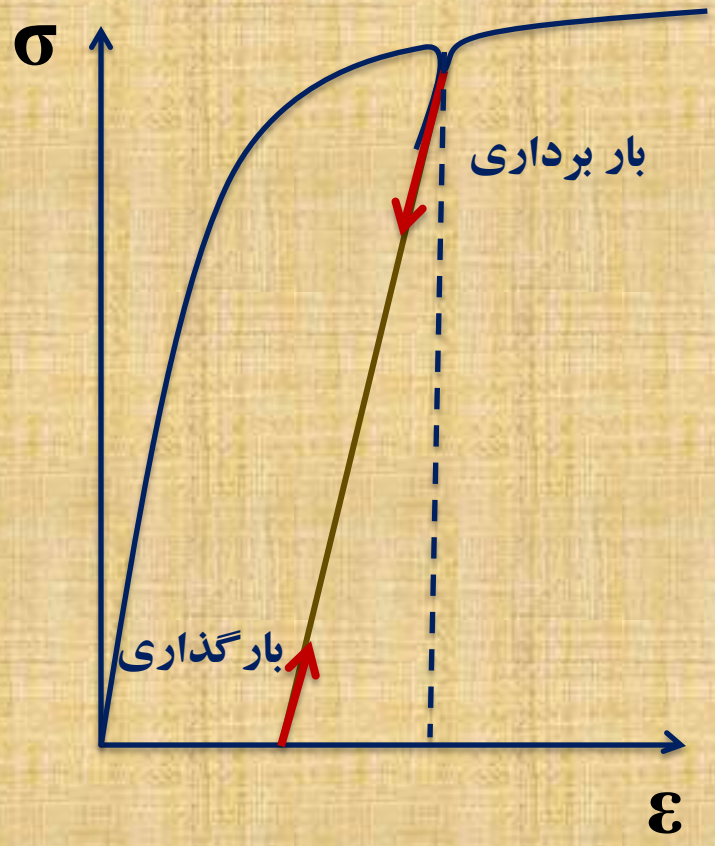
رفتار تنش کرنش الاستیک مواد سرامیکی با استفاده از آزمایش خمش مشابه با نتایج آزمایش کششی فلزات میباشد و یک ارتباط خطی بین تنش و کرنش وجود دارد .





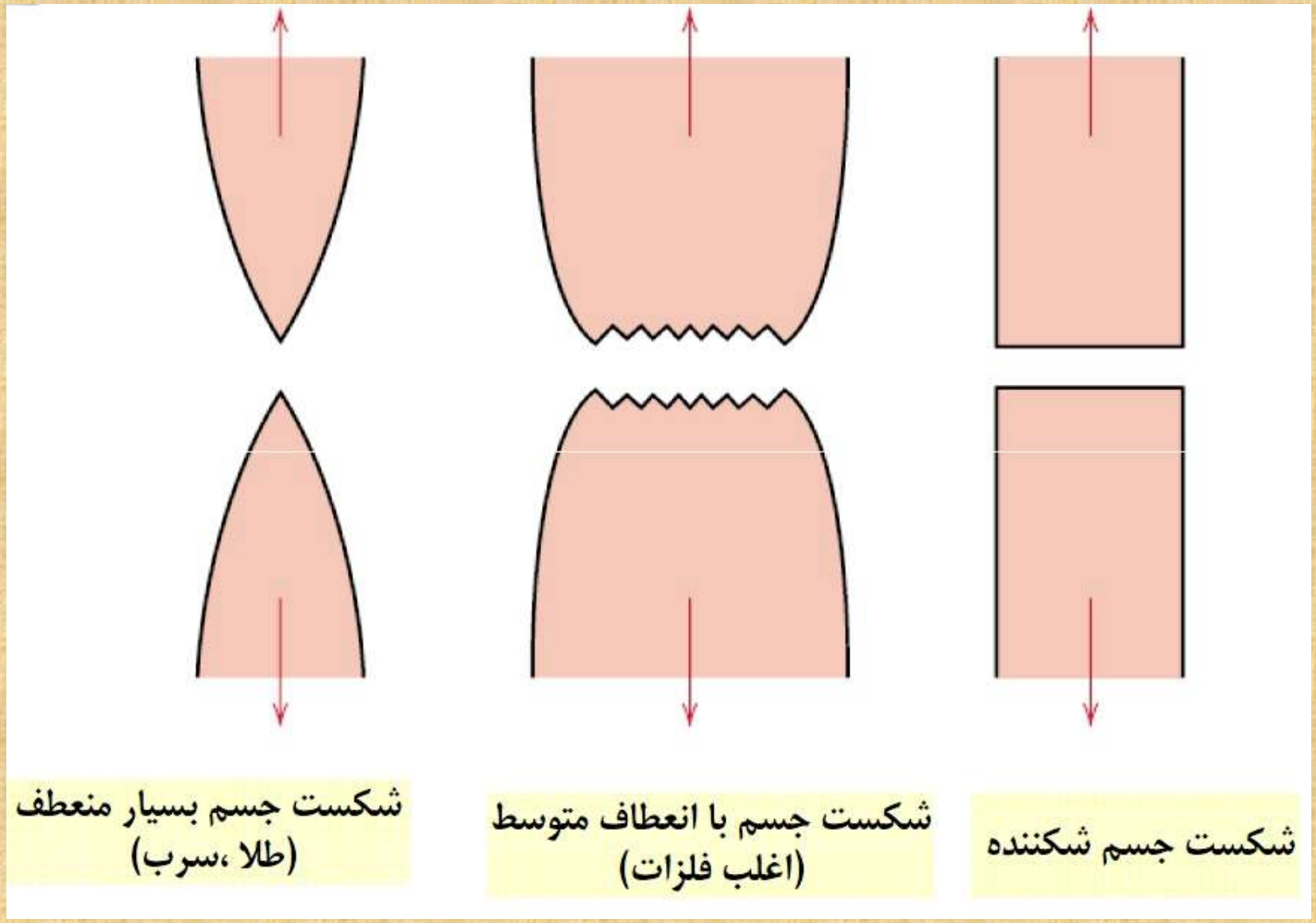
شکل روبرو رفتار تنش کرنش اکسید آلومینیوم و شیشه را تا نقطه ی شکست مقایسه میکند. مدول الاستیسیته مواد سرامیکی بیشتر از فلزات میباشد. از شکل روبرو میتوان فهمید که هیچ یک از دو ماده سرامیکی متحمل تغییر شکل پلاستیک قبل از شکست نمیشوند.

بازگشت الاستیک در حین تغییر شکل پلاستیک



با برداشتن بار در طول مسیر یک آزمایش تنش-کرنش بخشی از مجموع تغییر شکل مطابق با کرنش الاستیک بازیافت میشود. مقدار کرنش الاستیک که در طول بار برداری بدست می اید با کرنش بازیافت شده برابر است. اگر بار مجددا اعمال شود منحنی همان جهت خطی را در جهت مخالف میپیماید . کرنش الاستیک در مرحله شکست قابل بازیابی خواهد بود.

شکست نرم و ترد



شکست نرم و ترد

شکست مخروطی-ناودانی(شکست نرم در آلومینیم)
بیشتر در مواد با ساختار BCC

شکست ترد در فولاد
(بیشتر در مواد با ساختار FCC و HCP در دماهای پائین

سختی

- سختی عبارت است از میزان مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک موضعی .آزمایشات سختی سنجی به دلایل زیر بیشتر از سایر آزمایشات مکانیکی انجام میشود .
- ۱- ساده و ارزان هستند
- ۲-آزمایش غیر مخرب است نمونه نه شکسته میشود نه تغییر شکل زیادی در آن میدهد
- ۳- سایر خواص مکانیکی نظیر استحکام کششی ممکن است از نتایج سختی سنجی تخمین زده شوند

آزمایش سختی راکول

- **سختی راکول (*Rockwell Hardness*)**

- یکی از معیارهای سختی است که بر اساس مقاومت مواد در برابر فرورونده با اعمال بار بزرگتر در مقایسه با بار اولیه سختی آنها را تعیین می کند. معیارهای مختلفی برای این سختی وجود دارد که هر کدام توسط یک حرف انگلیسی نشان داده می‌شود. این روش سختی‌سنجی توسط استنلی راکول در ۱۹۱۹ ابداع شد.

آزمایش سختی راکول

- آزمایشهای راکول رایج ترین روش مورد استفاده جهت اندازه گیری سختی می‌باشند زیرا انجام کار آنها ساده بوده و نیاز به مهارتهای ویژه ندارند. چندین مقیاس مختلف می‌توانند از بکارگیری سنبه‌ها و بارها متفاوت مورد استفاده قرار گیرند که نهایتاً امکان اندازه گیری سختی تمام فلزات را فراهم می‌آورند. اثرگذارهای کروی از فولادهای سخت شده با قطرهای یک دوم و یک چهارم و یک هشتم و یک شانزدهم اینچ هستند. اثرگذارهای مخروطی از جنس الماس برای مواد سخت با این سیستم، یک عدد سختی بوسیله تفاوت در عمق اثر ایجاد شده ناشی از اعمال یک بار فرعی اولیه و بدنبال آن یک بار اصلی بزرگتر حاصل می‌شود.

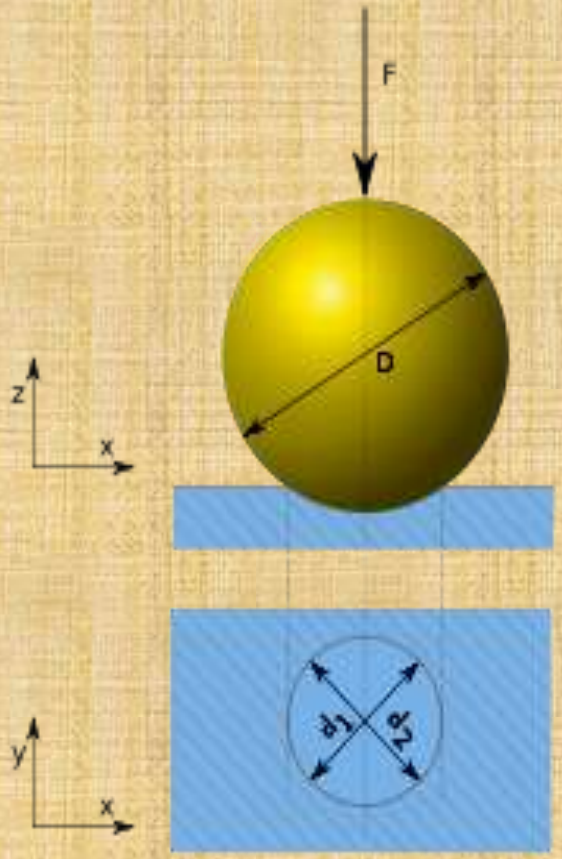
هنگام مشخص کردن آزمایش‌های سطح راکول عدد سختی و نشانه مقیاس هر دو باید ذکر شوند. این مقیاس، بوسیله علامت HR مشخص می‌شود و به دنبال آن تعریف مقیاس مشخص آورده می‌شود. برای مثال HRB ۸۰ نشاندهنده عدد سختی ۸۰ روی مقیاس B می‌باشد.

جدول a ۵-۷ مقیاسهای سختی راکول

علامت مقیاس	اثر گذارنده	نیرو (Kg)
A	الماس	۶۰
B	کره $\frac{۱}{۱۶}$ اینچ	۱۰۰
C	الماس	۱۵۰
D	الماس	۱۰۰
E	کره $\frac{۱}{۸}$ اینچ	۱۰۰
F	کره $\frac{۱}{۱۶}$ اینچ	۶۰
G	کره $\frac{۱}{۱۶}$ اینچ	۵۰
H	کره $\frac{۱}{۸}$ اینچ	۶۰
K	کره $\frac{۱}{۸}$ اینچ	۱۵۰

آزمایش سختی برینل

- **سختی برینل** (*Brinell hardness*)

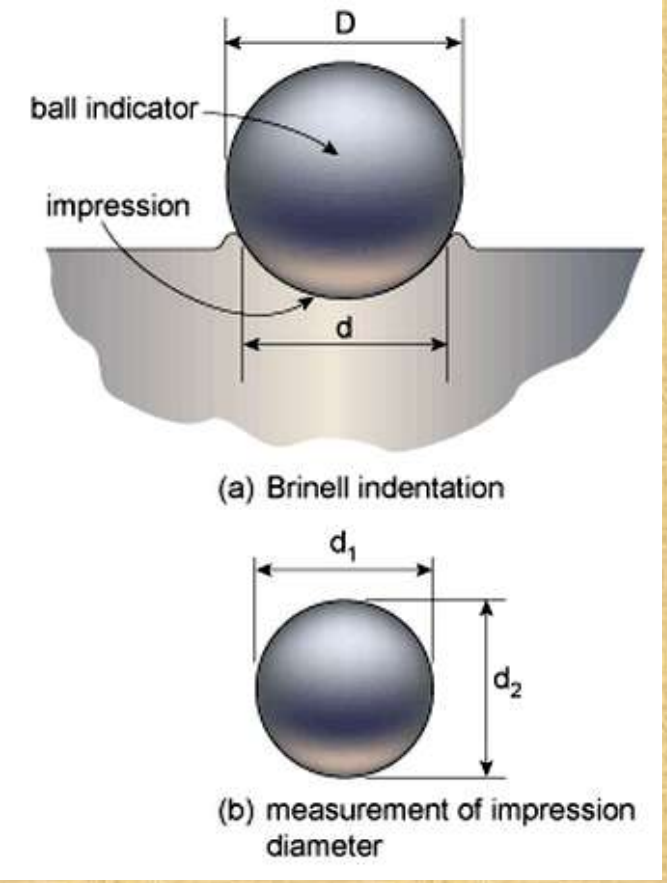


یکی از معیارهای سختی است که بر اساس مقاومت مواد در برابر فرورونده کروی شکل از جنس فولاد یا کاربید تنگستن سختی آنها را تعیین می کند.
این روش در سال ۱۹۰۰ توسط مهندس سوئدی برینل پیشنهاد شد.

سختی مواد در این روش بصورت زیر محاسبه می‌شود:
که در آن P میزان نیروی اعمالی به فرورونده (kgF)، D قطر فرورونده (mm) و d قطر فرورفته در نمونه (mm) است.

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

آزمایش سختی برینل



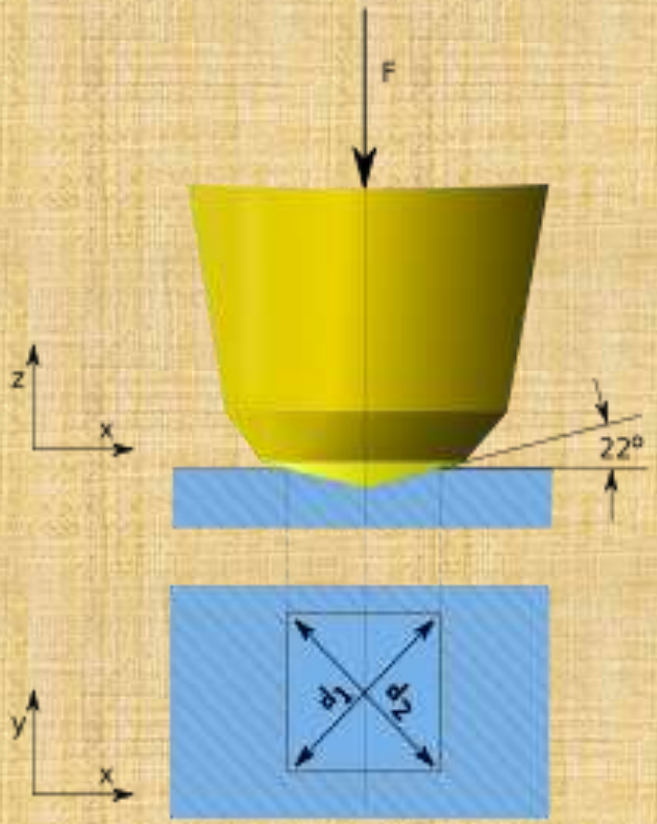
در آزمایشهای برینل مانند اندازه گیری های راکول، یک اثرگذار کروی سخت بر روی سطح فلز مورد آزمایش نیرو اعمال می‌کند. قطر گلوله فولاد سخت شده (یا کاربید تنگستن) 10mm است (0/394in) بارهای استاندارد در محدوده بین ۵۰۰ و 3000 kg قرار دارند.

در حین یک آزمایش، مقدار بار برای یک مدت معین ثابت نگه داشته می‌شود (بین ۱۰ و ۳۰ ثانیه).

مواد سخت تر احتیاج به بار اعمال شده بزرگتری دارند. عدد سختی برینل تابعی از قطر حفره ایجاد شده و نیروی اعمال شده است. این قطر بوسیله میکروسکوپ مخصوصی اندازه گیری می‌شود که بر روی عدسی آن مقیاس اندازه‌گیری حک شده است. قطر اندازه گیری شده بوسیله یک جدول به عدد سختی HB تبدیل می‌شود؛ با این تکنیک تنها یک مقیاس بکار گرفته می‌شود.

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

آزمایش سختی ویکرز

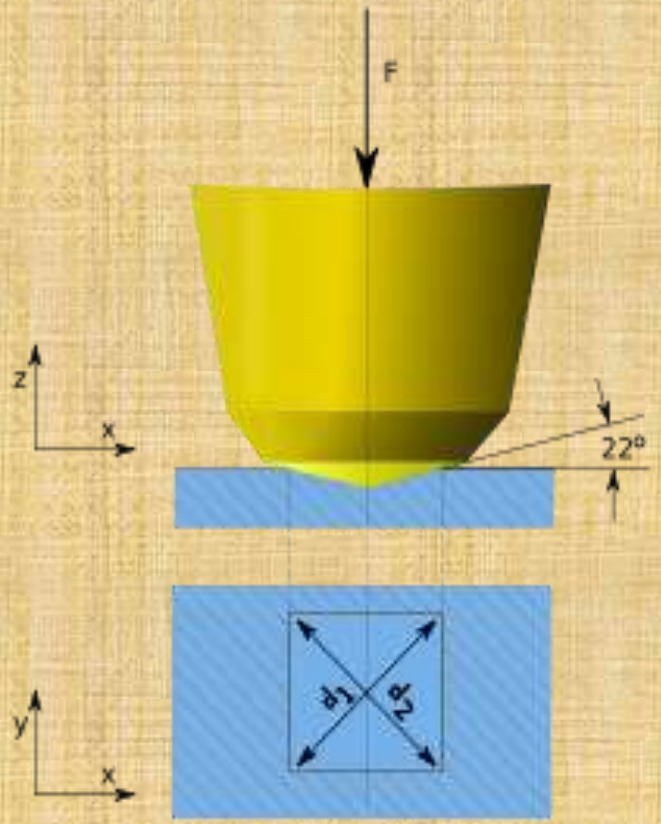


- **سختی ویکرز** (*Vickers hardness*)
- یکی از معیارهای سختی است که بر اساس مقاومت مواد در برابر فرورونده هرمی شکل از جنس الماس سختی آنها را تعیین می کند. سختی‌سنجی به این روش اولین بار در سال ۱۹۲۲ توسط اسمیت و ساندلند به عنوان جایگزینی برای سختی برینل توسعه یافت.[۱]
- فرورونده بکار رفته در این روش، الماس هرمی با قاعده مربع شکل است که سطوح مقابل آن با زاویه ۱۳۶ درجه به یکدیگر می‌رسند. مقدار سختی ماده پس از آزمایش توسط رابطه زیر بدست می‌آید:
- واحد سختی ویکرز کیلوگرم نیرو بر میلی‌متر مربع است.

$$VH = \frac{2F\sin(136°/2)}{d^2} \approx \frac{1.854F}{d^2}$$

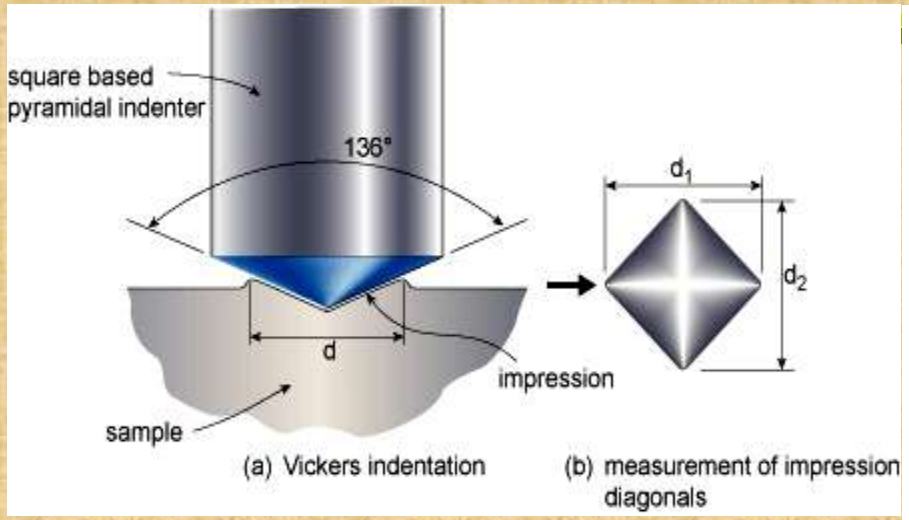
آزمایش سختی ویکرز

- در روش ویکرز (گاهی به هرم الماس معروف است)، یک الماس هرمی بسیار کوچک به عنوان اثرگذار به روی سطح نمونه فشرده می‌شود. بارهای اعمال شده در این روش بسیار کمتر از روشهای قبلی است. این مقادیربین ۱ تا 1000 gr متغیر است. اثر ایجاد شده بوسیله میکروسکوپ مشاهده و اندازه گیری می‌شود. این اندازه به عدد سختی تبدیل می‌شود .
- اعداد سختی ویکرز با HV نشان داده می‌شوند. از روشهای ویکرز به عنوان روش اندازه گیری سختی دقیق یاد می‌شود که بر پایه مقدار بار و اندازه اثر گذار عمل می‌نمایند. برای اندازه گیری سختی نواحی کوچک انتخاب شده از نمونه مناسبند.



$$VH = \frac{2F\sin(136°/2)}{d^2} \approx \frac{1.854F}{d^2}$$

سختی سنج ویکرز



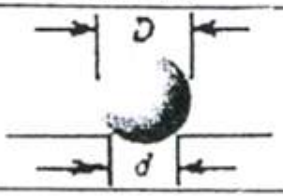
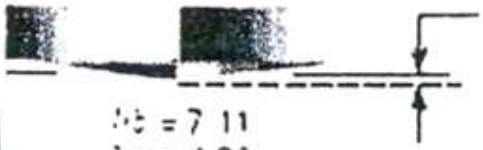
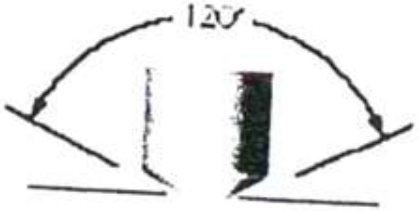
سختی سنج ویکرز

آزمایشهای سختی ویکرز

در روش ویکرز (گاهی به هرم الماس معروف است)، یک الماس هرمی بسیار کوچک به عنوان اثرگذار به روی سطح نمونه فشرده می‌شود. بارهای اعمال شده در این روش بسیار کمتر از روشهای قبلی است. این مقادیربین ۱ تا 1000 gr متغیر است. اثر ایجاد شده بوسیله میکروسکوپ مشاهده و اندازه گیری می‌شود. این اندازه به عدد سختی تبدیل می‌شود .

اعداد سختی ویکرز با HV نشان داده می‌شوند. از روشهای ویکرز به عنوان روش اندازه گیری سختی دقیق یاد می‌شود که بر پایه مقدار بار و اندازه اثر گذار عمل می‌نمایند. برای اندازه گیری سختی نواحی کوچک انتخاب شده از نمونه مناسبند.

جدول ۴-۷ تکنیکهای آزمایش سختی

آزمایش	اثرگذارنده	تصویر از پهلو	تصویر از بالا	نیرو	فرمول سختی [a]
برینل	کره فولادی یا کاربید تنگستن با قطر ۱۰mm			P	$HB = \frac{۲P}{\pi D[D - \sqrt{D^۲ - d^۲}]}$
میکروسختی ویکرز	هرم الماسی			P	$HV = \frac{۱/۸۵۴P}{d_۱^۲}$
میکروسختی نوپ	هرم الماسی			P	$HK = \frac{۱۴/۲P}{l^۲}$
راکول و راکول سطحی	مخروط الماسی کره‌های فولادی به قطر $\frac{۱}{۲}$، $\frac{۱}{۴}$، $\frac{۱}{۸}$ و $\frac{۱}{۱۶}$ اینچ			راکول: ۶۰ kg، ۱۰۰ kg، ۱۵۰ kg راکول سطحی: ۱۵ kg، ۳۰ kg، ۴۵ kg	

a) برای فرمول سختی داده شده در جدول ، P (نیروی اعمال شده) برحسب کیلوگرم بوده ولی D ، d ، $d_۱$ و l برحسب میلی‌متر هستند.

Rockwell C Scale]	Brinell Hardness	Vickers Hardness	Tensile Strength (approx.)		Rockwell C Scale	Brinell Hardness	Vickers Hardness	Tensile Strength (approx.)	
Brale Penetrator	10mm Tungsten Carbide Ball	Pyramidic Diamond			Brale Penetrator	10mm Tungsten Carbide Ball	Pyramidic Diamond		
150kgf	3,000kgf	10kgf	ksi	kg/mm_	150kgf	3,000kgf	10kgf	ksi	kg/mm_
67	-	900	-	-	43	400	423	201	141
66	-	865	-	-	42	390	412	196	138
65	739	832	-	-	41	381	402	191	134
64	722	800	-	-	40	371	392	186	131
63	705	772	-	-	39	362	382	181	127
62	688	746	-	-	38	353	372	176	124
61	670	720	-	-	37	344	363	172	121
60	654	697	-	-	36	336	354	167	118
59	634	674	329	232	35	327	345	163	114
58	615	653	319	224	34	319	336	159	112
57	595	633	307	216	33	311	327	154	109
56	577	613	297	209	32	301	318	149	105
55	560	595	288	202	31	294	310	146	102
54	543	577	279	196	30	286	302	142	99
53	525	560	269	189	29	279	294	138	97
52	512	544	262	184	28	271	286	134	94
51	496	528	253	178	27	264	279	130	92
50	481	513	245	172	26	258	272	127	89
49	469	498	238	167	25	253	266	125	88
48	455	484	231	162	24	247	260	122	85
47	443	471	224	158	23	243	254	120	84
46	432	458	218	153	22	237	248	116	82
45	421	446	212	149	21	231	243	113	80
44	409	434	206	145	20	226	238	111	78

پیوستگی سختی با استحکام

استحکام کششی و سختی هر دو بیانگر مقاومت فلز در برابر تغییر شکل پلاستیک هستند، در نتیجه این دو به طور تقریبی به یکدیگر وابسته‌اند.

روابط تجربی:

$$\mathrm{TS\ (MPa)} = \begin{cases} 3.55 \cdot HB & (HB \leq 175) \\ 3.38 \cdot HB & (HB > 175) \end{cases}$$

$$\mathrm{TS\ (psi)} = \begin{cases} 515 \cdot HB & (HB \leq 175) \\ 490 \cdot HB & (HB > 175) \end{cases}$$

پیوستگی سختی با استحکام