اصول سختی سنجی و کاربردهای آن

کامران خداپرستی

واژه های کلیدی: سختی، سختی سنجی، برینل، ویکرز، راکول، آزمون

پیشگفتار

آزمون بخش اساسی هر فعالیت مهندسی است. در بسیاری از مراحل فرآیند پیچیده تولید مواد مهندسی از شکل دادن این مواد و ساخت قطعه گرفته تا در اتصال این قطعات و ایجاد یک فرآورده مهندسی، بازرسی و آزمون انجام می شود. نیاز به آزمون با پایان یافتن تولید از بین نمی رود و لازم است محصول در طول عمر کاریش مورد بازبینی و آزمون قرار گیرد تا تغییرات احتمالی ایجاد شده در آن مانند آسیبهای مربوط به خوردگی و خستگی مشخص گردد.

انواع آزمونهای مورد استفاده را می توان به دو دسته کلی: الف) آزمونهای تعیین خواص مواد و ب) آزمونهای تعیین درستی مواد یا قطعات جای داد. آزمونهای دسته اول عموما مخرب بوده و روی نمونه های مواد انجام می شوند اما آزمونهای دسته دوم عموما ماهیت غیر مخرب دارند.

دامنه خواص قابل بررسی در مواد بسیار گسترده است؛ از میان اینها می توان به بدست آوردن استحکام تسلیم، استحکام کششی، فشاری و برشی در دمای محیط و دیگر دماها، اندازه گیری سفتی، سختی و استحکام ضربه ای، بررسی ریز ساختار، محاسبه و بررسی خواص تابع زمان مانند پدیده های خستگی، خزش، مقاومت به اکسید شدن، مقاومت به انواع خوردگی و ... را نام برد. ارزیابی تمام این خواص برای هر ماده بسیار وقت گیر و پرهزینه است و مهندس باید مشخص کند کدام ویژگی ها برای کاربرد مورد نظر دارای اهمیت هستند.

در این نوشتار تلاش بر این است تا ضمن معرفی سختی، به جنبه های مختلف آزمون سختی سنجی که روشی در دسترس، سریع، ارزان و بسیار پرکاربرد برای بررسی خواص مواد و نیز بازرسی و آزمون قطعات است، پرداخته شده و انواع سختی سنجی، روشهای انجام آزمون و نکات عملی مرتبط با آن، معرفی شوند.

مفهوم سختی

هر یک از ما از دوران کودکی با واژه سختی آشنا بوده‌ایم و به آن به عنوان موضوع ساده‌ای نگاه می‌کردیم. اگر از دوستانمان بخواهیم که سختی را تعریف کنند، بعضی‌ها ماده‌ای را سخت می‌دانند که در مقابل سایش مقاوم باشد و بعضی دیگر مقاومت در مقابل خمش و نفوذ را معیار سختی می‌دانند. از سوی دیگر گروهی ماده ای را سخت می‌دانند که بتواند مواد دیگر را در اثر ضربه بشکند و یا روی آن خراش ایجاد کند. به این ترتیب از پاسخهای گوناگونی که دریافت می‌کنیم در می یابیم که تعاریف متفاوتی نسبت به سختی مواد وجود دارد.

سختی ویژگی ذاتی و بنیادی یک ماده نیست. برای واژه سختی می توان بیش از یک معنی در نظر گرفت؛ می توان آن را مقاومت ماده در برابر سایش یا مقاومت در مقابل تغییر شکل مومسان(تغییر فرم دائمی یا پلاستیک) موضعی، دانست. روشهای گوناگون آزمون سختی سنجی بر اندازه گیری یکی از این دو ویژگی ماده استوار است؛ البته انواع آزمونهایی که بیانگر تغییر شکل مومسان موضعی هستند را فقط می توان برای موادی به کار برد که قابلیت تغییر شکل مومسان داشته باشند یعنی فلزات و پلاستیکهای گرمانرم(ترمو پلاست). این آزمونها از نوع نفوذی هستند و ممکن است استاتیک(ایستا) یا دینامیک(پویا) باشند. در آزمونهای فروکردنی استاتیک که متداولتر هستند، حفره ای با استفاده از نیرویی معین در قطعه ایجاد شده و ابعادش اندازه گیری می شود. هر چه حفره ایجاد شده در شرایط استاندارد، بزرگتر باشد، ماده نرمتر است و برعکس. در آزمونهای نفوذی دینامیک، پرتابه ای که آزادانه رها می شود به سطح ماده برخورد می کند. بخشی از انرژی پرتابه برخورد کننده صرف تغییر شکل مومسان ماده شده و باقیمانده آن موجب برگشتن وزنه از سطح می شود. ماده سخت انرژی زیادی جذب نمی کند زیرا تغییر شکل مومسان آن چشمگیر نیست، در نتیجه پرتابه تا ارتفاع بیشتری بر می گردد. این آزمون علاوه بر برخی فلزات، برای ارزیابی گروه دیگری از مواد، که معمولا خیلی سخت تلقی نمی شوند یعنی لاستیکها به کار می روند. هنگامی که پرتابه با لاستیک برخورد می کند، آهنگ بازیافت بسیار سریع کرنش کشسان موجب زیاد شدن ارتفاع بازگشت پرتابه می شود. بر خلاف این تناقض ظاهری، که ارتفاع بازگشت پرتابه برای یک ماده نرم زیاد است و به معنی سختی بالا می باشد، این آزمون با موفقیت برای تعیین خواص مواد لاستیک گونه به کار می رود.

آزمونهای سختی سنجی از نوع فروکردنی به مقیاس وسیعی برای بررسی نمونه های فلزی به کار می روند. گفتنی است نتایج سختی سنجی می تواند شاخصی از استحکام فلز نیز باشد زیرا رابطه های تجربی فرموله شده ای بین مقادیر سختی و استحکام کششی در مورد برخی فلزات وجود دارد. افزون بر اینها، نتایج سختی می تواند روش مناسبی برای بررسی میزان تاثیر عملیات حرارتی باشد.

آزمونهای نفوذی استاتیک

در تمام آزمونهای نفوذی استاتیک، نوعی فرو رونده تحت اثر نیروی خارجی به سطح نمونه مورد آزمایش فرو برده می شود. فرو رونده موجب تغییر شکل موضعی ماده می شود. بخشی از تغییر شکل ماده در اثر اعمال نیرو، کشسان و بخش دیگری از آن مومسان است. پس از برداشتن نیرو، کرنش کشسان ایجاد شده در ماده برطرف می شود ولی کرنش مومسان برجای مانده و اثری دائمی روی سطح قطعه باقی می گذارد. یکی از ابعاد این فرورفتگی(عمق یا طول) اندازه گیری شده و برای تعیین عدد سختی به کار می رود. اندازه فرورفتگی یعنی مقدار کرنش مومسان با ذات ماده مورد آزمایش، اندازه و نوع فرورونده و همچنین مقدار نیروی وارد شده تغییر می کند. نکته مهم این است که باید عمق فرورفتگی در مقایسه با ضخامت قطعه مورد آزمایش کوچک باشد در غیر اینصورت ممکن است ناحیه تغییر شکل کشسان و حتی ناحیه تغییر شکل مومسان از تمام عمق قطعه گذشته و با میز دستگاه وارد عمل شده و در نهایت منجر به عدد سختی نادرست گردد. به عنوان یک قاعده کلی، عمق حفره ایجاد شده نباید از یک هشتم ضخامت نمونه مورد آزمایش تجاوز کند. به همین ترتیب محل ایجاد فرورفتگی نباید نزدیک لبه نمونه یا نزدیک یک فرورفتگی دیگر باشد چرا که در این حالت نیز جواب نادرست خواهد بود.

بسیاری از آلیاژهای فلزی ساختار همگن ندارند و ممکن است با یکبار اندازه گیری سختی، نتیجه ای که بیانگر خاصیت کل ماده باشد به دست نیاید؛ بنابراین اندازه گیری باید در چند نوبت انجام شود. غالبا آزمایش را حداقل 3 بار انجام می دهند. اگر نتیجه این سه آزمون به قدر کافی به هم نزدیک نباشد، باید آزمونهای بیشتری انجام داد.

بعضی آلیاژها شامل دو فاز نرم و سخت هستند و ایجاد فرورفتگیهای کوچک ممکن است منجر به وجود پراکندگی زیاد در نتایج آزمون گردد. به طور کلی هر چه فرورفتگی وسیعتر و عمق آن بیشتر باشد نتیجه آزمایش به میانگین سختی ماده نزدیکتر است. البته ممکن است در بعضی موارد، ایجاد فرو رفتگی عمیق غیر عملی یا نامعقول باشد. اگر ماده به شکل یک قطعه نازک یا بسیار کوچک باشد، ایجاد فرورفتگی عمیق غیر عملی است، همچنین اگر هدف تعیین سختی پوسته یک قطعه سخت شده پوسته ای (سخت شده با عملیات سخت گردانی سطحی) باشد، تنها ایجاد فرورفتگیهای کوچک می تواند مفهوم داشته باشد.

راکول[1] ، برینل[2] ، نوپ[3] و ویکرز[4] روش هایی هستند که غالبا برای تعیین سختی استفاده می شوند. اصل بنیادی به کار گرفته شده در تمام این آزمایشها، مجموعه نیرو هایی هستند که به یک فرورونده به منظور تعیین مقاومت ماده در برابر نفوذ، اعمال می شوند. اگر ماده سخت باشد، فرورفتگی ای کوچک و کم عمق حاصل می شود در حالی که اگر ماده نرم باشد، فرورفتگی ای کاملا بزرگ و عمیق حاصل خواهد شد. این آزمایشها اغلب بر اساس یکی از دو عبارت زیر دسته بندی می شوند :

1- اندازه نیروی اعمالی در آزمایش 2- روش اندازه گیری استفاده شده

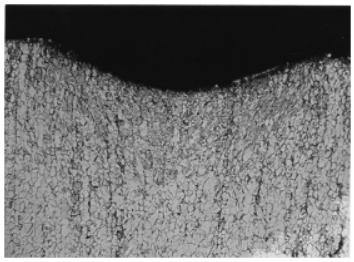
آزمایش ماکرو به آزمایشی اطلاق می شود که در آن نیرویی بیش از 1 کیلوگرم اعمال شود و در حالت مشابه آزمایش میکرو (میکرو سختی- ریز سختی-سختی سنجی میکرو) به آزمایشی گفته می شود که نیرویی کمتر از 1 کیلوگرم اعمال شود. آزمایشگر های راکول و برینل در دسته آزمایشهای ماکرو قرار می گیرند در حالی که آزمایشگر های نوپ برای ریز سختی سنجی(میکرو سختی) استفاده می شوند و آزمایشگر های ویکرز ، هم برای ماکرو و هم برای میکرو بکار گرفته می شوند.

روش های اندازه گیری موجود شامل مشاهده بصری فرورفتگی یا عمق سنجی می شود. آزمایشگر های راکول قادر به تعیین عمق فرورفتگی هستند در حالی که آزمایشگر های برینل، نوپ و ویکرز نیاز به قطرسنجی فرورفتگی دارند.

هنگام سختی سنجی باید توجه داشت سطحی که سختی آن اندازه گیری می شود، بر خط نیروی فرو رونده عمود بوده و موقعیت نمونه به گونه ای باشد که هنگام آزمایش حرکت نکند. در سختی سنجی ماکرو، معمولا یک سطح خوب سنگ زده شده کافی است و لازم است هر گونه پوسته، زنگ زدگی و آلودگی از سطح آن زدوده شود. در سختی سنجی میکرو سطح نمونه باید پرداخت بسیار خوب داشته باشد. گفتنی است نتایج آزمونهای سختی سنجی میکرو عموما کمتر از نتایج حاصل از فرورفتگیهای بزرگتر قابل اعتمادند. معمولا نتایج این آزمایشها سختی بالاتری را نشان می دهند.

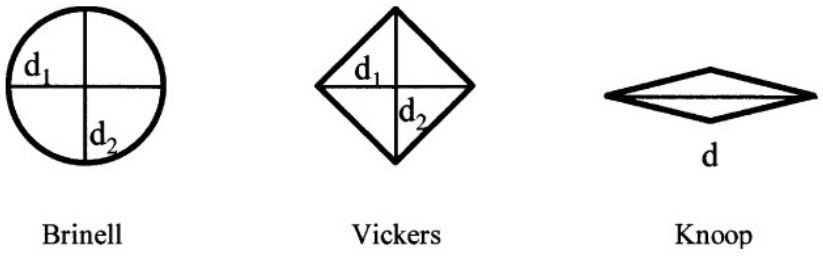
اصول کار

وقتی نیرو از طریق تماس با فرورونده به نمونه وارد می شود، نمونه تسلیم می شود. پس از اینکه نیرو برداشته شد، ترمیم شکل اندکی در ناحیه پلاستیکی در خلاف جهت جریان اولیه اما بیش از یک حجم کوچک انتظار می رود. پس از برداشتن نیرو به دلیل اینکه ترمیم پلاستیکی بطور کامل انجام نمی شود، تنش های دو محوری پسماند، در صفحاتی موازی با صفحات آزاد و بدون تنش، باقی می ماند. مقدار سختی با توجه به میزان تغییر فرم دائمی یا جریان پلاستیک ماده بر اثر نیروی وارده، محاسبه می شود. کمیت تغییر فرم بر مبنای سطح یا عمق فرورفتگی معین می شود. روابط عددی با هم نسبت عکس دارند از این رو با افزایش اندازه و عمق فرورفتگی ، مقدار سختی کاهش می یابد.



شکل 1. تغییر فرم و سیلان ماده حاصل از فرورفتگی در یک نمونه برنجی. بزرگنمایی 100 برابر

شکل 1، تنش و جریان را که در ناحیه اطراف فرورفتگی مشاهده می شود، نشان می دهد. مقادیر سختی تنها اگر تحت آزمایش یکسان قرار بگیرند، می توانند بطور مستقیم مقایسه شوند چرا که هندسه فرورونده و نیروی اعمالی نتیجه آزمایش را تحت تاثیر قرار می دهند. برای هر یک از انواع آزمون سختی بکار گرفته شده، از یک معادله مجزا برای تبدیل ابعاد، عمق، یا قطر اندازه گیری شده، به مقدار سختی استفاده می شود.(تصاویر شکل شماره 2)



شکل 2. مقادیر سختی بر اساس قطر فرورفتگی (d) که برای آزمونهای مختلف بطور متفاوت اندازه گیری می شود، محاسبه می شوند.

آزمون سختی برینل

اولین آزمون سختی استاندارد شده از نوع نفوذی که با استقبال گسترده ای همراه بود، توسط یک مهندس مکانیک سوئدی به نام یوهان آگوست برینل در سال 1900 ارائه شد. این آزمون را می توان بر اساس **EN ISO 6506-1** یا **ASTM E 10** انجام داد. استاندارد ملی انجام این آزمون نیز 1-7809 است که در سال 1383 منتشر شده است.(استانداردهای ملی ایران به رایگان از وبسایت موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به آدرس **www.isiri.org** قابل دریافت است) آزمون سختی برینل از ایجاد فرورفتگی در سطح فلز بوسیله یک گلوله (به آن گوی یا ساچمه هم گفته می شود) با قطر 10 میلیمتر تحت اثر نیروی 3000 کیلوگرم نیرو که به مدت 10 تا 15 ثانیه روی نمونه اعمال می شود، استفاده می کند. (3000 کیلوگرم نیرو برای فولاد و چدن مناسب است و برای فلزات و آلیاژهای نرمتر غیر آهنی از نیروهای کمتر استفاده می گردد) قطر فرورفتگی پس از برداشته شدن نیرو بوسیله میکروسکوپ مدرج اندازه گیری می شود. سپس میانگین قطرهای عمود بر هم فرورفتگی را باید به دست آورد. اگر فرورونده فولادی باشد، نماد **HBS** یا **HB** به کار می رود و در صورت استفاده از فرو رونده با جنس کاربید تنگستن از نماد **HBW** برای نمایش سختی بهره می گیرند. عدد سختی برینل از تقسیم نیروی اعمالی بر مساحت سطح فرورفتگی بدست می آید که بیان فرمولی آن، بصورت زیر است :

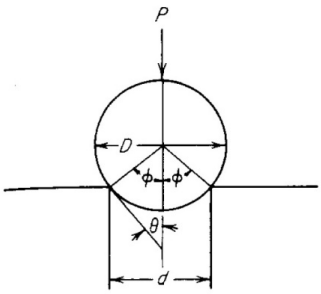
$$\textbf{HB or HBS or HBW} = \frac{2F}{pD\left(D-\sqrt{D^2-d^2}\right)} \quad = \frac{F}{pDt}$$

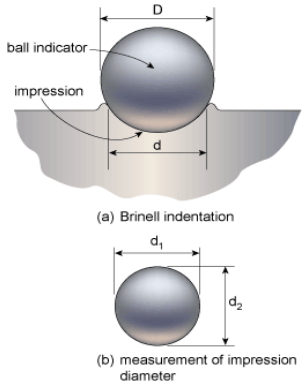
که در آن **F** نیروی اعمال شده بر حسب کیلوگرم نیرو و **D** قطر گلوله بر حسب میلیمتر و **d** قطر فرورفتگی بر حسب میلیمتر و **t** عمق فرورفتگی بر حسب میلیمتر است(اگر بخواهیم با سیستم **SI** کار کنیم یعنی نیرو را با واحد نیوتن محاسبه کنیم فقط لازم است کسر را در عدد **0.102** ضرب کنیم). با جایگذاری مقدار **d** با زوایای شکل 3 در رابطه اولی ، بیان دیگری از عدد سختی برینل بدست می آید:

$$\textbf{HB or HBS or HBW} = \frac{2F}{pD^2\left(1-Cos\,j\right)}$$

به منظور بدست آوردن مقدار قبلی سختی بوسیله نیرو یا قطر گلوله غیراستاندارد، لازم است که فرورفتگی های با شکل هندسی مشابه ایجاد کنیم. رابطه دوم نشان می دهد که میزان نیرو و قطر گلوله باید در نسبت های زیر تغییر کنند :

$$\frac{F_1}{D_1^{\,2}} = \frac{F_2}{D_2^{\,2}}$$





شکل3 پارامترهای اصلی آزمون برینل و تصویر ابداع کننده این روش

در مجموع می توان گفت آزمون سختی سنجی به روش برینل چند اشکال دارد؛ نخست آنکه فرورفتگی های ایجاد شده توسط یک فرورونده کروی از نظر شکل هندسی مشابه هم نیستند. به عبارت دیگر دو فرورفتگی عمیق و کم عمق که با دو نیروی متفاوت ایجاد می شوند دارای الگوی سیلان متفاوت بوده و بنابراین عدد سختی حاصل از آزمون برینل، مستقل از نیروی وارد شده نیست. یعنی اگر دو آزمایش سختی برینل با دو نیروی متفاوت روی یک ماده انجام شود، عدد سختی حاصل از نیروی زیادتر با عدد سختی حاصل از نیروی کمتر، متفاوت است. به همین دلیل برخی استانداردها (مثلا **BS 240** یا **ISO 6506**) مقادیر پیشنهادی $\mathbf{F/D^2}$ را برای مواد مختلف ارائه داده اند. این نسبت برای انواع فولاد و چدن 30، برای آلیاژهای مس و آلومینیوم 10 و برای سرب و قلع عدد 1 پیشنهاد شده است.

نکته دیگر در مورد این آزمون این است که در یک فرورفتگی کم عمق، قطر **d** در مقایسه با قطر **D** کوچک است. زاویه بین سطح نمونه و مماس بر گلوله بسیار کوچک بوده و مرز فرورفتگی به خوبی زیر میکروسکوپ قابل تشخیص نبوده و نمی توان قطر فرورفتگی را به دقت اندازه گرفت. از سوی دیگر در یک فرورفتگی عمیق، حدود حفره به خوبی مشخص است، ولی با اینکه می توان قطر را به دقت اندازه گیری کرد، افزایش چشمگیر عمق حفره(ودر نتیجه سطح تماس) موجب افزایش زیادی در **d** نمی شود. این امر نیز به نوبه خود موجب کاهش دقت اندازه گیری سختی می شود. به این دلایل، مقادیر دقیق سختی برینل فقط در صورتی به دست می آید که قطر فرورفتگی(**d**) در محدوده **0.25D** و **0.5D** باشد.

شایان ذکر است مقادیر سختی برینل و سختی ویکرز تا سختی 300 با هم قابل مقایسه هستند ولی برای مقادیر سختی بالاتر، تفاوت بین اعداد بدست آمده از دو روش آزمون، برای یک ماده یکسان، زیادتر می شود.

با وجود نقاط ضعف اشاره شده، آزمون سختی برینل هنوز به طور گسترده به کار می رود. در صورت استفاده از فرو رونده 10 میلیمتری، حفره ایجاد شده بزرگ بوده و در نتیجه عدد سختی می تواند بیانگر سختی میانگین ماده باشد. از آن سو معمولا وجود یک حفره عمیق، نامطلوب است. برای حل این مشکل، دستگاه های سختی سنج، فرورونده های 1 و 2 میلیمتری نیز دارند. به یاد داشته باشیم بدون توجه به اندازه فرورونده هنوز رعایت نسبتهای $\mathbf{F/D^2}$ ضروری است.

Material	Hardness
Softwood (e.g., pine)	**1.6**
Hardwood	**2.6–7.0**
Aluminum	**15**
Copper	**35**
Mild steel	**120**
18-8 (304) stainless steel annealed	**200**
Glass	**1550**
Hardened tool steel	**1500–1900**
Rhenium diboride	**4600**

جدول1. سختی مواد مختلف در مقیاس برینل

نکات انجام آزمون برینل و روش گزارش دهی نتایج

اگر فرو رونده (گلوله) فولادی باشد، این آزمون برای موادی با سختی بالاتر از 450 برینل نباید انجام شود زیرا گلوله تغییر شکل می دهد. برای مـواد سخت باید از گلوله با جنس کاربید تنگستن استفاده کرد.

سطح آزمونه[5] باید کاملا صاف(صیقلی) و عاری از هر گونه آلودگی نظیر پوسته اکسیدی ، مواد خارجی و بویژه مواد روغنی باشد(به جز مواردی که در استاندارد محصول ذکر شده باشد). آماده سازی نمونه باید طوری انجام شود که انتهای قطر اثر سختی به روشنی قابـل تـشخیص باشـند. در ضـمن هنگام آماده سازی دقت شود از ایجاد هر گونه تغییر در سختی سطح فلز تا حد امکان جلوگیری شود بعنوان مثال سطح آزمونـه گـرم نـشده یـا کـار سخت نگردد.

ضخامت آزمونه نباید کمتر از 10 برابر عمق فرو رفتگی باشد.(مقادیر حداقل ضخامت آزمونه که متناسب با قطر متوسط فرو رفتگی اسـت در پیوسـت ب استاندارد ملی ایران (1-7809) و نیز پیوست استاندارد **ISO 6506-1** آمده است در ضمن برای دیدن ارتباط نیروی آزمـون و ضـخامت آزمونـه می توان به جدول 5 استاندارد **ASTM E 10** مراجعه کرد) همچنین پس از آزمون هیچگونه تغییر شکلی در پشت آزمونه نباید مـشاهده گـردد. در مورد نمونه هایی که دارای مقطع کوچک و یا شکل نامنظم هستند باید از نگهدارنده مناسب استفاده نمود. در این حالتها اگـر از قـالبگیری یـا مانـت قطعه در رزینهای مخصوص استفاده شود باید نوع مانت به گونه ای باشد که بر اثر اعمال نیروی فرورونده تغییر شکل ندهد. عموما آزمون در دمـای محیط در محدوده 10 تا 35 درجه سانتیگراد انجام می شود.

باید دقت گردد که آماده سازی یا مانت طوری باشد که سطح نمونه عمود بر محور فرو رونده گـردد(بـا رواداری1± درجـه). آزمونـه روی تکیـه گـاه دستگاه قرار می گیرد. باید دقت شود سطح تکیه گاه عاری از مواد خارجی نظیر پوسته، روغن، براده و غیره باشد. ایـن نکتـه بـسیار مهـم اسـت کـه آزمونه بطور محکم و ثابت بر روی تکیه گاه قرار داده شود تا ضمن آزمون جابجا نگردد. توسط اهرم دستگاه نمونه بالا آورده می شود تا فـرو رونـده در تماس با سطح آزمونه قرار گرفته سپس با فشار دادن دکمه **start** نیرو بر روی نمونه اعمال می شود. باید توجه داشت که در حـین اعمـال نیـرو نباید به دستگاه ضربه وارد شود یا تحت لرزش باشد. اهرم سندان در جهت معکوس پـایین آورده شـده و نمونـه جهـت خوانـدن قطـر اثـر بـه زیـر میکروسکوپ دستگاه منتقل می‌شود. سعی شود تا حد امکان اثر سختی در مرکز میکروسکوپ باشد. عمل فوکاس کردن توسط اهرم سندان صـورت می گیرد. دو تیغه درون چشمی میکروسکوپ تعبیه شده اند. تیغه ها طوری تنظیم می شوند که درست بر لبه های فرورفتگی منطبـق شـوند. فاصـله بین دو تیغه از روی اندازه خوان عددی متصل به چشمی خوانده می شود. همین کار در جهت عمود دیگر انجام می شود و میانگین دو عدد محاسـبه می گردد. این عدد، عدد چشمی نام دارد که با استفاده از جدول موجود در کاتالوگ دستگاه یا استاندارد مربوطه، عدد چشمی به عـدد سـختی برینـل تبدیل می گردد. اینکار بین 3 تا 5 بار تکرار گردیده و میانگین گرفته می شود. فاصله مرکز هر فرو رفتگی از لبه آزمونه باید حداقل 2/5 برابـر قطـر متوسط فرو رفتگی و فاصله بین مراکز دو فرو رفتگی مجاور باید حداقل 3 برابر قطر متوسط فرو رفتگی باشد. اگر اندازه دو فرو رفتگی مجاور بـا هـم متفاوت باشد، در مورد رعایت فاصله برای ایجاد فرو رفتگی بعدی می بایست قطر فرو رفتگی بزرگتر را ملاک عمل قرار داد. قبل از انجام هر سـری آزمایش و یا هنگامی که از آخرین آزمون 24 ساعت گذشته باشد و نیز پس از تعویض فرورونده، دو عدد اول ثبت شده پس از چنین حالاتی نباید مـد نظر قرار گیرند.

درصورتیکه نمونه استوانه ای محدب باشد باید عدد سختی بدست آمده با توجه به ضرایب تصحیح مندرج در جداول استاندارد تصحیح گردد. در مورد سطوح کروی یا مقعر آزمون باید بر اساس آزمونهای مقایسه ای و یا یک توافق ویژه میان درخواست کننده و آزمایشگاه انجام گیرد. در هنگام آزمون نیز بهتر است از نگهدارنده با شیار **V** استفاده شود(شکل 8 را ببینید).

در مورد مواد ناهمسانگرد[6] مثلا موادی که کار سرد زیادی روی آنها انجام شده، ممکن است تفاوت میان اندازه قطرهای فرورفتگی مشاهده گردد. در اینحالت جهت نمونه باید عوض شود **(reoriented)** تا قطرهای اثر جدید سختی، تقریبا برابر باشند. (زاویه بین قطرهای فرورفتگی و جهـت کـار سرد را باید تقریبا 45 درجه اختیار نمود).

سختی برینل بصورت **HBW** نشان داده می شود. زمانی که تحت شرایط استاندارد از گلوله های فولادی استفاده گردد، سختی را بـصورت **HB** یـا **HBS** نمایش می دهند. پیش از عبارت **HBW** میزان سختی و پس از آن از شاخصهای تکمیلی استفاده می شود که هر یک بیانگر یکی از مـوارد زیر هستند:

الف) قطر فرورونده بر حسب میلیمتر ب) نشانه ای که بیانگر نیروی آزمون (بار اعمالی) است پ) مدت زمان اعمال نیرو اگر 10 تا 15 ثانیه نباشد.

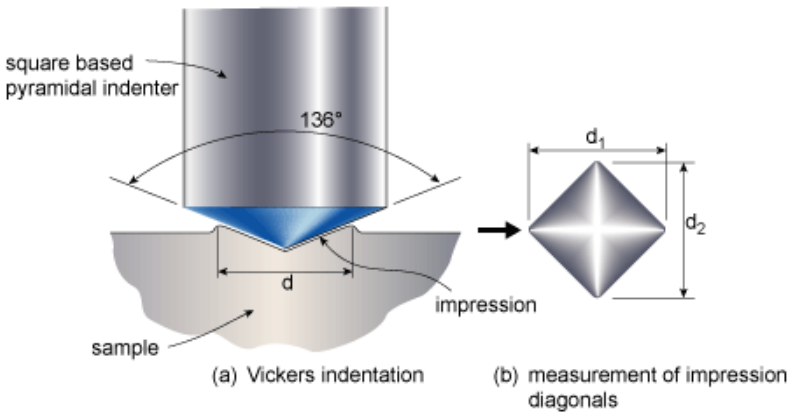
به این ترتیب در صورتی که سختی به صورت **350HBW 5/750** گزارش شده باشد به معنی سختی 350 برینل، بدست آمده توسـط سـاچمه ای با قطر 5 میلیمتر و نیروی اعمالی 750 کیلوگرم نیرو نیرو (7 کیلو نیوتن) می باشد. از سوی دیگر **600HBW 1/30/20** نشانگر سختی 600 برینل بدست آمده توسط ساچمه ای با قطر 1 میلیمتر و نیروی اعمالی 30 کیلوگرم نیرو نیرو (294 نیوتن) برای مدت زمان 20 ثانیه می باشد.

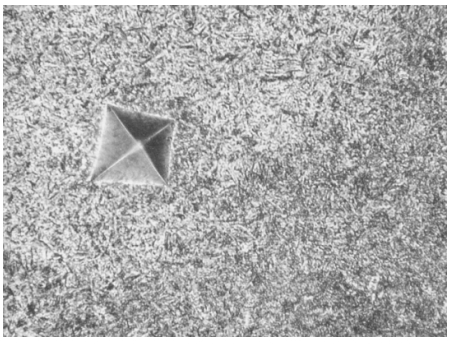
آزمون سختی ویکرز

این آزمایش در سال 1923 توسط اسمیت و ساندلند در شرکت ویکرز لیمیتد انگلستان به عنوان جایگزینی برای سختی برینل توسعه یافت و مورد استفاده قرار گرفت. استانداردهای گوناگونی برای انجام این آزمون وجود دارند که از جمله می توان به **ISO 6507-1** و **EN 23878** یا **ASTM E 92** اشاره کرد. موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی کشورمان نیز استاندارد 7810-1 را به این منظور تدوین کرده است. در این آزمون از یک هرم الماسی مربع القاعده به عنوان فرورونده استفاده می شود. زاویه بین وجوه مقابل هرم 136درجه است.(شکل 4) این زاویه به این خاطر انتخاب شد که به مطلوب ترین نسبت قطر فرورفتگی به قطر گلوله در آزمون سختی برینل نزدیک است. عدد سختی هرم الماسی(**DPH**) یا عدد سختی ویکرز(**VHN**یا **VPH** یا **HV**) [7] تحت عنوان نیرو تقسیم بر مساحت سطح فرورفتگی تعریف می شود. در آزمایش، این سطح از طریق اندازه گیری میکروسکوپی طول قطرهای فرورفتگی محاسبه شده است. **HV** را می توان از تساوی زیر بدست آورد:

$$HV = \frac{2FSin\frac{q}{2}}{d^2} = \frac{1.854F}{d^2}$$

که که در آن **F** نیروی اعمال شده بر حسب کیلوگرم نیرو و **d** میانگین طول اقطار بر حسب میلیمتر و **θ** زاویه بین وجوه مخالف مقابل هم فرورونده بوده که 136درجه است.





شکل 4. آزمون سختی سنجی ویکرز و یک نمونه اثر واقعی

شکل5. دستگاه سختی سنج ویکرز

امتیاز آزمون ویکرز در مقایسه با برینل این است که بدون توجه به اندازه فرورفتگی، شکل هندسی حفره های مربع القاعده آزمون ویکرز همیشه یکسان است؛ در نتیجه الگوی سیلان مومسان برای حفره های کم عمق و عمیق مشابه است و بنابراین سختی محاسبه شده مستقل از اندازه نیروی وارده خواهد بود.

برای دستیابی به بهترین جواب آزمون سختی، نیروی فرورونده باید طوری انتخاب گردد که قطر فرورفتگی حدود نیم میلیمتر باشد. ضخامت آزمونه نباید کمتر از 1/5 برابر **D** باشد. نکته مهم دیگر، انتخاب نیروی مناسب برای مواد مختلف است. فولاد و چدن با نیروی 30 کیلوگرم نیرو، آلیاژهای آلومینیوم با 5 کیلوگرم نیرو و آلیاژهای مس با نیروی 10 کیلوگرم نیرو آزمون می شوند. شایان ذکر است که برخی استانداردها یا دستورالعملها برای آزمون قطعات خاص، الزامات ویژه ای مشخص می کنند مثلا استاندارد **EN ISO 15614-1** که برای ارزیابی نمونه های فولادی جوشکاری شده بر اساس **WPS** به کار می رود(نمونه**PQR**) مشخص کرده است که باید **10 HV** روی فلز جوش، فلز پایه و ناحیه **HAZ** بر اساس استاندارد **EN 1043-1** انجام شود.

نکات انجام آزمون ویکرز و روش گزارش دهی نتایج

نکات آماده سازی نمونه و ضخامت آزمونه و سایر شرایط مشابه روش برینل است. درباره روش گزارش دهی نتایج گفتنی است سختی ویکرز با نماد **HV** مشخص می شود که پیش از آن عدد سختی و پس از آن مقادیر زیر می آیند:

الف) عددی که نشانگر نیروی آزمون است ب) مدت زمان اعمال نیرو اگر 10 تا 15 ثانیه نباشد.

عبارت **640 HV 30** بیانگر سختی به میزان 640 ویکرز با اعمال نیروی 30 کیلوگرم نیرو به مدت 10 تا 15 ثانیه است. به عنوان مثال دیگر عبارت **640 HV 30/20** بیانگر سختی به میزان 640 ویکرز با اعمال نیروی 30 کیلوگرم نیرو به مدت 20 ثانیه می باشد.

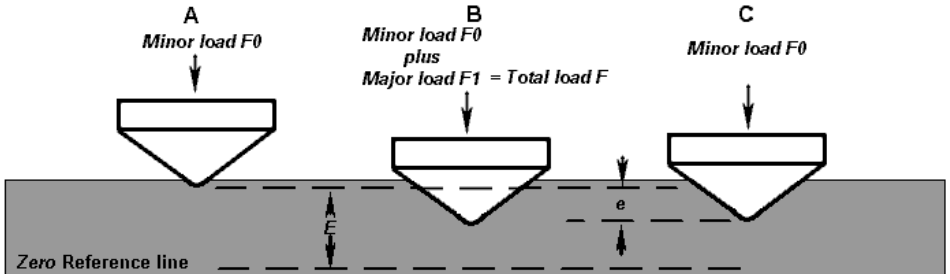
آزمون سختی راکول

این روش سختی سنجی توسط استنلی. پی. راکول آمریکایی در 1919 ابداع شد. از استانداردهای انجام این آزمون می توان به **ISO 6508-1** و **ISO 3738-1** یا **ASTM E 18** اشاره کرد. استاندارد ملی 1-7811 نیز به این منظور موجود است. دستگاه آزمایش راکول، دستگاه آزمایش سریع با خواندن مستقیم است. استقبال گسترده از آن بخاطر سرعت بالای آن، عدم وجود خطای اپراتور در اندازه گیری، توانایی تشخیص کوچکترین تفاوت سختی در فولاد های سخت شده و نیز اندازه کوچک فرورفتگی می باشد. قطعاتی که عملیات حرارتی شده اند با این روش مورد آزمون قرار گرفته و نیاز به آماده سازی سطحی خاصی ندارند(زیرا همانگونه که در جلوتر اشاره می شود این روش از دو مرحله اعمال نیرو استفاده می کند که بار گذاری مرحله اول باعث از بین رفتن اکسیدها و پوسته های سطحی می گردد). این آزمایش از عمق فرورفتگی به عنوان مقیاسی برای سختی استفاده می کند. باید یادمان باشد سیستم اندازه گیری دستگاه بطور عکس عمل می کند به طوری که یک عدد کوچک به معنی عمق زیاد فرورفتگی و در نتیجه سختی کم است به همین ترتیب سختی های بالایی که مربوط به عمق های کم می باشند با اعداد سختی بزرگتری نشان داده می شوند. چندین مجموعه مقیاس سختی راکول وجود دارد زیرا چند فرورونده و چند نیروی استاندارد برای آزمایش به کار می روند. فرو رونده ها گلوله های فولادی سخت شده با قطرهای مختلف یا مخروط الماسی با زاویه راس 120 درجه هستند.(به این نوع فرورونده **brale** نیز می گویند) جدول 2 انواع مقیاسهای راکول و کاربردها را نمایش می دهد. هر یک از مقیاسهای سختی راکول با یکی از حروف **A** یا **B** و غیره مشخص می شوند.

	Scale Symbol	Indenter Type (Ball dimensions indicate diameter.)	Preliminary Force N (kgf)	Total Force N (kgf)	Typical Applications
Regular Rockwell Scales	A	Spheroconical Diamond	98.07 (10)	588.4 (60)	Cemented carbides, thin steel, and shallow case hardened steel.
	B	Ball - 1.588 mm (1/16 in.)	98.07 (10)	980.7 (100)	Copper alloys, soft steels, aluminum alloys, malleable iron, etc.
	C	Spheroconical Diamond	98.07 (10)	1471 (150)	Steel, hard cast irons, pearlitic malleable iron, titanium, deep case hardened steel, and other materials harder than HRB 100.
	D	Spheroconical Diamond	98.07 (10)	980.7 (100)	Thin steel and medium case hardened steel, and pearlitic malleable iron
	E	Ball - 3.175 mm (1/8 in.)	98.07 (10)	980.7 (100)	Cast iron, aluminum and magnesium alloys, and bearing metals
	F	Ball - 1.588 mm (1/16 in.)	98.07 (10)	588.4 (60)	Annealed copper alloys, and thin soft sheet metals.
	G	Ball - 1.588 mm (1/16 in.)	98.07 (10)	1471 (150)	Malleable irons, copper-nickel-zinc and cupro-nickel alloys.
	H	Ball - 3.175 mm (1/8 in.)	98.07 (10)	588.4 (60)	Aluminum, zinc, and lead.
	K	Ball - 3.175 mm (1/8 in.)	98.07 (10)	1471 (150)	Bearing metals and other very soft or thin materials. Use smallest ball and heaviest load that does not give anvil effect.
	L	Ball - 6.350 mm (1/4 in.)	98.07 (10)	588.4 (60)	
	M	Ball - 6.350 mm (1/4 in.)	98.07 (10)	980.7 (100)	
	P	Ball - 6.350 mm (1/4 in.)	98.07 (10)	1471 (150)	
	R	Ball - 12.70 mm (1/2 in.)	98.07 (10)	588.4 (60)	
	S	Ball - 12.70 mm (1/2 in.)	98.07 (10)	980.7 (100)	
	V	Ball - 12.70 mm (1/2 in.)	98.07 (10)	1471 (150)	
Superficial Rockwell Scales	15N	Spheroconical Diamond	29.42 (3)	147.1 (15)	Similar to A, C and D scales, but for thinner gage material or case depth.
	30N	Spheroconical Diamond	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45N	Spheroconical Diamond	29.42 (3)	441.3 (45)	
	15T	Ball - 1.588 mm (1/16 in.)	29.42 (3)	147.1 (15)	Similar to B, F and G scales, but for thinner gage material.
	30T	Ball - 1.588 mm (1/16 in.)	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45T	Ball - 1.588 mm (1/16 in.)	29.42 (3)	441.3 (45)	
	15W	Ball - 3.175 mm (1/8 in.)	29.42 (3)	147.1 (15)	Very soft material.
	30W	Ball - 3.175 mm (1/8 in.)	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45W	Ball - 3.175 mm (1/8 in.)	29.42 (3)	441.3 (45)	
	15X	Ball - 6.350 mm (1/4 in.)	29.42 (3)	147.1 (15)	
	30X	Ball - 6.350 mm (1/4 in.)	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45X	Ball - 6.350 mm (1/4 in.)	29.42 (3)	441.3 (45)	
	15Y	Ball - 12.70 mm (1/2 in.)	29.42 (3)	147.1 (15)	
	30Y	Ball - 12.70 mm (1/2 in.)	29.42 (3)	294.2 (30)	
	45Y	Ball - 12.70 mm (1/2 in.)	29.42 (3)	441.3 (45)	

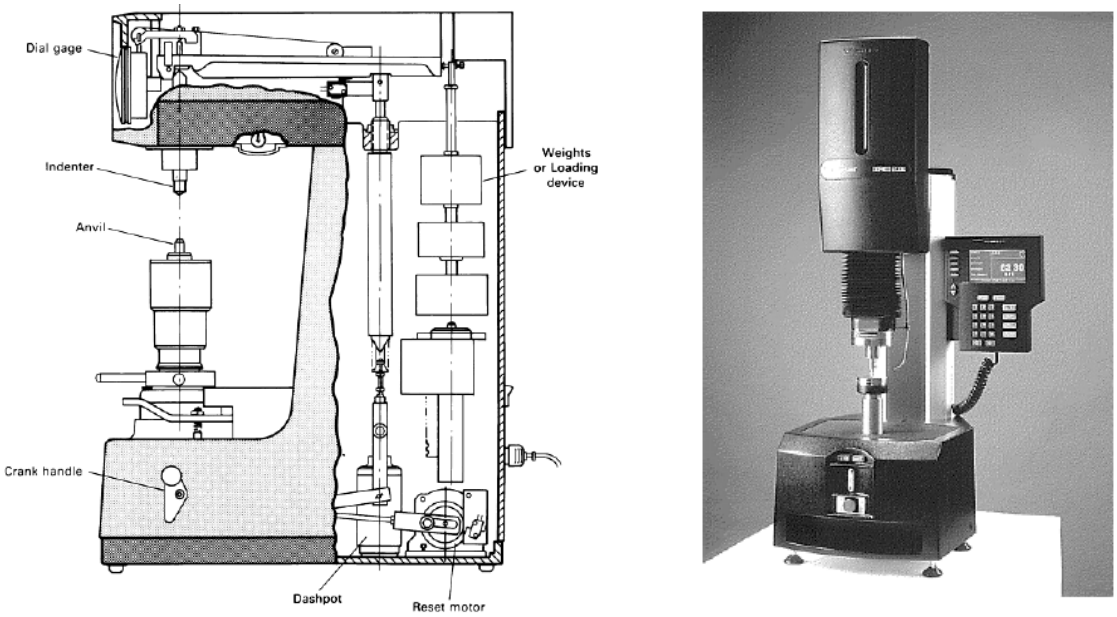
جدول2. انواع مقیاسهای راکول و کاربردها

ابتدا یک نیروی جزئی(کم)[8] به اندازه 10 کیلوگرم وارد می شود و سپس نیروی کلی(زیاد) [9] اعمال می گردد. بدین ترتیب در مقیاس **C** ابتدا نیروی 10 کیلوگرم نیرو وارد شده سپس نیروی کلی 140 کیلوگرم نیرو اعمال می گردد تا نیروی اصلی 150 کیلوگرم نیرو مقیاس **C** وارد شده باشد.(شکل 6 را ببینید)

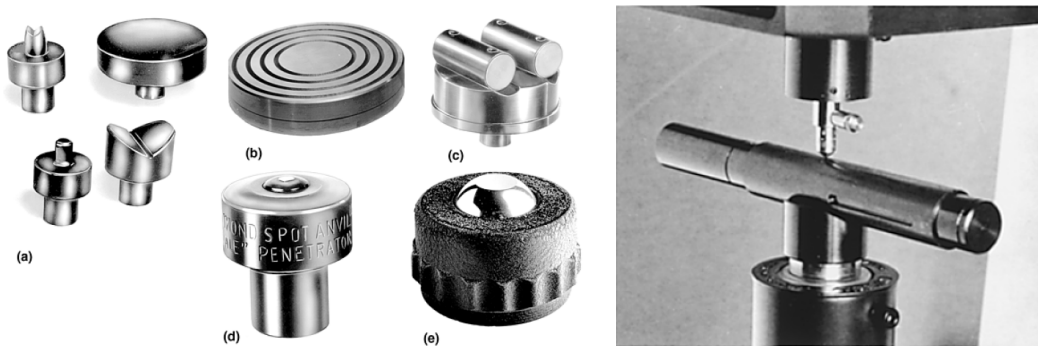


شکل6. پارامترهای آزمون راکول

از آن جایی که آزمون سختی راکول وابسته به نیرو و فرورونده می باشد، لازم است ترکیبی از نیرو و فرورونده مورد استفاده مشخص شود که این مشخص کردن بوسیله پیشوندگذاری اعداد سختی با یک حرف که بیانگر مشخص بودن ترکیب نیرو و فرورونده برای مقیاس سختی بکار گرفته شده است، انجام می شود. عدد سختی راکول بدون پیشوند حرفی، فاقد معنی است. فولاد سخت شده، در مقیاس **C** با فرورونده الماسی و بار اصلی150 کیلوگرم آزمایش می شود. بازه مفید در این مقیاس، از حدود **20HRC** تا **70HRC** می باشد. مواد نرم تر معمولا در مقیاس **B** با گلوله فولادی به قطر 1/6 میلی متر و بار اصلی 100 کیلوگرم آزمون می شوند. بسیاری از مقیاسهای دیگر برای برای مواد گوناگون موجود است که در جدول 2 آمده اند. مقیاسهای مختلف راکول با هم همپوشانی دارند و نکته شایان توجه این است که ترکیب مناسب فرورونده و نیرو برای ماده مورد نظر انتخاب شود. بد نیست بدانیم برخلاف آزمون سختی برینل و ویکرز که واحد **Kg/mm^2** دارند، عدد سختی راکول بدون واحد است. مقیاسهای دیگر سختی راکول نیز وجود دارند. اینها مقیاسهای **N** و**T** و**W** هستند که در آنها نیروهای فرورونده‌گی کمتری اعمال می شود. به اینها روش **superficial** نیز گفته می شود که کاربردشان برای سختی سنجی نمونه های نازک است. تذکر این نکته لازم است که روش انجام این آزمونها نیز دقیقا همانند روش انجام مقیاسهای دیگر راکول اما با نیروی اولیه 3 کیلوگرم نیرو پیش از اعمال بار اصلی است. جدول 2 این مقیاسها را معرفی کرده است.



شکل7. تصویر چپ شماتیک و تصویر راست نمونه واقعی دستگاه سختی راکول را نمایش می دهند



شکل8. انواع نگهدارنده ها برای سختی سنجی ماکرو نمونه های خاص و استفاده از یکی از آنها(نگهدارنده**V**) برای سختی سنجی شفت

کالیبراسیون

برای کالیبراسیون دستگاه سختی سنج باید به استاندارد مربوط به آن روش سختی سنجی مراجعه کرد که بخشی را به این موضوع اختصاص داده است اما به طور کلی دستگاه، حداقل یکبار در روز باید(درصورتی که دستگاه مورد استفاده قرار گیرد) بازرسی شود. قبل از بازرسی حداقل 2 فرورفتگی ایجاد شده تا از ثابت بودن نمونه، فرورونده و سندان(صفحه زیر نمونه) اطمینان حاصل شود. از نتایج مربوط به این دو فرورفتگی مقدماتی صرفنظر می گردد. حداقل یک آزمون سختی سنجی(با ایجاد پنج اثر) بر روی نمونه مرجع که به آن **Test Block** می گویند انجام گرفته و اگر رواداری(تلرانس) میان سختی اندازه‌گیری شده و محدوده مجاز ارایه شده در راهنمای دستگاه زیاد باشد باید دستگاه را بطور حتم بازرسی کاملی نمود در غیر اینصورت یک ممیزی عادی باید انجام گیرد.

آزمون ریز سختی (سختی میکرو)

در بسیاری از موارد نیاز است تا سختی ناحیه ای بسیار کوچک اندازه گیری شود. بدست آوردن سختی یک پوشش گالوانیزه، تعیین پروفیل سختی رزوه های یک پیچ کوچک، تعیین سختی یک فاز میکروسکوپی یا تعیین سختی یک چرخ دنده نازک ساعت می تواند از مثالهای رایج باشد. چند سیستم آزمون برای این موارد وجود دارد که دو تا از پر کاربردترین آنها آزمونهای میکرو ویکرز و نوپ است. یکی از متداولترین استانداردهای این دو آزمون، **ASTM E 384** است. اصول روش آزمایش میکرو ویکرز همانند آزمون ویکرز استاندارد است با این تفاوت که نیروهای اعمالی در حد گرم هستند.

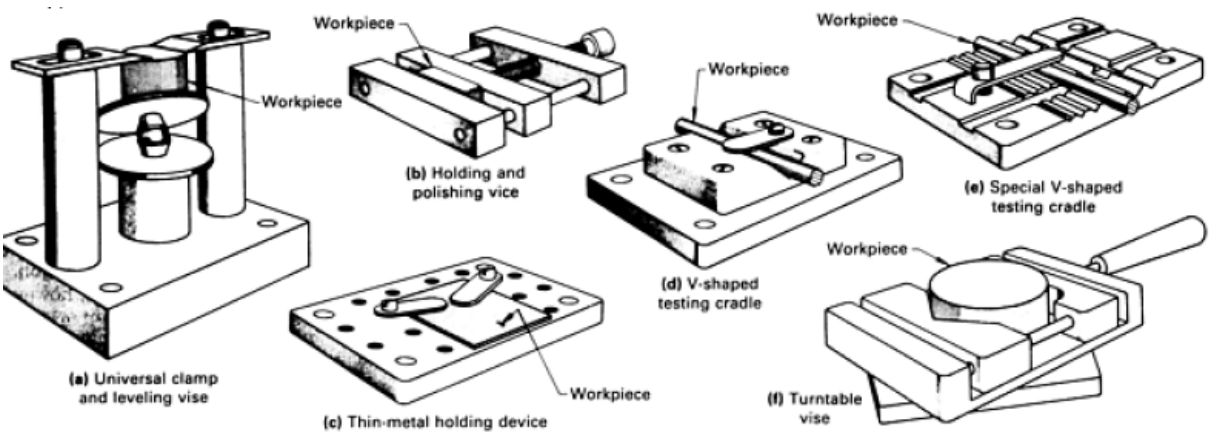
شکل9. تصویر چپ و وسط دو نمونه دستگاه سختی سنج میکرو و تصویر راست اثر فرورونده با نیروی 100 گرم را روی فولاد زنگ نزن 430 (از نوع پرکربن) نشان می دهد. نواحی روشن فاز آلفا و نواحی تیره رنگ، مارتنزیت هستند.

انواع این آزمونها توسط دستگاهی که بخشی از آن یک میکروسکوپ متالورژی است، انجام می شود. مشاهده آزمونه در زیر میکروسکوپ با بزرگنمایی های تا 150 برابر(برای مشاهده و انجام آزمون) و تا 600 برابر (برای انجام اندازه گیری قطرهای اثر) امکان انجام آزمون با نیروهای کم را به ما می دهد. نیروی مورد استفاده معمولا بین 10 تا 1000 گرم است. البته برخی دستگاهها نیروی 2000 گرم نیز دارند.

نکات انجام آزمون میکرو ویکرز و روش گزارش دهی نتایج

نمونه باید ابتدا مورد آماده‌سازی سطحی و پولیش (یا الکترو پولیش) مطابق با استاندارد **ASTM E 3** قرار گیرد. نباید نمونه اچ شود (مگر در سختی سنجی فازها). در ضمن هنگام آماده سازی دقت شود از ایجاد هر گونه تغییر در سختی سطح فلز تا حد امکان جلوگیری شود بعنوان مثال سطح آزمونه گرم نشده یا کار سخت نگردد. در مورد نمونه هایی که مانت می شوند باید نوع مانت بگونه ای باشد که بر اثر اعمال نیروی فرورونده تغییر شکل ندهد و نمونه داخل مانت جابجا نگردد. عموما آزمون در دمای محیط در محدوده 10تا 35 درجه سانتیگراد انجام می شود. باید دقت گردد که آماده سازی یا مانت طوری باشد که سطح نمونه عمود بر محور فرو رونده(با رواداری1± درجه) گردد. با استفاده از صفحه کلید دستگاه بار اعمالی مناسب و زمان اعمال نیرو را انتخاب کرده و نمونه روی سندان و دقیقاً در زیر فرورونده قرار می گیرد. پس از اعمال نیرو، با چرخاندن اهرم، یکی از عدسی‌ها روی نمونه متمرکزشده و پس از فوکاس شدن، دو نشانگر در دو طرف اثر (به صورت مماس) قرار گرفته و دکمه کوچک کنار عدسی چشمی فشرده شده و همین عمل برای قطر بعدی تکرار می گردد. بدین ترتیب دستگاه عدد سختی را گزارش می دهد. اینکار بین 3 تا 5 بار تکرار گردیده و میانگین گرفته می شود. فاصله بین مراکز دو فرو رفتگی مجاور باید حداقل 4 برابر قطر متوسط فرو رفتگی باشد. اگر اندازه دو فرو رفتگی

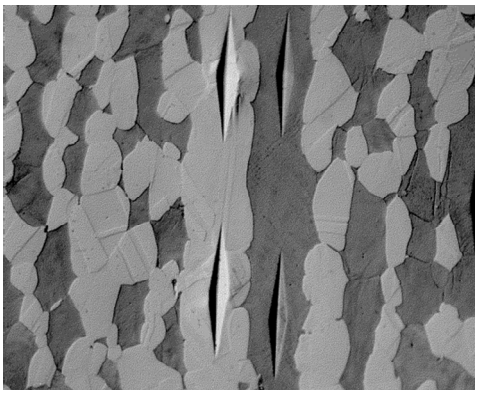
مجاور با هم متفاوت باشد، در مورد رعایت فاصله برای ایجاد فرو رفتگی بعدی می بایست قطر فرو رفتگی بزرگتر را ملاک عمل قرار داد. در مورد مواد ترد همانند سرامیکها ممکن است پس از انجام آزمون، ترک مشاهده گردد. در این حالت باید به نکات مندرج در استاندارد **ASTM C 1327** رجوع کرد. روش گزارش دهی نتایج همانند روش گفته شده برای آزمون ویکرز است.



شکل10. انواع نگهدارنده ها برای سختی سنجی میکرو

آزمون نوپ

این آزمون توسط فردریک نوپ و همکارانش در انجمن ملی استاندارد آمریکا در سال 1939 ابداع شد.در این روش از یک فرورونده هرمی استفاده می شود که قطر بزرگ حفره ی ایجاد شده توسط آن 7 برابر قطر کوچکش و در حدود سی برابر عمق آن است. امتیاز این نوع فرورونده در مقایسه با فرورونده آزمون میکرو ویکرز، که فرورفتگی مربعی ایجاد می کند، در این است که طول فرورفتگی نوپ حدود سه برابر قطر فرورفتگی ویکرز است و می تواند با دقت بیشتری اندازه گیری شود. این روش برای مواردی که یکی از ابعاد ناحیه مورد آزمایش بزرگتر از بعد دیگر باشد(مثلا پوششهای نازک یا فازهای کشیده شده) بسیار مناسب است. گستره نیروهای مورد استفاده در آزمون نوپ همانند آزمون میکرو ویکرز است. نتایج آزمون سختی نوپ بسیار شبیه نتایج آزمون میکرو ویکرز است با این تفاوت که همواره اعداد نوپ 20 تا 25 واحد بزرگتر از اعداد میکرو ویکرز برای همان ماده هستند. به یاد داشته باشیم سختی نوپ را با نماد **HK** نشان می دهند. گفتنی است استاندارد **ASTM C 730** روش سختی سنجی شیشه را با نوپ بیان می کند.



شکل11. اثر فرورونده نوپ با نیروی 50 گرم روی برنج دریایی (C46400). نواحی روشن فاز آلفا و نواحی تیره رنگ، فاز بتا هستند. بزرگنمایی 500 برابر

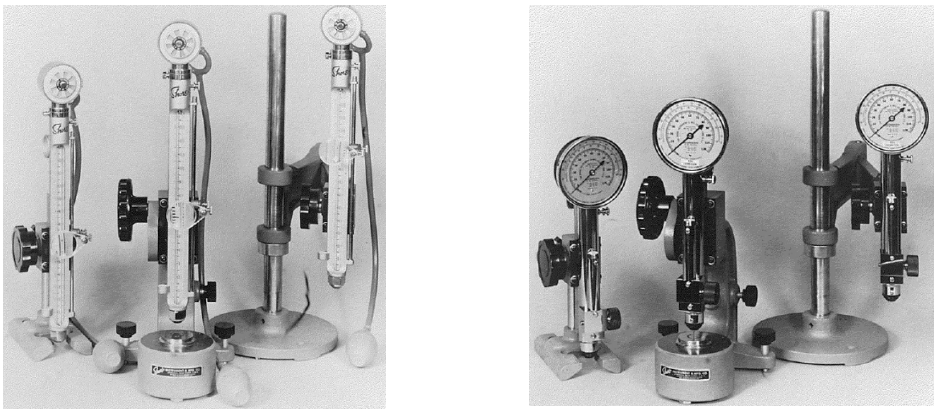
آزمونهای سختی سنجی دینامیک

همانگونه که گفته شد، مقدار سختی فلزات به روش دینامیک، به کمک اندازه گیری میزان جهش یک پرتابه سخت پس از برخورد بـه سـطح مـورد آزمایش به دست می آید. جهش بیشتر نشان دهنده سختی بیشتر است. در اثر برخورد، اثر کوچکی روی نمونه به جای می ماند. مقدار این اثر نـشان دهنده خاصیت پلاستیک قطعه مورد آزمایش است که تظاهر "سختی استاتیکی" فلز می باشد. بخشی از انرژی پرتابه صرف ایجاد این اثر گـشته و

تقریبا باقیمانده انرژی صرف باز جهاندن پرتابه می شود. دو سختی سنجی که بر اساس روش دینامیک ساخته شده و در صنعت مرسوم هستند به اسکلروسکوپ[10] و لیب[11] موسوم هستند که در زیر معرفی می شوند. البته روشهای دینامیک دیگری نیز برای سختی سنجی وجود دارند اما کاربردی و رایج نیستند.

آزمون اسکلروسکوپ(شر[12])

نخستین نمونه این سختی سنج در 1907 توسط آلبرت. اف. شر ارائه گردید. اگرچه امروزه دیگر این دستگاه تولید نمی شود اما هنوز برای آزمون غلتک های نورد یا قطعات بزرگ فورج شده از این روش استفاده می گردد. اساس این روش بر افتادن یک پرتابه با نوک الماسه از ارتفاع معین و اندازه گیری ارتفاع برگشت آن، استوار است. دو نوع از این سختنی سنجها تولید می شدند؛ در نوع **C** (شکل 12)، پرتابه از ارتفاع 10 اینچ(254 میلیمتر) در داخل یک لوله شیشه ای مدرج به سمت نمونه آزمون پرتاب می گردد. از اعداد روی لوله مدرج جهت خواندن عدد سختی در این مقیاس که با $\mathbf{HS_C}$ نشان داده می شود، استفاده می گردد. ارتفاع بازگشت با قضاوت چشم از روی خطوط مدرج لوله تخمین زده می شود. لوله شیشه ای دارای درجه بندی 140 تایی است که در این معیار سختی 100 معادل سختی فولاد ابزار کوئنچ شده در آب(بدون تمپر کردن) در نظر گرفته می شود. برای کسب یک نتیجه مطمئن باید چند آزمایش متوالی با جابجا کردن محل دستگاه آزمایش روی سطح نمونه، انجام گردد. استاندارد **ASTM E 448** برای انجام آن موجود است. دستگاه استاندارد آزمایش شر مجهز به یک درپوش لاستیکی است. فشار دادن درپوش باعث می شود پرتابه به سمت بالا، که در آنجا توسط یک قلاب نگه داشته می شود، کشیده شود. فشار مجدد روی درپوش، قلاب را آزاد کرده و پرتابه آزادانه رها می شود. این آزمون مشخصا برای فلزات بسیار سخت مناسب است و از انجایی که قابل حمل(پرتابل) است می تواند برای آزمایش قطعات بزرگ در محل استفاده شود. در مدل **D** از پرتابه ای سنگینتر استفاده شده است. در این دو مدل اگر کالیبراسیون به نوعی باشد که بیشترین عدد نشاندهنده سختی غلتک نورد سرد باشد در اینصورت به آنها $\mathbf{HFRS_c}$ و $\mathbf{HFRS_d}$ اطلاق می شود که کوتاه شده کلمات عبارت **Forged roll Scleroscope hardness number** می باشد.



شکل12. مدل **C** و **D** سختی سنج اسکلروسکوپ

آزمون لیب

این روش سختی سنجی که توسط مهندس دیتمار لیب در 1977 به ثبت رسید از طریق شرکت سوئیسی **PROCEQ SA.** به جهان معرفی شد. چون دستگاه ساخت این شرکت با نام تجاری **Equotip** عرضه شد، این روش را با این نام هم می شناسند. از این تاریخ به بعد عدد سختی جدیدی وارد قلمرو اندازه گیری سختی شد که به افتخار مخترع آن با **LH** نشان داده می شود. این آزمون از 1996 با **ASTM A 956** استاندارد شده است. روش انجام آزمون اینگونه است که یک پرتابه از فولاد غیر مغناطیس(پارا مغناطیس) با نوک توپی شکل از جنس کاربید تنگستن به قطر 3 میلیمتر و وزن 5/5 گرم بر اثر نیروی یک فنر فشاری در داخل یک لوله از فولاد غیر مغناطیس به جلو پرتاب می شود. اگر سرعت پرتابه در هنگام برخورد به سطح قطعه مورد آزمون که بستگی به نیروی فنر، جرم پرتابه و جهت یا راستای حرکت پرتابه دارد، $\mathbf{V_1}$ نامیده شود و سرعت پرتابه پس از برخورد با سطح کار در زمان برگشت(در همان راستا یا عکس جهت اول) $\mathbf{V_2}$ باشد، همواره $\mathbf{V_1}$ بزرگتر از $\mathbf{V_2}$ خواهد بود. بدیهی است که تغییر شکل پلاستیک قطعه مورد آزمایش در محل برخورد باعث کاهش سرعت اولیه می گردد و انرژی جذب شده به شکل یک فرورفتگی کوچک بر سطح کار قابل مشاهده است. دو سرعت مذکور تقریبا در یک میلیمتری نقطه برخورد پرتابه با قطعه مورد آزمایش اندازه گیری شده و ثبت می گردد. روش آشکارسازی اینگونه است که یک آهنربای دائمی در بدنه پرتابه نصب می باشد و عبور پرتابه از داخل یک سیم پیچ ولتاژی را در سیم پیچ القا می کند. شار مغناطیسی با بیشتر شدن سرعت، افزایش یافته و در نتیجه ولتاژ بیشتری در سیم پیچ القا می شود. محل سیم پیچ به گونه ای تعبیه شده تا

در یک میلیمتری نقطه برخورد، حداکثر میزان ولتاژ را داشته باشد. عدد لیب از رابطه $L=\frac{ReboundVelocity}{Im\,pactVelocity}\times 1000$ محاسبه می شود.

در دستگاه های لیب این عدد به مقیاسهای آشنای ویکرز، برینل و راکول تبدیل می گردد. این روش جای خود را در صنعت به عنوان روشی پرتابل باز کرده است و در بسیاری از موارد که نیاز به سختی سنجی در محل وجود دارد از آن بهره گرفته می شود. البته برای سختی سنجی در محل توسط روشهای گوناگون می توان به استانداردهای **ASTM E 110- ASTM A 833** مراجعه نمود.

شکل13. سختی سنج لیب

روابط بین سختی و خواص دیگر

به عنوان یک اصل کلی، به نظر می رسد که در فلزات با افزایش سختی، خواص دیگر مانند استحکام کششی، فشاری و برشی نیز افزایش می یابند. رابطه مشخصی بین سختی و استحکام که در مورد همه مواد فلزی صادق باشد، وجود ندارد، اما برخی فرمولهای تجربی برای تخمین استحکام کششی بعضی فلزات از روی سختیشان مورد استفاده قرار می گیرند که نمونه ای از آنها در جدول 3 آمده است. شاخص مایر[13] یا شاخص کار سختی یک فلز را می توان با انجام تعدادی آزمایش سختی برینل بدست آورد. برای این منظور یک سری اندازه گیری سختی با نیروهای فروکردنی متفاوت ولی با یک فرو رونده گلوله ای صورت می گیرد. رابطه مایر بصورت $F=ad^n$ تعریف می شود که در آن **F** و **d** به ترتیب نیروی اعمالی و قطر فرورفتگی هستند و **a** و **n** اعداد ثابت مربوط به ماده در شرایط خاص مورد بررسی می باشند. از ترسیم **ln F** بر حسب **ln d** یک خط مستقیم حاصل می شود که از روی آن **a** و **n** به دست می آیند. ناگفته پیداست که یک روند کلی بین سختی فلزات و خواص دیگر آنها مانند نرمی و چقرمگی نیز وجود دارد. بیشتر مواد شکل پذیر، نرم هستند و با کاهش نرمی، سختی آنها بالا می رود. چقرمگی با خاصیت متضادش یعنی شکنندگی(تردی)، نیز با سختی تغییر می کند؛ به طوریکه مواد بسیار سخت معمولا خیلی شکننده هستند، ولی این مشاهدات صرفا نمایشگر روند تغییرات هستند و هیچ فرمول تجربی برای تبدیل عدد سختی به خاصیتی مثل استحکام ضربه ای وجود ندارد.

Material	Tensile strength (MPa)	Tensile strength (ksi)
Heat treated carbon and alloy steels	(3.24–3.55) HB	(0.470–0.515) HB
Annealed carbon steels	(3.55–3.86) HB	(0.515–0.560) HB
All steels	(3.09–3.55) HB	(0.448–0.515) HV
Nickel-chromium austenitic stainless steels	(3.09–3.32) HV	(0.448–0.482) HV
Steel: sheet, strip, and tube	(2.85–3.71) HV	(0.414–0.538) HV
Aluminum alloys: bar and extrusions	(2.94–4.48) HB (2.85–4.17) HV	(0.426–0.650) HB (0.414–0.605) HV
Aluminum alloys: sheet, strip, and tube	(3.24–4.01) HV	(0.470–0.582) HV
Aluminum-copper castings	(1.70–2.94) HB	(0.246–0.426) HB
Al-Si-Ni castings	(2.32–2.94) HB	(0.336–0.426) HB
Aluminum-silicon castings	(2.63–3.71) HB	(0.381–0.538) HB
Phosphor bronze castings	(2.32–3.24) HB	(0.336–0.470) HB
Brass castings	(3.24–4.63) HB	(0.470–0.672) HB

جدول3. روابط تایلور برای تبدیل عدد سختی به استحکام کششی که توسط **W. J. Taylor** در 1942 ارائه شده است.

تبدیل سختی ها به هم در مقیاسهای مختلف

نکته قابل توجه در این رابطه آن است که با توجه به اختلاف روش ارزیابی سختی ماده در مقیاس‌های راکول، برینل و ویکرز هیچ فرمول کلی برای تبدیل سختی از یک مقیاس به مقیاس دیگر وجود ندارد بنابراین آزمایش سختی باید در همان مقیاسی که اطلاعات مربوطه وجود دارد، انجام شود. البته لازم به ذکر است که در رابطه با برخی از آلیاژها، جداولی تهیه شده است که سختی‌های متناظر در مقیاس‌های مختلف را بدست می‌دهد. در استفاده از این جداول باید به این مسأله توجه شود که علاوه بر ترکیب شیمیایی، سایر مشخصات آلیاژ (مانند ساختار میکروسکوپی و ماکروسکوپی و اندازه دانه) ذکر شده در جدول با مشخصات آلیاژ تحت بررسی یکسان باشد در غیر اینصورت جدول غیرقابل استفاده خواهد بود البته گفتنی است چنین جداولی برای بسیاری از آلیاژها وجود ندارد. می توان در صورت نیاز از استاندارد **ASTM E 140** برای تبدیل سختی استفاده کرد. جداولی نیز به این منظور موجود است که نمونه ای از آنها در جدول 4 آمده است.

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/mm²	150kgf	3.000kgf	10kgf	ksi	kg/mm²
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

جدول4. جدول تبدیل اعداد سختی

روشهای دیگر سختی سنجی

برای برخی مواد نظیر مواد معدنی، یکی از بهترین روشهای سختی سنجی، اندازه گیری مقاومت سایش است. سختی خراش طبق مقیاس موس[14] اندازه گیری می شود که توسط یک زمین شناس آلمانی به نام فردریش موس در 1822 معرفی شد. این مقیاس شامل 10 ماده معدنی استاندارد می شود که به ترتیب قابلیت خراشیده شدنشان مرتب می شوند. نرم ترین ماده معدنی در این مقیاس، تالک می باشد(با سختی خراش 1). در حالی که الماس سختی برابر 10 دارد. باید بدانیم فواصل بین اعداد موس برابر نیستند یعنی الماس با سختی 10 بسیار سختر از کوراندوم با سختی 9 است اما فلورایت با سختی 4 فقط اندکی سختر از کلسیت با سختی 3 است. ناخن اندازه ای حدود 2، شیشه سختی 5، مس آنیل شده عدد 3 و مارتنزیت سختی معادل 7 دارد. بر اساس این نوع سنجش سختی، مواد مطابق با توانایی شان برای خراشیدن یکدیگر، ارزیابی می شوند. می دانید ماده ای که روی ماده ای دیگر بتواند خراش ایجاد کند از آن سخت تر است. بدین ترتیب در این آزمون، نمونه های استاندارد توسط ماده مورد آزمایش خراشیده می شوند. عدد سختی ماده بین سختی دو نمونه استاندارد متوالی قرار می گیرد: چنانچه ماده بتواند نمونه نرمتر را بخراشد ولی قادر به خراشیدن نمونه سخت تر نباشد. مقیاس موس برای فلزات خیلی مناسب نیست زیرا فواصل مقدار سختی در بازه سختی های بالا، زیاد نیست. اکثر فلزات سخت در بازه 4 تا 8 سختی موس قرار می گیرند.

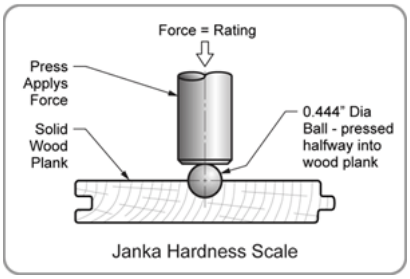
روشهای سختی سنجی دیگری نیز وجود دارند که کمتر رایج هستند. مثلا در سختی سنجی به روش التراسونیک از نیروهای تا 800 گرم استفاده شده و عمق اثر با یک پروب اندازه گیری شده و عدد سختی در معیار راکول سی یا ویکرز به صورت دیجیتال گزارش می شود. از ویژگی های مهم این روش قابلیت اتوماتیک شدن آن است بطوریکه با تمهیدات لازم می توان تا 1200 قطعه را در ساعت سختی سنجی نمود.

Mineral	Mohs relative Hardness	Scratch Test
Talc	1	scrapeable with fingernail
Gypsum	2	scratcheable with fingern.
Calcite	3	scr. with copper coin
Fluorite	4	easily scr. with knife
Apatite	5	still scr. with knife
Orthoclase	6	scr. with steel file
Quartz	7	scratches window glass
Topaz	8	scratches quartz
Corundum	9	scratches topaz
Diamond	10	scratches corundum

شکل14. فردریش موس و جدول سختی موس

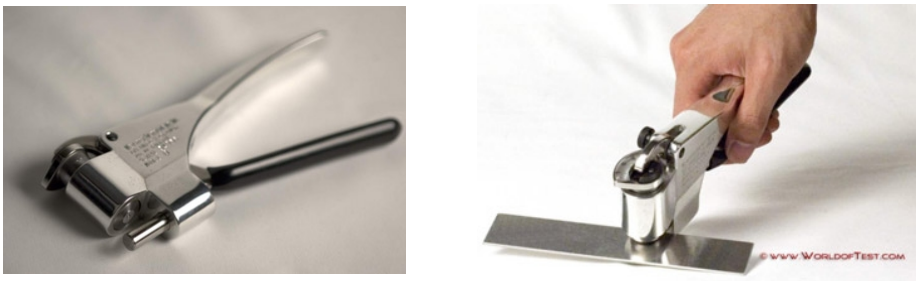
سختی سنجی مواد و قطعات مختلف

باید به یاد داشته باشیم که روشهای دیگر سختی سنجی نیز برای سایر مواد وجود دارند. می توان در اینجا به چوب اشاره کرد. برای سختی سنجی انواع چوبها از روشی به نام **Janka** استفاده می شود که اساس آن این است که با چه نیرویی بر حسب پوند نیرو(**lbf**) نیمی از یک گلوله با قطر **0.444** اینچ، درون چوب فرو می رود(شکل 14). بدین ترتیب انواع چوبهای درختان را طبقه بندی می کنند که معیاری برای آسان بودن یا دشواری بریدن یا میخ کاری چوب بوده و به عنوان راهنمایی برای چگونگی کاربرد آن بر اساس استحکام به کار می رود.



شکل15. روش سختی سنجی چوبها

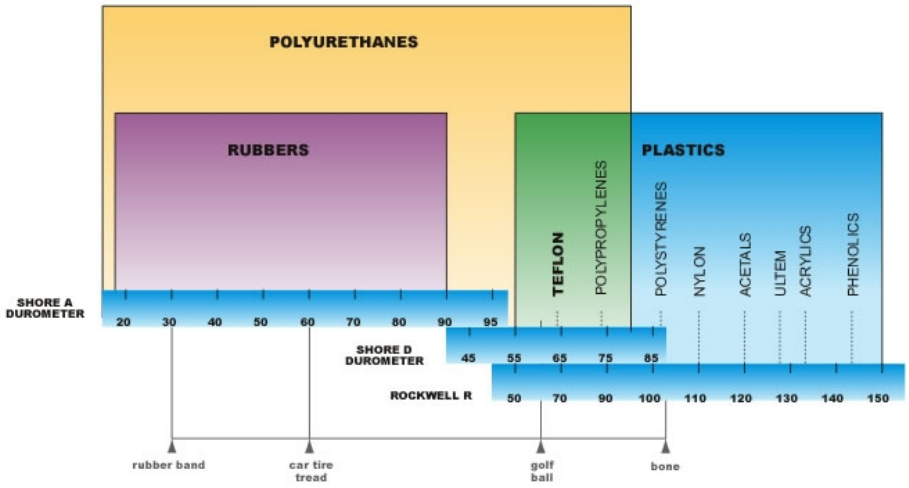
در صنعت ممکن است به نامهای ناآشنایی برای سختی سنجی برخورد کنیم. به عنوان مثال در صنعت آلومینیوم بویژه در کارخانه های تولید مقاطع آلومینیومی با استفاده از روش اکستروژن، از روش وبستر[15] برای سختی سنجی استفاده می شود. این روش با استاندارد **ASTM B647** انجام می شود و اساس آن اندازه گیری سختی آلومینیوم و آلیاژهایش در مقیاس **Rockwell E** بوده و قادر به اندازه گیری سختی در دامنه **5HRE** تا **110HRE** می باشد. نمونه با ضخامت از **0.6** تا **8** میلیمتر در دستگاه که در شکل 16 تصویرش آمده است قرار گرفته و پس از اعمال نیرو، عدد سختی از 1 تا 20 اندازه گیری می شود. در اینحالت عدد 20 دستگاه معادل سختی 110 راکول **E** است. مدلهایی از این دستگاه نیز برای سختی سنج مس، برنج و فولادهای کم کربن ساخته شده اند.



شکل16. روش سختی سنجی وبستر

در اینجا بد نیست به سختی سنجی گروه مهمی از مواد یعنی لاستیکها و پلاستیکها بپردازیم. سختی این مواد با وسیله کوچکی به نام دورومتر[16] بر اساس استاندارد **ASTM D2240** اندازه گیری می شود. دورومتر معمولی یک وسیله کوچک دستی است که در آن فرورونده کروی تحت اثر نیروی فنر یا وزنه، روی سطح ماده فشرده شده و یک عقربه عدد سختی را روی صفحه مدرج نمایش می دهد. انواع مختلفی از این دستگاه برای آزمایش گستره کامل الاستومرها و پلاستیکها از بسیار نرم تا بسیار سخت، از مقیاس **A** تا **D** وجود دارد. شکل 17 دو نوع دورومتر را نشان داده است. استفاده از فرو رونده بارکل[17] روش دیگر اندازه گیری سختی مواد پلاستیکی است که بر اساس **ASTM D2583** قابل انجام است. در بیشتر موارد سختی پلاستیکها و لاستیکها طبق مقیاس **IHRD**[18] بیان می شود که همان روش دورومتر با تغییراتی اندک است.

شکل17. دورومتر عقربه ای و دیجیتالی



شکل18. مقایسه سختی پلاستیکها و لاستیکها و برخی پلیمرها در معیار های مختلف

استانداردهای سختی سنجی

همانطور که می دانید استانداردهای متفاوتی برای انجام سختی سنجی وجود دارند که توسط مراجع معتبری نظیر**ASTM, ISO, EN, JIS** و ... منتشر می شوند. در زیر لیستی از استانداردهای انجمن آزمون و مواد آمریکا(**ASTM**) آمده است که عنوان و شماره استانداردهای مختلف این مرجع استانداردسازی را برای سختی سنجی مواد مختلف با روشهای متفاوت، ارائه می کند.

- **E10** Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials
- **E18** Standard Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials
- **E92** Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials
- **E103** Standard Test Method for Rapid Indentation Hardness Testing of Metallic Materials
- **E110** Standard Test Method for Indentation Hardness of Metallic Materials by Portable Hardness Testers
- **E140** Standard Hardness Conversion Tables for Metals
- **E384** Standard Test Method for Microhardness of Materials

- **E448** Standard Practice for Scleroscope Hardness Testing of Metallic Materials
- **E1842** Standard Test Method for Macro-Rockwell Hardness Testing of Metallic Materials
- **A833** Standard Practice for Indentation Hardness of Metallic Materials by Comparison Hardness Testers
- **A623** Standard Specification for Tin Mill Products, General Requirements
- **A956** Standard Test Method for Equotip Hardness Testing of Steel Products
- **B277** Standard Test Method for Hardness of Electrical Contact Materials
- **B294** Standard Test Method for Hardness Testing of Cemented Carbides
- **B578** Standard Test Method for Microhardness of Electroplated Coatings
- **B647** Standard Test Method for Indentation Hardness of Aluminum Alloys by Means of a Webster Hardness Gage
- **B648** Standard Test Method for Indentation Hardness of Aluminum Alloys by Means of a Barcol Impressor
- **B721** Standard Test Method for Microhardness and Case Depth of Powder Metallurgy (P/M) Parts
- **B724** Standard Test Method for Indentation Hardness of Aluminum Alloys by Means of a Newage Portable Non-Caliper-Type Instrument
- **B934** Standard Test Method for Effective Case Depth of Ferrous Powder Metallurgy (P/M) Parts Using Microindentation Hardness Measurements
- **C661** Standard Test Method for Indentation Hardness of Elastomeric-Type Sealants by Means of a Durometer
- **C730** Standard Test Method for Knoop Indentation Hardness of Glass
- **C748** Standard Test Method for Rockwell Hardness of Fine-Grained Graphite Materials
- **C849** Standard Test Method for Knoop Indentation Hardness of Ceramic Whitewares
- **C886** Standard Test Method for Scleroscope Hardness Testing of Fine-Grained Carbon and Graphite Materials
- **C1326** Standard Test Method for Knoop Indentation Hardness of Advanced Ceramics
- **C1327** Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics
- **D785** Standard Test Method for Rockwell Hardness of Plastics and Electrical Insulating Materials
- **D1415** Standard Test Method for Rubber Property-International Hardness
- **D1474** Standard Test Methods for Indentation Hardness of Organic Coatings
- **D2240** Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness
- **D2583** Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor
- **F1957** Standard Test Method for Composite Foam Hardness-Durometer Hardness

* در تهیه این مقاله آقای مهدی نقدلو نیز همکاری داشته اند.

پی نوشت:

1- **Rockwell**

2- **Brinell**

3- **Knoop**

4- **Vickers**

5- نمونه(**specimen- sample**) عبارت است از نمونه برداشته شده از محصول در حالیکه آزمونه(**test piece**) عبارت است از قسمتی از نمونه که پس از آماده سازی، برای آزمون مورد استفاده قرار می گیرد.

6- **Anisotrope**

7- از ابتدای دهه 60 میلادی، **ASTM** با درپیش گرفتن رویکردی مدرنتر به بحث سختی سنجی، نمادهای جدیدی را جایگزین نمادهای پیشین کرد که از جمله می توان از **HB** به جای **BHN**، **HRC** به جای $\mathbf{R_C}$، **HV** به جای **DPH-VPH-VHN** و نیز **HK** به جای **KHN** نام برد.

8- **Minor load**

9- **Major load**

10- **Scleroscope**

11- **Leeb**

12- **Shore**

13- **Meyer Index**

14- **Mohs**

15- **Webster**

16- **Durometer**

17- **Barcol**

18- **International Rubber Hardness Degrees**

مراجع

1- **Samuel R. Low, Rockwell Hardness Measurement of Metallic Materials, NIST Recommended Practice Guide, 2001**
2- **ASM Metals Handbook, Volume 8: Mechanical Testing, 10th ed., ASM International, Materials Park, OH, 1990**
3- **George E. Dieter, Mechanical Metallurgy, Chapter 9, McGraw-Hill, 1988**
4- **http://en.wikipedia.org/wiki/Brinell_scale**
5- **http://en.wikipedia.org/wiki/Johan_August_Brinell**
6- **http://en.wikipedia.org/wiki/Rockwell_scale**
7- **http://en.wikipedia.org/wiki/Knoop_hardness_test**
8- **http://www.worldoftest.com/index.htm**

9- آزمون مواد، ورنون جان، ترجمه: دکتر علی حائریان، دکتر محسن کهرم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، 1375
10- کامران خداپرستی، دستورالعملهای روشهای آزمون آزمایشگاه متالورژی، پژوهشگاه نیرو، **LMY-W50400**، 1384
11- جزوه سختی سنجی جدید، شرکت کوپا پژوهش، 1380
12- روش آزمون ویکرز، استاندارد ملی ایران با شماره 1-7810، چاپ اول، 1383