



دانشگاه صنعتی شریف

دانشکده مهندسی و علم مواد

آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد

آزمایش شماره 4 :

آزمایش سختی سنجی

نگارش :

پیام مرادی بانیارانی

**98107728**

گروه :

**دوشنبه ساعت 13:30 تا 16:30**

اساتید :

دکتر سیامک سراج زاده

مهندس جعفر مهدی اخگر

تاریخ انجام آزمایش :

**1401/01/22**

## عنوان : آزمایش سستی سستی

سستی را به عنوان مقاومت در برابر تغییر شکل موضعی و در خورد فلزات به عنوان مقاومت در برابر تغییر شکل صومسان می توان تعریف کرد. ولی بسته به نوع آزمایش و کاربرد، تعاریف زیادی دارد که مهمترین آنها عبارتند از :

(الف) مقاومت در برابر فرو رفتگی تحت نیروهای استاتیکی یا دینامیکی

(ب) جذب انرژی تحت نیروهای ضربه ای

(ج) مقاومت در مقابل خراش

(د) مقاومت در مقابل سایش

(هـ) مقاومت در مقابل برش های یکبارگی و یا سوراخکاری

روش های بررسی سستی مواد به صورت (۱) روش <sup>خراش</sup> ~~خراش~~ دادن (۲) استفاده از فرو رفتن یک ساچمه

یا فرو رنده در داخل جسم (۳) سستی دینامیکی

**روش خراش دادن :** این روش بیشتر در مینرالوژی کاربرد دارد و سستی با استفاده از آینه یک فلز فلز بعدی را خط و اندازد به دست می آید که مهمترین طبقه بندی در این روش جدول Mohl می باشد. در این طبقه تالک با سستی ۱ نرمترین و الپاس با سستی ۱۰ سخت ترین ماده می باشد. مطابق با این طبقه بندی سستی مس آنیل شده ۳ و مارتنیت ۷ می باشد. بیشتر فلزات سخت مطابق با این جدول سستی بین ۴-۸ را دارا می باشند.

واضح است که به علت کم بودن دامنه تغییرات سستی این روش در خورد فلزات کاربرد زیادی دارد.

## سستی دینامیکی :

در این روش فرو رنده (ساچمه) از ارتفاع معینی به سطح فلز افتاده و یا استفاده از میزان انرژی جذب شده و ارتفاع برگشت ساچمه (فرو رنده) سستی اندازه گیری می شود.

این روش نیز در خورد فلزات کاربرد زیادی دارد. در خورد فلزات از روش سوم یعنی مقاومت در مقابل فرو رفتگی جهت تعیین سستی استفاده می شود.

## مقاومت در مقابل فرو رفتگی :

این روش دارای انواع مختلفی می باشد که عبارتند از : سستی بریل، سستی مایر، سستی ویکرز

سستی راکول می باشد در ادامه به بررسی تک تک آنها می پردازیم.

ویکرز سستی

(1) **سختی برینل %** با استفاده از اولین سختی سنجی<sup>۱</sup> **فوروورنه** که به طور گسترده پذیرفته شده بود توسط آقای J. A. Brinell در سال ۱۹۰۰ مطرح گردید.

در این روش معمولاً از ساجچه های فولادی به قطر ۱۰mm به عنوان فوروورنه استفاده می شود. میزان نیروی اعمالی برای فلزات سخت ۳۰۰۰ kg و برای فلزات نرم ۵۰۰ kg و برای فلزاتی با سختی متوسط ۱۵۰۰ kg می باشد. مدت زمان اعمال نیرو برای فلزات آهنی حدود ۳۰ ثانیه و برای فلزات غیر آهنی ۱۰ تا ۱۵ ثانیه می باشد. برای فلزات سخت از ساجچه های کاربید تنگستن استفاده می شود.

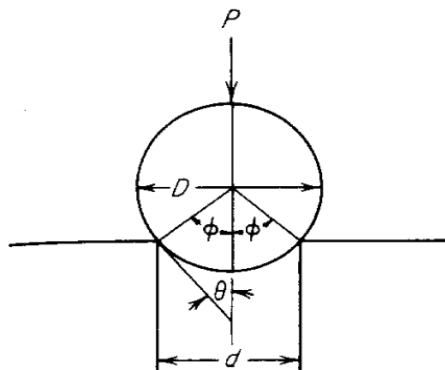
بعد از حذف نیرو قطر فوروورنتگی به وسیله قیله و سکوپ اندازه گیری می شود. در این روش سختی به عنوان نیرو تقسیم بر سطح اثر ایجاد شده تعریف شده و به وسیله فرمول زیر بیان می گردد.

$$BHN = \frac{P}{(\pi D/2)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{P}{\pi D t} \quad (4.1)$$

در رابطه فوق  $P$  نیرو به کیلوگرم،  $D$  قطر ساجچه به میلی متر،  $d$  قطر اثر ایجاد شده به میلی متر و  $t$  عمق اثر به میلی متر است. واحد سختی برینل، کیلوگرم بر میلی متر مربع می باشد.

با توجه به شکل زیر می توان  $d = D \sin \phi$  را نوشت و معادله (4.1) را به معادله (4.2) تغییر داد.

$$BHN = \frac{P}{(\pi/2) D^2 (1 - \cos \phi)} \quad (4.2)$$



شکل 4.1 پارامترهای اساسی در تست برینل

برای اینکه بتوانیم با نیرو و یا مساحت‌های غیر استاندارد سختی یکسانی بدست آوریم باید شکل هندسی اثر  
 های ایجاد شده متساوی باشند و برای اینکه باید زاویه  $\phi$  ثابت بماند معادله (4.2) نشان می‌دهد  
 برای اینکه  $\phi$  و عدد سختی برینزل ثابت بماند باید رابطه زیر بین نیرو و قطر مساحت برقرار باشد.

$$\frac{P_1}{D_1^2} = \frac{P_2}{D_2^2} = \frac{P_3}{D_3^2} = k \quad (4.3)$$

نسبت ثابت  $k$  برابر خلالت مختلف فرق می‌کند که در مورد چدن و فولاد  $k=30$ ، مس و آلومینیوم  $k=5$   
 آلایزهای مس و آلایزهای آلومینیوم  $k=10$  و در مورد سرب  $k=1$  می‌باشد.  
 این روش دارای مزایا و محدودیت‌هایی است که محدودیت‌های آن عبارتند از:



الف) با افزایش نیرو سستی افزایش و سپس کاهش می یابد  
 ب) اثر بزرگ ایجاد شده کاربرد آنرا محدود کند  
 ج) ممکن است در هنگام استفاده نیروی اجسام کوچکی به دلیل سطح <sup>ایجاد</sup> اثر بزرگ مکان های مناسب برای شکست شوند، تغییر تنش.

و فرای آن عبارتند از:

الف) به علت بزرگ بودن اثر ایجاد شده، مسئله ناهمگنی ساختار از بین می رود.  
 ب) کمتر به خواص ها و ناهمگنی های سطح حساس است.

## (2) سستی هاییر (Meyer) &

در این روش برخلاف روش برینل که مات واقعی سطح اثر رواندازه ستری که کرده، در اینجا صرفاً تصویر اثر را اندازه گیری کنیم و به صورت نیرو تقسیم به مات سطح اثر تصویر شده تعریف می شود.

$$P_m = \frac{P}{\pi r^2} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (4.4)$$

سستی هاییر نیز مانند برینل دارای واحد کیلوگرم به میلی متر مربع می باشد.  
 نسبت به سستی برینل کمتر به نیروی اعمال شده حساس است. در مورد فلزات کارسرد شده سستی هاییر ثابت و مستقل از نیرو است. حال آنکه سستی برینل با افزایش نیرو کاهش می یابد.  
 در فلزات آنیل شده با افزایش نیرو، سستی هاییر به علت کارسختی ایجاد شده افزایش می یابد ولی سستی برینل ابتدا با افزایش نیرو، افزایش پیدا کرده و سپس در نیروهای بالاتر کاهش می یابد.  
 هاییر یک رابطه تجربی را بین نیروی اعمال شده و قطر اثر ایجاد شده بدست آورد که به قانون هاییر معروف است

$$P = k d^{n'} \quad (4.5)$$

در رابطه فوق  $n'$  ثابتی است که مربوط به کارسختی فلزات می باشد و برای فلزات کاملاً آنیل شده حدود 2.5 و برای فلزات کارسخت شده حدود 2 می باشد. این پارامتر را می توان از طریق رسم نمودار  $\log d$  به عنوان شیب خط نمودار در فلگه گرت. به طور تقریبی  $n'$  با توان کارسختی رابطه زیر را دارد:

$$n' = n + 2 \quad (4.6)$$

همچنین کار را می‌توان با قطر دادن  $d=1$  بعد از گفاریتم که فن از طرفین راجد (4.5) به دست آورد.

آثار نیروی اعمالی کم باشد تغییر شکل اطراف فرو رفته به طور کامل پلاستیکی نیست، پس از رابطه (4.5) نیروی فنر کند. مقدار نیروی اعمالی بستگی به سختی فلزات دارد. مثلاً برای آلومین با قطر 10mm نیروی اعمالی باید بیش از 50kg بری مس با BHN 100 باشد و یا برای فولاد با سختی برینل 400 باید نیروی اعمالی از 500kg هم بیشتر باشد.

### (3) سختی ویلرز

در این روش از هرم العاس با مقطع چهار وجهی به عنوان فرو رنده استفاده می‌شود. زاویه بین صفحات متقابل هرم 136 درجه می‌باشد. این زاویه به گونه‌ای انتخاب شده که بدترین تناسب را نسبت به قطر لوله در سختی برینل دارد. به دلیل شکل فرو رنده به این تست، تست سختی هرم العاسی لگوین (DPH). سختی به عنوان نیرو تقسیم بر سطح اثر ایجاد شده تعریف می‌شود و در عمل این سطح با اندازه گیری قطر اثر محاسبه و از فرمول زیر بدست می‌آید.

$$DPH = VHN = \frac{2P \sin(\frac{\theta}{2})}{L^2} = \frac{1.854P}{L^2} \quad (4.7)$$

در رابطه فوق  $P$  نیروی اعمال شده به کیلوگرم،  $L$  مقدار متوسط قطر اثر به میلی متر،  $\theta = 136^\circ$  و  $VHN$  عدد سختی ویلرز می‌باشد.

در این روش ما می‌توانیم از فلزات خیلی نرم تا مواد خیلی سخت، سختی آنها را اندازه گیری کنیم. در این روش نیرو بستگی به سختی فلز دارد و از 1 تا 120 کیلوگرم متغیر است و می‌توان سختی فلزات را در یک نیروی معین از 5 تا 500 ویلرز اندازه گیری کرد.

با وجود مزایای فوق از این سختی به طور گسترده‌ای استفاده نمی‌شود چرا که سرعت آن کم می‌باشد و همچنین سطح نفوذ باید قبلاً آماده شود و خطای اندازه گیری مقعر اثر هم زیاد است.




#### (4) سختی راکول :

یکی از تست‌هایی که به طور گسترده در آمریکا استفاده می‌شود، سختی راکول می‌باشد.  
به دلیل سرعت بالا، عدم وجود خطای انسانی، توانایی در تشخیص اختلاف کم سختی در فولادهای  
سخت شده، اندازه کوچک اثر فرورفتگی، مورد استفاده قرار می‌گیرد.  
و همچنین

در این روش از مخروط القاسی با زاویه رأس 120 درجه و یا ساجعه فولادی به قطعه‌های  $\frac{1}{12}$  و  $\frac{1}{8}$  اینچ  
به عنوان فرورونده استفاده می‌شود. اینبار برای تثبیت نمونه نیروی 10 کیلوگرم اعمال می‌شود و این عمل  
باعث می‌شود و این عمل باعث می‌شود که سطح احتیاج به آماده سازی کفتری داشته باشد، سپس  
بقیه نیرو اعمال شده و با اندازه گیری عمق اثر عدد سختی بدست می‌آید.

سختی راکول دارای واحد نیست. در این روش بسته به نوع فرورونده و میزان نیروی اعمال شده  
اسامی مختلفی وجود دارد که در جدول 4.1 انواع آن دیده می‌شود.

سختی راکول بدون حرف معنا ندارد. به عنوان مثال برای فولادهای سخت شده در مقیاس C  
با فرورونده القاسی و اعمال نیروی 5 کیلوگرم صورت می‌گیرد. محدوده مفید این مقیاس از حدود  
Rc 20 تا Rc 70 می‌باشد. برای مواد نرم‌تر از مقیاس B با گلوله فولادی با قطر  $\frac{1}{16}$  اینچ  
و نیروی اعمالی 100 کیلوگرم مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ محدوده مورد استفاده در این مقیاس هم  
از Rb 0 تا Rb 100 می‌باشد.

از مقیاس A با فرورونده القاسی و نیروی اعمالی 5 کیلوگرم برای بیشتر سختی‌های استفاده می‌شود.  
این سختی‌های با این مشخصات برای موادهای مختلف از  به رخ آ نیل شده تا  
Cemented Carbides کاربرد دارد.

جدول 4.1 اسامی مختلف سختی راکول

نوع راکول	نوع فرورونده	نیرو Kg	کاربرد
A	مخروط الماسی	۶۰	کاربیدهای سمنته، فولادهایی که سطحی سخت شده‌اند
B	ساچمه فولادی به قطر $\frac{1}{16}$	۱۰۰	آلیاژهای مس و آلومینیم، فولادهای نرم
C	مخروط الماسی	۱۵۰	فولاد-چدن سخت، فولادهایی که عمقی سخت شده‌اند
D	مخروط الماسی	۱۰۰	فولادهای با سختی متوسط و فولادهای نازک
E	ساچمه فولادی به قطر $\frac{1}{8}$	۱۰۰	چدن، آلیاژهای $Mg$ , $Al$ ، فلزات یاتاقان
F	ساچمه فولادی به قطر $\frac{1}{16}$	۶۰	آلیاژهای مس آنیل شده
G	ساچمه فولادی به قطر $\frac{1}{16}$	۱۵۰	برنر فسفر، مس، $Be$ ، آهن مالیل
H	ساچمه فولادی به قطر $\frac{1}{8}$	۶۰	$Zn$ , $Pb$ , $Al$

### (۵) سختی میکرو و کلینی ۵

بسیار مسائل متالورژیکی اصحاح به تعیین سختی در ناحیه‌های خیلی کوچکی نیاز شد. به عنوان مثال اندازه گیری سختی در سطح کمپوره شده، تعیین سختی میکرو ساختار اجزاء مختلف به صورت مجزای می‌تواند طراره کرد.

در این روش از هم القاسی به عنوان فرورونده استفاده می‌شود به طوری که نسبت قلم بزرگ اثر ایجا شده به قلم کوچک آن ۷:۱ می‌باشد سختی به عنوان نیرو تقسیم بر تصویر سطح اثر ایجا شده تعریف می‌شود.



من شود و از فرمول زیر بدست می آید.

$$KHN = \frac{P}{A_p} = \frac{P}{L^2 C}$$

(4.8)

در رابطه فوق  $P$  نیروی اعمالی به کیلوگرم،  $A_p$  تصویر سطح اثر ایجاد شده به میل متر مربع،  $L$  طول قطره بزرگ به میل متر،  $C$  ثابتی است مربوط به فرورونده و  $KHN$  عدد سختی  $Knoop$  می باشد. در این روش نیرو از ۲۵ گرم تا ۳۵۰ گرم تغییر است و بیشتر برای اندازه گیری سختی فلزات ترد و قطعات نازک و یا اندازه گیری سختی یک فلز خاص به کار رود.

مزایای این روش نسبت به ویکرز این است که می توان اثرهای ایجاد شده را نزدیک تر به هم انتخاب کرد. از طرفی در یک مقدار معین از قطر اثر، سطح و عمق اثر ایجاد شده حدود ۱۵ درصد از سطح و عمق اثر ایجاد شده توسط روش ویکرز می باشد. (به علت شکل خاص فرورونده)

**در موقع اندازه گیری سختی با روشهای مذکور باید به نکات زیر توجه کرد:**

- (۱) فرورونده و عمل قرار گرفتن نفون در دستگاه سختی سنج (سندان) تمیز باشند.
- (۲) سطح نفون نمود آزمائش تمیز، خشک، صاف و عاری از آلودگی باشد.
- (۳) سطح باید مسطح و عمود بر فرورونده باشد.
- (۴) آزمائش بر روی سطح استوانه ای منجر به کم خواندن عدد سختی می شود که میزان خطا بستگی به شعاع انحنا، نیرو، فرورونده و سختی فلز دارد.
- (۵) ضخامت نفون باید به حدی باشد که به آمدگی یا علامتی در طرف دیگر نفون ظاهر نشود. بهتر است ضخامت نفون حداقل ۱۰ برابر عمق اثر باشد.
- (۶) فواصل بین دواتر ایجاد شده باید حداقل ۳-۵ برابر قطر اثر ایجاد شده باشد.
- (۷) سرعت اعمال نیرو باید استاندارد باشد.
- (۸) از نفون های ثابت نشو سختی نباید گرفت. زیرا مقداری از نیرو صرف تغییر شکل ثابت می شود.

خواسته شماره ۱ :

برای سختی سنجی نفوذ نفوذی شکل :

$$VHN = \frac{1.854P}{L^2} =$$

میانگین قلم های ایجاد شده توسط نفوذ سنجی

$$VHN \left( \frac{kgf}{mm^2} \right) \Rightarrow \begin{matrix} 0.495 \\ 227 \frac{kgf}{mm^2} \end{matrix} \left\{ \begin{matrix} 0.5 \\ 222.48 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 0.51 \\ 213.84 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 0.52 \\ 205.7 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 0.53 \\ 209.71 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 0.54 \\ 213.84 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 0.55 \\ 222.48 \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 0.49 \\ 231.65 \end{matrix} \right\}$$

سختی سنجی نفوذ آلایار مسی به روش برینل با ساچمه ۲.۵ mm و با نیروی اعمالی ۶۲.۵ kgf

$$BHN = \frac{P}{(\pi D_2)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

اندازه قلم اثر ایجاد شده

$$BHN \Rightarrow \begin{matrix} 0.87 mm \\ 101.85 \frac{kgf}{mm^2} \end{matrix} \left\{ \begin{matrix} 0.865 mm \\ 103.07 \frac{kgf}{mm^2} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 0.88 mm \\ 99.472 \frac{kgf}{mm^2} \end{matrix} \right\}$$

میانگین این سختی ها :

$$BHN = \frac{101.85 + 103.07 + 99.472}{3} = 101.464 \frac{kgf}{mm^2}$$

سختی سنجی نفوذ آلایار آلومینیوم به روش برینل با ساچمه ۲.۵ mm و با نیروی اعمالی ۶۲.۵ kgf

اندازه قلم اثر ایجاد شده برابر اول ۰.۷۹ mm ، اندازه قلم اثر ایجاد شده در بار دوم ۰.۷۸۵ mm

اندازه قلم اثر ایجاد شده در بار سوم ۰.۷۹۵ mm

$$BHN = \frac{P}{(\pi D_2)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

اندازه قلم اثر ایجاد شده

$$BHN \Rightarrow \begin{matrix} 0.79 mm \\ 124.241 \frac{kgf}{mm^2} \end{matrix} \left\{ \begin{matrix} 0.785 mm \\ 125.87 \frac{kgf}{mm^2} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 0.795 mm \\ 122.641 \frac{kgf}{mm^2} \end{matrix} \right\}$$

میانگین این سختی ها :

$$BHN = \frac{124.241 + 125.87 + 122.641}{3} = 124.251 \frac{kgf}{mm^2}$$



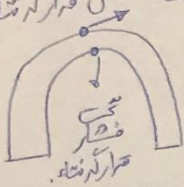
سختی نفونه فولادی با روش راکول B

$$HRB = \frac{83 + 85 + 84}{3} = \underline{\underline{84 HRB}}$$

سختی نفونه مسی با روش راکول B

$$HRB = \frac{47 + 48 + 46}{3} = \underline{\underline{47 HRB}}$$

در خصوص سختی نفونه دغلی شکل چون نفونه ماتیت خفشی قرار گرفته و قسمت داخلی نفونه تحت فشار و قسمت بیرونی تر نفونه تحت کشش قرار گرفته به دلیل کار سختی و تغییر فرم پلاستیک سختی در مکان های مختلف متفاوت است. پس نمی توان به آن یک سختی معین نسبت داد و سختی تابع مکان قرارگیری و جهت سختی است.

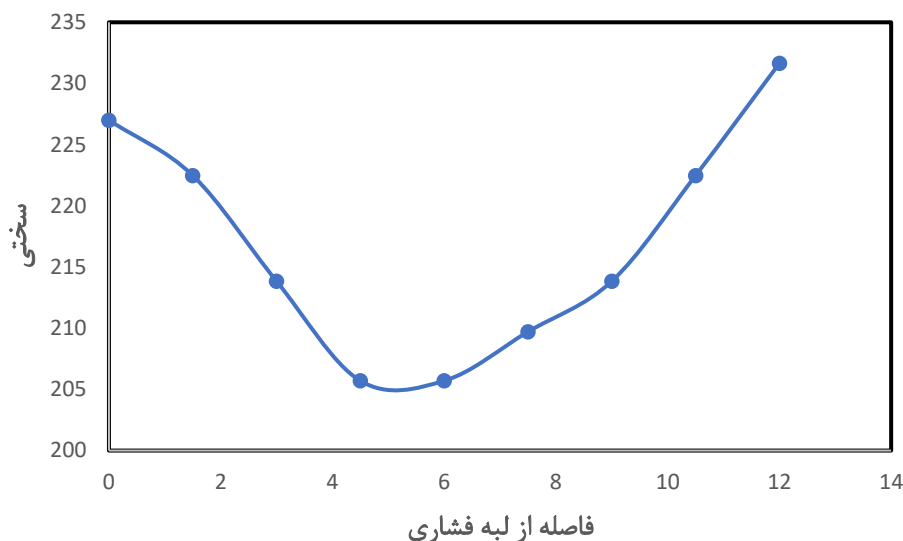


در مورد نفونه جعبینی هم به دلیل انحراف صورت گرفته در انتهای سر شده ما شاهد سختی بالا و هر چه به دور تر از انتهای روم وارد ناحیه نرم تر قطعه شده که آهسته تر نسبت به انتهای نفونه سر شده. با سرع سرد شدن نفونه مورفولوژی های مارتنزیتی در نفونه شکل می گیرد که این مورفولوژی دارای سختی بالایی است در صورتی که در نفونه به دلیل تعادل سرد شدن، سختی کمتر دارد. پس در این مورد هم نمی توان یک سختی کامل در نفونه گرفت.

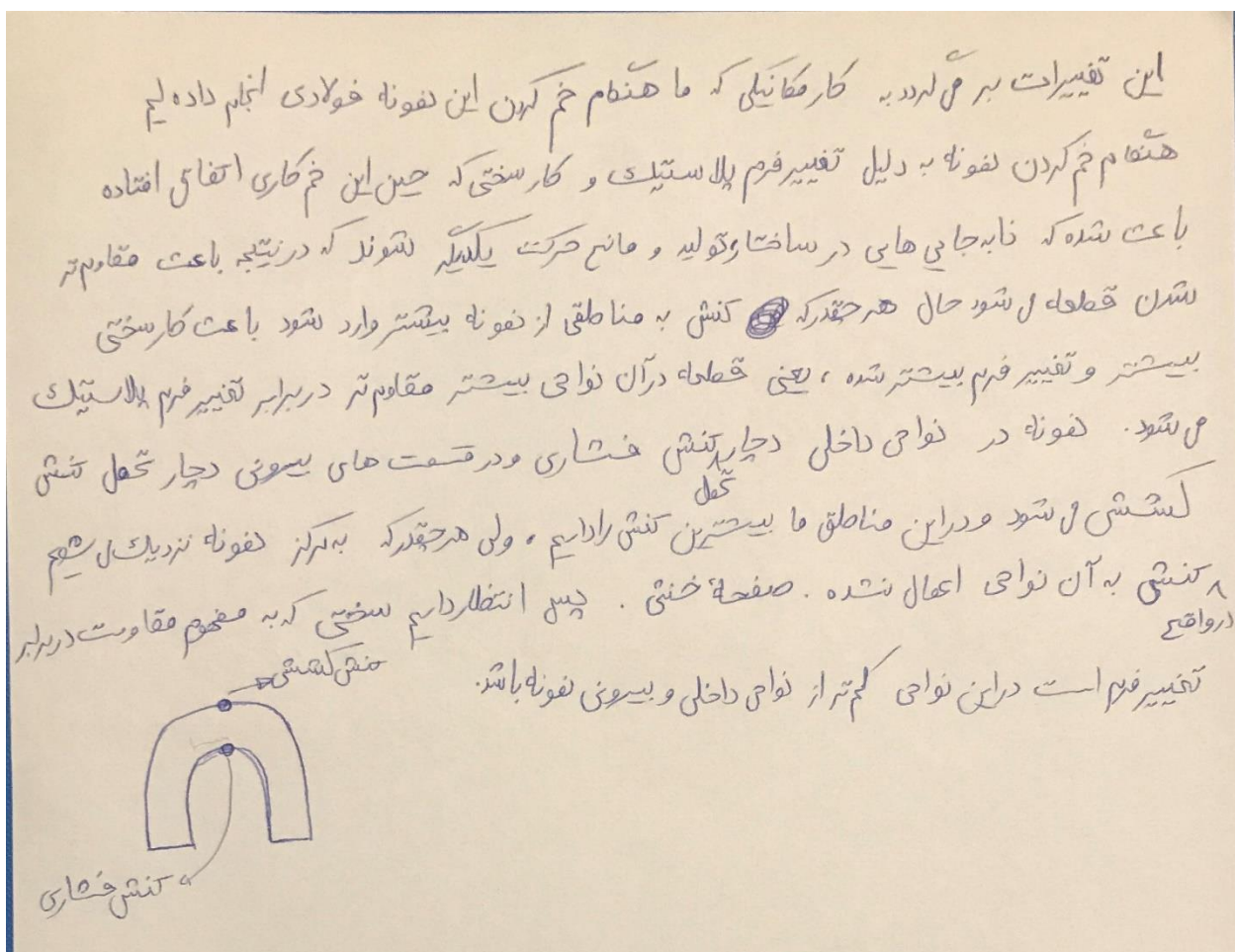
جدول 4.2 سختی فلزات مختلف

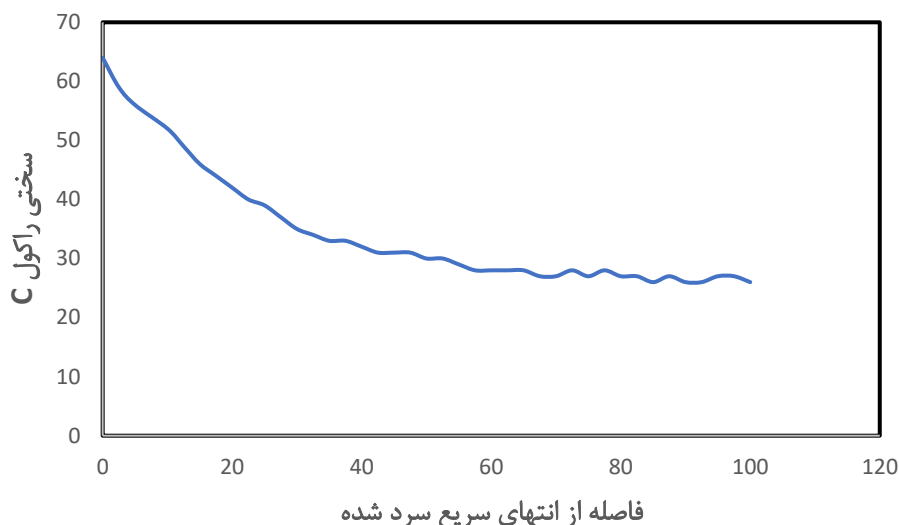
نمونه دغلی	L(mm)	0.495	0.5	0.51	0.52	0.515	0.51	0.5	0.49
	VHN(kgf/mm <sup>2</sup> )	227	222.48	213.84	205.7	209.71	213.84	222.48	231.65
در مورد نمونه جعبینی سختی ها در صورت سوال قرار دارند									
نمونه ها		آلیاژ مسی با روش سختی سنجی برینل	آلیاژ آلومینیوم با روش سختی سنجی برینل	نمونه فولادی با روش C راکول	نمونه مسی با روش B راکول				
سختی ها (kgf/mm <sup>2</sup> )		101.464 BHN	124.251 BHN	84 HRB	47 HRB				





شکل 4.2 منحنی تغییرات سختی با فاصله گرفتن از لبه نمونه نعلی به سمت بیرون





شکل 4.3 منحنی تغییرات سختی با فاصله گرفتن از انتهای سریع سرد شده نمونه جیمینی

همانطور که از نمودار مشخص است در نواحی که دچار انجماد سریع شده، سختی بیشتر از نواحی است که به آرامی و با زمان بیشتر سرد شده و طبیعتاً سختی در این نواحی کمتر از نواحی سریع شده باشد. اما چرا این گونه می باشد.

دلیل این اتفاق به شکل گیری نواحی مورفولوژی های مارتنزیتی که ما در این مورفولوژی ها سخت هستند چرا که در دما های بالا، دمای آفیل، عناصر آلیاژی، بیشتر و بیشتر در ساختار حل شده و در هنگام سریع سرد کردن قطعه، این عناصر آلیاژی در همان جای خود می مانند یعنی قطعه دچار خوک اسباب عناصر آلیاژی نشود چرا که زمان لازم برای نفوذ این عناصر به دیگر قسمت های قطعه داده نشده است. به همین دلیل این مورفولوژی دارای سختی بیشتری نسبت به حالتی است که نفوذ بیشتر و در زمان طولانی تر رخ داده. همانطور که میدانیم سختی یعنی مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک پس در مورفولوژی های مارتنزیتی و همان نواحی سریع سرد شده این سختی بالاتر می باشد. البته باید دقت کرد که این عمل بر روی آلیاژها اتفاق افتد و ممکن است در آلیاژهای هم ما دقیقاً برعکس این اتفاق را داشته باشیم.

#### خواسته شماره 4 :

آنرا قرار باشد از یک دستگاه برای اندازه گیری سختی هم فلزات نرم و هم فلزات سخت باشد  
می توان از دستگاه سختی سنجی و نیز این کار را تمام داد چرا که طیف وسیعی از مواد را می توان به وسیله  
این دستگاه اندازه گرفت.

اما برای حالتی که به طور جداگانه باشد، برای مواد نرم می توان از دستگاه سختی سنجی برینل کمک گرفت  
چرا که هم سطح اثر خوبی می توان در مواد نرم ایجاد کرد و هم به دلیل سطح اثر بزرگ تر، مسئله ناهمگنی ساختار  
از بین می رود برای مواد سخت هم می توان از سختی سنجی راکول C استفاده کرد. چرا که کار کردن با  
آن هم راحت است و هم خطاهای ناشی از افراد در این روش دیده نمی شود. در ضمن در سختی سنجی  
راکول C چون نوع فرورونده مخروطی القاسی هست و نیروی ۱۵۰۰۰۰ گرام به آن وارد می شود  
پس مناسب مواد سخت می باشد.

مراجع :

کتاب هرتربرگ

جزوه آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد