۴ــ۲ــ۱ــ آزمایش استحکام فشاری‌تر: ماکزیمم تنش فشاری نمونه برحسب PSI که یک نمونه‌ی معین از ماسه‌ی‌تر با ابعاد مشخص و استاندارد می‌تواند تحمل کند و گسیخته نشود «استحکام فشاری‌تر آن» نمونه نامیده می‌شود در عمل برای تعیین این استحکام ابتدا نمونه‌ای تهیه کرده و آن را با کوبیدن متراکم می‌کنند. سپس نمونه را (استوانه‌ی استاندارد) در امتداد طول، تحت نیروی فشاری قرار می‌دهند تا گسیخته[1] شود. عواملی چون مقدار خاک و سایر چسب‌ها، مقدار رطوبت و اندازه ذرات در استحکام فشاری‌تر ماسه مؤثر می‌باشند.

وسایل مورد نیاز:

۱ــ استوانه‌ی استاندارد آماده‌سازی نمونه

۲ــ دستگاه کوبه‌ی آزمایشگاهی استاندارد

۳ــ دستگاه اندازه‌گیری استحکام ماسه

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

ابتدا نمونه‌ای استوانه‌ای به قطر ۲ اینچ (۵/۰۸ سانتی‌متر) و به ارتفاع ۲ اینچ توسط استوانه‌ی استاندارد می‌سازیم. برای ساختن نمونه معمولاً ۱۴۵ تا ۱۷۵ گرم ماسه را در استوانه (لوله یا سیلندر)ی استاندارد ریخته و سپس به وسیله‌ی دستگاه کوبه‌ی آزمایشگاهی استاندارد ضربه‌ای (معمولاً ۳ ضربه) تا ارتفاع ۲ اینچ، که در دستگاه نیز مشخص گردیده است آن را می‌کوبیم (شکل ۸ــ۱). بعد از تهیه‌ی نمونه‌ی استوانه‌ای، آن را در دستگاه آزمایش استحکام ماسه قرار می‌دهیم. این دستگاه دارای دو کفه‌ی دایره ای تخت است که به سهولت در امتداد محور بین آن ها قرار می‌گیرد. با چرخش اهرم دستگاه، دو کفه‌ی دایره‌ای (مانند دو فک) به نمونه فشار وارد می‌کند.

شکل ۸ ــ۱ــ دستگاه نمونه‌ساز (کوبه‌ی آزمایشگاهی) استاندارد برای آزمایش استحکام ماسه

فشار ماسه در حالت تر بین ۵ تا ۲۲ P.S.I[2] که بستگی به نوع ماسه دارد تغییر می‌کند. این فشار در حقیقت مشخص کننده‌ی استحکام فشاری تر ماسه است. شکل ۹ــ۱ نمونه‌ای از دستگاه آزمایش استحکام ماسه را نشان می‌دهد.

شکل ۹ــ۱ــ دستگاه اندازه‌گیری استحکام ماسه

تمرین: آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاه ارائه دهید.

۱ ــ Rupture

۲ ــ Specimen-tube

۵ــ۲ــ۱ــ آزمایش استحکام فشاری خشک:

استحکام فشاری خشک کاملاً مانند استحکام فشاری تر تعریف می‌شود ؛ با این تفاوت که استحکام ماسه، در حالت خشک و پخته شده مورد نظر است.

وسایل مورد نیاز:

۱ــ استوانه‌ی استاندارد آماده سازی نمونه

۲ــ دستگاه کوبه‌ی آزمایشگاهی استاندارد

۳ــ دستگاه اندازه‌گیری استحکام ماسه

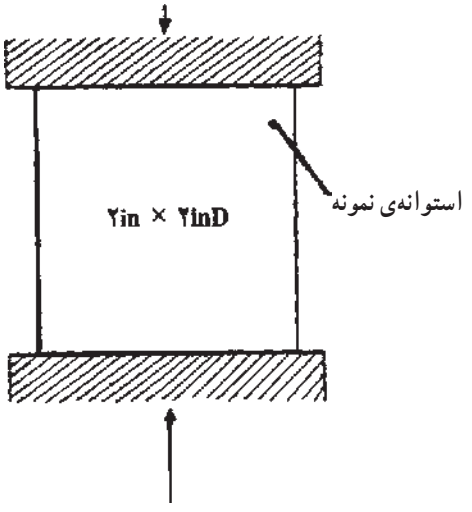
۵ــ صفحه‌ی صافی توپر

۶ــ کوره‌ی گرم‌کن (اون)

۷ــ دسیکاتور

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

بعد از تهیه‌ی نمونه‌ی استوانه‌ای به قطر ۲ اینچ و ارتفاع ۲ اینچ (شکل ۱۰ــ۱) (بهتر است چند نمونه گرفته شود تا در صورت خراب شدن یا شکستن تعویض شود) مانند آزمایش ۴ آن‌ها را روی یک صفحه‌ی فلزی توپر، صاف و محکم (صفحه



شکل ۱۰ــ۱ــ نمونه استاندارد فشاری ونیروهای وارد بر آن

کج و معوج نباشد و تاب برندارد) گذاشته و به داخل یک کوره‌ی گرم‌کن قرار می‌دهیم، سپس نمونه ها را تا دمای بیشتر از $105^{\circ}C$ و کمتر از $110^{\circ}C$ به مدت ۲ ساعت پخته و خشک می‌کنیم. سپس نمونه‌ها را وارد دسیکاتور کرده و آن‌ها را تا دمای محیط سرد و خنک می‌کنیم. بعد از اجرای مراحل مذکور، نمونه‌ها را توسط دستگاه آزمایش استحکام ماسه (شکل ۱۱ــ۱) تحت فشار قرار می‌دهیم. سرعت وارده توسط دستگاه به هر نمونه باید بین ۱۲۰ تا ۱۶۰ P.S.I/min یعنی ۰/۸۳ تا ۱/۱ مگا پاسکال بر دقیقه (mpa/min) باشد. در چنین وضعیتی فشار نشان داده شده‌ی دستگاه مشخص‌کننده‌ی استحکام فشاری خشک ماسه خواهد بود. این استحکام فشاری بین ۲۰ تا ۲۵۰ PSI (۰/۱۴ تا ۱/۷ mpa/min) که بستگی به نوع ماسه دارد تغییر می‌کند (در مورد ماسه‌های سخت شده توسط چسب سیلیکات سدیم و گاز CO_2 این استحکام در شرایط مناسب به ۳۰۰ P.S.I تقریباً به ۲ مگا پاسکال نیز می‌رسد)

شکل ۱۱ــ۱ــ دستگاه آزمایش استحکام ماسه

تمرین: آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاه ارائه دهید.

۶ــ۲ــ۱ــ آزمایش استحکام کششی تر: این استحکام عبارت است از حداکثر تنش کششی یک نمونه (نمونه‌ی کششی ماسه‌ای استاندارد) در حالت مرطوب تا مرحله‌ی گسیخته شدن. این استحکام بر حسب P.S.I تعیین می‌شود.

وسایل مورد نیاز:

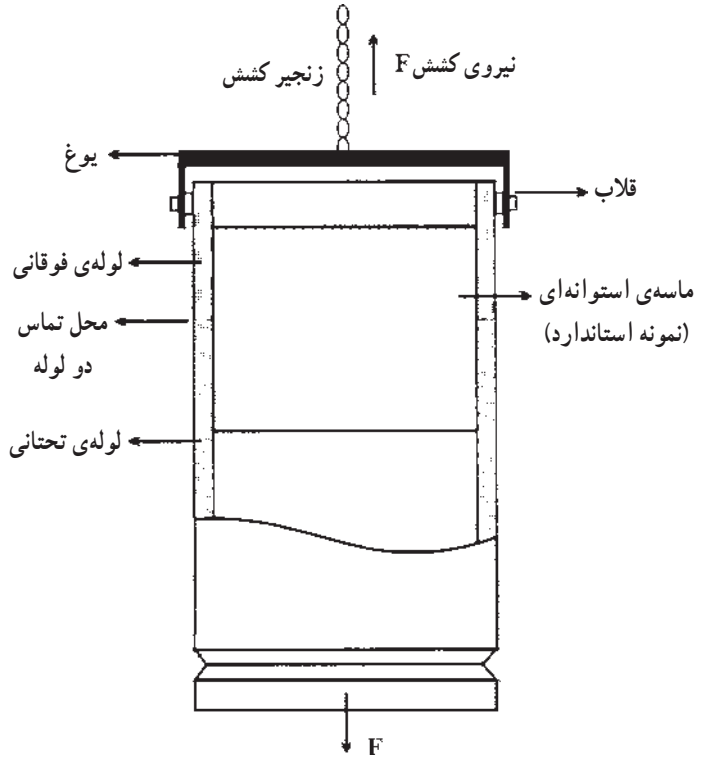
۱ــ استوانه‌ی استاندارد آماده‌سازی نمونه‌ی دو تکه

۲ــ دستگاه نمونه‌ساز (کوبه‌ی آزمایشگاهی استاندارد)

۳ــ دستگاه استحکام کششی

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

لوله یا استوانه‌ی استاندارد نمونه در این آزمایش، مطابق شکل ۱۲ــ۱ دو تکه است و نمونه در داخل دو استوانه‌ی بالایی و پایینی تحت کشش قرار می‌گیرد. هنگام شکست و گسیخته‌شدن نمونه، دو استوانه‌ی مذکور در قسمت وسط از هم جدا می‌شوند.



شکل ۱۲ــ۱ــ تعیین استحکام کششی ماسه‌ی‌تر

در این آزمایش حداکثر سرعت عمل کشش ۴۰ و حداقل ۲۰ اونس[1] بر اینچ مربع در هر دقیقه است (۰/۴۳ ± ۱/۲۹ نیوتن بر سانتی‌متر مربع N/Cm^2). چنانچه ملاحظه می‌شود استحکام مخلوط ماسه برای کشش کم می‌باشد. برای تعیین استحکام کششی مخلوط‌های ماسه که استحکام زیادی دارند از روش تعیین استحکام ماهیچه‌های پخته شده استفاده می‌کنند.

استحکام کششی ماسه‌های تر حدود ۱ تا ۶ پوند بر اینچ مربع یا ۶/۹ تا ۴۱/۵ کیلو پاسکال است (بستگی به ترکیب و نوع ماسه دارد).

تمرین: آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاه ارائه دهید.

---

۱ ــ Ounce

۷ــ۲ــ۱ــ آزمایش استحکام کششی خشک برای ماهیچه‌های پخته شده: این استحکام نیز عبارت از حداکثر تنش کششی (بر حسب P.S.I) است که یک نمونه می‌تواند تا مرحله‌ی شکستن تحمل کند.

وسایل مورد نیاز:

۱ــ جعبه‌ی ماهیچه‌ی نمونه‌ی فلزی

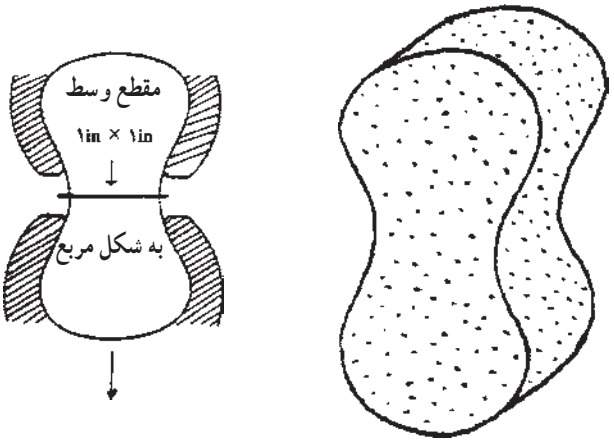
۲ــ کوره‌ی ماهیچه خشک‌کنی (گرم‌خانه)

۳ــ دسیکاتور

۴ــ دستگاه آزمایش کشش نمونه

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

ابتدا مخلوط ماسه را آماده می‌کنیم و سپس به کمک جعبه‌ی قالب‌گیری نمونه یک یا چند نمونه را قالب‌گیری و تهیه می‌نماییم. نمونه را در دمای $250^{\circ}C$ و به مدت ۳۰ ثانیه پخته و در دسیکاتور تا دمای محیط خنک می‌کنیم. ابعاد استاندارد این نمونه، در شکل ۱۳ــ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۳ــ ۱ــ نمونه‌ی استاندارد کششی و نیروهای وارد بر آن

لازم به توضیح است که با افزایش درصد خاک رس استحکام ماسه زیاد می‌شود. مثلاً اگر درصد خاک رس ۱۰٪ به ۱۶٪ افزایش یابد استحکام کششی خشک حدود ۱۱۰٪ خواهد بود. (در مورد استحکام کششی‌تر این افزایش حدود ۱۶۰٪ است).

بعد از تهیه‌ی نمونه‌ی استاندارد (قالب‌گیری و پخته شده) آن را روی دستگاه آزمایش کشش تنن قرار می‌دهیم و استحکام کششی آن را اندازه می‌گیریم. شکل‌های ۱۴ــ۱ و ۱۵ــ۱ فک‌های دستگاه و نحوه‌ی اندازه‌گیری استحکام کششی نمونه را نشان می‌دهند.

شکل ۱۴ــ۱ــ فک‌های دستگاه کشش

شکل ۱۵ــ۱ــ نحوه‌ی اندازه‌گیری استحکام کششی نمونه

تمرین: آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

۸ــ۲ــ۱ــ آزمایش‌های استحکام برشی ماسه:

استحکام برشی ماسه نیز مانند استحکام فشاری و کششی تعریف می‌شود : استحکام برشی ماسه عبارت است از حداکثر تنش برشی که نمونه‌ی استاندارد می‌تواند تا مرحله‌ی برش و گسیخته‌شدن تحمل کند. این تنش نیز برحسب پوند بر اینچ مربع بیان می‌شود : آزمایش استحکام برشی به دو صورت تر و خشک انجام می‌شود.

وسایل مورد نیاز:

۱ــ استوانه‌ی استاندارد آماده‌سازی نمونه

۲ــ دستگاه کوبه‌ی آزمایشگاهی استاندارد

۳ــ دستگاه اندازه‌گیری استحکام ماسه

۴ــ صفحه‌ی صافی توپر

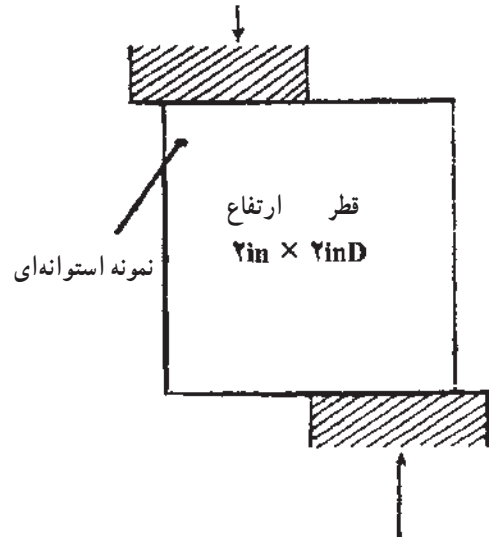
۵ــ کوره‌ی گرم‌کن (اون)

۶ــ دسیکاتور

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

الف ــ استحکام برشی تر: در این آزمایش پس از تهیه‌ی نمونه‌ی استوانه‌ی (با قطر و ارتفاع ۲ اینچ) تنش برشی توسط ماشین مربوطه به نمونه اعمال می‌شود. (شکل ۱۶ــ۱ــ الف) در نتیجه نمونه بریده و گسیخته می‌گردد. سرعت عمل نیروی برش توسط دستگاه بین ۱۹ تا ۲۹ PSI در دقیقه است. در این آزمایش استحکام برشی تر حدود ۱/۵ تا ۷ PSI است. (شکل ۱۶ــ۱ــ ب) فک‌های برش را نشان می‌دهد.

ب ــ استحکام برشی خشک: در آزمایش استحکام خشک، نمونه‌های استاندارد ابتدا در درجه حرارت $110^{\circ}C$ ــ ۱۰۵ به مدت ۲ ساعت خشک می‌شود و سپس در یک دسیکاتور تا دمای محیط خنک می‌گردد. پس از این مرحله می‌توان نمونه‌های تهیه شده را، در ماشین مربوطه مورد آزمایش قرار داد و استحکام آن‌ها را اندازه‌گیری کرد.



شکل ۱۶ــ۱ــ الف ــ نمونه استاندارد برشی و نیروهای وارد بر آن

شکل ۱۶ــ۱ــ ب

توضیح: نسبت استحکام برشی خشک به استحکام فشاری خشک کمیتی است که در تهیه و آماده‌سازی ماسه‌ی ریخته‌گری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به طوری که اگر این نسبت از حد معینی کمتر باشد نشان آماده نبودن و به عمل نیامدن ماسه است و اگر بیش از آن حد معین باشد، نشانگر بالا بودن درصد مواد افزودنی به ماسه است.

تمرین: آزمایش استحکام برشی تر و خشک را برای چند نمونه ماسه انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

۹ــ۲ــ۱ــ آزمایش قابلیت نفوذ گاز: یکی از عوامل مهم در تولید قطعات ریختگی سالم قابلیت نفوذ گاز از ماسه یا نفوذپذیری ماسه است. همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد دانه‌بندی و پخش ذرات ماسه، نقش مهمی در خروج گازهای محلول در مذاب، هوای قالب، بخار آب و غیره دارد، لذا کنترل و تعیین قابلیت نفوذ گاز، می‌تواند نتایج بسیار مفیدی برای کیفیت قطعات ریختگی داشته باشد.

برای تعیین این قابلیت معمولاً سرعت خروج هوا از یک نمونه‌ی ماسه‌ای را برحسب سانتی‌متر مکعب در دقیقه در زمان معین و در تحت فشار ثابت اندازه‌گیری می کنند. این سرعت در واقع می‌تواند مشخص کننده‌ی توانایی خروج گاز از ماسه باشد. آزمایش شماره ۹ این مطلب را روشن می‌کند.

وسایل مورد نیاز:

۱ــ استوانه‌ی استاندارد آماده سازی نمونه

۲ــ دستگاه کوبه‌ی آزمایشگاهی استاندارد

۳ــ دستگاه تعیین قابلیت نفوذ ماسه (مجهز به استوانه‌ی استاندارد آماده‌سازی نمونه) (شکل ۱۷ــ۱).

شکل ۱۷ــ۱ــ یک نوع دستگاه تعیین قابلیت نفوذ گاز

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

حجم هوایی (برحسب CC) که در مدت یک دقیقه با فشار یک گرم نیرو بر سانتی‌متر مربع (۱۰CC آب) از درون یک نمونه‌ی ماسه‌ای به ارتفاع ۱ سانتی‌متر و سطح مقطع یک سانتی‌متر مربع عبور می‌کند قابلیت نفوذ گاز آن ماسه است.

بنابراین اگر حجم هوای عبوریV، ارتفاع نمونه‌ی ماسه‌ای (استوانه‌ی استاندارد) H، سطح مقطع نمونه A، فشار وارد بر هوای عبوری P و مدت زمان عبور هوا T (دقیقه) باشد، در این

صورت قابلیت نفوذ گاز در این ماسه (K)، با H و V نسبت مستقیم، ولی با P و A و T نسبت معکوس دارد. به عبارت ریاضی می‌توان نوشت.

$$K = \frac{V.H}{P.A.T}$$

در استاندارد جامعه‌ی ریخته‌گران آمریکا (A.F.S) با در نظر گرفتن مقادیر استاندارد، می‌توان رابطه‌ی اخیر را به صورت زیر ساده کرد ؛ چون قطر استوانه‌ی استاندارد نمونه، اینچ $D = ۲$ و ارتفاع آن H، نیز برابر ۲ اینچ است. لذا خواهیم داشت :

$$A = \frac{\pi D^{۲}}{۴} = \frac{۳/۱۴ \times (۲ \times ۲/۵۴)^{۲}}{۴} = ۲۰/۶۸cm$$

سطح مقطع استوانه‌ی نمونه

ارتفاع استوانه‌ی نمونه $H = ۲ \times ۲/۵۴ = ۵/۰۸cm$

از طرفی مطابق استاندارد مذکور V(AFS) برابر است با ۱۲۲ اینچ مکعب، و فشار هوای عبوری $P = ۱۰cmH_۲O$ زمان عبور هوا (T) برحسب ثانیه است، به این ترتیب می‌توان نوشت :

$$V = ۱۲۲in^{۳} = ۱۲۲ \times (۲/۵۴)^{۳}$$
$$= ۱۹۹۹/۲۲cm^{۳} = ۲۰۰۰cm^{۳} (۲lit)$$

حجم هوای عبوری از ماسه

اگر T برحسب دقیقه منظور شود، مقدار K (قابلیت نفوذ گاز ماسه) چنین است :

$$K = \frac{V.H}{P.A.T} = \frac{۲۰۰۰ \times ۵/۰۸}{۱۰ \times ۲۰/۲۶۸ \times T} = \frac{۲۰۰۰ \times ۵/۰۸}{۱۰ \times ۲۰/۲۶۸} \times \frac{۱}{T}$$

حجم هوای عبوری از ماسه

و یا

$$K = \frac{۵۰/۱۲}{T}$$

چنانچه T برحسب ثانیه بیان شود رابطه‌ی K چنین است :

$$K = \frac{۵۰/۱۲}{T} \times ۶۰ \Rightarrow K = \frac{۳۰۰۷/۲}{T}$$

همان طور که ملاحظه می‌شود قابلیت نفوذ گاز تابعی است از زمان T، لذا در دستگاه تعیین قابلیت نفوذ (مطابق شکل ۱۷ــ۱) صفحه‌ی اندازه گیری برحسب معکوس زمان T در مقدار ثابت ۳۰۰۷/۲ (مطابق استاندارد AFS) مدرج شده است. لذا پس از قراردادن نمونه‌ی استاندارد در این دستگاه، زمان لازم و عدد قابلیت نفوذ گاز در ماسه به طور اتوماتیک روی دستگاه خوانده می‌شود.

یادآوری می شود که هر چه زمان T کمتر باشد، مفهوم آن این است که حجم گاز عبوری در شرایط استاندارد آزمایش بیشتر است، به عبارت دیگر قابلیت نفوذ گاز از ماسه بیش‌تر است.

تمرین: آزمایش فوق را برای چند نمونه ماسه انجام داده نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

فصل دوم

آزمایشگاه متالورژی مکانیکی
آزمایش‌های خواص مکانیکی فلزات و آلیاژها

هدف‌های رفتاری: پس از پایان این فصل از هنرجو انتظار می‌رود که :

۱ــ خواص مکانیکی فلزات و آلیاژها را توضیح دهد.

۲ــ تنش کشش (مقاومت به کشش) فلزات و آلیاژ ها را توضیح دهد و به وسیله‌ی ماشین تنش کششی، اندازه‌ی این مقاومت را از طریق آزمایش تعیین کند.

۳ــ تنش فشاری یا مقاومت به فشار فلزات و آلیاژها را توضیح دهد و با اجرای آزمایش مربوطه، این تنش را مشخص کند.

۴ــ سختی اجسام را توضیح دهد و سختی فلزات و آلیاژها را با روش‌های : برینل، راکول و ویکرز تشریح کند. همچنین آزمایش‌های این روش‌ها را انجام دهد.

۵ــ مقاومت به ضربه‌ی فلزات و آلیاژها را با روش «شارپی» و «آیزود» توضیح دهد و اندازه‌ی این مقاومت را تعیین کند.

۶ــ خواص مکانیکی چند نوع چدن (نشکن، خاکستری و مالی بل) را بررسی کند.

۲ــ خواص مکانیکی فلزات و آلیاژها

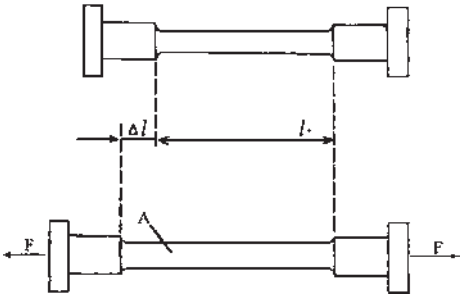
همان‌طور که در درس شناخت فلزات توضیح داده شده است، هنگامی که یک قطعه‌ی نمونه‌ی فلزی تحت تأثیر نیروهای خارجی (مثلاً کششی یا فشاری) قرار گیرد، تغییر شکل می‌دهد. اگر پس از حذف این نیروها ابعاد قطعه به اندازه‌های اوّلیه‌ی خود بازگشت نماید، تغییر شکل را ارتجاعی (الاستیک) می‌نامند.

در صورتی که نیروهای وارد بر قطعه در حد ارتجاعی باشند با تغییر شکل آن متناسب خواهند بود.

مثلاً افزایش طول یک میله ($\Delta l = l - l_0$) تحت تأثیر یک نیروی کششی خارجی (F) با مقدار این نیرو و طول اوّلیه (l_0) نسبت مستقیم و با سطح مقطع مؤثر (A) نسبت معکوس دارد. بنابراین مطابق شکل ۱ــ۲ می‌توان نوشت :

$$\Delta l = K \frac{l_0 \times F}{A}$$

که در آن K ضریب تناسب بوده و خواص ارتجاعی جنس میله‌ی فلزی را مشخص می‌کند. رابطه‌ی فوق را می‌توان به صورت زیر نوشت :



شکل ۱ــ۲ــ افزایش طول میله‌ی فلزی تحت تأثیر نیروی کشش در حد ارتجاعی (کشسان)

$$\frac{F}{A}=\frac{1}{K}\times\frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

نسبت $\frac{F}{A}$ را با σ نمایش می دهند و آن را تنش[1] میله می‌نامند (نیروی وارد بر واحد سطح). معمولاً تغییر شکل میله‌ها با طول و سطح مقطع معینی (استاندارد شده) از روی کمیتی به نام تغییر طول نسبی یا کُرنش[2] (تغییر طول به ازای هر واحد طول) یعنی $\varepsilon=\frac{\Delta l}{l_0}$ مشخص می‌گردند.

ضریب $\frac{1}{K}$ را با E نمایش می‌دهند و به آن ضریب ارتجاعی (مدول الاستیسیته) یا ضریب «یانگ»[3] می‌گویند. با توجه به نکات اخیر، رابطه‌ی (۱) را می‌توان به صورت رابطه‌ی ساده‌ی زیر تبدیل کرد.

$$\sigma=E\times\varepsilon$$

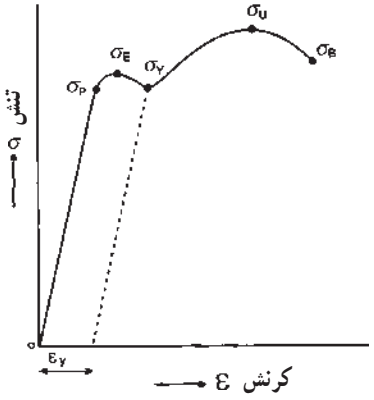
که در آن هم σ و هم E برحسب kgf/m^2 یا kgf/cm^2 بیان می‌شوند (واحد عملی). واحد عملی (SI) برای این دو کمیت عبارت است از نیوتن بر متر مربع یا کیلو نیوتن بر متر مربع (N/m^2 یا kN/m^2) به طوری که می‌توان نوشت :

$$1kgf/cm^2=98/0665kN/m^2\approx100kN/m^2$$

ε فاقد واحد است چون نسبت دو کمیت هم واحد σ و E می‌باشد.

رابطه‌ی اخیر (σ) در واقع بیان ریاضی قانون هوک[4] می‌باشد (متناسب بودن تنش با ازدیاد طول نسبی)

اگر مقادیر کرنش و تنش وارد بر قطعه‌ی نمونه را در هر لحظه ؛ روی صفحه مختصات دو بعدی (محور افقی کرنش و محور قائم تنش) منتقل نماییم و نقاط به‌دست آمده را به هم وصل کنیم منحنی تغییرات تنش وارد بر قطعه، بر حسب کرنش به دست خواهد آمد (شکل ۲ــ۲).



شکل ۲ــ۲ــ دیاگرام کششی یک قطعه‌ی نمونه

در روی منحنی دیاگرام، نقاطی مشخص شده‌اند که مربوط به مقادیر تنش‌هایی به شرح زیر هستند.

الف) حد تنش تناسب σ_P : این مقدار حد تنشی است که اگر به قطعه اعمال شود کرنشی متناسب با آن ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر می‌توان گفت اگر تنش تا این حد به قطعه اثر کند در صورت حذف آن تنش، طول جسم به اندازه‌ی اوّلیه برمی‌گردد. از این نظر چون تغییرات طول نسبی (کرنش) متناسب با نیرو است، منحنی در فاصله‌ی o تا σ_P به شکل خط راست است باید دانست که قانون هوک فقط در این فاصله صادق است.

ب) حد تنش ارتجاعی σ_E : این نقطه نمایانگر حداکثر مقدار تنشی است که پس از حذف آن، جسم می‌تواند به حالت اوّلیه برگردد. ولی این تنش متناسب با کرنش نیست (تنش‌های مربوط به نقاط از σ_P تا σ_E) بنابراین حد تنش ارتجاعی، تنشی است که برای کم‌تر از آن جسم تغییر شکل موقتی و برای بیشتر از آن تغییر شکل دائمی می‌دهد.

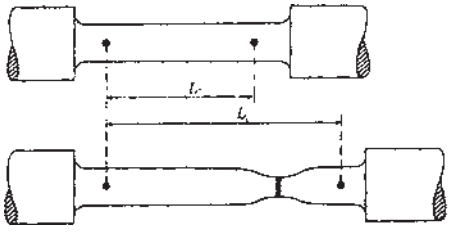
---

۱ ــ Stress ۲ ــ Strain ۳ ــ Young's modulus ۴ ــ Hooke's Law

ج) نقطه‌ی تسلیم σ_Y : در این نقطه، تنش وارد بر جسم، باعث تغییر شکل دائمی آن می‌شود، یعنی در صورت حذف این تنش، دیگر طول جسم به حال اوّلیه برنمی‌گردد. بلکه به اندازه‌ی Δl_Y متناسب با کُرنش ($\varepsilon_Y = \frac{\Delta l_Y}{l_0}$) افزایش می‌یابد. (شکل ۲ــ۲) با این تعریف معلوم می شود که تمام نقاط بعد از حد ارتجاعی (σ_E) تاگسیخته‌شدن و پاره‌شدن جسم (σ_B) نقاط تسلیم می‌باشند. ولی در عمل معمولاً نقطه‌ی تسلیم را نقطه‌ای انتخاب می‌کنند که ازدیاد طول نسبی (تغییر شکل) ایجاد شده در اثر این تنش در محور افقی برابر ۰/۲ درصد باشد.

د) حداکثر تنش کششی σ_U : در این نقطه تنش کششی وارد به جسم به بیش‌ترین مقدار رسیده است و از این نقطه به بعد با توجه به این‌که تنش کششی کاهش یافته باز هم ازدیاد طول ایجاد خواهد شد. به همین علت این مقدار مربوط به نقطه‌ی ماکزیمم منحنی خواهد بود.

هـ) حد گسیختگی یا پارگی σ_B : اگر عمل کشش باز هم ادامه پیدا کند، طول جسم افزوده می‌گردد و بالاخره به ازای یک تنش معینی (σ_B) جسم گسیخته و دو قسمت خواهد شد. (شکل ۳ــ۲).



شکل ۳ــ۲ــ یک قطعه‌ی نمونه‌ی استاندارد با مقطع گرد، قبل و بعد از کشش (تا مرحله‌ی گسیختن)

۱ــ۲ــ درصد ازدیاد طول نسبی[1] و درصد کاهش سطح مقطع نسبی:

معمولاً کُرنش را برحسب درصد تعیین می‌کنند. اگر طول اوّلیه l_0 و طول بعد از تغییر شکل (مثلاً هنگام گسیخته شدن) l_B فرض شود در این صورت خواهیم داشت :

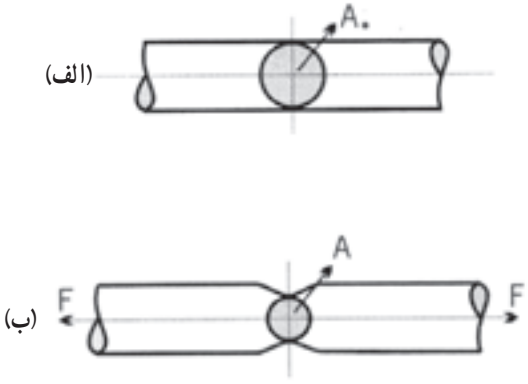
درصد ازدیاد طول نسبی یا کرنش برحسب درصد

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_B - l_0}{l_0} \times 100$$

در مورد اغلب فلزات و آلیاژها قطعه‌ی نمونه قبل از گسیخته‌شدن، در یک ناحیه باریک شده (شکل ۴ــ۲) و با ادامه‌ی عمل کشش در باریک‌ترین مقطع پاره می‌شود. اگر سطح مقطع اوّلیه A_0 و سطح مقطع باریک شده A باشد، درصد کاهش سطح مقطع نسبی قطعه چنین خواهد بود.

درصد کاهش سطح مقطع نسبی $S = \frac{\Delta A}{A_0} = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100$

به طورکلی فلزات و آلیاژهایی که تحت تأثیر نیروهای خارجی هم ازدیاد طول و هم کاهش سطح مقطع بیشتری داشته باشند قابلیت مفتول شدن و تورق یا چکش‌خواری[2] زیادتری خواهند داشت (مانند برنج نرم) و برعکس اگر این تغییرات در آن‌ها کمتر باشد شکننده‌تر و همچنین سخت‌تر خواهند بود. (مانند چدن خاکستری). کاهش سطح مقطع در مورد آلیاژهای سخت تقریباً صفر است.



شکل ۴ــ۲ــ تقلیل سطح مقطع[3] تحت تأثیر نیروی کشش F (الف) قبل از کشش (ب) بعد از کشش

مثال: یک قطعه‌ی نمونه با مقطع گرد و طول اوّلیه‌ی ۷۶ میلی‌متر و قطر ۵ میلی متر تحت تأثیر نیروی کششی قرار گرفته

---

۱ ــ Elongation ۲ ــ Malleability ۳ ــ Reduction of area

است. در صورتی که طول آن بعد از کشش به ۹۵/۸ میلی‌متر و قطر آن به ۴/۶میلی‌متر رسیده باشد، اولاً درصد کرنش و ثانیاً درصد نسبی کاهش سطح مقطع آن را تعیین کنید.

حلّ:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \times ۱۰۰$$

درصد نسبی ازدیاد طولی یا درصد کرنش

$$\varepsilon = \frac{۹۵/۸ - ۷۶}{۷۶} \times ۱۰۰ = ۲۶/۰۵$$

برای محاسبه و تعیین درصد نسبی سطح[1] مقطع ابتدا لازم است سطح مقطع‌های قبل و بعد از کشش حساب شود :

$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{۴} = \frac{۳/۱۴ \times ۵^2}{۴} = ۱۹/۶۳۵ mm^2$$

سطح مقطع اوّلیه

$$A = \frac{\pi d^2}{۴} = \frac{۳/۱۴ \times ۴/۶^2}{۴} = ۱۶/۶۱۹ mm^2$$

سطح مقطع بعد از کشش

بنابراین درصد نسبی کاهش سطح مقطع چنین است :

$$S = \frac{A_0 - A}{A_0} \times ۱۰۰ = \frac{۱۹/۶۳۵ \times ۱۶/۶۱۹}{۱۹/۶۳۵} \times ۱۰۰ = ۱۵/۳۶$$

درصد

---

۱ ـ Relative narrowing

۱ــ۱ــ۲ــ آزمایش تعیین کشش فلزات و آلیاژها

هدف آزمایش: تعیین رفتار فلزات و آلیاژها تحت تأثیر تنش کشش و کرنش آن‌هاست حداکثر نیروی کششی قطعه‌ی نمونه قبل از گسیخته‌شدن نسبت به سطح مقطع اوّلیه‌ی آن نمونه را تنش کششی یا مقاومت به کشش می نامند و آن را با σ_U نمایش می‌دهند.

بنابراین می‌توان نوشت :

$$\text{تنش کششی} = \frac{\text{حداکثر نیروی کشش نمونه قبل از گسیختن}}{\text{سطح مقطع اوّلیه‌ی نمونه}}$$

و یا $$\sigma_U = \frac{F_U}{A_0}$$

برای تنش کشش اصطلاحاتی نظیر : مقاومت کششی، قدرت کششی، بار کششی، حد گسیختگی، مقاومت به کشش، تنش حداکثر[1] و استحکام کششی نیز به کار می‌رود.

در واقع می‌توان گفت که تنش کششی، حداکثر نیروی لازم برای گسیخته‌شدن در هر واحد سطح است. در فرمول اخیر F_U بر حسب کیلوگرم نیرو و A_0 بر حسب میلی‌متر مربع یا سانتی‌متر مربع است در این صورت تنش کششی σ_U بر حسب کیلوگرم نیرو بر میلی‌متر مربع یا کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع بیان می‌شود. واحدهای SI که در این مورد متداول‌اند عبارت‌اند از :

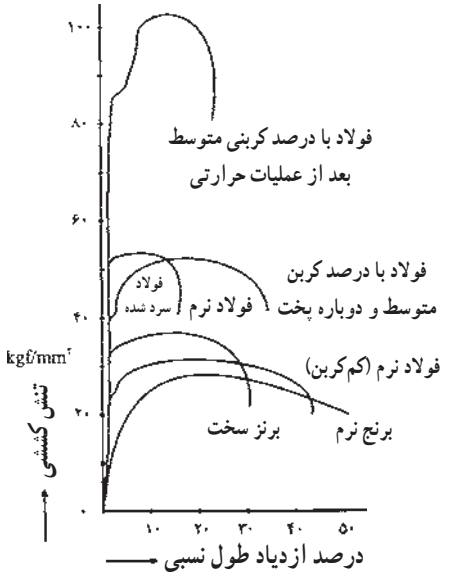
$$\frac{kN}{mm^2} = \frac{GN}{m^2} = GP_\alpha$$

(۱ کیلو نیوتن بر میلی‌متر مربع = ۱ گیگا[2] پاسکال)

برای تبدیل واحد عملی تنش به واحد SI، یعنی کیلوگرم نیرو بر میلی‌متر مربع به کیلو نیوتن بر میلی‌متر مربع، می‌توان همواره از تساوی : $1kgf/mm^2 = 9/8N/mm^2$ استفاده کرد.

لازم به توضیح است که تنش کششی و به طور کلی منحنی تغییرات و دیاگرام کششی با توجه به ترکیب و جنس آلیاژ، عملیات حرارتی، عملیات مکانیکی (مثل نورد سرد)، درجه حرارت و بالاخره شکل قطعه‌ی نمونه متفاوت می‌باشد و نمی‌توان یک معادله‌ی ریاضی کلی برای آن تعیین کرد. لذا در هر مورد با توجه به شرایط مختلف مذکور، برای تعیین مقدار آن، لازم است آزمایش تنش کششی انجام گیرد.

در شکل ۵ ــ۲ نمودارهای تنش کششی چند آلیاژ، به منظور مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر نمایش داده‌شده است. آزمایش‌های مربوطه همگی در دمای محیط ($25^\circ C$) انجام شده است. تجربه نشان داده است که با افزایش دما، تنش کششی کاهش می‌یابد. یادآوری می‌شود که نقاط ماکزیمم در منحنی‌های این شکل مشخص کننده‌ی تنش کششی مربوطه هستند.



شکل ۵ــ۲ــ مقایسه نمودارهای تنش کششی چند آلیاژ (برنج ــ برنز و فولاد) در دمای محیط $25^\circ C$

آزمایش کشش[3] از نوع آزمایش‌های استاتیک می باشد، یعنی آزمایش‌هایی که در آن‌ها، بار (نیروی کشش) به طور نسبتاً آهسته از صفر تا یک مقدار نهایی و معین افزایش پیدا می‌کند.

هنگامی که جسم تحت تأثیر نیروی کشش قرار می‌گیرد از خود عکس‌العمل‌های مختلفی نظیر رفتار کشسان (ارتجاعی) یا الاستیک نشان می‌دهد.

وسایل مورد نیاز:

۱ــ دستگاه آزمایش تنش کششی (۱۰ تن نیرو) شکل ۶ ــ۲

---

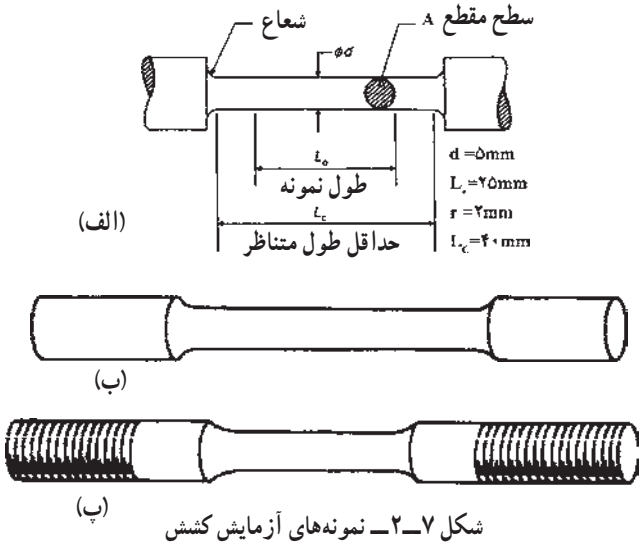
۱ ــ Ultimate strength یا Maximum stress (M.S)　　۲ ــ Giga = 10^9　　۳ ــ Tensile test

شکل ۶ــ۲ــ ماشین آزمایش تنش کششی انیورسال

۲ــ نمونه‌ی کشش استاندارد (با قطر ۵ میلی‌متر و طول ۲۵ میلی‌متر از آلیاژهای : سرب، روی، چدن خاکستری، چدن نشکن، فولاد ساختمانی، فولاد آلیاژی، برنج، برنز و آلیاژهای آلومینیوم نظیر سیلومین و آلیاژهای آلومینیوم منیزیم)

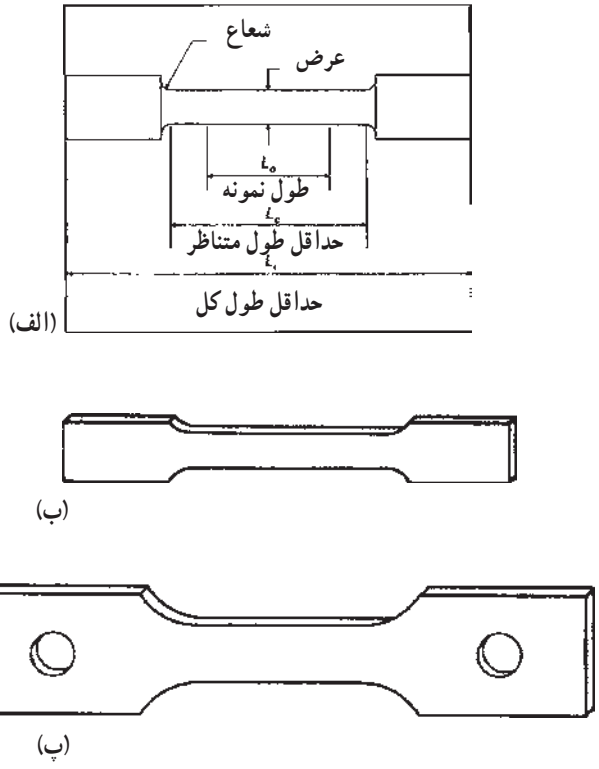
نحوه‌ی اجرای آزمایش:

۱ــ تهیه‌ی نمونه استاندارد، نمونه استاندارد نمونه‌ای است که طول اولیه‌ی نمونه تقریباً ۵ برابر قطر نمونه باشد ($L_o = 5d_o$) این استاندارد برای نمونه های کوتاه است در مورد نمونه‌ی بلند رابطه به صورت ($L_o = 10d_o$) می‌باشد نمونه‌های استاندارد را به روش ماشینکاری به صورت استوانه‌ای تهیه می کنند مطابق (شکل ۷ــ۲).



شکل ۷ــ۲ــ نمونه‌های آزمایش کشش
الف) نمایش ابعاد قطعه نمونه‌ی استوانه‌ای
ب) نمونه‌ی گرد برای درگیری گوه‌ای
پ) نمونه‌ی گرد با دو انتهای پیچ شده

برای ورق‌ها و تسمه‌ها از نمونه‌های تخت مانند شکل ۸ــ۲ استفاده می‌شود.



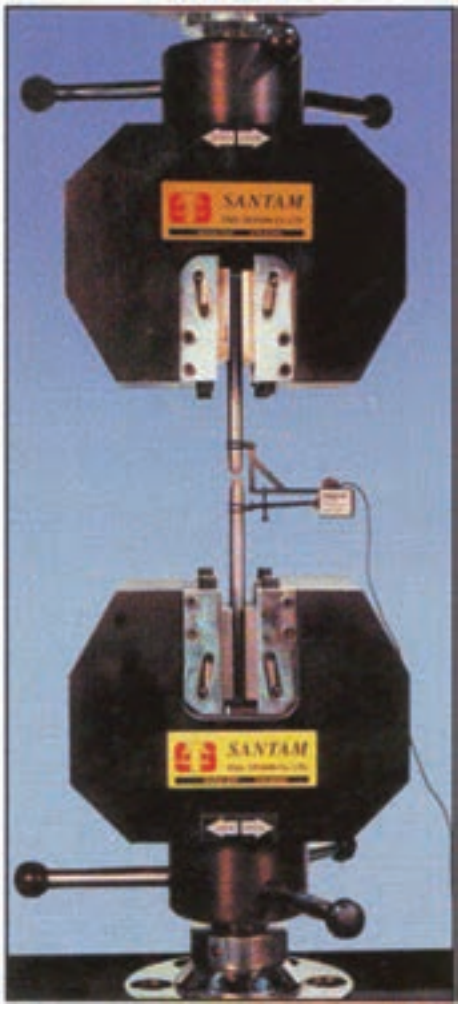
شکل ۸ــ۲ــ نمونه‌های آزمایش کشش
الف) نمایش ابعاد قطعه نمونه‌ی تخت
ب) نمونه‌ی تیغه‌ای برای درگیری گوه‌ای
پ) نمونه‌ی تیغه‌ای برای درگیری و اتصال پین‌دار

۲ــ نمونه استاندارد را مطابق شکل (۹ــ۲) در دستگاه آزمایش کشش قرارداده و پس از اعمال نیرو و شکست نمونه، طول نهایی نمونه را اندازه‌گیری می‌نماییم در ضمن دستگاه آزمایش کشش نمودار نیرو برحسب تغییر طول نمونه را نیز رسم می‌نماید که با کمک روابط

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{و} \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0}$$

مقدار تنش و کرنش را می‌توان محاسبه نموده و منحنی تنش ــ کرنش را رسم نمود.

به کمک منحنی تنش ــ کرنش می‌توان از رفتار فلز و آلیاژ مطلع شد.



شکل ۹ــ۲ــ دستگاه آزمایش کششی و نمونه آزمایش

به طور کلی در آزمایش کششی باید کمیت‌های، ضریب ارتجاعی (مدول الاستیسیته) E، تنش کششی (یا استحکام کششی) σ_U ، مقاومت تسلیم σ_Y ، ازدیاد طول نسبی (کُرنش) ε و ضریب باریک شدن (تقلیل سطح مقطع نسبی) S با چندین بار تکرار و آزمایش و تعیین میانگین آن‌ها مشخص شوند.

تمرین : چند نمونه استاندارد از فلزات و آلیاژهای مختلف تهیه نموده آزمایش را تکرار کنید و نتایج را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

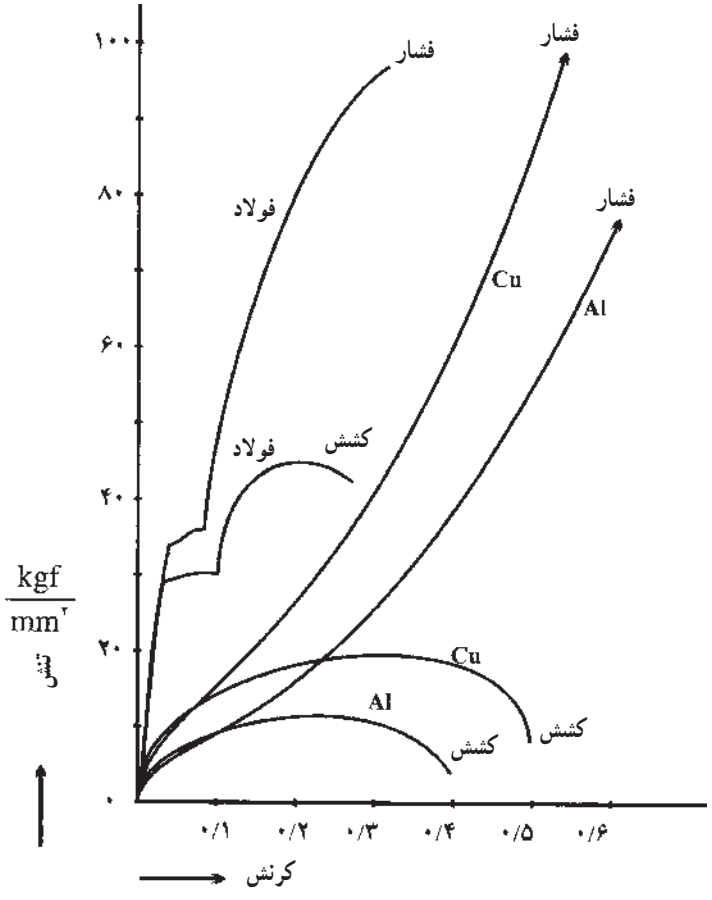
۲ــ۱ــ۲ــ آزمایش تعیین تنش فشاری (تست فشار[1]): اگر قطعه‌ی نمونه تحت تأثیر نیروی فشار معینی قرار گیرد، تغییر شکل آن (کوتاه‌شدن طول و ازدیاد سطح مقطع) متناسب با این نیرو خواهد بود ولی اگر فشار وارده بیش تر گردد، برای فلزات و آلیاژهایی که قابلیت تغییر شکل مکانیکی دارند، یک تغییر شکل خمیری و برای فلزات و آلیاژهایی که شکننده می‌باشند شکستگی ایجاد خواهد شد.

در تنش فشاری اندازه و شکل قطعه‌ی نمونه تأثیرزیادی نسبت به تنش کششی دارد و معمولاً تنش فشاری فلزات و آلیاژها به مراتب بیشتر از تنش کششی آن‌ها است. تنش فشاری یا مقاومت به فشار یک جسم عبارت است از حداکثر نیروی فشاری قبل از شکستن نسبت به سطح مقطع اولیه

$$\text{تنش فشاری یا مقاومت به فشار} = \frac{\text{حداکثر نیروی فشاری قبل از شکستن}}{\text{سطح مقطع اولیه}}$$

$$\sigma_P = \frac{F_p}{A_\cdot}$$

شکل ۱۰ــ۲، نمودارهای کششی و فشاری برای فولاد، مس و آلومینیوم را به منظور مقایسه نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ــ۲ــ نمودارهای کششی و فشاری برای فولاد، مس و آلومینیوم

وسایل مورد نیاز:

۱ــ دستگاه آزمایش تنش فشار (شکل ۱۱ــ۲)

۲ــ نمونه‌ی فشاری با ابعاد مناسب از فلزات و آلیاژهای سرب، روی، چدن خاکستری، چدن نشکن و چند نوع فولاد (ابعاد نمونه‌های با استحکام بالا کوچک‌تر و نمونه‌های نرم‌تر بزرگ‌تر انتخاب شوند)

---

۱ ــ Compressive stress

شکل ۱۱ــ۲ــ دستگاه آزمایش فشاری و نمونه آزمایش

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

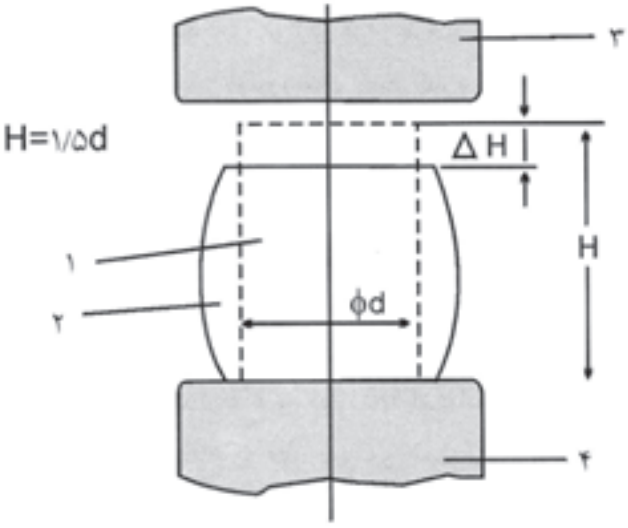
در این آزمایش نمونه استاندارد به شکل استوانه‌ای می‌باشد که مناسب‌ترین نمونه، نمونه‌ای است که ارتفاع آن بین ۱ تا ۲ برابر قطر آن باشد اغلب از نسبت $\frac{H}{d}=1/5$ استفاده می‌شود چنانچه این نسبت از ۱/۵ بیشتر باشد امکان خم‌شدن نمونه وجود دارد در حالی‌که اگر نسبت مذکور از ۱/۵ کمتر باشد اصطکاک بین دو فک دستگاه که با قاعده‌های نمونه استوانه‌ای تماس دارد بیش از حد شده و باعث تنش برشی می‌گردد (در امتداد نیروی اصطکاکی که بر نیروی فشاری اعمال شده توسط ماشین عمود است) به همین علت است که در تمام مدت اعمال فشار باید دو سطح تماس قاعده‌های نمونه با دو فک دستگاه روغن‌کاری شود (از پودر گرافیت نقره‌ای برای نمونه‌های کوچک نیز می‌توان استفاده کرد)

نمونه‌ی تهیه شده پس از روغن‌کاری بین دو فک دستگاه انیورسال قرار داده شده و نیروی فشاری به آن اعمال می‌گردد (شکل ۱۱ــ۲).

این نیرو که به طور یکنواخت و آهسته بر نمونه وارد می‌شود باعث تغییر شکل آن می‌گردد و در نهایت سبب کاهش ارتفاع و افزایش سطح نمونه می‌گردد با ادامه اعمال نیرو اصطکاک بین دو فک دستگاه و دو قاعده نمونه بیش از حد شده و باعث تنش برشی می‌گردد.

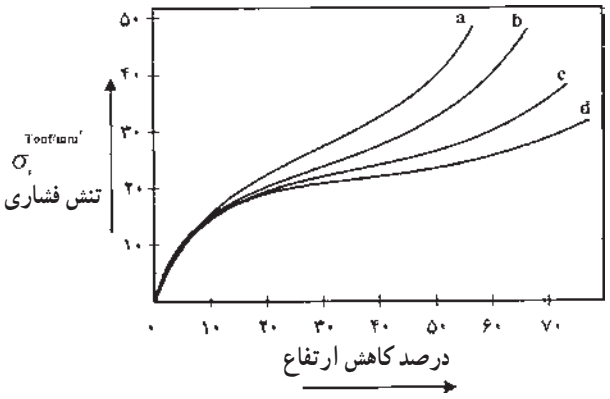
تنش برشی ایجاد شده در سطوح دو قاعده استوانه‌ی نمونه با صفحات موازی، دو اشکال بزرگ در آزمایش فشار ایجاد می‌کنند که عبارت‌اند از :

الف) نیروی تنش در دو سطح قاعده‌ی استوانه‌ی نمونه ماکزیمم است در حالی که در قسمت وسط نمونه، این تنش صفر است، در نتیجه، این امر باعث می‌شود که استوانه به شکل بشکه درآید (شکل ۱۲ــ۲) در این صورت ارتفاع کاهش یافته، نمی‌تواند ملاک صحیحی برای تعیین تنش فشاری باشد.



شکل ۱۲ــ۲ــ آزمایش فشار، بشکه‌ای شدن نمونه‌ی استاندارد بر اثر ایجاد نیروی اصطکاک بین دو صفحه‌ی موازی با سطوح قاعده‌ها

ب) نیروی فشاری ایجاد شده توسط ماشین، باید نیروی اصطکاکی صفحات موازی مذکور را نیز جبران کند. بنابراین محاسبه‌ی تنش فشاری به کمک این نیروی فشاری، از اندازه‌ی حقیقی بیشتر خواهد بود. شکل ۱۳ــ۲ منحنی تغییرات فشار وارد بر نمونه را برای یک فلز با نسبت‌های قطر به ارتفاع مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ــ۲ــ منحنی تغییرات فشار وارد بر نمونه‌ی استوانه‌ای برای یک فلز

به هر حال یادآوری می‌شود که روغن‌کاری بین صفحات و قاعده‌های استوانه‌ی نمونه از اهمیت زیادی برخوردار است و می‌تواند نیروی اصطکاکی مذکور را فوق‌العاده کاهش دهد.

۱ــ استوانه‌ی نمونه قبل از فشار اعمال شده

۲ــ نمونه بعد از فشار اعمال شده ۳ و ۴ صفحات موازی

تمرین: آزمایش فوق را برای نمونه‌های از جنس مختلف انجام داده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

۲ ــ۲ــ سختی اجسام

سختی جسم یعنی میزان مقاومت نیروهای داخلی در مقابل خراش یا سایش. سختی یک جسم با عملیات مکانیکی یا حرارتی که روی آن انجام می‌گیرد تغییر می‌کند. اندازه‌گیری سختی روی اصول خراش برداشتن جسم نرم از جسم سخت (روش موهس)، یا اثر گذاشتن یک ساچمه‌ی سخت روی جسم نمونه (روش برینل) یا ایجاد عمق به وسیله‌ی یک نوک الماسه به شکل مخروط که تحت فشار قرار گرفته است (روش راکول) و یا روش‌های دیگر بنا گذاشته شده است.

ساده‌ترین روش تعیین سختی، روش خراش برداشتن است. با رجوع به جدول موهس (جدول ۱ــ۲) می‌توان سختی جسم را تعیین کرد. در این جدول سختی الماس که سخت‌ترین جسم است نمره ۱۰ و پودر تالک دارای نمره ۱ می باشد. اجسام سیال فاقد سختی می‌باشند. بنابراین نمره‌ی سختی آن‌ها صفر است.

جدول ۱ــ۲ــ سختی اجسام در مقیاس موهس (جدول موهس)

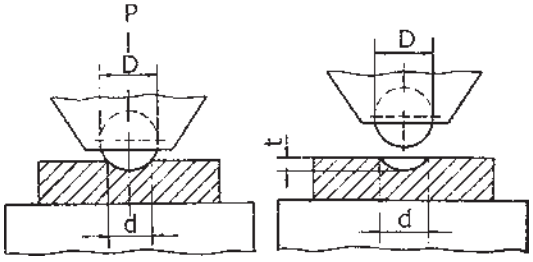
جسم	فرمول شیمیایی	سختی
الماس	C	۱۰
کروندُم	Al_2O_3	۹
توپاز	$Al_2SiO_4F_2$	۸
کوارتز	SiO_2	۷
ارتوکلاز	$KAlSi_3O_8$	۶
آپاتیت	$Ca_5(PO_4)_3F$	۵
فلوریت	CaF_2	۴
کلسیت	$CaCO_3$	۳
گچ	$CaSO_4.2H_2O$	۲
تالک	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$	۱

با استفاده از این جدول و مقایسه‌ی سختی اجسام با سختی مواد دیگر، سختی کاربیدتنگستن ۹/۵، کاربید سیلیسیم ۹، فولادها بین ۵ تا ۸/۵، سرب ۱/۵، گرافیت حدود ۱ و سدیم ۰/۴ تعیین شده‌اند. روشن است که تعیین سختی اجسام با این روش دقیق نبوده و فقط حدود نسبی سختی‌ها را مشخص می‌کند.

برای تعیین سختی دقیق فلزات و آلیاژها از روش‌های برینل، راکول و ویکرز استفاده می‌کنند.

۱ــ۲ــ۲ــ آزمایش تعیین سختی به روش برینل[1]:

در روش برینل یک ساچمه از کاربید تنگستن یا فولاد (پرکربن یا سمانته آب داده شده) به قطر (D) روی جسم با نیروی (P) به مدت ثابتی (۱۰ ثانیه برای آلیاژهای آهنی و ۳۰ تا ۶۰ ثانیه برای آلیاژهای غیرآهنی) توسط ماشین مربوطه، فشار ایجاد می‌کند. از تقسیم نیروی وارد بر سطح ایجاد شده (سطح عرقچین کروی) عدد سختی در این روش به دست می‌آید (شکل ۱۴ــ۲). سختی برینل را به اختصار با BHN[2] نمایش می‌دهند.



شکل ۱۴ــ۲ــ آزمایش و تعیین عدد سختی برینل

مقدار این سختی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$BHN = \frac{P}{A}$$

که در آن P عبارت است از نیروی وارد به ساچمه (بار) و A سطح عرقچین کروی ایجاد شده روی فلز یا آلیاژ مورد آزمایش است. از طرفی سطح عرقچین کروی با توجه به شکل اخیر چنین است.

$$A = \pi\ Dt \quad و \quad t = \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

در این روابط t عبارت از عمق فرو رفتگی (نفوذ ساچمه در فلز یا آلیاژ) و d قطر دایره‌ی اثر است. به این ترتیب می‌توان سختی برینل را از رابطه‌ی زیر محاسبه و تعیین کرد.

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

چون سختی برینل عبارت است از نیرو تقسیم بر سطح (مانند فشار)، لذا واحد آن برحسب kgf/mm^2 یا N/m^2 (پاسکال Pa) بیان می شود. در این صورت واحدهای : D، t و d برحسب mm یا m خواهد بود (واحد مناسب دیگر برای سختی برینل، عبارت است از مگا پاسکال «MPa» که در این صورت واحد P برحسب نیوتن و واحد کمیت‌های D، t و d برحسب میلی‌متر خواهد بود). یادآوری می‌شود که :

$$1kfg/mm^2 \ \ 9/8N/mm^2 = 9/8\times10^6\ N/m^2 =$$
$$9/8\times10^6\ Pa = 9/8MPa$$

تجربه نشان داده است که بین P (نیروی بار بر حسب نیوتن) و D (قطر ساچمه برحسب میلی‌متر) نسبتی وجود دارد که در جدول ۲ــ۲ نشان داده شده است. حداقل و حداکثر ضخامت نمونه برحسب قطر ساچمه نیز درج شده است.

ضخامت نمونه‌ی مورد آزمایش باید حداقل ۱۰ برابر عمق فرو رفتگی ساچمه در فلز نمونه باشد یعنی :

$$h \geq \frac{10P}{\pi D(BHN)}$$

حداکثر عدد سختی برینل برای اندازه گیری سختی فلزات آهنی، فلزات غیرآهنی و آلیاژهای آن ۴۵۰۰MPa (تقریباً $450kgf/mm^2$) است.

وسایل مورد نیاز:

۱ــ دستگاه سختی سنج برینل

۲ــ نمونه (مطابق شرح آزمایش)

۳ــ میکروسکپ میکرومتردار (یا دستگاه منعکس کننده‌ی نور از روی سطح نمونه روی یک صفحه)

ماشین یا دستگاه آزمایش برینل ممکن است از نوع ئیدرولیکی باشد و به‌طور دستی عمل کند (یا این که دستگاه مجهز به یک نوع اهرمی باشد که توسط دست یا الکتروموتور، نیروی لازم را اعمال کند). در اغلب موارد، دستگاه آزمایش برینل از نوع تحرک اهرم توسط الکتروموتور بوده و کاربرد دارد. (شکل ۱۵ــ۲)

---

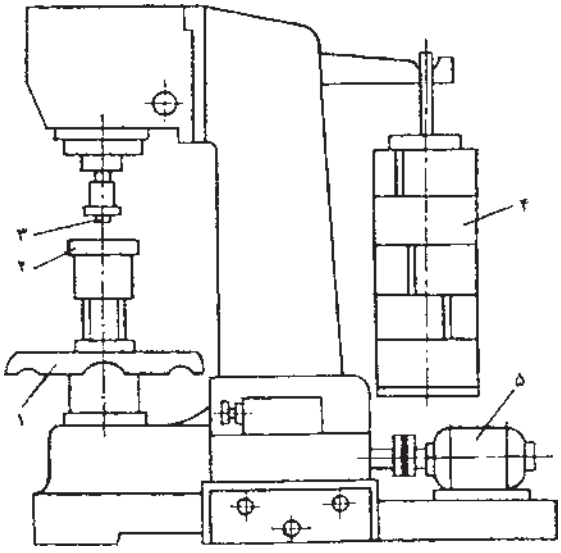
۱ ــ Brinell ۲ ــ Brinell Hardness Number

۱۰ برابر عمق فرورفتگی ساچمه بوده و همچنین باید دارای دو سطح موازی و صیقلی باشد.

ابتدا نمونه‌ی تهیه شده روی سندان دستگاه سختی سنج قرار داده می‌شود.

و سپس گیره‌ی متحرک (چرخشی) آن‌قدر چرخانده می‌شود تا سندان بالا بیاید و نمونه‌ی روی آن با ساچمه تماس پیدا کند. در این هنگام الکتروموتور (اهرم) را به کار می‌اندازند تا وزنه آزاد شده و نیروی لازم توسط وزنه، به تدریج ساچمه را روی نمونه فشار دهد. زمان اعمال این فشار در جدول ۲ــ۲ برای قطرهای مختلف ساچمه (و سایر عوامل) درج شده است.

پس از آن که فشار لازم ایجاد شد و دایره‌ی اثر روی نمونه به‌وجود آمد، جهت حرکت الکتروموتور (اهرم) را عوض می‌کنند تا نیروی وزنه قطع شود. اکنون می‌توان گیره‌ی متحرک را به‌طور وارونه گرداند و سندان را پایین آورد. نمونه که دایره‌ی اثر روی آن ایجاد شده است، برای اندازه‌گیری و تعیین قطر d توسط میکروسکوپ میکرومتر، آماده است.



شکل ۱۵ــ۲ــ دستگاه سختی‌سنج برینل
۱ــ گیره متحرک چرخشی ۲ــ سندان
۳ــ ساچمه فرو رونده ۴ــ وزنه ۵ــ الکتروموتور

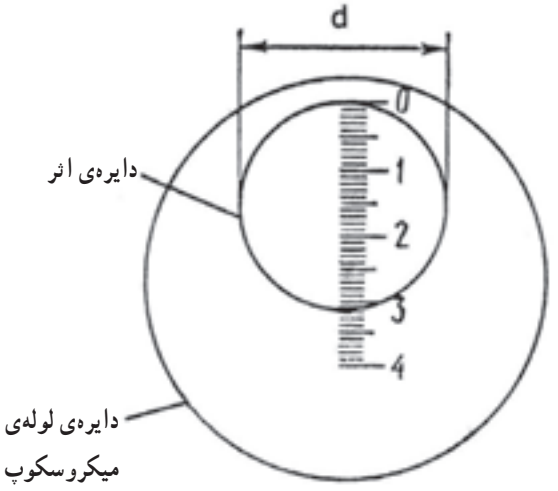
نحوه‌ی اجرای آزمایش:

نمونه‌ی آزمایش سختی باید دارای ضخامت حداقل

جدول ۲ــ۲ــ سختی برینل فلزات برحسب عوامل: قطر ساچمه، نیروی وارد بر نمونه، ضخامت نمونه و زمان اعمال نیرو

فلز	سختی Bhn $MPa(N/mm^2)$	ضخامت نمونه h (mm)	نسبت بین P و D	قطر ساچمه D (mm)	نیروی وارد (بار) بر نمونه P(N)	زمان اعمال نیرو T(S)
فلزات آهنی	۱۴۰۰ــ۱۵۰۰	۶ــ۳ ۴ــ۲ حداکثر ۲	$P=۳۰D^2$	۱۰ ۵ ۲/۵	۳۰۰۰۰ ۷۵۰۰ ۱۸۷۵	۱۰
	حداکثر ۱۴۰۰	حداقل ۶ ۶ــ۳ حداکثر ۳	$P=۱۰۰D^2$	۱۰ ۵ ۲/۵	۱۰۰۰۰ ۲۵۰۰ ۶۲۵	۱۰
فلزات غیرآهنی	حداقل ۱۳۰۰	۶ــ۳ ۴ــ۲ حداکثر ۲	$P=۳۰D^2$	۱۰ ۵ ۲/۵	۳۰۰۰۰ ۷۵۰۰ ۱۸۷۵	۳۰
	۳۵۰ــ۱۳۰۰	۹ــ۳ ۶ــ۳ حداکثر ۳	$P=۱۰۰D^2$	۱۰ ۵ ۲/۵	۱۰۰۰۰ ۲۵۰۰ ۶۲۵	۳۰
	۸۰ــ۳۵۰	حداقل ۶ ۶ــ۳ حداکثر ۳	$P=۲۵D^2$	۱۰ ۵ ۲/۵	۲۵۰۰ ۶۲۵ ۱۵۶	۶۰

شکل ۱۶ــ۲ نحوه‌ی اندازه‌گیری قطر دایره‌ی اثر روی قطعه‌ی نمونه (d) را توسط یک میکروسکوپ میکرومتردار نشان می‌دهد هر فاصله نماینده‌ی $\frac{۱}{۱۰}$ میلی‌متر است و در این شکل حداکثر قطر ۴ میلی‌متر قابل اندازه‌گیری می‌باشد.



شکل ۱۶ــ۲ــ اندازه‌گیری قطر دایره‌ی اثر با میکروسکوپ میکرومتردار.

ممکن است اندازه‌گیری قطر دایره‌ای اثر به‌وسیله‌ی تابش نور روی قطعه‌ی نمونه و سپس انعکاس آن پس از چند برابر شدن تصویر توسط عدسی‌های مخصوص روی یک صفحه انجام گیرد.

سپس قطر اندازه‌گیری شده (d) در فرمول (BHN) قرار داده می‌شود و عدد سختی برحسب برینل به‌دست می‌آید.

معمولاً دستگاه‌های آزمایش سختی برینل جداولی به صورت ضمیمه (پلاک) دارند. به کمک این جدول‌ها و اندازه‌ی قطر دایره‌ی اثر به سهولت و به سرعت عدد سختی برینل معلوم می‌شود (بدون استفاده از فرمول و محاسبه).

تذکر: آزمایش سختی سنجی را معمولاً برای هر نمونه در سه نقطه دور از هم انجام داده و سپس میانگین سختی برینل سه نقطه به‌دست آمده را به عنوان سختی نمونه در نظر می‌گیرند.

مثال: برای اندازه‌گیری سختی برینل یک قطعه فولاد ریختگی، قطر گلوله‌ی مربوط ۱۰ میلی‌متر و بار وارد به آن ۳۰۰۰ کیلوگرم نیرو معین شده است. در صورتی که قطر دایره‌ی اثر ایجاد شده روی قطعه ۳ میلی‌متر باشد، سختی آن چنین حساب خواهد شد.

$$P = ۳۰۰۰\,kgf \quad و \quad d = ۳mm \quad و \quad D = ۱۰mm$$

$$BHN = \frac{P}{\frac{\pi}{۲}D(D - \sqrt{D^۲ - d^۲})}$$

$$BHN = \frac{۳۰۰۰}{\frac{۳/۱۴}{۲} \times ۱۰(۱۰ - \sqrt{۱۰^۲ - ۳^۲})} =$$

$$\frac{۳۰۰۰}{۱۵/۷(۱۰ - ۹/۵۴)}$$

$$BHN \approx ۴۱۵\,kgf/mm^۲ \Rightarrow ۴۱۵ \times ۹/۸$$

$$= ۴۰۶۷MPa$$

تمرین: سختی چند فلز مختلف را به روش برینل اندازه‌گیری نموده و نتایج را به روش گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

۲ــ۲ــ۲ــ آزمایش تعیین سختی به روش راکول[1]:

در روش راکول تعیین سختی از روی عمق فرو رفتگی ایجاد شده در قطعه‌ی مورد آزمایش توسط یک نوک مخروطی از الماس و یا یک ساچمه فولادی که تحت تأثیر بار ثابت و برای مدت معینی قرار گرفته است مشخص می‌گردد. (توسط عقربه‌ی دستگاه). روش سختی سنجی راکول نیز یکی از روش‌های مهم صنعتی است.

زاویه‌ی رأس مخروط[2] ۱۲۰ درجه بوده و در مورد ساچمه‌ی[3] فولادی، قطر آن ۱/۵۸۷۵ میلی‌متر ($\frac{۱}{۱۶}$ اینچ) مشخص و استاندارد شده است. بار وارد بر ساچمه معمولاً ۹۸۰ نیوتن و برای نوک مخروطی الماسه ۱۴۷۰ نیوتن است. در شروع آزمایش تعیین سختی، ابتدا یک بار : نیوتن ۹۸ =P. وارد می‌کنند تا خاصیت ارتجاعی اثر خنثی شود. عدد سختی راکول مستقیماً از روی عقربه‌ی دستگاه سختی سنج مربوطه خوانده می‌شود و درجات صفحه‌ی مدرج دستگاه برحسب رابطه‌ی زیر با توجه به شکل ۱۷ــ۲ درجه‌بندی شده است.

سختی راکول $R = \frac{K - (H - h)}{C}$

در این رابطه :

K ضریبی است ثابت که برای نوک مخروطی ۰/۲ و برای ساچمه‌ی فولادی برابر ۰/۲۶ است.

h عمق فرو رفتگی برحسب میلی‌متر برای نوک مخروطی و ساچمه‌ی فولادی بعد از اضافه شدن بار اوّلیه می‌باشد.

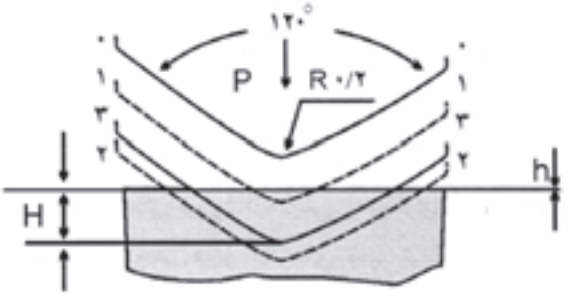
H عمق فرو رفتگی بر حسب میلی‌متر برای نوک مخروطی و ساچمه‌ی فولادی بدون اضافه شدن بار اوّلیه است.

C ضریبی است ثابت برای بزرگ نشان دادن تقسیمات مقیاس و مقدار آن برابر : ۰/۰۰۲ میلی‌متر است.

در حقیقت هر واحد سختی راکول معادل ۰/۰۰۲mm عمق نفوذ نوک الماس (یا ساچمه‌ی فولادی) است.

با این که اندازه‌گیری سختی در آزمایشگاه‌ها با روش برینل (و همچنین ویکرز) از دقت زیاد و مناسبی برخوردار است، با این حال روش راکول به علت : سرعت عمل، سادگی کار و آزمایش و قرائت مستقیم اندازه‌ی سختی از روی صفحه‌ی مدرج دستگاه، امروز به خصوص برای اندازه‌گیری فلزات و آلیاژهای سخت نظیر فولادهای آب داده زیاد استفاده می‌شود. در شکل ۱۸ــ۲ صفحه مدرج دستگاه سختی‌سنج راکول نشان داده شده است.

شکل ۱۸ــ۲ــ آزمایش سختی راکول



شکل ۱۷ــ۲ــ اندازه‌گیری سختی راکول با نوک مخروطی الماس[4]

(شعاع کره‌ی نوک مخروط ۰/۲ میلی متر است).

۱ــ۱ــ فرو رفتگی مخروط زیر بار اوّلیه‌ی ۹۸ نیوتن.

۲ــ۲ــ فرو رفتگی مخروط زیر بار ۱۵۶۸ نیوتن

(مجموع بار اوّلیه: $P_0 = 98N$ و بار اصلی یا نهایی $P_0 = 1470N$)

۳ــ۳ــ فرو رفتگی مخروط زیر بار ۱۴۷۰N بدون بار اوّلیه است.

۱ــ Rockwell ۲ــ Cone - Brale ۳ــ Ball ۴ــ Diamond cone

در این سختی‌سنجی که ابتدا یک بار اوّلیه‌ی[1] ۹۸N(۱۰kgf) بر روی نوک یا ساچمه‌ی فرو رونده وارد می‌شود که پس از تنظیم عقربه‌ی صفحه‌ی مدرج روی صفر، می‌توان بار نهایی[2] را اعمال کرد. در این صورت عمق فرو رفتگی متناسب با تقسیمات سختی روی صفحه‌ی مدرج مشخص می‌شود. دراین آزمایش هیچ‌گونه محاسبه و یا تبدیلی از روی جداول لازم نیست و مستقیماً عدد سختی راکول از روی عقربه‌ی متحرک صفحه‌ی مدرج قابل رؤیت است.

برحسب تغییر بار نهایی، نوع نوک و مقدار نفوذ آن در جسم انواع مختلفی از روش‌های راکول در صنایع مختلف طراحی شده است و به صورت ...، R_C ، R_B ، R_A نمایش داده می‌شوند. متداول‌ترین این روش‌ها راکول B و راکول C هستند که به‌طور وسیعی در مهندسی صنایع کاربرد دارند. (B حرف اول کلمه‌ی انگلیسی ساچمه : Ball و C حرف اول کلمه‌ی مخروط : Cone است).

مشخصات این دو روش چنین هستند :

ـ راکول B :

فرمول سختی : $R = ۱۰۰ - \frac{H - h}{۰/۰۰۲}$

بار اوّلیه : $P_۰ = ۹۸N = ۱۰kgf$

بار نهایی : $P = ۹۸۰N = ۱۰۰kgf$

رنگ مقیاس صفحه‌ی مدرج (تقسیمات دایره‌ی درونی) : قرمز

نفوذ کننده (نوک) : کره‌ی (ساچمه) فولادی به قطر $\frac{۱}{۱۶} = ۱/۵۸۷۵mm$

آلیاژهای مورد آزمایش : آلیاژهای مس، آلیاژهای آلومینیوم و فولادهای آنیل شده‌ی کم کربن

ـ راکول C :

فرمول سختی : $R_C = ۱۳۰ - \frac{H - h}{۰/۰۰۲}$

بار اوّلیه : $P_۰ = ۹۸N = ۱۰kgf$

بار نهایی : $P = ۱۴۷۰N = ۱۵۰kgf$

رنگ مقیاس صفحه‌ی مدرج (تقسیمات دایره‌ی بیرونی) : سیاه

نفوذ کننده : نوک مخروطی الماسه

آلیاژهای مورد آزمایش : بسیاری از فولادهای سخت، انواع چدن‌ها و آلیاژهای تمپر شده.

لازم به توضیح است که اندازه‌گیری سختی ورق‌های نازک، قشر سمانته یا نیتروره شده‌ی فولادها و نظایر آن‌ها با روش راکول معمولی که ذکر شد مقدور نیست. در این موارد از آزمایش سختی سطحی[3] استفاده می‌کنند. بارهای به کار گرفته شده در این نوع آزمایش کم (حتی کم‌تر از ۳kgf) و دقت اندازه‌گیری زیاد است.

در مورد سختی R_A (راکول A) بار نهایی عبارت است از ۶۰kgf = ۵۸۸N و نفوذکننده نوک مخروطی الماسه است. راکول A برای اندازه‌گیری ورق‌های فولادی نازک به کار می‌رود.

وسایل مورد آزمایش:

۱ـ دستگاه سختی‌سنج راکول (مجهز به صفحه‌ی مدرج با مقیاس راکول B و C)

۲ـ قطعه‌ی نمونه (مطابق شرح آزمایش)

شکل ۱۹ـ۲ قسمت‌های مختلف یک دستگاه یا ماشین آزمایش راکول را نشان می‌دهد.

صفحه‌ی مدرج (۶) دارای دو مقیاس قرمز (راکول B[4]) و سیاه (راکول C[5]) و همچنین دو عقربه است.

عقربه‌ی بزرگ‌تر برای مشخص کردن عدد سختی و عقربه‌ی کوچک‌تر برای نمایش بار اوّلیه $P_۰ = ۹۸N$ می‌باشد.

۱ـ Minor force
۲ـ Major force
۳ـ Rockwell Superficial Hardness Test
۴ـ HRB
۵ـ HRC

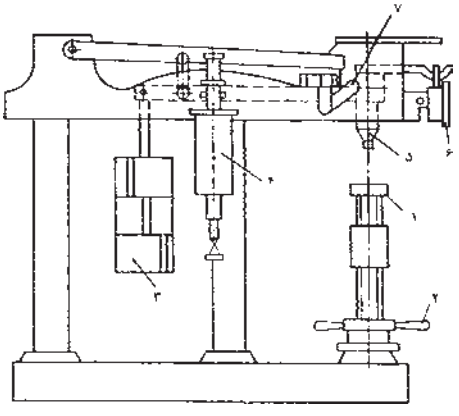
نحوه‌ی اجرای آزمایش:

در آزمایش سختی‌سنجی با دستگاه یا ماشین راکول، باید هر دو طرف نمونه‌ی مورد آزمایش، تراشیده و پولیش شود. سپس نمونه را باید روی سندان (۱) قرار داد. در این هنگام می‌توانیم با چرخش گیره‌ی متحرک (۲)، سندان (و نمونه‌ی روی آن) را آن‌قدر بالا بیاوریم که با نوک ساچمه یا مخروط تماس پیدا کند. چرخش این گیره را به اندازه‌ای ادامه می‌دهیم تا عقربه‌ی کوچک‌تر به روی نقطه‌ی قرمز رنگ صفحه‌ی مدرج قرار گیرد. در این موقع مطمئن می‌شویم که بار اوّلیه‌ی ۹۸N اعمال شده است. در چنین وضعیتی، ممکن است عقربه‌ی بزرگ‌تر روی صفر قرار گرفته باشد یا نباشد. چنان‌چه عقربه روی صفر نباشد، صفحه‌ی مدرج را آن‌قدر دوران می‌دهیم تا این عقربه روی صفر میزان شود.

اکنون می‌توانیم دستگیره (۷) را فشار دهیم تا این که بار نهایی (P) با آزاد شدن و معلق شدن وزنه (۳) که معادل همین بار است، روی نمونه اعمال شود. زمان نیروی وارده ۵ تا ۷ ثانیه است. بعد از این که عقربه‌ی صفحه مدرج، آرام و بی‌حرکت گردید، لازم است دستگیره به جلو کشیده شود تا وزنه‌ی مذکور باری را اعمال نکند. البته در این وضعیت بار اوّلیه نیز برداشته شده است. به این ترتیب عدد سختی راکول به‌طور اتوماتیک توسط عقربه‌ی بزرگ‌تر روی صفحه‌ی مدرج (۶) مشخص و معین می‌شود. در این موقع می‌توانیم عدد سختی را یادداشت کنیم و دستگیره‌ی متحرک چرخشی را دوران دهیم تا سندان پایین بیاید.

باید دانست که در تمام مدت آزمایش، نباید نمونه سرد یا گرم شود (برای تمام انواع سختی سنج‌ها).

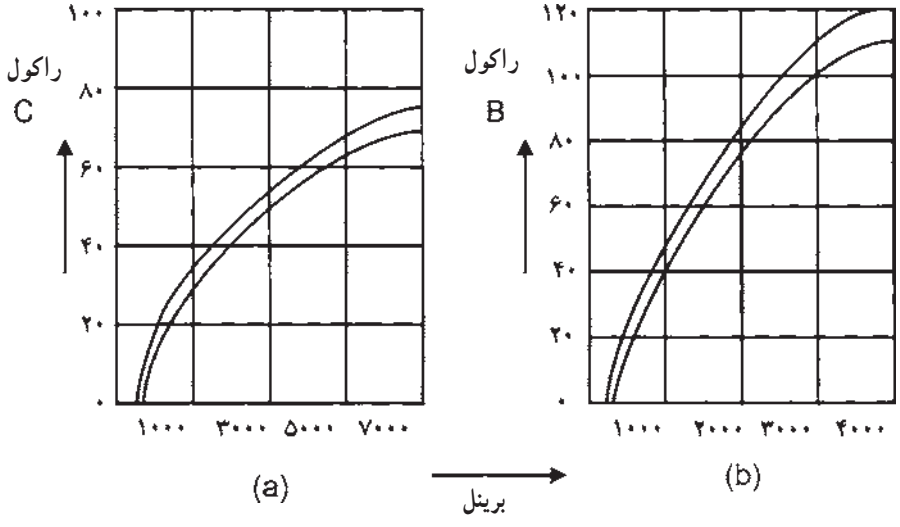
نوک الماسه برای اندازه‌گیری دقیق و صحیح فولادهای تمپر شده و کوئنچ شده، سختی سطحی (بعد از کربوره شدن یا سختی القایی) سختی آلیاژهای کاربیدی (کاربیدهای سمانته شدن). ساچمه‌ی فولادی برای اندازه‌گیری سختی فولاد آنیل شده و فلزات و آلیاژهای غیرآهنی به کار می‌رود. اندازه‌گیری‌های سختی باید حداقل در سه نقطه انجام گیرد و فاصله‌ی بین هر دو



شکل ۱۹ــ۲ــ اجزای مختلف یک نوع دستگاه آزمایش سختی راکول
۱ــ سندان، ۲ــ گیره‌ی متحرک چرخشی، ۳ــ وزنه، ۴ــ مخزن روغن‌پاش، ۵ــ سنبه، ۶ــ صفحه‌ی مشخص‌کننده‌ی سختی (صفحه‌ی مدرج) ۷ــ دستگیره

فرورفتگی[1] حداقل برای نوک مخروطی باید ۱/۵ میلی‌متر و برای ساچمه ۴ میلی‌متر باشد. ضخامت نمونه باید حداقل ۱۰ برابر عمق نفوذ باشد.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در سختی سنجی راکول واحد سختی عبارت است از جابه‌جایی سنبه و در نتیجه فرو رفتن نوک مخروطی یا ساچمه در داخل فلز که برابر است با ۰/۰۰۲ میلی‌متر عدد سختی راکول را می‌توان تبدیل به عدد سختی برینل کرد که با مراجعه به نمودارهای شکل ۲۰ــ۲ و هم‌چنین جدول ۳ــ۲این مطلب روشن می‌شود.



شکل ۲۰ــ۲ــ مقایسه و تبدیل عدد سختی‌های برینل و راکول (a) راکول c (مخروط الماسه) به برینل ــ (b) راکول B (ساچمه) به برینل

در مورد تبدیل عدد سختی راکول A به عدد سختی راکول C (و بالعکس) می‌توان از معادله‌ی زیر استفاده کرد :

$$HRC \approx 2HRA - 104$$

در مورد ورق‌های بسیار نازک (کم‌تر از ۰/۳ میلی‌متر) آزمایش تعیین سختی، باید از روش سختی‌سنج سطحی راکول انجام گیرد. بار اوّلیه در این آزمایش حدود ۳۰N (۳ کیلوگرم نیرو) و بار نهایی که بستگی به ضخامت نمونه و نوع نوک دارد، می‌تواند حدود ۱۵۰، ۳۰۰، ۴۵۰ و ۶۰۰ نیوتن انتخاب شود.

مقیاس اندازه‌گیری در هر دو راکول (B و C) بین ۱ تا ۱۰۰ است.

تمرین: سختی چند نمونه فلزی را با استفاده از روش‌های راکول B و C اندازه‌گیری نموده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

۱ــ Indentation

جدول ۳ــ۲ــ مقایسه‌ی عدد سختی برینل، راکول و ویکروز

ویکرز	برینل D/P ۱۰/۳۰۰۰		راکول			ویکرز	برینل P/P ۱۰/۳۰۰۰		راکول		
	عدد سختی	قطر دایره‌ی اثر	مقیاس	مقیاس	مقیاس		عدد سختی	قطر دایره‌ی اثر	مقیاس	مقیاس	مقیاس
MPa	MPa	(d)mm	A	C	B	MPa	MPa	(d)mm	A	C	B
۲۲۶۰	۲۲۹۰	۴/۰۰	۶۲	۲۲	۹۸	–	۹۴۶۰	۲/۰۰	–	–	–
۲۲۱۰	۲۲۳۰	۴/۰۵	۶۱	۲۱	۹۷	–	۸۹۸۰	۲/۰۵	–	–	–
۲۱۷۰	۲۱۷۰	۴/۱۰	۶۱	۲۰	۹۷	–	۸۵۷۰	۲/۱۰	–	–	–
۲۱۳۰	۲۱۲۰	۴/۱۵	۶۰	۱۹	۹۶	–	۸۱۷۰	۲/۱۵	–	–	–
۲۰۹۰	۲۰۷۰	۴/۲۰	۶۰	۱۸	۹۵	۱۲۲۰۰	۷۸۲۰	۲/۲۰	۸۹	۷۲	–
۲۰۱۰	۲۰۱۰	۴/۲۵	۵۹	–	۹۴	۱۱۱۴۰	۷۴۴۰	۲/۲۵	۸۷	۶۹	–
۱۹۷۰	۱۹۷۰	۴/۳۰	۵۸	–	۹۳	۱۰۲۱۰	۷۱۳۰	۲/۳۰	۸۵	۶۷	–
۱۹۰۰	۱۹۲۰	۴/۳۵	۵۸	–	۹۲	۹۴۰۰	۶۸۳۰	۲/۳۵	۸۴	۶۵	–
۱۸۶۰	۱۸۷۰	۴/۴۰	۵۷	–	۹۱	۸۶۷۰	۶۵۲۰	۲/۴۰	۸۳	۶۳	–
۱۸۰۰	۱۸۳۰	۴/۴۵	۵۶	–	۸۹	۸۰۳۰	۶۲۷۰	۲/۴۵	۸۲	۶۱	–
۱۷۷۰	۱۷۹۰	۴/۵۰	۵۶	–	۸۸	۷۴۶۰	۶۰۰۰	۲/۵۰	۸۱	۵۹	–
۱۷۴۰	۱۷۴۰	۴/۵۵	۵۵	–	۸۷	۶۹۴۰	۵۷۸۰	۲/۵۵	۸۰	۵۸	–
۱۷۱۰	۱۷۰۰	۴/۶۰	۵۵	–	۸۶	۶۴۹۰	۵۵۵۰	۲/۶۰	۷۹	۵۶	–
۱۶۵۰	۱۶۷۰	۴/۶۵	۵۴	–	۸۵	۶۰۶۰	۵۳۲۰	۲/۶۵	۷۸	۵۴	–
۱۶۲۰	۱۶۳۰	۴/۷۰	۵۳	–	۸۴	۵۸۷۰	۵۱۲۰	۲/۷۰	۷۷	۵۲	–
۱۵۹۰	۱۵۹۰	۴/۷۵	۵۳	–	۸۳	۵۵۱۰	۴۹۵۰	۲/۷۵	۷۶	۵۱	–
۱۵۴۰	۱۵۶۰	۴/۸۰	۵۲	–	۸۲	۵۳۴۰	۴۷۷۰	۲/۸۰	۷۶	۴۹	–
۱۵۲۰	۱۵۲۰	۴/۸۵	۵۲	–	۸۱	۵۰۲۰	۴۶۰۰	۲/۸۵	۷۵	۴۸	–
۱۴۹۰	۱۴۹۰	۴/۹۰	۵۱	–	۸۰	۴۷۴۰	۴۴۴۰	۲/۹۰	۷۴	۴۷	–
۱۴۷۰	۱۴۶۰	۴/۹۵	۵۰	–	۷۸	۴۶۰۰	۴۲۹۰	۲/۹۵	۷۳	۴۵	–
۱۴۴۰	۱۴۳۰	۵/۰۰	۵۰	–	۷۶	۴۳۵۰	۴۱۵۰	۳/۰۰	۷۳	۴۴	–
–	۱۴۰۰	۵/۰۵	–	–	۷۶	۴۲۳۰	۴۰۱۰	۳/۰۵	۷۲	۴۳	–
–	۱۳۷۰	۵/۱۰	–	–	۷۵	۴۰۱۰	۳۸۸۰	۳/۱۰	۷۱	۴۱	–
–	۱۳۴۰	۵/۱۵	–	–	۷۴	۳۹۰۰	۳۷۵۰	۳/۱۵	۷۱	۴۰	–
–	۱۳۱۰	۵/۲۰	–	–	۷۲	۳۸۰۰	۳۶۳۰	۳/۲۰	۷۰	۳۹	–
–	۱۲۸۰	۵/۲۵	–	–	۷۱	۳۶۱۰	۳۵۲۰	۳/۲۵	۶۹	۳۸	–
–	۱۲۶۰	۵/۳۰	–	–	۶۹	۳۴۴۰	۳۴۱۰	۳/۳۰	۶۹	۳۷	–
–	۱۲۳۰	۵/۳۵	–	–	۶۸	۳۳۵۰	۳۳۱۰	۳/۳۵	۶۸	۳۶	–
–	۱۲۱۰	۵/۴۰	–	–	۶۷	۳۲۰۰	۳۲۱۰	۳/۴۰	۶۸	۳۵	–
–	۱۱۸۰	۵/۴۵	–	–	۶۶	۳۱۲۰	۳۱۱۰	۳/۴۵	۶۷	۳۴	–
–	۱۱۶۰	۵/۵۰	–	–	۶۵	۳۰۵۰	۳۰۲۰	۳/۵۰	۶۷	۳۳	–
–	۱۱۴۰	۵/۵۵	–	–	۶۴	۲۹۱۰	۲۹۳۰	۳/۵۵	۶۶	۳۱	–
–	۱۱۱۰	۵/۶۰	–	–	۶۲	۲۸۵۰	۲۸۵۰	۳/۶۰	۶۶	۳۰	–
–	۱۰۹۰	۵/۶۵	–	–	۶۱	۲۷۸۰	۲۷۷۰	۳/۶۵	۶۵	۲۹	–
–	۱۰۷۰	۵/۷۰	–	–	۵۹	۲۷۲۰	۲۶۹۰	۳/۷۰	۶۵	۲۸	–
–	۱۰۵۰	۵/۷۵	–	–	۵۸	۲۶۱۰	۲۶۲۰	۳/۷۵	۶۴	۲۷	–
–	۱۰۳۰	۵/۸۰	–	–	۵۷	۲۵۵۰	۲۵۵۰	۳/۸۰	۶۴	۲۶	–
–	۱۰۱۰	۵/۸۵	–	–	۵۶	۲۵۰۰	۲۴۸۰	۳/۸۵	۶۳	۲۵	–
–	۹۹۰	۵/۹۰	–	–	۵۴	۲۴۰۰	۲۴۱۰	۳/۹۰	۶۳	۲۴	۱۰۰
–	۹۷۰	۵/۹۵	–	–	۵۳	۲۳۵۰	۲۳۵۰	۳/۹۵	۶۲	۲۳	۹۹

۳ــ۲ــ۲ــ آزمایش تعیین سختی به روش ویکرز[1]:

روش دیگری که بیش‌تر برای تعیین سختی آلیاژهایی که سطح خارجی آن‌ها سخت است، به کار می‌رود روش ویکرز می‌باشد. آزمایش تعیین سختی در این روش با استفاده از یک هرم مربع‌القاعده با نوک الماسه انجام می‌گیرد. زاویه‌ی رأس بین دو سطح مقابل این هرم ۱۳۶° است. نمونه‌ی مورد آزمایش قبلاً تراشیده و پولیش شده است. با فرو رفتن نوک الماسه‌ی هرم در این نمونه، سطح اثر شامل سطوح چهار مثلث جانبی متساوی الساقین پدید می‌آید. خارج قسمت بار وارد بر سطح این چهار مثلث، عدد سختی ویکرز نامیده می‌شود. محاسبه نشان می‌دهد که مقدار سختی در این روش از رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود :

عدد سختی ویکرز $VHN = \frac{۲P\sin\frac{\alpha}{۲}}{d^۲}$

و چون $\alpha = ۱۳۶°$ بنابراین :

$$\sin\frac{\alpha}{۲} = ۲\sin\frac{۱۳۶°}{۲} = ۲\sin ۶۸° = ۱/۸۵۴۴$$

و رابطه‌ی ویکرز به صورت زیر خلاصه می‌شود :

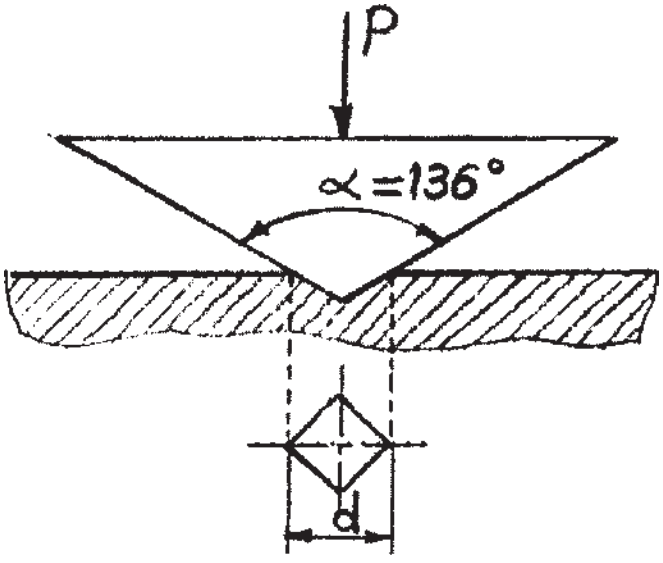
$$VHN = ۱/۸۵۴\frac{P}{d^۲}$$

در روابط مذکور :

P بار وارد بر قطعه برحسب کیلوگرم نیرو یا نیوتن ؛

α زاویه‌ی رأس هرم بین دو سطح مقابل (فرجه‌ی بین دو سطح متساوی‌الساقین مقابل) که برابر ۱۳۶° انتخاب شده است ؛

d قطر چهار ضلعی اثر (مربع) ایجاد شده توسط هرم بر حسب میلی‌متر (مطابق شکل ۲۱ــ۲) و VHN عدد سختی ویکرز بر حسب $kfg/mm^۲$ یا $N/mm^۲ = MPa$ است.



شکل ۲۱ــ۲ــ اندازه‌گیری سختی ویکرز (اثر نوک هرم)

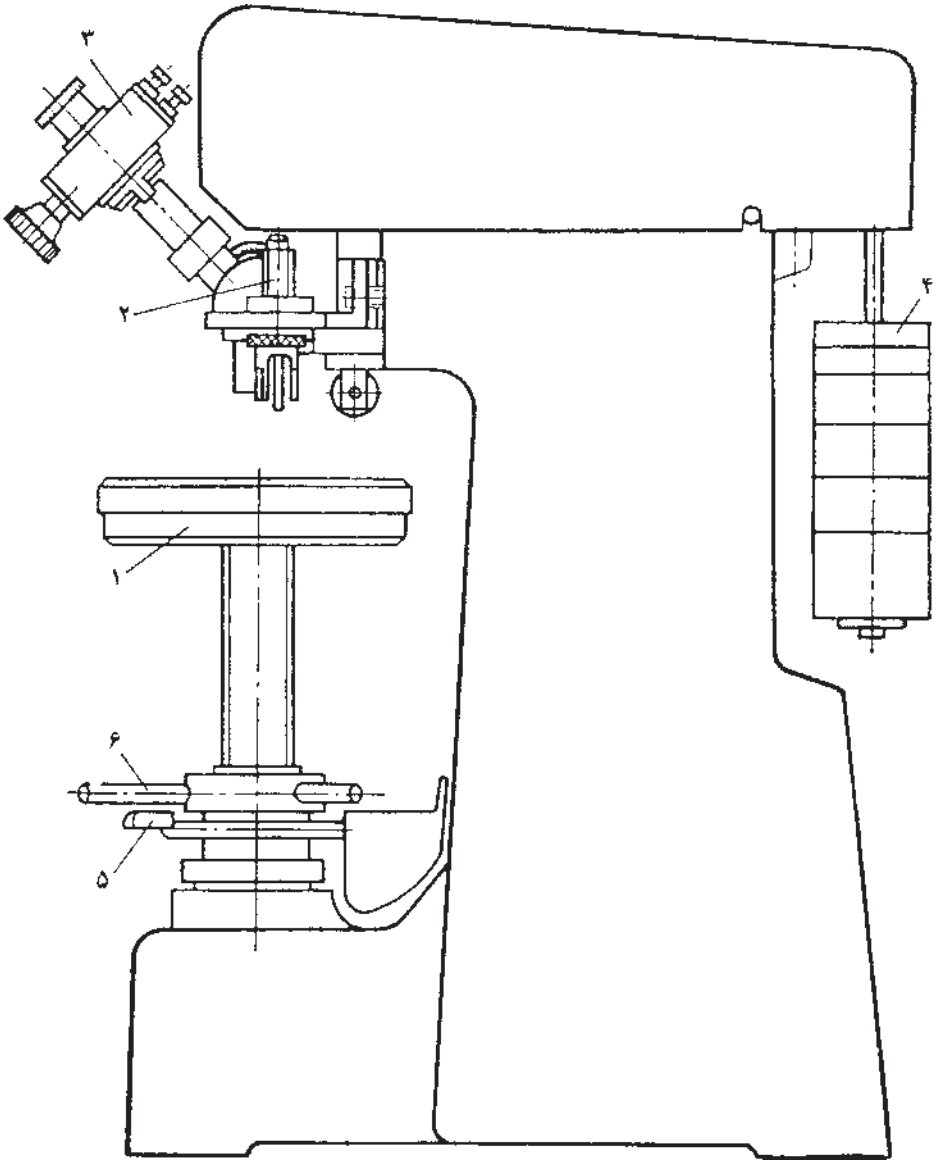
بار P می‌تواند یکی از مقادیر : ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ یا ۱۲۰۰ نیوتن باشد.

وسایل مورد آزمایش:

۱ــ دستگاه سختی سنج ویکرز (مجهز به میکروسکوپ میکرومتردار یا مجهز به صفحه یا پرده‌ی نمایش) (شکل ۲۲ــ۲)

۲ــ نمونه‌ی مورد آزمایش

۱ــ Vickers



شکل ۲۲ــ۲ــ دستگاه سختی‌سنج ویکرز

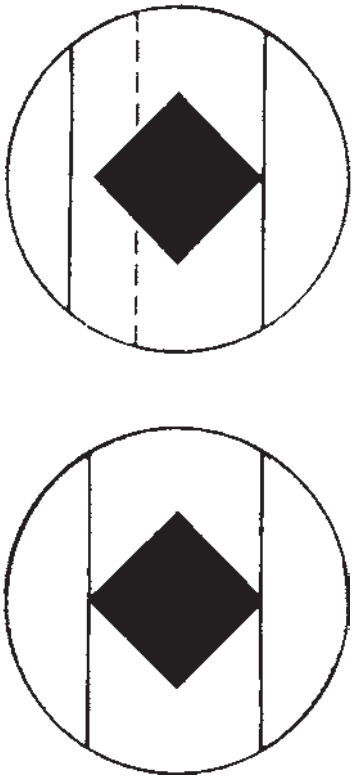
۱ــ صفحه‌ی مقر نمونه ۲ــ سنبه و هرم با نوک الماسه۳ــ میکروسکوپ ۴ــ وزنه ۵ــ پدال یا اهرم شروع‌کار ۶ــ گیره‌ی متحرک چرخشی

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

ابتدا دو طرف نمونه مورد آزمایش تراشکاری نموده پولیش می‌کنیم سپس نمونه روی سندان (۱) قرار گیرد در این هنگام با چرخاندن گیره متحرک (۶) سندان و نمونه روی آن‌را آن‌قدر بالا می‌آوریم که نمونه با نوک الماس تماس پیدا کند در این حالت بار نهائی P اعمال می‌شود تا نوک الماسه هرم در نمونه فرو رود پس از قطع نیرو و مشاهده سطح اثر قطر مربع اثر (d) توسط میکروسکوپ میکرومتردار روی دستگاه اندازه‌گیری می‌شود روش اندازه‌گیری بدین صورت است که عدسی میکروسکوپ دارای دو خط نازک (موئی) دقیق و قابل رؤیت است که می‌توان آن‌ها را با چرخاندن پیچ میکرومتر به چپ و راست حرکت داد. ابتدا یکی از خطوط را روی صفر میزان کرده و یک رأس مربع اثر را به آن مماس کرده سپس خط نازک بعدی به رأس مقابل رأس قبلی مماس می‌شود و فاصله بین دو خط موازی از روی

میکرومتر قرائت می‌شود که قطر مورد نظر می‌باشد (شکل ۲۳ــ۲) قطر به‌دست آمده را در فرمول VHN قرار داده تا عدد سختی ویکرز به‌دست آید.

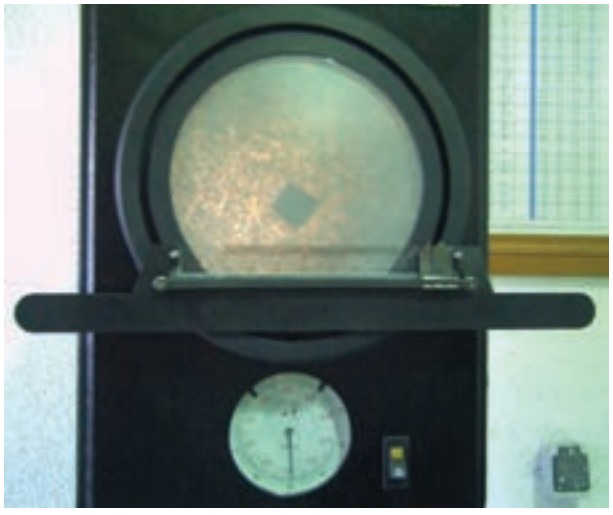
برای دقت در تعیین اندازه‌ی قطر اثر، می‌توانیم قطر دیگر مربع را نیز اندازه بگیریم و میانگین آن را در فرمول تعیین سختی ویکرز منظور کنیم.



شکل ۲۳ــ۲ــ اندازه‌گیری قطر مربع اثر در آزمایش سختی ویکرز

در بعضی از دستگاه‌ها به جای میکروسکوپ از صفحه یا پرده‌ی نمایش[1] برای اندازه‌گیری قطر مربع اثر استفاده می‌شود. شکل ۲۴ــ۲ که مجهز به این سیستم است نحوه‌ی عمل را نشان می‌دهد.

این دستگاه یک ماشین اونیورسال الکترونیک آزمایش سختی است و می‌توان آن را با چرخش یک کلید تبدیل به دستگاه سختی‌سنج برینل کرد.



شکل ۲۴ــ۲ــ اندازه‌گیری قطر مربع اثر با استفاده از صفحه یا پرده‌ی نمایش (a) ماشین سختی‌سنج اونیورسال الکترونیک (b) اندازه‌گیری با بزرگ کردن روی صفحه

تمرین: سختی چند نمونه فلزی به روش ویکرز را اندازه‌گیری نموده و نتایج را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.

۱ــ Screen Showing

۳ــ۲ــ مقاومت در برابر ضربه‌ی فلزات و آلیاژها

یکی دیگر از خواص مکانیکی مهم فلزات و آلیاژها مقاومت آن‌ها در مقابل ضربه است که با شکنندگی رابطه‌ای معکوس دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین مقاومت در برابر ضربه وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها روش «شارپی[۱]» و روش «آیزود[۲]» است در روش شارپی، قطعه‌ی نمونه به شکل مکعب مستطیل و با مقطع مربع به ابعاد ۵۵×۱۰×۱۰ میلی‌متر بوده و در وسط آن در امتداد عمود بر طول نمونه دو نوع شیار می‌توان تعبیه کرد.

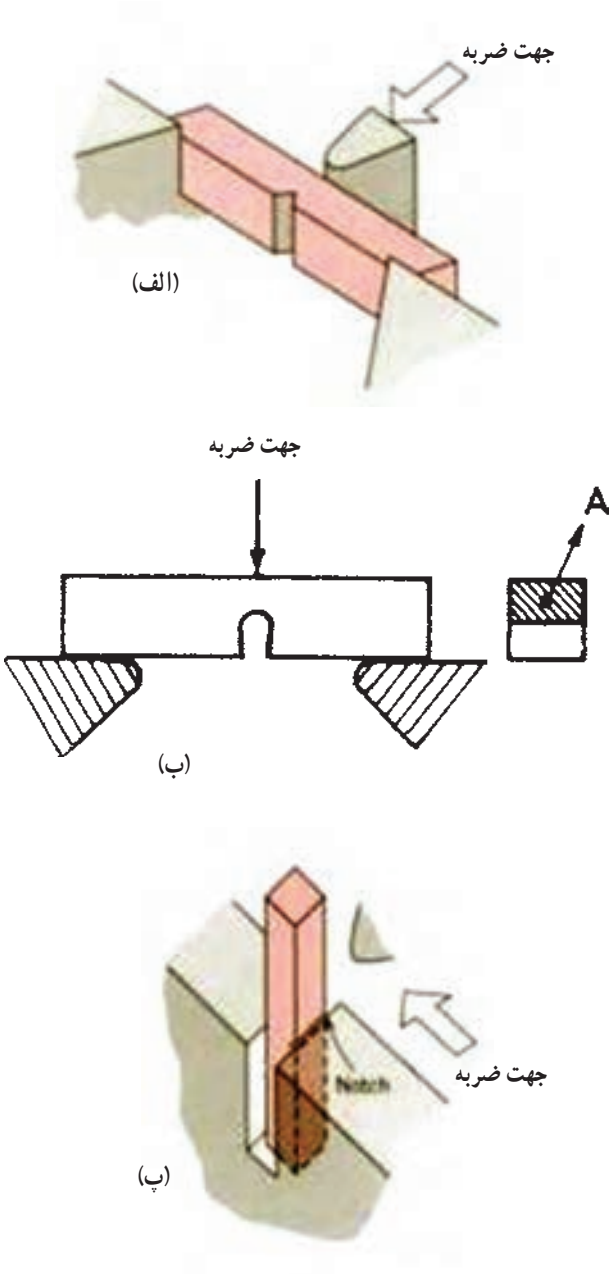
الف) شیار V شکل با زاویه ۴۵ درجه به عمق ۲ میلی‌متر (شکل ۲۵ــ۲) الف

ب) شیار U شکل با شعاع ۱ میلی‌متر به عمق ۵ میلی‌متر (شکل ۲۵ــ۲) ب ضربه‌ی لازم توسط یک صفحه‌ی مدور سنگین (پاندول) که مجهز به یک تیغه‌ی فولادی است به پشت شیار وارد می‌شود.

در روش آیزود نحوه‌ی عمل مانند روش شارپی است با این تفاوت که شکاف قطعه‌ی نمونه به شکل V بوده و ضربه به یک طرف وارد می‌آید. (شکل ۲۵ــ۲) پ سرعت پاندول هنگام برخورد با قطعه‌ی نمونه در روش شارپی ۵/۵ متر بر ثانیه و در روش آیزود ۵/۳ متر بر ثانیه است. سرعت برخورد را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود :

$$V = \sqrt{2gl(1-\cos\alpha_1)}$$

که در آن g شتاب ثقل زمین ($9/8\,m/s^2$)، V سرعت برخورد پاندول با قطعه‌ی نمونه (m/s^2)، l طول پاندول (m) و α_1 زاویه‌ی اوّلیه‌ی پاندول با محور قائم است.



شکل ۲۵ــ۲ــ نمونه‌های آزمایش ضربه و جهت ضربه وارد بر آن (الف) شارپی با شیار V شکل (ب) شارپی با شیار U شکل (پ) آیزود

۱ــ Charpy ۲ــ Izod

۱ــ۳ــ۲ــ آزمایش تعیین میزان مقاومت فلزات، آلیاژها در برابر ضربه

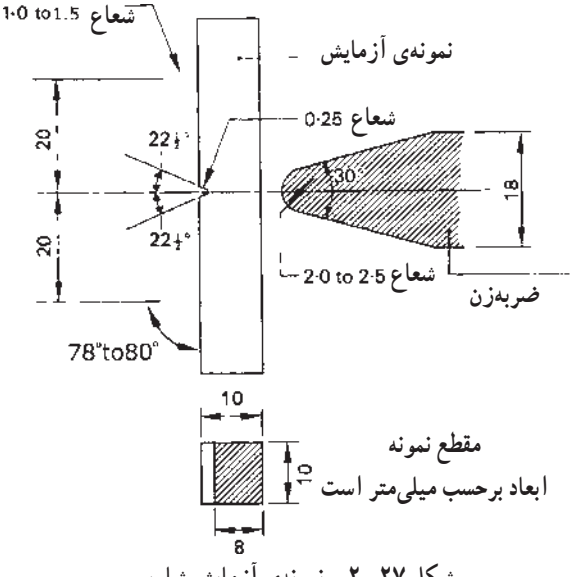
به‌طورکلی آزمایش‌های مقاومت آلیاژها در برابر ضربه از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. زیرا به کمک این آزمایش‌ها می‌توان تأثیر عناصر موجود درآلیاژ و هم‌چنین تأثیر عملیات حرارتی را در واکنش‌های سختی، سایش و شکنندگی قطعه مورد بررسی قرار داد.

وسایل مورد آزمایش:

۱ــ دستگاه آزمایش مقاومت در برابر ضربه (شکل ۲۶ــ۲)

۲ــ نمونه‌ی استاندارد (شکل ۲۷ــ۲)

شکل ۲۶ــ۲ــ نوعی ماشین آزمایش مقاومت ضربه



شکل ۲۷ــ۲ــ نمونه‌ی آزمایش شارپی

نحوه‌ی اجرای آزمایش:

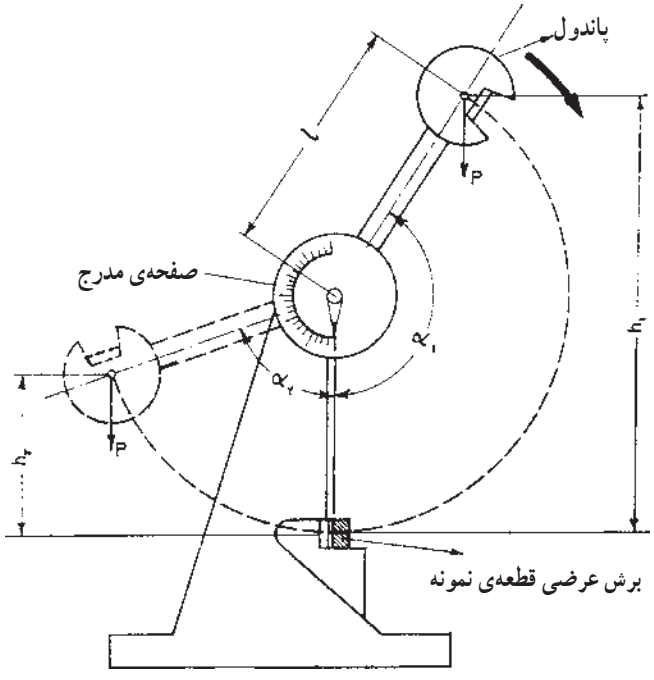
ابتدا نمونه‌ی استاندارد شاربی مطابق شکل (۲۷ــ۲) تهیه نموده آن‌را در دستگاه در جایگاه خود قرار می‌دهیم سپس ضامن دستگاه را آزاد کرده در نتیجه ضربه لازم توسط پاندول که مجهز به یک تیغه فولادی است به پشت شیار وارد می‌آید نسبت کار انجام شده (W) برای شکستن نمونه تقسیم بر سطح مقطع اولیه (A) مشخص‌کننده‌ی مقاومت در برابر ضربه‌ی قطعه‌ی نمونه است.

با تعریف اخیر و با توجه به شکل ۲۸ــ۲ می‌توان مقاومت فلز در مقابل ضربه را از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد.

$$a_k = \frac{W}{A} = \frac{P(h_1 - h_2)}{A}$$

چون اندازه‌گیری زوایای α_1 و α_2 (به کمک صفحه‌ی مدرج دستگاه) ساده‌تر از اندازه‌گیری ارتفاعات h_1 و h_2 است، به کمک روابط مثلثاتی می‌توان فرمول فوق را به صورت زیر نوشت :

$$a_k = \frac{Pl(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)}{A}$$



شکل ۲۸ــ۲ــ اندازه‌گیری مقاومت فلزات و آلیاژها در مقابل ضربه

در روابط فوق :

W کار انجام شده برای شکستن قطعه برحسب kgm (کیلوگرم متر)،

A سطح مقطع شکستگی در محل شکاف بر حسب cm^2 ،

P وزن پاندول بر حسب kgf،

h_1 ارتفاع اوّلیه‌ی پاندول بر حسب m،

h_2 ارتفاع پاندول بعد از شکستن قطعه‌ی نمونه بر حسب m،

l طول پاندول برحسب m،

α_1 زاویه‌ی اوّلیه‌ی پاندول (زاویه‌ی ضربه) با محور قائم،

α_2 زاویه‌ی پاندول با محور قائم بعد از شکستن قطعه‌ی نمونه است. زاویه‌ی α_1 مقداری است ثابت و زاویه‌ی α_2 از روی صفحه‌ی مدرج دستگاه تعیین می‌شود.

با توجه به واحدهای فوق واحد مقاومت به ضربه (ak)، $\frac{kgm}{cm^2}$ خواهد بود.

مثال: یک قطعه‌ی نمونه با ابعاد استاندارد شده مطابق شکل ۲۹ــ۲ مورد آزمایش مقاومت در برابر ضربه قرار می گیرد. در صورتی که وزن پاندول ۴ کیلوگرم نیرو و طول آن ۹۰ سانتی‌متر و زاویه‌ی اوّلیه‌ی پاندول برای رها کردن آن 135° و زاویه‌ی بعد از شکستن قطعه‌ی نمونه 30° باشد مطلوب است.

الف) سطح مقطع اوّلیه‌ی نمونه.

ب) مقاومت قطعه‌ی نمونه در برابر ضربه برحسب kgm/cm^2

ج) سرعت پاندول هنگام برخورد با نمونه بر حسب m/s .

حلّ:

الف) چنان‌چه در شکل ملاحظه می‌شود سطح مقطع قطعه‌ی نمونه مستطیلی است به ابعاد ۸×۱۰ میلی‌متر (سطح هاشور خورده) بنابراین می‌توان نوشت :

$$A = ۱۰ \times ۸ = ۸۰ mm^2 = ۰/۸ cm^2$$

سطح مقطع اوّلیه‌ی قطعه‌ی نمونه

ب)مقاومت در برابر ضربه از فرمول زیر محاسبه می‌شود.

$$a_k = \frac{P \times l(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1)}{A}$$

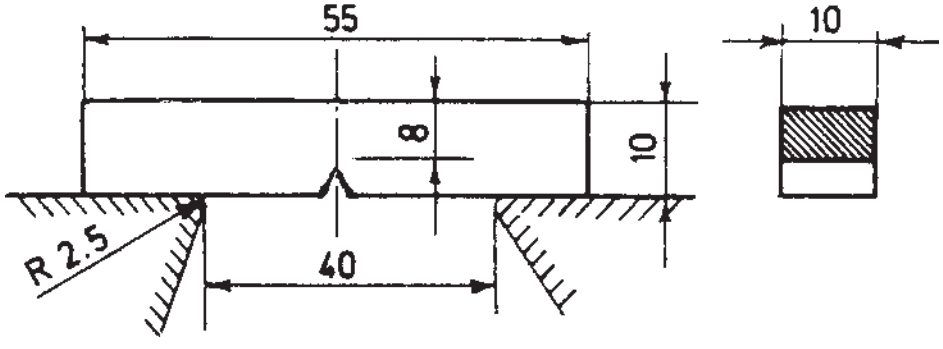
با توجه به مقادیر داده شده در مثال می‌توان نوشت :

$$P = ۴ kgf$$

$$l = ۹۰ cm = ۰/۹ m$$

$$\cos\alpha_1 = \cos ۱۳۵^\circ = -\frac{\sqrt{۲}}{۲} = -۰/۷۰۷$$

$$\cos\alpha_2 = \cos ۳۰^\circ = \frac{\sqrt{۳}}{۲} = ۰/۸۶۶$$



شکل ۲۹ــ۲ــ شکل و اندازه‌ی یک قطعه نمونه برای آزمایش مقاومت در برابر ضربه

با قرار دادن این مقادیر در فرمول فوق مقاومت قطعه‌ی نمونه در برابر ضربه تعیین می‌شود.

$$a_k = \frac{۴ \times ۰/۹(۰/۸۶۶ + ۰/۷۰۷)}{۰/۸} = ۷/۰۸ \frac{kgm}{cm^2}$$

ج) سرعت پاندول هنگام برخورد با نمونه نیز از رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود :

$$V = \sqrt{2gl(1-\cos\alpha_1)}$$

$$V = \sqrt{2\times 9/81\times 0/9(1+0/707)} = \sqrt{30/142}$$

$$\approx 5/5 m/s$$

باید توجه کرد که مقاومت در برابر ضربه نیز مانند خواص کششی در اثر درجه حرارت تغییر می‌کند. اگر قطعه‌ای در مناطق سردسیر مورد استفاده قرار گیرد از مقاومت کم‌تری در مقابل ضربه برخوردار است. این موضوع با توجه به آن که با افزایش درجه حرارت، مقاومت در مقابل ضربه نیز افزایش می‌یابد (هرچند در تغییرات کوچک درجه حرارت، اندازه‌گیری تفاوت‌های حاصله بسیار ناچیز است) و برعکس، استاندارد کردن آزمایش‌های مقاومت در برابر ضربه در تحت شرایطی که قطعه مورد استفاده قرار می‌گیرد لازم است.

توضیح: واحد مقاومت در مقابل ضربه (a_k) را می‌توان با منظور کردن و نام بردن روش آن (شارپی یا آیزود) برحسب (ژول) بیان کرد در این صورت واحد سطح مقطع برابر یک سانتی‌مترمربع است.

تمرین

مقاومت به ضربه چند نمونه فلزی را به روش شارپی اندازه‌گیری نموده و نتیجه را به صورت گزارش کار آزمایشگاهی ارائه دهید.