

دانشگاه صنعتی شریف
دانشکده مهندسی و علم مواد

آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد

تهیه و تنظیم:

دکتر علی اکبر اکرامی

مهندس مسعود مصلایی پور بزدی

مهندس رضا بختیاری

تابستان ۸۸

فهرست مطالب

1.....	خواص کششی و تاثیر عوامل مختلف بر این خواص
11.....	آزمایش اول: بررسی رفتار کششی فلزات مختلف
13.....	آزمایش دوم: بررسی رفتار تنش-کرنش فلزات تحت بارگذاری فشاری
19.....	آزمایش سوم: آزمایش خمش
28.....	آزمایش چهارم: آزمایش سختی سنگی
25.....	آزمایش پنجم: بررسی تاثیر آهنگ تغییرشکل بر خواص کششی نمونه‌های فولادی
36.....	آزمایش ششم: بررسی تاثیر اندازه دانه بر خواص کششی نمونه‌های فولادی
37.....	آزمایش هفتم: آزمایش ضربه
51.....	آزمایش هشتم: آزمایش خستگی
55.....	آزمایش نهم: آزمایش خرش
64.....	آزمایش دهم: آزمایش شکست.
66.....	آزمایش یازدهم: آزمایش پلیمرها

۱- آزمایش کشش

۱-۱- رفتار مواد تحت بارگذاری کششی

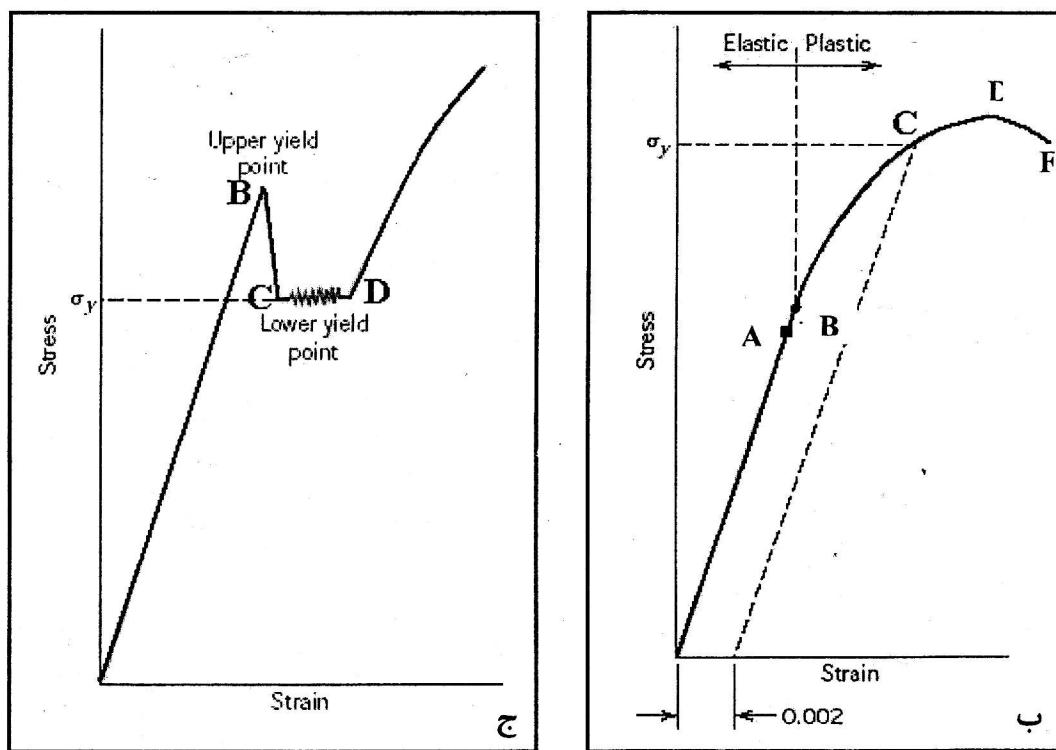
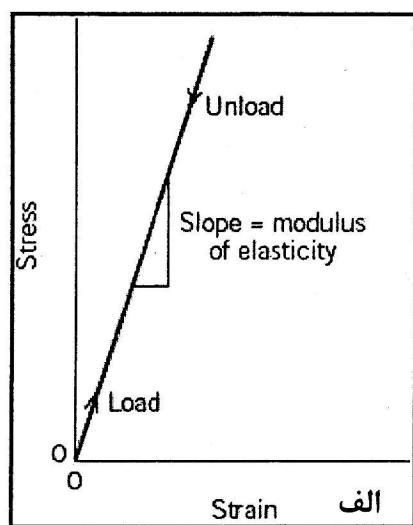
مواد جامد در اثر اعمال نیرو به دو حالت کشسان و موسان تغییر شکل می‌دهند. تغییر شکل کشسان در اثر نیروهای کم بوجود می‌آید و با برداشتن نیرو از بین می‌رود و مقدار تغییر شکل بستگی به میزان نیروهای اعمال شده دارد. نیرویی که تحت آن دیگر جسم رفتار کشسان ندارد به حد کشسان معروف است. برای بیشتر موارد مادامیکه نیرو از حد کشسان تجاوز نکرده باشد، میزان تغییر شکل مناسب با نیرو می‌باشد یا به عبارتی رابطه بین تنש و کرنش خطی می‌باشد (قانون هوک). لازم به ذکر است رفتار کشسان تمام مواد از قانون هوک پیروی نمی‌کند به عنوان مثال رابطه بین تنش - کرنش در لاستیک^۱ که یک جسم کشسان می‌باشد، غیرخطی است. اندازه گیری تغییر شکل کشسان در فلزات به وسایل دقیق و خیلی حساس نیاز دارد. مقایسه نتایج حاصل از آزمایشات معمولی در مورد حد کشسان با نتایج حاصل از اندازه گیری حد کشسان توسط وسایل اندازه گیری دقیق نشان می‌دهد که حد کشسان در فلزات خیلی پایین‌تر از حدی است که بوسیله آزمایش‌های معمولی بدست می‌آید.

اگر نیروی اعمال شده از حد کشسان بیشتر باشد، بعد از حذف نیرو مقداری تغییر شکل در جسم باقی می‌ماند و جسم به ابعاد اولیه‌اش بر نمی‌گردد. در این صورت اصطلاحاً گفته می‌شود که جسم تحت تغییر شکل مومسان قرار گرفته است.

در شکل ۱-۱ منحنی تنش - کرنش فلزات مختلف نشان داده شده است. شکل ۱-۱-الف مربوط به فلزات کاملاً ترد می‌باشد که در منطقه کشسان و بدون تغییر مومسان می‌شکنند. شکل ۱-۱-ب مربوط به فلزات نرم مانند مس (Cu) و آلومینیم (Al) می‌باشد که قبل از شکست مقدار زیادی تغییر شکل مومسان می‌دهند و شکل ۱-۱-ج برای فولاد کم کربن می‌باشد. با توجه به شکل ۱-۱-ب، در فاصله OB فلز دارای رفتار کشسان و در فاصله BF دارای رفتار مومسان می‌باشد. در بررسی دقیق‌تر این منحنیها رابطه تنش - کرنش در فاصله OA خطی می‌باشد. نقطه A را حد تناسب^۲ می‌نامند و معادل با سطح تنشی می‌باشد که پایین‌تر از آن، تنش مناسب با کرنش می‌باشد.

1- Rubber

2 - Proportional Limit



شکل ۱-۱- حالات مختلف منحنی نیرو - تغییر طول برای فلزات.

برای تعیین نقطه A خط کش را روی منحنی (در ناحیه کشسان) گذاشته، نقطه‌ایی که منحنی از خط راست منحرف شد نقطه A نامیده می‌شود. در فاصله AB اگر چه جسم دارای رفتار کشسان است اما

رابطه بین تنش و کرنش دیگر خطی نیست. نقطه B حد کشسان نامیده می‌شود و معادل با تنشی است که پایین‌تر از آن جسم دارای رفتار کشسان می‌باشد. معمولاً در فلزات حد کشسان و حد تناوب خیلی نزدیک بهم و در بیشتر موارد بر هم منطبق می‌باشند.

تغییر شکل مومسان از نقطه B شروع می‌شود. میزان تنش در نقطه B را که همان تنش لازم جهت شروع تغییر شکل مومسان است، تنش تسلیم می‌نامند. در مورد فولاد کم کربن و سایر فلزاتی که رفتار مشابه دارند نقطه B کاملاً مشخص است و اگر دستگاههای اندازه‌گیری دقیق باشد براحتی این نقطه قابل تعیین است؛ ولی در مورد فلزات دیگر مانند مس و آلومینیم پیدا کردن نقطه B مشکل می‌باشد. در مورد این فلزات نقطه‌ای فرضی مانند C را که فلز مقداری تغییر شکل مومسان دارد (معمولًاً ۱/۰٪ درصد) به عنوان نقطه تسلیم انتخاب می‌نمایند و آن را تنش تسلیم قرار دادی^۱ می‌نامند. برای پیدا کردن نقطه C روی محور کرنش، مقدار تغییر شکل ۱/۰٪ یا ۰/۲٪ درصد انتخاب شده و خطی موازی با خط کشسان رسم می‌گردد تا منحنی تنش - کرنش را در نقطه C قطع کند. تنش در این نقطه را تنش تسلیم گویند. بعد از نقطه B به علت کار سختی که در حین تغییر شکل بر روی فلز انجام می‌شود، ادامه تغییر شکل احتیاج به نیروی بیشتری دارد. افزایش نیرو تا موقعی ادامه می‌یابد که اثر افزایش نیرو به علت کار سختی^۲ از کاهش نیرو به علت کاهش سطح مقطع بیشتر باشد. در حالیکه این دو اثر با هم مساوی باشند نیروی اعمالی به نمونه حداکثر می‌باشد (نقطه D) و تنش مربوط به این نقطه را استحکام کششی^۳ می‌نامند. در این نقطه جسم شروع به گلوبی شدن^۴ نموده و سطح مقطع نمونه به شدت کاهش می‌یابد. در این وضعیت نیروی لازم برای ادامه تغییر شکل نمونه کاهش می‌یابد. گلوبی شدن در منطقه‌ای از نمونه واقع می‌شود که نسبت به سایر مناطق ضعیفتر باشد. لازم به ذکر است که بیشترین تغییر شکل مومسان در منطقه گلوبی متمرکز می‌شود. باریک شدن نمونه ادامه پیدا کرده تا بالاخره منجر به شکست نمونه شود (نقطه F). در مورد فولاد کم کربن همانطور که قبل ذکر شد، نقطه B کاملاً مشخص است و در این نقطه افت ناگهانی در تنش (نیرو) بوجود می‌آید و تنش تا

1- Proof Stress

2 - Strain Hardening

3 - Ultimate Tensile Strength (UTS)

4 - Necking

نقطه C نزول می‌کند. تنش در نقطه B تنش تسلیم بالایی^۱ و در نقطه C تنش تسلیم پایینی^۲ نامیده می‌شود. وجود تنش تسلیم پایینی نشان می‌دهد که تنش لازم برای ادامه تغییر شکل مومسان کمتر از تنش تسلیم بالایی می‌باشد. گفته می‌شود که اتمهای بین‌نشین کربن و نیتروژن در فولادهای کم کربن موادی در حرکت نابجاییها ایجاد می‌کنند و در نتیجه تنش لازم جهت شروع تغییر شکل مومسان را افزایش می‌دهند. با آزاد شدن نابجاییها از این مواد تنش لازم برای ادامه تغییر شکل مومسان کاهش می‌یابد. افت تنش همزمان با تشکیل نوارهای "لودر"^۳ می‌باشد. این نوارها در امتداد ۴۵ درجه با محور تنش می‌باشند. در ادامه تغییر شکل این نوارها گسترش پیدا کرده و سرتاسر نمونه را فرا می‌گیرند. بالا و پایین رفتن تنش در فاصله CD مربوط به تشکیل نوارهای جدید می‌باشد. بعد از اینکه نوارها کل نمونه را فرا گرفت بعلت کار سختی ایجاد شده بر روی نمونه دوباره نیروی لازم جهت ادامه تغییر شکل افزایش می‌یابد و مطابق با آنچه که قبلاً در مورد فلزات نرم گفته شد افزایش نیرو ادامه پیدا کرده تا منجر به شکست نمونه شود.

۱-۲ روابط بین تنش و کرنش

در ناحیه کشسان رابطه بین تنش و کرنش خطی می‌باشد یعنی قانون هوک صادق می‌باشد.

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1-1)$$

در منطقه مومسان از رابطه تجربی هولمن $\sigma = K \epsilon^n$ استفاده می‌شود که این رابطه تا نقطه استحکام کششی (UTS) قابل استفاده است. در رابطه فوق n و K ضرایبی هستند که بستگی به فلز داشته، n توان کار سختی و k ضریب استحکام نامیده می‌شوند.

در روابط زیر σ ، ϵ به ترتیب تنش و کرنش حقیقی، δ و e به ترتیب تنش و کرنش مهندسی نامیده می‌شوند و طبق روابط زیر تعریف می‌گردند.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2-1)$$

1 - Upper Yield Point

2 - Lower Yield Point

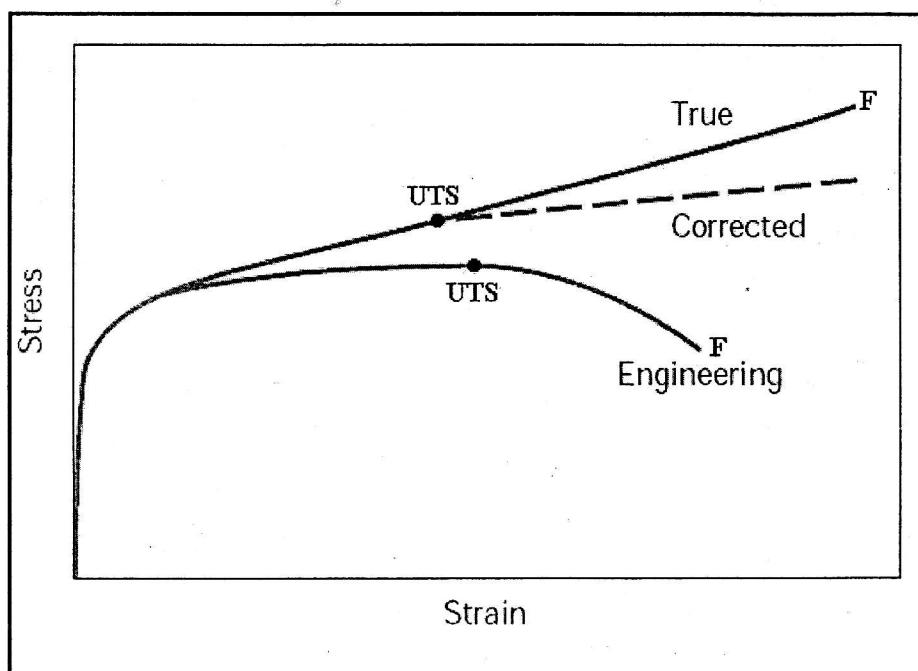
3 - Louder band

$$\varepsilon = Ln \frac{l}{l_0} \quad (3-1)$$

$$S = \frac{P}{A_0} \quad (4-1)$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (5-1)$$

در روابط فوق P نیرو، l_0 طول اولیه و l طول نهایی نمونه می‌باشد. در منطقه مومسان منحنی نیرو - تغییر طول مشخص کننده خواص مکانیکی جسم نخواهد بود. بدین جهت از منحنیهای تنش - کرنش استفاده می‌شود. در شکل ۱-۲ منحنی تنش کرنش حقيقی و مهندسی رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، منحنی تنش - کرنش مهندسی شبیه به منحنی نیرو - تغییر طول می‌باشد. چون تنش مهندسی از تقسیم نیرو بر سطح مقطع اولیه بدست می‌آید، لذا با کاهش نیرو بعد از گلویی شدن تنش هم کاهش می‌یابد. ولی در مورد تنش حقيقی چون نیرو تقسیم بر سطح مقطع لحظه‌ای می‌باشد بعد از گلویی شدن علی‌رغم افت نیرو؛ کم شدن سطح مقطع تاثیر بیشتری بر میزان تنش داشته، لذا تنش افزایش می‌یابد.



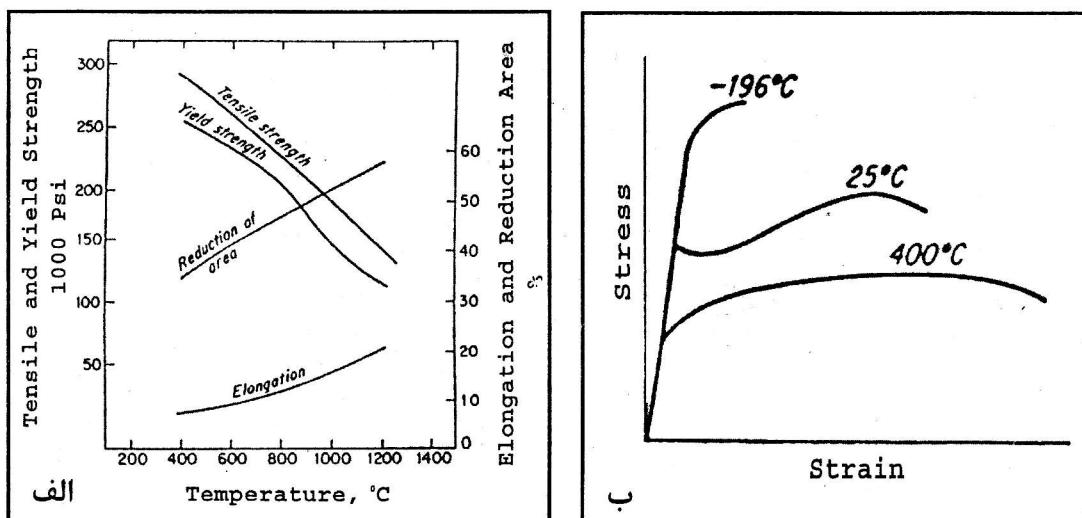
شکل ۱-۲- منحنی تنش-کرنش حقيقی و مهندسی.

۱-۳-۱- تأثیر عوامل مختلف بر نمودار تنش - گرنش

عوامل زیادی بر خواص کششی فلزات تأثیر دارند. از مهمترین این عوامل می‌توان به دمای آزمایش، اندازه دانه، آهنگ تغییر شکل، عملیات سخت کردن، آلیاژ سازی و شکل هندسی نمونه‌های کششی اشاره نمود. بطور خلاصه تاثیر هر یک از این عوامل به شرح زیر می‌باشد:

۱-۳-۱- اثر دما:

بطور کلی می‌توان گفت با افزایش دما تنیش تسليم، استحکام کششی و شدت کار سختی کاهش می‌یابد اما قابلیت تغییر شکل و ازدیاد طول نسبی افزایش می‌یابد. تغییرات این عوامل برای فلزات مختلف فرق می‌کند و بستگی به شبکه بلوری آنها دارد. مثلاً در فلزات *F.C.C* تنیش تسليم با افزایش دما زیاد فرق نمی‌کند ولی شدت کار سختی و استحکام کششی کم می‌شود. در فلزات *B.C.C* با افزایش دما شدت کار سختی ثابت و استحکام کششی و تنیش تسليم افت پیدا می‌کند. در شکل ۱-۳-۱ الف اثر دما بر تنیش تسليم و استحکام کششی فلزات *F.C.C* ارائه شده است. شکل ۱-۳-۱ ب نیز اثر کلی دما بر منحنی $\sigma - \epsilon$ نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳-۱- اثر دما بر استحکام کششی و تنیش تسليم.

۱-۳-۲- اثر سرعت تغییر شکل:

آهنگ اعمال کرنش یا سرعتی که در آن جسم دچار تغییر شکل می‌شود، عامل مهمی در تولید، ساخت و آزمایش مواد می‌باشد. در اغلب موارد آزمایش کشنش با حد بالای سرعت تغییر شکل که توسط استاندارد A مشخص می‌شود؛ انجام می‌گردد.

آهنگ کرنش که بر یک نمونه اعمال می‌شود، می‌تواند اثر مهمی بر تنش سیلان نمونه داشته باشد.

آهنگ کرنش به صورت $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$ تعریف شده و به صورت قراردادی بر حسب واحد "برثانیه" بیان می‌شود. آزمایشات نشان می‌دهد که در کرنشهای مومسان اندک تنش تسلیم بیش از استحکام کششی به آهنگ کرنش وابسته است. افزایش سرعت کشنش باعث افزایش تنش تسلیم و استحکام کششی شده و در مقابل قابلیت تغییر شکل نسبی فلز را کاهش می‌دهد. رابطه کلی بین تنش اعمال شده و سرعت تغییر شکل در دما و کرنش ثابت به صورت زیر می‌باشد.

$$\sigma = c \dot{\varepsilon}^m \Big|_{\varepsilon, T: \text{cte}} \quad (6-1)$$

در رابطه فوق σ تنش، c ثابت، m ضریب حساسیت به کرنش می‌باشد. در دمای اتاق مقدار m برای اغلب فلزات نسبتاً کوچک است (بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۱). کرنش ثابت به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$m = \frac{\log(\sigma_2/\sigma_1)}{\log(\dot{\varepsilon}_2/\dot{\varepsilon}_1)} \quad (7-1)$$

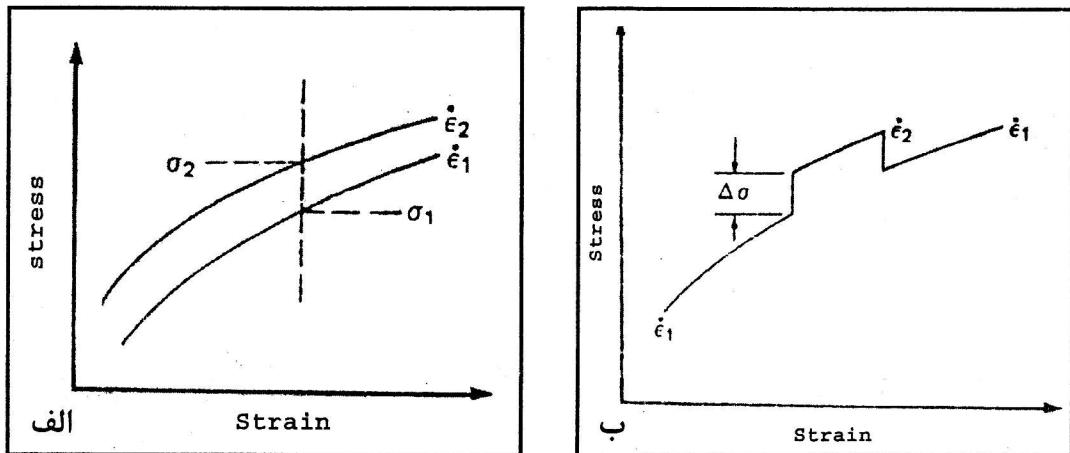
در دماهای بالا m معمولاً به ۰/۱ تا ۰/۲ افزایش می‌یابد. در مورد فولادهای نرم رابطه لگاریتمی زیر بین نقطه تسلیم پایین (σ_y) و سرعت کرنش ($\dot{\varepsilon}$) وجود دارد.

$$\sigma_y = k_1 + k_2 \log \dot{\varepsilon} \quad (8-1)$$

در رابطه فوق k_1 و k_2 ثابت می‌باشند.

برای اندازه گیری m دو روش متداول است. یکی بدست آوردن منحنی های تنش - کرنش پیوسته به ازای آهنگهای مختلف کرنش و مقایسهی تنش در یک کرنش ثابت (شکل ۱-۴-الف)، سپس m را می‌توان از رابطه ۱-۷ بدست آورد.

روش دیگر ایجاد تغییر ناگهانی در آهنگ کرنش به هنگام آزمون کشش می‌باشد. افزایش آهنگ کرنش سبب افزایش تنش به میزان مشخصی می‌شود (شکل ۱-۴-ب). بنابراین مقدار m را می‌توان با استفاده از رابطه ۱-۷ بدست آورد. در روش دوم چندین بار مقدار نرخ کرنش را می‌توان تغییر داد که از مزیت این روش می‌باشد.



شکل ۱-۴-۱- دو روش متداول برای اندازه‌گیری m

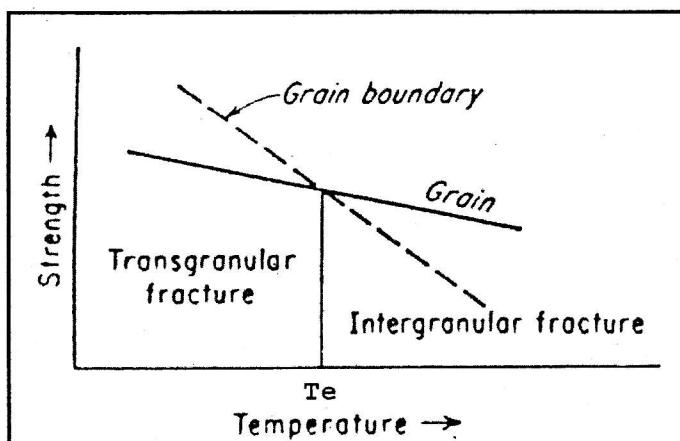
۱-۳-۳- اثر اندازه دانه:

مرز دانه‌ها ممکن است باعث قوی شدن و یا ضعیف شدن فلز گردند که بستگی به دما، سرعت تغییر شکل و خلوص فلز دارد. از این رو اندازه دانه تأثیر چشمگیری بر خواص مکانیکی فلزات دارد چون با بزرگ و کوچک شدن اندازه دانه تعداد مرز دانه نیز به ترتیب کم یا زیاد می‌شود. اندازه دانه در مراحل اولیه تغییر شکل بیشترین اثر را دارد زیرا در مراحل اولیه تغییر شکل است که مرز دانه‌ها موثرترین مانع در برابر حرکت نابجاییها می‌باشند. به عبارت دیگر تنش تسليم بیشتر از استحکام کششی به اندازه دانه بستگی دارد. زیرا بعد از شروع به حرکت نابجاییها و به طور کلی در مراحل بعدی تغییر شکل استحکام بوسیله واکنشهای پیچیده نابجاییها کنترل می‌شود.

در اکثر فلزات برای بیان ارتباط استحکام تسليم و اندازه دانه از رابطه $Hall - petch$ (رابطه ۹-۱) استفاده می‌شود.

$$\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot D^{-1/2} \quad (9-1)$$

در رابطه فوق σ_y تنש تسليم، k_H ثوابتی هستند که بستگی به فلز دارند و D قطر دانه می‌باشد. همانطور که گفته شد اثر اندازه دانه بر خواص مکانیکی بستگی به دما دارد. در دماهای پایین استحکام مرز دانه‌ها بیشتر از استحکام مناطق درون دانه می‌باشد و هرچه دانه‌ها ریزتر باشند به علت افزایش تعداد مرز دانه‌ها استحکام و مقاومت به تغییر شکل نیز زیادتر است. بر عکس در دماهای بالا مرز دانه‌ها ضعیفتر از مناطق درون دانه بوده و دانه‌بندی ریز باعث کاهش استحکام فلز می‌شود. در شکل ۱-۵ استحکام دانه و مرز دانه نسبت به دما رسم شده است. T_e دمایی است که استحکام دانه و مرز دانه مساوی است. البته باید توجه داشت که T_e به سطح تنش اعمال شده به نمونه، سرعت تغییر شکل و خلوص آلیاژ بستگی دارد.



شکل ۱-۵- مقایسه استحکام دانه و مرز دانه بر حسب دما.

لازم به توضیح است که مشابه با رابطه ۱-۹ رابطه زیر نیز بین سختی و اندازه دانه برقرار است.

$$H = H_0 + K_H D^{-1/2} \quad (10-1)$$

در رابطه فوق H عدد سختی، D قطر متوسط دانه‌ها، H_0 و k_H ثوابت معادله می‌باشند.

۴-۱- محاسبه اندازه دانه:

اندازه دانه متوسط یک نمونه توسط میکروسکوپ نوری و به وسیله شمارش تعداد دانه‌های داخل یک سطح معین، یا تعیین تعداد دانه‌هایی که طول مشخصی از یک خط اختیاری را قطع می‌نمایند بدست می‌آید. برای بیان اندازه دانه معمولاً از عدد اندازه دانه در استاندارد *ASTM* استفاده می‌شود که از مقایسه اندازه دانه بدست آمده با جداول استاندارد اندازه دانه در استاندارد *ASTM* تعیین می‌شود. عدد اندازه دانه *ASTM* (n) طبق رابطه زیر با تعداد دانه‌ها در یک اینچ مربع (N) در بزرگنمایی ۱۰۰ رابطه دارد.

$$N = 2^{n-1} \quad (11-1)$$

۱-۵- بررسی رفتار کششی فلزات مختلف

هدف از این آزمایش بررسی رفتار فلزات مختلف (نرم و ترد) در مقابل نیروی کششی و تاثیر آلیاژ نمودن بر خواص مکانیکی فلزات می‌باشد. برای این منظور نمونه‌های کششی از فلزات مختلف (فولاد کم کربن، چدن خاکستری، مس و برنج) با تجهیزات موجود کششی تحت آزمایش کشش قرار می‌گیرند. نحوه استفاده از دستگاه‌های مربوطه در آزمایشگاه تشریح می‌شود.

۱-۶- دستور کار آزمایش

- ۱- طول سنجه^۱ نمونه را توسط خودکار مشخص نمایید. لازم به ذکر است به آن قسمت از طول نمونه که دارای حداقل قطر می‌باشد طول سنجه خطاب می‌شود.
- ۲- برای یک نمونه طول سنجه و قطر مربوط به آن را بدقت اندازه گیری کنید.
- ۳- نمونه را در دستگاه‌های اندازه گیری ازدیاد طول نسبی و کاهش سطح مقطع قرار داده و وضعیت اولیه دستگاهها را روی صفر تنظیم کنید.
- ۴- با دستگاه کشش منحنی نیرو - ازدیاد طول نمونه را تحت کشش بدست آورید.
- ۵- برای پیدا کردن مدول کشسان، در منطقه کشسان در گستره نیروی 50 kgf تا 200 kgf تغییر طول و قطر لحظه‌ای نمونه را اندازه گیری کنید.
- ۶- بعد از پاره شدن نمونه‌ها میزان درصد ازدیاد طول نسبی و کاهش سطح مقطع را توسط دستگاه‌های مربوطه اندازه گیری کرده و مجدداً قطر نمونه را در قسمت شکست و طول نهایی را اندازه گیری کنید.
- ۷- مراحل فوق را برای تمام نمونه‌ها تکرار کنید.

۱-۷- خواسته‌های آزمایش

- ۱- ابعاد اولیه و نهایی نمونه‌ها را در جدولی قرار دهید.
- ۲- میزان نیرو، تنش مهندسی، تنش حقیقی، کرنش مهندسی و تنش حقیقی در نقطه شکست نمونه‌های مختلف را در جدولی قرار دهید

- ۳- مقادیر مدول کشسان، تنش تسلیم (۰/۲ درصد)، استحکام کششی و درصد کاهش سطح مقطع در نقطه شکست نمونه‌های مختلف را محاسبه و در جدولی قرار دهید.
- ۴- مقادیر درصد کاهش سطح و ازدیاد طول اندازه گیری شده با ابزار مربوطه را با مقادیر محاسبه شده مقایسه و علت اختلاف را ذکر کنید.
- ۵- منحنی تنش حقیقی - کرنش مهندسی و تنش مهندسی - کرنش مهندسی را برای نمونه مسی و نمونه فولاد کم کربن رسم نمائید.
- ۶- رفتار متفاوت نمونه‌های مختلف را بررسی و علت آنرا ذکر کنید.

۲- بررسی رفتار تنش - کرنش فلزات تحت بارگذاری فشاری

می‌توان گفت که آزمایش فشار از نظر جهت اعمال نیرو مخالف آزمایش کشش می‌باشد ولی اصول و بحث‌هایی که در این آزمایش بکار می‌رود همانند آزمایش کشش می‌باشد. لازم به ذکر است به علت محدودیتهای زیر آزمایش فشار را نمی‌توان در تمام موارد بکار برد.

۱- مشکل بودن اعمال نیروی تک محوری^۱

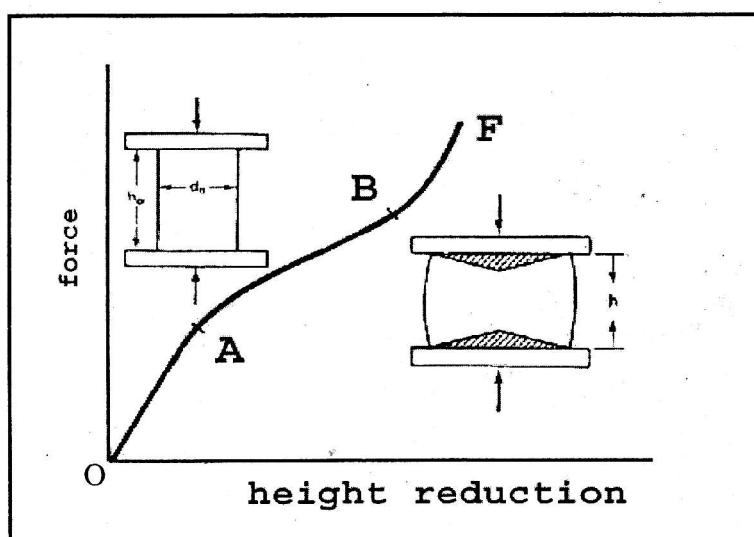
۲- رفتار ناپایدار نمونه در این روش بار دادن (در مقایسه با نیروی کششی). همیشه تمایلی برای بوجود آمدن تنشهای خمشی در قطعه مورد آزمایش موجود است.

۳- اصطکاک بین دوسر نمونه و فک‌های دستگاه

۴- سطح مقطع نسبتاً بزرگتر نمونه‌های فشاری نسبت به نمونه‌های کششی. این امر موجب می‌شود که برای بدست آوردن مقدار معین تنش احتیاج به یک ماشین با ظرفیت نیروی بیشتر باشد. اگر نمونه‌هایی با طول و قطر کوچکتر انتخاب شوند، اندازه‌گیری کرنش با دقت لازم مشکل خواهد بود.

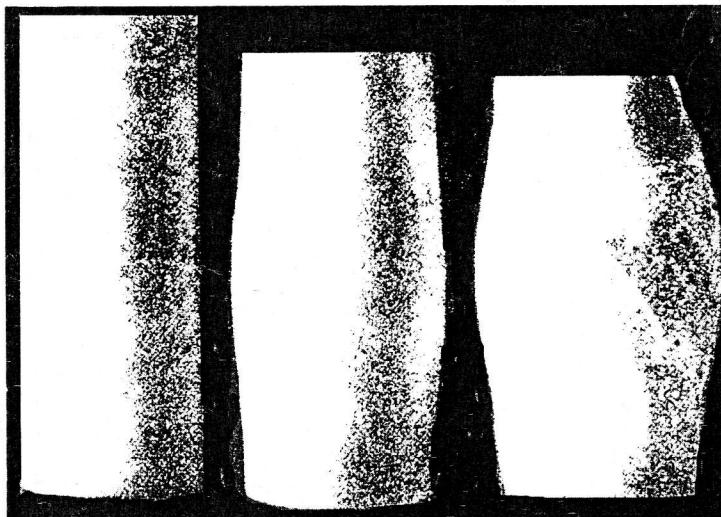
ساده‌ترین نمونه‌های آزمایش فشار، نمونه‌های استوانه‌ای شکل می‌باشند که مقطع آنها مسطح باشد. اگر چنین نمونه‌ای تحت فشار قرار گیرد، منحنی تغییرات نیرو بر حسب درصد کاهش ارتفاع طبق شکل

۱-۲ خواهد بود.



شکل ۱-۲ منحنی نیرو بر حسب درصد کاهش ارتفاع نمونه فشاری.

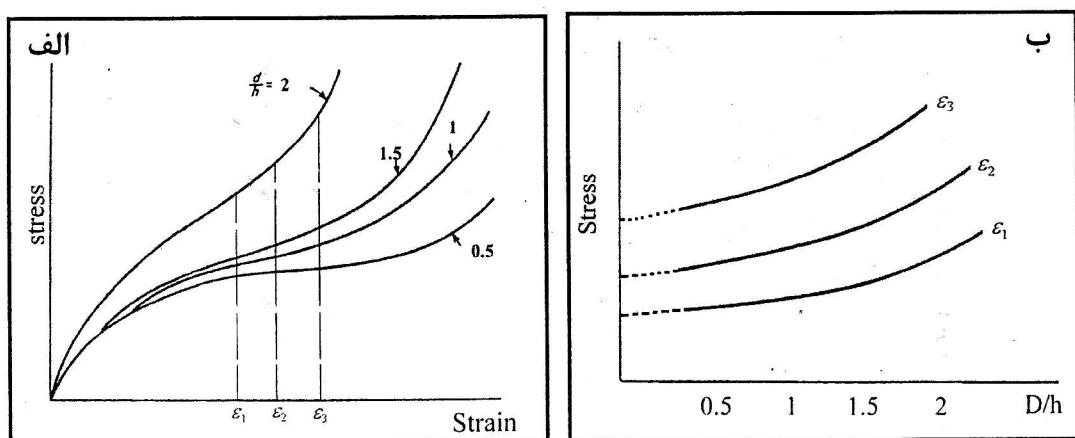
در نیروهای کم، یعنی از نقطه O تا A ، تغییر شکل کشسان است و با حذف نیرو، نمونه ابعاد اولیه خود را بدست می‌آورد. در نیروهای زیادتر یعنی از نقطه A تا B تغییر شکل مومسان شروع خواهد شد. این قسمت از منحنی شبیه منحنی تغییرات نیرو بر حسب درصد افزایش طول در آزمایش کشش می‌باشد. اگر نیرو باز هم افزایش یابد، دیگر تغییر شکل به صورت یکنواخت در تمام ارتفاع نمونه انجام نمی‌گیرد؛ بلکه از دیاد قطر در قسمت وسط نمونه بیشتر از دو انتهای آن خواهد بود. این حالت را " بشکه‌ای " شدن می‌نامند. این مسئله موجب افزایش شب منحنی تغییرات نیرو بر حسب درصد کاهش ارتفاع می‌شود و نقطه B آغاز چنین حالتی است. ادامه عمل موجب ایجاد ترکهای عمودی در قسمت میانی نمونه می‌شود. نقطه F در روی منحنی مذکور بیانگر این حالت است. علت این امر تنش کششی محیطی زیادی است که بر اثر تغییر شکل غیر یکنواخت نمونه در قسمت میانی آن ایجاد می‌شود. بشکه‌ای شدن به علت اصطکاک موجود بین دو سر نمونه و فکهای دستگاه بوجود می‌آید و این اصطکاک باعث می‌شود فلز به فکها چسبیده و منطقه‌ای مرده بوجود آید، محدودیت حرکت فلز در این منطقه باعث می‌شود که نمونه در اثر فشار به صورت بشکه در آید (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲ ایجاد منطقه مرده حین آزمایش فشار و بشکه‌ای شدن نمونه.

به عبارت دیگر تغییر شکل در اثر اعمال فشار همگن نبوده و اگر روش‌هایی جهت حذف یا کاهش اصطکاک بکار نرود، منحنی حاصل نماینده منحنی تنش - کرنش فلز نمی‌باشد. برای کاهش اصطکاک می‌توان دو سطح نمونه را پرداخت نمود و از روغنکاری نیز استفاده کرد. ولی با وجود این نمی‌توان اصطکاک را کاملاً از بین برد. از این رو روش‌های دیگری برای رسم منحنی تنش - کرنش مورد استفاده واقع می‌شود که در زیر به یکی از این روشها اشاره می‌شود.

نمونه‌هایی با نسبت‌های مختلف D/h (قطر به ارتفاع) انتخاب کرده و آنها را تحت آزمایش فشار قرار داده و منحنیهای تنش - کرنش آنها را در یک دستگاه مختصات رسم می‌کنیم (شکل ۲-۳-الف). در یک درصد معین کرنش، تنש لازم برای تغییر شکل هر یک از نمونه‌ها از منحنیهای فوق را بدست آورده و سپس این تنشهای را بر حسب D/h رسم می‌کنیم. با ادامه دادن^۱ این منحنی تا نقطه صفر ($D/h \rightarrow 0$) تنش حقیقی لازم برای ایجاد این درصد کاهش ارتفاع (کرنش) بدست می‌آید (شکل ۲-۳-ب). با تکرار این عمل در کرنشهای دیگر و بدست آوردن تنش لازم، می‌توان تاثیر اصطکاک را حذف نمود و منحنی تنش - کرنش را رسم کرد.



شکل ۲-۳-الف) منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌های با نسبت ارتفاع به قطر متفاوت (ب) بدست آوردن تنشهای حقیقی لازم در کرنشهای مختلف لازم در کرنشهای مختلف و حذف اثر اصطکاک.

در آزمایش فشار نیز مانند آزمایش کشش می‌توان پارامترهای زیر را بدست آورد.

1- Extrapolate

- ۱- استحکام فشاری^۱. از تقسیم نیروی ماکریم بر سطح مقطع بدست می‌آید که می‌توان سطح مقطع اولیه و یا لحظه‌ای را بکار برد.

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A} \quad \text{یا} \quad S = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (12)$$

- ۲- تنش تسلیم. شبیه به آزمایش کشش است و به ازای تغییر شکل $0/2$ درصد بدست می‌آید.

- ۳- میزان درصد کاهش ارتفاع که از روابط زیر بدست می‌آید.

$$e = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h - h_0}{h_0} \quad \text{یا} \quad \varepsilon = \ln \frac{h}{h_0} \quad (13)$$

- ۴- درصد تورم. از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\frac{\Delta A}{A_0} = \frac{A - A_0}{A_0} \times 100 \quad \text{درصد تورم} \quad (14)$$

- که در روابط فوق A_0 سطح مقطع اولیه و A بزرگترین سطح مقطع پس از آزمایش, h طول نهایی و h_0 طول اولیه است.

- ۱.۲ شرایط نمونه‌های فشاری. برای ایجاد تنش فشاری یکنواخت به هنگام آزمایش فشار، بهترین نمونه نمونه فشاری با سطح مقطع دایره‌ای است. ولی گاهی اوقات از سطح مقطع مربعی یا مستطیلی نیز استفاده می‌شود. نسبت ارتفاع به قطر نمونه نیز مهم است. هرچه طول نمونه بیشتر باشد تمایل به کمانش بیشتر شده که در نتیجه منجر به توزیع غیر یکنواخت تنش می‌شود. نسبت $10 = \frac{h_0}{d_0}$ حد بالای این نسبت پیشنهاد شده است. از طرفی هر چه طول نمونه کاهش یابد اثر اصطکاک در انتهای

نمونه بیشتر می‌شود. معمولاً نسبت $2 \geq \frac{h_0}{d_0}$ بکار برد می‌شود.

- البته اندازه واقعی نمونه بر اساس نوع ماده، وسایل موجود آزمایشگاهی و پارامتر مورد اندازه‌گیری انتخاب می‌شود. برای مواد همگن که فقط استحکام فشاری مورد نیاز است، از نمونه‌های نسبتاً کوچک استفاده می‌شود. اندازه نمونه‌های مواد غیر همگن بستگی به اندازه تجمع ذرات آن دارد. انتهای نمونه که نیرو به آن اعمال می‌شود باید مسطح و عمود بر محور نمونه باشد. طول سنجه باید از طول نمونه کوتاه‌تر انتخاب شود (حداقل به اندازه قطر).

- ۲-۲- نمونه‌های استاندارد آزمایش فشار. نمونه‌های استاندارد برای مواد فلزی طبق استاندارد *ASTM* به سه دسته ذیل تقسیم می‌شوند.
- ۱- نمونه‌های کوتاه برای فلزات یاتاقان
 - ۲- نمونه‌های متوسط برای استفاده‌های عمومی
 - ۳- نمونه‌های بلند که برای تعیین مدول کشسان بکار می‌رود. در جدول زیر ابعاد نمونه‌های استاندارد ارائه شده است.

جدول ۱-۲- ابعاد نمونه‌های استاندارد آزمون فشار

نوع نمونه	قطر (in)	ارتفاع (in)
کوتاه	$1\frac{1}{8}$	1
متوسط	1.2	$1\frac{1}{2}$
	0.798	$2\frac{3}{8}$
	1	3
	$1\frac{1}{8}$	$3\frac{3}{8}$
بلند	0.798	$6\frac{3}{8}$
	$1\frac{1}{4}$	$12\frac{1}{2}$

۳-۲- دستور کار آزمایش

در قسمت اول آزمایش رفتار فشاری فلزات مختلف از قبیل فولاد، چدن، مس و برنج بررسی می‌شوند.
در قسمت دوم آزمایش سه نمونه آلومینیمی با نسبت طول به ارتفاع مختلف را تحت آزمایش فشار قرار
داده و اثر ابعاد نمونه را برحسب ۴-۵ و مراحل حذف نیروی اصطکاکی بررسی می‌کنیم.

۴-۲- مراحل انجام آزمایش

- ۱- ابعاد نمونه‌ها (طول و قطر) را با دقیقت اندازه‌گیری کنید.
- ۲- نمونه را در مرکز فکهای دستگاه قرار داده و به آن نیرو اعمال کنید.
- ۳- برای تعیین مدول کشسان، در منطقه تغییر فرم کشسان در گستره نیروی $kgf\cdot m$ تا $400\cdot kgf\cdot m$ کاهش ارتفاع و قطر لحظه‌ای نمونه‌ها را در حین آزمایش در نیروهای مختلف اندازه‌گیری کنید.
- ۴- هر یک از نمونه‌ها را تا حد بشکه‌ای شدن تحت فشار قرار داده و منحنی نیرو - کاهش طول را به وسیله دستگاه رسم کنید.
- ۵- ارتفاع نهایی نمونه‌ها و قطر مربوطه در منطقه بشکه‌ای شدن را اندازه‌گیری کنید.

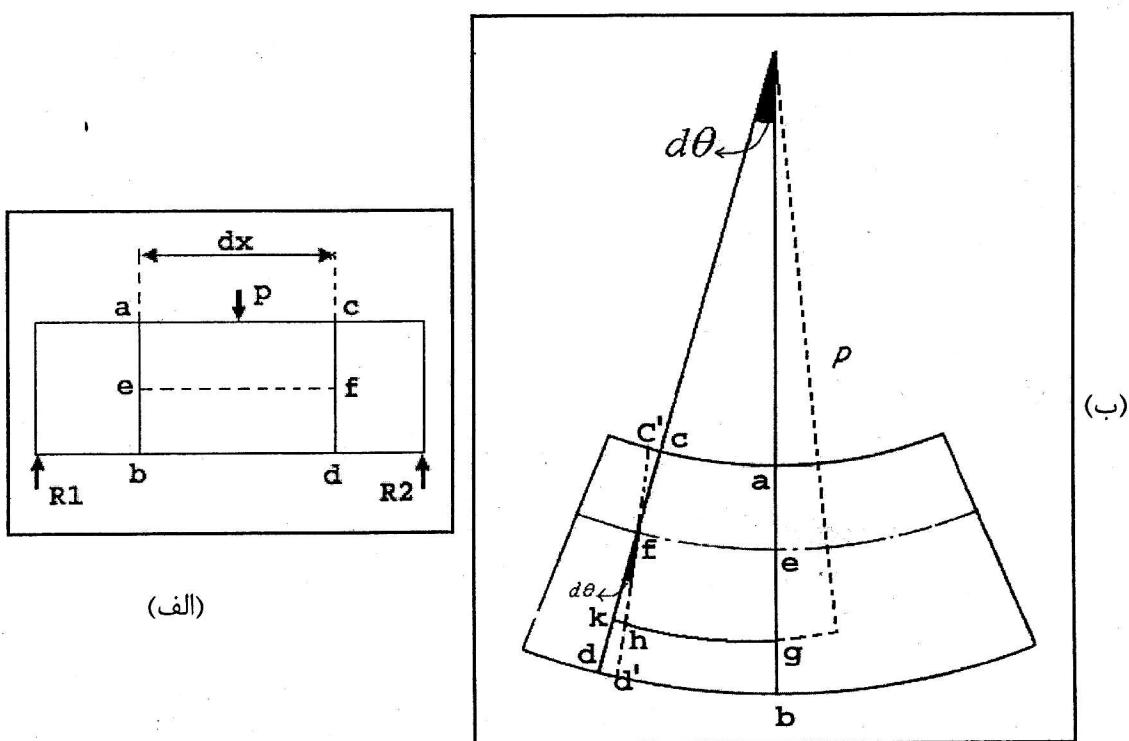
۵- خواسته‌های آزمایش

- ۱- منحنی تنش-کرنش مهندسی را برای هر یک از نمونه‌ها رسم کنید (با استفاده از منحنی نیرو- تغییر طول)
- ۲- مقادیر مدول کشسان، تنش تسلیم (0.2%)، کاهش طول نسبی، درصد تورم، و استحکام فشاری نمونه‌ها را محاسبه و با هم مقایسه کنید.
- ۳- منحنی تنش-کرنش مهندسی برای نمونه فلزی با ابعاد مختلف را در یک دستگاه مختصات رسم کرده و در مورد اثر ابعاد نمونه بر منحنی تنش-کرنش بحث کنید.
- ۴- با استفاده از منحنیهای سوال ۳ تنش لازم (بدون اصطکاک) برای 2% تغییر شکل را محاسبه کنید.

۳- آزمایش خمث

با در نظر گرفتن فرضیات زیر چگونگی خمث کشسان تیر در این آزمایش مورد بررسی واقع می‌شود.

- ۱- مقاطع صفحه‌ای تیر بصورت صفحه باقی می‌ماند.
- ۲- جسم بصورت همگن بوده و از قانون هوک پیروی می‌کند.
- ۳- تیر در ابتدا مستقیم بوده و دارای سطح مقطع یکسان است.
- ۴- مدول کشسان در فشار و کشش یکسان است.
- ۵- صفحه باردهی شامل یک محور اصلی از مقطع تیر می‌باشد و بار اعمالی عمود بر محور طول تیر وارد می‌شود.



شکل ۳-۱-۳- مقطع طولی عمودی از نمونه (الف) قبل از اعمال نیرو (ب) بعد از اعمال نیرو.

فاصله ac در اثر خمس کم می‌شود، فاصله bd زیاد و طول ef تغییر نمی‌کند. اگر خط $c'd'$ را به موازات ab از نقطه f رسم کنیم دیده می‌شود که ac به اندازه cc' کوتاه شده است و تحت فشار می‌باشد، bd به اندازه dd' به طولش اضافه شده و تحت کشش است.

صفحاتی که شامل لایه‌هایی چون ef هستند بنام سطح خنثی نامیده می‌شوند زیرا تغییری در طول این لایه‌ها ایجاد نشده و لذا هیچ تنشی به آنها اعمال نمی‌شود. حال تغییر شکل لایه gh که به فاصله z از محور خنثی است را در نظر می‌گیریم که به اندازه hk به طولش اضافه شده است. hk قوسی از دایره به شعاع z با زاویه $d\theta$ می‌باشد. بنابراین:

$$\delta = hk = zd\theta \quad (1-3)$$

کرنش برابر است با تغییر طول (δ) تقسیم بر طول اولیه ef لذا:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{y \cdot d\theta}{ef} \quad (2-3)$$

اگر شعاع انحنای سطح خنثی را با (ρ) نشان دهیم طول ef برابر است با $\rho \cdot d\theta$. بنابراین:

$$\epsilon = \frac{y \cdot d\theta}{\rho \cdot d\theta} = \frac{y}{\rho} \quad (3-3)$$

با فرض اینکه جسم همگن بوده و از قانون هوک پیروی کند، تنش در لایه gh برابر است با:

$$\sigma = E \cdot \epsilon = E \cdot y / \rho \quad (4-3)$$

شرط اینکه نیروی وارد مؤلفه ای در جهت عمود بر سطح جانبی تیر نداشته باشد به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\int \sigma_x \cdot dA = 0 \Rightarrow \frac{E}{\rho} \int y \cdot dA = 0 \quad (5-3)$$

همان دیفرانسیل سطح dA نسبت به محور خنثی است و $\int y \cdot dA$ همان کل سطح است، پس:

$$\frac{E}{\rho} \cdot A \cdot \bar{y} = 0 \quad (6-3)$$

رابطه فوق در حالتی برقرار است که $\bar{y} = 0$ باشد. در این حالت فاصله محور خنثی تا مرکز جرم سطح مقطع باید صفر باشد و این بدان معنی است که محور خنثی باید مرکز جرم سطح مقطع باشد.

همان خمثی برابر است با:

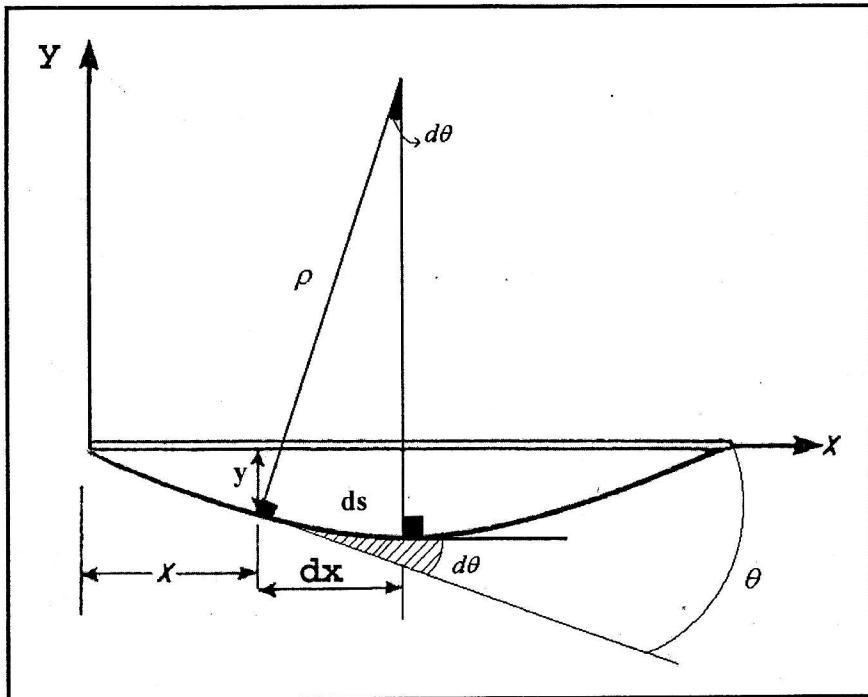
$$\left. \begin{aligned} M &= \int y \cdot \sigma_x dA \\ \sigma_x &= \frac{E \cdot y}{\rho} \end{aligned} \right\} \Rightarrow M = \frac{E}{\rho} \int y^2 \cdot dA \quad (\gamma-3)$$

طبق تعریف $I = \int y^2 dA$ ممان اینرسی نسبت به محور خنثی است. در نتیجه:

$$M = \frac{E \cdot I}{\rho} \Rightarrow \frac{E}{\rho} = \frac{M}{I} = \frac{\sigma}{y} \Rightarrow \sigma = \frac{M \cdot y}{\rho}, \quad \frac{1}{\rho} = \frac{M}{E \cdot I} \quad (\lambda-3)$$

روش انتگرال گیری دوبل و تعیین تغییر مکان خمثی (خیز)

در شکل ۲-۳ مقطع تغییر مکان خمثی یک تیر نشان داده شده است که انحنای کشسان نامیده می‌شود.



شکل ۲-۳- تغییر مکان خمثی یک تیر.

در اینجا چگونگی تغییر مکان خمثی y در فاصله x مورد محاسبه قرار می‌گیرد. فرض بر این است که مقدار انحنا، کوچک بوده لذا انحنا، کشسان دارای شبیه خیلی کم می‌باشد.

بنابراین شبیه برابر است با $\frac{d\theta}{dx} = \tan \theta$ و چون θ خیلی کوچک است، با در نظر گرفتن خطای کم می‌توان نوشت:

$$\theta = \frac{dy}{dx}, d\theta = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (9-3)$$

حال اگر تغییرات θ برای مقدار طول ds , که در اثر خمش تیر می‌باشد, نوشته شود خواهیم داشت:

$$ds = \rho.d\theta \quad (10-3)$$

ρ شعاع انحنای قوس به طول ds می‌باشد, چون انحنا کم در نظر گرفته شده ds علماً برابر با dx است.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \square \frac{d\theta}{dx} \Rightarrow \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (11-3)$$

از ریاضیات برای شعاع انحنا داریم:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y/d^2x}{\left[1 + (d^2y/d^2x)^2\right]^{3/2}} \quad (12-3)$$

چون d^2y/dx^2 مقدار کوچکی است می‌توان در مقایسه با ۱ از آن صرف نظر کرد.

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y}{d^2x} \Rightarrow \frac{M}{EI} = \frac{d^2y}{d^2x} \Rightarrow EI \frac{d^2y}{d^2x} = M \quad (13-3)$$

معادله فوق معادله دیفرانسیل انحنای کشسان تیر است. با در نظر گرفتن اینکه EI ثابت است می‌توان

نوشت:

$$EI \frac{dy}{dx} = MX + C_1 \quad (14-3)$$

در این روابط M مقدار ممان بر حسب x می‌باشد.

$$EI \frac{dy}{dx} = MX + c_1 \quad (15-3)$$

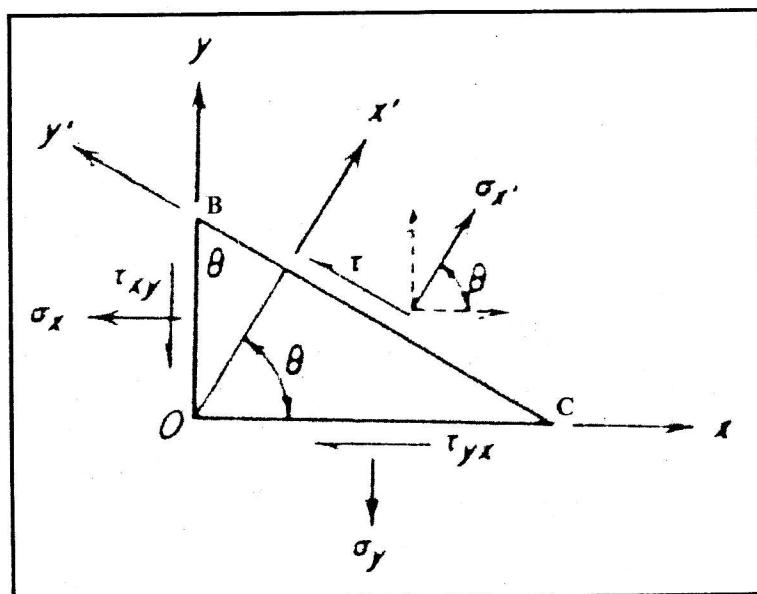
$$EI.y = \frac{M}{2}x^2 + c_1x + c_2 \quad (16-3)$$

C_1 و C_2 ثوابتی هستند که بر حسب شرایط باردهی مشخص می‌شوند.

۲-۳- تنش صفحه‌ای

اگر یک ورق نازک به موازات صفحه بارگذاری شود؛ در این صورت در جهت عمود بر صفحه تنش وجود نخواهد داشت. سیستم تنش در این حالت شامل تنش‌های نرمال σ_x, σ_y و تنش برشی τ_{xy} خواهد بود. به چنین حالتی که تنش در یکی از جهات صفر است تنش صفحه‌ای گویند و عملاً وقتی بدست

می‌آید که یکی از ابعاد جسم نسبت به دو بعد دیگر کوچک باشد. در شکل ۳-۳ یک صفحه نازک که ضخامتش عمود بر صفحه کاغذ است نشان داده شده است.



شکل ۳-۳- صفحه نازک در شرایط تنش دو بعدی.

اگر بخواهیم حالت تنش را در یک نقطه از این صفحه مثل نقطه O بدانیم باید قادر باشیم که مولفه‌های تنش را در نقطه O در هر جهت تعریف کنیم. برای بدست آوردن روابطی که منظور فوق را تأمین کند، صفحه‌ای عمود بر صفحه کاغذ طوری در نظر می‌گیریم که محورهای X و Y را قطع کرده و با محور Y زاویه θ بسازد. این صفحه در شکل ۳-۳ با خط BC نشان داده شده است. حالا مولفه‌های تنش را با نوشتن روابط تعادل نیروها روی این صفحه، تعیین می‌کنیم. فرض می‌کنیم که سطح BC برابر A باشد. در این صورت سطح OB برابر $A\cos\theta$ و سطح OC برابر $A\sin\theta$ می‌باشد.

$$\sum Fy' = 0 \Rightarrow \tau = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (17-3)$$

$$\sum Fx' = 0 \Rightarrow \sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (18-3)$$

پس با تغییر زاویه θ مقادیر مختلفی برای σ , τ بدست می‌آید. می‌توان θ را آنطور انتخاب کرد که به ازای آن مقدار τ برابر صفر شود. یعنی صفحه‌ای که روی آن تنش برشی موجود نبوده و فقط تنش نرمال بر آن اثر کند. برای بدست آوردن این جهت در رابطه فوق τ را برابر صفر قرار می‌دهیم.

$$\tau = 0 \Rightarrow \theta_1 = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad \text{و} \quad \theta_2 = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right) + \frac{\pi}{2} \quad (19-3)$$

در جهات θ_1 و θ_2 تنش برش صفر خواهد بود. این جهات را جهات اصلی^(۳) نامند و صفحات عمود بر این جهات صفحات اصلی هستند و بالاخره تنش نرمالی که بر صفحات اصلی اثر می‌کند تنش اصلی نامیده می‌شود.

چون در بسیاری از موارد اندازه‌گیری تنشهای عملی نیست، لذا با اندازه‌گیری عملی میزان کرنش، تنش را تعیین می‌کنند. در این اندازه‌گیری‌ها چون کرنش کشسان می‌باشد می‌توان بوسیله قانون هوک با داشتن کرنش، میزان تنش را نیز بدست آورد. کرنش را با وسایل مختلفی می‌توان اندازه گرفت. متداولترین روش، استفاده از کرنش‌سنجد است. این وسیله از یک سیم مقاومت ساخته شده و بر روی جسمی که باید کرنش آن اندازه گیری شود نصب می‌شود. با تغییر شکل جسم، کرنش‌سنجد هم تغییر شکل داده و با کم و زیاد شدن طول آن تغییری در مقاومت آن ایجاد می‌شود، که متناسب با میزان کرنش است. با اندازه‌گیری مقاومت که بوسیله "پل وتسنون" انجام می‌شود می‌توان کرنش را اندازه گرفت. در یک المان می‌توان جهاتی پیدا کرد که در آن جهات کرنش حداکثر باشد. این جهات را جهات اصلی تغییر شکل و صفحات عمود بر این جهات را صفحات اصلی می‌نامند. اگر جهات اصلی

تنش و یا کرنش را بدانیم به آسانی با تعیین میزان کرنش در این جهات بوسیله کرنشن سنج تنشهای اصلی را حساب می‌کنیم. کرنشهای اندازه گیری شده در این حالت کرنش اصلی می‌باشد و طبق قانون هوک داریم:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - v \cdot \sigma_2) \quad , \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - v \cdot \sigma_1) \quad (20-3)$$

که نتیجه می‌شود:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-v^2}(\varepsilon_1 + v \cdot \varepsilon_2) \quad , \quad \sigma_2 = \frac{E}{1-v^2}(\varepsilon_2 + v \cdot \varepsilon_1) \quad (21-3)$$

برای بدست آوردن کرنش اصلی بوسیله کرنش سنج از دایره مور^(۱) استفاده می‌شود. برای این کار فرض می‌کنیم که سه کرنش سنج روی صفحه‌ای به طور دلخواه با زاویه α و β نسبت به یکدیگر در جهات oa و ob و oc قرار گرفته و به ازای یک سیستم تنش اعمالی این سه کرنش سنج مقدار کرنشهای $\varepsilon_c, \varepsilon_b, \varepsilon_a$ را نشان می‌دهند. دایره مور به روش زیر رسم می‌کنیم:

۱- دو محور عمود بر هم $\frac{\gamma}{2}, xx'$ را بطور دلخواه رسم کرده و سه خط به موازات محور $\frac{\gamma}{2}$ و به فاصله $\varepsilon_c, \varepsilon_b, \varepsilon_a$ از آن رسم کنید.

۲- از یک نقطه دلخواه مثل D روی خط bb خطی رسم می‌کنید که با bb زاویه α بسازد و از همان نقطه خط دیگری که با آن زاویه β بسازد نیز رسم می‌شود. (زوایای α, β در همان جهت هستند که بین کرنش سنجها وجود دارد). نقطه تقاطع خط اولی را با محور aa نقطه A و محل برخورد خط دوم با محور cc را نقطه C بنامید.

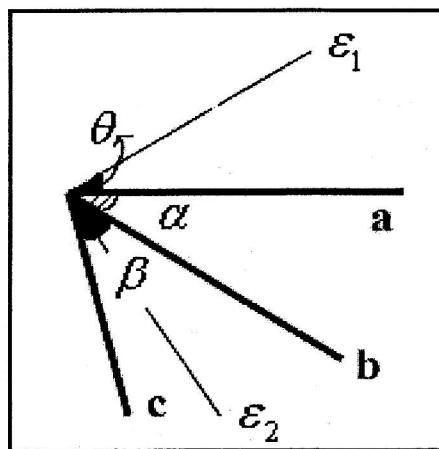
۳- از سه نقطه D و A و C حاصله یک دایره رسم بنمایید. این دایره، دایره مور است.

۴- از مرکز دایره خطی عمود بر محور $\frac{\gamma}{2}$ رسم کنید، این خط محور ε است.

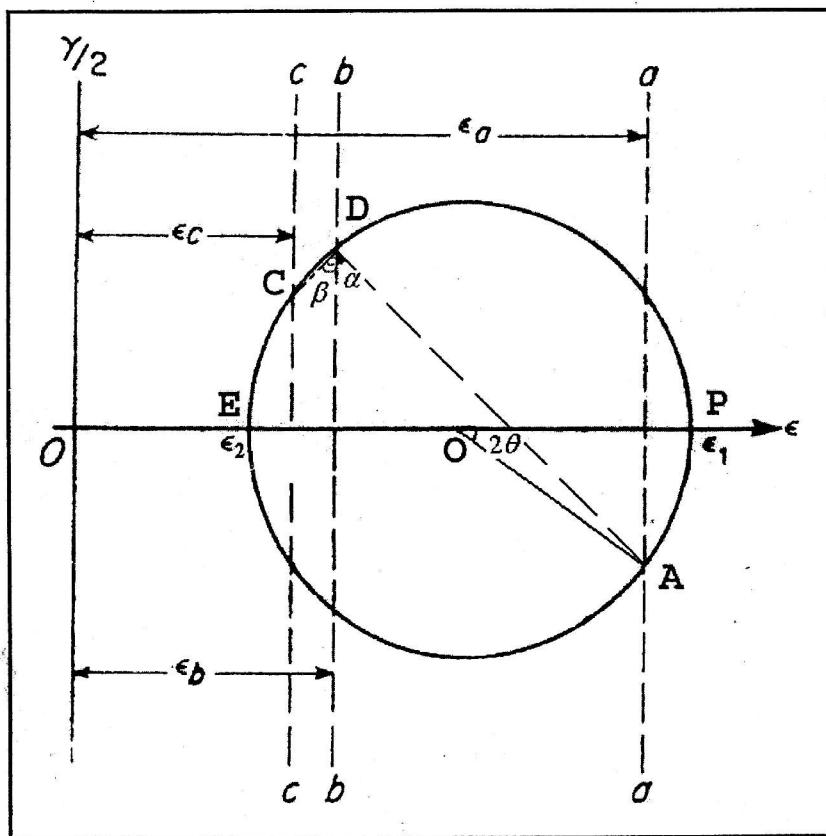
۵- نقاط D و C مقادیر $\frac{\gamma}{2}$ و ε را برای سه کرنش سنج نشان می‌دهد (در سیستم جدید $\varepsilon - \frac{\gamma}{2}$).

۶- میزان کرنشهای اصلی از محل برخورد دایره مور با محور جدید (محور ε) بدست می‌آید. زاویه ε با کرنش سنج (a) نصف زاویه AOP در دایره مور است ($AOP = 2\theta$). در شکل ۴-۳

نقاط P و E مشخص کننده کرنشهای اصلی هستند.



شکل ۳-۳ (الف) طرحواره موقعيت کرنش سنجها نسبت به کرنشهای اصلی.



شکل ۳-۳(ب) شماتیک ترسیم دایره مور.

۳-۳- دستور کار آزمایش

در مرحله اول یک تسمه فولادی را که روی آن در جهت اصلی یک کرنش سنج نصب شده است با قرار دادن وزنه در انتهای آن در حد کشسان تحت خمث قرار داده و به ازای هر نیرو میزان کرنش را بوسیله دستگاه اندازه گیری کرنش تعیین کنید. سپس به ازای هر وزنه میزان خمث را در وسط تسمه بوسیله خط کش اندازه گیری کنید (ابعاد تسمه را بدقت اندازه گیری کنید).

در مرحله دوم یک صفحه فولادی را که در مرکز آن سه عدد کرنش سنج تحت زوایای 45° نسبت به هم نصب شده است در حد کشسان تحت تنش دو بعدی قرار داده و با تعیین کرنشها در سه جهت و رسم دایره مور میزان کرنشها اصلی و جهات اصلی را بدست آورید.

۴-۱- خواسته های آزمایش

$$F_1 = 523 \text{ gr} \quad F_2 = 725 \text{ gr} \quad F_3 = 2489 \text{ gr}$$

۱- تعیین تنش کششی حداقل در تسمه به ازای هر یک از نیروها با دو روش زیر و مقایسه آنها با هم

الف: با استفاده از فرمول $\sigma = MY/I$

۲- رسم نمودارهای توزیع تنش نرمال در سطح تسمه، توزیع تنش برشی و ممان خمثی در طول تسمه.

۳- محاسبه میزان خمث در وسط تسمه به ازای هر نیرو و مقایسه آن با نتایج آزمایش.

۴- تعیین جهات کرنشها اصلی و تنشهای اصلی در نمونه تحت تنش دو بعدی با استفاده از دایره مور و در فشارهای مختلف.

۴- آزمایش سختی سنجی

سختی^۱ را به عنوان مقاومت در مقابل تغییر شکل و در مورد فلزات بعنوان مقاومت در مقابل تغییر شکل مومسان می‌توان تعریف کرد. ولی بسته به نوع آزمایش و کاربرد تعاریف زیادی دارد که مهمترین آنها عبارتند از:

الف) مقاومت در مقابل فرورفتگی تحت نیروهای استاتیکی یا دینامیکی^۲

ب) جذب انرژی تحت نیروهای ضربه‌ای^۳

ج) مقاومت در مقابل خراش^۴

د) مقابل در مقابل سایش^۵

۵- مقاومت در مقابل برش، ماشینکاری و یا سوراخکاری

بیشتر سه روش زیر در تعیین سختی یک ماده بکار می‌رود:

۱- روش خراش دادن. این روش بیشتر در میترالوژی بکار می‌رود و سختی با استفاده از اینکه یک فلز، فلز بعدی را خط میاندازد بدست می‌آید که مهمترین طبقه بندی در این روش جدول مو^۶ می‌باشد. در این طبقه تالک با سختی ۱ نرمترین و الماس با سختی ۱۰ سختترین ماده می‌باشد. مطابق با این طبقه‌بندی سختی مس آنیل شده ۳ و مارتنتزیت ۷ می‌باشد. بیشتر فلزات سخت مطابق با این جدول سختی بین ۴-۸ را دارا می‌باشند.

واضح است که بعلت کم بودن دامنه تغییرات سختی این روش در مورد فلزات بکار نمی‌رود.

۲- سختی دینامیکی^۷. در این روش فرو رونده (ساقمه) از ارتفاع معینی به سطح فلز افتاده و با استفاده از میزان انرژی جذب شده و ارتفاع برگشت ساقمه (فرو رونده) سختی اندازه گیری می‌شود. این روش نیز در مورد فلزات بکار نمی‌رود. در مورد فلزات از روش سوم یعنی مقاومت در مقابل فرورفتگی جهت تعیین سختی استفاده می‌شود.

۴-۳) مقاومت در مقابل فرورفتگی.

این روش دارای انواع مختلفی می‌باشد که عبارتند از:

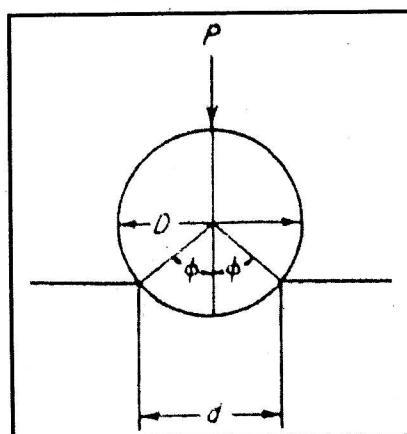
۱-۳-۴- سختی برینل. در این روش معمولاً از ساچمه فولادی به قطر ۱۰ میلیمتر به عنوان فرو رونده استفاده می‌شود، میزان نیروی اعمال شده برای فلزات سخت 300 kg و برای فلزات نرم 500 kg و برای فلزاتی با سختی متوسط 150 kg می‌باشد. مدت زمان اعمال نیرو برای فلزات آهنی حدود ۳۰ ثانیه و برای فلزات غیرآهنی ۶۵ ثانیه می‌باشد. برای فلزات سخت از ساچمه‌های کاربید تنگستن استفاده می‌شود.

بعد از حذف نیرو قطر فرورفتگی بوسیله میکروسکوپ اندازه‌گیری می‌شود. در این روش سختی بعنوان نیرو تقسیم بر سطح اثر ایجاد شده تعریف شده و بوسیله فرمول زیر بیان می‌گردد.

$$BHN = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot t} = \frac{P}{(\pi \cdot \frac{D}{2})(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-4)$$

در رابطه فوق P نیرو به کیلوگرم، D قطر ساچمه به میلیمتر، d قطر اثر ایجاد شده به میلیمتر و t عمق اثر به میلیمتر است. همانطوریکه مشاهده می‌شود واحد سختی برینل کیلوگرم بر میلیمتر مربع می‌باشد. با توجه به شکل ۱-۴- داریم:

$$d = D \sin \Phi \quad (2-4)$$



شکل ۱-۴- پارامترهای اصلی در آزمایش سختی سنجی برینل.

با جایگزین کردن رابطه بالا در معادله ۴-۱- می توان نوشت:

$$BHN = \frac{P}{\pi \cdot \frac{D^2}{2} \cdot (1 - \cos \Phi)} \quad (3-4)$$

برای اینکه بتوانیم با نیرو و یا ساقمه های غیراستاندارد سختی یکسانی بدست آوریم باید شکل هندسی اثرهای ایجاد شده مشابه باشند و برای اینکار باید زاویه Φ ثابت بماند. معادله بالا نشان می دهد برای اینکه Φ و عدد سختی برینل ثابت بماند باید رابطه زیر بین نیرو و قطر ساقمه برقرار باشد.

$$\frac{P_1}{D_1^2} = \frac{P_2}{D_2^2} = \frac{P_3}{D_3^2} = K \quad (4-4)$$

نسبت ثابت K برای فلزات مختلف فرق می کند که در مورد چدن و فولاد $K=30$ ، مس و آلومینیم $K=5$ آلیاژ های مس و آلیاژ های آلومینیم $K=10$ و در مورد سرب $K=1$ می باشد.

این روش دارای مزایا و محدودیتهایی است که "محدودیتهای آن عبارتنداز:

الف) با افزایش نیرو سختی افزایش و سپس کاهش می یابد.

ب) اثر بزرگ ایجاد شده کاربرد آنرا محدود می کند.

و مزایای آن عبارتنداز:

الف) بعلت بزرگ بودن اثر ایجاد شده مسئله ناهمگنی ساختار از بین می رود.

ب) کمتر به خراشها و ناصافیهای سطح حساس است.

۴-۳-۲- سختی مایر^۱. در این روش سختی بعنوان نیرو تقسیم بر تصویر سطح اثر ایجاد شده تعريف می شود.

$$S_{Meyer} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (5-4)$$

سختی مایر نیز مانند برینل دارای واحد کیلوگرم بر میلیمتر مربع می باشد. نسبت به سختی برینل کمتر به نیروی اعمال شده حساس است. در مورد فلزات کارسرد شده سختی مایر ثابت و مستقل از نیرو است، حال آنکه سختی برینل با افزایش نیرو کاهش می یابد. در فلزات آنیل شده با افزایش نیرو،

سختی مایر به علت کار سختی ایجاد شده افزایش می‌یابد. ولی سختی برینل ابتدا با افزایش نیرو، افزایش پیدا کرده و سپس در نیروهای بالاتر کاهش می‌یابد. مایر رابطه زیر را بین نیروی اعمال شده و قطر اثر ایجاد شده بدست آورد که به قانون "مایر" معروف است.

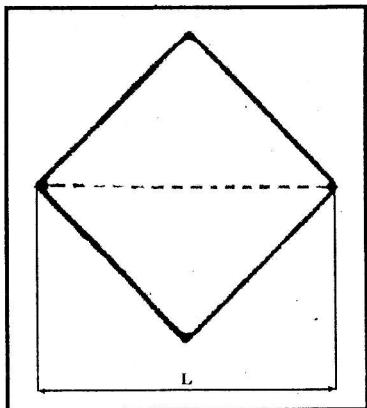
$$P = Kd^n \quad (6-4)$$

در رابطه فوق n' ثابتی است که مربوط به کار سختی فلزات می‌باشد و برای فلزات کاملاً آنیل شده حدود $2/5$ و برای فلزات کار سخت شده حدود 2 می‌باشد. K ثابتی است مربوط به مقاومت فلز در مقابل فرورفتگی و مقدار آن مساوی با نیرو است وقتی که $d=1$ باشد، قطر اثر d و P نیروی اعمال شده می‌باشد.

۴-۳-۳- سختی ویکرز^۱. در این روش از هرم الماس با مقطع چهاروجهی بعنوان فرورونده استفاده می‌شود. زاویه بین صفحات متقابل هرم 136 درجه می‌باشد. سختی به عنوان نیرو تقسیم بر سطح اثر ایجاد شده تعریف شده و در عمل این سطح با اندازه‌گیری قطر اثر محاسبه و از فرمول زیر بدست می‌آید.

$$DPH = VHN = \frac{2.P.\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{L^2} = \frac{1.854P}{L^2} \quad (7-4)$$

در رابطه فوق P نیروی اعمال شده به کیلوگرم، L مقدار متوسط قطر اثر به میلیمتر، $\theta = 360^\circ$ و عدد سختی ویکرز می‌باشد.



شکل ۲-۴- تصویر اثر ایجاد شده در سختی ویکرز

در این روش نیرو بستگی به سختی فلز دارد و از ۱ تا ۱۲۰ کیلوگرم متغیر است و می‌توان سختی فلزات را در یک نیروی معین از ۵ تا ۱۵۰ و بکر اندازه‌گیری کرد.

علی‌رغم مزایای فوق ~~سختی و بکر~~ زیرا سرعت عمل کم است و همچنین سطح نمونه باید قبل‌آماده شود و خطای اندازه‌گیری قطر اثر زیاد است.

۴-۳-۴- سختی راکول. در این روش از مخروط الماسی با زاویه رأس ۱۲۰ درجه و یا ساقمه فولادی به قطرهای $\frac{1}{12}$ و $\frac{1}{8}$ اینچ بعنوان فرورونده استفاده می‌شود. این روش بعلت عدم وجود خطای اندازه‌گیری، سرعت عمل زیاد و کوچک بودن اثر ایجاد شده کاربرد زیادی دارد. ابتدا برای تثبیت وضع نمونه نیروی ۱۰ کیلوگرم اعمال می‌شود و این عمل باعث می‌شود که سطح احتیاج به آماده‌سازی کمتری داشته باشد، سپس بقیه نیرو اعمال شده و با اندازه‌گیری 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 ۴-۱ انواع آن دیده می‌شود.

جدول ۴-۱- اسامی مختلف سختی راکول

نوع راکول	نوع فرورونده	نیرو Kg	کاربرد
A	مخروط الماسی	۶۰	کاربیدهای سمنتی، فولادهایی که سطحی سخت شده‌اند
B	ساقمه 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	ساقمه فولادی به قطر $\frac{1}{8}$	۱۰۰	چدن، آلیاژهای Mg ، Al ، فلزات یاتاقان
F	ساقمه فولادی به قطر $\frac{1}{16}$	۶۰	آلیاژهای مس آنیل شده
G	ساقمه فولادی به قطر $\frac{1}{16}$	۱۵۰	برنر فسفر، مس، Be ، آهن مالیبل
H	ساقمه فولادی به قطر $\frac{1}{8}$	۶۰	Zn , Pb , Al

بیشتر از روش‌های استفاده می‌شود و سختی راکول B و راکول C از فرمولهای زیر بدست می‌آید.

$$R_B = 130 - \frac{d}{0.002} \quad (8-4)$$

$$R_c = 100 - \frac{d}{0.002} \quad (9-4)$$

در روابط ۸-۴ و ۹-۴ d عمق فرورفتگی به میلیمتر می‌باشد.

۵۰۳۰-۴- سختی میکروسکوپی^۱. در این روش از هرم الماسی بعنوان فرورونده استفاده می‌شود، بطوریکه نسبت قطر بزرگ اثر ایجاد شده به قطر کوچک آن $7:1$ می‌باشد و سختی بعنوان نیرو تقسیم بر تصویر سطح اثر ایجاد شده تعریف می‌شود و از فرمول زیر بدست می‌آید.

$$KHN = \frac{P}{A_p} = \frac{P}{L^2 C} \quad (10-4)$$

در رابطه فوق P نیروی اعمال شده به کیلوگرم، A_p تصویر سطح اثر ایجاد شده به میلیمتر مربع، L طول قطر بزرگ به میلیمتر، C ثابتی است مربوط به فرورونده و KHN عدد سختی *knoop* می‌باشد. در این روش نیرو از ۲۵ گرم تا ۳۶۰۰ گرم متغیر است و بیشتر برای اندازه‌گیری سختی فلزات ترد، قطعات نازک و یا اندازه‌گیری سختی یک فاز خاص بکار می‌رود. مزایای این روش نسبت به ویکرز این است که می‌توان اثرهای ایجاد شده را نزدیک‌تر بهم 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 می‌باشد (بعثت شکل خاص فررونده).

۴-۴ در موقع اندازه‌گیری سختی با روش‌های مذکور باید به نکات زیر توجه کرد.

۱- فرورونده و محل قرار گرفتن نمونه در دستگاه سختی سنج (سنداخ) تمیز باشند.

۲- سطح نمونه مورد آزمایش تمیز، خشک، صاف و عاری از اکسید باشد.

۳- سطح باید مسطح و عمود بر فرو رونده باشد.

- ۴- آزمایش بر روی سطح استوانه‌ای منجر به کم خواندن عدد سختی می‌شود که میزان خطا بستگی به شعاع انحنای، نیرو، فرو رونده و سختی فلز دارد.
- ۵- ضخامت نمونه باید بحدی باشد که برآمدگی یا علامتی در طرف دیگر نمونه ظاهر نشود. بهتر است ضخامت نمونه حداقل ۱۰ برابر عمق اثر باشد.
- ۶- فواصل بین دو اثر ایجاد شده باید حداقل ۳-۵ برابر قطر اثر ایجاد شده باشد.
- ۷- سرعت اعمال نیرو باید استاندارد باشد.
- ۸- از نمونه‌های مانت شده سختی نباید گرفت. زیرا مقداری از نیرو صرف تغییر شکل "مانت" می‌شود.

۴-۵ دستور کار آزمایش

- ۱- سختی چند نمونه از فلزات مختلف را به روش بریتل و راکول B اندازه‌گیری کنید.
- ۲- سختی یک نمونه نعلی شکل را به روش ویکرز در فواصل مختلف نسبت به لبه فشاری اندازه‌گیری کنید.
- ۳- سختی یک نمونه جمینی را در فواصل مختلف نسبت به انتهای نمونه (که سریع سرد شده است) به روش راکول C اندازه‌گیری کنید.

۶-۴ خواسته‌های آزمایش

- ۱- اعداد بدست آمده از سختی فلزات مختلف را در جدولی قرار دهید.
- ۲- منحنی تغییرات سختی نمونه نعلی شکل را نسبت به فاصله از لبه فشاری رسم کرده و علت تغییرات را توضیح دهید.
- ۳- منحنی تغییرات سختی نمونه جمینی را نسبت به فاصله از انتهای سریع سرد شده رسم کرده و در مورد شکل منحنی بحث نمائید.
- ۴- کدامیک از روش‌های سختی سنجی را برای اندازه‌گیری سختی فلزات نرم و سخت پیشنهاد می‌کنید
چرا؟

۵- بررسی تاثیر آهنگ تغییر شکل بر خواص کششی نمونه‌های فولادی

۱-۱- دستور کار آزمایش

در این آزمایش چند نمونه فولاد کم کربن را با سرعتهای مختلف تحت آزمایش کشش قرار دهید. برای یکی از نمونه‌ها در حین آزمایش سرعت کشش را تغییر دهید.

۲-۱- خواسته‌های آزمایش

۱- منحنی $\sigma - \epsilon$ را برای هر نمونه رسم کنید.

۲- سرعت تغییر طول نسبی برای هر نمونه را محاسبه نمایید.

۳- منحنی UTS , σ_y و σ_e را بر حسب $^{\circ}\text{C}$ رسم کرده و علت تغییرات را توضیح دهید.

۴- برای نمونه‌ای تحت همین شرایط تنش تسلیم را برای سرعت تغییر شکل $\frac{1}{2} \text{ sec}^{-1}$ محاسبه کنید.

۵- مقدار m را به دو روش و در یک کرنش معینی بدست آورید.

۶- بررسی تاثیر اندازه دانه بر خواص کششی نمونه‌های فولادی

۱- دستور کار آزمایش

در این آزمایش چند نمونه فولاد کم کربن را که دارای اندازه دانه های مختلفی می‌باشند با دستگاه کششی تحت آزمایش قرار داده و بعد از پاره شدن نمونه‌ها، قسمتی از نمونه را که تغییر شکل نداده است متالوگرافی کرده و اندازه دانه را برای هر نمونه مشخص کنید.

۲- خواسته‌های آزمایش:

- ۱- منحنی $\sigma - \epsilon$ را برای نمونه‌های مختلف رسم کنید
- ۲- تغییرات UTS ، σ_y و σ_u را برحسب اندازه دانه رسم کرده و علت تغییرات آنرا توضیح دهید.
- ۳- مقادیر ثابت k ، σ_0 (در رابطه *Hall-petch*) را بدست آورید.
- ۴- تنش تسلیم را برای فولادی کم کربن (مشابه با نمونه‌های آزمایش شده) با اندازه دانه $20\text{ }\mu\text{m}$ بدست آورید.

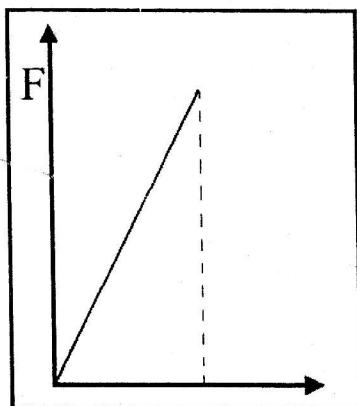
۷- آزمایش ضربه

۱-۷ مقدمه.

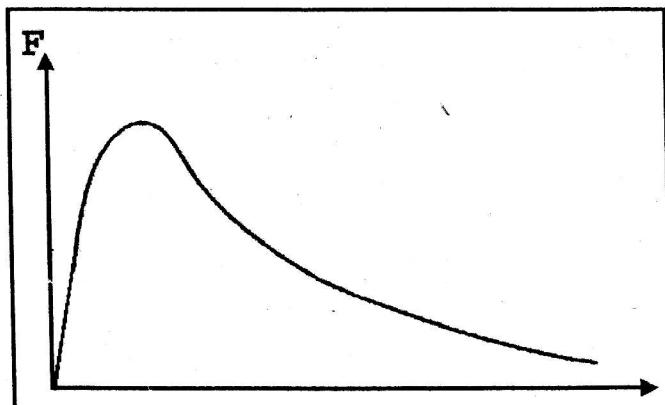
در آزمایش‌های قبلی چگونگی رفتار خواص فلزات و مواد را در مقابل نیروهای استاتیکی که اعمال نیرو با سرعت کم بر آنها صورت می‌گرفت را بررسی کردیم. در عمل همیشه نیرو به این صورت به ماشین آلات، ساختمانها، پلها و غیره وارد نمی‌شود، از این رو باید رفتار و خواص مصالح را در مقابل نیروهای دینامیکی (ضربه‌ای)، که بطور یقین با نتایج آزمایش‌های استاتیکی فرق دارد، بررسی کنیم. بطور کلی اگر ماده‌ای تحت نیروی ضربه‌ای قرار گیرد، دو نوع شکست در آن مشاهده خواهد شد.

۱- شکست ترد ۲- شکست نرم (برشی)

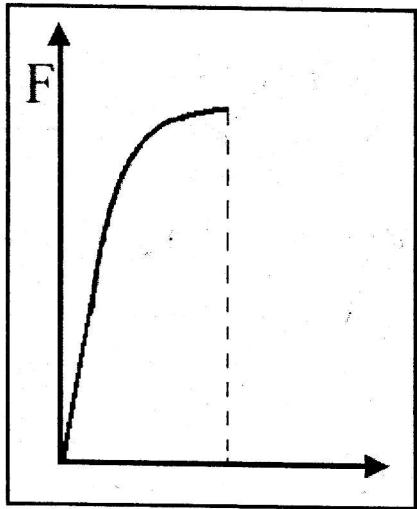
در بیشتر اوقات با مخلوطی از این دو نوع شکست مواجه خواهیم شد. چنانچه منحنی نیرو بر حسب تغییر فرم را رسم کنیم، نوع منحنی نشان دهنده شکستی است که در نمونه اتفاق افتاده است. در شکل ۱-۷ نشان دهنده شکست ترد، شکل ۲-۷ نشان دهنده شکست نرم و شکل ۳-۷ نشان دهنده مخلوطی از این دو شکست می‌باشد.



شکل ۱-۷) منحنی نیرو بر حسب تغییر فرم در شکست ترد.



شکل ۲-۷) منحنی نیرو بر حسب تغییر فرم در شکست نرم.



شکل ۳-۷) منحنی نیرو بر حسب تغییر فرم در شکست ترد-نرم.

در شکست ترد با ایجاد ترک و اشعاع آن، نمونه قبل از رسیدن به نقطه تسلیم می‌شکند و سطح شکست صاف، براق و دانه خواهد بود. انرژی جذب شده (سطح زیر منحنی تنش-کرنش) در این نوع شکست نسبت به شکست نرم کمتر است. در شکست نرم در منطقه ترک قبل از شکست مقداری تغییر فرم پلاستیک در نمونه ایجاد شده و نیرو بعد از رسیدن به یک ماکریم، همزمان با اشعاع ترک (کاهش سطح مقطع) افت پیدا کرده تا منجر به شکست نمونه می‌شود. حال بینیم چه عواملی باعث شکست ترد می‌شوند. در جنگ جهانی دوم بعلت شکستهایی که در بدنه کشتیها و زیردریاییها بوجود می‌آمد و بخصوص وقتی که مشاهده شد بیشتر این شکستها در زمستانهای سرد و به هنگام عبور کشتیها از مناطق سردسیر اتفاق می‌افتد، محققین را بر آن داشت که علت شکست، مکانیزم شکست و چگونگی جلوگیری از آن را مورد بررسی قرار دهند.

تحقیقات اولیه نشان داد که عوامل زیر در شکست ترد موثرند.

۱- وجود تنש‌های سه بعدی که دز اثر وجود شیارها، فضاهای خالی و یا جدایش عناصر آلیاژی در نمونه ایجاد می‌شود.

۲- سرعت زیاد اعمال نیرو (تنش)

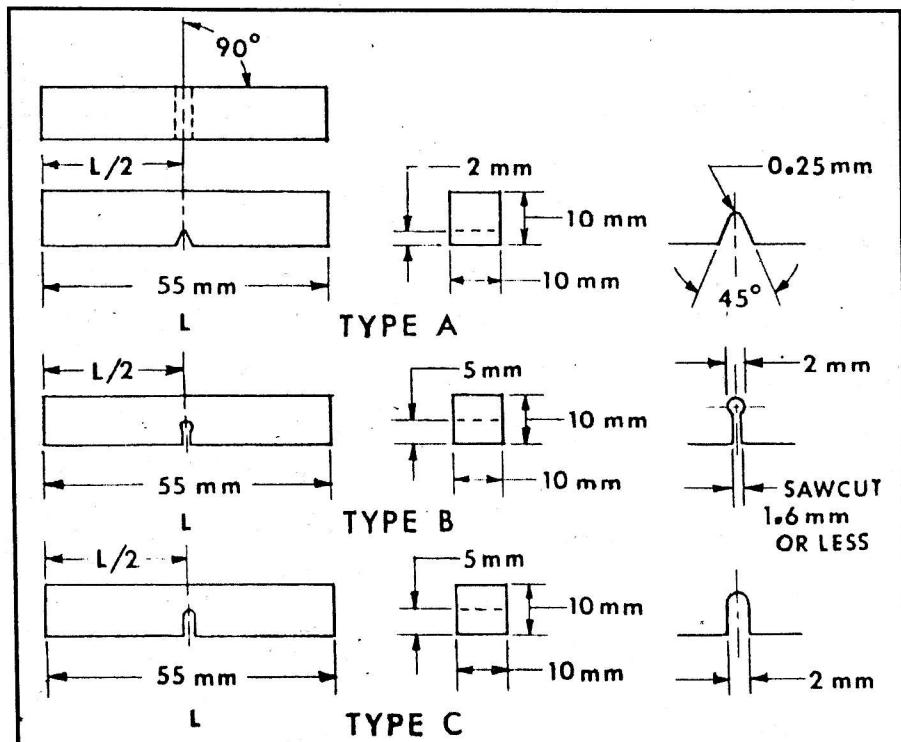
۳- دماهای کم، مانند دماهای صفر و زیر صفر

هدف از انجام این آزمایش تعیین مقاومت ضربه‌ای مواد و بررسی تأثیر دما بر استحکام ضربه‌ای و نوع شکست می‌باشد.

برای انجام آزمایش ضربه معمولاً دو روش بکار برده می‌شود.

۱۰.۷ روش شارپی.

در این روش از نمونه‌های استاندارد به ابعاد $mm 10 \times 10 \times 55$ که دارای شیارهای U ، V و یا به صورت جاکلیدی^۱ است استفاده می‌شود. معمولاً از نمونه‌های با شیار V که دارای ۲ mm عمق، شعاع رأس شیار ۰/۲۵ mm و زاویه شیار 45° می‌باشد استفاده می‌کنند. در شکل ۴-۷ نمونه‌های استاندارد شارپی ارائه شده است.

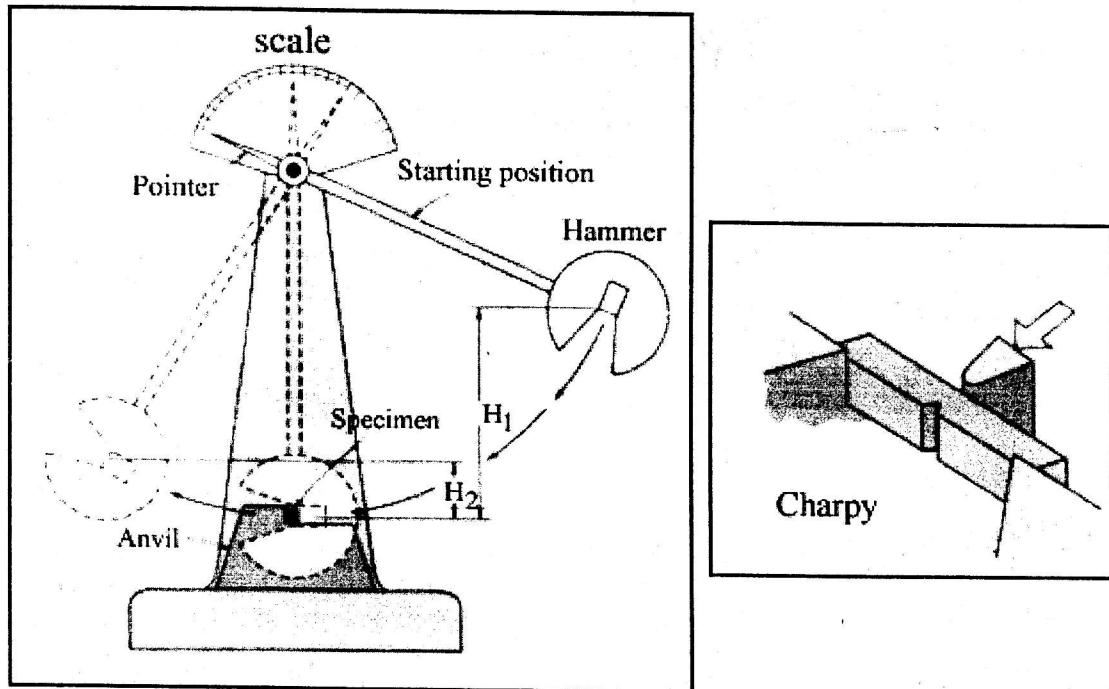


شکل ۴-۷- شماتیک نمونه‌های استاندارد شارپی.

نمونه طبق شکل ۴-۷-۵-۷- بصورت افقی در محل مربوطه واقع شده و ضربه توسط پاندولی که به انتهای آن وزنه سنگینی متصل است با سرعت $S (m/s)$ درست در پشت شیار وارد می‌شود و انرژی

1- Keyhole

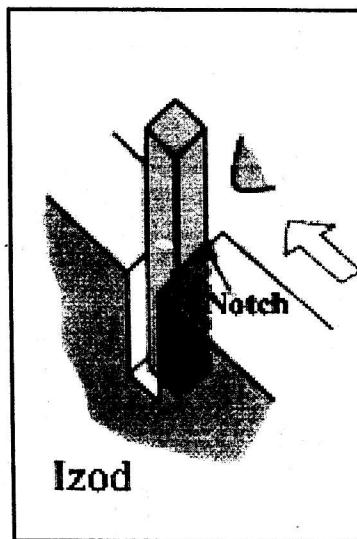
- جذب شده توسط نمونه (انرژی شکست) مستقیماً از روی صفحه مدرج دستگاه شارپی (طبق شکل ۷-۵) خوانده می‌شود. انرژی لازم برای شکست نمونه تابعی از زاویه بلند شدن پاندول، وزن پاندول و موقعیت مرکز جرم پاندول نسبت به محل وارد شدن نیرو می‌باشد که بعداً محاسبه خواهد شد.



شکل ۷-۵- دستگاه ضربه شارپی و طرز حرکت پاندول.

۱-۲- آزمایش ایزوود! در این آزمایش نیز از نمونه‌های استاندارد به ابعاد $10 \times 10 \times 75 \text{ mm}$ و با شیار V شکل به عمق 2 mm ، زاویه 45° درجه و شعاع رأس 25 mm استفاده می‌شود که نمونه در دستگاه بحال قائم در موضع مربوطه قرار گرفته و ضربه توسط پاندول با سرعت $11/5 \text{ m/s}$ ($3/5 \text{ ft/s}$) در طرف شیار (طبق شکل ۶-۷) به نمونه وارد می‌شود. انرژی شکست مستقیماً از صفحه مدرج دستگاه ایزوود خوانده می‌شود.

روش ایزوود معمولاً کمتر بکار می‌رود زیرا نمونه بوسیله نگهدارنده‌های آن تحت تنش قرار می‌گیرد.



شکل ۶-۷- طرز قرار گرفتن نمونه در دستگاه ایزود.

۲-۷- محاسبه انرژی لازم جهت شکست نمونه

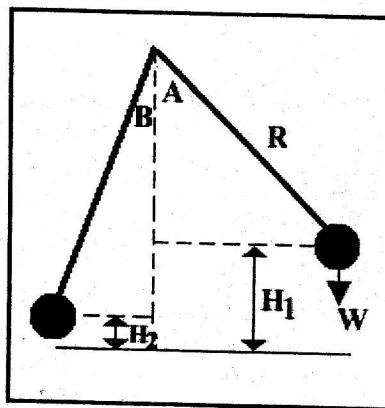
استحکام ضربه‌ای یا انرژی جذب شده برای شکست نمونه، اختلاف انرژی پاندول قبل و بعد از برخورد می‌باشد که این اختلاف انرژی تابعی از کاهش سرعت پاندول بوده و با داشتن ارتفاع پاندول قبل و بعد از برخورد قابل محاسبه است. البته در محاسبه انرژی باید انرژیهای تلف شده از قبیل کاهش سرعت پاندول در اثر مقاومت هوا، انرژی جذب شده توسط اصطکاک قسمتهای متحرک دستگاه و انرژی لازم برای پرتاب نمونه بعد از شکست را در نظر گرفت. بدون در نظر گرفتن اختلاف انرژی می‌توان انرژی شکست را طبق شکل ۷-۷- و با استفاده از فرمولها زیر بدست آورد.

$$E_1 = WH_1 = WR (I - COSA) \quad (1-7)$$

$$E_2 = WH_2 = WR (I - COSB) \quad (2-7)$$

$$E_1 - E_2 = WR (COSB - COSA) \quad (3-7)$$

در رابطه فوق W وزن پاندول، H_1 و H_2 به ترتیب ارتفاع مرکز جرم پاندول قبل و بعد از برخورد، R طول پاندول، A و B بترتیب زوایای پاندول قبل و بعد از برخورد (مطابق شکل ۲۰) می‌باشند.



شکل ۷-۷- طرحواره موقعیت پاندول قبل و بعد از برخورد به نمونه.

باید در نظر داشت که نتایج بدست آمده از آزمایش ضربه برای یک فلز ولی با دستگاههای ضربه مختلف بدلیل زیر یکسان نخواهد بود.

- اتلاف انرژی بوسیله قسمتهای متحرک ماشین
- تغییرات سرعت پاندول
- اندازه و فرم نمونه

۳-۷- عوامل موثر بر استحکام ضربه ای فلزات.

از مهمترین عواملی که در استحکام ضربه ای فلزات موثرند می توان به موارد ذیل اشاره نمود.

۳-۷-۱- سرعت اعمال نیرو.

افزایش سرعت نیروی اعمال شده (ضربه) ممکن است باعث تغییر شکست از نرم به ترد شود، که در نتیجه انرژی جذب شده توسط نمونه کاهش می یابد (استحکام ضربه ای کم می شود). افزایش سرعت نیرو مشابه با کاهش دما است که هر دو منجر به افزایش تنش سیلان می شوند.

۲-۳-۷ هندسه شیار.

جدول ۱-۷ تأثیر زاویه شیار را بر انرژی ضربه ای فولاد نرم^۱ نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود تا زاویه ۶۰ درجه تغییر زاویه اثر چندانی بر انرژی جذب شده ندارد. در این آزمایش عمق شیار ۵ mm و شعاع رأس شیار ۶۷ mm بوده است.

جدول ۱-۷ - تأثیر زاویه رأس شیار بر استحکام ضربه فولاد نرم

زاویه شیار درجه	.	۳۰°	۶۰°	۹۰°	۱۲۰°	۱۵۰°	۱۸۰°
انرژی جذب شده <i>ft.lb</i>	۲۲/۱	۲۴/۴	۲۳/۱	۲۵/۹	۴۱/۸	۶۶/۲	۶۳/۱

شعاع رأس شیار نیز در انرژی جذب شده موثر است، زیرا هرچه شیار تیزتر باشد تمرکز تنش در رأس شیار بیشتر بوده و انرژی لازم برای شکست نمونه کمتر خواهد بود. البته در مواد نرم شعاع رأس شیار کمتر در نتایج آزمایش موثر است. در جدول ۲-۷ اثر شعاع رأس شیار بر انرژی شکست فولادی با ۶۵/۰ درصد کربن (نمونه با شیار V شکل، زاویه ۴۵ درجه و عمق شیار ۲ mm) را نشان می‌دهد.

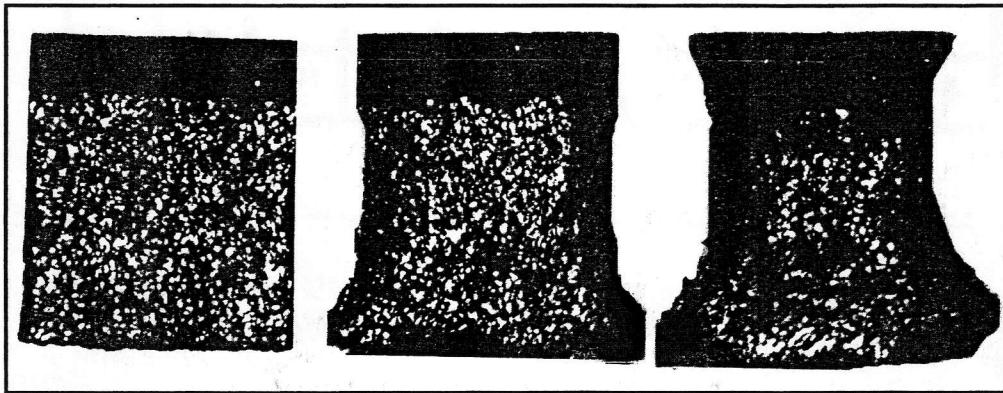
جدول ۲-۷ تأثیر شعاع رأس شیار بر انرژی شکست فولاد کربن متوسط

شعاع رأس شیار mm	تیز	۰/۱۷	۰/۳۴	۰/۶۷
انرژی جذب شده به <i>ft.lb</i>	۴	۶/۶	۸/۳	۱۳/۷

عمق شیار و شکل شیار نیز بر استحکام ضربه ای موثرند.

۳-۳-۷ دما

دما اثر مهمی بر استحکام ضربه‌ای و نوع شکست خواهد داشت بطوریکه افزایش دما ممکن است نمونه را از صد درصد شکست ترد به صد درصد شکست نرم تغییر دهد. شکل ۸-۷ اثر دما بر تغییر شکل یک نمونه که در دماهای ۴۰، ۱۰۰ و ۲۱۲ درجه فارنهایت تحت آزمایش ضربه قرار گرفته‌اند نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در دما $^{\circ}F\ 40$ شکست صد درصد ترد و در $^{\circ}F\ 212$ شکست صد درصد برشی (نرم) می‌باشد و نیز همانطوریکه دیده می‌شود، شکست نرم ابتدا در سطوح خارجی نمونه (لبه برشی)، جائیکه تنفس سه بعدی کم است ظاهر می‌شود.



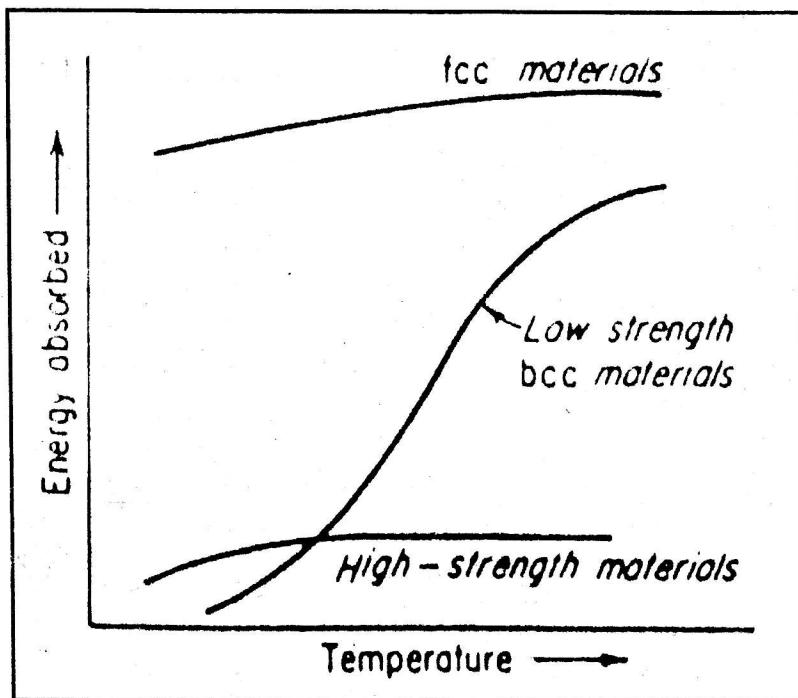
شکل ۸-۷- اثر دما بر سطح شکست در آزمایش ضربه.

البته اثر دما بر انرژی جذب شده (استحکام ضربه‌ای) بستگی به ساختار بلوری و استحکام فلز دارد (شکل ۷-۹). فلزات F.C.C با استحکام کم و متوسط و دارای چقرمگی زیادی (در مقابل شیار) هستند بطوریکه شکست ترد کمتر در این مواد اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است در مواردی که این فلزات در محیط‌های شیمیایی فعالی واقع شوند، دستخوش شکست ترد می‌شوند.

فلزات با استحکام بالا ($\frac{E}{150} > \sigma_0$) دارای چقرمگی کمتری (در مقابل شیار) می‌باشند بطوریکه در تمام دماها و با اغلب سرعتهای تغییر شکل، شکست ترد در این فلزات رخ می‌دهد. فولادهای با استحکام بالا و آلیاژهای آلومینیم و تیتانیم جزو این گروه هستند.

فلزات B.C.C و فلزات با استحکام کم و یا متوسط از قبیل روی، برلیم و مواد سرامیکی، چقرمگی (در مقابل شیار) آنها شدیداً به دما بستگی دارد. همانطوریکه در شکل ۹-۷- دیده می‌شود در دماهای

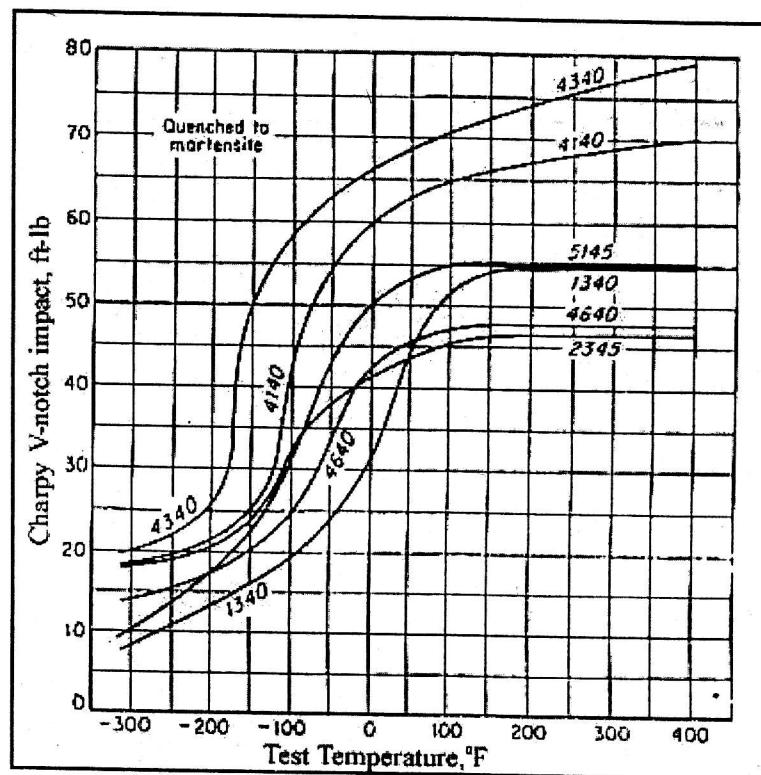
پایین شکست ترد و در دماهای بالا شکست برشی در آنها اتفاق می‌افتد. در بین این دو دما که آن را گستره دمای تبدیل^۱ می‌نامیم شکست مخلوطی از نوع ترد و برشی می‌باشد که اندازه این گستره به ترکیب شیمیایی جسم بستگی دارد و می‌تواند خیلی کوتاه و یا خیلی وسیع باشد.



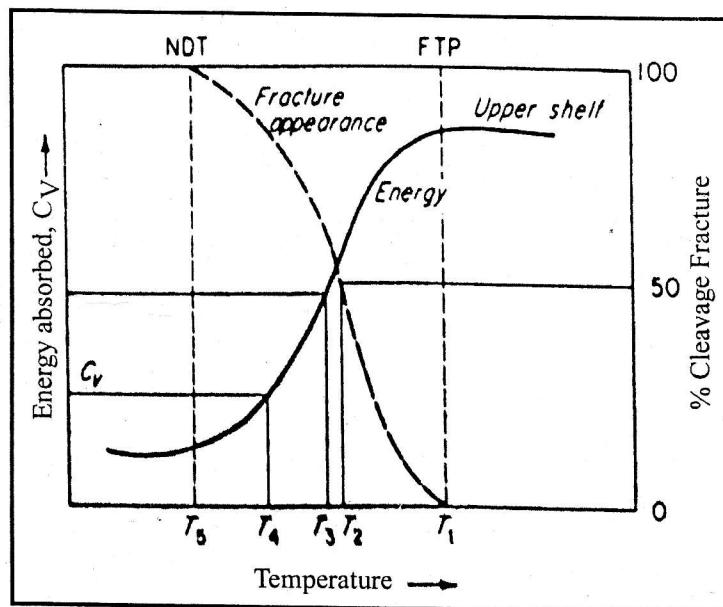
شکل ۷-۹- تاثیر دما بر انرژی جذب شده در مواد مختلف.

شکل ۷-۱۰- اثر ترکیب شیمیایی را بر گستره دمای تبدیل در فولادها نشان می‌دهد. دما تبدیل برای فلزات در حدود $10/2$ نقطه ذوب (در مقیاس کلوین) و برای سرامیکها در حدود $10/5$ نقطه ذوب (در مقیاس کلوین) می‌باشد. دانستن دمای تبدیل برای کاربرد فلزات مهم است زیرا هر چه دمای تبدیل پایین‌تر باشد (نسبت به دمای اتاک) شکست ترد کمتر اتفاق می‌افتد.

برای دمای تبدیل تعاریف مختلفی شده است که مختصراً به یک یک آنها اشاره می‌کنیم. در شکل ۷-۱۱ که نشان دهنده تغییرات انرژی جذب شده و تغییرات درصد شکست ترد نسبت دما می‌باشد؛ دماهای مختلف تبدیل مشخص شده است.



شکل ۷-۱۰- اثر ترکیب شیمیایی بر دمای تبدیل در فولادها.



شکل ۱۱-۷ دماهای تبدیل مختلف.

۱- دمایی که بالاتر از آن دما امکان شکست ترد ناچیز و شکست صد درصد برشی است. این دما را طبق شکل ۱۱-۷) دمای شکست پلاستیکی^۱ (*FTP*) می‌نامند.

۲- دمایی که در آن ۵۰ درصد شکست برشی و ۵۰ درصد شکست ترد باشد این دما را T_2 یا $FATT$ می‌نامند.

۳- دمای دیگری T_4 می‌باشد که بعنوان دمای تبدیل در نظر گرفته می‌شود، T_4 دمایی است که انرژی جذب شده کم باشد. این دما را دمای DTT ^۲ می‌نامند. معمولاً انرژی جذب شده را 15 ft.lb می‌گیرند.

۴- دمایی که در آن هیچ تغییر فرم پلاستیکی انجام نمی‌شود T_5 . در این دما شکست صدرصد "تورقی" است و این دما را NDT ^۳ می‌نامند.

۵- همچنین دمای تبدیل را میانگین دماهای T_1 و T_5 می‌توان در نظر گرفت (شکل ۱۱-۷).

۶- عوامل متالورژیکی موثر بر دمای تبدیل.
عواملی که باعث افزایش یا کاهش دمای تبدیل می‌شوند عبارتند از؛ اندازه دانه، ترکیب شیمیایی و جهتی که نمونه مورد آزمایش در آن جهت ساخته شده است.

۷- ترکیب شیمیایی.
کربن اثر زیادی بر مقدار حداکثر انرژی، شکل منحنی و دمای T_4 دارد. بطوریکه با افزایش هر $Wt\%$ عنصر آلیاژی کربن دمای T_4 حدود 25°F افزایش می‌یابد. شکل ۱۲-۷- اثر کربن را بر دمای تبدیل و انرژی شکست فولادها نشان می‌دهد.

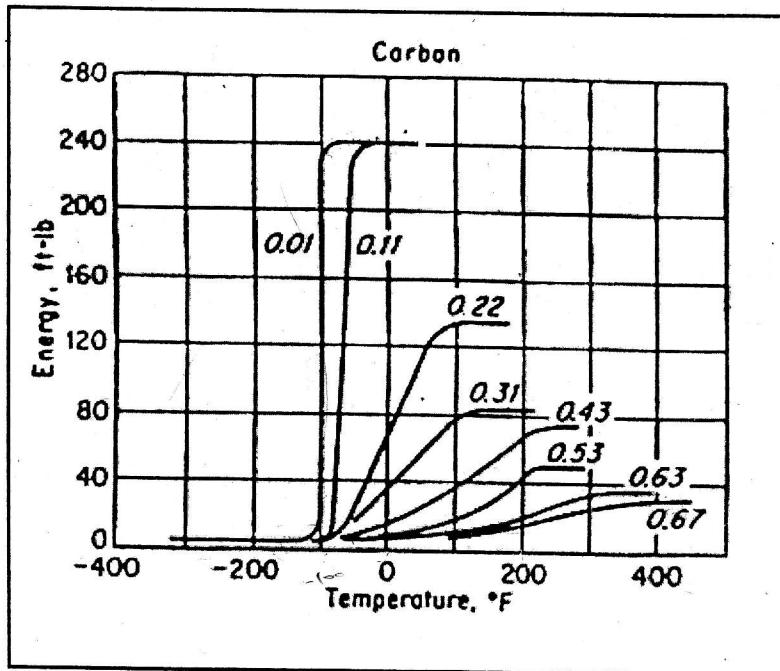
منگنز:

افزایش $Wt\%$ عنصر آلیاژی منگنز دمای T_4 را حدود 10°F کاهش می‌دهد.

-
- 1- *Fracture Transition Plastic: FTP*
 - 2- *Fracture Appearance Transition Temperature*
 - 3- *Ductility Transition Temperature*
 - 4- *Nil Ductility Temperature*

فسفر:

فسفر اثر شدیدی بر دمای T_4 دارد بطوریکه با افزایش $Wt\% 0.101$ عنصر فسفر T_4 حدود $13^{\circ}F$ افزایش می‌یابد. از این رو فسفر باید کنترل شود و با توجه به اینکه در فولادهای "بسمر" فسفر زیاد است لذا این فولادها در دماهای کم کاربردی ندارند.



شکل ۱۲-۷ اثر کربن بر تغییرات انرژی ضربه نسبت به دما برای فولاد.

اکسیژن:

برای آهن با درجه خلوص بالا اگر مقدار اکسیژن بالاتر از $Wt\% 0.03$ باشد باعث شکست بین دانه‌ای شده و انرژی شکست کم خواهد بود. چنانچه درصد اکسیژن از $Wt\% 0.01$ به $Wt\% 0.057$ افزایش یابد دمای تبدیل از $5^{\circ}F$ به $650^{\circ}F$ می‌رسد، لذا اکسیژن‌زدایی اثر مهمی بر دمای تبدیل دارد. فولادهای جوشان^۱ که مقدار زیادی اکسید آهن دارند، دمای تبدیل آنها در حدود دمای اتاق است. فولادهای نیمه آرام^۲ که با سیلیسیم اکسیژن زدایی شده دمای تبدیل آن کمتر است. در فولادهای آرام^۳

1- Rimmed Steel

2- Semi-Killed Steel

3- Killed Steel

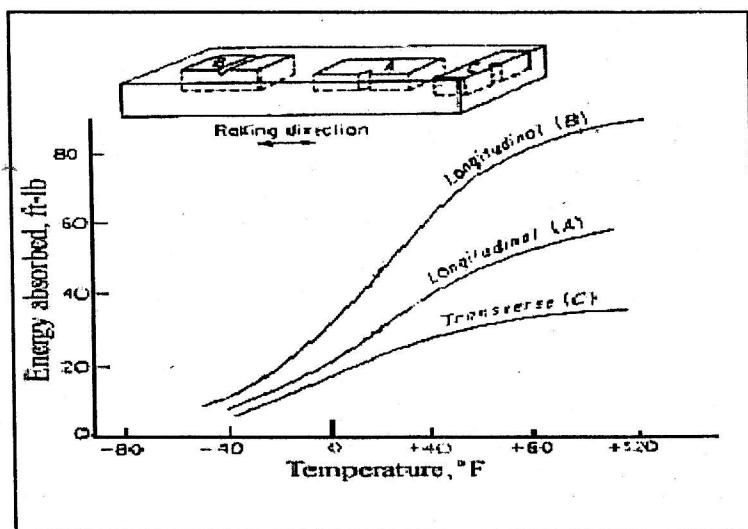
که با سیلیسیم و آلومینیم اکسیژن زدایی شده دمای تبدیل T_4 حدود $75^{\circ}F$ - است، سایر عناصر هم بر دمای تبدیل موثرند. نیکل بیش از $2\%Wt$ باعث کاهش دمای T_4 و سیلیسیم بیش از $0.25\%Wt$ باعث افزایش دمای تبدیل شده و عنصر آلیاژی مولیبден نیز مانند کربن و با همان سرعت دمای تبدیل را بالا می‌برد.

۲-۴-۷- اندازه دانه.

اندازه دانه اثر شدیدی بر دمای تبدیل دارد. بطوریکه افزایش یک عدد *ASTM* (کاهش اندازه دانه) در فولادهای فریتی باعث کاهش دمای تبدیل به میزان $30^{\circ}F$ در فولادها خواهد شد. همچنین کاهش اندازه دانه از *ASMT* ۵ به *ASTM* ۱۰ دمای تبدیل را از $70^{\circ}F$ به $60^{\circ}F$ کاهش می‌دهد. همین کاهش دما نیز با کاهش اندازه دانه‌های آستنیت پیش می‌آید.

۳-۴-۷- اثر جهت کریستالوگرافی نمونه.

برای فلزاتی که کارسرد، از قبیل نورد و یا عملیات دیگر، روی آنها انجام شده جهتی که نمونه آزمایش در آن جهت انتخاب می‌شود بر انرژی جذب شده و نیز دمای تبدیل موثر است. شکل ۱۳-۷- منحنی تغییرات انرژی جذب شده بر حسب دما را برای سه نمونه ضربه شارپی، که از جهات مختلف یک صفحه نورد شده انتخاب شده‌اند، نشان می‌دهد. نمونه *C* در جهت عمود بر جهت نورد و نمونه‌های *A* و *B* در جهت نورد می‌باشند. با این تفاوت که جهت شیار در نمونه‌های *A* با *B* فرق می‌کند.



شکل ۱۳-۷- اثر جهت نمونه روی منحنی‌های دما تبدیل.

۵-۷- دستور کار آزمایش

پنج نمونه شارپی از فولاد کم کربن را در دماهای مختلف تحت آزمایش ضربه قرار داده و اثر دما را بر انرژی شکست بررسی کنید.

ابتدا ابعاد نمونه ها را با دقیق اندازه گیری کرده و سپس هر نمونه را بعد از رسیدن به دمای مورد نظر تحت آزمایش ضربه قرار دهید. در هر دما تغییرات ابعاد نمونه، درصد شکست ترد و انرژی شکست را اندازه گیری کنید.

۶- خواسته های آزمایش

۱- منحنی انرژی شکست را بر حسب دما رسم کرده و دمای تبدیل را برای فولاد کم کربن مورد آزمایش بدست آورید.

۲- منحنی درصد شکست ترد بر حسب دما را رسم کرده و دماهای *FATT NDT* و *FTP* را بدست آورید.

۳- منحنی تغییرات عرض نمونه بر حسب دما را رسم کرده و علت تغییرات را توضیح دهید.

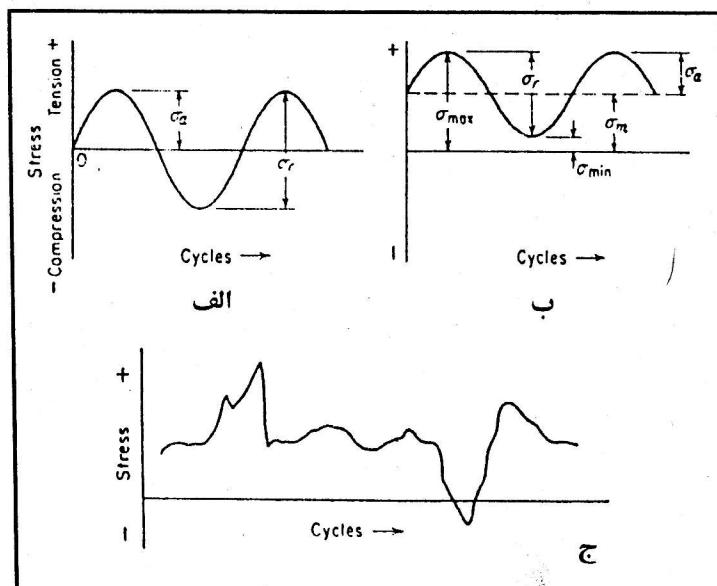
-۸ آزمایش خستگی

وقتی فلزی تحت تنش یا نیروی تناوبی قرار گیرد در تنشی به مراتب پایین‌تر از تنش لازم برای شکست فلز در حالتی که تحت نیروهای استاتیکی واقع شود، شکسته خواهد شد. مشروط بر اینکه زمان اعمال نیرو یا تعداد چرخه (سیکل) به اندازه کافی باشد. شکستی که تحت شرایط بارگذاری تناوبی اتفاق می‌افتد، شکست خستگی نامیده می‌شود. شکست در اثر خستگی، ناگهانی و بصورت ترد می‌باشد. از نقطه نظر ماکروسکوپی سطح شکست معمولاً عمود بر جهت تنش کشش اصلی است. شکست در اثر خستگی را می‌توان از ظاهر سطح شکست تشخیص داد. سطح شکست دارای دو منطقه صاف و زبر است. منطقه صاف در حین اشعه ترک و بهم سائیده شدن دو سطح ترک بوجود می‌آید و منطقه زبر وقتی بوجود می‌آید که سطح باقیمانده تحمل نیروی وارد را نداشته و بصورت ترد می‌شکند. برای شکست در اثر خستگی سه عامل اصلی لازم است که عبارتند از: ۱- مقدار بالای تنش کششی ۲- تغییرات زیاد و کافی در تنش اعمال شده ۳- تعداد سیکلهای زیاد و کافی.

البته عوامل دیگری از قبیل تمرکز تنش، خوردگی، دما، بار اضافی، ساختار متالورژیکی، تنش‌های پس‌ماند و غیره بر خستگی یک ماده تأثیر گذار می‌باشد.

۱-۸ تنشهای تناوبی

ابتدا بهتر است انواع تنشهای تناوبی، که منجر به خستگی می‌شوند، تعریف شوند. در شکل ۱-۸ سه نوع تنش تناوبی دیده می‌شود.

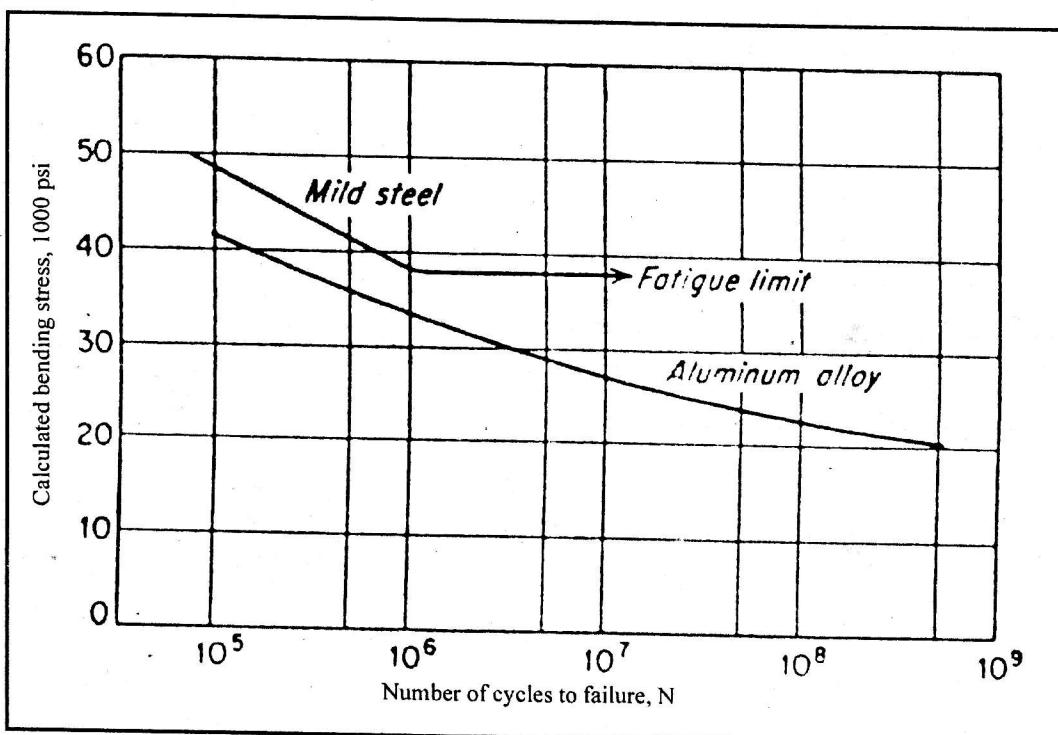


شکل ۱-۸ انواع تنشهای تناوبی
که منجر به خستگی می‌شوند.

در شکل ۱-۸-الف منحنی تنش تناوبی بصورت سینوسی است که بیشتر در محورهای که با سرعت ثابت در حال دوران هستند دیده می‌شود. در این نوع بارگزاری، تنش ماکزیمم و تنش مینیمم با هم مساوی هستند. تنش کششی را مثبت و تنش فشاری را منفی در نظر می‌گیرند. در شکل ۱-۸-ب. تنش ماکزیمم و تنش مینیمم با هم برابر نیستند. در این شکل هر دو تنش کششی می‌باشند، اما می‌تواند تنش ماکزیمم کششی و تنش مینیمم فشاری نیز باشد. شکل ۱-۸-ج نشان دهنده یک نوع تنش تناوبی پیچیده است که در قسمتهایی مانند بال هواپیما که تحت وزش باد می‌باشد؛ اتفاق می‌افتد.

۲-۸- منحنی $S-N$

برای نشان دادن رفتار یک جسم در مقابل خستگی از منحنی $S-N$ استفاده می‌شود. S تنش و N تعداد چرخه تا شکست می‌باشد. تنش می‌تواند σ_{\max} ، σ_{\min} و یا σ_a باشد. معمولاً این منحنی برای مقدار معین m رسم می‌شود. لازم به ذکر است بیشتر خواص خستگی فلزات در حالت ۰ تعیین می‌شود. شکل ۲-۸ منحنی $S-N$ را برای فولاد و فلزات غیرآهنی نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸ منحنی $S-N$ برای فولادها و فلزات غیر آهنی.

همانطور که در شکل ۲۸ دیده می‌شود، تعداد چرخه‌هایی که نمونه قبل از شکست می‌تواند تحمل کند با کاهش تنش افزایش می‌یابد و نیز دیده می‌شود که برای بعضی از مواد مانند فولاد و تیتانیم منحنی $S-N$ در تنש معینی افقی می‌شود. در تنشهای کمتر از این تنش، که حد خستگی نامیده می‌شود، ماده می‌تواند بدون شکست چرخه‌های نامحدودی را تحمل کند. ولی در مورد بیشتر فلزات غیر آهنی مانند آلومینیم، منیزیم و آلیاژهای مس منحنی $S-N$ با شبیه تدریجی نسبت به افزایش تعداد چرخه‌ها به سمت پایین می‌آید. این مواد دارای حد خستگی نبوده و منحنی $S-N$ آنها هرگز افقی نخواهد شد. در این مواد استحکام خستگی در چرخه معین تعریف می‌شود. عنوان مثال در 10^8 چرخه برای رسم منحنی $S-N$ اولین نمونه را تحت تنش بالا قرار داده تا شکست در تعداد سیکل اندک اتفاق بیفتد (عنوان مثال در تنشی حدود $\frac{2}{3}$ استحکام کششی) سپس تنش را کم کرده و نمونه‌ها را در تنشهای پایین‌تر تحت آزمایش قرار داده تا جاییکه یک یا دو نمونه در تعداد معینی چرخه (که معمولاً 10^7 چرخه است) دچار شکست نشوند. بیشترین تنشی را که در آن شکست اتفاق نیفتد به عنوان حد خستگی در نظر می‌گیرند.

در مورد فلزاتی که حد خستگی ندارند آزمایش خستگی تا 10^8 یا 10^9 سیکل ادامه می‌یابد. معمولاً منحنی $S-N$ با ۸ تا ۱۲ نمونه رسم می‌شود.

۳-۸- دستور کار آزمایش:

در این آزمایش ۵ نمونه فولاد کم کربن در تنشهای مختلف تحت آزمایش خستگی قرار گرفته و منحنی $S-N$ رسم می‌شود.

- ۱- قطر نمونه را با کولیس به دقیقیت اندازه‌گیری کنید.
- ۲- نمونه را در داخل فکها قرار داده و پیچ فکها را محکم ببندید. (در این حالت وزنه باید روی صفر باشد تا ممانی به نمونه وارد نشود).
- ۳- در حالیکه نمونه را با یک دست به حالت افقی نگه داشته‌اید، با دست دیگر وزنه را روی ممان مورد نظر آورده و موقعیت آن را ثابت نمایید.

- ۴- بعد از آماده شدن دستگاه جهت آزمایش، همزمان دستگاه و کرونومتر را روشن کنید و منتظر بمانید تا نمونه شکسته شود (برای اندازه گیری زمان می توان از ساعت دستگاه نیز استفاده کرد).
- ۵- با استفاده از کرونومتر زمان لازم جهت شکست را تعیین کنید. با توجه به سرعت دوران دستگاه (تعداد چرخه تا شکست را محاسبه کنید.

۴-۸- خواسته های آزمایش

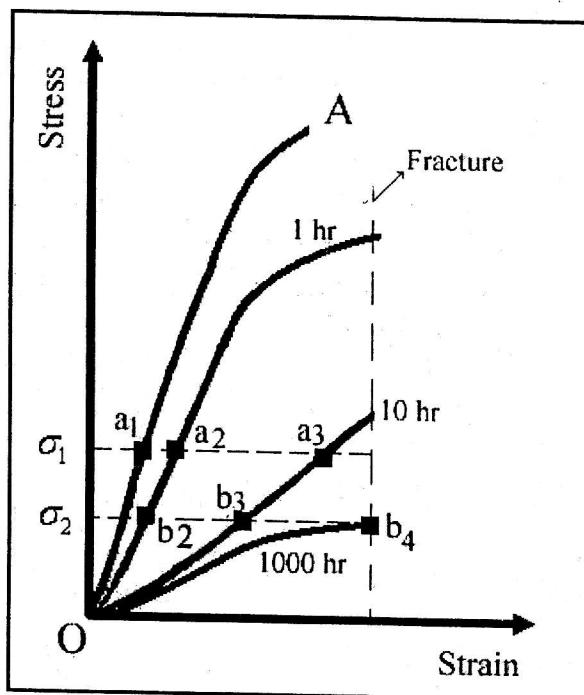
- ۱- با استفاده از زمان آزمایش و سرعت دوران دستگاه، تعداد چرخه تا شکست را بدست آورید.
- ۲- با استفاده از فرمول $\sigma = \frac{M}{\frac{\pi d^3}{32}}$ تنش لازم برای شکست را محاسبه نماید.
- ۳- اعداد محاسبه شده تنش و تعداد سیکل را در جدولی قرار دهید.
- ۴- منحنی $S-N$ را رسم کنید.

۹- آزمایش خزش

۱-۹- مقدمه.

استحکام فلزات با افزایش دما کاهش یافته و حرکت اتمها سریعتر می‌شود. در دماهای بالا نفوذ اتمی اثر مهمی بر خواص مکانیکی مواد دارد. همچنین دمای بالا باعث تحرک بیشتر ناجاییها بوسیله مکانیزم صعود شده و کسر مولی تهیاییها نیز افزایش می‌یابد. بعلاوه در دماهای بالا ممکن است مکانیزم‌های دیگر تغییر شکل وارد عمل شوند، از جمله در بعضی فلزات سیستم لغزش تغییر کرده یا سیستم لغزش جدیدی بوجود می‌آید. تغییر شکل در مرزدانه‌ها نیز امکان دارد در دمای بالا رخ دهد. از طرفی در دمای بالا واکنش فلز با محیط اطراف از قبیل اکسایش و خوردگی نیز باید در نظر گرفته شود. در دماهای پائین خواص مکانیکی بیشتر فلزات مستقل از زمان می‌باشد اما در دماهای بالا استحکام به سرعت تغییر طول نسبی و زمان بستگی دارد. فلزی که در دما بالا تحت نیروی ثابت کششی (یا تنש ثابت) قرار می‌گیرد، در آن پدیده خزش^۱ اتفاق می‌افتد. حال بینیم خزش چیست؟ تغییر شکل تدریجی فلز را نسبت به زمان تحت تنش یا بار ثابت خزش می‌نامند. اگرچه خزش در تمام دماها اتفاق می‌افتد و حتی در دمای هلیوم مایع نیز مشاهده شده است، اما از نقطه نظر عملی خزش فلزات و آلیاژهای مهندسی در دماهای بالا اهمیت دارد. در دماهای پائین، فلزات در تنشهایی بیشتر از تنش حدکشسان تغییر شکل مومسانی خواهند داد ولی تغییر طول مومسان کم و بیش آنی بوده و ادامه اعمال تنش ثابت اثر کمی بر تغییر طول نسبی خواهد داشت. اما در دماهای زیاد، تحت تنش ثابت فلز شروع به تغییر شکل مومسان کرده و چنانچه زمان نگهداری در این دما به اندازه کافی باشد سرانجام فلز خواهد شکست. در شکل ۱-۹- تغییرات کرنش با تنش برای زمانهای متفاوت رسم شده است. در منحنی OA آزمایش در دمای پائین متوقف شده و فلز تحت تنش یا نیروی ثابت باقی مانده است. در این حالت اثری جزئی از خزش پدیدار می‌شود. اما اگر آزمایش در دماهای بالا تنش ثابت انجام شود، نمونه با سرعتی که بستگی به نیرو و دما دارد کشیده خواهد شد. هرچه دما و نیرو بیشتر باشد، سرعت ازدیاد طول نسبی نیز بیشتر خواهد بود. در شکل ۱-۹-، در مدت زمان یک ساعت و تحت تنش a_1 کشیدگی فلز از میزان لحظه‌ای a_1 به a_2 و در مدت زمان ۱۰ ساعت به a_3 می‌رسد. در سطح تنش

کمتر مانند σ_2 , فلز در یک ساعت فقط تا b_2 و در ۱۰ ساعت فقط تا b_3 کشیده می‌شود. ممکن است اگر آزمایش تا ۱۰۰۰ ساعت ادامه یابد, فلز در b_4 گسیخته شود.



شکل ۹-۱-۹- اثر تنش و زمان بر ازدیاد طول نسبی.

۲-۹- مراحل خزش. همانطور که در اهداف مهندسی، خواص مکانیکی فلزات معمولاً بوسیله منحنی‌های تنش-کرنش ($\sigma - \epsilon$) تشریح می‌شود، خزش نیز بوسیله منحنی‌های کرنش-زمان ($\epsilon - t$) در دما و تنش ثابت نشان داده می‌شود. در شکل ۹-۲-۹- فرم کلی منحنی خزش رسم شده است.

بطور کلی خزش از سه مرحله به اضافه یک مرحله مقدماتی تشکیل می‌شود. این مرحله مقدماتی شامل تغییر شکل تقریباً لحظه‌ای (ϵ_0) است که در اثر اعمال نیرو در اول آزمایش ایجاد می‌شود.

مرحله اول: که خزش اولیه یا گذرا نامیده می‌شود، سرعت خزش مرتب کاهش یافته و مقاومت خزش مواد بعلت کار سختی ایجاد شده افزایش می‌یابد.

مرحله دوم: که به نام خزش ثانویه یا حالت پایدار نامیده می‌شود، مهمترین مرحله خزش در عملیات صنعتی می‌باشد. در این مرحله مواد دارای سرعت خزش ثابتی هستند یعنی نرخ کرنش نسبت به زمان ثابت است. این مرحله ممکن است سالها طول بکشد. این مرحله که در مواردی خزش بازیابی نیز

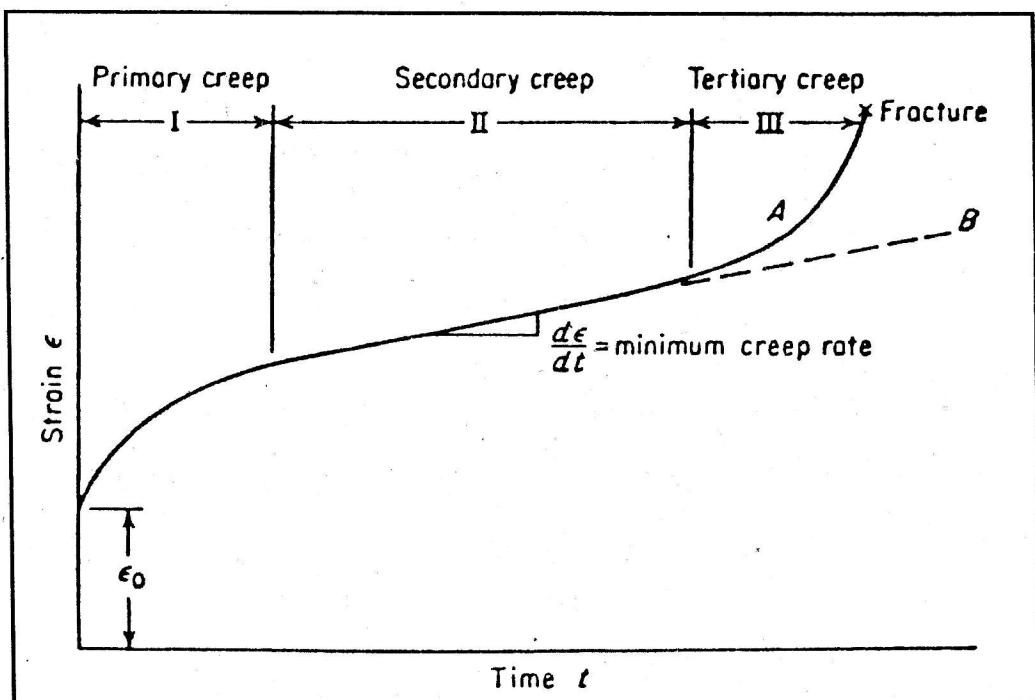
نامیده می‌شود موقعی رخ می دهد که سرعت بازیابی به اندازه کافی زیاد و سرعت کار سختی، (سخت شدن) بر اثر تغییر طول نسبی به اندازه کافی کم باشد بطوریکه این دو به یک حالت توازن برستند. لذا در این مرحله داریم:

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial t} dt + \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} d\varepsilon \quad (1-9)$$

$$\sigma = cte \Rightarrow d\sigma = 0 \quad (2-9)$$

$$\varepsilon^o = \frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{\frac{\partial \sigma}{\partial t}}{\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon}} = -\frac{r}{h} \quad (3-9)$$

در رابطه فوق r آهنگ بازیابی و h آهنگ کار سختی می‌باشد.



شکل ۲-۹- فرم کلی منحنیهای خزش.

مرحله سوم: در این مرحله که خزش سومین نامیده می‌شود سرعت خزش افزایش یافته و بالاخره منجر به شکست نمونه خواهد شد. اگر در حین آزمایش تنش ثابت باشد، افزایش سرعت خزش در منطقه سوم شدید نبوده و طبق منحنی B (نقطه چین در شکل ۲-۹) خواهد بود. مرحله سوم اغلب با رشد

ترکهای میکروسکوپی در ماده همراه است. اگرچه معمولاً منحنی‌های خزش در سه مرحله مشاهده شده است ولی گاهی صورتهای دیگری از تغییرات کرنش نسبت به زمان دیده می‌شود. بعضی مواقع سرعت خزش از آغاز آزمایش، بخصوصاً وقتی که از تنفس یا دمای بالا استفاده شود، پیوسته افزایش می‌یابد و گاهی سرعت خزش به طور مرتب کاهش یافته و در مرحله سوم بدون اینکه مرحله دوم را طی کند به شکست منجر می‌شود. این موارد اغلب مربوط به ناپایداری در ساختار مواد می‌باشد که در حین آزمایش ماده سخت و یا نرم شده و در نتیجه باعث از بین رفتن مرحله دوم خزش می‌شوند.

۳.۹ اثر دما بر خزش.

اصولاً خزش در مواد مهندسی پدیده‌ای است که به دمای‌های بالا مربوط می‌شود ولی باید بدانیم که دمای بالا عبارت رسائی نیست زیرا دمایی که برای یک آلیاژ زیاد محسوب می‌شود ممکن است برای آلیاژ دیگر کم باشد. دمایی که در آن خزش اهمیت دارد، به نقطه ذوب آلیاژ بستگی دارد. در دمای‌های پایین هم تغییر شکل ناشی از خزش انجام می‌گیرد اما در بیشتر موارد در دمای‌های بین صفر مطلق و $\frac{1}{4}T_m^0$ تغییر شکل ناشی از خزش کمتر اهمیت دارد (T_m دما مطلق ذوب است). ولی به محض اینکه دما از $\frac{1}{4}T_m^0$ فراتر رفت، خزش باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد. بنابراین در فلزی مانند سرب که دارای نقطه ذوب $C^0 327$ یا $k 600$ است، خزش در دمای اتاق نیز اهمیت دارد. از طرف دیگر فولاد که دارای نقطه ذوب $C^0 1500$ یا $k 1773$ است تا $C^0 300$ پدیده خزش به صورت جدی مطرح نمی‌شود. باید در نظر داشت اگرچه نقطه ذوب از مهمترین عوامل موثر بر خزش می‌باشد اما فقط یکی از این عوامل می‌باشد. در دمایی که خزش اهمیت دارد ساختار بلوری و متالورژیکی نیز نقش مهمی دارند. به عنوان مثال در فولادهای فریتی با ساختار $B.C.C$ خزش در بالای $C^0 300$ اهمیت دارد حال آنکه در فولادهای زنگ نزن آستینتی (با ساختار بلوری $F.C.C$) خزش تا حوالی $C^0 500$ مشکلی ایجاد نخواهد کرد. با وجود اینکه دو فولاد نقاط ذوب مشابهی دارند.

لازم به ذکر است که ارتباط بین نقطه ذوب و مقاومت خزش نباید جدا از اثر دیگر عوامل بر خزش بررسی شود. سالها عقیده بر این بود که تغییر شکل خزش فرایند است که یوسیله حرارت برانگیخته شده و فرمول مشهور آرنیوس بر آن حاکم می‌باشد.

$$\varepsilon^\circ = \alpha \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (4-9)$$

در رابطه فوق ε° آهنگ خزش، Q انرژی محرکه خزش، T دمای مطلق و R ثابت گازها است. بنابراین با افزایش دما آهنگ خزش بطور نمایی^۱ افزایش می‌یابد. انرژی محرکه Q برای سیستمهای زیادی اندازه‌گیری شده است. یک روش ساده اندازه‌گیری Q تغییر ناگهانی شرایط آزمایش خزش از تنش σ_1 و دمای T_1 به تنش σ_2 و دمای T_2 می‌باشد. انرژی محرکه از روی تغییر آهنگ خزش با استفاده از معادله شماره ۴-۹ به صورت زیر محاسبه می‌شود. تغییرات دما باید به حدی باشد که بر ثابت α تأثیر نداشته باشد.

$$Q = \frac{R \cdot L n \frac{\varepsilon_1^\circ}{\varepsilon_2^\circ}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (5-9)$$

بررسی انرژی محرکه اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که در فلزات خالص مقدار انرژی محرکه خزش در بالاتر از $15T_m$ ، تقریباً مساوی با انرژی محرکه خود نفوذی اتمها^۲ می‌باشد. در مورد آلیاژها، انرژی محرکه خزش معمولاً با انرژی محرکه خود نفوذی یکی از عناصر آلیاژی مساوی است. بنابراین می‌توان چنین استنباط نمود که در دمای بالا خزش تحت تأثیر مکانیزمهایی است که آن مکانیزمها توسط خود نفوذ اتمها کنترل می‌شود. بنابراین عواملی که باعث سخت شدن مواد در دماهای پائین می‌شوند در دماهای بالا دیگر تأثیر چندانی نخواهند داشت. اثر تفозд اتمی، مخصوصاً در مورد کربن در آهن ۷ بخوبی روشن شده است، با افزایش درصد کربن سرعت خود نفوذی اتمهای آهن در فاز آستینیت بیشتر شده و سرعت خزش نیز افزایش می‌یابد. بنابراین بر خلاف انتظار (با در نظر گرفتن اثر سخت‌کنندگی کربن بر آهن) اضافه کردن کربن عملاً مقاومت خزشی را کاهش می‌دهد. بهبود زیاد مقاومت خزشی آهن ۷ (با ساختار بلوری $F.C.C$) در مقایسه با آهن α (با ساختار بلوری $B.C.C$) نیز به کاهش سرعت خود نفوذی آهن، هنگامیکه در $910^\circ C$ از حالت α به γ تغییر حالت می‌دهد، نسبت داده می‌شود. همچنین سرعت خزش با سرعت صعود نابجاییها متناسب است و از طرفی سرعت صعود نابجاییها بوسیله سرعت نفوذ اتمها کنترل می‌شود.

۴-۹- اثر تنش. سرعت خزش بستگی به مقدار تنش دارد و در اکثر موارد سرعت خزش ثانویه بصورت تابع توانی از تنش تغییر می‌کند که توسط معادله $\varepsilon^\circ = K\sigma^n$ نشان داده می‌شود. ε° سرعت خزشی، n تنش، K ثوابت ماده هستند. براساس تحقیقات گوناگون، برای بسیاری از فلزات خالص و آلیاژها n در حدود ۳-۵ می‌باشد. با توجه به فرمول فوق اگر تنش در خزش ۲ برابر شود سرعت خزش معمولاً ۸ تا ۳۲ برابر می‌شود. البته این قانون کلی دارای استثناهایی نیز می‌باشد. به عنوان مثال در نزدیکی نقطه ذوب بعلت رفتار فلزات در این دما، سرعت خزش با تنش بصورت خطی تغییر می‌کند. یعنی $n=1$ می‌شود. بنابراین کاملاً مشخص است که n بستگی به دما دارد. ضمناً بعضی از مواد دارای توان تنش بسیار بالایی هستند. برای مثال مقادیری از n در حدود ۲۰ نیز مشاهده شده است. در این صورت دیگر رابطه $\varepsilon^\circ = K\sigma^n$ صادق نیست و وابستگی سرعت خزش با تنش به صورت رابطه زیر در می‌آید.

$$\varepsilon^\circ = A \cdot \exp(B \cdot \sigma) \quad (6-9)$$

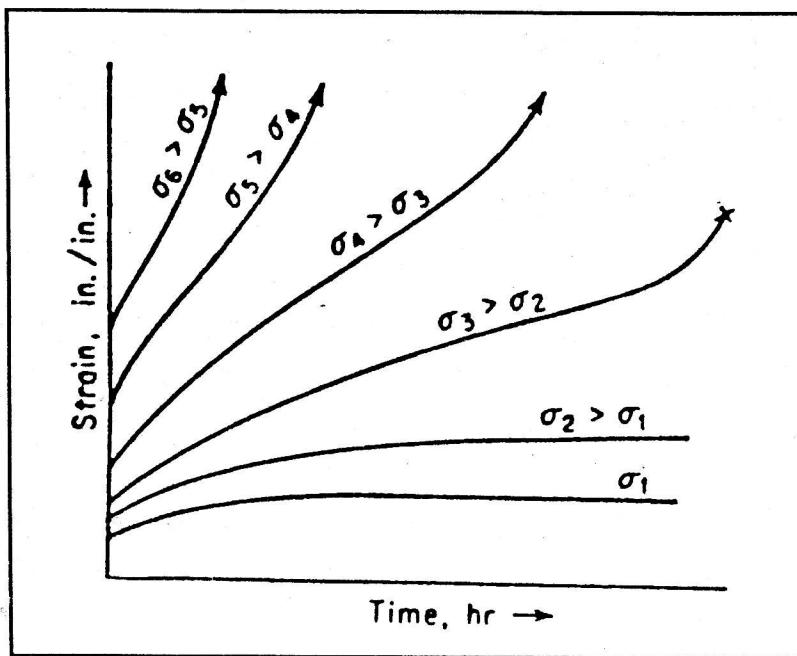
با وجود اینکه این فرمول غالباً برای خزش ثانویه در تنشهای زیاد ذکر شده است، ولی در سرعتهای خزشی و تنشهایی که بنظر می‌رسد باید فرمول فوق صادق باشد، ممکن است هرگز سرعتهای ثانویه خزش واقعی دیده نشده و خزش سومین روی دهد.

تونهای معمولی تنش که در محدوده ۳-۵ مشاهده می‌شوند، می‌تواند بوسیله تئوریهای صعود نابجاییها توضیح داده شوند. با تجمع نابجاییها پشت موانع موجود مانند ذرات یا مرزدانه‌ها کار سختی ایجاد می‌شود. نابجاییها با صعود می‌توانند از محل تجمع عبور نمایند. وقتی سرعت کار سختی و سرعت بازیابی با هم برابر شود شرایط خزش ثانویه بوجود آمده و در آن حالت سرعت خزش بوسیله سرعت صعود نابجاییها، کنترل می‌شود. معادله سرعت خزش در تنشهای کم از رابطه زیر پیروی می‌کند.

$$\varepsilon^\circ = \frac{C \cdot \sigma^{4.5} \cdot D}{N^{0.5} \cdot G \cdot k \cdot T} \quad (7-9)$$

در رابطه فوق ε° سرعت خزش ثانویه، C ثابت، σ تنش، D ضریب خود نفوذی، N تعداد نابجاییها که در صعود شرکت می‌کنند، G مدول برشی، K ثابت بولتزمان و T دما می‌باشد.

شکل ۳-۹- اثر تنش را بر منحنی خزش در دمای ثابت نشان می‌دهد. همانطوریکه ملاحظه می‌شود منحنی خزش با سه ناحیه فقط برای تنش و دمای خاصی اتفاق می‌افتد. همچنین اگر تنش ثابت و دما تغییر کند، با افزایش دما سرعت خزش بیشتر می‌شود.

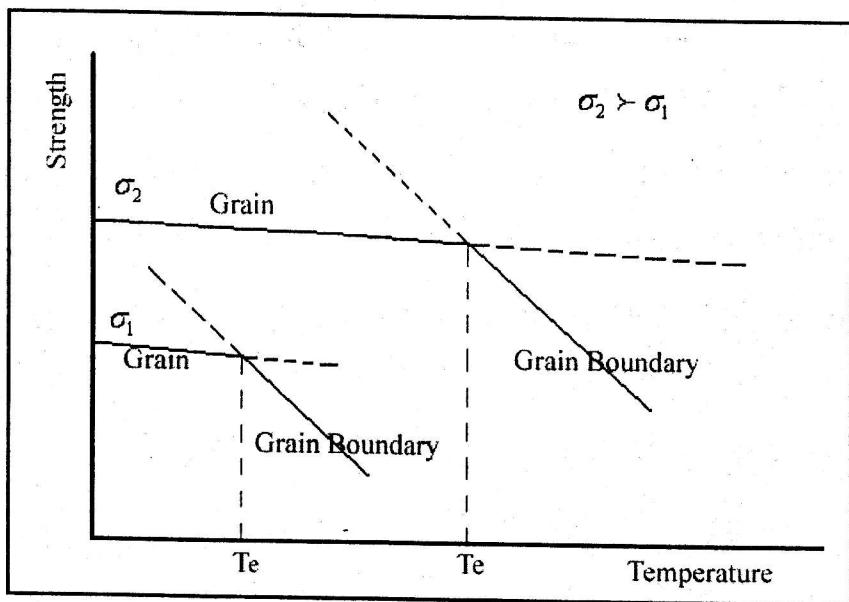


شکل ۳-۹- اثر تنش بر منحنی خزش.

۵-۹- نقش مرزدانه‌ها.

تغییرات استحکام دانه و مرزدانه نسبت به دما در شکل ۴-۹ دیده می‌شود. در اثر افزایش دما استحکام مرزدانه، بیشتر از استحکام دانه‌ها کاهش می‌یابد و این، دو منحنی در T_e (دمای که استحکام دانه و مرزدانه با هم برابر است) همدیگر را قطع می‌کنند. T_e با میزان تنش اعمالی، سرعت اعمال کرنش و خلوص ماده تغییر می‌کند. هرچه تنش بالاتر باشد T_e نیز بالاتر است.

به آسانی می‌توان دید که در دماهای پایینتر از T_e استحکام مرزدانه‌ها بیشتر بوده و هرچه مرزدانه‌ها بیشتر یعنی دانه‌ها کوچکتر باشند، استحکام و مقاومت در مقابل تغییر شکل نیز بطور چشمگیری زیادتر است. و در دماهای بالا عکس این مطلب صادق است. یعنی مرزدانه منبع ضعف است و دانه‌بندی ریز باعث کاهش استحکام خزش می‌شود. بخصوص وقتی که سرعت آزمایش کم باشد.



شکل ۴-۹- تغییرات استحکام دانه و مرزدانه نسبت به دما.

۶-۹- دستور کار آزمایش

این آزمایش در حقیقت پاره شدن در اثر تنفس^۱ است زیرا به علت محدودیت زمانی سطح تنفس اعمالی به نمونه بالا انتخاب شده و نمونه در مدت زمان کوتاهی پاره می‌شود. نمونه مورد آزمایش یک نمونه آلومینیمی تخت می‌باشد که در دماهای ۳۲۰، ۲۵۰، ۲۸۰ و ۳۲۰ درجه سانتیگراد تحت بار ثابت ۳۲kg قرار می‌گیرد.

- ۱- ابعاد نمونه را با دقیقیت با کولیس اندازه گیری کنید.
- ۲- وزنهای لازم جهت انجام آزمایش را در قسمت مربوطه قرار دهید.
- ۳- نمونه را به فکهای دستگاه خزش ببندید.
- ۴- کوره را بالا آورده بطوریکه نمونه در وسط کوره گرفته و آنگاه کوره را روی دمای مورد نظر تنظیم نموده و آنرا روشن کنید.
- ۵- دستگاه مربوط به اندازه گیری تغییر طول نمونه را به دستگاه خزش وصل کنید.
- ۶- بعد از رسیدن کوره به دمای مورد نظر، اهرم مربوط به نیرو را آزاد کرده تا نیرو به نمونه اعمال شود.

۷- بعد از آزاد شدن نیرو بلا فاصله تغییر طول نمونه را در زمانهای مختلف یادداشت کرده تا وقتی که نمونه پاره شود.

۷-۹- خواسته های آزمایش

۱- منحنی $t - \theta$ را در دماهای مختلف رسم کرده و بعد از تعیین مراحل مختلف خزش، سرعت خزش پایدار را بدست آورید.

۲- منحنی $\theta - t$ را برای دو دما رسم کرده و بررسی کنید که آیا این دو منحنی بر هم منطبق می‌شوند یا خیر. لازم به ذکر است که $\theta = t \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right)$ است و که در این رابطه t زمان بر حسب ساعت می‌باشد.

۳- سرعت خزش نمونه‌هایی با همین شرایط را در دمای بالاتر و پائین تراز دمای آزمایش بدست آورید.

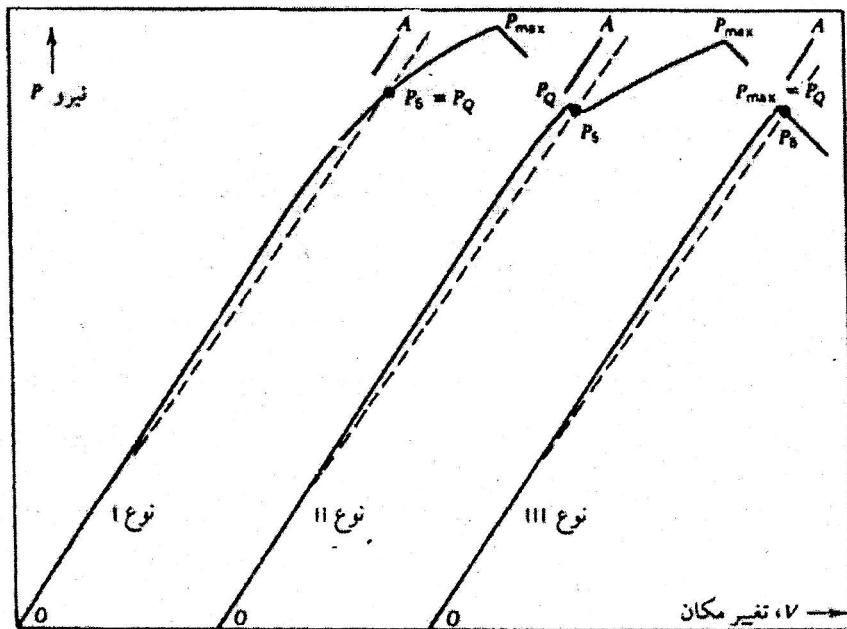
۱۰- آزمایش شکست

از آنجا که برای جلوگیری از شکست، چقرمگی شکست در حالت کرنش صفحه‌ای (K_{IC}) یکی از خواص مهم ماده است، روش اندازه‌گیری این خاصیت دارای اهمیت ویژه‌ای است. روش‌های قابل قبول برای این آزمون تحت عنوان استاندارد E399-90 در کتاب استاندارد ASTM آمده است.

در اینجا به شرح یکی از روش‌های معمول آزمایشگاهی اندازه‌گیری K_{IC} می‌پردازیم. در این روش از یکی از نمونه‌های خمس سه نقطه‌ای، نمونه فشرده و یا نمونه C شکل استفاده می‌شود. این نمونه‌ها ابتدا تحت بارگذاری خستگی قرار می‌گیرند تا فاق نمونه به میزان از قبل تعیین‌شده‌ای توسعه یابد. در ادامه با استفاده از آزمون در ارتباط با نوع نمونه، منحنی‌های نیرو-تغییرمکان رسم می‌شوند که مطابق با شکل ۱-۱۰ می‌باشد. سپس با استفاده از رسم گرافیکی بر روی این منحنی‌ها، مقدار K_Q محاسبه می‌گردد. رابطه مربوط به K_Q برای نمونه‌های استاندارد مختلف در مراجع موجود است. رسم گرافیکی بدین شرح است که در منحنی نیرو-تغییرمکان، خط OP_5 از مبدأ با شیب ۵٪ کمتر از شیب مماس OA در قسمت اول منحنی رسم می‌شود. برای نمونه خمی سه نقطه‌ای و نمونه کششی فشرده، ۵٪ کاهش در شیب تقریباً برابر با ۲٪ افزایش در طول موثر ترک است، این میزان کمترین مقدار رشد ترک و اصلاحیه مربوط به تغییرشکل مومسان را منعکس می‌کند. P_5 به عنوان نیرو در محل تلاقی OP_5 یا منحنی اولیه تعریف می‌شود. نیروی P_Q که برای محاسبه K_Q بکار می‌رود، به این روش تعیین می‌شود: اگر در هر نقطه‌ای از منحنی که قبل از P_5 می‌باشد نیرو کمتر از P_5 باشد، آنگاه P_Q همان P_5 است (شکل ۱-۱۰-نوع I). اما اگر قبل از P_5 نقطه حداکثری وجود داشت که از P_5 بیشتر باشد، آنگاه حداکثر نیرو P_Q است (شکل ۱-۱۰-نوع II, III). اگر نسبت $P_Q / P_{max} < 1.1$ باشد، می‌توان K_Q را محاسبه نمود. اگر مقدار محاسبه شده K_Q شرایط رابطه ۱-۱۰ را برقرار کند، $K_Q = K_{IC}$ و بدین معنی است که آزمون تعیین چقرمگی معتبر بوده است. در غیر اینصورت، باید نمونه‌ای ضخیم‌تر و یا ترکی عمیق‌تر برای آزمون K_{IC} معتبر آماده شود.

$$t, a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (1-10)$$

که در این رابطه t و a به ترتیب ضخامت نمونه و طول ترک و σ_y استحکام تسلیم ماده است.



شکل ۱-۱۰- منحنی های نیرو-تغییرشکل حاصل از آزمون چرمنگی شکست.

۱-۱- دستور کار آزمایش

- ۱- سه نمونه کششی فشرده از جنس فولاد پرکربن با ابعاد مختلف را پس از اندازه‌گیری ابعاد اولیه، بوسیله دستگاه کشش بارگذاری کنید.
- ۲- پس از شکست نمونه‌ها، ابعاد نهایی را اندازه‌گیری نمایید.

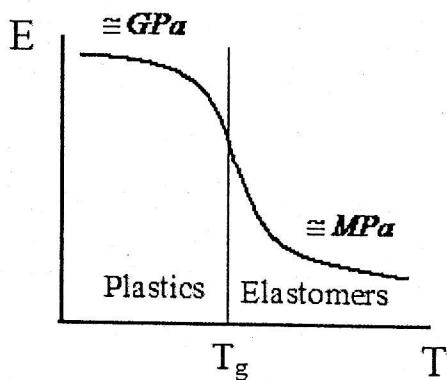
۱-۲- خواسته‌های آزمایش

- ۱- منحنی تنش-کرنش را برای سه نمونه رسم کنید.
- ۲- با اندازه‌گیری و محاسبات لازم، مقدار K_Q را برای هر سه نمونه بدست آورید.
- ۳- با بررسی شرط معتبر بودن، مقدار K_{IC} را گزارش داده و در مورد اختلاف موجود برای سه نمونه بحث کنید.

۱۱-آزمایش پلیمرها

۱-۱۱-آزمون کشش

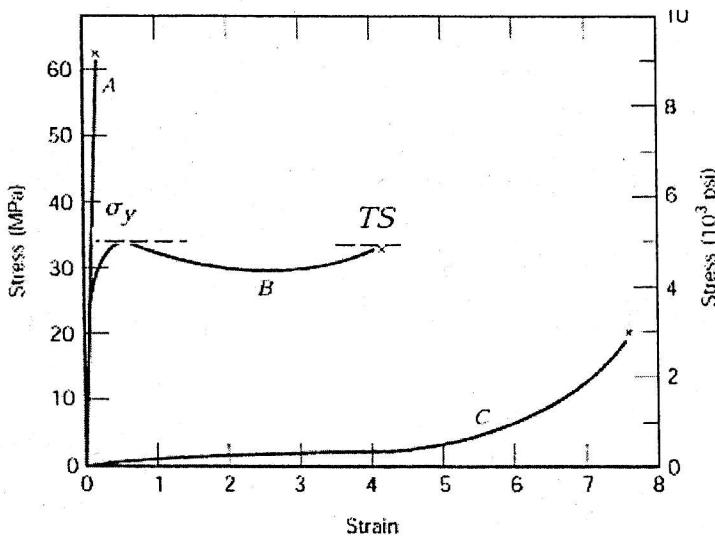
پلیمرها را می‌توان در دو دسته پلاستیک‌ها و لاستیک‌ها (الاستومرها) تقسیم بندی کرد. یکی از مشخصات پلیمرها، دمای شیشه‌ای شدن (T_g) می‌باشد که در بالاتر از این دما بصورت الاستومر و در پایین‌تر از آن بصورت پلاستیک می‌باشند. تقسیم‌بندی پلیمرها بصورت پلاستیک و الاستومر، به ترتیب بر اساس بالاتر یا پایین‌تر بودن T_g از دمای اتاق می‌باشد. شکل ۱-۱۱، تغییرات مدول الاستیک پلیمرها را نسبت به دما نشان می‌دهد که نشان-دهنده مبنای تعریف T_g می‌باشد.



شکل ۱-۱۱- تغییرات مدول الاستیکیتہ با دما برای پلیمرها.

خواص مکانیکی پلیمرها به مانند فلزات توسط برخی پارامترها نظیر مدول الاستیک، استحکام تسلیم و استحکام کششی مشخص می‌گردند که این پارامترها از منحنی تنش-کرنش بدست می‌آیند. در اکثر موارد مشخصه‌های مکانیکی پلیمرها حساسیت بالایی به نرخ تغییرشکل (نرخ کرنش)، دما و ماهیت شیمیایی محیط (وجود رطوبت، اکسیژن و حللاهای آلی) دارند.

برای پلیمرها در حالت کلی می‌توان سه نوع منحنی تنش-کرنش متصور بود که در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده‌است. منحنی A مربوط به یک پلیمر ترد است که در منطقه تغییرشکل الاستیک دچار شکست شده‌است. منحنی B رفتار پلاستیک‌ها را در حالت کلی نشان می‌دهد که مشابه رفتار اغلب فلزات می‌باشد. تغییرشکل اولیه بصورت الاستیک است که در ادامه تسلیم و تغییرشکل پلاستیک رخ می‌دهد. منحنی C نیز رفتار الاستیک غیرخطی را نشان می‌دهد که مربوط به الاستومرها می‌باشد. الاستومرها قابلیت تغییرشکل پلاستیک ندارند و تحت تنش‌های کم، تغییرشکل زیادی انجام می‌دهند.



شکل ۲-۱۱- منحنی تنش-کرنش برای پلیمر ترد (منحنی A)، پلاستیکها (منحنی B)، الاستومرها (منحنی C).

مدول الاستیک (که برای پلیمرها مدول کششی و یا مدول نامیده می‌شود) و درصد ازدیاد طول برای پلیمرها به مانند فلزات محاسبه می‌گردد. برای پلاستیکها (منحنی B در شکل ۲-۱۱)، نقطه تسليم در ماکریم منحنی در نظر گرفته می‌شود که انتهای منطقه الاستیک خطی می‌باشد. تنش مربوط به این نقطه، استحکام تسليم (σ_y) خواهد بود. استحکام کششی (TS) نیز در ارتباط با تنشی است که شکست رخ می‌دهد و ممکن است کمتر یا بیشتر از σ_y باشد.

البته در مواردی خواص مکانیکی پلیمرها نسبت به فلزات متفاوت است. به عنوان مثال، مدول پلیمرهای الاستیک ممکن است کمتر از 7 MPa باشد، در حالی که مدول پلاستیکهای با سفتی بالا به مقدار 4 GPa نیز می‌رسد که البته در این حالت هم بسیار کمتر از فلزات است. حداقل مقدار استحکام کششی پلیمرها حدود 100 MPa است، حال آنکه برای فلزات این مقدار حدود 4100 MPa نیز گزارش شده است. علاوه بر این، با وجود اینکه درصد ازدیاد طول فلزات به ندرت بالاتر از 100% است، پلیمرهای الاستیک درصد ازدیاد طول بیشتر از 100% را نیز تجربه می‌کنند.

همانطور که گفته شد، خواص مکانیکی پلیمرها شدیداً وابسته به دما می‌باشد. از طرفی، افزایش دما موجب کاهش مدول، کاهش استحکام کششی و افزایش درصد ازدیاد طول می‌گردد. اثر کاهش نرخ کرنش نیز مانند افزایش دما می‌باشد که موجب افزایش رفتار نرمی پلیمر می‌گردد.

۱-۱-۱-۱- دستور کار آزمایش

- سه نمونه مختلف پلیمری شامل دو پلاستیک با ماده متفاوت و یک الاستومر را پس از اندازه‌گیری ابعاد اولیه (ضخامت و عرض و طول سنجه) با استفاده از دستگاه کشش، تحت آزمون کشش قرار دهید.
- ابعاد نهایی نمونه‌ها را اندازه‌گیری کنید.

۱-۲-۱-۱- خواسته‌های آزمایش

- منحنی تنش-کرنش مهندسی را برای هر سه نمونه رسم کنید.
- مقادیر استحکام تسلیم، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول را برای نمونه‌های مختلف محاسبه کنید.
- منحنی‌های رسم شده و مقادیر محاسبه شده را برای سه نوع پلیمر مختلف مقایسه کرده و علل اختلاف را توضیح دهید.

۱-۲-۱- آزمون فشار

مبانی تئوری آزمون فشار در آزمایش دوم توضیح داده شد که کلیات آن برای پلیمرها نیز صادق است.

۱-۲-۱-۱- دستور کار آزمایش

- سه نمونه فشاری از جنس اپوکسی با ابعاد متفاوت (نسبت طول به ارتفاع مختلف) را پس از اندازه‌گیری ابعاد اولیه (قطر و ارتفاع)، تحت آزمون فشار قرار دهید.
- برای تعیین مدول کشسان، در دو نیرو در منطقه الاستیک، کاهش ارتفاع و قطر لحظه‌ای یکی از نمونه‌ها را حین آزمایش اندازه‌گیری کنید.
- نمونه‌ها را تا حد بشکه‌ای شدن تحت فشار قرار دهید.
- ارتفاع نهایی و قطر نهایی در منطقه بشکه‌ای شدن را اندازه‌گیری کنید.

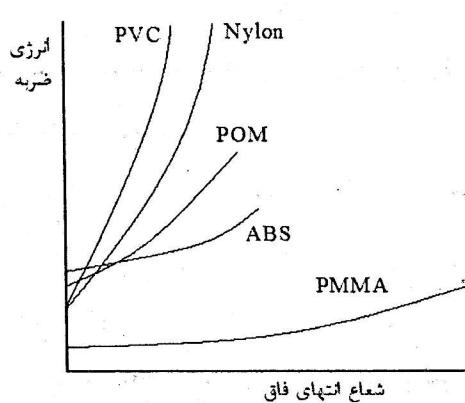
۱-۲-۲- خواسته‌های آزمایش

- منحنی تنش-کرنش مهندسی را با استفاده از منحنی نیرو-تغییر طول برای نمونه‌های مختلف در یک دستگاه مختصات رسم کرده و تنش لازم (بدون اصطکاک) را برای 2% تغییر شکل محاسبه نمایید.

۲- مقادیر مدول الاستیک، تنش تسلیم (٪/٪)، کاهش طول نسبی، درصد تورم و استحکام فشاری نمونه‌ها را محاسبه کنید.

۳-۱۱ آزمون ضربه

آزمون ضربه تنها برای پلاستیک‌ها کاربرد دارد. روش معمول این آزمون برای پلاستیک‌ها، به مانند فلزات، بر اساس روش‌های شارپی و ایزوود می‌باشد که در آزمایش هفتم توضیح داده شده‌است، ولی وزنه مورد استفاده در این حالت دارای وزن به مراتب کمتر است. استاندارد مورد استفاده در روش شارپی برای پلاستیک‌ها، ارزشی ASTM-D256 است و ارزشی ضربه بصورت ارزشی بر واحد ضخامت یا واحد سطح گزارش داده می‌شود. ارزشی ضربه پلاستیک‌ها تابع رزین پایه و عوامل افزودنی که چقرمه‌کننده و استحکام‌دهنده هستند، می‌باشد. مطالعات متعددی نشان داده است که ارزشی ضربه ایزوود برای بیشتر پلاستیک‌ها دارای یک تبدیل تردی-نرمی است که نشان‌دهنده وابستگی ارزشی ضربه به دما می‌باشد. علاوه بر دما، محیط و رطوبت نیز در اینجا موثرند. کاهش زیاد ارزشی ضربه در یک دمای معین و در حضور فاق، به آهنگ کرنش بالا در انتهای فاق و میزان ارزشی لازم برای جوانهزنی ترک مربوط شده‌است. مقاومت به ضربه چند پلیمر در دمای اتاق در شکل ۳-۱۱ آمده است و نشان می‌دهد که این مواد به فاق خیلی حساس‌اند.



شکل ۳-۱۱- منحنی تنش-کرنش برای پلیمر ترد (منحنی A)، پلاستیک‌ها (منحنی B)، الاستومرها (منحنی C).

دو روش دیگر آزمون ضربه برای پلاستیک‌های مهندسی روش وزنه سقوطی و روش ضربه-کشش می‌باشد. روش وزنه سقوطی (ASTM-D3029) ارزشی شروع شکست در یک ورق بدون فاق را اندازه می‌گیرد، نمونه دیسک شکل بصورت افقی روی یک حلقه فولادی قرار می‌گیرد و از ارتفاع معینی وزنهایی با وزن‌های متفاوت روی آن

سقوط می‌کنند. سپس انرژی متوسط شکست بر مبنای استاتیکی تعریف می‌شود که متناظر با ۵۰٪ شکست دیسک‌هاست. روش ضربه-کشش با سرعت زیاد (ASTM-D1822)، نمونه کوچک کششی را بکار می‌برد که از یک انتهای چکش آونگ متصل می‌شود و از انتهای دیگر به صفحه‌ای وصل است که به سندان اصابت می‌کند. آونگ آزاد می‌شود و با نمونه سقوط می‌کند. وقتی که صفحه مذکور به سندانی ثابت برخورد می‌کند، نمونه به سرعت تا لحظه شکست بصورت کششی تغییرشکل می‌دهد. انرژی شکست از اختلاف ارتفاع آونگ قبل و بعد از آزادشدن تعیین می‌شود.

۱-۳-۱۱- دستور کار آزمایش

- ۱- سه نمونه ضربه شارپی از پلاستیک‌های مختلف مهندسی را پس از اندازه‌گیری ابعاد اولیه تحت آزمون ضربه شارپی قرار دهید. اندازه‌گیری‌ها شامل ابعاد سطح مقطع نمونه‌ها به همراه عرض نمونه در محل ناج و در مقابل ناج می‌باشد.
- ۲- پس از ثبت مقادیر انرژی ضربه، ابعاد نهایی نمونه‌ها را اندازه‌گیری کنید.

۲-۳-۱۱- خواسته‌های آزمایش

- ۱- انرژی ضربه نمونه‌ها را مقایسه کرده و علل اختلاف را توضیح دهید.
- ۲- تغییرات عرض نمونه‌ها (عرض نهایی نسبت به عرض اولیه در محل ناج و در مقابل ناج) را محاسبه کرده و با مقایسه برای سه نمونه، در مورد اختلاف موجود بحث نمایید.

۴-۱۱- آزمون خمس

آزمون خمس سه نقطه‌ای برای پلاستیک‌ها بکار می‌رود و مطابق با استاندارد ASTM-D790 انجام می‌شود. برای اطمینان از شکست پلاستیک موردنظر تحت بارگذاری خمی، در نمونه‌ها ناج تعییه می‌گردد (شکل ۴-۱۱). بر طبق این استاندارد موارد زیر می‌بایست در طراحی آزمون موردنظر قرار گیرند:

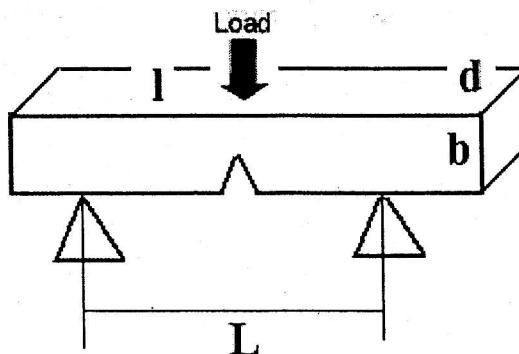
$$L \geq 16d \quad (1-11)$$

$$l \geq 1.1L \quad (2-11)$$

که L فاصله بین دو تکیه‌گاه، l طول نمونه و d ضخامت نمونه می‌باشند.
با انجام آزمون خمس، منحنی نیرو-تغییرمکان خمی و نیز استحکام خمی قابل دستیابی می‌باشند. اگر نمونه تا شکست پیش رود، استحکام خمی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (۳-۱۱)$$

که P نیروی اعمالی در لحظه شکست و b عرض نمونه می‌باشد.



شکل ۴-۱۱- طرح شماتیک نمونه خمین سه نقطه‌ای پلیمری.

اگر نمونه تا شکست نزود، با توجه به مراکزیم تغییر مکان خمی در وسط بین دو تکیه‌گاه (D) و نیروی مربوط به آن (P)، استحکام خمی و کرنش خمی مراکزیم طبق روابط زیر محاسبه می‌گردند:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \left(1 + 6 \left(\frac{D}{L} \right)^2 - 4 \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{d}{L} \right) \right) \quad (۴-۱۱)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (۵-۱۱)$$

۴-۱- دستور کار آزمایش

- ۱- سه نمونه پلاستیک با جنس متفاوت را پس از اندازه‌گیری ابعاد اولیه و تعیین فاصله مناسب بین دو فک تارسیدن به شکست یا مراکزیم تغییر مکان خمی تحت آزمون خمین قرار دهید.
- ۲- ابعاد نهایی نمونه‌ها را اندازه‌گیری کنید.

۴-۲- خواسته‌های آزمایش

- ۱- منحنی نیرو- تغییر مکان خمی و تنش- کرنش خمی را برای هر سه نمونه رسم نمایید.
- ۲- استحکام خمی را در هر حالت محاسبه نمایید.
- ۳- تغییرات ابعاد سطح مقطع نمونه‌ها را پس از آزمون محاسبه کرده و در مورد امکان تغییر شکل پلاستیک بحث کنید.