

بسمه تعالی



دانشگاه سمنان

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

دستور کار آزمایش

آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد

رشته و گرایش

کارشناسی مهندسی مواد و متالورژی

تهیه و تنظیم

دکتر اسماعیل عمادالدین

مهندس نجمه ذاکری

تابستان ۱۳۹۶

معرفی آزمایشگاه، نکات ایمنی، انضباطی و روش تهیه گزارش

دانشجویان محترم،

ضمن سلام و خوش آمدگویی به شما عزیزان، لازم می‌دانیم تا مواردی را در خصوص مقررات موجود در آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد و شکل‌دهی به اطلاع شما برسانیم، که رعایت این نکات از سوی شما، ما را در پیشبرد اهداف آموزشی و هر چه مطلوب‌تر برگزار کردن جلسات آزمایشگاهی یاری خواهد کرد. امید است تا با یاری ایزد منان و همکاری شما عزیزان بتوانیم در محیطی علمی و دوستانه، جلسات آزمایشگاهی را به بهترین و پر بارترین نحو برگزار نماییم. همواره پذیرای پیشنهادات سازنده شما در جهت ارتقا سطح آزمایشگاه می‌باشیم. در زیر جهت اطلاع شما عزیزان نکاتی در خصوص مقررات، ایمنی استفاده از تجهیزات، انضباط و نحوه کار در آزمایشگاه و روش تهیه گزارش کار، آورده شده است.

۱- معرفی و شناخت آزمایشگاه

آزمایش‌های مکانیکی مواد آزمایش‌هایی هستند که رفتار الاستیک و غیر الاستیک موادی که تحت اعمال بار در شرایط مختلف هستند را مورد توجه قرار می‌دهند. به عبارتی پارامترهای اساسی مورد توجه در آزمایش‌های مکانیکی اول بار اعمال شده و دوم اثرات اعمال بار بر ماده است. در آزمایش‌های مکانیکی، شرایط مختلف اعمال بار عبارتند از: اعمال بارهای کششی، فشاری، برشی و پیچشی و در نهایت بارهای متناوب. همچنین بر اساس اینکه زمان و سرعت اعمال بار به چه نحوی باشد می‌توان آزمون‌های مکانیکی را در سه دسته آزمون‌های استاتیکی (مانند آزمون‌های کشش و فشار)، دینامیک (مانند آزمون ضربه) و آزمون‌های طولانی مدت (مانند آزمون خزش) تقسیم بندی نمود.

در حالت ایده ال یک آزمایش باید هدفمند، قابل اعتماد و تکرارپذیر، دارای دقت کافی و توجیه اقتصادی چه از نظر مالی و چه زمانی باشد. آزمایش باید در هر بار تکرار نتایج مشابهی را به دست بدهد. دقت آزمایش و ماشین‌ها و تجهیزات آزمایش شناخته شوند و قابل اندازه‌گیری باشند. لذا هر آزمایش باید مطابق استانداردهای از پیش تعیین شده‌ای صورت پذیرد.

روش استاندارد انجام یک تست، هماهنگی منظم و پیوسته‌ی مجموعه‌ای از اصول است که در کتابچه‌هایی نوشته شده است و یا به نحو اختیاری مورد پذیرش یک انجمن یا سازمان معین واقع شده است. استانداردهای ASTM (استانداردهای انجمن آزمون مواد آمریکا) و DIN (استاندارد ملی کشور آلمان) از استانداردهای مورد استفاده در آزمایشگاه خواص مکانیکی است. تفاوت در خواندن اطلاعات نوشته شده بر روی وسیله با آنچه واقعا برای یک ماده اندازه گرفته است، موجب پیدایش خطا می‌شود. دو تقسیم بندی کلی برای خطاها وجود دارد. خطاهای برنامه‌ریزی شده و خطاهای هم زمان. خطاهای برنامه‌ریزی شده آنهایی هستند که به تدریج با افزایش داده‌ها و یافته‌ها کاهش و یا افزایش می‌یابند. خطاهای همزمان بر حسب اتفاق نتیجه آزمایش را تحت تاثیر خود قرار می‌دهند. این اشتباهات را نمی‌توان تصحیح کرد اما می‌توان تا حدودی آنها را حل نمود.

۲- نکات ایمنی

رعایت نکات ایمنی زیر بسیار حائز اهمیت است. لازم است دانشجویان عزیز با رعایت دقیق اصول ایمنی جهت ایجاد محیطی امن و بدون خطر برای خود و سایر دانشجویان نسبت به فعالیت و انجام آزمایش در آزمایشگاه اقدام نمایند.

حفاظت از چشم‌ها

- در صورت استفاده از مواد محرک شیمیایی، پودرها و اسیدها استفاده از عینک و ماسک مناسب آزمایشگاهی ضروری است.
- در صورت استفاده از لنزهای تماسی چشمی نیز استفاده از عینک آزمایشگاهی ضروری است.
- عینک آزمایشگاهی باید راحت بوده و تمام چشم و اطراف آن را فرا گرفته باشد.
- عینک در عین حال مانع از فعالیت و جابجایی پژوهشگر نباشد.

حفاظت از دست‌ها

- کاربر آزمایشگاه همواره باید از دستکش‌های محافظ استفاده نماید.
- قبل از استفاده از دستکش‌ها از وضعیت و سالم بودن آنها اطمینان حاصل نمایید.
- برای در آوردن دستکش‌ها ابتدا از مچ دست شروع کرده و دستکش را به طرف انگشتان بیرون بکشید
- بلافاصله پس از بیرون آوردن دستکش‌ها دستهای خود را بشویید.

حفاظت از پاها

- به خاطر داشته باشید آسیب پذیرترین قسمت بدن هنگام ریزش مواد شیمیایی و یا سقوط اشیاء، پاها هستند.
- در آزمایشگاه از کفش‌هایی که به طور کامل پاها را بپوشانند و آن‌ها را حفاظت نمایند استفاده نمایید.
- پوشیدن انواع صندل‌ها، دمپایی، کفش‌های پارچه‌ای و کفش‌های پاشنه بلند در آزمایشگاه ممنوع است.

حفاظت از گوش ها

- در مکان‌هایی که صدا بیش از حد مجاز (۸۵ دسی بل) وجود دارد و یا علامت هشدار دهنده حفاظت از گوش نصب شده است، استفاده از محافظ گوش الزامی است.

ایمنی حریق و برق گرفتگی

- عوامل آتش‌گیر را در کمترین مقدار ممکن خریداری و در محل‌ها و ظرف‌های ایمن نگهداری کنید.
- ابزار برقی باید مطابق با طراحی و هدف ساخت آنها مورد استفاده قرار گیرند.
- استفاده از پوشش دستکش و کفش‌های ایمنی در طول کار با ابزارهای برقی توصیه می‌گردد.
- ابزارهای برقی در مکان‌های خیس و مرطوب نباید مورد استفاده قرار گیرند.
- کلیه ادوات و ابزار انتقال برق نظیر کابل‌ها و اتصالات مربوط باید سالم و دارای پوشش عایق و درون کار باشند.
- از سالم بودن کابل‌های برق اطمینان حاصل کنید و هرگز یک سیم برق لخت را لمس نکنید.
- اگر بدنه ابزار برقی در هنگام کار داغ شد و یا دود مشاهده کردید، فوراً سوئیچ آن را خاموش کنید.
- تا حد امکان سعی شود از سیم‌های رابط برای انتقال برق استفاده نگردد.
- لازم است از تاب خوردگی بیش از حد کابل‌ها و سیم‌ها ممانعت به عمل آید.

اقداماتی که برای نجات شخص برق گرفته می‌توان انجام داد:

- قطع مدار اصلی برق
- رها کردن شخص برق گرفته از مدار برق (فردی که این کار انجام می‌دهد باید خود کفش عایق به پا داشته باشد و با وسیله ای عایق اتصال را قطع نماید)
- تنفس مصنوعی
- رساندن به پزشک (توسط اورژانس و امداد)

در صورت بروز آتش سوزی یا انفجار:

- کنترل خود را از دست ندهید و خونسردی خود را حفظ کنید.
- مسئولین آزمایشگاه را مطلع کنید.
- بلافاصله از محل حادثه خارج شوید و در محل ایمن قرار بگیرید.

در صورت سوختگی با اسید

- بلافاصله محل را با آب فراوان شستشو دهید.
- از دیگران بخواهید سریعاً مسئولین آزمایشگاه را مطلع کنند.

- رساندن به پزشک (توسط اورژانس و امداد)

۳- نکات مهم در خصوص نحوه کار در آزمایشگاه

- سکوت را در آزمایشگاه رعایت نموده و از تحرکات و رفت و آمدهای غیر ضروری پرهیز نمائید.
- پیش از ورود به آزمایشگاه مطالعه دقیق در مورد آزمایش و یادآوری مفاهیم مورد نیاز آزمایش ضرورت دارد.
- قبل از شروع آزمایش توجه داشته باشید که با روش کار و تجهیزات مورد نیاز و نکات ایمنی مرتبط با آن

آشنا شوید.

- اگر مساله ای را نمی دانید حتما قبل آن سوال بفرمایید.
- هرگز از وسایل معیوب و شکسته استفاده نکنید.
- کلیه تجهیزات قبل از استفاده مورد بررسی قرار بگیرند.
- هرگونه شکستگی، آسیب و یا نصب نامناسب تجهیزات و لوازم آزمایشگاهی را بلافاصله گزارش دهید و انجام آزمون را تا رفع نقص متوقف نمایید.
- شیلنگ های آب و گاز را هرگز بدون بسط استفاده نکنید.
- وسایل روی میز کارتان را به طور مناسب و ایمن قرار دهید و مواد و وسایل غیر ضروری را از روی میز کار و یا کف آزمایشگاه برداشته و در محل مناسب قرار دهید.
- آزمایشگاه و محل کار خود را تمیز نگهدارید. مواد شیمیایی و تجهیزات بلا استفاده را در محل مخصوص خود قرار دهید.
- هرگز آزمایش در حال اجرا را بدون مراقبت رها نکنید، در صورت نیاز اجباری به ترک محل یا در مورد آزمایش های طولانی، حتما توضیحاتی شامل نام آزمایش، نام آزمایش کننده، تلفن تماس و احتیاط های لازم را در محل آزمایش در دسترس قرار دهید.
- در صورت نیاز به زمان طولانی برای انجام آزمایش، به جای انجام آن در ساعت های انتهایی روز بهتر است آزمایش را زودتر شروع نمایید.
- در هنگام کار با مواد شیمیایی و مواد خطرناک و یا جابجایی ماشین آلات جانب احتیاط و موارد ایمنی را به طور کامل رعایت کنید.
- هرگز هر مایع بی رنگ و بو را آب تلقی ننموده و آن را استنشام نکنید.
- استعمال دخانیات، خوردن، آشامیدن، نگهداشتن مواد غذایی و نوشیدنی ها در آزمایشگاه مطلقاً ممنوع است.

- سطح و کف آزمایشگاه در تمام مدت باید خشک نگه داشته شود.
- محل جعبه کمک‌های اولیه و کپسول آتش‌نشانی را در آزمایشگاه بشناسید و همچنین توصیه می‌شود تلفن‌های ضروری را که در تابلو اعلانات آزمایشگاه نیز نصب شده‌اند- به خاطر بسپارید. شماره تماس اورژانس دانشگاه:

3660

- در حفظ و نگهداری صحیح وسایل آزمایشگاه کوشا بوده و آن دسته از وسایل کار را که به شما تحویل داده می‌شود در پایان کار صحیح و سالم به مسئول آزمایشگاه عودت دهید.
- اگر در جریان آزمایش عمداً یا سهواً به وسایل و قطعات آزمایشگاه آسیبی وارد گردد، مسئولیت بر عهده شخص یا گروه آزمایش‌کننده است. در مواردی که به تشخیص مسئولان به دلیل بی‌مبالاتی فرد باشد، علاوه بر جبران خسارت وارده، ممکن است از نمره آزمایشگاه فرد یا گروه کسر شود.
- پس از انجام آزمایشها در پایان هر جلسه وسایل و میز کار را مرتب نموده و صندلی‌ها را در جای خود قرار دهید، در صورت ترک آزمایشگاه بدون مرتب نمودن، از نمره کلاسی کلیه دانشجویان، یک نمره کسر می‌گردد.
- یک دفتر یادداشت مخصوص آزمایشگاه خواص مکانیکی مواد تهیه کنید و توضیحات و شرح آزمایش‌ها، نتایج عملیات، اندازه‌گیری‌ها و محاسبات مربوط به آزمایش‌ها و سایر مورد را در هر جلسه یادداشت کنید و در هر جلسه تحویل مسئول آزمایشگاه دهید.

۴- نکات انضباطی

- حضور به موقع در رأس ساعت مقرر در آزمایشگاه الزامی است و ۲ نمره از کل نمره به حضور و غیاب اختصاص دارد. در صورت وجود تأخیر به ازاء هر ۱۵ دقیقه تأخیر ۰/۳ نمره از کل نمره حضور و غیاب کسر خواهد شد.
- غیبت در هر جلسه آزمایشگاه سبب کسر ۱ نمره از کل نمره حضور و غیاب می‌گردد و فقط در صورت جبران، غیبت موجه تلقی می‌شود، که در این صورت نیز ۰/۳ از نمره کل کسر خواهد شد. در صورت غیبت بیش از دو جلسه (موجه یا غیر موجه) فرد مذکور از ادامه شرکت در جلسات آزمایشگاه محروم گردیده و مطابق مقررات آموزشی دانشگاه در این خصوص تصمیم‌گیری می‌شود.

نمره گزارش آزمایش‌ها به صورت گروهی می‌باشد و تحویل گزارش‌ها باید در تاریخ مقرر (دو هفته بعد از انجام آزمایش) به مربی آزمایشگاه مربوطه صورت گیرد و در صورت تأخیر در تحویل گزارش به ازاء هر یک روز تأخیر ۱۰ درصد از کل نمره گزارش کار کسر خواهد شد.

در صورتیکه در تهیه گزارش‌ها مواردی چون کپی و یا همانند نویسی از گزارش کار سایر گروه‌ها یا ترم‌ها مشاهده شود (اعم از کل گزارش یا بخشی از آن حتی در مورد شکل‌ها و نمودارها) تخلف محسوب شده و نمره گزارش کار تمام اعضای آن گروه صفر منظور خواهد شد.

۵- نحوه تهیه و تنظیم گزارش کار

ثبت و بیان نتایج آزمایش بسیار اهمیت دارد و باید دقیق و روشن و واضح صورت پذیرد تا سایرین نیز بتوانند از نتایج و یافته های ما استفاده کنند. لذا یک گزارش کار خوب باید از روند مشخصی پیروی کند که رعایت موارد زیر می‌تواند مفید باشد.

۵-۱- موارد کلی

- یک گزارش کار خوب علاوه بر پر محتوا بودن، باید تمیز و مرتب باشد. گزارش کارها را در ورق A4 بی خط تهیه شوند و برای آن جلد مناسب در نظر بگیرید.
- متن گزارش کار حداکثر بصورت تایپ شده باشد.
- در صورت نبودن امکان تایپ متن گزارش را خوش خط و خوانا نوشته و در حین نگارش گزارش کار از خط خوردگی پرهیز نمایید.

۵-۲- متن گزارش کار

در نگارش متن گزارش کار موارد زیر را رعایت نمایید:

۵-۲-۱- صفحه عنوان

۱. قید نام درس آزمایشگاهی و عنوان آزمایش
۲. نام استاد ارائه دهنده
۳. نام و نام خانوادگی نویسنده گزارش کار و سپس نام سایر اعضای گروه
۴. تاریخ انجام آزمایش و تاریخ تحویل گزارش کار.

۵-۲-۲- متن گزارش کار

۱. بیان هدف از انجام آزمایش
۲. توضیحی مختصر پیرامون آزمایش (کمتر از دو صفحه)

۳. شرح وسایل و تجهیزات، استاندارد آزمون و همچنین نمونه استاندارد به کار رفته در آزمایش
۴. شرح آزمایش
۵. گزارش نتایج آزمایش و رسم شکل‌ها و نمودارهای مربوط به هر بخش بطور جداگانه، همراه با توضیح و زیرنویس برای هر شکل یا نمودار
۶. نتیجه گیری از آزمایش و مقایسه نتایج آزمایش و پاسخ به سوالات و خواسته‌های آزمایش
۷. بیان خطاهای آزمایش
۸. ذکر منابع و مآخذ

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	معرفی آزمایشگاه، نکات ایمنی، انضباطی و روش تهیه گزارش
الف	۱- معرفی و شناخت آزمایشگاه
ب	۲- نکات ایمنی
ث	۳- نکات مهم در خصوص نحوه کار در آزمایشگاه
ج	۴- نکات انضباطی
ح	۵- نحوه تهیه و تنظیم گزارش کار
ح	۵-۱- موارد کلی
ح	۵-۲- متن گزارش کار
ح	۵-۲-۱- صفحه عنوان
ح	۵-۲-۲- متن گزارش کار
	آزمایش اول: سختی سنجی (تست ماکروسختی)
۱	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- انواع آزمون سختی سنجی
۲	۱-۲-۱- روش برینل
۳	۲-۲-۱- سختی مایر
۴	۳-۲-۱- سختی ویکرز
۵	۴-۲-۱- سختی راکول
۶	۳-۱- شرایط انجام تست و آماده سازی نمونه
۶	۴-۱- هدف آزمایش
۶	۵-۱- دستور کار آزمایش
۷	۶-۱- خواسته های آزمایش

۸

آزمایش دوم: سختی سنجی میکروسکوپی (تست میکروسختی)

- ۸-۲-۱- مقدمه
- ۹-۲-۲- هدف آزمایش
- ۹-۳-۲- دستور کار آزمایش
- ۹-۴-۲- خواسته های آزمایش

۱۰

آزمایش سوم: خواص کششی ماده (تست کشش)

- ۱۰-۳-۱- خواص کششی ماده
- ۱۴-۳-۲- تأثیر عوامل مختلف بر منحنی تنش-کرنش مواد
- ۱۴-۳-۲-۱- اثر درجه حرارت
- ۱۵-۳-۲-۲- اثر سرعت تغییر شکل
- ۱۶-۳-۲-۳- اثر اندازه دانه
- ۱۷-۳-۴- هدف آزمایش
- ۱۷-۳-۵- دستور کار آزمایش
- ۱۸-۳-۶- خواسته های آزمایش

۱۹

آزمایش چهارم: اثر سرعت کشش بر خواص کششی

- ۱۹-۴-۱- مقدمه
- ۲۱-۴-۲- محاسبه نرخ کرنش بر حسب سرعت کشش
- ۲۱-۴-۳- هدف آزمایش
- ۲۲-۴-۴- دستور کار آزمایش
- ۲۲-۴-۵- خواسته های آزمایش

۲۳

آزمایش پنجم: اثر پیر کرنشی بر خواص کششی

۲۳

۱-۵- معرفی پدیده پیرکرنشی

۲۴

۲-۵- هدف آزمایش

۲۴

۳-۵- دستور کار آزمایش

۲۵

۴-۵- خواسته‌های آزمایش

۲۶

آزمایش ششم: خواص فشاری ماده (تست فشار)

۲۶

۱-۶- مقدمه

۲۶

۲-۶- روش آزمایش فشار ساده

۲۹

۳-۶- شرایط نمونه های فشاری

۳۰

۴-۶- هدف آزمایش

۳۰

۵-۶- مراحل انجام آزمایش

۳۱

۶-۶- خواسته‌های آزمایش

۳۲

آزمایش هفتم: بررسی انرژی شکست (تست ضربه)

۳۲

۱-۷- مقدمه

۳۴

۲-۷- انواع آزمون ضربه

۳۴

۱-۲-۷- روش تست شاریبی

۳۵

۲-۲-۷- روش تست ایزود

۳۶

۳-۷- محاسبه انرژی لازم جهت شکست نمونه

۳۷

۴-۷- عواملی موثر بر استحکام ضربه

۳۷

۱-۴-۷- سرعت اعمال نیرو

۳۸

۲-۴-۷- اثر شیار

۳۸

۳-۴-۷- اثر درجه حرارت روی استحکام ضربه ای

۴۲

۴-۴-۷- عوامل متالورژیکی موثر در درجه حرارت تبدیل

۴۲	۷-۴-۴-۱- ترکیب شیمیایی
۴۳	۷-۴-۴-۲- اندازه دانه
۴۳	۷-۴-۴-۳- اثر جهت نمونه
۴۴	۷-۵- هدف آزمایش
۴۴	۷-۶- روش انجام آزمایش
۴۶	۷-۷- خواسته‌های آزمایش

۴۷ آزمایش هشتم: مطالعه رفتار خستگی مواد (تست خستگی)

۴۷	۸-۱- مقدمه
۴۸	۸-۲- تنش‌های تناوبی
۵۰	۸-۳- هدف آزمایش
۵۱	۸-۴- دستور کار آزمایش
۵۱	۸-۵- خواسته‌های آزمایش

۵۲ آزمایش نهم: مطالعه رفتار خزشی مواد (تست خزش)

۵۲	۹-۱- مقدمه
۵۳	۹-۲- مراحل خزش
۵۵	۹-۳- عوامل موثر بر رفتار خزشی
۵۵	۹-۳-۱- اثر درجه حرارت
۵۶	۹-۳-۲- اثر تنش
۵۸	۹-۳-۳- نقش مرزدانه‌ها
۵۸	۹-۴- هدف آزمایش
۵۹	۹-۵- دستور کار آزمایش
۶۰	۹-۶- خواسته‌های آزمایش

آزمایش اول: سختی سنجی (تست ماکروسختی)

۱-۱- مقدمه

سختی را به عنوان مقاومت در مقابل تغییر شکل و در مورد فلزات به عنوان 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 و دینامیکی

ب) جذب انرژی تحت نیروهای ضربه‌ای

ج) مقاومت در مقابل خزش

د) مقاوم در مقابل سایش

ه) مقاومت در مقابل برش، ماشین کاری و سوراخ کاری

بیشتر سه روش زیر در تعیین سختی یک ماده به کار می‌رود:

روش خراش دادن: این روش بیشتر در مینرالوژی بکار می‌رود و سختی با استفاده از اینکه یک فلز، فلز بعدی را خط می‌اندازد به دست می‌آید که مهمترین طبقه‌بندی در این روش جدول مو^۱ 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 مارتنزیت ۷ می‌باشد. بیشتر فلزات سخت مطابق با این جدول سختی بین ۴ تا ۸ را دارا می‌باشند. واضح است که به علت کم بودن دامنه تغییرات سختی این روش در مورد فلزات بکار نمی‌رود.

سختی دینامیکی: در این روش فرورونده (ساچمه) از ارتفاع معینی به سطح فلز افتاده و با استفاده از میزان انرژی جذب شده و ارتفاع برگشت ساچمه (فرورونده) سختی اندازه‌گیری می‌شود. مبنای این روش در دستگاه‌های سختی سنج پرتابل به کار برده می‌شود. در این مدل دستگاه‌ها یک پروب به دستگاه متصل می‌شود که در آن پرتابگر قرار دارد. نیاز چندانی به آماده سازی نمونه نیست و می‌توان دستگاه را به محل نمونه برده و در همان محل نمونه سختی جسم را اندازه‌گیری نمود. معمولاً اندازه‌گیری با توجه به شرایط نمونه و روش انجام تست دقت کمتری دارد ولی با تکرار اندازه‌گیری می‌توان از خطای آن

¹ Moh

کاست. این روش نیز در مورد فلزات به کار نمی‌رود. در مورد فلزات از روش سوم یعنی مقاومت در مقابل فرورفتگی جهت تعیین سختی استفاده می‌شود.

مقاومت در مقابل فرورفتگی: این روش دارای انواع مختلفی می‌باشد که عبارتند از روش سختی سنجی برینل^۱، راکول^۲ و ویکرز^۳ و ... که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

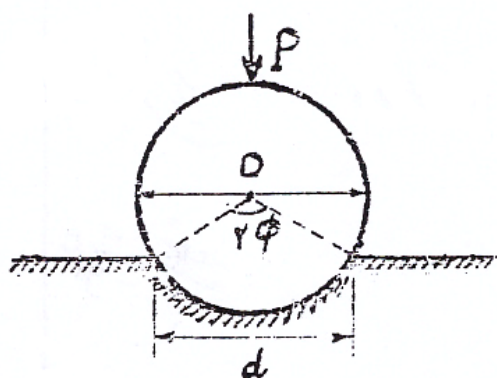
۱-۲- انواع آزمون سختی سنجی

۱-۲-۱- روش برینل

در این روش معمولاً از ساچمه فولادی به قطر ۱۰ میلی‌متر به عنوان فرورونده استفاده می‌شود میزان نیروی اعمال شده برای فلزات سخت 3000 kg و برای فلزات نرم 500 kg و برای فلزاتی با سختی متوسط 500 kg می‌باشد. مدت زمان اعمال نیرو برای فلزات آهنی حدود ۳۰ ثانیه و برای فلزات غیرآهنی ۶۵ ثانیه می‌باشد. برای فلزات سخت از ساچمه های کاربید تنگستن استفاده می‌شود. بعد از حذف نیرو قطر فرورفتگی بوسیله میکروسکوپ اندازه‌گیری می‌شود. در این روش سختی به عنوان نیرو تقسیم بر سطح اثر ایجاد شده تعریف شده و بوسیله فرمول زیر بیان می‌گردد.

$$BHN = \frac{P}{\pi Dt} = \frac{P}{\left(\pi \frac{D}{2}\right)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-1)$$

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، شکل ۱-۱. همانطور که مشاهده می‌شود واحد سختی برینل کیلوگرم بر میلی‌متر مربع می‌باشد.



شکل ۱-۱- هندسه و پارامترهای اثر فرورونده در روش برینل

¹ Brinell
² Rockwell
³ Vickers

با توجه به شکل ۱-۱ داریم:

$$d = D \sin \phi \quad (۲-۱)$$

با جایگزین کردن رابطه (۲-۱) در (۱-۱) داریم:

$$BHN = \frac{P}{\frac{\pi}{2} D^2 (1 - \cos \phi)} \quad (۳-۱)$$

برای اینکه بتوانیم با نیرو و یا ساچمه های غیر استاندارد سختی یکسانی بدست آوریم باید شکل هندسی اثرهای ایجاد شده مشابه باشند و برای اینکار باید زاویه 2ϕ ثابت بماند. معادله بالا نشان می‌دهد برای اینکه ϕ و عدد سختی برینل ثابت بماند باید رابطه زیر بین نیرو و قطر ساچمه برقرار باشد.

$$\frac{P_1}{D_1^2} = \frac{P_2}{D_2^2} = \frac{P_3}{D_3^2} = K \quad (۴-۱)$$

نسبت ثابت K برای فلزات مختلف فرق می‌کند که در مورد چدن و فولاد $K=۳۰$ ، مس و آلومینیم $K=۵$ ، آلیاژهای مس و آلایژهای آلومینیم $K=۱۰$ و در مورد سرب $K=۱$ می‌باشد. این روش دارای مزایا و محدودیتهایی است که مهمترین محدودیت های آن عبارتند از:

(الف) با افزایش نیرو سختی افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

(ب) اثر بزرگ ایجاد شده کاربرد آنرا محدود می‌کند.

و اهم مزایای آن عبارتند از:

(الف) به علت بزرگ بودن اثر ایجاد شده مسئله ناهماهنگی ساختار از بین می‌رود.

(ب) کمتر به خراش ها و ناصافی های سطح حساس است.

۱-۲-۲- سختی مایر

در این روش سختی به عنوان نیرو تقسیم بر تصویر سطح ایجاد شده تعریف می‌شود.

$$\text{سختی مایر} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (۵-۱)$$

سختی مایر نیز مانند برینل دارای واحد کیلوگرم بر میلیمتر مربع می‌باشد. نسبت به سختی برینل کمتر به نیروی اعمال شده حساس است. در مورد فلزات کار سرد شده سختی مایر ثابت و مستقل از نیرو است. حال آنکه سختی برینل با افزایش نیرو کاهش می‌یابد. در فلزات آنیل شده با افزایش نیرو، سختی مایر به علت کار سختی ایجاد شده افزایش می‌یابد. ولی سختی

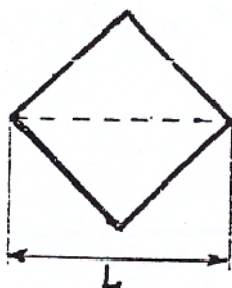
برینل ابتدا با افزایش نیرو افزایش پیدا کرده و سپس در نیروهای بالاتر کاهش می‌یابد. مایر رابطه زیر را بین نیروی اعمال شده و قطر اثر ایجاد شده به دست آورد که به قانون مایر معروف است.

$$P = Kd^n \quad (6-1)$$

در رابطه فوق n ثابتی است که مربوط به کار سختی فلزات می‌باشد و برای فلزات کاملاً آنیل شده حدود ۲.۵ و برای فلزات کار سخت شده حدود ۲ می‌باشد. K ثابتی است مربوط به مقاومت فلز در مقابل فرورفتگی و وقتی که $d=1$ باشد مقدار آن مساوی با نیرو است، d قطر اثر و P نیروی اعمال شده می‌باشد.

۱-۲-۳- سختی ویکرز

در این روش از هرم الماسی با مقطع چهار وجهی بعنوان فرورونده استفاده می‌شود. زاویه‌ی بین صفحات متقابل هرم ۱۳۶ درجه می‌باشد. سختی بعنوان نیرو تقسیم بر سطح اثر ایجاد شده تعریف شده و در عمل این سطح با اندازه‌گیری قطر اثر (شکل ۱-۲) محاسبه و از رابطه ۱-۷ زیر بدست می‌آید.



شکل ۱-۲- هندسه اثر در روش سختی سنجی ویکرز

$$DPH = VHN = \frac{2P \sin(\theta/2)}{L^2} = \frac{1.854}{L^2} \quad (7-1)$$

در رابطه فوق P نیروی اعمال شده به کیلوگرم، L مقدار متوسط قطر اثر به میلی‌متر، $\theta=360^\circ$ و VHN عدد سختی ویکرز می‌باشد. 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 ۱۵۰۰ ویکرز اندازه‌گیری کرد. علی‌رغم مزایای فوق، سختی ویکرز کاربرد ندارد زیرا سرعت عمل کم است و همچنین سطح نمونه باید قبلاً آماده شود و خطای اندازه‌گیری قطر اثر زیاد است.

۱-۲-۴- سختی راکول

در این روش از مخروط الماسی با زاویه‌ی راس ۱۲۰ درجه و یا ساچمه‌های فولادی به قطرهای $\frac{1}{12}$ و $\frac{1}{8}$ اینچ به عنوان فرورونده استفاده می‌شود. این روش به علت 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 آماده سازی کمتری داشته باشد، سپس نیروی اصلی 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 انواع سختی سنجی راکول وجود دارد که در جدول ۱-۱ آمده است.

جدول ۱-۱- انواع روش سختی سنجی راکول

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

بیشتر از روش‌های راکول A^۱، راکول B^۲ و راکول C^۳ استفاده می‌شود و سختی راکول B و راکول C از فرمول‌های زیر بدست می‌آید.

$$HRB = 130 - \frac{d}{0.002} \quad (A-1)$$

¹ Hardness Rockwell A (HRA)

² Hardness Rockwell B (HRB)

³ Hardness Rockwell C (HRC)

$$HRC = 100 - \frac{d}{0.002} \quad (9-1)$$

در روابط بالا، d معرف فرورفتگی به میلیمتر می‌باشد.

۳-۱- شرایط انجام تست و آماده سازی نمونه

مطابق استاندارد ASTM E10 در هنگام اندازه‌گیری سختی با هر کدام از روش‌های مذکور باید به نکات زیر توجه کرد:

- ۱- فرورونده و محل قرار گرفتن نمونه در دستگاه سختی سنج (سندان) تمیز باشند.
- ۲- سطح نمونه مورد آزمایش تمیز، خشک، و عاری از اکسید و چربی باشد.
- ۳- سطح باید مسطح، تخت و عمود بر فرورونده باشد.
- ۴- آزمایش بر روی سطوح استوانه‌ای منجر به کم خواندن عدد سختی می‌شود که میزان خطا بستگی به شعاع انحنا، نیرو، فرورونده و سختی فلز دارد.
- ۵- ضخامت نمونه باید به حدی 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 مانع شده ماکروسختی نباید گرفت زیرا مقداری از نیرو صرف تغییر شکل مانع می‌شود.

۴-۱- هدف آزمایش

در این آزمایش هدف بررسی برخی عوامل متالورژیکی موثر بر عدد سختی مواد می‌باشد. از جمله عواملی که بر مقدار سختی یک آلیاژ فلزی اثرگذار است، ترکیب آلیاژی و ریزساختار ماده است. لذا در این قسمت سه آلیاژ غیر آهنی (آلومینیوم، مس و برنج) که به دو روش ریخته‌گری شده و نورد شده تولید شده‌اند و همچنین فولادهای St 37، Ck 45 و SPK نرمال شده و SPK مارتنزیتی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۵-۱- دستور کار آزمایش

۱- ابتدا روش کار با دستگاه سختی سنجی موجود در آزمایشگاه را به دقت یاد بگیرید. به نکات ایمنی و اصول استفاده از دستگاه که توسط کارشناس محترم توضیح داده می‌شود کاملاً توجه نمایید.

۲- سختی نمونه SPK مارتنزیتی و نرمال شده را به روش راکول C اندازه‌گیری کنید. عمل سختی سنجی را در چند نقطه انجام دهید.

۳- سختی سایر نمونه‌ها را با روش برینل اندازه‌گیری نمایید.

۱-۶- خواسته‌های آزمایش

۱- اعداد بدست آمده از سختی فلزات مختلف را در جدول ۱-۲ قرار دهید و مقدار میانگین را اعلام نمایید.

جدول ۱-۲- جدول گزارش داده‌های سختی نمونه‌های مختلف

نام نمونه	اعداد حاصل از آزمایش سختی برینل (HB/5/125)						سختی میانگین
آلومینیوم نوردی							
آلومینیوم ریختگی							
مس نوردی							
مس ریختگی							
برنج نوردی							
برنج ریختگی							
فولاد St 37							
فولاد CK45							
نرماله SPK							
SPK مارتنزیتی							

۲- نمودار ستونی میانگین سختی نمونه‌ها را رسم کنید.

۳- پیرامون نحوه تاثیر فرایند تولید بر عدد سختی بحث نمایید

۴- پیرامون نحوه تاثیر عنصر آلیاژی بر عدد سختی در نمونه‌های برنج و مس و فولادهای St 37 و CK 45 بحث نمایید.

۵- پیرامون نحوه تاثیر عملیات حرارتی بر عدد سختی فولاد SPK بحث نمایید

۶- کدامیک از روش‌های سختی سنجی را برای اندازه‌گیری سختی فلزات نرم و سخت پیشنهاد می‌کنید؟ چرا؟

آزمایش دوم: سختی سنجی میکروسکوپی (تست میکروسختی)

۲-۱- مقدمه

روش میکروسختی سنجی^۱ در تعیین سختی قطعات بسیار کوچک و ظریف و در مطالعه خواص سختی ماده در بسیاری از تحقیقات و پژوهش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً عمق اثر با توجه به نیرو به گونه‌ای است که سختی میکروسکوپی در حد فاز یا چند دانه مورد سنجش قرار می‌گیرد. در آماده‌سازی نمونه علاوه بر موارد اشاره شده در آزمایش قبل معمولاً نمونه بصورت پولیش و یا حتی اچ شده خواهد بود. اهم کاربرد این روش سختی سنجی به شرح زیر است:

- اندازه‌گیری سختی نمونه و قطعات خیلی نازک مثل فویل، سیم نازک و غیره
- تعیین سختی یک فاز مشخص در ریزساختار یک ماده چندفازی
- تعیین سختی یک تک بلور
- سنجش و رسم پروفیل سختی (توزیع سختی بر حسب فاصله) یک نمونه، به عنوان مثال رسم توزیع سختی یک ورق نورد شده در امتداد ضخامت از مرکز به سطح.

در این روش از هرم الماسی بعنوان فرورونده استفاده می‌شود، بطوریکه نسبت قطر بزرگ اثر ایجاد شده به قطر کوچک آن ۷:۱ می‌باشد و سختی بعنوان نیرو تقسیم بر تصویر سطح اثر ایجاد شده تعریف می‌شود و از فرمول زیر بدست می‌آید.

$$KHN = \frac{P}{A_p} = \frac{P}{L^2 C} \quad (1-2)$$

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 نوپ^۲ 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 به هم انتخاب کرد. از طرفی در یک مقدار معین از قطر اثر، سطح و عمق اثر ایجاد شده حدود ۱۵ درصد از سطح و عمق اثر ایجاد شده توسط روش ویکرز می‌باشد (بعلت شکل خاص فرورونده).

¹ Micro-hardness

² Knoop Hardness Number (KHN)

۲-۲- هدف آزمایش

در این آزمایش میکروسختی یک نمونه فلزی تحت اعمال بارهای مختلف انجام می‌شود و تاثیر بار اعمالی بر مقدار میکروسختی بررسی می‌گردد. از آنجا که در این آزمون سطح اثر ایجاد شده در زیر میکروسکوپ توسط چشم اندازه‌گیری می‌شود لذا شکل و کیفیت اثر بر عدد سختی تاثیرگذار است. از آنجا که در یک ماده ثابت، بارهای مختلف می‌توانند سطح اثرهایی با کیفیت‌های بصری متفاوتی ایجاد نمایند لذا بار می‌تواند بر روی عدد سختی تاثیرگذار باشد.

۲-۳- دستور کار آزمایش

- ۱- نمونه ای ترجیحاً همگن و تک فاز را انتخاب نمایید
- ۲- نمونه را به طور کامل متالوگرافی نمایید تا عاری از هرگونه شیب و خط و خش باشد.
- ۳- روش کار با دستگاه میکروسختی را بدقت یاد بگیرید.
- ۴- مقدار سختی نمونه را در محدوده کلیه بارهای دستگاه میکروسختی سنج (۱۰ تا ۱۰۰۰ گرم) اندازه‌گیری نمایید.
(حداقل سه اندازه گیری در هر بار)

۲-۴- خواسته های آزمایش

- ۱- نمودار عدد سختی ویکرز بر حسب بار را رسم نمایید.
- ۲- در مورد رفتار نمونه و علت این رفتار بحث نمایید.
- ۳- محدوده بار مناسب برای میکروسختی سنجی نمونه مذکور را تعیین نمایید.

آزمایش سوم: خواص کششی ماده (تست کشش)

۳-۱- خواص کششی ماده

مواد جامد در اثر اعمال نیرو به حالت الاستیکی و پلاستیکی تغییر شکل می‌دهند. تغییر شکل الاستیکی در اثر نیروهای کم به وجود می‌آید و با برداشتن نیرو از بین می‌رود و مقدار آن بستگی به میزان نیروی اعمال شده دارد. نیرویی که تحت آن دیگر جسم رفتار الاستیکی ندارد به حد الاستیک معروف است. برای بیشتر موارد مادامی که نیرو از حد الاستیک تجاوز نکرده باشد، میزان تغییر شکل متناسب با نیرو می‌باشد، به عبارتی رابطه بین تنش و کرنش خطی می‌باشد (قانون هوک). البته لازم نیست که تمام موادی که دارای رفتار الاستیکی می‌باشند از قانون هوک پیروی کنند. به عنوان مثال لاستیک^۱ که به عنوان جسم الاستیکی در نظر گرفته می‌شود رابطه بین تنش و کرنش آن غیر خطی است. تغییر شکل الاستیک، در فلزات خیلی کم است و برای اندازه‌گیری آن احتیاج به وسایل دقیق و خیلی حساس می‌باشد. وسایل اندازه‌گیری خیلی حساس و دقیق نشان می‌دهد که حد الاستیک در فلزات خیلی پایین‌تر از حدی است که به وسیله آزمایش‌های معمولی بدست می‌آید.

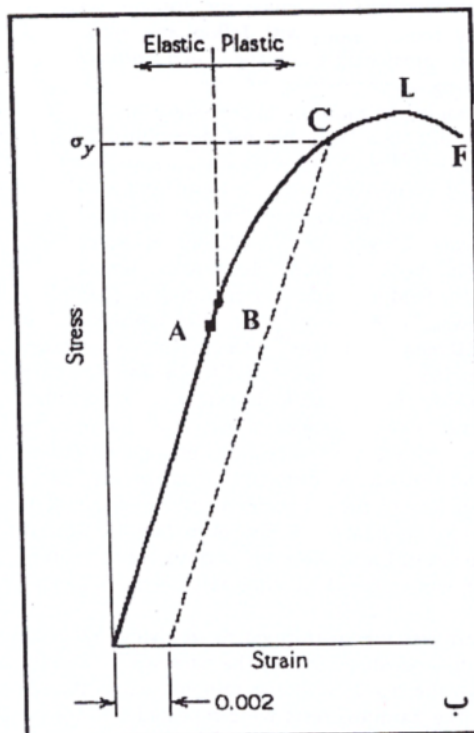
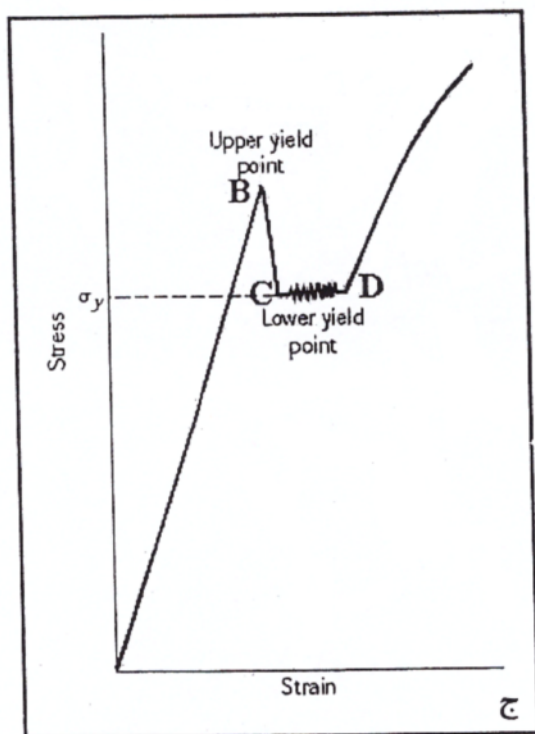
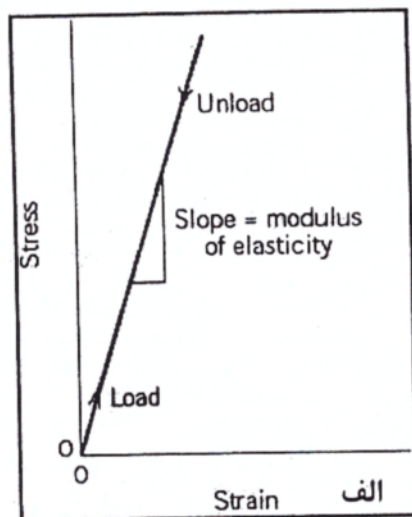
اگر نیروی اعمال شده از حد الاستیک بیشتر باشد، بعد از حذف نیرو مقداری تغییر شکل در جسم باقی می‌ماند و جسم به ابعاد اولیه برنمی‌گردد. در این صورت می‌گوییم که جسم تحت تغییر شکل پلاستیکی قرار گرفته است.

در شکل ۳-۱ منحنی "نیرو-تغییر طول" فلزات نشان داده شده است. شکل (۳-۱-الف) برای فلزات کاملاً ترد می‌باشد که در منطقه الاستیک و بدون تغییر فرم پلاستیکی می‌شکند. شکل (۳-۱-ب) برای فلزات نرم مانند مس و آلومینیوم می‌باشد که قبل از شکست مقدار زیادی تغییر شکل پلاستیکی می‌دهند و شکل (۳-۱-ج) برای فولاد کم کربن می‌باشد. در فاصله OB فلز دارای رفتار الاستیکی و در فاصله BF دارای رفتار پلاستیکی است. اگر بخواهیم این منحنی‌ها را دقیق‌تر بررسی کنیم در فاصله OA رابطه بین تنش و کرنش خطی می‌باشد. نقطه A را حد تناسب^۲ نامند و آن تنشی می‌باشد که پایین‌تر از آن تنش متناسب با کرنش می‌باشد. برای پیدا کردن نقطه A خط کش را روی منحنی گذاشته هر جا از خط راست منحرف شد نقطه A می‌باشد. در فاصله AB اگرچه جسم دارای رفتار الاستیکی است ولی رابطه بین تنش و کرنش خطی نیست.

¹ Rubber

² Proportional Limit

نقطه B را حد الاستیک^۱ می‌نامند و آن تنشی است که پایین تر از آن جسم دارای رفتار الاستیکی می‌باشد. معمولاً در فلزات حد الاستیک و حد تناسب خیلی نزدیک به هم و در بیشتر موارد یکی است.



شکل ۳-۱- منحنی نیرو- تغییر طول برای فلزات مختلف. (الف) فلزات کاملاً ترد، (ب) فلزات نرم و (ج) فولاد کم کربن

¹ Elastic Limit

تغییر شکل پلاستیکی از نقطه B شروع می‌شود. تنش در نقطه B را همان تنش لازم جهت شروع تغییر شکل پلاستیک می‌نامند. در مورد فولاد کم کربن و سایر فلزاتی که رفتار مشابه دارند، نقطه B کاملاً مشخص است و اگر دستگاه‌های اندازه‌گیری دقیق باشند به راحتی قابل تعیین است ولی در مورد فلزات دیگر مانند آلومینیم و مس پیدا کردن نقطه B مشکل می‌باشد. برای این فلزات نقطه‌ی فرضی مانند C را که فلز مقدار اندکی تغییر شکل پلاستیک دارد (معمولاً ۰/۱ یا ۰/۲ درصد) به عنوان نقطه تسلیم انتخاب می‌کنند و آن را تنش تسلیم قراردادی^۱ می‌نامند.

برای پیدا کردن نقطه C، روی محور کرنش مقدار تغییر شکل ۰/۱ یا ۰/۲ درصد را انتخاب کرده و خطی موازی با خط الاستیک رسم می‌کنیم تا منحنی تنش-کرنش را در نقطه C قطع کند. تنش در این نقطه را تنش تسلیم گویند. بعد از نقطه B که تغییر شکل پلاستیکی شروع می‌شود به علت کار سختی^۲ که در حین تغییر شکل بر روی فلز انجام می‌شود، برای ادامه تغییر شکل احتیاج به نیروی بیشتری می‌باشد. افزایش نیرو تا وقتی ادامه می‌یابد که در اثر کاهش سطح مقطع از اثر افزایش نیرو به علت کارسختی ایجاد شده بر روی نمونه بیشتر شود. در این حالت نیرو ماکزیمم است (نقطه E) و تنش مربوط به این نقطه را استحکام کششی^۳ می‌نامند. از این نقطه جسم شروع به گلوئی شدن^۴ می‌کند و سطح مقطع نمونه به شدت کاهش می‌یابد. در نتیجه نیروی لازم برای تغییر شکل نمونه نیز کاهش می‌یابد. گلوئی شدن در منطقه ای از نمونه واقع می‌شود که نسبت به سایر مناطق ضعیف‌تر است و بیشتر تغییر شکل پلاستیکی در این منطقه متمرکز می‌شود. باریک شدن نمونه ادامه پیدا کرده تا بالاخره منجر به شکست نمونه شود (نقطه F).

در مورد فولاد کم کربن همانطور که قبلاً ذکر شد، نقطه تسلیم کاملاً مشخص است و در این نقطه افت ناگهانی در تنش (نیرو) به وجود می‌آید و به نقطه C نزول می‌کند. تنش در نقطه B را تنش تسلیم بالایی^۵ و در نقطه C، تنش تسلیم پایینی^۶ (تنش تسلیم تحتانی) می‌نامند. وجود تنش تسلیم پایینی نشان می‌دهد که تنش لازم برای ادامه تغییر شکل پلاستیکی کمتر از تنش تسلیم بالایی می‌باشد و احتمالاً موانعی در راه شروع تغییر شکل پلاستیک وجود دارد.

گفته می‌شود که اتم‌های بین‌نشین کربن و نیتروژن در ترکیب فولادهای کم کربن موانعی در حرکت نابجایی‌ها ایجاد می‌کند و در نتیجه تنش لازم جهت شروع تغییر شکل پلاستیک را افزایش می‌دهد. با آزاد شدن نابجایی‌ها از این موانع، تنش افت پیدا می‌کند. افت تنش همزمان با تشکیل "نوارهای لودرز"^۷ می‌باشد. این نوارها در امتداد ۴۵ درجه با محور تنش می‌باشد. این نوارها گسترش پیدا کرده و سراسر نمونه را فرا می‌گیرد. بالا و پایین رفتن تنش در این منطقه، مربوط به تشکیل نوارهای

¹ Proof Stress

² Strain Hardening

³ Ultimate Tensile Strength (UTS)

⁴ Necking

⁵ Upper Yield Stress

⁶ Lower Yield Stress

⁷ Luders Bands

جدید است. بعد از اینکه نوارها سرتاسر نمونه را گرفت، به علت کارسختی ایجاد شده بر روی نمونه، دوباره نیروی لازم جهت ادامه تغییرشکل افزایش پیدا می‌کند و مطابق با آنچه که قبلا در مورد فلزات نرم گفته شد، این روند ادامه پیدا کرده تا منجر به شکست نمونه شود.

روابط بین تنش و کرنش:

در حد الاستیک رابطه بین تنش و کرنش خطی بوده و قانون هوک صادق می‌باشد. یعنی:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-3)$$

در منطقه پلاستیکی از رابطه تجربی هولومان مطابق معادله (۲-۳) استفاده می‌شود که این رابطه تا نقطه UTS قابل استفاده است.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (2-3)$$

در رابطه فوق n و K پارامترهایی هستند که بستگی به فلز داشته و n توان کارسختی^۱ را نشان می‌دهد. σ و ε به ترتیب

تنش حقیقی و کرنش حقیقی است که طبق روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3-3)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} \quad (4-3)$$

تنش مهندسی (S) و کرنش مهندسی (e) نیز از طریق روابط ۳-۵ و ۳-۶ قابل محاسبه می‌باشند.

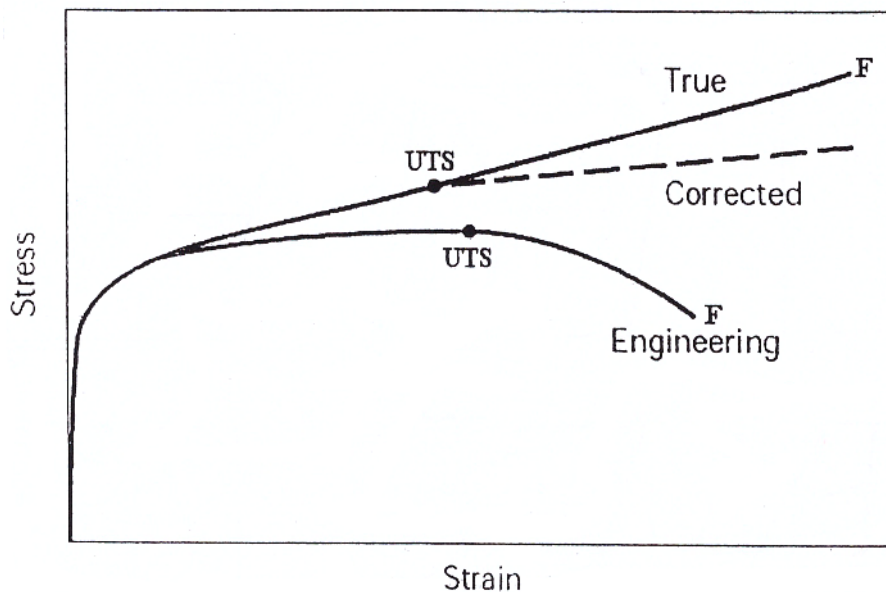
$$S = \frac{P}{A_0} \quad (5-3)$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (6-3)$$

در روابط فوق P نیرو، l_0 طول اولیه، l طول لحظه‌ای، A_0 سطح مقطع اولیه و A سطح مقطع لحظه‌ای نمونه می‌باشند. در منطقه پلاستیکی منحنی نیرو-تغییر طول مشخص کننده خواص مکانیکی ماده نخواهد بود. از این رو از منحنی‌های تنش-کرنش استفاده می‌شود. در شکل ۲-۳ منحنی تنش کرنش حقیقی و مهندسی رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، منحنی تنش-کرنش مهندسی شبیه به منحنی نیرو-تغییر طول می‌باشد. و چون تنش مهندسی از تقسیم نیرو بر سطح مقطع اولیه بدست می‌آید، لذا با کاهش نیرو بعد از گلوبی شدن تنش هم افت پیدا می‌کند، ولی در مورد تنش

¹ Strain Hardening Exponent

حقیقی چون نیرو تقسیم بر سطح مقطع لحظه ای می‌باشد بعد از گلوئی شدن علی‌رغم افت نیرو، کم شدن سطح مقطع تاثیر بیشتری بر میزان تنش داشته؛ لذا تنش بیشتر می‌شود.



شکل ۳-۲- منحنی تنش کرنش مهندسی و حقیقی

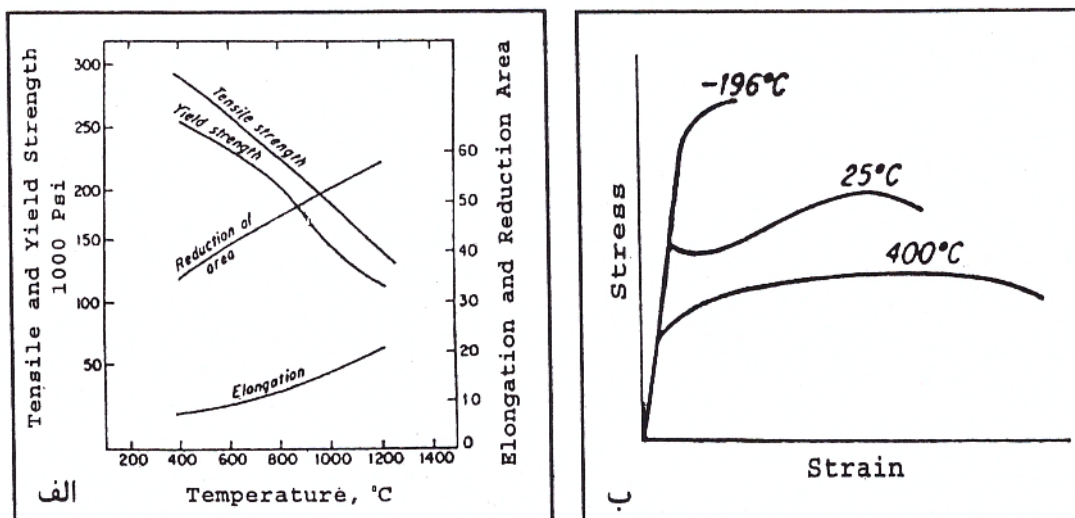
۳-۲- تأثیر عوامل مختلف بر منحنی تنش-کرنش مواد

عوامل زیادی بر خواص کششی فلزات تأثیر دارند. از جمله درجه حرارت آزمایش، اندازه دانه، سرعت تغییر شکل، سخت کردن، آلیاژ کردن و شکل نمونه‌های کششی که بطور خلاصه اثرات هر یک از عوامل فوق ذکر می‌شود.

۳-۲-۱- اثر درجه حرارت

بطور کلی می‌توان گفت که با افزایش دما، تنش تسلیم، استحکام کششی و شدت کارسختی کاهش می‌یابد اما قابلیت تغییرشکل و ازدیاد طول نسبی افزایش می‌یابد. تغییرات این فاکتورها با درجه حرارت برای فلزات مختلف فرق می‌کند و بستگی به شبکه کریستالی آنها دارد. مثلاً در فلزات FCC تنش تسلیم با افزایش دما زیاد فرق نمی‌کند ولی شدت کارسختی و استحکام کششی هم کم می‌شود.

در فلزات BCC با افزایش دما شدت کارسختی ثابت و استحکام کششی و تنش تسلیم افت پیدا می‌کند. در شکل ۳-۳-الف اثر درجه حرارت را بر تنش تسلیم و استحکام کششی فلزات FCC ارائه شده است. شکل ۳-۳-ب نیز اثر کلی درجه حرارت را بر منحنی $\sigma - \epsilon$ نشان می‌دهد.



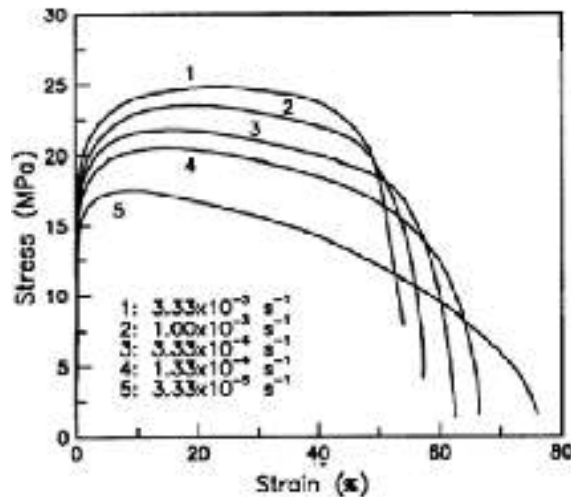
شکل ۳-۳- الف) اثر دما بر استحکام کششی و تنش تسلیم ماده، قابلیت تغییر شکل و از یاد طول نسبی و ب) اثر کلی دما بر

منحنی تنش- کرنش ماده

۳-۲-۲- 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 چرا که آهنگ کرنش می‌تواند اثر مهمی بر تنش سیلان نمونه داشته باشد. آهنگ کرنش به صورت $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$ تعریف شده و به صورت قراردادی بر حسب واحد بر ثانیه (sec^{-1}) بیان می‌شود و به سادگی می‌توان نشان داد که وابسته به سرعت بارگذاری (سرعت حرکت فک کشش) است.

آزمایشات نشان می‌دهد که در کرنش‌های مومسان اندک تنش تسلیم بیش از استحکام کششی به آهنگ کرنش وابسته است. افزایش سرعت کشش، باعث افزایش تنش تسلیم و استحکام کششی می‌شود و در مقابل میزان تغییر شکل نسبی کاهش می‌یابد. جزئیات بیشتری از اثر نرخ کرنش بر رفتار کششی ماده در آزمایش چهارم آورده شده است. در شکل ۳-۴ اثر کلی نرخ کرنش بر خواص کششی ماده و منحنی تنش- کرنش آمده است.



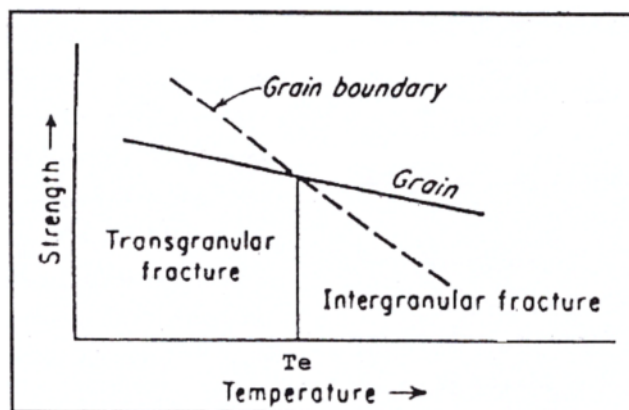
شکل ۳-۴- تاثیر نرخ کرنش بر رفتار منحنی تنش- کرنش آلیاژ سرب

۳-۲-۳- اثر اندازه دانه

مرزدانه‌ها ممکن است باعث قوی شدن و یا ضعیف شدن فلز گردند که بستگی به دما، سرعت تغییر شکل و خلوص فلز دارد. از اینرو اندازه دانه تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی دارد. چون با کم یا زیاد شدن اندازه دانه، مقدار مرزدانه‌ها نیز کم یا زیاد می‌گردد. البته اندازه دانه در مراحل اولیه تغییر شکل، بیشترین اثر خود را دارد زیرا در مراحل اولیه تغییر شکل است که مرزدانه مؤثرترین موانع در برابر حرکت نابجایی‌ها می‌باشند. از این رو تنش تسلیم بیشتر به اندازه دانه بستگی دارد تا استحکام کششی، در مراحل بعدی تغییر شکل، استحکام به وسیله واکنش‌های پیچیده‌ی نابجایی‌ها کنترل می‌شود. در اکثر فلزات استحکام تسلیم تابعی از اندازه دانه می‌باشد، یعنی:

$$\sigma_y = \sigma_o + Kd^{-1/2} \quad (۷-۳)$$

که در فرمول فوق σ_y تنش تسلیم، σ_o و K توابعی هستند که بستگی به فلز دارند و d قطر دانه می‌باشد. همانطور که گفته شد اثر اندازه دانه بر خواص مکانیکی بستگی به درجه حرارت دارد. در دماهای پایین استحکام مرزدانه‌ها بیشتر می‌باشد و هرچه دانه‌ها ریزتر باشند یعنی مقدار مرزدانه‌ها بیشتر باشد استحکام و مقاومت در مقابل تغییر شکل نیز زیادتر است و برعکس در دماهای بالا مرزدانه‌ها ضعیف‌تر بوده و دانه‌بندی ریز باعث کاهش استحکام فلز می‌شود. در شکل ۳-۵ استحکام دانه و مرزدانه را نسبت به درجه حرارت مشاهده می‌کنید. T_e درجه حرارتی است که استحکام دانه و مرزدانه یکی می‌باشد. البته باید توجه داشت که T_e با تنش و سرعت تغییر شکل تغییر می‌کند.



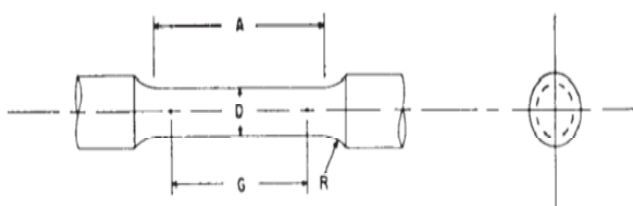
شکل ۳-۵- استحکام دانه و مرزدانه نسبت به درجه حرارت

۳-۴- هدف آزمایش

هدف از این آزمایش رسم منحنی کششی مواد مختلف، بررسی رفتار فلزات مختلف (نرم و ترد) تحت شرایط تنش کششی در دمای اتاق و اثر آلیاژسازی بر خواص مکانیکی فلزات می‌باشد. برای این منظور پنج نمونه کششی از فلزات آلومینیوم، مس، برنج، فولاد کم کربن (St 37) و فولاد کربن متوسط (Ck 45) را با دستگاه تست کشش یونیورسال تحت آزمایش کششی قرار می‌دهیم. طرز کار با دستگاه در آزمایشگاه تشریح می‌شود.

۳-۵- دستور کار آزمایش

نمونه‌های مورد آزمون بر اساس استاندارد ASTM E8 به صورت نمونه‌هایی با مقطع دایره ای و با ابعاد نمونه استاندارد (D=12.5 mm) طبق شکل ۳-۶ ساخته شدند.



	Dimensions, mm				
	Standard Specimen	Small-Size Specimens Proportional To Standard			
	12.5	9	6	4	2.5
G—Gage length	62.5 ± 0.1	45.0 ± 0.1	30.0 ± 0.1	20.0 ± 0.1	12.5 ± 0.1
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2	9.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	4.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1
R—Radius of fillet, min	10	8	6	4	2
A—Length of reduced section, min (Note 2)	75	54	36	24	20

شکل ۳-۶ طرح و ابعاد نمونه ساخته شده

۱. ابعاد نمونه‌ای که در اختیار شما قرار داده شده است را به دقت اندازه‌گیری کنید (طول قسمت میانی نمونه و قطر نمونه)
۲. طول سنج (G) را بر روی نمونه‌ها علامت گذاری نمایید.
۳. نمونه را در دستگاه تست کشش قرار داده و دستگاه را تنظیم کنید.
۴. نمونه را با سرعت کشش 10 mm/min تحت آزمایش قرار داده و منحنی نیرو-ازدیاد طول را بدست آورید.
۵. برای پیدا کردن مدول الاستیسیته، در منطقه الاستیک تغییر طول نمونه را در دو نیروی مختلف در حین آزمایش اندازه‌گیری کنید.
۶. بعد از پاره شدن نمونه‌ها، میزان افزایش طول در ناحیه طول سنج را اندازه‌گیری کنید، همچنین قطر نمونه را در قسمت شکست و طول نهایی را اندازه‌گیری کنید. میزان درصد ازدیاد طول نسبی و درصد کاهش سطح مقطع را محاسبه نمایید.

۳-۶- خواسته‌های آزمایش

۱. ابعاد اولیه و نهایی نمونه‌ها را در جدول قرار دهید. میزان تغییرات طول مربوط به جابجایی فک دستگاه در نمودار (نیرو-تغییرات طول) اصلاح گردد.
۲. میزان تنش مهندسی و کرنش مهندسی، همچنین تنش حقیقی و کرنش حقیقی را با فرمول‌های مربوطه محاسبه و نمودار تنش و کرنش حقیقی و مهندسی رسم گردد.
۳. مقادیر مدول الاستیسیته، تنش حد الاستیک، تنش تسلیم به ازای 0.2% درصد تغییر فرم پلاستیک، استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نسبی و درصد کاهش سطح مقطع در نقطه شکست را برای فلزات مختلف تعیین کرده و نمونه‌های مختلف را از نظر خواص کششی با هم مقایسه کنید.
۴. کار انجام شده جهت تغییر فرم الاستیک را برای نمونه‌ها محاسبه کنید.
۵. اثر عناصر آلیاژی را بر خواص کششی فلز مورد آزمایش بررسی کرده و توضیح دهید.
۶. خطاهای آزمایش را ذکر کنید.

آزمایش چهارم: اثر سرعت کشش بر خواص کششی

۴-۱- مقدمه

با افزایش نرخ کرنش، تنش تسلیم و استحکام کششی افزایش پیدا می‌کند و میزان تغییر شکل نسبی کاهش می‌یابد. رابطه کلی بین تنش اعمال شده و سرعت تغییر شکل در دما و کرنش ثابت به صورت زیر می‌باشد:

$$\sigma = c \dot{\epsilon}^m \Big|_{\epsilon, T} \quad (1-4)$$

در رابطه فوق σ تنش، c ثابت رابطه و $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش اعمالی (وابسته به سرعت نسبی تغییر شکل) و m ضریب حساسیت به نرخ کرنش^۱ می‌باشد. m را می‌توان بصورت زیر هم تعریف کرد.

$$m = \frac{\log(\sigma_2 / \sigma_1)}{\log(\dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1)} \quad (2-4)$$

در این رابطه σ_1 و σ_2 تنش سیلان^۲ ماده در یک کرنش معین برای انجام تست کشش در نرخ کرنش به ترتیب $\dot{\epsilon}_1$ و $\dot{\epsilon}_2$ می‌باشد. مقدار m معمولاً مقدار کوچکی می‌باشد و به شدت به دما وابسته است. در دماهای پایین مقدار m خیلی کوچک در حد صدم ($m < 0.05$) و در دماهای بالا این مقدار در حد چند دهم ($m < 0.4$) افزایش می‌یابد. در مقادیر m کوچک افزایش چندین برابری نرخ کرنش تاثیر زیادی در افزایش تنش سیلان ماده ندارد در حالیکه در دماهای بالاتر m بالاتر افزایش نرخ کرنش تاثیر بسزایی در افزایش تنش ماده به همراه دارد.

به طور معمول دو روش برای تعیین مقدار m در آزمایشگاه وجود دارد.

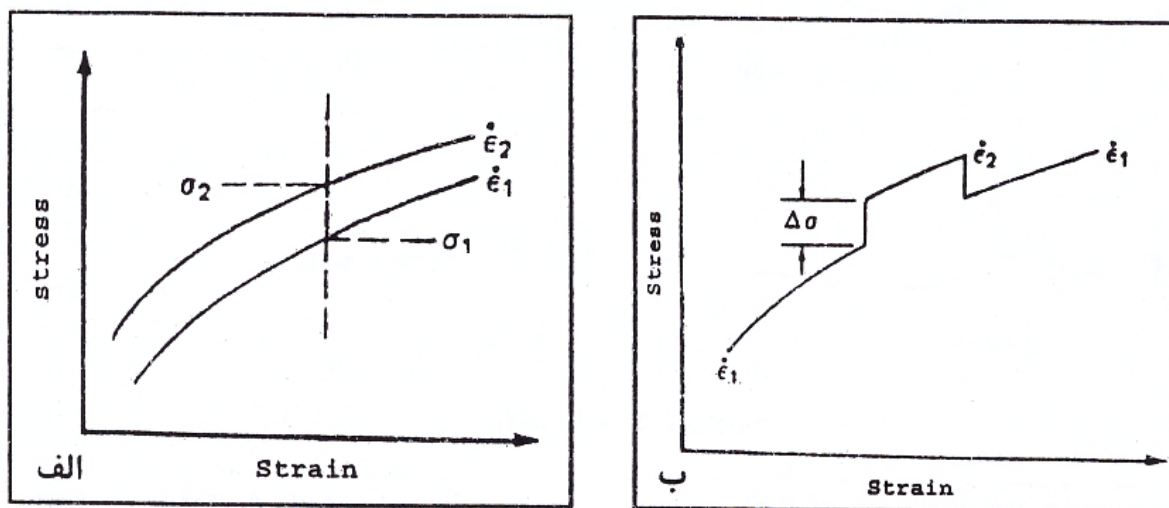
الف- روش تعیین منحنی تنش-کرنش پیوسته ماده در دو نرخ کرنش متفاوت: در این روش در یک دمای معین دو نمونه از ماده مشخص با دو نرخ کرنش متفاوت $\dot{\epsilon}_1$ و $\dot{\epsilon}_2$ کشیده می‌شود. سپس در یک کرنش معلوم، مقدار تنش سیلان ماده در هر نرخ کرنش که به ترتیب σ_1 و σ_2 است از روی منحنی تنش-کرنش تعیین می‌شود، شکل ۴-۱-الف. آنگاه با استفاده از رابطه ۴-۲ می‌توان m را تعیین نمود.

¹ Strain Rate Sensitivity

² Flow Stress

ب- روش تعیین منحنی تنش- کرنش ناپیوسته ماده با تغییر ناگهانی در نرخ کرنش بارگذاری: در این روش یک نمونه از ماده مشخص در دمای معین تحت تست کشش قرار می‌گیرد. در یک کرنش مشخص و دلخواه در محدوده تغییر شکل پلاستیک به یکباره سرعت بارگذاری دستگاه از مقدار اولیه به مقدار بیشتری تغییر می‌یابد. بنابراین یک ناپیوستگی در رفتار منحنی تنش- کرنش در تغییر نرخ کرنش از $\dot{\epsilon}_1$ به $\dot{\epsilon}_2$ رخ می‌دهد (شکل ۴-۱-ب). با تعیین تنش سیلان در هر نرخ کرنش و استفاده از رابطه ۴-۲ مقدار m را تعیین نمود. در این روش با اندازه‌گیری مقدار از روی منحنی و استفاده از رابطه ۴-۳ نیز می‌توان با تقریب مناسبی مقدار m را تعیین نمود.

$$m = \frac{\Delta\sigma/\sigma}{2.3 \times \log(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)} \quad (۳-۴)$$



شکل ۴-۱- نمایش شماتیک رفتار منحنی تنش- کرنش (الف) در دو نمونه با نرخ کرنش متفاوت و (ب) در یک نمونه با تغییر ناگهانی مقدار نرخ کرنش.

در مورد فولادهای نرم رابطه لگاریتمی زیر در محاسبه استحکام تسلیم بر حسب نرخ کرنش وجود دارد.

$$\sigma_y = k_1 + k_2 \log \dot{\epsilon} \quad (۴-۴)$$

در رابطه فوق σ_y تنش تسلیم پایین، k_1 و k_2 ثابت و $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش اعمالی می‌باشد.

۴-۲- محاسبه نرخ کرنش بر حسب سرعت کشش

در دستگاههای عمومی^۱ و متداول تست کشش معمولاً سرعت بارگذاری که با سرعت حرکت فکها^۱ سنجیده می شود ثابت است. تحت چنین شرایط بارگذاری، آنچنان که در ادامه می آید، مشخص می شود که نرخ کرنش در حین کشش در حال تغییر است. نهایتاً با یک مقدار نرخ کرنش میانگین، می توان نرخ کرنش بارگذاری را گزارش نمود. ذکر این نکته حائز اهمیت است که با دستگاههای مدرن و تمام کنترل می^۲ توان با تغییر دقیق سرعت حرکت فک در حین تست نرخ کرنش را ثابت نگه داشت.

فرض کنید نمونه تست کشش به طول اولیه l_0 با سرعت ثابت V_0 در حال کشش می باشد. در یک لحظه معین طول نمونه l است که نرخ کرنش لحظه ای بنا به تعریف به صورت زیر خواهد بود.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (۵-۴)$$

با توجه به تعریف کرنش حقیقی:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{dl/l}{dt} = \frac{1}{l} \left(\frac{dl}{dt} \right) \quad (۶-۴)$$

با توجه به سرعت ثابت فک کشش و تعریف سرعت $\left(V_0 = \frac{dl}{dt} \right)$ نرخ کرنش لحظه ای بصورت زیر فرموله می شود:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_0}{l} \quad (۷-۴)$$

طبق رابطه فوق مشخص است که در حین کشش نمونه با افزایش طول نمونه مقدار نرخ کرنش لحظه ای در حال کاهش است. همانطور که ذکر شد برای گزارش نرخ کرنش اعمالی به نمونه از مقدار متوسط نرخ کرنش^۲ $(\bar{\varepsilon})$ استفاده می شود که به صورت زیر خواهد بود:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{V_0}{l_f - l_0} \ln \frac{l_f}{l_0} \quad (۸-۴)$$

۴-۳- هدف آزمایش

هدف اصلی در این آزمایش انجام تست کشش با دو سرعت مختلف در دمای اتاق و بررسی اثر نرخ کرنش بر رفتار منحنی تنش - کرنش فولاد Ck 45 است.

¹ Ram Speed

² Mean Strain Rate

۴-۴- دستور کار آزمایش

۱. ابعاد دو نمونه را به دقت اندازه‌گیری کنید
۲. طول سنج مناسب را بر روی نمونه‌ها علامت گذاری نمایید.
۳. نمونه را در دستگاه قرار داده و وضعیت اولیه دستگاه را تنظیم کنید.
۴. نمونه را با دستگاه کشش با سرعت‌های ۱۰ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه تحت آزمایش کشش قرار داده و منحنی نیرو-ازدیاد طول را بدست آورید.
۵. بعد از پاره شدن نمونه‌ها، میزان افزایش طول در ناحیه طول سنج را اندازه‌گیری کنید، طول نهایی را اندازه‌گیری کنید و میزان درصد ازدیاد طول نسبی را محاسبه نمایید.

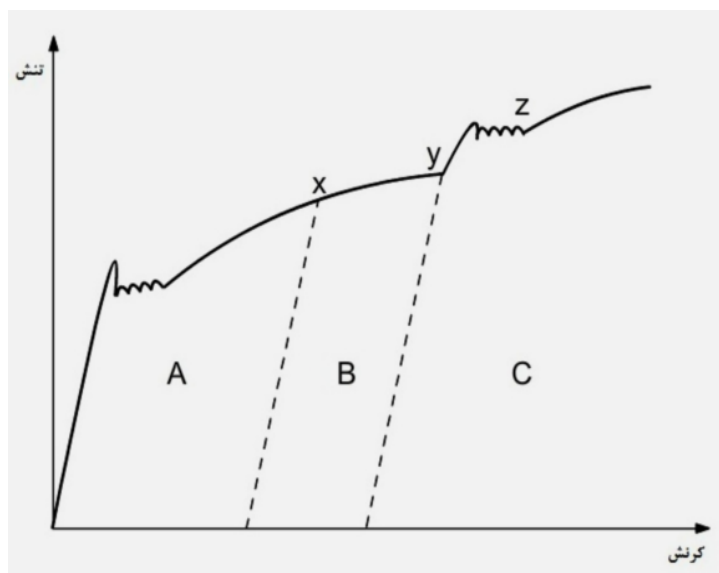
۴-۵- خواسته‌های آزمایش

۱. منحنی $\sigma - \epsilon$ را برای نمونه‌ها در یک نمودار مختصات رسم کنید و اثر سرعت کشش بر رفتار کششی را مورد بحث قرار دهید.
۲. تنش تسلیم، استحکام کششی نهایی و درصد ازدیاد طول نسبی را برای نمونه‌ها در هر دو سرعت بارگذاری محاسبه و با هم مقایسه کنید و علت تغییرات را توضیح دهید.
۳. از روی داده‌های منحنی تنش- کرنش دو نمونه مقدار ضریب حساسیت به نرخ کرنش را تعیین کنید.
۴. خطاهای آزمایش را ذکر کنید.

آزمایش پنجم: اثر پیر کرنشی بر خواص کششی

۱-۵- معرفی پدیده پیر کرنشی

وقتی یک فلز (با عناصر آلیاژی بین نشین محلول در زمینه) بعد از کار سرد در دمای نسبتاً پایین حرارت داده شود، استحکام آن افزایش و قابلیت انعطاف آن کاهش می‌یابد. به این پدیده پیر کرنشی^۱ گفته می‌شود که معمولاً همراه با پدیده نقطه تسلیم می‌باشد. شکل ۱-۵ زیر اثر این پدیده را بر منحنی سیلان فولاد کم کربن نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵- منحنی سیلان فولاد کم کربن تحت اثر پدیده پیر کرنشی

منطقه A نشان دهنده منحنی تنش-کرنش فولاد کم کربن است که بطور پلاستیکی تا نقطه X تغییر شکل داده است. سپس نمونه باربرداری شده و مجدداً بدون هیچ تاخیر یا عملیات حرارتی تحت آزمایش قرار گرفته است (ناحیه B). مشاهده می‌شود که در بارگذاری مجدد نقطه تسلیم ظاهر نمی‌شود، زیرا ناهمگنی‌ها از منطقه انتهایی کربن و نیتروژن دور شده‌اند. همچنین تنش سیلان در بارگذاری مجدد از همان تنشی که نمونه باربرداری شده بود یعنی نقطه X شروع می‌شود.

¹ Strain Aging

نمونه دیگری تا نقطه y تغییر شکل داده و بار برداری شده است. در واقع تا کرنش معادل نقطه y نمونه تحت پیش کرنش^۱ قرار می‌گیرد. حال اگر بعد از اینکه نمونه چند روز در دمای اتاق یا چند ساعت در دمای کم مانند 300°F باشد و سپس تحت نیرو قرار گیرد، اولاً نقطه تسلیم مجدداً ظاهر می‌شود و مقدار آن از y تا z افزایش می‌یابد و ثانیاً پدیده مضرس شدن^۲ و کرنش لودرز^۳ در رفتار کششی نمونه پیر شده ظاهر می‌شود. ظاهر شدن مجدد نقطه تسلیم مربوط به دیفوزیون اتم های کربن و نیتروژن محلول در فولاد به نابعائی‌ها می‌باشد.

نیتروژن نسبت به کربن در این پدیده نقش بیشتری دارد زیرا حلالیت آن بیشتر و ضریب دیفوزیون آن نیز بیشتر است و در حین آهسته سرد کردن رسوبی کمتر می‌دهد. از نقطه نظر عملی بهتر است که در کشش عمیق فولادها این پدیده حذف شود زیرا ظاهر شدن مجدد نقطه تسلیم باعث می‌شود که به علت تغییر شکل غیر هموزن موضعی، در سطح علائمی ظاهر شود. برای کنترل کردن پدیده پیرکرنشی، می‌توان میزان کربن و نیتروژن محلول را با اضافه کردن عناصری مانند آلومینیوم، وانادیم، کلومبیم و برن در تشکیل کاربید و نیتريد می‌دهند کم کرده ولی راه حل بهتر این است که فلز را بوسیله نورد، تا نقطه x تغییر شکل داده و فوراً قبل از اینکه پیر شود به کار گرفته شود. تغییر شکل پلاستیکی بوسیله نورد باعث می‌شود که نابعائی‌های جدید به اندازه کافی بوجود آمده و تغییر شکل بعدی بدون نقطه تسلیم اتفاق افتد. برای فولاد کم کربن در فاصله حرارتی $450-700^{\circ}\text{F}$ این پدیده با حداکثر سرعت اتفاق می‌افتد.

۵-۲- هدف آزمایش

هدف از این آزمایش مشاهده پدیده نقطه تسلیم ناپیوسته در فولاد کم کربن و بررسی تاثیر دمای پیرسازی بر رفتار کششی و خواص مکانیکی این نوع فولاد است.

۵-۳- دستور کار آزمایش

۱. ابعاد سه نمونه فولاد St 37 را به دقت اندازه‌گیری کنید.
۲. در هر سه نمونه با مراحل آغازین ناحیه پلاستیک، تست متوقف و نیرو برداشته می‌شود.
۳. مقدار پیش کرنش ایجاد شده در سه نمونه را اندازه بگیرید و سعی کنید برای هر سه نمونه یکسان باشد.
۴. نمونه اول را به محض برداشتن نیرو با ایجاد طول سنج مناسب بر روی نمونه در دستگاه قرار داده و پس از تنظیم وضعیت اولیه دستگاه مجدداً تحت تست کشش قرار دهید.

¹ Prestrain

² Serration

³ Luders Strain

۵. نمونه دوم و سوم را پس از حرارت دادن به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۲۰۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و پس از سرد کردن در کوره، با ایجاد طول سنج مناسب بر روی نمونه در دستگاه قرار داده و پس از تنظیم وضعیت اولیه دستگاه مجدداً مورد آزمایش کشش قرار دهید.

۶. منحنی نیرو-ازدیاد طول نمونه‌ها را بدست آورید.

۷. بعد از پاره شدن نمونه‌ها، طول نهایی را اندازه‌گیری کنید و میزان درصد ازدیاد طول نسبی را محاسبه نمایید.

۴-۵- خواسته‌های آزمایش

۱. منحنی $\sigma - \epsilon$ نهایی هر نمونه را با منحنی تنش- کرنش مرحله اولیه (پیش کرنش شده) رسم کنید.
۲. منحنی تنش- کرنش نهایی هر سه نمونه را در یک نمودار رسم کنید.
۳. چه اختلاف‌هایی در منحنی تنش کرنش نمونه‌ها وجود دارد. شرح دهید.
۴. مقادیر UTS، کرنش تا شکست (ϵ_f) و σ_y را برای هر سه نمونه محاسبه کرده و علت تغییرات را توضیح دهید.
۵. در خصوص اثر دما بر پدیده پیرکرنشی و تغییرات خواص مکانیکی بحث کنید.
۶. خطاهای آزمایش را ذکر کنید.

آزمایش ششم: خواص فشاری ماده (تست فشار)

۶-۱- مقدمه

از لحاظ تئوری می‌توان گفت در این آزمایش از نظر اعمال نیرو مخالف آزمایش کشش می‌باشد ولی اصول و بحث‌هایی که در این آزمایش به کار می‌رود همانند آزمایش کشش خواهند بود. با وجود این، به علت محدودیت‌های زیر آزمایش فشار^۱ را نمی‌توان در تمام موارد بکار برد.

۱. مشکل بودن اعمال نیروی محوری^۲

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

۳. وجود اصطکاک بین دو سر 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 زیاد باشد. و اگر نمونه‌هایی با طول و قطر کوچک انتخاب شوند اندازه‌گیری کرنش با دقت لازم مشکل خواهد بود.

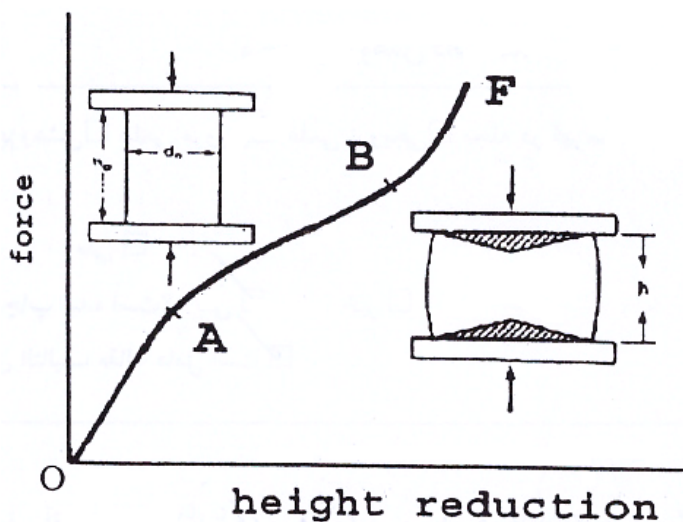
۶-۲- روش آزمایش فشار ساده

ساده‌ترین نمونه‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای شکل می‌باشد که دو قاعده آنها مسطح باشد. اگر چنین نمونه‌ای زیر پرس قرار بگیرد، منحنی تغییرات نیرو بر حسب درصد کاهش ارتفاع طبق شکل ۶-۱ خواهد بود. در نیروهای کم، یعنی از نقطه‌ی O تا A تغییر شکل الاستیک بوده و با حذف نیرو نمونه ابعاد اولیه خود را بدست می‌آورد. در نیروهای زیادتر یعنی از نقطه‌ی A تا B تغییر شکل پلاستیکی شروع شده و این قسمت از منحنی شبیه منحنی تغییرات نیرو بر حسب درصد افزایش طول در آزمایش کشش می‌باشد. اگر نیرو باز هم افزایش یابد، تغییر شکل دیگر بصورت یکنواخت در تمامی ارتفاع نمونه انجام نمی‌گیرد؛ بلکه ازدیاد قطر در قسمت وسط نمونه بیشتر از دو انتهای آن خواهد بود. این حالت را بشکله‌ای شدن می‌نامند. این مسئله موجب افزایش شیب منحنی تغییرات نیرو بر حسب درصد کاهش ارتفاع می‌شود و نقطه‌ی B آغاز چنین حالتی

¹ Compressive Test

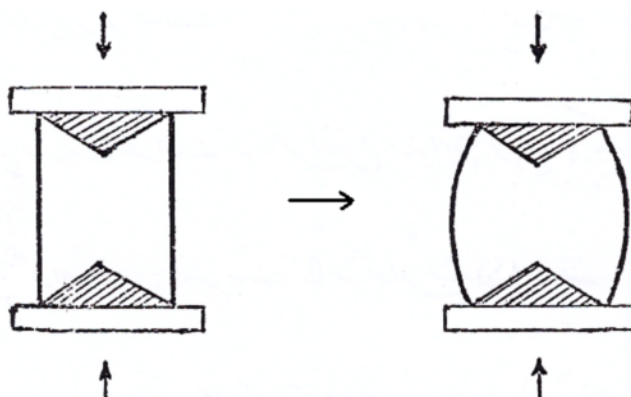
² Axial Loading

است. ادامه عمل موجب ایجاد ترک‌های عمودی در قسمت میانی نمونه می‌شود. نقطه‌ی F در روی منحنی مزبور 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.



شکل ۶-۱- نمودار تنش و کرنش فشاری

بشکهای شدن^۱ به علت اصطکاک موجود بین B سر نمونه و فک‌های دستگاه بوجود می‌آید و این اصطکاک باعث می‌شود که فلزها به فک‌ها چسبیده و منطقه فلز مرده^۲ بوجود آید، محدودیت حرکت فلز در این منطقه باعث می‌شود که نمونه در اثر فشار به صورت بشکه در آید، شکل ۶-۲.



شکل ۶-۲- مناطق مرده (مخروط‌های فشاری) در نمونه تحت فشار (چپ) و بشکهای شدن نمونه (راست).

¹ Barrelling

² Dead Metal Zone (DMZ)

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

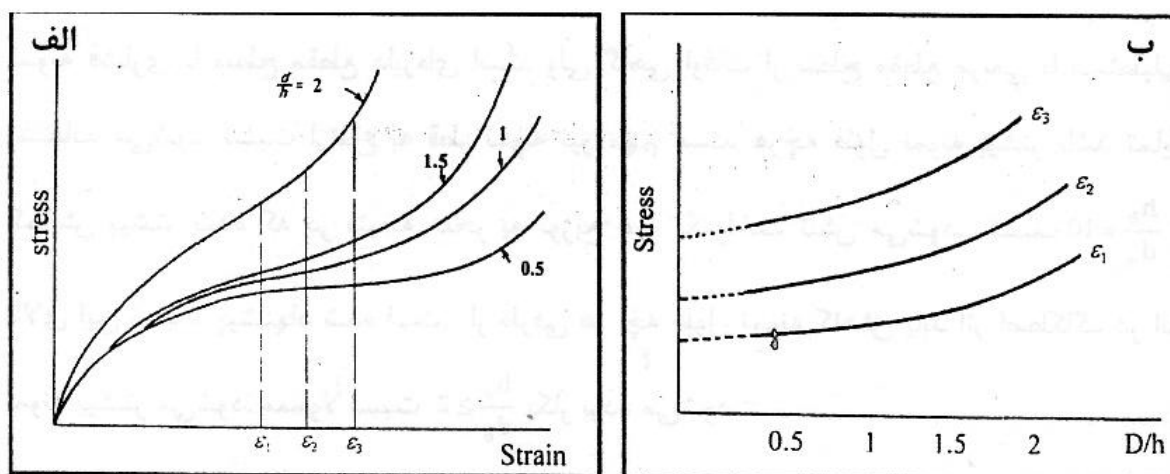
نمونه‌هایی با نسبت‌های مختلف $\frac{d_o}{h_o}$ (قطر به ارتفاع) انتخاب کرد و آنها را تغییر شکل می‌دهیم و منحنی‌های تنش -

کرنش آنها در یک دستگاه مختصات رسم می‌تماییم (شکل ۳-۶-الف). در یک درصد معین کرنش، تنش لازم برای هر یک از

نمونه‌ها را از منحنی‌های فوق بدست می‌آوریم و سپس این تنش‌ها را بر حسب $\frac{d_o}{h_o}$ رسم کرده و با برون‌یابی^۱ کردن این

منحنی به $\frac{d_o}{h_o} = 0$ تنش حقیقی لازم برای این درصد کاهش ارتفاع (کرنش) بدست می‌آید (شکل ۳-۶-ب). با تکرار این

عمل در کرنش‌های دیگر و بدست آوردن تنش لازم، می‌توان منحنی تنش- کرنش را رسم کرد.



شکل ۳-۶- نمودارهای مربوط به برون‌یابی داده‌های تست فشار

در آزمایش فشار نیز مانند آزمایش کشش می‌توان خواص مکانیکی زیر را بدست آورد:

۱- استحکام فشاری: که از تقسیم نیروی ماکزیمم بر سطح مقطع بدست می‌آید که می‌توان سطح مقطع اولیه و یا لحظه-ای را بکار برد.

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A} \quad (1-6)$$

¹ Extrapolation

۲- تنش تسلیم: شبیه به آزمایش کشش بوده و به ازای ۰/۲ درصد تغییر شکل بدست می‌آید.

۳- میزان درصد کاهش ارتفاع از روابط زیر بدست می‌آید:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \quad (2-6)$$

$$e = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h - h_0}{h_0} \quad (3-6)$$

۴- درصد تورم^۱ که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{درصد تورم} = \frac{\Delta A}{A_0} \times 100 = \frac{A - A_0}{A_0} \times 100 \quad (4-6)$$

که A_0 سطح مقطع اولیه و A بزرگترین سطح مقطع پس از آزمایش است.

۳-۶- شرایط نمونه های فشاری

برای یکنواخت بودن تنش بهترین سطح مقطع، سطح مقطع دایره است ولی گاهی اوقات از سطح مقطع مربع یا مستطیل استفاده می‌شود. نسبت ارتفاع به قطر نمونه نیز مهم است. هرچه طول نمونه بیشتر باشد تمایل به کمانش^۲ بیشتر شده در

نتیجه منجر به توزیع غیر یکنواخت تنش می‌شود. نسبت $\frac{h_0}{d_0} = 10$ حد بالای نسبت پیشنهاد شده است. از طرفی هر چه

طول نمونه کاهش یابد اثر اصطکاک در انتهای نمونه بیشتر می‌شود. معمولاً نسبت $\frac{h_0}{d_0} \geq 2$ به کار برده می‌شود.

البته اندازه واقعی نمونه بستگی به نوع ماده، وسایل موجود آزمایشگاهی و پارامتر مدنظر جهت اندازه‌گیری دارد. 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 موثر (طول سنج) نمونه باید از طول نمونه کوتاه‌تر (حداقل به اندازه‌ی قطر) انتخاب شود.

نمونه‌های استاندارد برای مواد فلزی طبق استاندارد ASTM E9 به سه دسته تقسیم می‌شوند. در جدول ۶-۱ ابعاد نمونه‌های استاندارد آمده است.

۱. نمونه‌های کوتاه برای فلزات یاتاقان استفاده می‌شود.

۲. نمونه‌های متوسط برای استفاده‌های عمومی.

¹ Bulging

² Buckeling

۳. نمونه‌های بلند که برای تعیین مدول الاستیسیته بکار می‌رود.

جدول ۶-۱- ابعاد استاندارد نمونه‌های تست فشار ساده

نوع نمونه	قطر به اینچ	ارتفاع به اینچ
کوتاه	$1\frac{1}{8}$	1
متوسط	$\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$
	0.798	$2\frac{3}{8}$
	1	3
	$1\frac{1}{8}$	$3\frac{3}{8}$
بلند	0.798	$6\frac{3}{8}$
	$1\frac{1}{4}$	$12\frac{1}{2}$

۶-۴- هدف آزمایش

مطالعه استحکام فشاری مواد مختلف و رسم منحنی تنش- کرنش فشاری مواد مختلف مهم‌ترین هدف این آزمایش می‌باشد.

۶-۵- مراحل انجام آزمایش

- چهار نمونه استوانه‌ای تست فشار از جنس آلومینیوم، مس، برنج و فولاد کم کربن (از همان فلزاتی که در تست کشش مورد استفاده قرار گرفته بود) آماده سازی کنید.
- ابعاد نمونه‌ها را (طول و قطر) اندازه‌گیری کنید.
- نمونه‌ها را پس از روغن‌کاری در مرکز فک‌های دستگاه قرار داده و پس از انجام تنظیمات دستگاه به آن نیروی فشاری اعمال کنید.
- هریک از نمونه‌ها را تا حد بشکته‌ای شدن تحت فشار قرار داده منحنی نیرو- کاهش ارتفاع را به وسیله دستگاه رسم کنید.
- ارتفاع نهایی نمونه‌ها و قطر در منطقه بشکته‌ای شدن را اندازه‌گیری کنید.

۶. در قسمت دوم آزمایش، چهار نمونه از یک جنس (برنج) با نسبت قطر به ارتفاع‌های مختلف را طبق ردیفهای ۲ تا ۴ تحت فشار قرار داده و اثر ابعاد نمونه را بر منحنی $\sigma - \epsilon$ بررسی کنید.

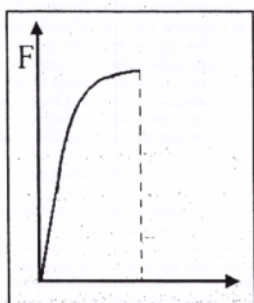
۶-۶- خواسته‌های آزمایش

۱. با استفاده از منحنی‌های نیرو- تغییر ارتفاع، منحنی تنش- کرنش فشاری را برای هر یک از نمونه‌ها رسم کنید.
۲. مقادیر مدول الاستیسیته، تنش تسلیم ($0/2$ درصد)، کاهش طول نسبی، درصد تورم و استحکام فشاری نمونه‌ها در ۳۵ درصد کاهش ارتفاع را بدست آورده و با هم مقایسه کنید.
۳. منحنی تنش- کرنش را برای نمونه‌های برنجی با ابعاد مختلف در یک دستگاه مختصات رسم کرده و با استفاده از منحنی‌های مذکور میزان تنش لازم برای ۵٪ کاهش ارتفاع را برای هر یک از نمونه‌ها حساب کنید. و این مقادیر را با هم مقایسه کنید. در مورد اثر ابعاد نمونه بر منحنی تنش- کرنش توضیح مختصری دهید.
۴. با استفاده از روش برون‌یابی، منحنی $\sigma - \epsilon$ بدون تاثیر اصطکاک را برای ماده برنج محاسبه و رسم نمایید.
۵. خطاهای آزمایش را ذکر کنید.

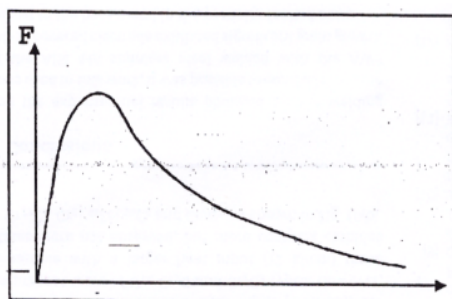
آزمایش هفتم: بررسی انرژی شکست (تست ضربه)

۷-۱- مقدمه

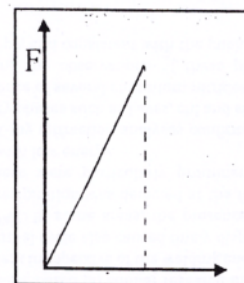
در آزمایشهای قبلی چگونگی رفتار خواص فلزات به موارد را در مقابل نیروهای استاتیکی که با سرعت کم بر آنها وارد می‌شود بررسی کردیم ولی در عمل همیشه نیرو به صورت استاتیکی به ماشین آلات، ساختمانها، پلها و غیره وارد نمی‌شود، از اینرو باید رفتار و خواص مصالح را در مقابل نیروهای دینامیکی (ضربه‌ای) که به طور یقین 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: شکست ترد^۱ و شکست نرم (برشی)^۲ که شکست در بیشتر اوقات مخلوطی از این دو نوع از شکست خواهد بود. چنانچه منحنی نیرو بر حسب تغییر فرم را رسم کنیم نوع منحنی نشان دهنده شکستی است که در نمونه اتفاق افتاده است. در شکل ۷-۱ منحنی الف نشان دهنده شکست ترد، منحنی ب نشان دهنده شکست نرم و منحنی ج نشان دهنده مخلوطی از این دو شکست می‌باشد.



ج



ب



الف

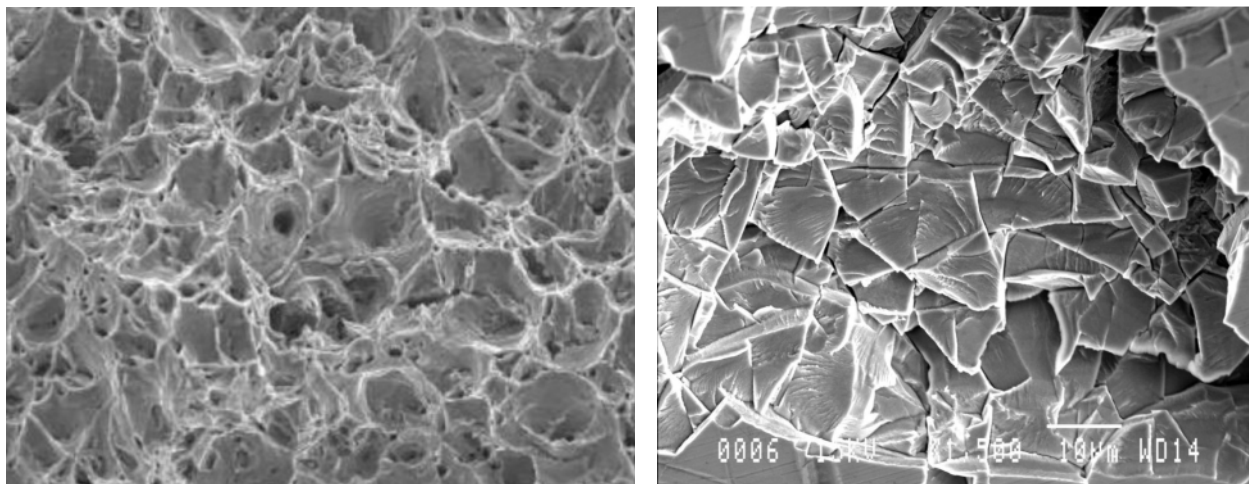
شکل ۷-۱- منحنی نیرو بر حسب تغییر فرم در انواع شکست (الف) ترد (ب) نرم (ج) مخلوطی از شکست نرم و ترد

در شکست ترد با ایجاد ترک و اشاعه آن، نمونه قبل از رسیدن به نقطه تسلیم می‌شکند و سطح شکست صاف و براق و دانه دانه خواهد بود. انرژی جذب شده (سطح زیر منحنی) در این نوع شکست نسبت به شکست نرم کمتر است. ولی در شکست نرم در منطقه راس ترک در حال گسترش، قبل از شکست مقداری تغییر فرم پلاستیکی در نمونه ایجاد شده و نیرو بعد از

¹ Brittle Fracture

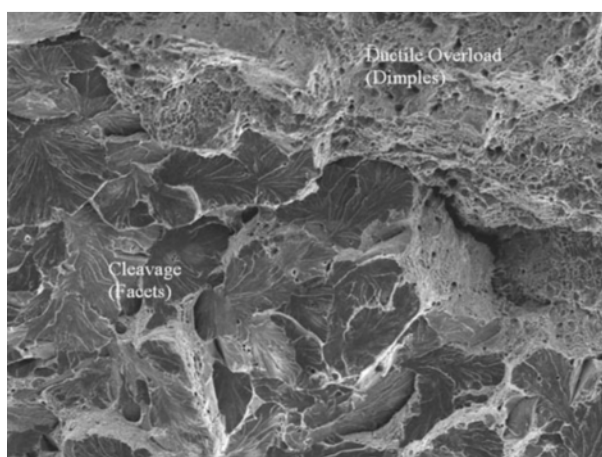
² Ductile (Shear) Fracture

رسیدن به یک ماکزیمم، همزمان با اشاعه ترک (کاهش سطح مقطع) افت پیدا کرد تا منجر به شکست نمونه می‌شود. در شکل ۷-۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی انواع شکست فوق آمده است.



(الف)

(ب)



(ج)

شکل ۷-۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح شکست الف) نرم، ب) ترد و ج) مخلوطی از دو نوع.

عوامل موثر که باعث شکست ترد می‌شوند امروزه با تحقیقات انجام شده شناخته شده است. در جنگ جهانی دوم بعلا شکستگی‌هایی که در بدنه کشتیها و زیر دریائی‌ها بوجود آمد و بخصوص وقتی که مشاهده شد، بیشتر این شکست‌ها در زمستانهای سرد و به هنگام عبور کشتی‌ها از مناطق سرد اتفاق می‌افتد محققین را بر آن داشت که علت شکست و مکانیزم شکست و چگونگی جلوگیری از آن را در آینده بررسی کنند. تحقیقات اولیه نشان داد که عوامل زیر در شکست ترد موثرند:

۱. وجود تنش‌های سه بعدی^۱ که در اثر وجود شیارها^۲، فضاهای خالی و یا جدایش‌ها^۳ در نمونه ایجاد می‌شود.

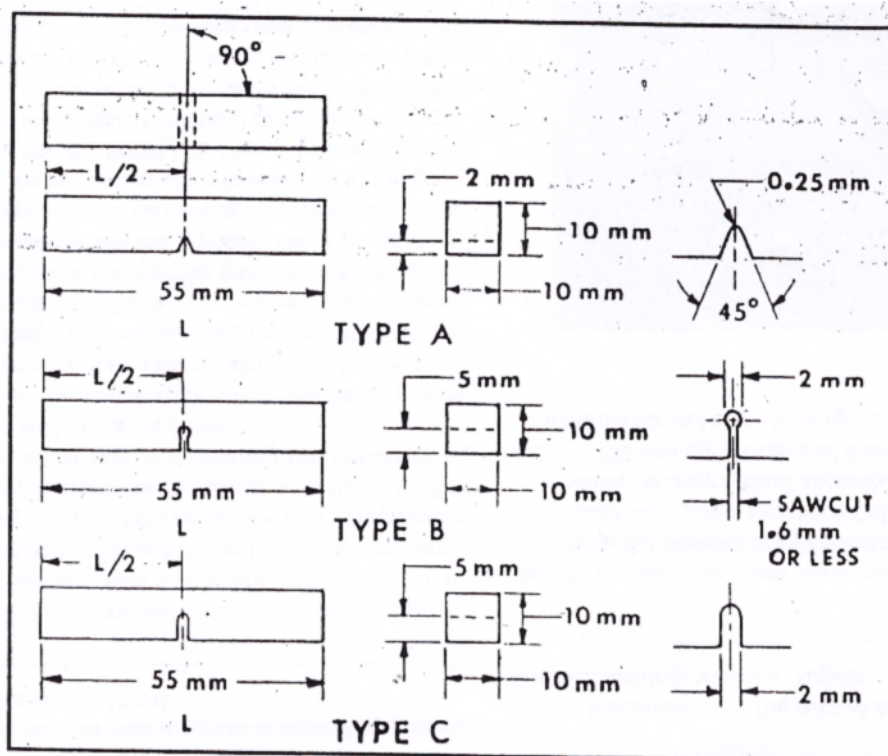
۲. سرعت زیاد اعمال نیرو (تنش)

۳. درجه حرارت‌های کم، مانند درجه حرارت‌های صفر و زیر صفر

۷-۲- انواع آزمون ضربه

۷-۲-۱- روش تست شارپی^۴

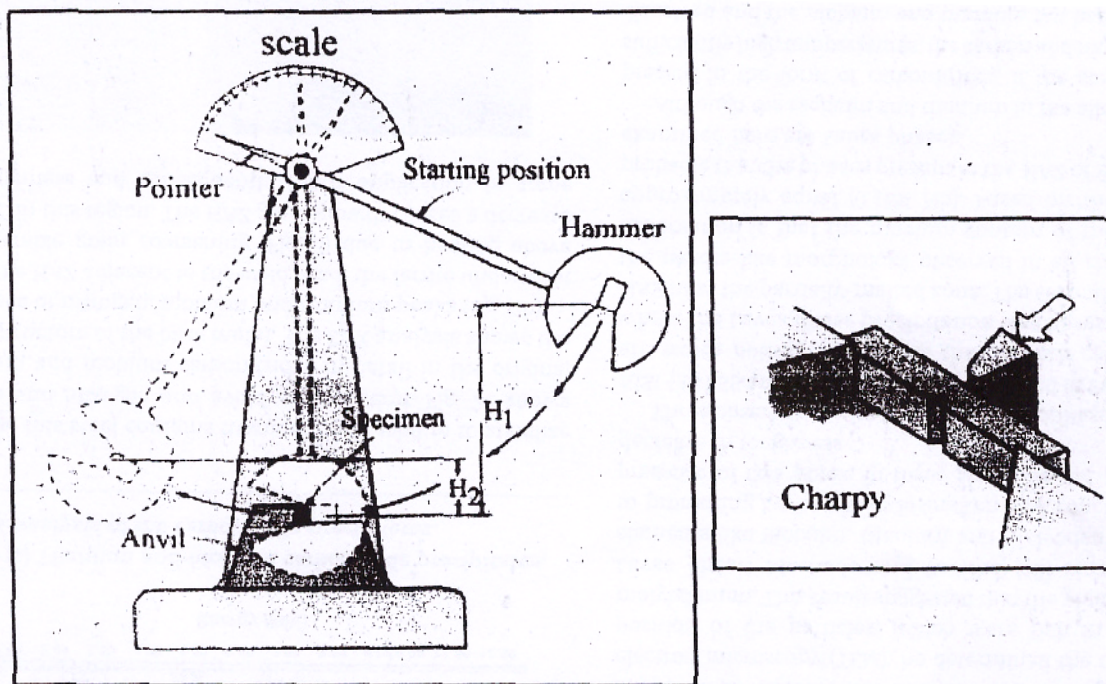
در این روش از نمونه‌های استاندارد به ابعاد $10 \times 10 \times 55$ میلی‌متر که دارای شیارهای V شکل^۵، U شکل^۶ و یا به صورت جاکلیدی^۷ است، استفاده می‌شود. که معمولاً از نمونه‌های با شیار V که دارای ۲ میلی‌متر عمق و شعاع راس شیار 0.25 میلی‌متر و زاویه شیار 45° درجه می‌باشد استفاده می‌کنند. در شکل ۷-۳ نمونه‌های استاندارد شارپی را ملاحظه می‌کنید.



شکل ۷-۳- شماتیک نمونه‌های استاندارد تست شارپی با انواع هندسه شیار

- ¹Triaxial Stresses
- ² Notches
- ³ Segregations
- ⁴ Charpy Test Method
- ⁵ V-Type Notch
- ⁶ U-Type Notch
- ⁷ Key-hole

نمونه طبق شکل زیر بصورت افقی قرار گرفته و ضربه توسط پاندولی که به انتهای آن وزنه سنگین متصل است با سرعت $17/5$ فوت در ثانیه ($5/33$ متر برثانیه) درست در پشت شیار وارد می‌شود و انرژی جذب شده توسط نمونه (انرژی شکست) مستقیماً از روی صفحه مدرج دستگاه شاری (طبق شکل ۷-۴) خوانده می‌شود. انرژی لازم برای شکست نمونه تابعی از زاویه بلند شدن پاندول، وزن پاندول، موقعیت مرکز جرم پاندول نسبت به محل وارد شدن نیروی می‌باشد که بعداً محاسبه خواهد شد.

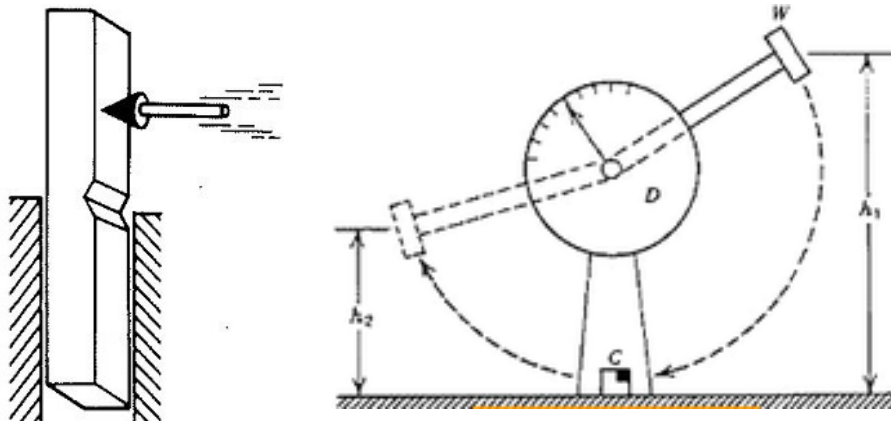


شکل ۷-۴- دستگاه ضربه شاری و طرز حرکت پاندول

۷-۲-۲- روش تست ایزود^۱

در این آزمایش نیز از نمونه های استاندارد به ابعاد $10 \times 10 \times 75$ میلیمتر و با شیار V شکل به عمق ۲ میلیمتر و زاویه 45 درجه و شعاع راس $0/25$ میلیمتر استفاده می‌شود که نمونه در دستگاه به حالت قائم قرار گرفته و ضربه توسط پاندول با سرعت $11/5$ فوت در ثانیه ($3/5$ متر درثانیه) در طرف شیار به نمونه وارد می‌شود، شکل ۷-۵. روش ایزود معمولاً کمتر بکار می‌رود زیرا نمونه بوسیله نگهدارنده‌های آن تحت تنش قرار می‌گیرد.

¹ Izod Test Method



شکل ۷-۵- نمایش شماتیک تست ضربه و طریقه قرارگیری نمونه در روش تست ایزود

۷-۳- محاسبه انرژی لازم جهت شکست نمونه

انرژی لازم برای شکست ماده در حقیقت انرژی لازم برای جوانه زنی ترک^۱ (E_N) و انرژی لازم برای اشاعه ترک^۲ (E_P) می-باشد. یعنی:

$$E = E_N + E_P \quad (1-7)$$

در مواد ترد بخش اصلی انرژی شکست ماده به انرژی لازم برای جوانه زنی ترک بستگی دارد. به عبارت دیگر در این دسته از مواد انرژی لازم برای اشاعه ترک بسیار ناچیز است. در مواد نرم انرژی لازم برای جوانه زنی ترک ناچیز است و بخش اصلی انرژی ضربه ماده به انرژی لازم برای توسعه ترک برمی-گردد. در آزمون ضربه با ایجاد شیار در نمونه عملاً انرژی لازم برای جوانه زنی به صفر می-رسد و انرژی اندازه‌گیری شده فقط مربوط به بخش اشاعه ترک است.

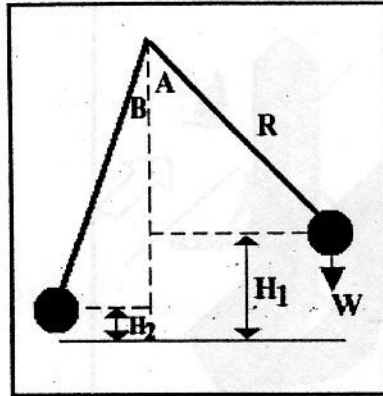
استحکام ضربه ای یا انرژی جذب شده برای شکست نمونه، اختلاف انرژی پاندول قبل و بعد از برخورد می-باشد که این اختلاف انرژی تابعی از کاهش سرعت پاندول بوده و با داشتن ارتفاع پاندول قبل و بعد از برخورد قابل محاسبه است که بسته در محاسبه انرژی باید انرژی های تلف شده از قبیل کاهش سرعت پاندول در اثر مقاومت هوا، انرژی جذب شده توسط اصطکاک قسمت های متحرک دستگاه و انرژی لازم برای پرتاب نمونه بعد از شکست را در نظر گرفت. بدون در نظر گرفتن اتلاف انرژی می-توان انرژی شکست را طبق شکل ۷-۶ و با استفاده از روابط زیر بدست آورد.

$$E_1 = mH_1 = mR(1 - \cos A) \quad (2-7)$$

$$E_2 = mH_2 = mR(1 - \cos B) \quad (3-7)$$

$$E = E_1 - E_2 = mR(\cos B - \cos A) \quad (4-7)$$

¹ Crack Nucleation
² Crack Propagation



شکل ۶-۷- شماتیکی از هندسه و پارامترهای پاندول در تست ضربه

در روابط فوق m وزن پاندول، H_1 و H_2 بترتیب ارتفاع مرکز جرم پاندول قبل و بعد از برخورد، R طول پاندول، A و B بترتیب زوایه راستای طول پاندول با محور قائم قبل و بعد از برخورد می‌باشد. باید در نظر داشت که نتایج بدست آمده از آزمایش ضربه برای یک فلز ولی با دستگاههای ضربه مختلف بدلائیل زیر یکسان نخواهد بود:

۱. اتلاف انرژی بوسیله قسمت‌های متحرک ماشین

۲. تغییرات سرعت پاندول

۳. اندازه و فرم نمونه

۴-۷- عواملی موثر بر استحکام ضربه

پارامترهای زیادی باعث تغییر استحکام ضربه ای فلزات می‌شوند که مهمترین آنها عبارتند از: ناحیه شیار، عمق شیار^۱، تیزی راس شیار^۲، ضخامت نمونه، درجه حرارت، سرعت اعمال نیرو و غیره که بطور مختصر به اثرات آنها اشاره می‌شود.

۱-۴-۷- سرعت اعمال نیرو

افزایش سرعت نیروی اعمال شده (ضربه) ممکن است باعث تغییر شکست از نرم به ترد بشود که در نتیجه انرژی جذب شده توسط نمونه کاهش می‌یابد (استحکام ضربه‌ای کم می‌شود). افزایش سرعت نیرو مشابه با کاهش درجه حرارت است که هر دو منجر به افزایش تنش سیلان می‌شود.

¹ Notch Depth

² Notch Tip Sharpness

۷-۴-۲- اثر شیار

جدول ۷-۱ اثر زاویه شیار را بر روی استحکام ضربه ای فولاد نرم^۱ نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود تا زاویه ۶۰ درجه، تغییرات زاویه اثر چندان روی انرژی جذب شده ندارد. در این آزمایش عمق شیار ۵ میلیمتر و شعاع راس شیار ۰/۲۷ میلیمتر است.

جدول ۷-۱ اثر زاویه شیار بر انرژی شکست ضربه ای فولاد نرم

زاویه شیار (درجه)	۰	۳۰	۶۰	۹۰	۱۲۰	۱۵۰	۱۸۰
انرژی جذب شده (فوت-پوند)	۲۲.۱	۲۴.۴	۲۳.۱	۲۵.۹	۴۱.۸	۶۶.۲	۶۳.۱

شعاع راس شیار نیز در انرژی جذب شده موثر است. زیرا هر چه شیار تیزتر باشد تمرکز تنش در راس شیار بیشتر بوده و انرژی لازم برای شکست نمونه کمتر خواهد بود. البته در مواد نرم، شعاع راس شیار، کمتر در نتایج آزمایش موثر است. در جدول ۷-۲ اثر شعاع راس شیار را در انرژی شکست فولادی با ۰/۲۵ درصد کربن (نمونه با شیار V شکل در زاویه ۴۵ درجه به عمق شیار ۲ میلیمتر است) نشان می‌دهد. همچنین عمق شیار و شکل شیار نیز در استحکام ضربه ای موثرند.

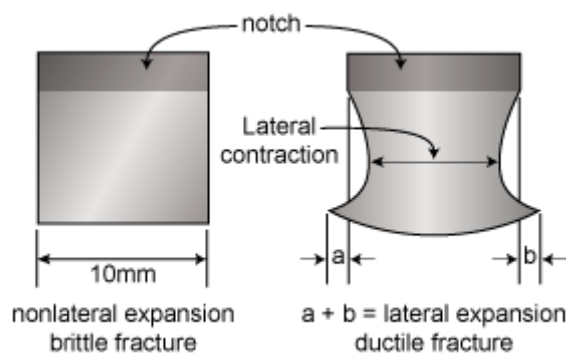
جدول ۷-۲ اثر شعاع راس شیار در انرژی شکست فولادی با ۰/۲۵ درصد کربن

شعاع راس شیار	تیز	۰.۱۷	۰.۳۴	۰.۶۸
انرژی جذب شده (فوت-پوند)	۴	۶.۹	۸.۳	۱۳.۷

۷-۴-۳- اثر درجه حرارت روی استحکام ضربه ای

درجه حرارت اثر مهمی روی استحکام ضربه‌ای و نوع شکست خواهد داشت بطوریکه افزایش درجه حرارت ممکن است نمونه را از صد در صد شکست ترد به صد در صد شکست نرم تغییر دهد. شکل ۷-۷ اثر درجه حرارت را روی یک نمونه که در درجه حرارت‌های ۲۱۲، ۱۰۰، ۴۰ درجه فارنهایت تحت آزمایش ضربه قرار گرفته نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در درجه حرارت ۴۰ درجه شکست صد در صد ترد و در ۲۱۲ درجه شکست صد در صد برش (نرم) می‌باشد و نیز همانطور که دیده می‌شود، شکست نرم ابتدا در سطوح خارجی نمونه (لبه برش)، جایی که فشار سه بعدی کم است ظاهر می‌شود.

^۱ Mild Steel



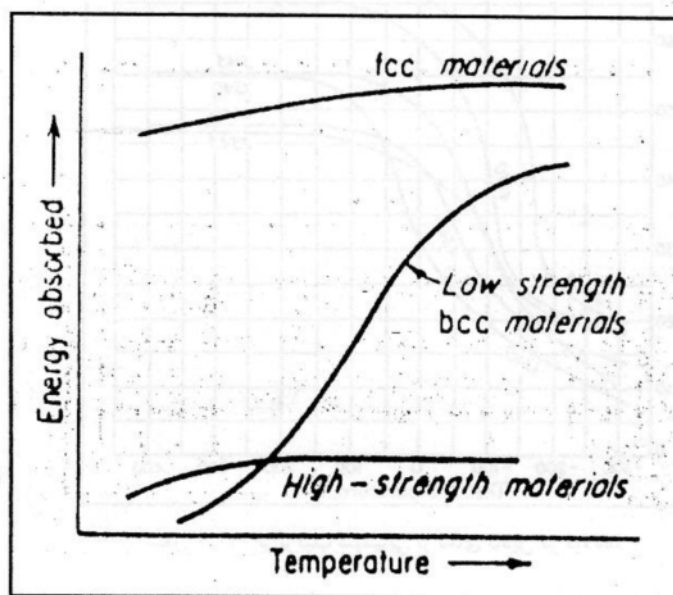
شکل ۷-۷- تصویر واقعی (بالا) و شماتیک (پایین) از اثر درجه حرارت بر سطح شکست در آزمایش شارپی

البته اثر درجه حرارت روی انرژی جذب شده (استحکام ضربه‌ای) بستگی به ساختمان کریستالی و استحکام فلز دارد. فلزات FCC با استحکام کم و متوسط دارای "چقرمگی" زیادی (در مقابل شیار) هستند بطوریکه شکست ترد کمتر اتفاق می‌افتد. لازم به ذکر است در مواردی که این فلزات در محیط‌های شیمیایی فعالی واقع شوند، دستخوش شکست ترد می‌شوند.

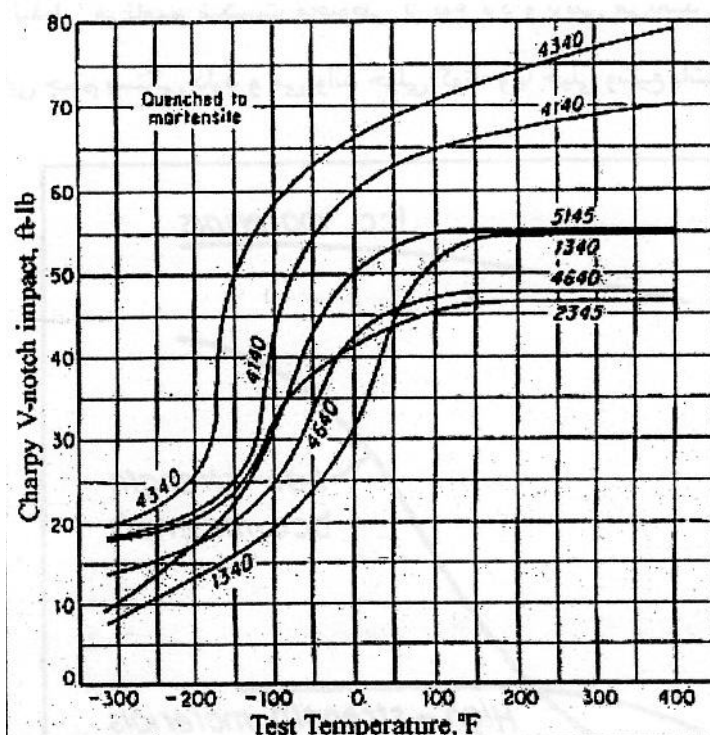
فلزات با استحکام بالا ($\sigma_0 > E/150$) دارای تافنس کمتری (در مقابل شیار) می‌باشند بطوریکه شکست ترد در آنها در تمام درجه حرارتها و با هر سرعت تغییر فرم در ناحیه الاستیکی و با تنش کم اتفاق می‌افتد. فولادهای با استحکام بالا و آلیاژهای آلومینیم و تیتانیوم جزو این گروه هستند. اما فلزات BCC با استحکام کم و یا متوسط از قبیل روی و برلیوم و مواد سرامیکی، تافنس (در مقابل شیار) آنها شدیداً به درجه حرارت بستگی دارد. همانطور که در شکل ۷-۸ دیده می‌شود در درجه حرارت‌های پائین شکست ترد و در درجه حرارت‌های بالا شکست برشی در آنها اتفاق می‌افتد. در بین این درجه حرارت که آنرا فاصله درجه حرارت تبدیلی^۱ می‌نامیم شکست مخلوطی از نوع ترد و برش می‌باشد که اندازه این فاصله بستگی به ترکیب شیمیایی جسم داشته و می‌تواند خیلی کوتاه و یا خیلی وسیع باشد شکل ۷-۹ اثر ترکیب شیمیایی را بر روی فاصله درجه حرارت تبدیل در فولادها نشان می‌دهد. درجه حرارت تبدیل برای فلزات در حدود ۰/۱-۰/۲ نقطه ذوب (در مقیاس کلوین) و برای سرامیکها در حدود ۰/۵-۰/۷ نقطه ذوب (در مقیاس کلوین) می‌باشد. دانستن درجه حرارت

¹ Transition Temperature

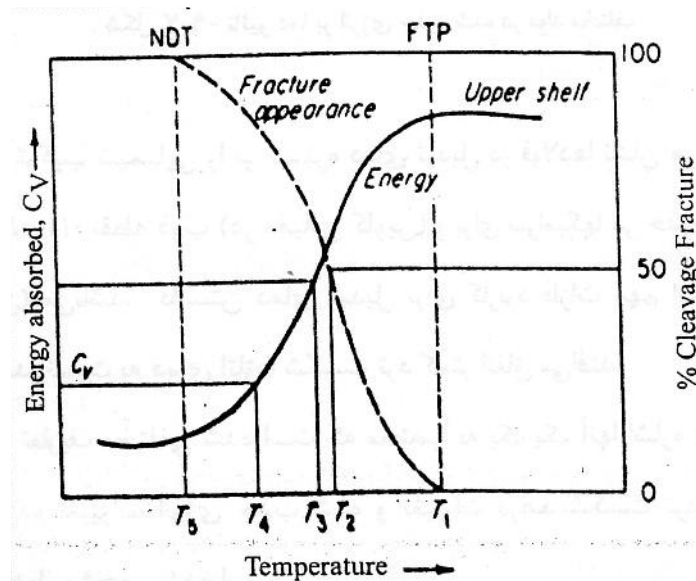
تبدیل برای کاربرد فلزات مهم است زیرا هر چه درجه حرارت تبدیل پایین تر باشد (نسبت به درجه حرارت محیط) شکست ترد کمتر اتفاق می افتد.



شکل ۸-۷- نمودار انرژی جذب شده در دماهای مختلف برای مواد مختلف



شکل ۹-۷- اثر ترکیب شیمیایی بر دمای تبدیل فولادها در آزمایش شارپی



شکل ۱۰-۷- نمودار انرژی جذب شده بر حسب دما و دماهای تبدیلی مهم

برای درجه حرارت تبدیل تعاریف مختلفی شده است که منحصراً به یک یک آنها اشاره می‌کنیم. در شکل ۱۰-۷ که منحنی انرژی جذب شده- درجه حرارت و منحنی درصد شکست ترد- درجه حرارت می‌باشد درجه حرارت‌های اساسی مشخص شده است.

- درجه حرارتی که بالاتر از آن امکان شکست ترد ناچیز است و شکست صد در صد برش می‌باشند. این درجه حرارت را (T_1 طبق شکل ۱۰-۷) درجه حرارت شکست پلاستیکی FTP می‌نامند.

- درجه حرارتی که در آن ۵۰ درصد شکست برشی و ۵۰ درصد شکست ترد باشد این درجه حرارت را (T_2 طبق شکل ۱۰-۷) FATT می‌نامند.

- درجه حرارتی دیگری (T_4 طبق شکل ۱۰-۷) که بعنوان درجه حرارت تبدیل در نظر گرفته می‌شود، درجه حرارتی است که انرژی جذب شده کم باشد. این درجه حرارت را درجه حرارت DTT می‌نامند. (معمولاً انرژی جذب شده را ۱۵ فوت- پوند می‌گیرند)

- درجه حرارتی که در آن هیچ تغییر فرم پلاستیکی انجام نمی‌شود (T_5 طبق شکل ۱۰-۷). در این درجه حرارت؛ شکست صد در صد "تورقی" است و این درجه حرارت را NDT نامند.

- همچنین درجه حرارت را می‌توان میانگین درجه حرارت T_1 و T_5 در نظر گرفت (T_3 طبق شکل ۱۰-۷).

¹ Cleavage

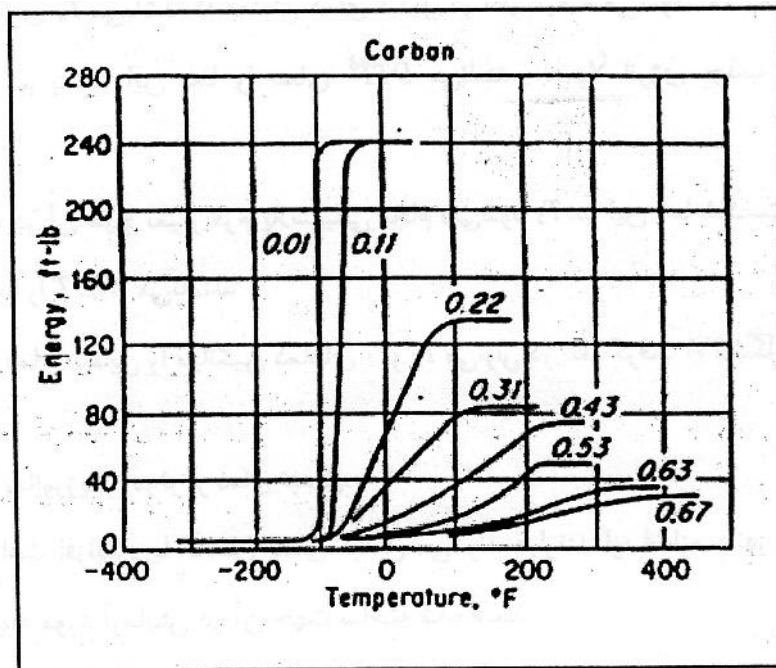
۷-۴-۴- عوامل متالورژیکی موثر در درجه حرارت تبدیل

عواملی که باعث افزایش یا کاهش درجه حرارت تبدیل می‌شوند عبارتند از: اندازه دانه، ترکیب شیمیایی و جهتی که نمونه مورد آزمایش در آن جهت ساخته شده است (بافت^۱ یا جهت‌گیری ترجیحی دانه‌های ماده).

۷-۴-۴-۱- ترکیب شیمیایی

کربن: اثر زیادی در مقدار ماکزیمم انرژی؛ شکل منحنی و درجه حرارت T_4 دارد بطوریکه با افزایش هر ۰/۱ درصد کربن درجه حرارت T_4 حدود 25°F افزایش می‌یابد. شکل ۷-۱۱ اثر کربن را بر درجه حرارت تبدیل و انرژی جذب شده نشان می‌دهد. منگنز: افزایش ۰/۱ درصد منگنز باعث کاهش حدود 10°F در T_4 می‌شود.

فسفر: فسفر اثر شدیدی روی درجه حرارت T_4 دارد بطوریکه با افزایش ۰/۰۱ درصد فسفر T_4 حدود 13°F بالا می‌رود. از این رو فسفر باید کنترل شود و با توجه به اینکه در فولادهای تولیدی در فرآیند "فولادسازی بسمر"^۲ فسفر زیادی است لذا این فولادها در درجه حرارت‌های کم، کاربردی ندارند.



شکل ۷-۱۱- اثر کربن بر روی منحنی انرژی- درجه حرارت تبدیل برای فولادها

¹ Texture (Preffered Grain Orientaition)

² Bessmer Steel Making

اکسیژن: برای آهن با درجه خلوص بالا اگر مقدار اکسیژن بالاتر از ۰/۰۳ درصد باشد باعث شکست بین دانه‌ای شده و انرژی جذب کم خواهد بود. چنانچه درصد اکسیژن از ۰/۰۰۱ به ۰/۵۷ درصد برسد درجه حرارت تبدیلی از 5°F به 650°F می‌رسد لذا اکسیژن زدایی روی درجه حرارت تبدیل اثر قابل ملاحظه‌ای دارد.

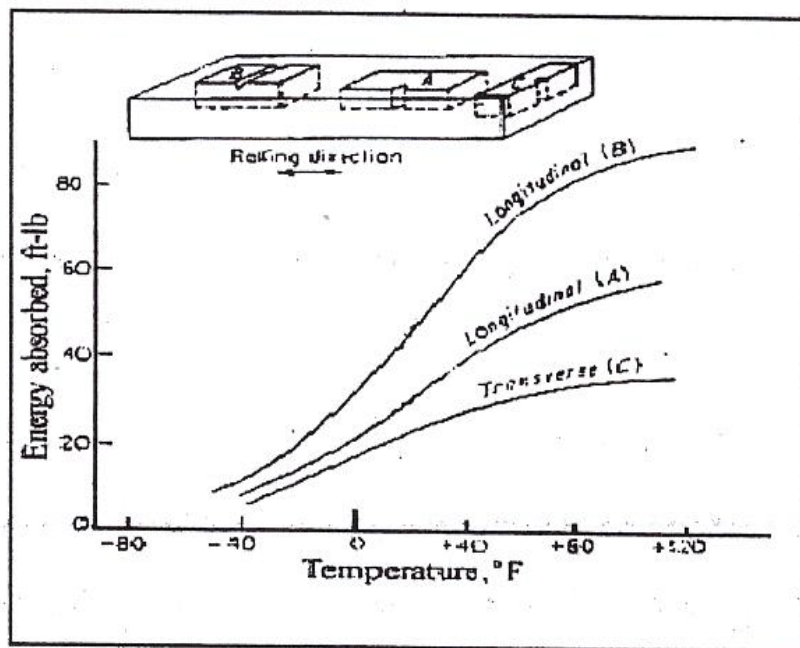
- فولادهای جوشان: که دارای مقدار زیادی اکسیژن است با درجه حرارت تبدیل آن حدود درجه حرارت اتاق است.
 - فولادهای نیمه آرام: که با سیلیس اکسیژن زدایی شده درجه حرارت تبدیلی آن کمتر است.
 - فولادهای آرام: که با سیلیس و آلومینیم اکسیژن زدایی شده درجه حرارت تبدیلی T₄ حدود 75°F- است.
- سایر عناصر هم در درجه حرارت تبدیل موثرند. نیکل بیش از ۲ درصد باعث کاهش درجه حرارت T₄ و سیلیسیم بیش از ۰/۲۵ درصد باعث بالا رفتن درجه حرارت تبدیل و مولیبدن نیز مانند کربن و با همان سرعت درجه حرارت تبدیل را بالامی‌برد.

۷-۴-۲- اندازه دانه

اندازه دانه اثر شدیدی روی درجه حرارت تبدیل دارد به طوریکه افزایش یک عدد ASTM (کاهش اندازه دانه) در دانه‌های فریتی باعث کاهش درجه حرارت تبدیل به میزان 30°F در فولادها خواهد شد. همچنین کاهش اندازه دانه از ۵ به ۱۰ ASTM درجه حرارت تبدیل به میزان 70°F به 60°F- می‌رسد. همین کاهش درجه حرارت نیز با کاهش اندازه دانه‌های آستنیت نیز پیش می‌آید.

۷-۴-۳- اثر جهت نمونه

برای فلزاتی که کار سرد از قبیل نورد و یا عملیات دیگر روی آنها انجام شده، جهتی که نمونه آزمایش در آن جهت انتخاب می‌شود در انرژی جذب شده و نیز درجه حرارت تبدیل موثر است. شکل ۷-۱۲ انرژی جذب شده درجه حرارت را برای سه نمونه که درجات مختلف یک صفحه نورد شده انتخاب شده اند نشان می‌دهد. نمونه C در جهت عمود بر نورد و نمونه‌های A و B در جهت نورد می‌باشند. با این تفاوت که جهت شیار در نمونه‌های A با B فرق می‌کند.



شکل ۷-۱۲- تاثیر جهت نمونه برداری بر انرژی ضربه

۷-۵- هدف آزمایش

هدف ما از انجام این آزمایش تعیین مقاومت ضربه‌ای مواد و بررسی اثر درجه حرارت بر روی استحکام ضربه و نوع شکست می‌باشد.

۷-۶- روش انجام آزمایش

- روش کار با دستگاه ضربه موجود در آزمایشگاه را به دقت بیاموزید و در استفاده از آن به دلیل خطرات احتمالی حتما مسائل ایمنی را رعایت کنید.
- چهار نمونه شاپی از یک نوع فولاد کربنی را مطابق استاندارد تهیه کنید.
- ابعاد نمونه‌ها را اندازه گیری کنید.
- برای بررسی اثر دما بر انرژی شکست، نمونه‌ها را در دماهای مختلف (مخلوط آب- یخ، دمای محیط، آب جوش و کوره تحت دمای 200 درجه سانتیگراد) قرار دهید.
- هر نمونه را بعد از رسیدن به دمای مورد نظر بلافاصله زیر دستگاه قرار داده و با رعایت اصول ایمنی پاندول را رها کرده و تحت آزمایش ضربه قرار دهید.

- برای هر نمونه در هر درجه حرارت تغییرات ابعاد نمونه، درصد شکست ترد و زاویه پاندول بعد از شکست را ثبت کنید.

فرمول‌های مربوط به دستگاه ضربه موجود در آزمایشگاه و ابعاد و مشخصات فنی آن در جدول ۷-۳ و ۷-۴ آمده است.

جدول ۷-۳- روابط مورد نیاز برای محاسبه انرژی شکست

انرژی پتانسیل در حالت A	$U_A = m_1 g * \frac{l}{2} * \{ \sin(\theta_1 - 90) + 1 \} + m_2 g(l + r) \{ \sin(\theta_1 - 90) + 1 \}$
انرژی پتانسیل در حالت B	$U_B = m_1 g * \frac{l}{2} * \{ \sin(\theta_2 - 90) + 1 \} + m_2 g(l + r) \{ \sin(\theta_2 - 90) + 1 \}$
انرژی لازم برای شکست	$U = U_A - U_B$
مقاومت در مقابل ضربه	$K = \frac{U}{A}$

جدول ۷-۴- اطلاعات دستگاه ضربه موجود در آزمایشگاه برای محاسبه انرژی ضربه

ممان اینرسی کل نسبت به محور گردش	6.36Kg	وزن چکش	196mm	قطر دایره چکش	4.78 kg.m ²
فاصله مرکز جرم تا محور	3.16kg	وزن محور	610mm	طول محور	625mm
= وزن کل پاندول = 6.5+4.7+(2*2.15)=15.5	12.26kg	جرم مجموعه	29mm	قطر محور	

۷-۷- خواسته‌های آزمایش

۱. مقادیر انرژی شکست برای هر نمونه را محاسبه (با نوشتن جزئیات محاسبات در متن گزارش آزمایشگاه) و نتیجه محاسبات را در جدول ۷-۵ گزارش نمایید.

جدول ۷-۵- نتیجه محاسبات تست ضربه برای نمونه فولادی تحت دمای مختلف

ضریب مقاومت جسم به ضربه	درصد شکست ترد	انرژی شکست	زاویه شکست	دمای نمونه
				مخلوط آب-یخ
				محیط
				آب جوش
				کوره

۲. منحنی انرژی شکست برحسب درجه حرارت و همچنین منحنی درصد شکست ترد برحسب درجه حرارت را در یک تصویر رسم کرده و محدوده دماهای NDT، FTP و FATT را بدست آورید.
۳. مقطع شکست را بصورت چشمی مشاهده و تصویربرداری کنید و توضیح دهید چه نوع شکستی در هر مقطع مشاهده می‌کنید.

آزمایش هشتم: مطالعه رفتار خستگی مواد (تست خستگی)

۸-۱- مقدمه

وقتی فلزی تحت تنش یا بارگذاری تناوبی^۱ قرار می‌گیرد در تنشی به مراتب پایین تر از تنش لازم برای شکست فلز در حالتی که تحت بارگذاری‌های استاتیکی^۲ 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^۳ نامیده می‌شود. شکست در اثر خستگی ناگهانی و به صورت ترد می‌باشد. از نقطه نظر میکروسکوپی 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 اشاعه ترک و به هم سائیدن شدن دو سطح ترک به وجود می‌آید و منطقه زبر وقتی به وجود می‌آید که سطح باقیمانده تحمل نیروی وارده را نداشته باشد و به صورت ترد می‌شکند، شکل ۸-۱. برای شکست در اثر خستگی سه عامل اصلی لازم است که عبارتند از:

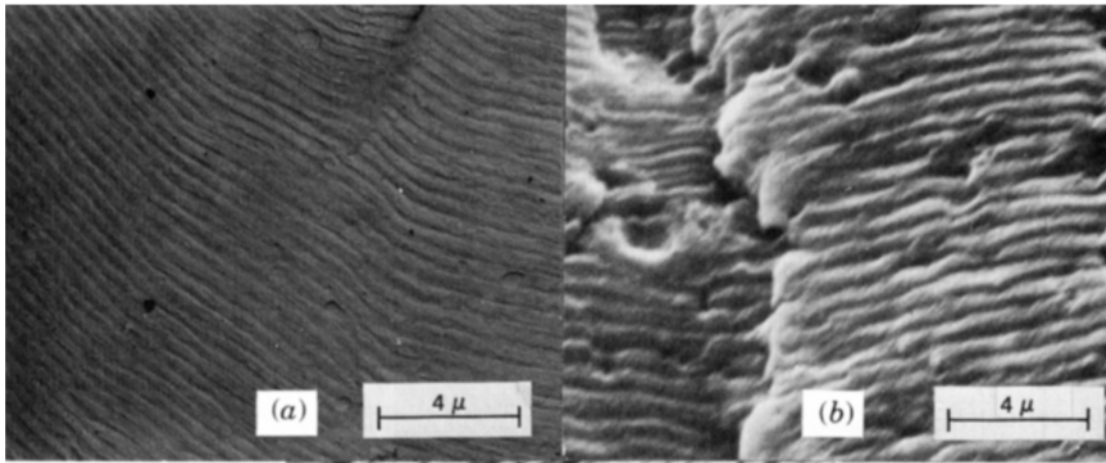
- مقدار بالای تنش کششی
- تغییرات زیاد و کافی در تنش اعمال شده
- تعداد سیکل های زیاد و کافی.

البته عوامل دیگری از قبیل تمرکز تنش، خوردگی، دما، بار اضافی، ساختار متالورژیکی، تنش های پسماند و ... نیز بر خستگی یک ماده تأثیر گذار است.

¹ Cyclic Loading
² Monotonic Loading
³ Fatigue Failure



(الف)

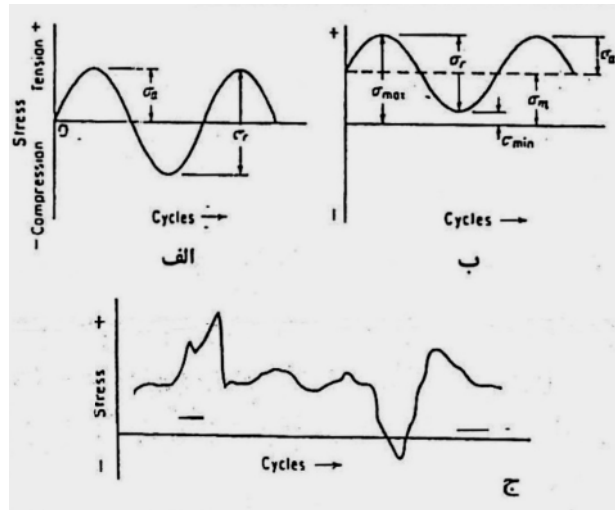


(ب)

شکل ۸-۱-الف) تصویر ماکروسکوپی سطح شکست خستگی و شروع ترک خستگی از سطح (با فلش مشخص شده است). (ب) پدیده striation منظم برای سطح شکست خستگی در تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی.

۸-۲- تنش های تناوبی

ابتدا بهتر است انواع تنش های تناوبی که منجر به خستگی میشوند، تعریف شوند. در شکل ۸-۲ سه نوع تنش تناوبی دیده می شود. در شکل ۸-۲-الف منحنی تنش تناوبی به صورت سینوسی است که بیشتر در محور هایی که با سرعت ثابت در حال دوران هستند دیده می شود. در این نوع بارگذاری، تنش ماکزیمم و تنش مینیمم با هم مساوی هستند. تنش کششی را مثبت و تنش فشاری را منفی در نظر می گیرند. در شکل ۸-۲-ب تنش ماکزیمم و تنش مینیمم با هم برابر نیستند. در این شکل هر دو تنش کششی می باشند. اما می تواند تنش ماکزیمم کششی و مینیمم فشاری نیز باشد. شکل ۸-۲-ج نشان دهنده یک نوع تنش تناوبی پیچیده است که در قسمت هایی مانند بال هواپیما که تحت وزش باد می باشد اتفاق می افتد.



شکل ۸-۲- انواع تنش‌های تناوبی که منجر به خستگی می‌شوند.

برای نشان دادن رفتار یک جسم در مقابل خستگی از منحنی S-N استفاده می‌شود. محور عمودی تنش (S) و محور افقی در مقیاس لگاریتمی تعداد چرخه تا شکست ($\log N$) می‌باشد. تنش می‌تواند بر حسب σ_{\max} ، σ_{\min} و یا σ_a باشد. معمولاً این منحنی برای مقادیر معین σ_m رسم می‌شود. σ_{\max} و σ_{\min} به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار تنش در بارگذاری سیکلی می‌باشد و دامنه تنش^۱ (σ_a) و تنش میانگین^۲ (σ_m) از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (۱-۸)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (۲-۸)$$

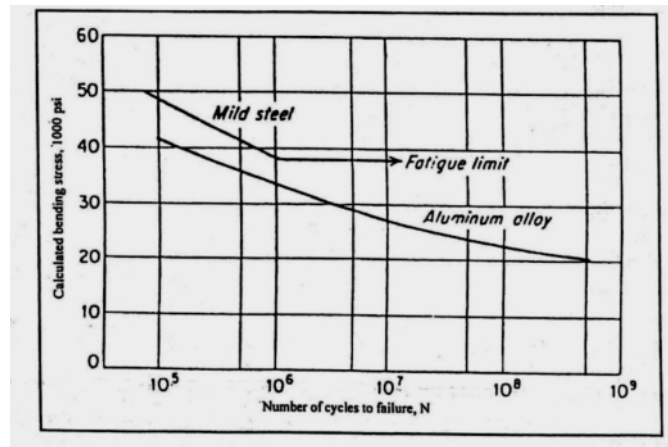
لازم به ذکر است بیشتر خواص خستگی فلزات در حالت $\sigma_m = 0$ تعیین می‌شود. شکل ۸-۳ منحنی S-N را برای فولاد و فلزات غیرآهنی نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۸-۳ دیده می‌شود، تعداد چرخه‌هایی که نمونه قبل از شکست می‌تواند تحمل کند با کاهش تنش افزایش می‌یابد و نیز دیده می‌شود که برای بعضی از مواد مانند فولاد و تیتانیوم منحنی S-N در تنش معینی افقی می‌شود. در تنش‌های کمتر از این تنش، که حد خستگی^۳ نامیده می‌شود ماده می‌تواند بدون شکست چرخه‌های نامحدودی را تحمل کند. ولی در مورد بیشتر فلزات مانند آلومینیوم، منیزیم و آلیاژهای مس منحنی S-N با شیبی 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 بعنوان مثال در 10^7 چرخه تعریف می‌شود. برای رسم منحنی S-N اولین نمونه را تحت تنش بالا قرار داده تا شکست در تعداد سیکل اندک اتفاق بیافتد (به عنوان مثال

^۱ Stress Altitude

^۲ Mean Stress

^۳ Fatigue Limit

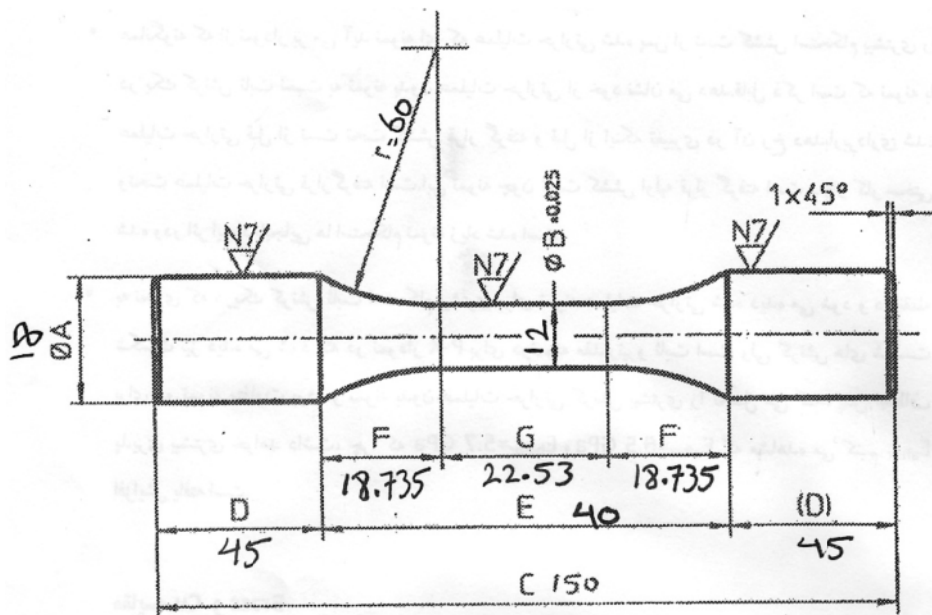
در تنش حدود ۲/۳ استحکام کششی) سپس تنش را کم کرده و نمونه‌ها را در تنش‌های پایین‌تر تحت آزمایش قرار داده تا جاییکه یک یا دو نمونه در تعداد معینی چرخه (که معمولاً 10^7 چرخه است) دچار شکست نشوند. بیشترین تنش را که در آن شکست اتفاق نیافتد به عنوان حد خستگی در نظر می‌گیرند. در مورد فلزاتی که حد خستگی ندارند آزمایش خستگی تا 10^8 یا 5×10^8 سیکل ادامه می‌یابد. معمولاً منحنی S-N با ۸ تا ۱۲ نمونه رسم می‌شود.



شکل ۸-۳- منحنی S-N برای فولادها و فلزات غیر آهنی

۸-۳- هدف آزمایش

در این آزمایش فولاد Ck 45 در تنش‌های مختلف تحت آزمایش خستگی قرار گرفته و منحنی S-N آن رسم می‌شود.



شکل ۸-۴- تصویر نمونه استاندارد خستگی مطابق استاندارد DIN 5623

۸-۴- دستور کار آزمایش

- ۱- چند نمونه استوانه‌ای مطابق استاندارد DIN 5623 (شکل ۸-۴) از جنس فولاد Ck 45 تراشکاری کنید.
- ۲- سطح نمونه را به دقت و به نحو مطلوبی پرداخت نمایید.
- ۳- قطر نمونه را با کولیس به دقت اندازه‌گیری کنید.
- ۴- طریقه کار کردن با دستگاه تست خستگی را بدقت بیاموزید.
- ۵- نمونه را داخل فک‌ها قرار داده و پیچ فک‌ها را محکم ببندید.
- ۶- مطابق فرمول زیر (مخصوص دستگاه خستگی موجود در آزمایشگاه) میزان وزنه لازم برای اعمال بار مورد نظر را تعیین نمایید.

$$G = \frac{\pi d^3 \sigma}{313920} \text{ kg} \quad (8-3)$$

- در این رابطه d قطر نمونه و σ مقدار تنش اعمالی مورد نظر است.
- ۷- مقدار وزنه تعیین شده با ترازوی دقیق بدقت توزین گردد.
 - ۸- بعد از کنترل و تنظیم دور موتور دستگاه و صفر نمودن شمارنده تعداد دور دستگاه، وزنه توزین شده در محل اعمال بار قرار داده شود و تست آغاز گردد.
 - ۹- تا شکست نهایی نمونه تست ادامه می‌یابد و پس از شکست تعداد دور تا شکست نمونه قرائت می‌شود.
 - ۱۰- مراحل فوق با بار متفاوت روی نمونه دیگر تکرار می‌شود و اطلاعات تعداد چرخه تا شکست نمونه‌ها در تنشهای مختلف اندازه‌گیری می‌شود.

۸-۵- خواسته‌های آزمایش

- ۱- نمودار S-N را رسم نمایید.
- ۲- خطاهای آزمایش را ذکر کنید

آزمایش نهم: مطالعه رفتار خزشی مواد (تست خزش)

۹-۱- مقدمه

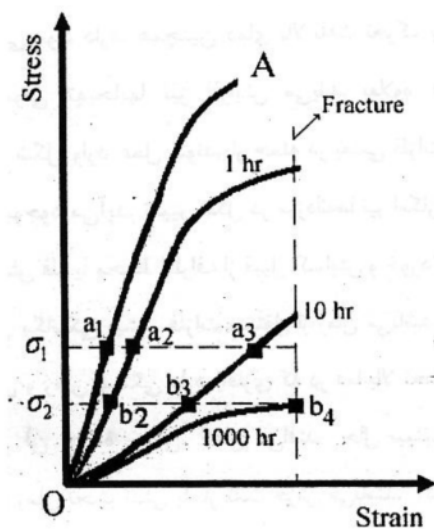
استحکام فلزات با افزایش درجه حرارت، کاهش یافته و حرکت اتم‌ها سریعتر می‌شود. در درجه حرارت‌های بالا نفوذ اتمی اثر مهمی بر خواص مکانیکی مواد دارد. همچنین درجه حرارت بالا باعث تحرک بیشتر نابجائی‌ها بوسیله مکانیزم صعود شده و کسر مولی تهی‌جای‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین در درجه حرارت‌های بالا ممکن است مکانیزم‌های دیگر تغییر شکل وارد عمل شود، از جمله در بعضی فلزات سیستم لغزش تغییر کند یا سیستم لغزش جدیدی بوجود می‌آید.

تغییر شکل در مرزخانه‌ها نیز امکان دارد در درجه حرارت بالا اتفاق بیافتد. از طرفی در درجه حرارت بالا واکنش فلز با محیط اطراف از قبیل اکسیداسیون و خوردگی نیز باید در نظر گرفته شود.

در درجه حرارت‌های پایین خواص مکانیکی بیشتر فلزات مستقل از زمان می‌باشد ولی در درجه حرارت‌های بالا استحکام بستگی به سرعت تغییر طول نسبی و زمان دارد. وقتی فلزی در درجه حرارت بالا تحت نیروی ثابت کششی (یا تنش ثابت) قرار می‌گیرد، در آن زمان خزش^۱ اتفاق می‌افتد. حال ببینیم خزش چیست؟ تغییر شکل تدریجی فلز را نسبت به زمان تحت تنش یا بار ثابت خزش می‌نامند. اگرچه خزش در تمام درجه حرارت‌ها اتفاق می‌افتد و حتی در درجه حرارت هلیوم مایع نیز مشاهده شده است، اما از نقطه نظر عملی خزش فلزات و آلیاژهای مهندسی در درجه حرارت‌های بالا اهمیت دارد. در درجه حرارت‌های پایین، فلزات در تنشهایی بیشتر از تنش حد الاستیک تغییر شکل پلاستیک خواهند داد ولی تغییر طول نسبی پلاستیکی آنها، کم و بیش لحظه‌ای و آنی بوده و ادامه اعمال تنش ثابت، اثر کمی بر تغییر طول نسبی خواهد داشت. اگر درجه زیاد شود، تحت تنش ثابت فلز شروع به تغییر شکل پلاستیکی کرده و چنانچه زمان نگهداری در این درجه حرارت به اندازه کافی باشد سرانجام خواهد شکست. در شکل ۹-۱ نمودار این خاصیت رسم شده است. چنانچه در منحنی OA آزمایش در درجه حرارت پایین متوقف شده و فلز تحت تنش یا نیروی ثابت باقی بماند اثری جزئی از خزش پدیدار می‌شود. اما اگر آزمایش در درجه حرارت‌های بالا متوقف شود با اعمال نیرو یا تنش ثابت بر نمونه، نمونه با سرعتی که بستگی به نیرو و درجه حرارت دارد، کشیده خواهد شد. هرچه دما و نیرو بیشتر باشد، سرعت ازدیاد طول نسبی نیز بیشتر خواهد بود. در شکل ۹-۱، در مدت زمان یک ساعت و تحت تنش σ_1 کشیدگی فلز از میزان لحظه ای a_1 به a_2 و در ۱۰ ساعت به a_3

^۱ Creep

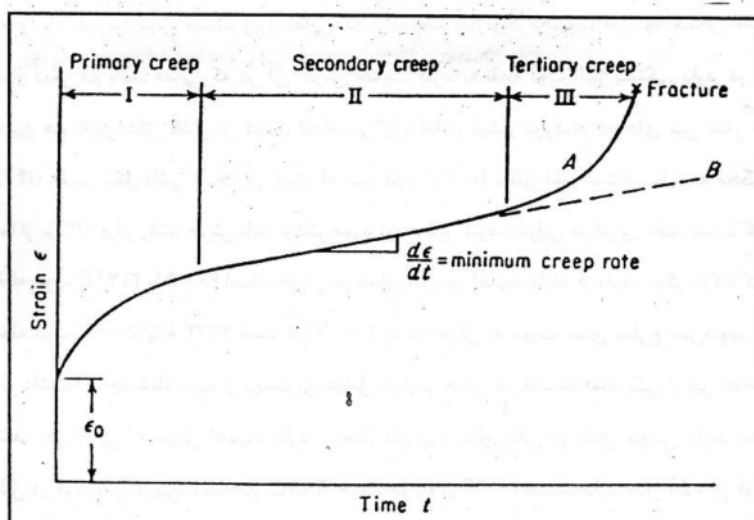
می‌رسد. در تنش کمتر مانند σ_2 ، فلز در یک ساعت فقط تا b_2 و در ۱۰ ساعت فقط تا b_3 کشیدگی دارد. ممکن است اگر آزمایش تا ۱۰۰۰ ساعت ادامه یابد، فلز در b_4 گسیخته شود.



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

۹-۲- مراحل خزش

همانطور که در اهداف مهندسی، خواص مکانیکی فلز معمولاً بوسیله منحنی تنش- ازدیاد طول نسبی ($\sigma - \epsilon$) تشریح می‌شود. در خزش نیز بوسیله منحنی‌های ازدیاد طول نسبی- زمان ($\epsilon - t$) در درجه حرارت و تنش ثابت نشان داده می‌شود. در شکل ۹-۲ فرم کلی منحنی خزش رسم شده است. به طور کلی خزش از سه مرحله به اضافه یک مرحله مقدماتی تشکیل می‌شود. مرحله مقدماتی شامل تغییر شکل اولیه لحظه‌ای ϵ_0 است که در حین اعمال نیرو در اول آزمایش ایجاد می‌شود.



شکل ۹-۲- فرم کلی منحنی‌های خزش

مرحله اول خزش اولیه یا گذرا^۱ نامیده می‌شود سرعت خزش مرتب کاهش یافته و مقاومت خزشی مواد به علت کار سختی ایجاد شده افزایش می‌یابد. مرحله دوم^۲ به نام خزش ثانویه یا حالت پایدار^۳ نامیده می‌شود و مهم‌ترین مرحله خزش در عملیات صنعتی می‌باشد. در این مرحله مواد دارای سرعت خزش^۴ ثابت هستند. یعنی ازدیاد طول نسبی نسبت به زمان ثابت است. شیب خط در این مرحله به عنوان نرخ خزش شناخته می‌شود. این مرحله ممکن است سالها طول بکشد. این مرحله گاهی خزش بازیابی نیز نامیده می‌شود. در این شرایط نرخ بازیابی^۵ به اندازه کافی زیاد و سرعت کار سختی^۶ (سخت شدن) ماده بر اثر تغییر شکل پلاستیک به اندازه کافی کم می‌باشد بطوریکه این دو مکانیزم به یک حالت توازن می‌رسند. لذا در این مرحله داریم:

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

با توجه به انجام خزش در تنش ثابت، یعنی ثابت مانده تنش حین تغییر شکل، پس $d\sigma = 0$ و در نتیجه رابطه فوق بصورت زیر خواهد بود:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{\frac{\partial\sigma}{\partial t}}{\frac{\partial\sigma}{\partial\varepsilon}} = -\frac{r}{h} \quad (2-9)$$

در این رابطه $\dot{\varepsilon}$ نرخ خزش یا آهنگ کرنش به زمان، r آهنگ بازیابی و h آهنگ کارسختی می‌باشد.

مرحله نهایی خزش سومین^۷ 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) 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، مخصوصاً وقتی از تنش 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 یا نرم شده و در نتیجه باعث از بین رفتن مرحله دوم خزش می‌شوند.

¹ First Stage Creep
² Second Stage Creep
³ Steady State Creep
⁴ Creep Rate
⁵ Recovery Rate
⁶ Hardening Rate
⁷ Third Stage Creep

۹-۳- عوامل موثر بر رفتار خزشی

۹-۳-۱- اثر درجه حرارت

اصولاً خزش در مواد مهندسی پدیدار است و به درجه حرارت‌های بالا مربوط می‌شود ولی باید بدانیم درجه حرارت بالا عبارت رسائی نیست زیرا درجه حرارتی که برای یک آلیاژ بالا محسوب می‌شود ممکن است برای آلیاژ دیگر کم باشد. درجه حرارتی که در آن خزش اهمیت دارد به نقطه ذوب آلیاژ بستگی دارد. در درجه حرارت‌های پایین هم تغییر شکل ناشی از خزش انجام می‌گیرد، اما در بیشتر موارد در درجه حرارت‌های فراتر از $T_m/3$ ، خزش باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد. بنابراین در فلزی مانند سرب که دارای نقطه ذوب 327°C یا 500°K است خزش در درجه حرارت اتاق نیز اهمیت دارد. از طرف دیگر فولاد که دارای نقطه ذوب 1500°C یا 1773°K است تا 300°C عامل خزش مشکلی ایجاد نخواهد کرد. باید در نظر داشت نقطه ذوب که از مهم‌ترین عوامل موثر در خزش است فقط یکی از عوامل موثر در خزش می‌باشد. در درجه حرارتی که خزش اهمیت پیدا می‌کند ساختار کریستالی و متالورژیکی ماده نیز نقش مهمی دارند. بعنوان مثال در فولادهای فریتی با ساختمان BCC خزش در بالای 300°C اهمیت دارد حال آنکه در فولاد ضد زنگ آستنیتی (FCC) خزش حتی تا قبل از 500°C مشکلی ایجاد نخواهد کرد. با وجود اینکه دو فولاد دمای ذوب تقریباً نزدیکی دارند.

لازم به ذکر است که ارتباط بین نقطه ذوب و مقاومت خزش نباید جدا از دیگر عوامل که می‌توانند بسیار موثر باشند بررسی شود. سالها عقیده بر این بود که تغییر شکل خزشی فرآیندی است که به وسیله حرارت برانگیخته شده و فرمول مشهور آرنیوسی بر آن حکم می‌کند.

$$\dot{\epsilon} = \alpha \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3-9)$$

در رابطه فوق $\dot{\epsilon}$ سرعت خزش، Q انرژی محرکه^۱ لازم برای خزش، T درجه حرارت مطلق و R ثابت گازها است. بنابراین با افزایش درجه حرارت سرعت خزش بطور توانی افزایش می‌یابد. انرژی محرکه Q برای سیستم‌های زیادی اندازه‌گیری شده است و یک روش ساده برای اندازه‌گیری آن عبارت از تغییر ناگهانی شرایط آزمایش خزش یعنی وقتی از تنش σ_1 و درجه حرارت T_1 به تنش σ_2 و درجه حرارت T_2 و محاسبه آن از روی تغییر سرعت خزش و با استفاده از فرمول زیر می‌باشد.

$$Q = \frac{R \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_1}{\dot{\epsilon}_2}\right)}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \quad (4-9)$$

^۱ Activation Energy

بررسی انرژی محرکه اندازه گیری شده برای خزش نشان می‌دهد که در فلزات خالص مقدار انرژی محرکه برای خزش در بالاتر از $0.5T_m$ تقریباً مساوی با انرژی محرکه برای نفوذ در خود^۱ اتمها می‌باشد. در مورد آلیاژها، انرژی محرکه برای خزش معمولاً با انرژی محرکه لازم برای نفوذ حضور یکی از عناصر آلیاژی مساوی است. بنابراین می‌توان چنین استنباط نمود که در درجه حرارت بالا خزش تحت تاثیر مکانیزمهایی است که در آن مکانیزمها توسط نفوذ در خود اتمها کنترل می‌شود. بنابراین عواملی که باعث سخت شدن مواد در درجه پایین می‌شوند در درجه حرارت‌های بالا دیگر تاثیر چندانی نخواهد داشت.

اثر نفوذ، مخصوصاً در مورد کربن در آهن γ به خوبی روشن شده است. با افزایش درصد کربن سرعت نفوذ در خود اتمهای آهن در فاز گاما بیشتر شده و سرعت خزش نیز افزایش می‌یابد. بنابراین برخلاف انتظار (با در نظر گرفتن سخت کنندگی کربن بر آهن) اضافه کردن کربن عملاً مقاومت خزشی^۲ را کم می‌کند. بهبود زیاد مقاومت خزشی آهن γ (FCC) در مقایسه با آهن α (BCC) نیز به کاهش سرعت نفوذ در خود آهن، هنگامیکه در 910°C از حالت α به γ تغییر حالت می‌دهد نسبت داده شده است. همچنین سرعت خزش با سرعت صعود نابجائی^۳ها متناسب است و از طرفی سرعت صعود نابجائیها بوسیله سرعت نفوذ اتمها کنترل می‌شود.

۹-۳-۲- اثر تنش

سرعت خزش بستگی به مقدار تنش دارد و در اکثر موارد سرعت خزش ثانویه بصورت تابع توانی از تنش تغییر می‌کند که با معادله زیر نشان داده می‌شود.

$$\dot{\epsilon} = K\sigma^n \quad (9-5)$$

$\dot{\epsilon}$ سرعت تغییر طول نسبی، σ تنش، K و n ثابت هستند. براساس تحقیقات گوناگون، برای بسیاری از فلزات خالص و آلیاژها n در حدود 3-5 می‌باشد. با توجه به فرمول فوق اگر تنش در خزش ۲ برابر شود سرعت خزش معمولاً ۸ تا ۳۳ برابر می‌شود و البته این قانون کلی دارای استثناهایی نیز می‌باشد. به عنوان مثال در نزدیکی نقطه ذوب بعلافت رفتار فلزات درجه حرارت سرعت خزش با تنش به صورت خطی تغییر می‌کند نیز $n=1$ می‌شود. بنابراین کاملاً مشخص است که n بستگی به درجه حرارت دارد. ضمناً بعضی از مواد دارای توان بسیار بالایی هستند. برای مثال مقادیری از n در حدود ۲۰ نیز مشاهده شده است. در این صورت دیگر رابطه $\dot{\epsilon} = K\sigma^n$ صادق نیست و وابستگی سرعت خزش با تنش به صورت رابطه زیر در می‌آید:

¹ Self Diffusion

² Creep Resistant

³ Dislocation Climb

$$\dot{\epsilon} = A \exp(B\sigma) \quad (6-9)$$

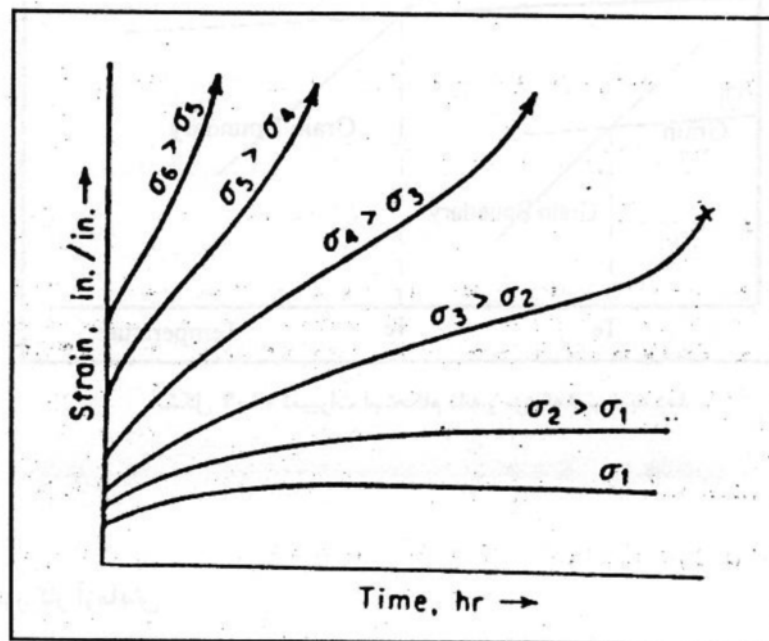
با وجود اینکه این فرمول غالباً برای خزش ثانویه در تنش‌های زیاد ذکر شده است، ولی در سرعت‌های خزشی و تنش‌هایی که بنظر می‌رسد باید فرمول فوق صادق باشد، ممکن است هرگز سرعت‌های ثانویه خزش واقعی دید نشده و خزش سومین روی دهد.

توانهای معمولی تنش که در محدوده 3-5 مشاهده می‌شوند، می‌توانند بوسیله تئوریهای صعود نابجائیها توضیح داده شوند. با تجمع نابجائیها پشت موانع موجود مانند، ذرات یا مرزدانه‌ها کار سختی ایجاد می‌شود. نابجائیها با صعود می‌توانند از محل تجمع بگریزند. وقتی سرعت‌های کار سختی و بازیابی برابر شود شرایط خزش ثانویه بوجود آمده و در آن حالت سرعت خزش بوسیله سرعت صعود نابجائیها کنترل می‌شود. معادله سرعت خزش در تنش‌های کم از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$\dot{\epsilon} = \frac{c\sigma^{4.5}D}{N^{0.5}GkT} \quad (7-9)$$

در رابطه فوق $\dot{\epsilon}$ سرعت خزش ثانویه، c ثابت، σ تنش، D ضریب نفوذ در خود، N چگالی نابجائیهای که در صعود شرکت می‌کنند، G ضریب برشی، k ثابت بولتزمن و T درجه حرارت مطلق می‌باشد.

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

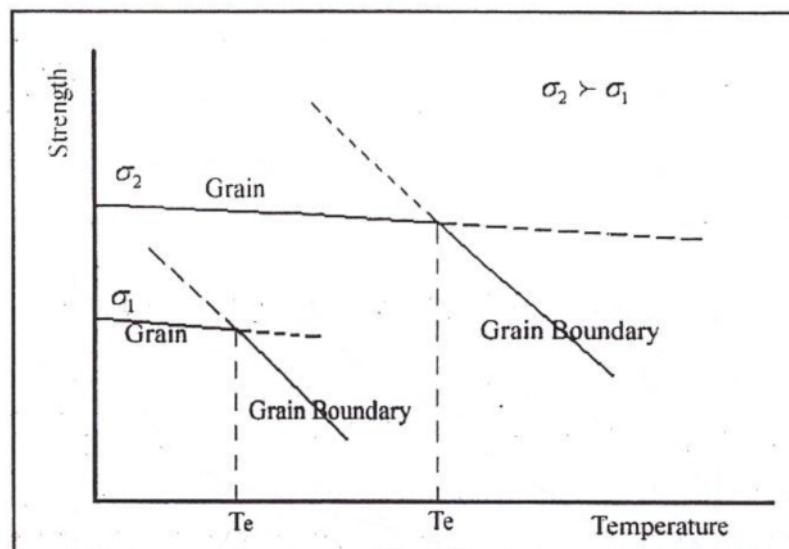


شکل ۳-۹- اثر تنش بر منحنی خزش مواد

۹-۳-۳- نقش مرزدانه‌ها

شکل ۹-۴ تغییرات استحکام دانه و مرزدانه را نسبت به درجه حرارت نشان می‌دهد. در اثر افزایش درجه حرارت استحکام مرزدانه، بیشتر از استحکام دانه‌ها افت پیدا می‌کند و این در منحنی در T_e (درجه حرارتی که استحکام دانه و مرزدانه با هم برای است) همدیگر را قطع می‌کنند. با تنش و سرعت تغییر شکل نسبی تغییر می‌کند و هر چه تنش بالاتر باشد T_e نیز بالاتر است.

به آسانی می‌توان دید که در درجه حرارت‌های پایین استحکام در مرزدانه بیشتر بوده و هر چه مرزدانه‌ها بیشتر یعنی دانه‌ها کوچکتر باشند، استحکام و مقاومت در مقابل تغییر شکل نیز بطور چشمگیر زیاده‌تر است و در درجه حرارت‌های بالا عکس مطالب فوق صادق است، این مرزدانه منبع ضعف است دانه بندی نیز باعث کاهش استحکام خزش می‌شود. بخصوص وقتی که سرعت آزمایش کم باشد.



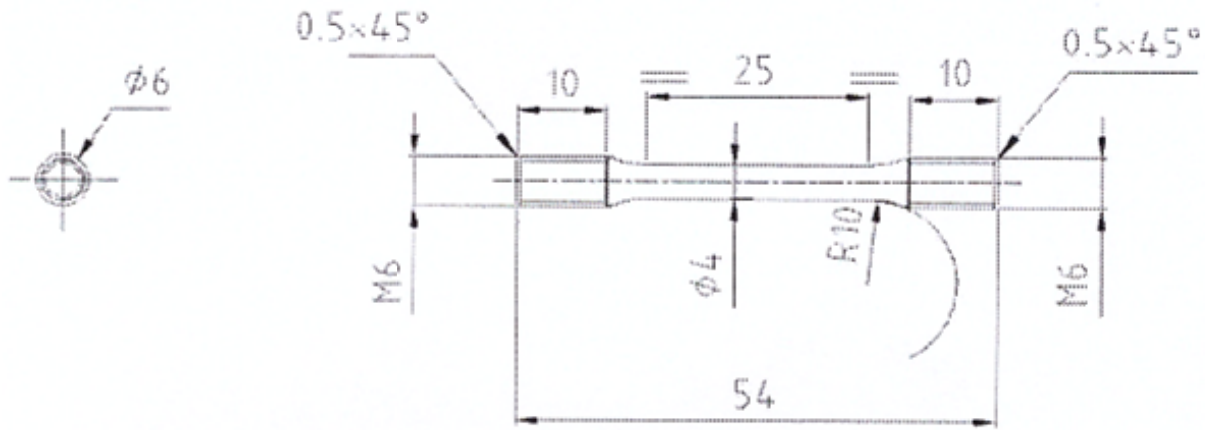
شکل ۹-۴- تغییرات استحکام مرزدانه نسبت به درجه حرارت

۹-۴- هدف آزمایش

هدف از این آزمایش مطالعه تاثیر دما بر رفتار خزشی یک نمونه فولاد گرم‌کار می‌باشد. در این آزمایش به علت محدودیت زمانی سطح تنش و دماهای بالا انتخاب می‌شود تا نمونه در مدت زمان معقول و کوتاه با توجه به زمان آزمایشگاه پاره می‌شود.

۵-۹- دستور کار آزمایش

• نمونه استاندارد مطابق شکل ۵-۹ را تهیه کنید.



شکل ۵-۹- نقشه نمونه استاندارد قابل استفاده برای دستگاه تست خزش STC30 مطابق با استاندارد ASTM E8 و رزوه M6

- ابعاد نمونه را با کولیس اندازه گیری کنید.
- طریقه کار با دستگاه خزش و تنظیمات مربوطه و کنترل آن را فرا بگیرید.
- وزنه های اعمال نیروی لازم جهت انجام آزمایش را در قسمت مربوطه قرار دهید.
- نمونه را به فک های دستگاه خزش ببندید.
- دستگاه مربوط به اندازه گیری تغییر طول نمونه را به دستگاه خزش وصل کنید.
- کوره را پایین آورده بطوریکه نمونه در وسط کوره قرار گرفته و آنگاه کوره را روی درجه حرارت 500°C تنظیم نموده و آن را روشن کنید
- میزان بار مورد نیاز جهت اعمال 150MPa تنش را محاسبه نمایید.
- بعد از رسیدن کوره به درجه حرارت مورد نظر، اهرم مربوط به نیرو را آزاد کرده تا تنش 150MPa به نمونه اعمال شود.
- با گذشت زمان و بعد از شکست نمونه، کوره را خاموش نموده، و منتظر بمانید تا نمونه خنک شود. کوره را بالا ببرید و نمونه را از دستگاه تست خارج کنید.
- با تکرار مراحل فوق تست را روی نمونه دیگر از همان جنس و با همان مقدار نیرو ولی در دمای 350°C تکرار کنید.
- یک نمونه دیگر از همان ماده قبلی و در دمای 500°C ولی با مقدار تنش 250MPa را تحت تست خزش قرار دهید.

۹-۶- خواسته‌های آزمایش

۱. منحنی $\varepsilon - t$ را در درجه حرارت‌های مختلف رسم کرده و بعد از تعیین مراحل مختلف خزش، نرخ خزش را بدست آورید.
۲. منحنی $\varepsilon - \theta$ که $\theta = t \exp(-\frac{5h}{rt})$ و t زمان بر حسب ساعت می‌باشند را برای دو درجه حرارت 350°C و 500°C رسم کرده و تحقیق کنید که آیا این دو منحنی برهم منطبق می‌شوند یا خیر؟
۳. با کمک نمودارها، نرخ خزش نمونه‌ای با همین شرایط را در درجه حرارتی غیر از درجه حرارت آزمایش بدست آورید.
۴. منحنی $\varepsilon - t$ برای دو نمونه که در دمای ثابت و تحت نیروهای متفاوت قرار گرفته‌اند را رسم کنید و در مورد اثر نیرو بر منحنی توضیح دهید.
۵. سرعت خزش را در مراحل مختلف برای این دو نمونه محاسبه کرده و با هم مقایسه کنید.
۶. خطاهای آزمایش را ذکر کنید.