بسمه تعالی

آزمایشگاه مقاومت مصالح

رسول قدمی

مقدمه

در فرآیند تولید و شکل دادن مواد مهندسی نظیر فلزات ، سرامیک ها یا مواد مرکب و ساخت قطعات ، بازرسی و تست بایستی انجام گیرد. قطعات در طول عمر کاریشان تحت آزمایشهای مختلف قرار گرفته و تغییرات احتمالی ایجاد شده در آنها از قبیل خسارت های مربوط به خستگی ، خزش ، خوردگی و ... تشخیص داده می شود. یکی از این قبیل آزمایش های مورد استفاده ، آزمایش تعیین خواص مکانیکی مواد می باشد که عموماً مخرب هستند. در ضمن انجام آزمایش نمونه ابتدا آسیب دیده و نهایتاً می شکند. مثال بارز از این نوع آزمایش ها تعیین استحکام کششی یک ماده از طریق آزمون کشش تا حد شکستن نمونه است. با انتخاب صحیح نمونه ، نتیجه حاصل شده از آزمایش بیانگر خواص ماده ای است که نمونه از آن گرفته شده است. در بسیاری از تست های فرآیند تولید ، نیاز به انجام تست های مکانیکی احساس می گردد. تأیید قطعه از سوی قطعه ساز به منظور اطمینان از عملکرد آن ، بررسی کنترل کیفیت در تولید فرآورده های نیمه تمام مانند ورق ، تسمه و میله ، نیاز به نمونه هایی جهت آزمایش می باشد تا از مطابقت خواص از پیش تعیین شده ، اطمینان حاصل گردد. از میان این خواص می توان به استحکام نهایی کششی ، استحکام فشاری و پیچشی – برشی در دمای محیط و سایر دماها ، سختی استحکام ضربه ای ، پدیده خستگی و خزش که تابع زمان هستند اشاره کرد. روش های آزمایشی که برای تعیین خواص شاخص قطعه از قبیل آزمایش کشش بیان می شود ، می تواند اطلاعات ارزشمندی به مهندس و طراح ارائه نماید. آگاهی داشتن یک مهندس از وجود خواص یک ماده برای عملکرد موفق قطعه ساخته شده از آن و قابلیت شکل پذیری ماده و نیز آگاهی از اینکه کدام یک از خواص نامبرده برای کاربرد مورد نظر مهم می باشد ، هزینه و وقت کمتری برای ارزیابی قطعه ملزم می نماید. از ویژگی های مواد که غالباً مورد نظر مهندسان می باشد می توان به ضریب یانگ (E) ، تنش تسلیم کششی ، استحکام کششی و انعطاف پذیری اشاره نمود و برحسب بارگذاری مکانیکی قطعه ی در حال کار حتی استحکام فشاری و برشی – پیچشی نیز مدنظر خواهد بود. در این کتاب ضمن معرفی انواع آزمایش های خواص مکانیکی مواد ، سعی شده است که خواننده با تجهیزات لازم جهت انجام هرکدام از آزمایش ها ، روش انجام هر آزمون ، نتایج مورد انتظار در اجرای هر آزمایش و همچنین نحوه انجام محاسبات آشنا گردد. (کتاب حاضر دارای 8 فصل بوده که به ترتیب شامل آزمایش های کشش ، فشار ، سختی ، خمش ، پیچش ، ضربه ، خستگی و خزش می باشد. در هر کدام از فصول ، هر آزمایش به طور مشروح مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.)

۱

آزمایش کشش

آزمون کشش[1] astm e-8

1-1- مقدمه

آزمون های کشش اطلاعات ارزشمندی را برای تعیین خواص فیزیکی و مکانیکی مواد تأمین می کنند . آزمون کشش یکی از اولین آزمون های به عمل آمده بر روی مواد بوده است . این آزمون برای تهیه اطلاعات مربوط به استحکام کششی ماده مورد نظر به کار می رود . این اطلاعات غالباً در طراحی و ساخت محصولات مهندسی اهمیت زیادی دارد .

اطلاعات آزمون کشش برای رسم نمودار نیرو – ازدیاد طول (تغییرات طول نسبی) نمونه مورد آزمایش به کار می رود . نتایج آزمون معرف عملکرد ماده مربوطه در حین عملکرد واقعی آن می باشد . دو نقطه مهم در منحنی نیرو – ازدیاد طول ، نقطه تسلیم و استحکام نهایی (تنش کششی نهایی) ماده هستند . این مقادیر قابلیت تحمل بار ماده را نشان می دهند . نتایج مهم دیگر آزمون کشش ، درصد افزایش (ازدیاد) طول ، درصد کاهش مقطع و مقدار کرنش در حین آزمایش می باشند . این خصوصیات مشخصه های تغییر شکل ماده را در طول آزمایش نشان می دهد . مقدار تغییر شکل ماده قبل از شکست برای تعیین جایگاه ماده در طبقه بندی مواد انعطاف پذیر یا ترد به کار می رود .

آزمون های کششی به طور کلی بر روی نمونه آزمون های استاندارد اجرا می شوند . اما می توان از هر نمونه با سطح مقطع و طول اولیه معین نیز استفاده کرد . آزمون های کشش ، برای تعیین رفتار مکانیکی مواد در بارگذاری ایستایی و کششی محوری بکار می روند .

1-2- نمونه های آزمایش

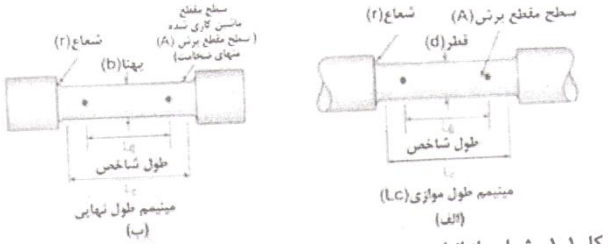
1-Tension testing

قبل از انجام آزمایش ، ابعاد نمونه و شرایط آزمون اندازه گیری می شود . اندازه گیری خطی بنا به محدوده اندازه ها و دقت مورد نظر ، به کمک کولیس ، خط کش یا میکرومتر ، انجام می شود . اندازه گیری تا 0/001 in (0/01 mm) از دقت مناسبی برخوردار است.

نمونه های آزمون کشش در شکل و اندازه های مختلفی آماده می شوند . به عنوان مثال مقطع نمونه ها می تواند گرد ، مربع یا مستطیلی شکل باشد . به علاوه طول همه نمونه ها باید تناسب لازم با شاخص طول استاندارد را داشته باشد . انتهای نمونه ها باید شکل مناسب را برای نصب بر روی فک های

نگه دارنده استاندارد داشته باشند . انتهای نمونه های گرد می تواند ، صاف ، پیله دار ، لولایی یا رزوه شده باشد . انتهای نمونه باید به اندازه کافی بلند باشد تا بتواند در فک های دستگاه نگه داشته شود .

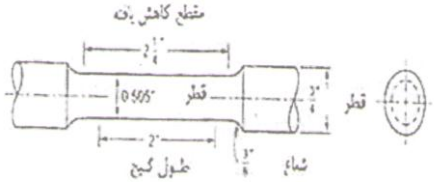
شکل 1-1 شمایی از نمونه های استاندارد آ زمایش کشش را نشان می دهد .



شکل 1-1 شمایی از انواع نمونه های استاندارد آزمایش کشش الف) مقطع گرد ب) مقطع تخت

به طور کلی شمایی از یک نمونه استاندارد کششی با سطح مقطع دایره ای شکل در شکل 1-2 ارائه شده است . مقطع عرضی نمونه ، دایره ای شکل می باشد . تغییر شکل مورد آزمایش تنها منحصر به قسمت باریک نمونه که دارای سطح مقطعی ثابت است ، می باشد .

قطر استاندارد این مقطع حدوداً 2/8 میلیمتر (0/5 اینچ) می باشد در حالی که طول قسمت تغییر قطر یافته نمونه باید حداقل چهار برابر قطر نمونه ، 60 میلیمتر یا 2/25 اینچ باشد . همان گونه که در شکل 1-2 مشخص است طول مؤثر نمونه یعنی طولی از نمونه که محاسبات کشائی در مورد آن انجام می شود . به عبارت دیگر طول استاندارد نمونه برابر 50 میلیمتر (2 اینچ) است .



شکل 1-2- شمایی از یک نمونه استاندارد در آ زمون کشش

اندازه گیری تغییر شکل نمونه ، بر اساس تغییرات به وجود آمده در ابعاد اولیه نمونه می باشد . که با توجه به اندازه گیری طول شاخص اولیه و نهایی نمونه آزمون ، به دست می آید . طول شاخص ، یک واحد استاندارد طول است که برای تعیین میزان کشیدگی یا تغییر شکل به وجود آمده در طی اجرای آزمون به کار می رود . طول استاندارد شاخص برای آزمون های عمومی کشش 2 in است . در هنگام اعمال بار کششی ، نمونه تمایل به افزایش طول دارد . بنابراین ، مساحت سطح مقطع اولیه و طول شاخص ، قبل از آزمون اندازه گیری می شوند . برای علامت گذاری طول شاخص موقعیت دو نقطه بر روی نمونه های استاندارد مشخص شده است . از یک انبساط سنج [1] یا کرنش سنج می توان برای تعیین افزایش طول نمونه در طی آزمون استفاده کرد . انبساط را با اندازه گیری اختلاف اندازه بین طول های شاخص در حالت اولیه و ثانویه نیز می توان به دست آورد ، که به آن ازدیاد طول می گویند . واحدهای ازدیاد طول ، in یا mm هستند . ازدیاد طول بر طول شاخص اولیه ، کرنش نامیده می شود . کرنش یک کمیت بدون بعد است هر چند می توان آن را بر حسب اینچ بر اینچ $\frac{in}{in}$ یا میلیمتر بر میلیمتر $\frac{mm}{mm}$ نیز بیان کرد .

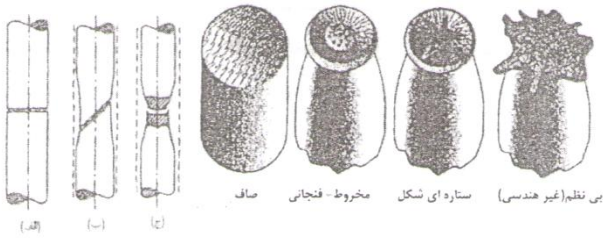
تغییر شکل در آزمون کشش ، در دو امتداد صورت می گیرد . اولی به صورت جانبی (در زاویه قائم نسبت به محور بار وارده) و دومی به طور محوری

(در طول محور بار) .

نسبت تغییر شکل جانبی به تغییر شکل طولی یا محوری ، نسبت پواسون نامیده می شود . مقدار نسبت پواسون برای اغلب مواد مهندسی از 0/25 تا 0/7 تغییر می کند . برای دستیابی به نتایج قابل قبول ،نمونه آزمون باید در فاصله طول شاخص ، یکنواخت باشد . یکنواختی سطح مقطع باعث توزیع تنش یکنواخت و حذف تمرکز تنش می گردد . سرعت انجام آزمون یا نرخ اعمال بار ، باید آرام

1-Extensometer

و پیوسته باشد . این آزمون یک آزمون استاتیکی است و سرعت بارگذاری از آهسته تا متوسط (0/01 تا 0/05 in/min) نباید بر نتایج آزمون تأثیر بگذارد . تأثیر گذاری عمده نرخ بارگذاری ، بر روی نقطه تسلیم است . نقطه تسلیم بیشترین تأثیر را از نرخ بارگذاری می پذیرد. نرخ بارگذار مواد چکش خوار را بعد از نقطه تسلیم می توان افزایش داد . زیرا استحکام نهایی نسبت به استحکام تسلیم اثر کم تری از نرخ بارگذاری می پذیرد . نرخ بارگذار مواد چکش خوار را بعد از نقطه تسلیم می توان افزایش داد . زیرا استحکام نهایی نسبت به استحکام تسلیم اثر کمتری از نرخ بارگذاری می پذیرد. هرچند درصد افزایش طول ممکن است به طور مخالف و معکوس تأثیر پذیرد . به عبارت دیگر در مواقعی که سرعت آزمایش زیاد باشد ، تنش (استحکام) کششی نهایی زیاد می شود و درصد ازدیاد طول کاهش می یابد . خواص مکانیکی پلاستیک ها ، پلیمرها و فولادها به سرعت انجام آزمایش بسیار حساس می باشند ولی در آلیاژهای آلومینیوم اینگونه نخواهد بود . بسته به هدف آزمون و اطلاعات مورد نیاز ، بارگذاری تا مرحله شکست نمونه و یا توقف آزمون ، پس تهیه اطلاعات مورد نیاز ادامه خواهد یافت . نمونه پس از فروپاشی یا شکست ، از دستگاه برداشته شده و بازرسی می شود . به طور کلی شکست های حاصل از آزمون کشش برحسب شکل ترکیب و رنگ مشخص می شوند . مقاطع شکست در انواع تخت ، گود ، نامنظم و ناهموار نیز هستند . این مقاطع شکست را نرم ، دانه درشت ، الیاف دار ، ریز ریز ، بلورین ،صیقلی وتیره نیز توصیف می کنند . بعضی از مواد را به راحتی می توان بر اساس نوع مقطع شکست بوجود آمده شناسایی نمود . برای مثال فولاد نرم معمولاً شکست گود نرم ایجاد می کند . آهن چکش خوار ، شکست نامنظم الیاف دار ایجاد می کند و چون شکست دانه درشت تخت خاکستری را به همراه دارد ، ارزیابی شکست ، علت فروپاشی را مشخص می کند . انواع مقاطع شکست را بر اساس دسته بندی ارائه شده در شکل 1-3 می توان توصیف کرد .



شکل 1-3- شمایی از مقاطع شکست در کشش تک محوری

الف) شکست ترد ب) شکست نرم ج) شکست مختلط

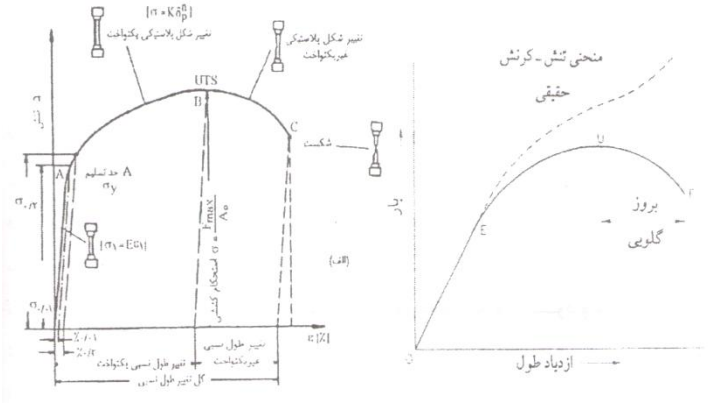
1-3- اجرای آزمون

برای اجرای آزمون کشش باید یک نمونه آزمون ، با اندازه و شکل مناسب تهیه نمود . این نمونه باید دارای سطح مقطع معلوم بوده و یک طول شاخص مناسب با شرایط آزمون داشته باشد . سپس دستگاه در نرخ سرعت مناسب برای آ زمون تنظیم می شود . بررسی لازم صورت می گیرد تا اطمینان حاصل شود که دستگاه تحت بار نمی باشد . این فرآیند صفر کردن (کالیبره کردن) دستگاه نامیده می شود . پس از آن نمونه آزمون به کمک فک های نگهدارنده مناسب در دستگاه آزمون بارگذاری می شود . وظیفه اصلی فک ها نگه داشتن نمونه است به طوری که بار بطور مؤثر از ماشین به نمونه منتقل گردد .

نکته ضروری این است که بار به طور محوری به نمونه وارد شود و لازمه آن انتخاب و .تنظیم مناسب فک ها برای اطمینان از استقرار صحیح نمونه ، قبل و در طول فرآیند آزمون می باشد . فک های نگهدارنده گوه ای برای مواد نرم وچکش خوار به کار می روند . این فک ها برای مواد ترد مناسب نیستند ، زیرا آن ها ماده را محکم فشار می دهند و باعث شکست انتهای نمونه می شوند . سپس بارکششی که به طور پیوسته و یکنواخت افزایش می یابد ، بر نمونه اعمال می گردد . مقدار بار در فواصل زمانی معین افزایش داده می شود . مقدار تغییر شکل ، مستقیماً با اندازه گیری طول شاخص یا با اندازه گیری مقدار جابه جایی یا تغییر شکلی که بعد از هر افزایش بار به وقوع پیوسته است تعیین می شود. از مقدار تغییر شکل و طول شاخص اولیه ، می توان مقدار کرنش را به دست آورد . وقتی که نمونه شروع به تسلیم و جاری شدن می کند (تغییر شکل بدون افزایش بار رخ می دهد) شکست ماده آغاز شده است . اطلاعات خروجی این آزمایش توسط رایانه به صورت نموداری بر حسب بار (نیرو)- تغییر طول ثبت می شود . چگونگی تغییرات بار – تغییرات طول به اندازه نمونه بستگی دارد .

1-4- نتایج آزمون

از نتایج آزمون کشش می توان برای رسم نمودار تنش – کرنش استفاده کرد . در این نمودار ، تنش اعمال شده بر روی محور قائم و کرنش ایجاد شده در طول محور افقی رسم می شود . در آزمون های تجارتی فلزها ، به جای منحنی تنش – کرنش ، منحنی نیرو – ازدیاد طول ترسیم می شود و استحکام بر مبنای مساحت سطح مقطع اولیه نمونه آزمایش محاسبه می شود . نمونه ای از منحنی نیرو – ازدیاد طول در شکل 1-4 ارائه شده است .



شکل 1-4- شمایی از منحنی نیرو – ازدیاد طول

در واقع در نمودار نیرو (بار) – ازدیاد طول ، تنش به دست آمده کوچک تر از تنشی است که در حقیقت به نمونه وارد می شود . به این علت که در آن ، تنش در هر لحظه از تقسیم نیرو به سطح مقطع اولیه بدست می آید ولی در حقیقت سطح مقطع نمونه در هنگام آزمایش به طور پیوسته کاهش می یابد . بنابراین برای بررسی دقیق تر در رفتار پلاستیکی مواد ، نمودار تنش –تغییر طول نسبی حقیقی مناسبتر خواهد بود ولی نمودار تنش – تغییر طول نسبی (کرنش) مهندسی از نمودار نیرو – تغییر طول با تقسیم مقدار آن به ترتیب به سطح مقطع اولیه (A_0) و طول اولیه (L_0) بدست می آید و کاملاً مشابه آن است . شکل و دامنه منحنی تنش کرنش یک فلز بستگی به ترکیب شیمیایی ، عملیات حرارتی ، سابقه تغییر شکل پلاستیک ، سرعت کرنش ، درجه حرارت (دما بین 10 الی 30 درجه سانتی گراد) و حالت تنشی که در جسم در حین آزمایش در معرض آن قرار می گیرد ، دارد . پارامترهایی که برای تشریح منحنی تنش –کرنش (نیرو- ازدیاد طول)یک فلز استفاده می شوند : حد ارتجاعی (الاستیک) ، حد تناسب ، استحکام (تنش) تسلیم، استحکام کششی ، استحکام (تنش) شکست ، در صد ازدیاد طول و درصد کاهش سطح مقطع می باشند . پارامترهای استحکام تسلیم و کششی به عنوان پارامترهای استحکام و مقاومت جسم و پارامترهای درصد ازدیاد طول و کاهش سطح مقاطع به عنوان پارامترهای چکش خواری جسم می باشند .

1-5- اطلاعات بدست آمده از آزمایش کشش

1-5-1- حد ارتجاعی (کشسانی)

در شروع آزمون وقتی که تنش رو به افزایش است ، کرنش ایجاد شده خیلی کوچک است . در طی این مرحله خطی ، کرنش متناسب با تنش اعمال شده است . این مرحله به عنوان ناحیه ارتجاعی شناخته می شود . به عبارت دیگر قابلیت ارتجاعی[1] توانایی ماده در جذب انرژی در زمان تغییر شکل الاستیک و بازگرداندن این انرژی پس از بار برداری است . به بیان دیگر با برداشتن بار و حذف تنش ، ماده شکل اولیه خود را به دست می آورد. در شرایط ارتجاعی ، رفتار ماده بر اساس قانون هوک می باشد . ماده بعد از حد ارتجاعی ، خاصیت مومسان پیدا می کند ، در این حالت ، ماده هنوز خاصیت ارتجاعی محدود از خود نشان می دهد اما با برداشتن بار به شرایط قبلی خود باز نمی گردد .

1-5-2- حد تناسب

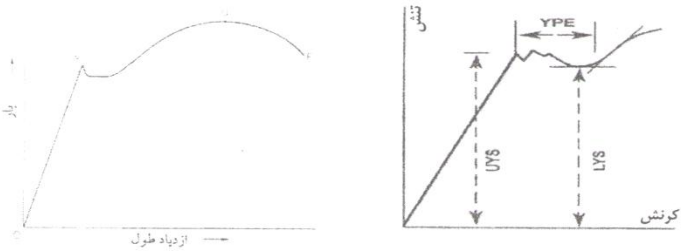
اولین نقطه ای که منحنی نیرو – ازدیاد طول (تنش – کرنش) در آن از حالت تناسب یا خطی خارج می شود ، حد تناسب نام دارد . به عبارت دیگر حد تناسب مقدار تنشی است که به ازای تنش های بیش از آن منحنی نیرو – ازدیاد طول (تنش – کرنش) دیگر خط مستقیم نیست یعنی نقطه ای است که بعد از آن قانون هوک برقرار نمی باشد . بعد از حد تناسب ماده هنوز خاصیت ارتجاعی دارد اما تنش و کرنش متناسب نیستند . تعیین حد تناسب بسیار دشوار است چرا که مقادیر بدست آمده تابع حساسیت سیستم اندازه گیری نیرو و ازدیاد طول سنج مورد استفاده هستند . در آ زمون های تجارتی عمومی غالباً حد تناسب گزارش نمی شود . در عوض در مورد فلزهایی که نقطه تسلیم مشخص ندارند ، تنش تسلیم قراردادی گزارش می شود .

1-5-3- نقطه تسلیم یا تنش (استحکام) تسلیم [2]

نقطه ای است که روی منحنی که رفتار جسم از الاستیک وارد مرحله پلاستیک می شود . در نمودار نیرو – ازدیاد طول بسیاری از فولادها یک ناپیوستگی تیز وجود دارد و ماده با افزایش جزئی نیرو یا حتی بدون نیاز به افزایش نیرو به طور ناگهانی تسلیم می شود (

[1] -Resilience
[2] - Yield strength

نقطه Y) . طول این تسلیم ناگهانی در حدود 5 تا 7 در صد طول شاخص اولیه است . نقطه تسلیم Y نزدیک یا منطبق بر حد ارتجاعی (کشسانی) است .



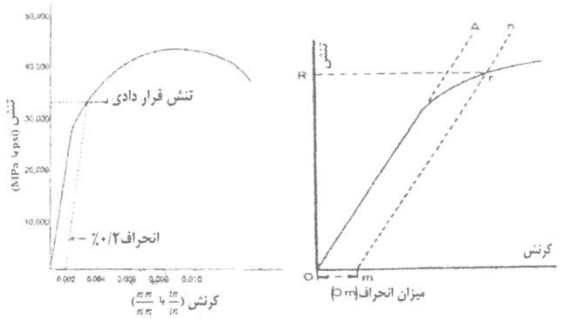
شکل 1-5- تعیین و محل نقطه تسلیم

بنابراین در تنش های کمتر از تنش تسلیم ، تغییر شکل ارتجاعی (برگشت پذیر) است و هرگاه تنش وارده از تنش تسلیم جسم بیشتر شود تغییر شکل دایمی یا پلاستیکی ایجاد می گردد (شکل 1-5). در برخی فلزات مانند فولاد کم کربن نقطه تسلیم مشخص وجود دارد که به صورت حد تسلیم بالا و پایین ظاهر می شود . ولی در مورد اکثر فلزات انتقال از منطقه الاستیک به پلاستیک به تدریج صورت گرفته و حد تسلیم مشخصی وجود ندارد .

1-5-4- تنش تسلیم قراردادی یا روش انحرافی [1]

در شرایطی که ماده تغییر شکل مومسان بزرگی را می پذیرد تنش اسمی به طور قابل ملاحظه ای از تنش واقعی فاصله می گیرد . همان طور که قبلاً بیان شد ، تعیین مساحت مقطع در هر افزایش بار ، ایده جالبی نیست . بنابراین در این موارد یک تغییر شکل یا انحراف دلخواه انتخاب می شود . معمولاً این انحراف 0/2 ٪ در نظر گرفته می شود و به نام استحکام تسلیم با انحراف 0/2٪ یا تنش گواه نامیده می شود . تنش گواه یک تنش کششی اسمی است که یک کرنش غیر خطی معادل با انحراف انتخاب شده و بر اساس درصدی از طول سنجش اولیه نمونه ایجاد می کند . روش انحراف برای موادی به کار می رود که نقاط تسلیم مشخص از خود نشان نمی دهند . تعیین تنش گواه به کمک روش انحراف در شکل 1-6 نمایش داده شده است . معمولاً وقتی ملاک طراحی استحکام فلز باشد ، استحکام تسلیم فلز مد نظر قرار می گیرد . این بدان علت است که در زمانی که تنش متناظر با استحکام کششی برای نمونه به کار گرفته می شود ، نمونه دچار تغییر فرم پلاستیک زیاد می شود که مفید نیست .

[1] - Offset Proof Stress



شکل 6-1 روش تعیین تنش تسلیم قراردادی

1-5-5 ضریب یانگ (کشسانی) (مدول الاستیسیته) (E)

ضریب کشسانی را می توان از روی شیب قسمت خطی منحنی نیرو – ازدیاد طول محاسبه کرد . به عبارت دیگر شیب اولیه قسمت خطی منحنی تنش – کرنش مدول یانگ است . مقدار این ضریب برابر است با :

$$E(GPA, KN/mm^2, lb/in^2) \quad \frac{\text{طول شاخص (طول قسمت مورد آزمون)}}{\text{مساحت سطح مقطع اولیه}}$$

ضریب یانگ ، معیاری از صلبیت (سفتی یا ایستایی) یک ماده در مقابل تغییر فرم الاستیک می باشد. هرچه این ضریب بیشتر باشد، کرنش الاستیک ناشی از اعمال یک تنش معین ، کمتر خواهد بود. به عبارت دیگر زیادتر بودن مدول یانگ در واقع نشان دهنده سفتی زیادتر ماده و یا تغییر طول کمتر در برابر اعمال تنش می باشد. از آنجایی که مدول یانگ برای محاسبه خمش تیرها و دیگر

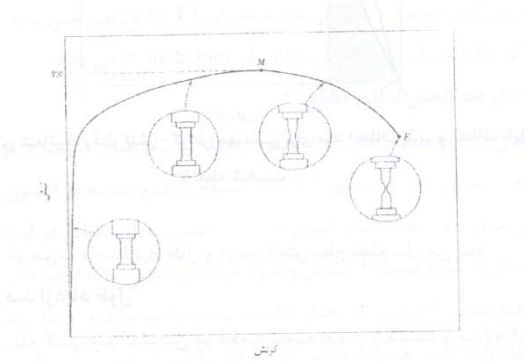
1-5-6- استحکام کششی (نهایی)[1]

این خاصیت بر مبنای بیشترین نیروی تحمل شده توسط نمونه طی یک آزمایش مخرب تا شکست بدست می آید. به عبارت دیگر حداکثر تنش لازم بر مبنای سطح مقطع اولیه است. هنگامی که تنش به مقدار استحکام نهایی میرسد یک ماده ترد می شکند در حالی که ماده نرم به تغییر شکل و ازدیاد طول ادامه می دهد.

$$\text{استحکام کششی } (N/mm^2)(Mpa) = \frac{\text{حداکثر نیروی وارده}}{\text{مساحت سطح مقطع اولیه}}$$

[1] -Tensile strength

با افزایش بار منحنی با شیب روبه بالا ادامه می یابد تا به مقدار حداکثر میرسد. این مقدار ، حداکثر تنشی است که در ماده می توان ایجاد کرده و به عنوان تنش کششی نهایی ماده شناخته میشود. استحکام کششی ماده را می توان با توجه به تنش اعمال شده و کرنش حاصل ازآن در این نقطه تعیین کرد. ماده بعد از این نقطه تسلیم شده و بدون اعمال تنش بیشتر ، مقدار کرنش ، افزایش خواهد یافت. در طی این مرحله نمونه شروع به باریک شدن یا کاهش سطح مقطع می کند. تا زمانی که تنش باقی بماند باریک شدن ماده تا مرحله شکست ادامه می یابد. شکست در زمان باریک شدن نمونه اتفاق می افتد ، در حالی که تنش مربوط به آن از حداکثر تنش کششی کمتر است.



شکل 1-7- رفتار تنش – کرنش مهندسی تا مرحله شکست

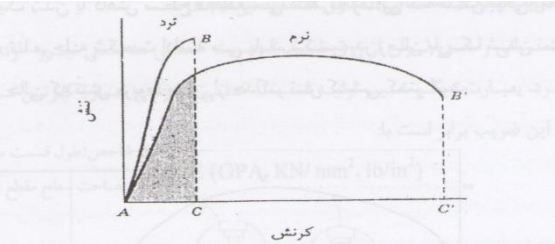
1-5-7- استحکام شکست

برای یک ماده نرم ، تا استحکام نهایی ، تغییر شکل درطول نمونه آزمایشی یکنواخت است. در تنش ماکزیمم تغییر شکل موضعی یا گلویی شدن در نمونه رخ می دهد و با کاهش سطح مقطع مقدار بار کاهش می یابد. گلویی شدن یک تغییر شکل غیریکنواخت است و به سرعت تا نقطه شکست اتفاق می افتد. در یک ماده سخت ، استحکام نهایی و شکست روی هم منطبق می شوند .

1-5-8- انعطاف پذیری

انعطاف پذیری یکی از خواص مهم مکانیکی است. این مقدار در واقع میزان درجه تغییر شکل پلاستیک است که تا زمان شکست ادامه می یابد. فلزی که تغییر شکل پلاستیکی بسیار کمی را تجربه می کند و یا تغییر شکل پلاستیک در این فلز وجود ندارد انعطاف ناپذیر یا ترد نامیده می شود. (مواد انعطاف ناپذیر موادی هستند که دارای کرنش شکستی تقریباً کمتر از 5 درصد می باشند.) رفتارهای تنش – کرنش مهندسی برای دو ماده انعطاف پذیر و انعطاف ناپذیر در آزمون کشش در شکل 1-8 نشان داده شده است.

انعطاف پذیری به دو صورت درصد ازدیاد طول و درصد کاهش سطح مقطع بیان می شود.



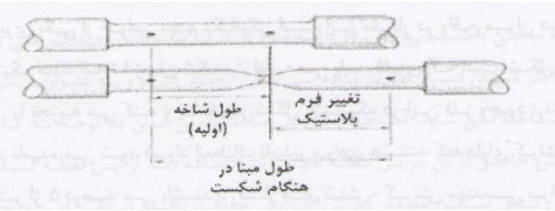
شکل 1-8- نمایش شماتیک رفتار تنش – کرنش مهندسی برای مواد انعطاف پذیر و انعطاف ناپذیر تا نقطه شکست

1-5-8-1- درصد ازدیاد طول[1]

این مقدار به وسیله کنار هم گذاشتن دو قطعه نمونه بعد از شکست و اندازه گیری فاصله بین دو نقطه علامت گذاری شده در طول شاخص (مؤثر) نمونه تعیین می گردد. افزایش طول اندازه گیری شده برحسب درصد طول شاخص (مؤثر) اولیه ، تحت نام درصد ازدیاد طول گزارش می شود.

$$\text{درصد ازدیاد طول } (\%EL) = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100$$

در اینجا L_f فاصله بین دو علامت روی نمونه پس از شکستن نمونه (طول شاخص نهایی) و L_0 طول شاخص (مؤثر) اولیه (معمولاً 2 اینچ) می باشد که در شکل 1-9 آورده شده است. در گزارش درصد ازدیاد طول ، طول مؤثر (شاخص) اولیه باید مشخص باشد ، زیرا درصد ازدیاد طول با طول مؤثر (شاخص) تغییر می کند.



شکل 1-9- شمایی از افزایش طول نمونه در آزمون کشش پس از پایان آزمایش

[1] - Elongation

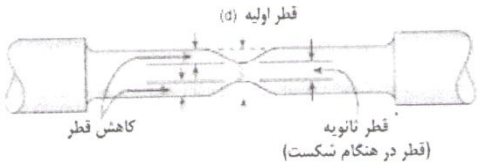
از آنجایی که قسمت عمده تغییر فرم پلاستیک در ناحیه شکست محدود به گلویی شدن می باشد ، مقدار %EL به طول نمونه که توسط دستگاه اندازه گیری میشود بستگی خواهد داشت. هرچه L_0 کوچکتر باشد ، نسبت تغییر طول کلی به طول در ابتدای گلویی شدن بزرگتر خواهد شد و در نتیجه مقدار %EL افزایش می یابد. بنابراین مقدار مشخصی برای L_0 باید بیان شود که این مقدار برابر 50 mm (2 in) می باشد.

1-5-8-2- درصد کاهش سطح مقطع [1]

درصد کاهش سطح مقطع غالباً به جای درصد ازدیاد طول نمونه های گرد گزارش می شود که در شکل 1-10 شمایی از کاهش سطح مقطع نمونه در آزمون کشش پس از پایان آزمایش نشان داده شده است. امتیاز درصد کاهش سطح مقطع در این است که کم و بیش مستقل از ابعاد نمونه آزمایش و طول شاخص است. مقدار عددی آن تفاوت بین مساحت مقطع نمونه آزمایش در محل شکست با مساحت مقطع اولیه ، برحسب درصد مساحت مقطع اولیه است. به عبارت دیگر این مقدار با اندازه گیری کوچکترین سطح مقطع نیمه های شکسته شده نمونه بعد از آزمایش کشش و با استفاده از فرمول زیر تعیین می شود :

$$\text{درصد کاهش سطح مقطع}(\%RA) = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$$

در اینجا A_0 مساحت سطح مقطع اولیه و A_f مساحت مقطع نهایی (شکسته شده) است.



شکل 1-10- شمایی از کاهش سطح مقطع نمونه در آزمون کشش پس از پایان آزمایش

آگاهی از انعطاف پذیری مواد از دو جهت بسیار مهم می باشد. اول آن که میزان تغییر شکل پلاستیک قبل از شکست را برای طراح مشخص می سازد. دوم آنکه میزان تغییر شکل مجاز را برای ماده در زمان تولید تعیین می نماید. خواص مکانیکی مهم مواد که به وسیله آزمون کشش مشخص می شوند نسبت به عواملی همچون تغییر شکل قبلی ، وجود ناخالصی ها و یا رفتار فلزات در مقابل عملیات حرارتی بسیار حساس می باشند. مدول الاستیسیته یکی از خواص مکانیکی است که نسبت به عملیات حرارتی حساس نمی

[1]- Reduction Area

باشد. با افزایش دما مقادیر استحکام کششی کاهش یافته و انعطاف پذیری افزایش می یابد و مدول یانگ ثابت می ماند. در نظر گرفتن مقداری خاصیت چکش خواری در طراحی ماده مطلوب است. مواد چکش خوار قبل از شکست خم شده یا تغییر شکل می دهند. چکش خواری ، شکل پذیری ماده را افزایش می دهد.

1-5-9- چقرمگی (تافنس) [1]

چقرمگی توانایی جذب انرژی ماده تا زمان شکست می باشد. شکل هندسی و چگونگی اعمال بار در تعیین چقرمگی بسیار مهم می باشند. در بارگذاری فعال (سرعت کرنش بالا) وقتی یک شکاف (یا نقطه تمرکز تنش) وجود داشته باشد ، چقرمگی شکاف با استفاده از آزمون ضربه محاسبه می شود. چقرمگی شکست ، خاصیتی است که بازگو کننده مقاومت ماده در برابر شکست زمانی که ترکی در آن وجود داشته باشد است. در حالت آرام و استاتیک (سرعت کرنش پایین) چقرمگی از طریق نتایج آزمون کشش بدست می آید که برابر سطح زیر منحنی نیرو – ازدیاد طول تا مرحله شکست است. واحدهای چقرمگی همان واحدهای قابلیت ارتجاع (انرژی بر واحد حجم ماده) هستند. برای این که یک ماده چقرمه باشد لازم است استحکام و انعطاف پذیری ماده در حد مطلوب باشد. به بیان دیگر چقرمگی یک جسم ، توانایی آن به جذب انرژی در ناحیه پلاستیک یا معیاری از میزان انرژی جذب شده توسط جسم قبل از لحظه شکست است. این کمیت در موادی که قابلیت تحمل ضربه بدون شکست مطرح باشد ، اهمیت پیدا می کند. چقرمگی توانایی تحمل یک جسم در برابر تنش های بیش از تنش تسلیم که گاهی اوقات به جسم وارد می شود را بیان می کند. مساحت سطح زیر منحنی تنش – کرنش تا نقطه شکست ، بیانگر انرژی مورد نیاز برای شکست چقرمگی ماده است. در واقع مساحت زیر منحنی نشانگر مدول چقرمگی و مشخص کننده میزان جذب انرژی ماده در تغییر شکل ارتجاعی و مومسان می باشد. چقرمگی ، اشاره به استقامت یک ماده در برابر شکست یا قابلیت تحمل بارهای ضربه ای دارد. بنابراین موادی که ترکیبی از استحکام و چکش خواری دارند ، چقرمگی خوبی را از خود نشان می دهند.

برای فلزات چکش خوار که منحنی تنش – کرنش مهندسی آن شبیه به فولاد ساختمانی است ، سطح زیر منحنی تقریباً برابر است با :

$$\text{چقرمگی} = S_u \times e_f$$

$$\text{چقرمگی} = \frac{S_0 + S_u}{2} \times e_f$$

[1] -Toughness

S_u = استحکام کششی ، e_f = کرنش شکست ، S_0 = استحکام تسلیم

برای مواد ترد منحنی تنش – کرنش مهندسی گاهی اوقات به صورت سهمی در نظر گرفته می شود و سطح آن برابر است با :

$$\text{چقرمگی} = (0/7) \times S_u \times e_f$$

1-6- عوامل مؤثر بر نمودار نیرو – ازدیاد طول (تنش – کرنش مهندسی)

درجه حرارت ، سرعت کشش (نرخ بارگذاری) و کار سرد از عواملی هستند که بر روی نمودار و در نتیجه بر روی نتایج بدست آمده از نمودار نیرو – ازدیاد طول تأثیر گذار خواهند بود.

1-6-1- درجه حرارت

در اینجا منظور درجه حرارت های حدود نصف نقطه ذوب ($0.5\ T_m$) می باشد. رفتاری که در درجه حرارت های بالاتر اتفاق می افتد مربوط به فعل و انفعالات دیفوزیون می باشد. عموماً کمیت هایی مانند حد تسلیم ، استحکام کششی و کار سختی با افزایش دما کاهش می یابند در حالی که تغییر طول نسبی شکست معمولاً افزایش می یابد ولی این تأثیر برای فلزات مختلف متفاوت است.

1-6-2- سرعت کشش (نرخ بارگذاری)

تأثیر سرعت کشش بر روی نمودار نیرو – ازدیاد طول تا حدودی نظیر تأثیر دما بر روی آن خواهد بود. بدین صورت که افزایش سرعت کشش اغلب همان اثر کاهش درجه حرارت را خواهد داشت.

1-6-3- اثر کار سرد

با ازدیاد تغییر شکل پلاستیکی سرد و ایجاد نابجایی های جدید ، چگالی نابجایی ها افزایش می یابد. این افزایش سبب تجمع بیشتر نابجایی ها در پشت موانع (ناخالصی ها ، مرزدانه ها) و همچنین تلاقی بیشتر آنها در سیستم های لغزشی فعال می شود ، به طور که تحرک نابجایی ها با افزایش تغییر شکل سرد مشکلتر می شود و در نتیجه استحکام ، سختی و حد تسلیم افزایش و برعکس شکل پذیری کاهش می یابد.

۲
آزمایش فشار

آزمون فشار[1] ASTM E-9

2-1- مقدمه

عموماً یک آزمون فشار می تواند به صورت عکس آزمون کشش در نظر گرفته شود. در حالیکه یک آزمون کشش تمایل به کشیدن یک قطعه (نمونه) را دارد ، یک آزمون فشار تمایل به لهیدن و فشردگی نمونه را دارد. تصمیم گیری برای انتخاب یک آزمون فشار علاوه بر انواع دیگر آزمون ها ، عمدتاً با توجه به نوع کاربردهایی صورت می گیرد که به واسطه آن مواد احتمالاً در معرض چنین فشارهایی قرار می گیرند. برای مثال ، فلزات در مقابل بارهای کششی نسبت به موادی مانند بتن با استحکام کششی پایین ، دارای استحکام بیشتری هستند. به همین دلیل فلزات غالباً تحت آزمون کشش قرار می گیرند نه آزمون فشار. مواد ترد مانند بتن ، آجر و بسیاری از محصولات سرامیکی به طور نسبی در مقایسه با استحکام فشاری ، دارای استحکام کششی کمتری هستند. در نتیجه عموماً برای تحمل بارهای فشاری مورد استفاده قرار می گیرند. لذا آزمون فشار برای این نوع مواد خیلی مهم و مفید است. همچنین چون در اغلب فرآیندهای شکل دهی ، تغییر شکل تحت تأثیر تنش های فشاری انجام می شود و منحنی تنش – کرنش حاصل ازآزمون کشش به دلیل ظاهر شدن گلویی یا نازکی موضعی در کرنش های نسبتاً پایین و محدود شدن تغییر شکل پلاستیکی یکنواخت برای مقدار کرنش های بالا (به ویژه برای تغییر شکل های داغ) پاسخگو نیست ، آزمون فشار آزمایش مناسب تری می باشد.

2-2- مقایسه آزمون فشار با آزمون کشش

1) مدول الاستیکی مواد تحت تأثیر تنش های کششی و فشاری برابر است.
2) در مواد نرم نتایج به دست آمده از آزمون کشش و فشار تقریباً یکسان است.
3) در مواد ترد نتایج حاصله از آزمایش کشش و فشار تفاوت قابل توجهی را نشان می دهند.

[1] -Compression Test Squeeze Compact

4) نتایج حاصل از آزمایش فشار توسط عواملی همچون نوع پرداخت کاری سطح نمونه و نوع روغنکاری تغییر خواهد کرد.

2-3- اصول

معمولاً رفتار مواد در کشش و فشار تقریباً یکسان است. هدف اولیه از آزمون فشار ، تعیین استحکام فشاری مواد است. بنابراین اطلاعات مربوط به استحکام فشاری و بار اعمالی و تغییر شکل نمونه بدست می آید. از طرف دیگر آزمایش فشار به ما این امکان را می دهد که به علت عدم شکست نمونه ، رفتار آن را تا کرنش بالا بررسی کنیم اما قطعه می تواند در اثر زیاد بودن نسبت طول به قطر دچار کمانه شدن گردد که معمولاً در آزمایش کشش رخ نمی دهد.

2-3-1- مواد ترد و نرم

در مواد ترد ، استحکام فشاری به راحتی بدست می آید در حالی که (همانند آزمون کشش) استحکام فشاری برای مواد چکش خوار بایستی برمبنای چند تغییر شکل دلخواه بدست آید. مواد نرم برخلاف مواد ترد ، رفتارهایی مانند شکست ناگهانی از خود نشان نمی دهند. زیرا مواد نرم ، گرایش به متورم شدن[1] دارند. بنابراین اطلاعات مربوط به این تغییر شکل بایستی مشخص شود تا استحکام فشاری را بتوان تعیین کرد. از لحاظ تئوری میتوان گفت که آزمایش فشار از نظر اعمال نیرو مخالف آزمون کشش می باشد ولی اصول و بحث هایی که در این آزمایش به کار می رود همانند آزمون کشش است. نتایجی که از آزمون کشش و فشار به دست می آید باید کاملاً با هم برابر باشند یعنی جسم چه در حالت کشش و چه در حالت فشار باید نتایج خواص مکانیکی یکسان داشته باشند.

در آزمایش فشار تا لحظه شکست ، تنش افزوده می شود که به علت افزایش سطح مقطع می باشد. در صورتی که در آزمایش کشش در منحنی تنش – کرنش مهندسی پس از گلوئی شدن ، تنش کاهش می یابد. پس با اعمال فشار ، پدیده گلوئی شدن رخ نمی دهد.

2-4- شرایط نمونه ها در آزمایش فشار

قبل از آزمون ، ابعاد نمونه بایستی توسط تجهیزات مناسب و با دقت کافی اندازه گیری شود. نمونه آزمایش کشش ، نسبتاً بلند و دارای یک قسمت باریک شده مرکزی به منظور تعیین دقیق ویژگی های کششی ماده است. در آزمون فشار نمی توان از نمونه بلند استفاده کرد زیرا در اثر ایجاد نیروی محوری فشاری مستقیم ، کمانش به وجود می آید و موجب از کارافتادگی قطعه می شود. در آزمون فشار نیرو به دو سر نمونه وارد می شود و آن را تحت فشار قرار می دهد. این کار تمایل به جمع کردن یا فشردن نمونه تحت

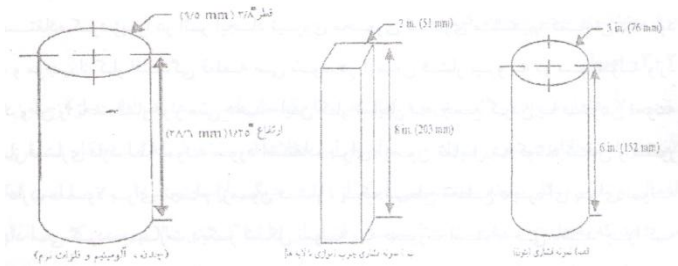
[1] -Barrel out

بار فشاری دارد. لذا نمونه مورد استفاده برای آزمون تمایل به کوتاه شدن و قطور شدن دارد. معمولاً برای انجام آزمون فشار ، یک سطح مقطع دایره ای برای نمونه پیشنهاد می گردد. به عبارت دیگر شکل نمونه به صورت استوانه می باشد چرا که نمونه های استوانه ای شکل استحکام فشاری بالاتری را نسبت به نمونه های مکعبی شکل با همان سطح قاعده و همان ارتفاع نشان می دهند. توزیع تنش در نمونه های استوانه ای شکل مناسبتر از نمونه های مکعبی شکل است. نسبت طول (ارتفاع) نمونه به قطر آن بایستی به دقت انتخاب گردد. هرگاه ارتفاع یا طول نمونه افزایش یابد ، پایداری نمونه کاهش می یابد. چرا که مخروط های اصطکاک به وجود آمده در اثر اصطکاک به طرف وسط نمونه کاهش می یابد. به همین منظور با بزرگتر شدن ارتفاع نمونه ، تمایل زیادی برای کمانش به وجود می آید. این موضوع ، به علت توزیع غیریکنواخت تنش های داخلی ایجاد شده ، تحت آزمون نیز می باشد. بنابراین نمونه آزمایشی باید کوچک باشد و برای جلوگیری از کمانش ، طول (ارتفاع) نمونه نبایستی از دو برابر قطر کوچکترین سطح مقطع تجاوز نماید. (فلزاتی را که به صورت ورق هستند را می توان به وسیله نگه داشتن آنها در یک فیکسچر مخصوص و جلوگیری از کمانش آن ، تحت آزمون فشار قرار داد.)

2- 5- ابعاد نمونه

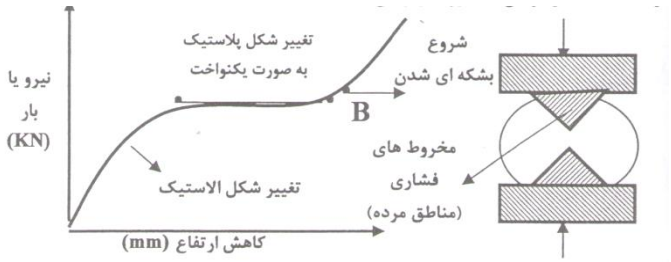
نمونه استاندارد ، یک استوانه با ابعاد 30 cm × 15 (6×12 in) می باشد که برای نمونه های بتنی این ابعاد به صورت 7/5×15 cm (3×6 in) خواهد بود (ASTM D143). از طرف دیگر انتهای دو سر نمونه آزمون فشار بایستی مسطح ، موازی و عمود باشد.

به طور کلی براساس استاندارد ، ابعاد نمونه ها در آزمایش فشار به صورت ($2<h/D_0<10$) خواهد بود. به عبارت دیگر نسبت ارتفاع به قطر نمونه بایستی بین 2 تا 10 باشد.



شکل 2-1- شمایی از نمونه های آزمون فشار و مشخصات آنها برای مواد مختلف

در آزمایش فشار نیرو معمولاً از طریق صفحات فشار موازی (فک ها) که سطح تماس آنها با نمونه روغنکاری نشده است برنمونه اعمال می شود. همراه با فشار محوری به علت وجود اصطکاک در سطح قاعده های نمونه ، تنش های عرضی در جهت شعاع و مماس وارد می شود. لذا شکل 2-1- به علت وجود اصطکاک و تنش ناشی از آن ، از تغییر شکل همگن و یکنواخت نمونه جلوگیری می شود. این ممانعت با افزایش فاصله از سطح فک ها به صورت مخروطی کاهش می یابد. بدین صورت نواحی تأثیر پذیر مخروطی شکل به دست می آید که به هر یک از این ناحیه ها ، نواحی غیرفعال یا مناطق مرده[1] گفته می شود. (شکل 2-2) که در این نواحی تنش هنوز به حد تسلیم نرسیده است. بدین ترتیب قسمت های مخروطی شکل از نمونه که در تماس با فک های دستگاه فشار قرار دارند به مقدار بسیار جزئی تغییر شکل یافته و یا هیچ تغییر شکلی نمی یابد و برعکس در قسمت وسط نمونه های نرم ، تغییر شکل پلاستیکی بدون هیچ ممانعتی صورت می گیرد به طوری که نمونه به شکل یک بشکه که دور تا دور وسط آن متورم شده باشد در آمده (پدیده بشکه ای شدن) و بدین ترتیب تغییر شکل به صورت غیریکنواخت (غیرهمگن) انجام می گیرد. وقتی که نمونه تحت فشار قرار می گیرد ، منحنی تغییرات نیرو برحسب کاهش ارتفاع به صورت زیر می باشد.



شکل 2-2- منحنی تغییرات نیرو برحسب کاهش ارتفاع

ازنقطه B به بعد با افزایش نیرو شیب منحنی زیادتر شده و در وسط نمونه ازدیاد قطر بیشتری مشاهده می شود که به این پدیده بشکه ای شدن می گویند.

2-6- راه های کاهش اصطکاک

1. روغن کاری سطوح
2. استفاده از تفلون در دوسر نمونه
3. پرداخت کردن فک های دستگاه

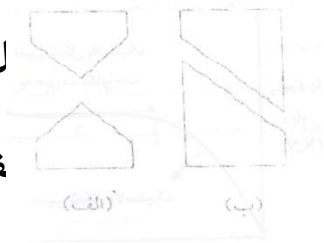
[1] - Dead Zone

4. استفاده از پودر شیشه یا مواد روانساز[1] در دماهای بالا

5. به وجود آوردن شیار جهت کاهش سطح تماس (عاج دار کردن در دور سر نمونه «سطح مقطع نمونه را با فک ها کم کنیم.»)

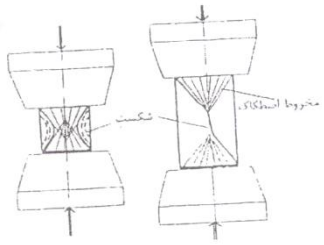
2-7- شکست مواد ترد در آزمون فشار

در آزمون فشار معمولاً مواد ترد در اثر برش تحت زاویه 45 درجه نسبت به محور بارگذاری می کنند. شکست ممکن است از نوع مخروطی یا از نوع برش مستقیم باشد. این حالت های شکست در مورد هر نوع ماده ترد ، خواه ماده فلزی باشد خواه ماده فلزی باشد خواه غیرفلزی صادق می باشد. در موقع شکست مواد ترد مشاهده می شود که مخروطهای اصطکاک برجای می ماند ، در صورتی که بقیه قسمت های نمونه به صورت لایه ای فرو می ریزد که این پدیده به نسبت ارتفاع به قطر نمونه بستگی دارد.

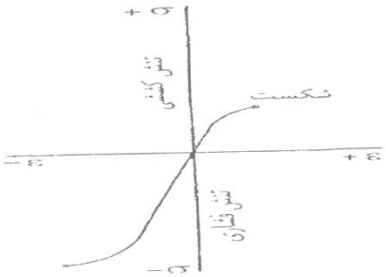


ل 2-3- حالت های شکست نمونه ماده ترد در آزمون فشار

ف) شکست به شکل دو مخروطی ب) شکست برشی



2-4- شکست دو نمونه ترد کوتاه و بلند تحت فشار

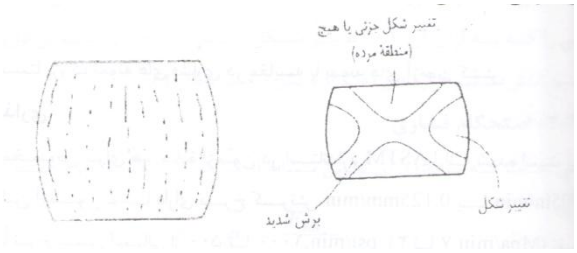


شکل 2-5- رفتار مواد ترد تحت تنش های کشش و فشاری

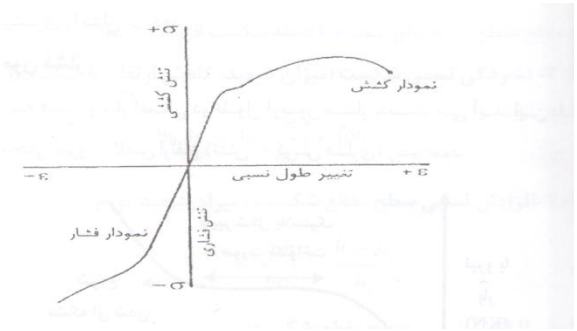
[1] -Flux

2-8- شکست مواد نرم

مواد نرم تحت تأثیر نیروهای فشاری معمولاً بدون اینکه بشکنند به هم فشرده خواهند شد. بعد از اینکه تغییر شکل به مقدار ماکزیمم خود رسید ، ترک های طولی در نتیجه تنش های کشی و یا ترک های حدود 45 درجه ای در اثر تنش های برشی درلایه سطح خارجی ایجاد می شود.



شکل 2-6- تغییر شکل یک نمونه نرم در آزمون فشار



شکل 2-7- رفتار مواد نرم تحت تنش های کششی و فشاری

2-9- کاربرد آزمایش فشار

1) فلزاتی که ازدیاد طول بیش از حد در آزمایش کشش نشان می دهند به جای آزمون کشش از فشار استفاده می شود.
2) اگر اندازه نمونه کوچک باشد.

2-10- محدودیت ها

1) غیرهمگن بودن تغییر شکل
2) وجود اصطکاک بین دستگاه و نمونه
3) احتیاج به دستگاه با تناژ بالا به علت افزایش سطح مقطع

4) رفتار ناپایدار نمونه در حین باردهی که تمایل به تنش های خمشی یا کمانشی وجود دارد.

5) سطح مقطع نسبتاً بزرگ نمونه های فاری در مقایسه با نمونه های آزمون کشش

2-11- نرخ بارگذاری[1]

نرخ بارگذاری مخصوص برای هر ماده آزمون در استاندارد ASTM ارائه شده است یک سرعت میانگین آزمون نوعاً دارای نرخ کرنش 0.125 mm/min یا 0.005 in/min می باشد. نوعاً نرخ تنش اعمالی از 500 تا 1000 psi/min (3 تا 7 Mpa/min) تغییر می کند. نرخ آزمون می تواند بر روی نتایج آزمون تأثیر گذار باشد. عموماً نخ سرعت بیشتر ، استحکام بیشتری را نشان می دهد.

2-12- نتایج آزمون فشار

اطلاعات مربوط به فشار و بار اعمالی در طول آزمون فشار بدست می آید . آن داده را می توان در یک منحنی نیرو – کاهش ارتفاع (تنش – کرنش فشاری) رسم نمود.

شکل 2-8- منحنی نیرو – کاهش ارتفاع

به طور کلی کمیت هایی که از آزمون فشار به دست می آیند و مشابه کمیت های قابل اندازه گیری به وسیله آزمون کشش می باشند ، عبارتند از :

2-12-1- حد تسلیم (تنش تسلیم)

که در مواد نرم همان تنشی است که به ازای آن تغییر شکل پلاستیکی شروع می شود.

(هرگاه این حد در نمودار به دست آمده به طور کاملاً واضحی مشخص نباشد به جای آن تنشی را که به ازای آن 0/2٪ تغییر شکل نسبی بر جای ماندنی داریم ، را تعیین می کنیم. تنش تسلیم قراردادی (0.2% کرنش «تغییر شکل»)).

2-12-2- استحکام فشاری

تنشی است که به ازای آن اولین نشانه از ترک یا شکست روی سطح نمونه ظاهر می شود.

[1] - loading rate

$$S = \sigma = \frac{F_{max}}{A_0}$$

اما بر خلاف آزمایش کشش از آغاز تغییر شکل تا لحظه شکست نیرو افزایش می یابد. زیرا به سطح مقطع نمونه به طور پیوسته تا لحظه شکست افزوده می شود.

2-12-3- فشردگی نسبی شکست (میزان درصد کاهش ارتفاع تا شکست)

$$\% h = In \frac{h}{ho} \times 100$$

2-12-4- افزایش نسبی سطح مقطع شکست (میزان درصد تورم)

$$\%e = \frac{\Delta h}{ho} = \frac{h - h_0}{h_0}$$

2-12-5- افزایش نسبی سطح مقطع شکست

بزرگترین مقدار تغییر شکل پلاستیکی (برآمدگی سطح جانبی) در زمان ظاهر شدن اولین ترک است.

$$\text{درصد تورم} = \frac{A - A_0}{\text{AO}} \times 100$$

۳
آزمایش سختی

3-1- تعاریف سختی [1]

مقاومت در برابر تغییر شکل پلاستیک موضعی و یا مقاومت مواد در برابر سایش .

به خاصیت اجسام در مقابل نفوذ جسم دیگری به سطح آنها و میزان مقاومت و نفوذ پذیری آنها.

3-2- انواع آزمون های سنجش سختی

الف) مقاومت در مقابل فرورفتگی تحت نیروهای استاتیکی و یا دینامیکی (سختی سنجی فرورونده گی)[2]

ب) جذب انرژی تحت نیروهای ضربه ای (سختی سنجی واجهشی)[3]

ج) مقاومت در برابر خراشی (سختی سنجی با خراش)[4]

د) مقاومت در برابر سایش (سختی سایی)[5]

و) مقاومت در برابر برش ، ماشین کاری و یا سوراخ کاری (تراش پذیری)[6]

روش های الف ، ب و ج به طور متداول تر در تعیین سختی به کار می روند.

3-3- جذب انرژی تحت نیروهای ضربه ای (سختی سنجی واجهشی)

---

[1] -Hardness 2-Indentation Hardness 3- Hardness Rebound 4 – Scratch Hardness
5-Wear Hardness 6- mach inability

در این روش فرونده (ساچمه یا گلوله) از ارتفاع معینی به سطح فلز فرود آمده و میزان سختی با استفاده از انرژی جذب شده و ارتفاع برگشت ساچمه (فرورونده) اندازه گیری می شود. به عبارت دیگر یک ساچمه از ارتفاع مشخصی رها می شود ، بسته به قابلیت تغییر شکل ماده به ارتفاع متفاوتی خواهد رفت. بخشی از انرژی ساچمه صرف تغییر شکل مومسان (پلاستیک) ماده شده و باقی مانده آن موجب برگشتن ساچمه (وزنه) از سطح فلزی می شود. ماده سخت انرژی زیادی جذب نمی کند زیرا تغییر شکل پلاستیک (مومسان) آن چشمگیر نمی باشد. در نتیجه وزنه برخوردکننده تا ارتفاع بیشتری بر می گردد. هرچه ارتفاع برگشت ساچمه (گلوله) بیشتر باشد ، انرژی کمتری جذب شده و به همان نسبت سختی ماده زیادتر می باشد. این آزمایش برای فلزات فوق العاده سخت مناسب می باشد. این آزمون همچنین برای ارزیابی گروه دیگری از مواد که معمولاً خیلی سخت تلقی نمیشود همانند پلاستیک ها به کار می رود.

3-4- مقاومت در برابر فرورفتگی تحت نیروهای استاتیکی (ایستا)

در آزمون های فرورونده‌گی استاتیکی (ایستا) (سختی سنجی فرورونده‌گی) که متداول تر می باشند ، حفره ای تحت فشار معین در قطعه ایجاد شده و ابعادش اندازه گیری می شود. هرچه حفره ایجاد شده در شرایط استاندارد ، بزرگتر باشد ماده نرمتر است. آزمون سختی از نوع فرورونده‌گی به مقیاس وسیعی برای بررسی نمونه های فلزی به کار می روند. انجام این آزمون ها نسبتاً آسان است و نیازی به نمونه های دقیقاً ماشین کاری ندارد. نتایج آزمون شاخصی از استحکام فلزها را نشان می دهد. رابطه های تجربی خاصی بین مقادیر سختی و استحکام کششی برای فلزات وجود دارد. همچنین علاوه بر این نتایج آزمون سختی می تواند روش مناسبی برای بررسی میزان تأثیرات عملیات حرارتی باشد.

3-5- مقاومت در برابر خراش (سختی سنجی خراشی)

بعضی مواد به ویژه سرامیک ها و شیشه ها در اثر اعمال فشار تغییر شکل مومسان (پلاستیک) نمی دهند و در نتیجه نمی توان از آزمون های نوع فرورفتگی برای ارزیابی سختی این گونه مواد استفاده کرد. برای این نوع مواد تنها آزمون سختی مناسب سختی سنجی خراش (مقیاس سختی موس) می باشد.

3-5-1- مقیاس سختی موس[1]

[1] - Mohs

این روش بیشتر در مینرالوژی (کانی شناسی) کاربرد دارد ولی امروزه برای تعیین سختی نسبی سرامیک های صنعتی و مواد شیشه ای نیز به کار می رود. این آزمون بر مبنای ده کانی طبیعی از تالک با سختی 1 به عنوان نرم ترین کانی تا الماس با سختی 10 که سخت ترین کانی شناخته شده است ، قرار دارد (جدول 3-1). در این آزمون سعی بر این است که نمونه های استاندارد به وسیله ماده مورد آزمایش خراشیده شوند. عدد سختی ماده مجهول بین سختی دو نمونه استاندارد و متوالی است. چنانچه ماده مجهول بتواند نمونه نرمتر را بخراشد ولی قادر به خراشیدن نمونه سخت تر نباشد. بیشتر فلزات سخت مطابق با این مقیاس سختی بین 4 تا 8 را دارا می باشند. واضح است که به علت کم بودن دامنه تغییرات سختی ، این روش در مورد فلزات به کار برده نمی شود.

3-6- آزمون سختی سنجی فروروندگی

(آزمون ، مقاومت در برابر فرورفتگی تحت نیروهای استاتیکی)

همان طور که میدانیم اصول سختی سنجی بر پایه اندازه گیری مقاومت جسم در مقابل فرورفتگی است که اساس و مبنای دستگاههای اندازه گیری مختلف می باشد. ابزار فرورونده در جسم ، در آزمون سختی سنجی ممکن است به صورت ساچمه ، مخروط ناقص ، یک سطح و یا هرم باشد که معمولاً از فولاد سخت یا الماس ساخته شده و تحت یک نیروی استاتیکی (ایستا) به کار برده می شود. در تمام انواع سختی سنجی فروروندگی استاتیکی ، فرورونده تحت اثر نیروی خارجی به سطح نمونه مورد آزمایش فروبرده می شود. فرورونده موجب تغییر شکل موضعی ماده می شود. بخشی از تغییر شکل ماده در اثر اعمال نیرو ، کشسان (الاستیک) و بخش دیگری از آن مومسان (پلاستیک) است. پس از برداشتن نیرو ، کرنش کشسان (الاستیک) ایجاد شده در ماده برطرف می شود ولی کرنش مومسان (پلاستیک) برجای مانده و اثر دائمی روی سطح قطعه باقی می گذارد. یکی از ابعاد این فرورفتگی (عمق یا طول) اندازه گیری شده و برای تعیین سختی به کار می رود.

جدول 3-1- مقیاس سختی موس

عدد سختی	مواد کانی
1	تالک (Talc)
2	سنگ گچ (Gypsum)
3	کلسیت (Calcite)

4	فلوئوریت (Fluorite)
5	آپاتایت (Apatite)
6	فلدسپار (Feldspar)
7	در کوهی (Quartz)
8	یاقوت زرد (Topaz)
9	یاقوت (Corundum)
10	الماس (Diamond)

متداول ترین آزمایش های سختی سنجی فروروندگی استاتیکی بر روی فلزات ، آزمون های برینل ، راکول ، ویکرز الماسی و میکروسختی است. هرچند آزمایشات سختی دیگری نیز امروزه با توجه به زیاد شدن فولادهای سخت و سخت تر شدن سطوح فولاد مورد استفاده قرار گرفته اند ، که این آزمایشات امل : سختی سنج شور[1] ، مونوترون [2](آزمایش با گلوله الماسی) ، راکول سوپرفیشیال [3](سختی سطحی راکول) و سختی سنج هربرت[4]می باشند.

3-7- آزمایش سختی سنجی برینل[5] ASTM E10-84

در این روش معمولاً از یک ساچمه فولادی سخت و یا کاربید تنگستن به قطر 10 میلیمتر به عنوان فرورونده استفاده می شود. میزان نیروی اعمال شده برای فلزات سخت (فولاد و چدن) 3000 Kg ، برای فلزات نرم (مس و آلومینیوم) 500 Kg و برای فلزات با سختی متوسط 1500 Kg می باشد. مدت زمان اعمال نیرو برای فلزات آهنی در حدود 15-10 ثانیه و برای فلزات غیرآهنی 50 – 30 ثانیه می باشد. بعد از حذف نیرو ، قطر فرورفتگی و همچنین عمق آن به وسیله میکروسکوپ اندازه گیری می شود. معمولاً دو قطر متعامد فرورفتگی را اندازه گرفته و میانگین آنها را برای محاسبه عدد سختی به کار می برند. عدد سختی برینل (BHN) ، مقدار اسمی فشار بر واحد سطح حفره ایجاد شده برحسب کیلوگرم بر میلی متر مربع می باشد. این عدد با تقسیم بار وارده بر سطح حفره ایجاد شده که کره در نظر گرفته می شود ، محاسبه می گردد.

[1] - Shore 2-Monotron 3- Superficial 4- Heart 5-Brinell Hardness

$$BHN = \frac{\text{نیروی وارد شده (کیلوگرم)}}{\text{مساحت سطح فرورفتگی (میلیمتر مربع)}}$$

شمایی از تست برینل در شکل 3-1 نشان داده شده است.

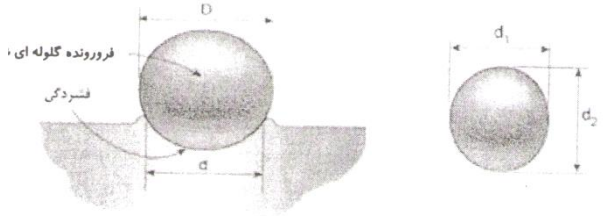
مساحت فرورفتگی با قطر d که از یک فرورونده کروی با قطر D ایجاد شده باشد ، از رابطه زیر بدست می آید.

$$\text{مساحت سطح} = \pi/2(D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

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

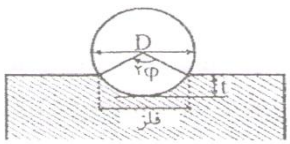
در رابطه فوق BHN عدد سختی برینل (کیلوگرم بر میلیمتر مربع) ، F : نیرو یا بار اعمال شده (کیلوگرم)، D : قطر ساچمه (گلوله) (برحسب میلیمتر) d : قطر حفره ایجاد شد ه بر حسب میلیمتر می باشد.

مقادیر دقیق سختی برینل فقط در صورتی بدست می آید که قطر فرورفتگی (d) در محدوده 0.25 D تا 0.5 D (D : قطر فرورونده) می باشد.



شکل 3-1- فرورونده برینل و نقطه اثر آن

همچنین با داشتن زاویه بین سطح نمونه و مماس بر گلوله (φ) و عمق اثر (t) برحسب میلیمتر نیز می توان سختی را محاسبه نمود.



شکل 3-2- تعیین سختی از طریق عمق اثر

$$BHN = \frac{F}{\frac{\pi}{2} D^2[1-\cos\varphi]} = \frac{F}{\pi D t}$$

$$t = (mm)\ \text{عمق} = {}^1/_2 \left[D - \sqrt{D^2 - d^2}\right] \qquad d = D\sin\varphi$$

اگر فلزی را با اعمال نیرو و ساچمه های غیر استاندارد مورد آزمایش قرار دهیم و بخواهیم سختی یکسانی به دست آوریم باید زاویه φ برای هر مورد یکسان باشد (چون بایستی شکل هندسی اثرهای ایجاد شده مشابه باشد) و چون عدد سختی هم مقداری ثابت است ، خواهیم داشت :

$$\frac{P_1}{D_1^2} = \frac{P_2}{D_2^2} = K$$

پارامتر $\frac{P}{D^2}$ برای هر مرتبه آزمایش بایستی ثابت باشد.

مثلاً برای فلزات نرم مثل سرب و قلع K = 1 و در مورد مس و آلومینیوم K = 5 و برای فولاد K = 30 در نظر گرفته می شود. عدد سختی حاصل از آزمون برینل مستقل از نیروی وارد شده نیست. به عبارت دیگر اگر دو آزمایش سختی برینل با دو نیروی متفاوت روی یک ماده انجام شود ، عدد سختی حاصل از بار ایستای زیادتر با عدد سختی بدست آمده از بار ایستای کمتر تفاوت خواهد داشت. عدد سختی برینل معمولاً در محدوده 90 تا 630 می باشد. اعداد بزرگتر نشانگر سختی بیشتر می باشند. هر اندازه که عمق حفره ایجاد شده بر روی سطح قطعه زیادتر باشد قطر این حفره نیز بیشتر شده و عدد سختی کوچکتر خواهد بود. چنانچه ساچمه ، حفره ای ایجاد نماید که قطر دایره آن بیشتر از 6 میلیمتر باشد ، بار کمتری بایستی برای آزمایش استفاده شود. آزمون برینل برای آزمایش موادی تا درجه سخت 400 HB مناسب است و برای فلزهایی با سختی بالاتر از عدد 500 HB توصیه نمی شود. چرا که اولاً قطر حفره ایجاد شده کوچک می باشد و ثانیاً فرورونده دچار تغییر شکل می شود. با یک حساب ساده این نتیجه حاصل می شود که برای موادی که عدد برینل آنها بیش از 150 باشد ، نیروی مورد نیاز 3000 کیلوگرم ، برای اعداد 75 تا 300 برینل بار مورد نیاز 1500 کیلوگرم و برای موادی که عدد برینل آنها زیر 100 باشد بار مورد نیاز 500 کیلوگرم خواهد بود.

3-7-1- محدودیت ها و معایب سختی سنجی برینل

1) روش مخربی می باشد چرا که بر روی نمونه حفره ای برجا می ماند.

2) وزن دستگاههای برینل سنگین و زیاد می باشد.

3) دستگاه برینل نسبت به سایر دستگاه ها گرانتر می باشد.

4) این آزمایش یک آزمایش نظری است که عواملی همچون آموزش کاربران ، تجربه و استعداد آنها در اندازه گیری ابعاد حفره ایجاد شده ممکن است در نتایج آزمایش اثر داشته باشد.

5) این آزمایش برای مواد بسیار سخت مناسب نمی باشد. (تغییر شکل ساچمه)

6) برای قطعات خیلی نازک که احتمالاً عمق حفره ایجاد شده بیشتر از ضخامت قطعه باشد این روش مناسب نیست.

7) مناسب نبودن این آزمایش برای قطعاتی است که سطح آنها سخت شده باشد.

(ممکن است عمق حفره ایجاد شده از ضخامت لایه سخت شده بیشتر باشد و در نتیجه نرمی مغز قطعه نتیجه آزمون را بی اعتبار نماید.)

8) با افزایش نیرو ، سختی افزایش و سپس کاهش می یابد.

9) نقطه اثر بزرگ ایجاد شده ، کاربرد آنرا محدود می کند.

3-7-2- مزایای آزمون سختی سنجی برینل

1) با بزرگ بودن اثر ایجاد شده مسئله غیر هموژن بودن از بین می رود.

2) به خراش ها و ناصافی های سطح حساس نمی باشد.

3) این روش دارای قدمت زیادی بوده و عموماً نتایج آزمایشات برینل در صنایع قابل قبول می باشد.

4) انجام آزمایش سریع بوده و معمولاً در کمتر از 2 دقیقه انجام می شود.

5) صرفنظر از قیمت و هزینه اولیه دستگاه ، انجام آزمایش معمولاً ارزان تمام می شود.

6) وجود نقایص درونی مواد از جمله وجود یک نقطه سخت و یا یک حفره ، اثر بزرگی در نتیجه آزمایش برینل نخواهد داشت.

7) اثر ایجاد شده در روش برینل بزرگتر از اثر ایجاد شده در آزمایش ویکرز می باشد.

8) این روش را می توان برای سختی سنجی نمونه های حجیم و بزرگ[1] نیز استفاده کرد.

1- bulk

9) عمق و قطر اثر ایجاد شده توسط ساچمه در این روش نسبت به سایر روش ها بزرگتر و پهن تر است. به همین دلیل سطح وسیعی از مواد را می توان سختی سنجی نمود.

10) از این آزمایش می توان برای مواد با ساختار چندفازی (دانه) و ساختار غیرهمگن نیز استفاده کرد.

براساس استاندارد بیان عدد سختی برینل برای یک فلز به صورت زیر می باشد :

(زمان /نیرو/قطر گلوله/عدد سختی) : (95HB 10/500/30)

3-7-3- کاربردهای آزمون سختی سنجی برینل

1) فولادهای ساختمانی و سایر قطعات نورد شده
2) اغلب قطعات ریختگی شامل فولاد ، چدن و آلومینیوم
3) اغلب قطعات آهنگری

3-7-4- رابطه بین عدد سختی برینل و استحکام کششی

با داشتن عدد سختی برینل یک فلز می توان استحکام کششی آنرا تخمین زد.

$$TS\,(Mpa) = \begin{cases} 3.55.HB & (HB \leq 175) \\ 3.38.HB & (HB > 175) \end{cases}$$

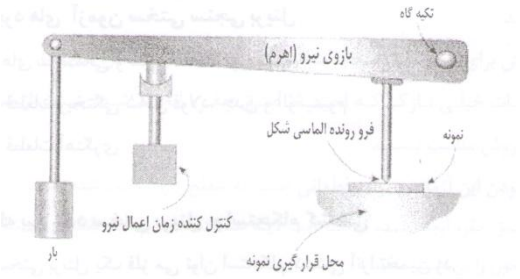
$$TS\,(psi) = \begin{cases} 515.HB & (HB \leq 175) \\ 490.HB & (HB > 175) \end{cases}$$

روابط بالا برای فولادهای شدیداً کار سرد شده و یا فولادهای آستنیتی کاربرد ندارد.

3-8- آزمون سختی سنجی ویکرز ASTM E92-82

در روش ویکرز فرورونده ، از جنس الماس به شکل هرم با مقطع چهار وجهی (مربع القاعده) که زاویه نوک آن 136 درجه و بار وارده از 1 تا 120 کیلوگرم با تقسیمات 5 کیلوگرمی می تواند تغییر نماید. یکی از امتیازات آزمون ویکرز در مقایسه با آزمون برینل

این است که بدون توجه به اندازه فرورفتگی ، شکل هندسی حفره های مربع القاعده آزمون ویکرز همیشه یکسان است. به عبارتی تغییر شکل پلاستیک (مومسان) برای حفره های کم عمق و عمیق می باشد. لذا سختی محاسبه شده مستقل از اندازه نیروی وارد بر فرورونده خواهد بود. در آزمون ویکرز پارامتر P/D^2 ندارد. از این آزمون برای سختی سنجی مواد بسیار سخت نیز استفاده می شود و مدت زمان اعمال بار در حدود 10 تا 15 ثانیه می باشد. محدوده عدد سختی ویکرز بین 1500 – 5 می باشد که محدوده قابل قبول بین 1300 – 5 خواهد بود. به علت دقیق بودن نتایج حاصل از آزمون ویکرز از این روش و دستگاه های آن در تحقیقات پژوهشی استفاده می شود. شمایی از اصول عملکرد سختی سنج ویکرز در شکل 3-3 ارائه شده است.



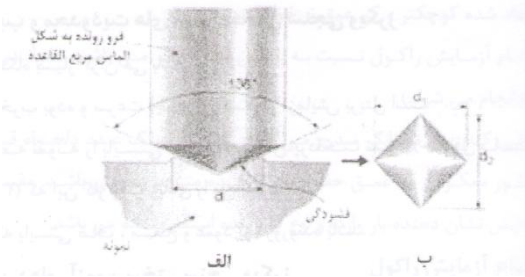
شکل 3-3- عملکرد سختی سنجی ویکرز

در روش ویکرز بایستی هر دو قطر مربع اندازه گیری شود و از میانگین آنها (D) برای محاسبه عدد سختی استفاده شود. عدد سختی دستگاه ویکرز با دندانه الماسی هرمی شکل ، به طور اختصار به صورت VHN و یا DPN نوشته و از فرمول زیر محاسبه خواهد شد.

$$VHN = \frac{1.8544\,P}{D^2}$$

VHN : برحسب کیلوگرم بر میلیمتر مربع P : بار وارده برحسب کیلوگرم D : میانگین قطر مربع فرورفتگی برحسب میلیمتر

شکل 3-4 نمایی از فرورونده در آزمایش ویکرز و نقطه اثر آن را نشان می دهد.



شکل 3-4- الف) فرورونده ویکرز ب) نقطه اثر فرورونده

برای دستیابی به بهترین جواب آزمون سختی ویکرز ، نیروی فرورونده باید طوری انتخاب شود که قطر فرورفتگی حدود 0/5 میلیمتر باشد. ضخامت ماده آزمایش نباید کمتر از 1/5D باشد. نیروهای مناسب برای بعضی مواد به عنوان مثال : انواع فولاد و چدن 30 کیلوگرم ، آلیاژهای مس 10 کیلوگرم و آلیاژهای آلومینیوم 5 کیلوگرم خواهد بود.

براساس استاندارد بیان عدد سختی ویکرز برای یک فلز به صورت زیر می باشد :

HVXX , 800 HV/10

میزان بار اعمال شده : XX

3-8-1- مزایای آزمون سختی سنجی ویکرز

1) دقت در اندازه گیری ابعاد فرورفتگی حاصل شده.
2) انجام آزمایش نسبتاً سریع می باشد.
3) می توان سختی نمونه های نازک تا 0/006 اینچ ضخامت را اندازه گرفت.
4) گفته شده است که تا محدوده عدد سختی 1300 (تقریباً برابر با عدد سختی 150 برینل) نتایج این روش دارای دقت مطلوب می باشد.
5) امکان مسطح شدن دندانه ویکرز کمتر از دندانه برینل است.
6) به علت اینکه جنس فرورونده از الماس است ، با این روش می توان نرم ترین تا سخت ترین اجسام را به دلیل کوچک بودن نقطه اثر مورد ارزیابی قرار داد. می توان از این روش برای بررسی سختی اتصالات جوش نیز استفاده کرد.

3-8-2- معایب و محدودیت های آزمون سختی سنجی ویکرز

1) قیمت دستگاه بسیار گران می باشد.
2) آزمایش مخرب بوده و سرعت اجرای آن کمتر از آزمایش برینل است.

3) سطح قطعه نمونه را بایستی قبل از آزمایش پرداخت نمود (حداقل با سنباده Sic با شماره 300) که این کار وقت زیادی را می گیرد.

4) سطح نمونه بایستی صاف ، مسطح و عمود بر فرورونده باشد.

3-8-3- کاربردهای آزمون سختی سنجی ویکرز

مواردی که دقت و نفوذ کم عمق مورد نیاز است همانند :

1) قطعات سمانته شده تا ضخامت های 0/5 تا 0/01 اینچ
2) قطعات تمام شده ای که صافی سطح زیادی دارند
3) مقاطع نازک مانند لوله ها
4) ساختارهای ضعیف
5) ضخامت رویه کاری

3-9- آزمایش سختی سنجی راکول [1] ASTM E18

آزمایش سختی راکول شبیه به آزمایش برینل است که در آن عدد سختی ، نسبتی از بزرگی حفره ای است که توسط تولید یک دانه و با وارد کردن یک بار ثابت معین بر روی قطعه به وجود می آید. دستگاه آزمایش راکول ، دستگاه آزمایش سریع با خواندن مستقیم است. این روش برای انجام آزمون های مقایسه ای سریع بسیار مناسب است. در این روش از فرورونده با جنس الماس با شکل مخروطی با زاویه 120 درجه که نوک مخروط آن گرد شده و برینل نامیده می شود ، استفاده می گردد. فرورونده یا نفوذ کننده ممکن است یک ساچمه فولادی سخت به قطر 1/16 اینچ یا 1/8 اینچ باشد. میزان بارهای استاندارد 60 ، 100 و 150 کیلوگرم خواهند بود.

3-9-1- تفاوت آزمایش راکول با آزمایش برینل

1) در آزمایش راکول سه نوع بار و سه نوع فرورونده مختلف را می توان انتخاب نمود.
2) اختلاف راکول با برینل در کوچکتر بودن بار وارده و شکل فرورونده ایجاد کننده حفره است.

1- Rockwell Hardness Test

3) حفره ایجاد شده کوچکتر و کم عمق تر خواهد بود.

4) روش انجام آزمایش راکول نسبت به برینل سریع تر می باشد (خواندن عدد سختی مستقیماً انجام می شود.)

5) عدد سختی که روی نشانگر مدرج می توان خواند ، یک عدد دلخواه قراردادی است که به طور معکوس با عمق حفره ایجاد شده متناسب می باشد. مقیاس به کار رفته برای آزمایش نشان دهنده بار وارده و نوع فرورونده استفاده شده می باشد.

3-9-2- انواع آزمایش راکول

1) Rock well B (حرف B حرف اول Ball)

در این روش از یک گلوله فولادی استفاده می شود.

2) Rock well C (C حرف اول Cone)

در این روش از یک مخروط الماسی استفاده می شود.

در سختی سنجی راکول ، عدد سختی به تنهایی وجود ندارد ، چون عدد سختی به نوع دندانه استفاده شده و میزان بار وارده بستگی دارد. یعنی عدد سختی راکول به بار وارده و نوع نفوذ کننده و شکل آن بستگی خواهد داشت. بنابراین یک حرف مشخص کننده لازم است تا مقادیر بدست آمده از آزمایش مفهوم گردد. به عبارت دیگر هنگام گزارش عدد سختی راکول حتماً مقیاس مربوطه همراه با عدد ذکر می شود که در غیر اینصورت عدد سختی فاقد معنی خواهد بود. به عنوان مثال HRB به مفهوم مقیاس B (یعنی بار اصلی 100 کیلوگرم و فرورونده کروی به قطر 1/16 اینچ) و HRC بیانگر مقیاس C (یعنی بار اصلی 150 کیلوگرم و فرورونده مخروط الماسی) است. مقیاس B برای آزمایش مواد با سختی نرم تا متوسط که سختی آنها از صفر تا 100 باشد استفاده می شود (اگر عدد سختی بیشتر از 100 باشد یعنی قسمتی از فرو رونده در نمونه فرو رفته است.) مقیاس C برای مواد سخت که عدد سختی آنها بیشتر از B100 باشد مورد استفاده قرار می گیرد. عدد سختی سخت ترین فولادها در حدود C70 می باشد. دامنه مفید کاربرد مقیاس C از عدد C20 به بالا می باشد. اگر عدد سختی از 20 کمتر باشد یعنی اینکه کل فرورونده وارد نمونه شده و کاملاً در نمونه فرورفته است.

در روش راکول مبنای اندازه گیری ، عمق اثر ایجاد شده است و بدون واحد می باشد.

$$RB = 130 - \frac{\text{عمق اثر}}{0.002}$$

(فرورونده : مخروط الماسی)

$$RC = 100 - \frac{\text{عمق اثر}}{0.002}$$

(فرورونده : گلوله فولادی)

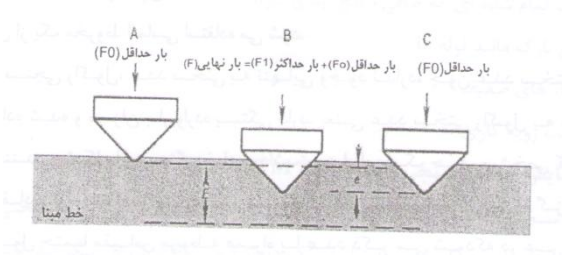
3-9-3- شرایط سطحی قطعه

1) بایستی صاف و بدون پلیسه ، چاله و یا مواد خارجی در رو و زیر آن باشد.

2) ضخامت قطعه باید طوری باشد که در موقع آزمایش بر روی سندان شکم نداده و تغییر شکل ندهد.

3) روی سطح کروی را باید با سوهان و یا سنگ زدن صاف نمود.

4) تمام قطعات بایستی با یک ضخامت ثابت تحت آزمایش قرار گیرند.



شکل 3-5- شمایی از اصول آزمایش راکول

در آزمایش راکول ابتدا یک بار کوچک 10 kg بر روی قطعه وارد می شود تا سبب ایجاد یک حفره کوچک شده و دندانه در داخل این حفره مستقر شود (اطمینان از اینکه فرورونده در تماس کامل با کف فرورفتگی قرار دارد)سپس درجه تنظیم دستگاه بر روی علامت set قرار داده شده و بار اصلی بر روی قطعه وارد می آید.

بار اصلی بین 60 تا 100 کیلوگرم برای ساچمه فولادی است و در بعضی مواقع در صورت لزوم مقدار بار ممکن است بیشتر شود. برای الماسه برینل نیروی 150 کیلوگرم به کار برده می شود. پس از اینکه بار اصلی بر روی قطعه وارد آمد و برداشته شد ، عدد سختی از روی نشانگر مدرج خوانده می شود. در حالی که بار کوچک اولیه همچنان در محل قرار دارد. در آزمون راکول ماشین عمق فرورفتگی با نفوذ را به جای قطر حفره اندازه گیری می کند و مستقیماً به وسیله یک عقربه روی صفحه مدرج گردی که به طور غیرمستقیم به 100 قسمت تقسیم شده است (هر قسمت نمایشگر میلیمتر از عمق حفره است) خوانده می شود. بنابراین یک عدد کوچک روی صفحه 1/100 به معنی عمق زیاد فرورفتگی و در نتیجه سختی کم (ماده نرم) و برعکس است. یعنی هرچه عمق

فرورفتگی بیشتر باشد عدد سختی کوچکتر است. عمق نفوذ طوری تنظیم شده است که عدد راکول را مستقیماً می توان روی صفحه مدرج خواند. به منظور جلوگیری از اشتباهاتی که به علت برخورد با یک نقطه سخت ، ناخالصی قطعه ، چاله و سوراخ های کوچک و یا سایر معایب موجود بر روی سطوح قطعه به وجود می آید ، معمولاً بر روی هر قطعه ، سه آزمایش در سه نقطه مختلف انجام می شود و معدل نتیجه سه آزمایش به عنوان عدد سختی آن قطعه ارائه می گردد.

جدول 3-2- مقیاس های سختی راکول

کاربرد مقیاس	مجموع بار فرورونده Kg	نوع فرورونده	علامت	مقیاس
تسمه های نازک فولادی سخت شده	60 Kg	مخروط الماسی (120)	H_{RA}	A
فولاد نرم و فولاد با کربن متوسط بدون عملیات حرارتی شده	100 Kg	گوی 1/16 اینچی فولاد	H_{RB}	B
فولادهای سخت و بازپخت شده و فولادهای آلیاژی	150 Kg	مخروط الماسی (120)	H_{RC}	C

3-9-4- مزایای آزمون راکول

آزمایش راکول را بر روی طیف وسیعی از مواد گوناگون می توان انجام داد و سختی آنها را بدست آورد. آزمون راکول در عمل سریع و ساده است. از آنجائیکه بارها و نافذها ، کوچکتر از آزمون برینل هستند ، آزمون راکول را می توان برای نمونه های نازکتر به کار برد و قطعات سخت به خوبی قطعات نرم می توانند آزمایش شوند.

3-9-5- معایب آزمون راکول

معایب آزمایش راکول بسیار شبیه به آزمایش برینل است. دستگاه آزمایش نسبتاً گران و مناسب استفاده در خارج از آزمایشگاه نبوده و آزمایش عموماً مخرب محسوب می شود.

3-9-6- مقیاس های متداول سختی راکول

عدد سختی راکول را می توان به برینل و بالعکس تبدیل کرد.

برای تبدیل عدد سختی راکول با مقیاس C که بین 20 تا 40 می باشد ، عدد سختی برینل از فرمول زیر محاسبه می شود :

$$BHN = \frac{1.42 \times 10^6}{(100 - HRC)^2}$$

برای عدد سختی راکول که بیشتر از 40 می باشد از فرمول زیر استفاده می شود :

$$BHN = \frac{2.5 \times 10^4}{100 - HRC}$$

برای محاسبه عدد سختی برینل در برابر عدد سختی راکول B که بین 35 تا 100 باشد از فرمول زیر استفاده می کنیم :

$$BHN = \frac{7/3 \times 10^3}{130 - HRB}$$

3-9-7- کاربردهای آزمون سختی سنجی راکول

1) برای سختی سنجی قطعات تمام شده از قبیل : یاتاقان ها ، سوپاپ ها ، پیچ ها ، مهره ها ،چرخ دنده ها ، غلطک ها و ...
2) برای سختی سنجی ابزارهای برشی نظیر اره ها ، قلم ها ، قیچی ها .....
3) برای سختی سنجی ابزارهای براده برداری
4) برای سختی سنجی قطعات ریختگی و آهنگری کوچک
5) برای سختی سنجی قطعات سمانته شده

3-10- آزمون ریزسختی (سختی میکروسکوپی) [1]

1-Micro hardness Test

هنگامی که تعیین سختی مواد بسیار نازک مانند تیغ صورت تراشی ، قطعات بسیار کوچک ، لایه نازک سخت شده ، قطعه سخت شده پوسته ای یا قطعات دارای سطوح ترد و یا احتمالاً بررسی سختی فازهای میکروسکپی مختلف یک آلیاژ مورد نظر باشد ، می توان از آزمون ریز سختی استفاده کرد. در این موارد همانند بررسی های ریزساختار ، بایستی سطح نمونه پرداخت بسیار خوب (صیقل کاری عالی) داشته باشد. دوآزمون متداول ریز سختی ، آزمون های ویکرز الماسی ونوپ الماسی هستند (شکل 3-6). نتایج آزمون های ریز سختی عموماً کمتر از نتایج حاصل از فرورفتگیهای بزرگتر قابل اعتمادند. معمولاً نتایج این آزمایش ها سختی بالاتری را نشان می دهند.

استاندارد مربوط به این آزمون ASTM E 384-89 می باشد. اصول روش آزمایش ریز سختی ویکرز الماسی همانند آزمون ویکرز استاندارد است با این تفاوت که به جای نیروی فرو رونده چند کیلوگرمی نیروها در حد گرم هستند. انواع این آزمون ها روی میکروسکوپ های متالورژیکی انجام می شوند. مشاهده قطعه از زیر میکروسکوپ با بزرگنمایی 100 تا 2000 برابر خواهد بود. در آزمون ریز سختی نوپ الماسی که در آمریکا ابداع شد ، از یک فرورونده از جنس الماس و به شکل هرم استفاده میشود که قطر بزرگ حفره ایجاد شده توسط آن ، هفت برابر قطر کوچکش و در حدود سی برابر عمق آن است. یعنی عمق آن $\frac{1}{30}$ قطر بزرگ حفره می باشد. نیروهای اعمالی در این روش از 25 تا 3600 گرم می باشد.امتیاز این نوع فرورونده در مقیاس با فرورونده آزمون ویکرز که فرورفتگی مربعی ایجاد می کند ، در این است که طول فرورفتگی نوپ (L) حدوداً سه برابر قطر فرورفتگی (D) ویکرز است و می تواند با دقت بیشتری اندازه گیری شود. در این روش سختی به عنوان نیرو بر سطح اثر ایجاد شده تعریف می شود :

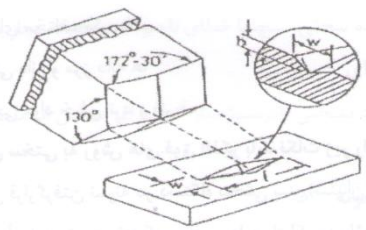
$$\frac{1.43\,P}{L^2} = \frac{P}{L^2 C} = \frac{P}{A} = KHN = Knoop$$

KHN : عدد سختی نوپ (گرم بر میلیمتر مربع)

P : بار وارده بر حسب گرم

L : قطر بزرگ لوزی فرورفتگی

C : ضریب ثابت که توسط سازنده تعیین می شود. (C = 0.7028)



شکل 3-6- شمایی از فرورونده و نقطه اثر ایجاد شده در آزمون ریز سختی (نوپ)

گسترده نیروهای مورد استفاده در آزمایش نوپ همانند آزمون ریز سختی ویکرز است. عدد سختی نوپ بین 60 تا 1000 بوده ومعادل از مقاومت سطح قطعات نسبت به فرورفتگی و یا اندازه مومسان (پلاستیک) شدن سطح قطعات می باشد.

3-10-1 مقایسه آزمون نوپ با آزمون ویکرز :

1) اثرهای ایجاد شده را می توان نزدیک به هم انتخاب کرد.
2) در یک مقدار معین از قطر اثر ، سطح و عمق اثر ایجاد شده در حدود 15 درصد سطح و عمق اثر ایجاد شده در روش ویکرز است (به علت شکل خاص فرورونده).
3) نتایج دو آزمایش مشابه است ولی همیشه اعداد نوپ 20 تا 25 واحد بزرگتر از اعداد ریزسختی ویکرز برای همان ماده است.
4) میزان عمق فرورونده در آزمون ویکرز در حدود 2 برابر عمق نفوذ فرورونده در آزمون نوپ می باشد.
5) قطر فرورونده در آزمون ویکرز تقریباً $\frac{1}{3}$ طول قطر بزرگ فرورونده نوپ می باشد.
6) آزمون ویکرز حساسیت کمتری بر شرایط سطحی نمونه نسبت به آزمون نوپ دارد.
7) آزمون ویکرز آزمون مناسبی برای مساحت های کوچک کروی می باشد.
8) آزمون نوپ آزمون مناسبی برای مساحت های کوچک طولی می باشد.
9) آزمون نوپ آزمون مناسب و مفیدی برای مواد با سطح ترد و قطعات نازک می باشد.

3-10-2- کاربردهای آزمون سختی سنجی نوپ

1) برای سختی سنجی ورق های فلزی و مواد نازک

2) برای بررسی فازهای مختلف یک ماده

3) برای تعیین سختی دانه و مرز دانه ها

4) برای سختی سنجی مواد خیلی ترد و ظریف

در موقع اندازه گیری سختی به روش های فوق الذکر باید نکات زیر را رعایت کرد :

الف) فرورونده و محل قرار گرفتن نمونه در دستگاه سختی سنجی (سندان) تمیز باشد.

ب) سطح نمونه مورد آزمایش تمیز ، خشک ، صاف و عاری از اکسید باشد.

ج) سطح باید مسطح و عمود بر فرورونده باشد.

د) آزمایش بر روی سطح استوانه ای منجر به کم خواندن عدد سختی می شود که میزان خطا بستگی به انحنا ، نیرو ، فرورونده و سختی فلز دارد.

ر) ضخامت نمونه باید حداقل 10 برابر عمق اثر باشد.

ز) فاصله دو اثر سختی باید 3 تا 5 برابر قطر اثر ایجاد شده باشد تا اثر کار سختی در اطراف اثر اول از بین برود.

س) سرعت اعمال نیرو بایستی استاندارد باشد.

و) حتی المقدور از قطعاتی که مانت نشده باشد استفاده کرد ، زیرا مقداری از نیرو صرف تغییر شکل مانت می شود.

ه) از کناره های آزاد جسم سختی گرفته نشود.

ی) به علت ناهمسان گردی و یا ناهمگنی فازها باید سختی در چند نقطه گرفته شده و میانگین آنها گزارش شود.

3-11- دقت آزمون های سختی

پاره ای از عواملی که بر روی دقت هر آزمون سختی تأثیر می گذارند عبارتند از :

3-11-1- شرایط فرورونده

تخت شدن فرورونده گلوله فولادی موجب خطا در شماره سختی خواهد شد. گلوله باید هرچند وقت یکبار برای اطمینان از عدم تغییر شکل بررسی شود و هنگامی که تغییر شکل مشاهده شد کنار گذاشته شود. فرورونده های الماس هم باید برای اطمینان از عدم لب پر شدن کنترل شوند.

3-11-2- دقت بار مصرفی

بایستی میزان بار اعمال شده سختی سنجی ، با خطای ناچیز ، در محدوده مجاز باشد.

3-11-3- باردهی ضربه ای

علاوه بر نشان دادن عدد سختی نادرست بار ضربه ای ممکن است به فرورونده الماس آسیب برساند.

3-11-4- شرایط سطح نمونه

سطحی از نمونه که برای اندازه گیری سختی انتخاب می شود بایستی کاملاً تخت باشد. هرگونه حفره ، پوسته یا چربی باید به وسیله سنگ زنی و پولیش از سطح نمونه برداشته شود.

3-11-5- ضخامت نمونه

نمونه بایستی به اندازه کافی ضخیم باشد. به طوری که بعد از انجام آزمون سختی در سطح مقابل اثر فرورونده برآمدگی ظاهر نشود. ضخامت نمونه بایستی حداقل ده برابر عمق اثر فرورونده باشد.

3-11-6- شکل نمونه

بالاترین دقت هنگامی حاصل می شود که سطح نمونه مورد آزمایش کاملاً تخت و عمود بر محور فرورونده باشد.

3-11-7- موقعیت اثر فرورونده

اثر فرورونده باید حداقل 2/5 برابر قطر و در مورد فرورونده های کروی حداقل 5 برابر قطر از لبه نمونه فاصله داشته باشد.

3-11-8- یکنواختی ماده

اگر از نظر ساختاری و شیمیایی تغییراتی در نمونه ایجاد شده باشد ، هرچقدر سطح اثر فرورونده بزرگتر باشد به همان اندازه میانگین سختی دقیق تر خواهد بود. اگر اثر نمونه کوچک باشد برای دست یابی به یک سختی میانگین واقعی باید از جاهای مختلف نمونه آزمایش سختی گرفته شود.

جدول 3-3- مقایسه اعداد سختی در آزمون های مختلف

(الف)

مقایسه استانداردهای سنجش سختی

ویکرز (F=10Kg)	مرینل	راکول		موهز	تنش کششی	ویکرز (F=10Kg)	برینل	راکول		موهز	تنش کششی
		B	C		MPa			B	C		MPa
63	60				200	175	166	86			560
65	62				210	176	169	86.5			570
66	64				220	180	171	87			575
70	67				225	181	172				580
72	68				230	184	175	88			590
75	71				240	185	176				595
79	75				250	187	178	89			600
80	76				255	190	181	89.5			610
82	78				260	193	184	90			620
85	81	41			270	195	185				625
88	84	45			280	197	187	91		5.0	630
90	86	48			285	200	190	91.5			640
91	87	49			290	203	193	92			650
94	89	51			300	205	195	92.5			660
95	90	52			305	208	198	93			670
97	92	54			310	210	199	93.5			675
100	95	56			320	212	201				680
103	98	58			330	215	204	94			690
105	100	59			335	219	208				700
107	102	60			340	220	209	95			705
110	105	62			350	222	211	95.5			710
113	107	63.5			360	225	214	96			720
115	109	64.5			370	228	216				730
119	113	66			380	230	219	96.5			740
120	114	67			385	233	221	97			750
122	116	67.5			390	235	223				755
125	119	69			400	237	225	97.5			760
128	122	70			410	240	228	98			770
130	124	71			415	243	231		21		780
132	125	72			420	245	233	99			785
135	128	73			430	247	235	99.5			790
138	131	74			440	250	238		22		800
140	133	75			450	253	240				810
134	136	76.5			460	255	242		23		820
145	138	77			465	258	245				830
147	140	77.5			470	260	247		24		835
150	143	78.5			480	262	249			5.5	840
153	145	79.5			490	265	252				850
155	147	80		4.5	495	268	255		25		860
157	149	81			500	270	257				865
160	152	81.5			510	272	258		26		870
163	155	82.5			520	275	261				880
165	157	83			530	278	264				890
168	160	84.5			540	280	266		27		900
170	162	85			545	283	268				910
172	163	85.5			550	285	271				915

(ب)

ویکرز (F>10Kg)	برینل	راکول		موهز	تنش کششی	ویکرز (F>10Kg)	برینل	راکول		موهز	تنش کششی
		B	C		MPa			B	C		MPa
287	273		28		920	423	402		43		1360
290	276				930	426	405				1370
293	278		29		940	429	408				1380
295	280				950	430	409				1385
299	284				960	431	410				1390
300	285				965	434	413		44		1400
302	287		30		970	437	415				1410
305	290				980	440	418				1420
306	293				990	443	421				1430
310	295		31		995	446	424		45		1440
311	296				1000	449	427				1450
314	299				1010	450	428				1455
317	301		32		1020	452	429				1460
320	304				1030	455	432				1470
323	307				1040	458	435		46		1480
327	311		33		1050	460	437				1485
330	314				1060	461	438				1490
333	316				1070	464	441				1500
336	319		34	6.0	1080	467	444				1510
339	322				1090	470	447				1520
340	323				1095	473	449		47	7.0	1530
340	325		35		1100	476	452				1540
345	328				1110	479	455				1550
349	332				1120	480					1555
350	333				1125	481					1560
352	334				1130	484			48		1570
355	337		36		1140	486					1580
358	340				1150	489					1590
360	342				1155	490					1595
361	343				1160	491					1600
364	346		37		1170	494					1610
367	349				1180	497			49		1620
370	352				1190	500					1630
373	354		38		1200	503					1640
376	357				1210	506					1650
380	361				1220	509					1660
382	363		39		1230	510					1665
385	366				1240	511					1670
388	369				1250	514			50		1680
390	371				1255	517					1690
392	372		40		1260	520					1700
394	374				1270	522					1710
397	377				1280	525					1720
400	380				1290	527			51		1730
403	383		41		1300	530					1740
407	387				1310	533					1750
410	390				1320	536					1760
413	393		42		1330	539					1770
417	396			6.5	1340	541					1780
420	398				1350	544			52		1790

(ج)

ویکرز (F>10Kg)	برینل	راکول		موهز	تنش کششی MPa	ویکرز (F>10Kg)	برینل	راکول		موهز	تنش کششی MPa
		B	C					B	C		
547					1880	615	584		56		2050
550					1810	618	587				2060
553					1820	620	589				2070
556					1830	623	592				2080
559					1840	626	595				2090
560			53		1845	629	598				2100
561					1850	630	599				2105
564					1860	631	600				2110
567					1870	634	602				2120
570					1880	636	604				2130
572					1890	639	607		57		2140
575					1900	640	608				2145
578			54		1910	641	609				2150
580					1920	644	612				2160
583					1930	647	615				2170
586					1940	650	618				2180
589					1950	653	620				2190
590					1955	655	622		58		2200
591				7.5	1960	675			59		
594					1970	698			60		
596					1980	720			61		
599			55		1990	745			62		
600					1995	773			63		
602					2000	800			64		
605					2010	828			65		
607					2020	864			66		
610					2030	900			67		
613					2040	940			68		

۴

آزمایش خمش

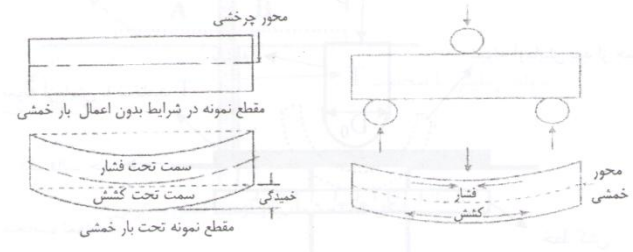
آزمایش خمش[1] ASTM E 143-87

4-1- مقدمه

چنانچه در اثر اعمال نیرو قسمتی از سطح مقطع ماده تحت تأثیر تنش فشاری و قسمت دیگر تحت تأثیر تنش کششی قرار گیرد ، گفته می شود که ماده تحت خمش است. به عبارت دیگر خمش ، میزان خمیدگی نمونه آزمون تحت اثر بار اعمال شده می باشد. استحکام نمونه آزمون ، تابعی از جنس و هندسه سطح مقطع آن است. نتیجه این آزمون تعیین کننده مدول الاستیسیته ، استحکام فشار و سایر خواص مشابهی که در تست کشش بدست می آید. با توجه به اینکه خواص در خمش و کشش یکسان هستند ، در بیشتر موارد از آزمون خمش برای تعیین بهترین شکل سطح مقطع در یک کاربرد معین استفاده می شود. تست خمش غالباً بر روی مواد تردی انجام می گیرد که به طور دقیق نمی توان بر روی آنها تست کشش را انجام داد. از جمله این موارد می توان به بسیاری از سرامیک ها و مواد مرکب اشاره نمود.

4-2- شرایط نمونه

شکل نمونه آزمون باید به گونه ای باشد که امکان استفاده از طول محدود و مشخصی فراهم باشد. طول نمونه آزمون برای اجتناب از شکست برشی یا کمانش باید بین 6 تا 12 برابر عرض آن باشد.



[1] - Bending Test

شکل 4-1- وضعیت آزمون خمش

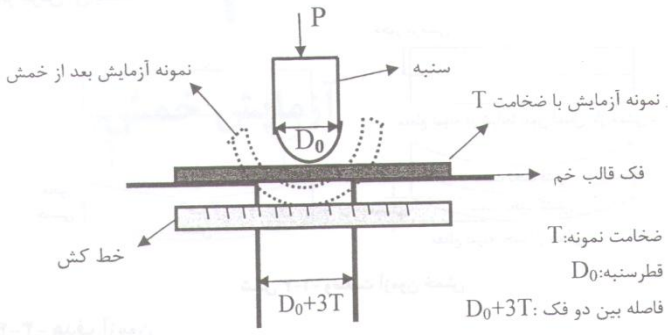
4-3- هدف آزمون

اندازه گیری مینیمم شعاعی است که بتوان قطعه را خم کرد بدون اینکه در کناره های آن ترک خوردگی به وجود آید. این مینیمم شعاع را قابلیت خمش می نامند که تابعی از ضخامت قطعه خواهد بود و برحسب ضخامت قطعه نیز می توان آنرا بیان کرد. به عنوان مثال شعاع انحناء 3T (T ضخامت قطعه) را می توان نام برد.

4-4- انواع آزمون های خمش

4-4-1- آزمون خمش کنترل شده

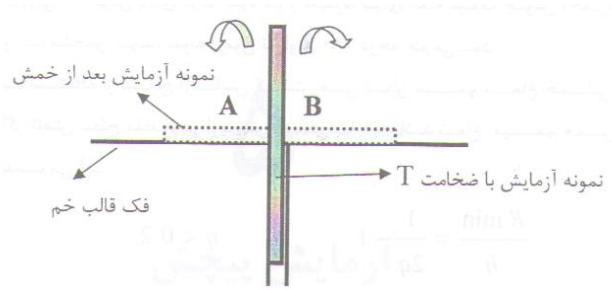
آزمون خمش کنترل شده آزمونی است که طی آن ماده دور یک قالب شکل دهنده با شعاع انحنای مشخص خم کاری می شود. در یک آزمون متداول از این نوع ، ورق فلزی تحت زاویه 180 درجه خم می شود. دلایل اصلی انجام چنین آزمون هایی اندازه گیری شکل پذیری ماده و تعیین کمترین شعاع ممکن خم کاری می باشد. همانطور که گفته شد این آزمون با چندقالب انجام می شود تا کوچکترین شعاع انحناء قابل خم کردن بدون بروز علائم ترک در ورق فلزی معلوم شود. شعاع حدی انحناء تابع ضخامت ماده و همچنین ویژگی های متالورژیکی آن است. به طوری که نتایج آزمون خمش با ضخامت ورش گزارش داده می شود. مثلاً گزارش شعاع حدی (مینیمم شعاع) به صورت 2T برای یک ورق به ضخامت 1/5 میلیمتر به این معنی است که کوچکترین شعاع خم کاری تا زاویه 180 درجه بدون ایجاد ترک دوبرابر ضخامت ورق یعنی 3 میلیمتر است. این آزمون برای ورق و سیم استفاده می شود که شمایی از آزمون خمش کنترل شده در شکل 4-2 نشان داده شده است.



شکل 4-2- شمایی از آزمون خمش کنترل شده

آزمون خمش کنترل شده همیشه تا خم کاری 180 درجه کامل انجام می شود. ممکن است بهترین روش ارزیابی مناسب بودن یک ماده برای بعضی انواع خاص شکل دهی خمش تحت زاویه های کوچکتر باشد. کاربرد دیگر آزمون خمش کنترل شده تعیین واجهش[1] ماده است. برای تولید قطعه ای با خم نهایی 90 درجه لازم است قطعه تحت زاویه ای بیشتر از 90 درجه خم شود تا پس از برداشتن نیروی تغییر شکل و بازیافت کشسان ماده ، زاویه نهایی 90 درجه باشد. میزان بازیافت کشسان ماده را می توان به کمک آزمون خمش کنترل شده اندازه گیری کرد.

4-4-2- آزمون خمش معکوس



شکل 4-3- شمایی از آزمون خمش معکوس

نتایج آزمون های خمشی معکوس کاملاً ماهیت تجربی دارند. این آزمون ها برای دستیابی به نوعی اطلاعات مقدماتی در مورد کرنش پلاستیک قابل تحمل و نرخ کار سختی ماده به کار می روند. در یکی از انواع این آزمون ها باریکه ای از فلز در یک گیره با فک های گرد بسته شده ابتدا 90 درجه (تا وضعیت A) ، سپس 180 درجه (تا وضعیت B) و پس از آن به طور تکراری بین این دو وضعیت خم می شود تا نخستین ترک آشکار شود. تعداد دفعات خم شدن تا شکست یادداشت می شود اولین خم 90 درجه نصف خم حساب می شود. نمونه های آزمایش بریده شده از ورق معمولاً دارای ابعاد 12/5 تا 50 میلیمتر هستند و این آزمون برای قطعات تا ضخامت 2 میلیمتر مناسب است. شعاع فلز برای ورق های تا ضخامت 0/4 میلیمتر باید 1 میلیمتر باشد. برای ورق های ضخیم تر ، از شعاع های فک 3/2 یا 6 میلیمتر استفاده می شود. برای هر ماده خاص تغییر شعاع فک تأثیر چشمگیری بر روی تعداد دفعات معکوس کردن خمش تا شکست می گذارد. به عنوان مثال تعداد دفعات معکوس کردن خمش تا شکست برای یک ورق 0/5 میلیمتر حول یک فک 2 میلیمتری ممکن است دو تا سه برابر بیشتر از هنگامی باشد که آزمایش حول یک فک با شعاع 1 میلیمتر صورت گیرد. این نوع آزمون خمش در مورد سیم نیز انجام می شود. برای تعیین استحکام اتصالات جوش از آزمون خمش استفاده

[1] - Spring back

می شود. در موقع اجرای آزمون خمش جوش دو نیمه قطعه به طور لب به لب جوش داده می شوند. برای دستیابی به یک سطح صاف ، ماده با سنگ زنی یا ماشین کاری برداشته می شود. پس از نمونه بر روی دستگاه تست قرار داده می شود به صورتی که جوش بالای مرکز گیره قرار بگیرد. برای آنکه عیوب جوش (حفره ها ، ترک ها و .....) مشخص شوند ، نمونه آزمون تا زاویه 180 درجه خم می شود.

با استفاده از نتایج آزمایش کشش می توان مینیمم شعاع خمشی را تقریب زد. اگر کاهش سطح مقطع در آزمایش کشش تا 0/2 باشد شعاع مینیمم خمش از رابطه زیر بدست می آید.

$$\frac{R\ min}{\mathrm{h}} = \frac{1}{2\mathrm{q}} - 1 \qquad \mathrm{q} < 0.2$$

$$\frac{R\ min}{\mathrm{h}} = \frac{(1-\mathrm{q})^2}{2\mathrm{q}-\mathrm{q}^2} - 1 \qquad \mathrm{q} > 0.2$$

R_{min} : مینیمم شعاع خمشی h : ضخامت نمونه q : کاهش سطح مقطع در آزمایش کشش

4-5- تعیین استحکام خمشی

می توان استحکام خمشی را از رابطه زیر محاسبه نمود :

استحکام خمشی (lb/in^2): $\frac{3\mathrm{FL}}{2\mathrm{Wh}^2}$

F : بار وارده L : فاصله بین دو انتهای نمونه W : عرض نمونه h : ارتفاع (ضخامت) نمونه

۵
آزمایش پیچش

آزمون پیچش[1] ASTM E143-87

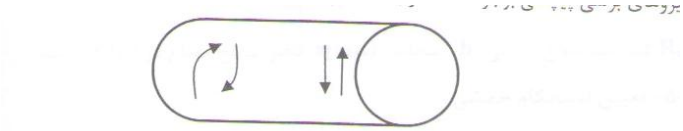
5-1- مقدمه

آزمایش پیچش برخلاف آزمایش کشش کاربرد زیادی ندارد. آزمایش پیچش برای تعیین خواصی چون مدول کشسانی در برش ، استحکام تسلیم پیچشی و مدول پارگی روی مواد مختلف انجام می شود. آزمایش پیچش ضمناً می تواند در مورد قطعات کاملی مانند میله ها ، محورها و مته های مارپیچ که در حین کار تحت بارگذاری پیچشی قرار دارند انجام شود. اگر میله ای را محکم در یک انتها ثابت نموده و انتهای دیگر آن را به وسیله یک کوپل یا Torque تحت پیچش قرار می دهیم در حالیکه این کوپل در صفحه عمود بر محور میله باشد گفته می شود که میله تحت تأثیر یک پیچش ساده قرار دارد.

اثر کوپل پیچشی ایجاد یک تغییر مکان زاویه ای در مقطع میله که عمود بر محور آن است می باشد. چون غالباً عمل پیچش به وسیله چندین کوپل نیرو ایجاد می شود مقدار جمع این ممان ها (گشتاورها) را که در یک طرف میله قرار دارد به عنوان ممان پیچشی[2] یا (T) در محاسبات قرار می دهند. کمیت ممان اینرسی قطبی (j) مقطع نیز در نظر گرفته می شود.

5-2- اصول

هنگامی که نیروهای اعمال شده موازی اما خلاف جهت یکدیگر باشند و صفحات اعمال نیروها بر محور طول نمونه آزمون نباشد ، نیروهای برشی پیچشی به وجود می آید (شکل 5-1) نیروهای پیچشی را می توان به عنوان عامل ایجاد تغییر شکل پیچشی در نظر گرفت. این نوع نیروها هنگامی که نیروها در خلاف جهت یکدیگر باشند موجب چرخش یک جسم می شوند و همانند شکل برش پیچشی ایجاد می شود. نیروهای برشی پیچشی به وجود آمده در یک جسم ، نتیجه اعمال یک گشتاور می باشد.

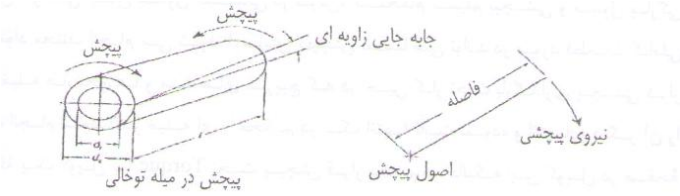


[1] . Torsion Testing
[2] . Twisting moment

شکل 5-1- شمایی از نیروهای پیچشی

5-2-1- گشتاور (ممان)

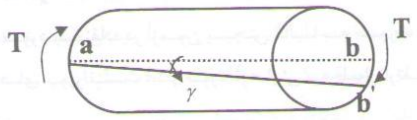
اثر یک نیرو (f) که در فاصله (d) اعمال می شود و برابر حاصل ضرب نیرو در فاصله ای که نیرو در آن اعمال میشود ، می باشد.



شکل 5-2- اصول گشتاور

اگر میله ای استوانه ای را که از یک انتها تحت گشتاور پیچشی است در نظر بگیریم ، تنش های برشی واقع در مقطع میله در برابر گشتاور پیچشی مقاومت می کنند.

تنش برشی در مرکز میله صفر است و به طور خطی با شعاع زیاد می شود. کرنش ایجاد شده در اثر اعمال نیروهای برشی به علت لغزش صفحات موازی نمونه آزمون بر روی یکدیگر حاصل می شود که این کرنش ، کرنش برشی نامیده می شود. این کرنش برشی در اثر تغییر شکل زاویه ای نمونه (شکل 5-3) تحت بارهای پیچشی اتفاق می افتد. کرنش برشی ایجاد شده در محدوده الاستیک بسیار کوچک است از این رو جابه جائی زاویه ای برحسب رادیان بیان می شود.



شکل 5-3- شمایی از تغییر شکل زاویه ای

به لحاظ تئوری وقتی یک نمونه تحت بار پیچشی قرار می گیرد ، پس از جابجایی ، لایه ها و صفحات داخلی نمونه به صورت صفحه ای باقی می مانند. این نکته تنها برای سطح مقطع های دایره ای شکل صحیح است. در نمونه های توپر استوانه ای شکل رشته های داخلی نسبت به رشته های سطحی نمونه آزمون ، تحت تنش کمتری قرار می گیرند. این نکته را می توان با نشان دادن جابجایی زاویه ای رشته های مرکزی در مقایسه با رشته های سطحی نشان داد. زمانی که رشته های سطحی نمونه تحت تنشی بیش از حد تناسب ماده قرار گرفتند ، استحکام نمونه تابعی از رشته های داخلی سطح مقطع که تحت تنش کمتری قرار دارند ، خواهد بود. در واقع پس از

آنکه لایه های سطحی نمونه در مقابل بار پیچشی تسلیم شدند ، لایه های داخلی نمونه مقاومت می کنند. نمونه های آزمون به صورت توخالی و یا لوله ها می توانند این مقاومت را به حداقل برسانند.

5-3- شرایط نمونه آزمایش

به طور کلی سطح مقطع نمونه پیچشی به شکل دایره است. زیرا این شکل هندسی ساده ترین شکل برای محاسبات تنش است. چون تنش برشی پیچشی در دامنه کشسان به طور خطی از مقدار صفر واقع در مرکز میله تا مقدار حداکثر در سطح تغییر می کند ، غالباً نمونه آزمایش به صورت لوله جدار نازک انتخاب می شود. این انتخاب سبب می شود تا تنش برشی پیچشی در تمام سطح مقطع نمونه تقریباً یکنواخت باشد. نمونه های آزمون پیچش نیز می تواند به صورت میله توپر باشد و باید دارای طول کافی برای راحتی اندازه گیری کرنش ها و کاهش آثار تنش ایجاد شده در دو انتهای گیره باشد. دو انتهای نمونه باید دارای شکل مناسب بوده و از تناسب کافی برای اتصال آسان و دقیق به گیره برخوردار باشند. هر دو انتهای نمونه باید با دقت کافی در اتصالات گیره ای جایگذاری شوند.

5-3-1- ابعاد نمونه

نمونه های مورد استفاده در آزمون پیچش غالباً به صورت استوانه توپر می باشد. برای نمونه های توپر نسبت قطر مورد آزمایش به طول (ارتفاع) آن بایستی 1 به 2 یا حدود 0/5 باشد.

5-4- روش آزمون

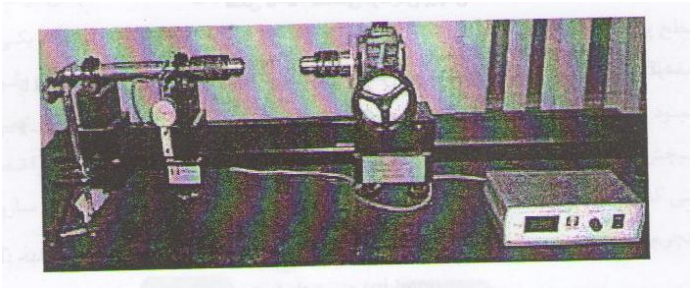
قبل از شروع آزمایش نمونه آزمون بایستی دقیق اندازه گیری شود و طول شاخص و قطر آن مشخص گردد. سایر وسایل دیگر همچون دستگاه اندازه گیری گشتاور (تروپومتر) و گیج مخصوص متصل شده به محور خنثی کننده گشتاور نیز بایستی صفر باشند. تروپومتر دستگاهی برای اندازه گیری کرنش حین آزمون می باشد. برای جایگذاری دقیق نمونه در دستگاه و یا گیره لازم است دقت کافی مبذول گردد. گیره ها بایستی به اندازه ای که باعث تغییر شکل یا تغییر نتایج آزمون شود. پس از نصب نمونه بر روی گیره ، یک نیروی پیچشی تا رسیدن به نقطه شکست اعمال می شود. ارقام خوانده شده توسط تروپومتر را می توان برای تعیین حد تناسب ، استحکام تسلیم ، استحکام پیچشی و مدول برشی مورد استفاده قرار داد. این محاسبات بر پایه مشاهدات مربوط به گشتاور اعمال شده

و جابجایی زاویه ای نمونه های مورد آزمایش استوار هستند. به علاوه چکش خواری مواد نیز شاخص دیگری است که توسط جابجایی زاویه ای نمونه تا نقطه شکست ، نشان داده می شود. جابجایی زاویه ای و استحکام پیچشی ، بیانگر چرمقگی مواد هستند.

برای اندازه گیری دقیق نتایج آزمون لازم است که نرخ اعمال بار به اندازه کافی آهسته باشد. پس از رسیدن نمونه به نقطه تسلیم ، سرعت آزمون ممکن است تا زمانی که شکست اتفاق می افتد ، افزایش یابد و یا مرحله ای که نمونه به اهداف آزمون برسد ، اندازه گیری های مربوط به گشتاور پیچشی و جابه جایی های زاویه ای (زاویه پیچش) خوانده و ثبت می شود. برای بیشتر مواد سرعت اعمال نیرو نباید از 1/25 میلیمتر بر دقیقه یا 0/05 اینچ بر دقیقه بیشتر شود.

5-5- دستگاه آزمایش پیچش

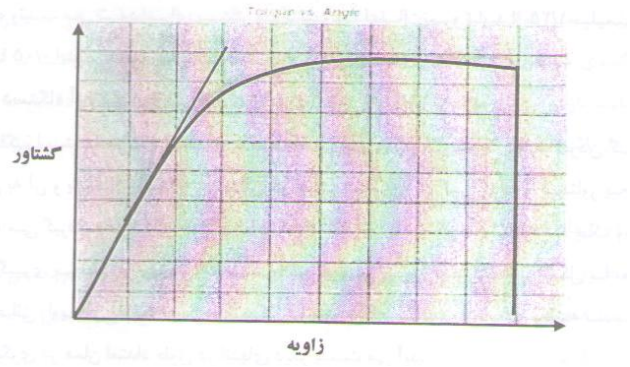
شامل فکی است با حرکت پیچشی و سه نظامی برای گرفتن نمونه و وارد کردن گشتاور پیچشی به آن و یک فک سنگین که انتهای دیگر نمونه را در گیر کرده و گشتاور پیچشی را اندازه می گیرد که در شکل 5-4 نشان داده است. تغییر شکل نمونه توسط یک وسیله اندازه گیری پیچش به نام تروپومتر اندازه گیری می شود. میزان تغییر کل با تعیین جابه جایی زاویه ای نقطه ای نزدیک یکی از دو انتهای قسمت آزمایشی نمونه نسبت به نقطه دیگری در همان امتداد طول در انتهای دیگر بدست می آید.



شکل 5-4- شمایی از دستگاه پیچش

5-6- نتایج آزمایش

در آزمایش پیچش ، مقادیر گشتاور پیچشی T و زاویه پیچش θ (درجه) بدست می آیند. در پیچش خواص کشسان با استفاده از گشتاور در حد تناسب یا گشتاور در زاویه ای خارج از مرکز پیچش (تنش تسلیم برشی) قراردادی که غالباً برابر با 0/0001 (RAD/in) از طول اولیه نمونه می باشد ، از روی منحنی گشتاور پیچشی برحسب زاویه پیچش (شکل 5-5) محاسبه می شود.



شکل 5-5- منحنی آزمایش پیچش

با استفاده از منحنی به دست آمده در آزمایش پیچش میتوان پارامترهای زیر را تعیین کرد.

5-6-1- حداکثر تنش برشی پیچشی (استحکام پیچشی نهائی)

$$\tau = \frac{16T}{\pi D^3} \left(\tau = \frac{TD}{2J} = \frac{Tr}{j}\right)$$

T : حداکثر گشتاور پیچشی (in. lb) D : قطر نمونه (in یا mm) J : ممان قطبی مقطع r : شعاع نمونه (in یا mm)

ممان قطبی مقطع : $j = {}^{\pi}/_{32}D^4$

5-6-2- کرنش برشی[1]

$$(\gamma) = {}^{D\,\theta}/_{2l} = \frac{r\theta}{l}$$

γ : کرنش برشی D : قطر نمونه (in یا mm) θ : زاویه پیچش (درجه) r : شعاع نمونه (in یا mm) L : طول مورد آزمایش (in یا mm)

5-6-3- مدول برشی در منطقه الاستیک

$$G = \frac{TL}{\theta J} = \frac{\tau}{\gamma} \qquad \theta = \frac{TL}{GJ} = \frac{\tau L}{G.r}$$

G : مدول برشی γ : کرنش برشی D : قطر نمونه (in یا mm) θ : زاویه پیچش (درجه)

r : شعاع نمونه (in یا mm) L : طول مورد آزمایش (in یا mm)

[1]. Shear strain

5-7- انواع شکست های پیچشی

فرق شکست در اثر پیچش با شکست حاصل از کشش این است که کاهش موضعی سطح یا ازدیاد طول در پیچش کمتر رخ می دهد. فلز نرم در اثر برش در امتداد یکی از صفحات تنش برشی حداکثر خود می شکند و به طور کلی صفحه شکست بر محور طولی عمود است. ماده ترد در امتداد صفحه ای عمود بر جهت تنش کشش حداکثر توسط پیچش می شکند چون این صفحه زاویه بین دو صفحه تنش برشی حداکثر را نصف می کند و با جهات طولی و عرضی زاویه 45 درجه می سازد به شکست های مارپیچ منجر می شود.

شکل 5-6- شکست های نمونه پیچشی

الف) شکست برشی (نرم) – ب) شکست کششی (ترد)

۶

آزمایش ضربه

آزمون ضربه[1] ASTM E23-88

6-1- مقدمه

در آزمایش های قبلی چگونگی رفتار خواص فلزات و مواد را در مقابل نیروهای استاتیکی که با سرعت کم به آنها وارد می شود بررسی کردیم . ولی در عمل همیشه نیرو به این صورت به قطعات وارد نمی شود . از این رو باید رفتار و خواص مواد را در مقابل نیروهای دینامیکی (ضربه ای) که به طور یقین با نتایج آزمون های استاتیکی فرق دارد .بررسی کنیم . به طور کلی اگر ماده ای تحت نیروهای ضربه ای قرار گیرد دو نوع شکست در آن مشاهده خواهد شد : الف) شکست ترد ب) شکست نرم (برشی)

نرم و ترد عبارات نسبی هستند و اینکه یک شکست به خصوص از کدام نوع است به موقعیت و شرایط بستگی دارد . علل ظاهر گشتن خاصیت تردی می تواند ، تجمع رسوبات یا فازهای سخت مخصوصاً در مرزدانه ها ، نفوذ گازها (ترد شدن در اثر هیدروژن)، ایجاد عیوب نقطه ای (جاهای خالی) در اثر اشعه دادن و همچنین اثرات خوردگی و اکسیداسیون باشد . هر فرآیند شکست در پاسخ به اعمال تنش ، دو مرحله دارد که عبارتند از شکل گیری و ترک و انتشار . نوع شکست به مکانیزم انتشار ترک بسیار وابسته است . تا اندازه زیادی تابع ماهیت ماده و شرایط آن است ولی شکست تحت تأثیر عوامل دیگری نیز قرار دارد که از جمله نوع تنش ، آهنگ افزایش تنش ، دما و محیط می باشد .

6-1-1- شکست نرم

در شکست نرم در منطقه ی ترک قبل از شکست مقداری تغییر فرم پلاستیکی در نمونه ایجاد شده و نیز بعد از رسیدن به یک ماکزیمم ، همزمان با اشاعه ی ترک(کاهش سطح مقطع) افت پیدا کرده تا منحنی به شکست نمونه می شود . به عبارت دیگر شکست نرم توسط تغییر شکل وسیع در نزدیکی ترک در حال رشد ، شکل می گیرد. به علاوه این فرآیند با افزایش ترک به آرامی اتفاق می افتد . این نوع ترک را اصطلاحاً ترک پایدار می گویند . این بدین معنی است که تا هنگامی که تنش اعمالی ثابت است ،

[1] - Impact Test

ترک گسترش نمی یابد . به علاوه این به طور عادی گواه بر تغییر شکل محسوس در سطوح شکست است . (همانند تابیدن و گسیختگی) .

6-1-2- شکست ترد

در شکست ترد با ایجاد ترک و اشاعه آن ، نمونه قبل از رسیدن به نقطه تسلیم می شکند و سطح شکست صاف و براق و دانه دانه خواهد بود . انرژی جذب شده (سطح زیر منحنی تنش – کرنش مهندسی) در این نوع شکست نسبت به شکست نرم کم تر خواهد بود . برای شکست ترد ، ترک ها بدون کوچک ترین تغییر شکل پلاستیکی ، بسیار سریع انتشار پیدا می کنند . این ترک ها را ترک های ناپایدار می نامند . اشاعه ترک به یکباره شروع می شود و خود به خود بدون تغییر در اندازه تنش اعمالی گسترش می یابد . شکست ترد بدون تغییر شکل محسوس و همچنین با انتشار سریع ترک بوجود می آید . جهت حرکت ترک تقریباً عمود بر جهت تنش کششی اعمالی می باشد و نتیجه آن سطوح شکستی نسبتاً مسطح است . سطوح شکست موادی که به صورت ترد منهدم می شوند ، خصوصیات ویژه خود را داشته و هیچ گونه نشانه ای از تغییر شکل پلاستیک محسوس در آن ها وجود ندارد . شکست ترد در مواد آمورف مانند شیشه و سرامیک ها سطح صاف و براقی را نشان می دهد . عواملی همچون : کاهش دما ، افزایش آهنگ کرنش (سرعت اعمال نیرو (تنش)) ، ایجاد شرایط تنش سه بعدی و حضور شیار تمایل به شکست ترد را افزایش می دهند .

برای بسیاری از مواد کریستالی ، انتشار ترک از شکستن پیاپی پیوندهای اتمی در امتداد صفحات کریستالوگرافی معین ناشی می شود که این فرآیند ، رخ برگی [1] نام دارد . این نوع شکست را درون دانه ای می نامند . بدلیل این که ترک های شکست از میان دانه ها عبور می کنند . به طور ماکروسکپی ، سطح شکست می تواند دانه دانه یا برش برش باشد که این ساختار ناشی از تغییر صفحات رخ برگی از یک دانه به دانه دیگر است .

6-2- اصول

برای تعیین تمایل ماده به داشتن رفتار ترد از آزمون های ضربه می توان استفاده کرد . این نوع آزمون ها تفاوت هایی را بین مواد مشخص می کنند که در آزمون کشش قابل مشاهده نیست . این آزمون ها بر روی نمونه های شیار دار انجام می گیرد لذا نتایج حاصل از این آزمون ها بر حسب نیازهای طراحی بیان نمی شود . چون اندازه گیری مؤلفه های شرایط تنش سه محوری (سه بعدی)

1-Cleavage

در شیار ممکن نیست . همچنین در مورد تفسیر یا اهمیت نتایج حاصل از این نوع آزمون ها هیچ گونه توافق کلی بدست نیامده است . همچنین به کمک آزمایش ضربه می توان محدوده درجه حرارتی را که در آن مواد رفتاری ترد و یا نرم از خود نشان می دهند ، مشخص کرد . در این آزمون مقدار کار یا انرژی لازم برای شکست یک نمونه (ازجنس فلز یا مواد پلیمری) که تحت شرایط نامناسب تنش قرار گرفته باشد (با ایجاد یک شیار در آن) اندازه گیری می شود . چنانچه این مقدار انرژی کم باشد می توان چنین نتیجه گیری کرد که ماده ترد بوده و دارای حساسیت بالایی در مقابل نیروهای ضربه ای است و اگر این انرژی بالا باشد ماده نرم و انعطاف پذیر است و بار بیش تری را می تواند تحمل کند و یا به عبارت دیگر دارای سفتی (چقرمگی) بالایی است .

با این آزمایش همچنین می توان محدوده درجه حرارت انتقال شکست نرم به شکست ترد را تعیین کرد . آزمون های ضربه برای اندازه گیری میزان برای اندازه گیری میزان انتقال انرژی مورد نیاز برای شکست یک حجم داده شده از ماده به کار می رود . به عبارت دیگر آزمایش ضربه مقدار انرژی لازم برای شکستن یک نمونه استاندارد با یک ضربه را اندازه می گیرد . بنابراین نتیجه کلی یک آزمایش ضربه ، تعیین انرژی مورد نیاز برای شکست یک نمونه آزمایشی می باشد. یعنی تحکیم استحکام ضربه ای نمونه آزمایش می باشد ، یعنی تعیین استحکام ضربه ای نمونه آزمایش می باشد . استحکام ضربه ای نشانگر این است که یک ماده چگونه می تواند بارگذاری های نهائی را تحمل کند .

اساس این آزمون ها بر این است که نمونه آزمایشی با شیار ماشین کاری شده را در اثر ضربه یک چکش سریع ، شکسته و مقدار انرژی جذب شده در عمل شکست را اندازه گیری می کنند .

6-3- انواع آزمایش ضربه

از مهمترین و متداولترین آزمون های ضربه ، آزمون های شارپی[1] و ایزود[2] می باشد. در هر دوی این آزمون ها از یک پاندول چرخشی (متحرک) استفاده شده و آزمایش بر روی یک نمونه کوچک و شیاردار انجام می شود که توسط بار ضربه ای شکسته می شود. این دو آزمون در طرح و شکل نمونه آزمون و سرعت ضربه وارده توسط پاندول متفاوت هستند. در این آزمون ها مقدار زیادی از انرژی ذخیره شده در پاندول در ناحیه ای نزدیک به شیار به یکباره مصرف و آزاد می شود. در هر دو نوع روش مقدار انرژی یا کاری که صرف شکست و یا احیاناً تغییر شکل نمونه شده اندازه گیری می شود. از آنجایی که انرژی لازم برای شکست ، به

[1]. charpy
[2] .Izod

چگونگی حالت تنش در نمونه بستگی دارد. بنابراین در نتایج آزمایش عواملی چون شکل و اندازه نمونه ، نوع و عمق شیار ، شعاع رأس شیار و ضخامت مقطع شیار مؤثر خواهد بود. هدف از ایجاد شیار یا شکاف در نمونه های آزمایشی ، متمرکز کردن تنش و در نتیجه جذب شدن انرژی در یک نقطه از نمونه آزمایشی است. این امر شکسته شدن نمونه آزمایشی را در یک ناحیه مشخص ، آسان تر می سازد. بدون وجود شیار یا شکاف ، تنش تمایل به پخش شدن در تمام نمونه آزمایشی خواهد داشت. لذا احتمال این که نمونه آزمایشی به طور پلاستیک حالت خود را به صورت خم شدن از دست بدهد ، بیشتر از شکست آن خواهد بود. بنابراین ، در این حالت نتایج آزمون بی اعتبار خواهد شد چرا که هدف از آزمون ضربه ، تعیین مقدار انرژی لازم برای شکست نمونه آزمایشی است.

6-3-1- آزمون شارپی[1]

روش شارپی بیشتر در آمریکا مرسوم و معمول می باشد. در این روش نمونه آزمایشی به صورت افقی روی تکیه گاه (بین دو سندان) قرار می گیرد و نیرو (ضربه) توسط یک آونگ (پاندول) که به انتهای آن یک وزنه سنگین متصل شده و در حال نوسان است ، درست در پشت شیار (که به عنوان یک نقطه تمرکز تنش در نمونه عمل می کند) وارد می شود و بعد از شکست نمونه شیاردار ، آونگ (پاندول) ، که با یک ارتفاع مشخصی رها شده است ، به ارتفاعی برمی گردد که این ارتفاع با ازدیاد انرژی جذب شده در شکست ، کم می شود. انرژی جذب شده در شکست که معمولاً برحسب ژول بر مترمربع (j/m^2) گزارش می شود ، مستقیماً توسط یک صفحه مدرج بروی دستگاه آزمایش خوانده می شود (شکل 6-1). همچنین انرژی جذب شده در شکست (استحکام ضربه ای) از حاصل ضرب وزن آونگ در اختلاف ارتفاع آونگ قبل و بعد از ضربه تعیین می شود. این مقدار انرژی برابر تفاضل انرژی پتانسیل اولیه و پتانسیل باقیمانده است.

$$E = wh - w\acute{h} = W(h - \acute{h})$$

E : انرژی لازم برای شکست نمونه W : وزن پاندول

h : ارتفاع اولیه (رها شدن) h : ارتفاع ثانویه (برگشت)

انرژی لازم برای شکست نمونه تابعی از زاویه بلند شدن پاندول ، زاویه افتادن پاندول ، وزن پاندول ، موقعیت مرکز جرم پاندول نسبت به محل وارد شدن نیرو می باشد.

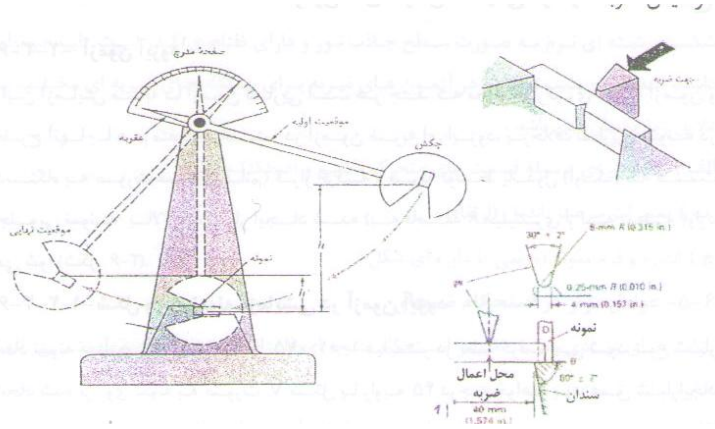
[1] . Charpy Impact Test

$$E = wr\,(\cos\beta - \cos\alpha)$$

$$E = mgr\,(\cos\beta - \cos\alpha)$$

E : انرژی لازم برای شکست نمونه m : جرم پاندول g : 9/8 (m/S^2) r : طول پاندول

α : زاویه اولیه (افتادن) β : زاویه نهایی (بلند شدن) w : وزن پاندول

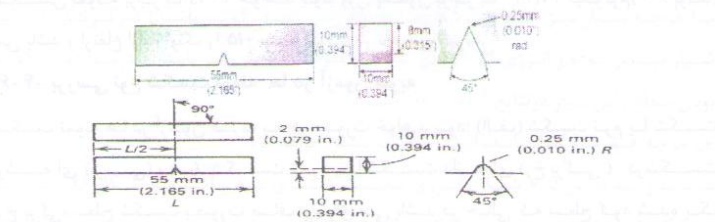


شکل 6-1- شمایی از دستگاه آزمایش ضربه و نحوه قرار گرفتن نمونه در دستگاه به روش شارپی

در یک ماشین آزمون شارپی استاندارد انرژی آونگ در پایین ترین نقطه حرکتش 320 ژول است. سرعت آونگ (پاندول) برابر با 4/8 تا 5/3 (m/s) خواهد بود. آهنگ خم شدن و شکستن نمونه برابر با 10^3 /S خواهد بود. وزن پاندول برابر با 27/24 کیلوگرم (60 پوند) می باشد و ارتفاع اولیه آونگ را یک متر (4 فوت) در نظر می گیرند.

6-3-1-2- شکل و ابعاد نمونه آزمایشی در روش شارپی

ابعاد نمونه در آزمون شارپی برابر با 50 × 10 × 10 میلیمتر در نظر گرفته می شود. نوع شیار ایجاد شده بر روی نمونه به صورت V شکل با زاویه 45 درجه خواهد بود. عمق شیار ایجاد شده برابر با 2 میلی متر و شعاع رأس شیار به اندازه 0/25 میلی متر خواهد بود.



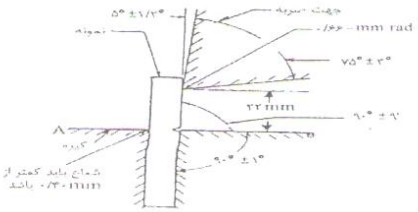
شکل 6-2- شمایی از شیار موجود بر روی نمونه های آزمون شارپی و مشخصات آن

6-3-2- آزمون آیزود[1]

این آزمایش مشابه با آزمون شارپی است هرچند که محل قرارگیری نمونه آزمون و طرح آنها با هم متفاوت است. در آزمون ضربه ای ایزود ، برخلاف شارپی ، نمونه در دستگاه به صورت عمودی (قائم) قرار گرفته و ضربه توسط پاندول (آونگ) به قسمت جلویی نمونه بالاتر از شیار ایجاد شده (به فاصله 8 میلیمتری از لبه نمونه) وارد می شود. (شکل 6-3)

6-3-2-1- شکل و ابعاد نمونه آزمایشی در آزمون آیزود

ابعاد نمونه در آزمون ایزود برابر با : 75 × 10 × 10 میلیمتر در نظر گرفته می شود. نوع شیار ایجاد شده بر روی نمونه به صورت V شکل با زاویه 45 درجه خواهد بود. عمق شیار ایجاد شده برابر با 2 میلی متر و شعاع رأس شیار به اندازه 0/25 میلیمتر خواهد بود.



شکل 6-3- شمایی از نمونه آزمون آیزود و مشخصات آن

در یک ماشین آزمون آیزود استاندارد انرژی آونگ در پایین ترین نقطه حرکتش 320 ژول است. سرعت آونگ (پاندول) برابر است با (m/s) 3/5 خواهد بود. آهنگ خم شدن و شکستن نمونه برابر با 10^3 /s خواهد بود. وزن پاندول برابر با 27/24 کیلوگرم (60 پوند) می باشد و ارتفاع اولیه آونگ را 0/5 متر (2 فوت) در نظر می گیرند.

6-4- بررسی نوع شکست نمونه ها در آزمون ضربه

شکست نمونه ها در آزمون ضربه به دو صورت خواهد بود : (الف) شکست نرم یا شکست رشته ای (برشی) و (ب) شکست ترد یا شکست دانه ای (رخ برگی). در شکست رخ برگی ، سطح شکست به صورت صاف و براق می باشد در حالی که سطح گود شده یک شکست رشته ای نرم به صورت سطح جاذب نور و دارای ظاهری کدر است. باید در نظر داشت که نتایج به دست آمده در آزمون های ضربه برای دستگاه های ضربه ای مختلف به دلایل زیر یکسان نمی باشد :

[1] . Izod impact test

الف) اتلاف انرژی به وسیله قسمت های متحرک ماشین و اصطکاک هوا

ب) تغییرات سرعت پاندول (ارتفاع)

ج) اندازه و فرم نمونه (مربعی یا دایره ای شکل)

6-5- عوامل مؤثر در استحکام ضربه ای

پارامترهای زیادی باعث تغییر استحکام ضربه ای فلزات می شوند که مهمترین آنها عبارتند از :

الف) سرعت اعمال نیرو ب) زاویه ، عمق و شعاع رأس شیار ج) ابعاد (ضخامت) و ماهیت نمونه د) درجه حرارت

6-5-1 اثر سرعت اعمال نیرو

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

6-5-2- اثر شیار (فاق) (notch)

الف) هرچه شعاع رأس شیار افزایش یابد ، میزان انرژی جذب شده (تافنس شکست) افزایش می یابد.

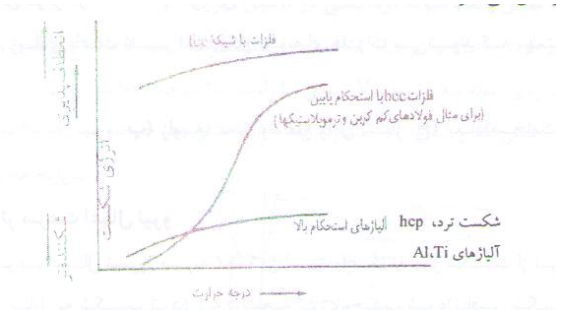
ب) هرچه شیار تیزتر باشد (هرچه شعاع رأس شیار کمتر باشد) تمرکز تنش در رأس شیار بیشتر بوده و انرژی لازم برای شکست نمونه کاهش می یابد. (در مواد نرم کمتر بودن شعاع رأس شیار در نتایج آزمون مؤثر است).

ج) هرچه عمق شیار کمتر باشد ، انرژی شکست بیشتر خواهد بود.

د) شیار به صورت V شکل انرژی شکست کمتری دارد و اگر به شکل U باشد به خاطر کم شدن تمرکز تنش ، انرژی شکست افزایش می یابد.

6-5-3- اثر درجه حرارت

درجه حرارت اثر شدیدی بر تافنس شکست دارد. به طوری که افزایش درجه حرارت ممکن است نمونه را از حالت صددرصد شکست ترد به صددرصد شکست نرم سوق دهد. اثر دما بر تافنس بستگی به جنس قطعه خواهد داشت. با افزایش دما تغییر شکل زیاد می شود و در نتیجه انرژی بیشتری برای شکست لازم است. هرچه در موارد ترد دما تأثیر چندانی روی انرژی شکست نخواهد داشت. اثر درجه حرارت بر تافنس شکست (انرژی جذب شده) با نمودار زیر بیان می شود :



شکل 6-4- تأثیر درجه حرارت بر روی انرژی جذب شده برای چند نوع ماده مختلف

همانطور که از شکل 6-4 مشاهده می شود در مورد مواد با استحکام متوسط ابتدا انرژی شکست کم است و شکست به صورت ترد انجام می شود و با افزایش دما مقدار انرژی شکست بیشتر شده و در دمای بالاتر شکست به صورت نرم رخ می دهد که نشان می دهد ماده دارای انرژی شکست بالایی است. بین شکست ترد و شکست نرم یک مرز وجود دارد که دمای انتقال[1] (T.T.P) گفته می شود. درجه حرارت تبدیل (انتقال) به سرعت تغییر شکل و حالت تنش وارده بستگی دارد و به عبارت دیگر تابع عواملی است که بر روی تحرک نابجایی ها و پیشرفت ترک های ترد اثر می گذارد و برای کاربرد ماده اهمیت زیادی دارد.

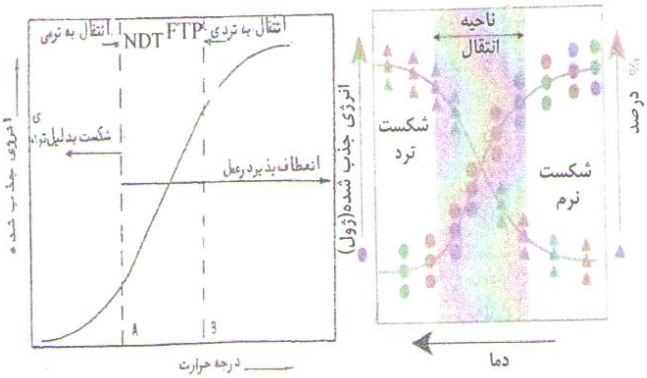
6-6- منحنی آزمایش ضربه

آزمایش ضربه را در چندین درجه حرارت (زیر صفر و بالای صفر) انجام می دهند و بدین ترتیب منحنی ضربه به دست می آید که از چند نظر حائز اهمیت است. در درجه حرارتهای بالاتر از B ، قطعه کاملاً نرم[2] رفتار می کند. حال با کاهش درجه حرارت از B ، انتقال

[1]. Transition Temperature Point
[2] . Ductile

به تردی[1] شروع می شود. هرچه دما کمتر باشد جسم تردتر شده و در دماهای پایین تر از A ، قطعه کاملاً ترد و شکننده می شود و به هنگام استفاده در عمل به آسانی شکسته می شود.

برعکس ، با افزایش دما در نقطه A انتقال از تردی به نرمی شروع شده و با زیاد شدن دما قطعه نرم و انعطاف پذیر می گردد تا در B که جسم کاملاً نرم رفتار می کند و به همین دلیل در دماهای بالاتر از B احتمال شکست به دلیل تردی بسیار کم است.



شکل 6-5- منحنی آزمون ضربه

6-7- انواع دماهای انتقال

6-7-1- دمای FTP[2]

دمایی که شکست صددرصد نرم است یا درصد شکست ترد در آن صفر است.

6-7-2- دمای FAT.T[3]

دمایی که در آن 50 درصد شکست نرم و 50 درصد شکست ترد می باشد.

6-7-3- دمای NDT[4]

دمایی که در آن درصد شکست نرم صفر است و 100 درصد شکست ، ترد خواهد بود.

(افزایش ضخامت نمونه و کاهش شعاع رأس شیار ، دمای تبدیل نرمی به تردی را افزایش می دهند).

---

[1] .Brittleness
[2] .Fracture-Transition Plastic
[3] .Fracture Appearance
[4] . Nil ductility temperature

6-8- عوامل متالورژیکی مؤثر بر دمای انتقال

عواملی که باعث افزایش یا کاهش دمای تبدیل می شوند عبارتند از : اندازه دانه ، عناصر آلیاژی (ترکیب شیمیایی) و جهتی که نمونه مورد آزمایش در آن جهت ساخته شده است (جهت نورد).

6-8-1- عناصر آلیاژی (ترکیب شیمیایی)

اضافه کردن کربن (به ازای هر 0/1 ٪) به فولاد باعث بالا رفتن دمای انتقال (حدود 13 F درجه) و در نتیجه باعث ترد تر شدن فولاد می گردد. اکسیژن و فسفر نیز باعث بالا رفتن دمای انتقال می گردند.

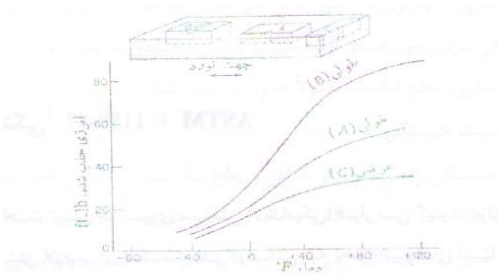
به طور کلی عناصر آستنیت زا (Ni , Mn بیشتر از 2 درصد) دمای تبدیل را کاهش می دهند و عناصر فریت زا Si , V (حدود ٪ 0/25) دمای تبدیل (انتقال) را افزایش می دهند.

6-8-2- اثر اندازه دانه

اندازه دانه اثر شدیدی بر روی دمای تبدیل دارد به طوریکه افزایش یک عدد ASTM (عدد اندازه دانه) و یا کاهش اندازه دانه در دانه های فریتی باعث کاهش دمای تبدیل به میزان 30 F درجه در فولادها خواهد شد. همچنین کاهش اندازه دانه از 5 ASTM به 10 ASTM درجه حرارت تبدیل از 70 F درجه به 60 F- درجه می رسد و کم شدن دما نیز با کاهش اندازه دانه های آستنیت پیش می آید. پس به طور کلی هرچه دانه بندی ریزتر باشد دمای انتقال کاهش یافته و در نتیجه ساختار دانه ای ریز از لحاظ انرژی شکست ، ساختار مطلوبی خواهد داشت.

6-8-3- اثر انتخاب جهت نمونه (اثر نورد)

برای فلزاتی که کارسرد از قبیل نورد و یا عملیات دیگری روی آنها انجام شده ، جهتی که نمونه آزمایش از آن جهت انتخاب می شود در انرژی جذب شده و نیز دمای تبدیل مؤثر است. شکل 6-6 اثر انتخاب جهت نمونه (اثر نورد) بر روی دمای انتقال در آزمایش شارپی را نشان می دهد.



شکل 6-6- اثر انتخاب جهت نمونه بر روی دمای انتقال

نمونه های A و B جهت طولی (جهت نورد و یا تغییر شکل) ورق هستند. در نمونه A شیار عمود بر سطح ورق است در حالیکه در نمونه B شیار موازی سطح ورق است. (معمولاً جهت شیار در نمونه A ترجیح داده می شود) در نمونه C جهت شیار به کار رفته همانند A می باشد ولی نمونه در جهت عرضی نورد (عمود بر جهت نورد) است. در نمونه C تنش به گونه ای است که ترک به موازات جهت نورد انتشار خواهد یافت.

۷
آزمایش خستگی

آزمون خستگی[1] AOYM > 1150-87

7-1 مقدمه

وقتی فلزی تحت تنش یا نیروی سیکلی (دینامیکی) قرار می گیرد ، در تنشی به مراتب پایین تر از تنش لازم برای شکست فلز در حالتی که تحت نیروهای استاتیکی می باشد ، خواهد شکست. این شکست مشروط بر این است که زمان اعمال نیرو یا تعداد سیکل به اندازه کافی باشد. شکستی که تحت شرایط بارگذاری دینامیکی اتفاق می افتد ، شکست خستگی نامیده می شود. این نام گذاری احتمالاً براین اساس است که به طور کلی مشاهده می شود که شکست ها فقط پس از یک دوره کار زیاد رخ می دهند. هیچگونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می شکند ، وجود ندارد تا بتوان به عنوان مدرکی برای شناخت دلایل شکست خستگی از آن استفاده کرد. با پیشرفت صنعت و افزایش تعداد وسایلی که تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی هستند ، خستگی بیشتر متداول شده و اکنون چنین برداشت می شود که عامل حداقل 90 درصد شکست های ناشی از دلایل مکانیکی در حین کار ، خستگی می باشد.

7-2- تعریف خستگی

به شکست یک ماده در اثر اعمال تنش های (نیروهای) متناوب سیکلی یا دینامیکی گفته می شود. به عبارت دیگر پدیده ای را که در نتیجه تنشهای متناوب در جسم ایجاد گشته و به شکست آن می انجامد ، خستگی و یا فرسودگی می نامند. هرچه تعداد تناوب تنش های وارده بیشتر باشد ، تنش شکست آن کوچکتر است. تنش تناوبی می تواند ناشی از چرخش ، خمش یا ارتعاش باشد. تعداد تناوب (سیکل) لازم برای شکست یک نمونه آزمایشی ، بستگی به تنش اعمال شده و شرایط عمل آن دارد. دلیل عمده خطرناک بودن شکست خستگی این است که بدون آگاهی قبلی و قابل رؤیت بودن رخ می دهد.

---

[1]. Fatigue test

7-3- شکست خوردگی

شکست در اثر خستگی ناگهانی و به صورت ترد می باشد به عبارت دیگر ، خستگی به صورت شکستی با ظاهر ترد بدون هیچ گونه تغییر شکل ناخالص در شکست نتیجه می شود. از نقطه نظر ماکروسکپی سطح شکست معمولاً عمود بر جهت تنش اعمالی می باشد.

7-4- ظاهر شکست خستگی

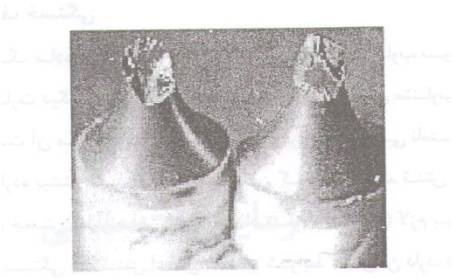
شکست در اثر خستگی را می توان از ظاهر سطح شکست تشخیص داد. سطح شکست دارای دو منطقه صاف و زبر است. منطقه صاف در حین اشاعه ترک و به هم سائیده شدن دو سطح ترک به وجود می آید و منطقه زبر وقتی به وجود می آید که سطح باقی مانده تحمل نیروی وارده را نداشته و به صورت ترد می شکند. به عبارت دیگر یک مقطع شکسته شده در اثر خستگی دارای دو ناحیه کاملاً متمایز می باشد. (شکل 7-1)

الف) ناحیه صاف دارای رگه های موجی

این ناحیه نشانگر پیشرفت تناوبی و تدریجی ترک می باشد. به عبارت دیگر سطح مجاور نقطه ای که ترک از آن آغاز گردیده ، صاف تر و با افزایش فاصله از آن به تدریج خشن تر می گردد.

ب) ناحیه ناصاف (زبر و خشن)

این ناحیه بیشتر به سطوح شکست مواد ترد شباهت دارد که از شکست ناگهانی نمونه به وجود آمده و گواه بر شکست سریع نمونه می باشد.



شکل 7-1- شمایی از مقطع شکست در آزمون خستگی

اکثر شکست های خستگی ناشی از ترک های میکروسکوپی هستند که این ترک ها در اثر تنش های موضعی بزرگ و منتشر می شوند تا مرحله ای که شروع شکست ایجاد شود. این ترک ها را به طور معمول از خطوط لغزش که در اثر تنش های سیکلی (متناوب) و نابجائی های میکروسکپی در ماده شکل می گیرند ، به وجود می آیند. نقص های بلوری از قبیل خراش سطوح ، شیارها ، شکاف ها و عیوب دیگر می توانند در آغاز پیدایش یک ترک بسیار مؤثر باشند.

شکست در اثر پدیده خستگی در سه مرحله مجزا صورت می گیرد :

1. ایجاد ترک 2. پیشرفت ترک 3. شکست نهایی

تنش لازم برای ایجاد شکست خستگی ، باید براساس درجه تغییر تنش و نوع تنش معین شود. تنش ها ممکن است محوری ، برشی ، پیچشی و یا خمشی باشند.

به تنشی که در آن ، یک ماده در اثر خستگی می شکند و یا به حداکثر تنشی که قطعه ای از ماده معین بتواند به ازای آن تعداد دور فوق العاده زیادی را بدون اینکه بشکند تحمل کند و یا به عبارت دیگر به تنشی که در مقادیر کمتر از آن یک نیرو می تواند به طور نامحدود و پیوسته (مکرر) و بدون شکست بر روی جسم اعمال شود ، استحکام خستگی[1] یا حد خستگی[2] گفته می شود.

7-5- انواع تنش های سیکلی (انواع چرخه های تنش)

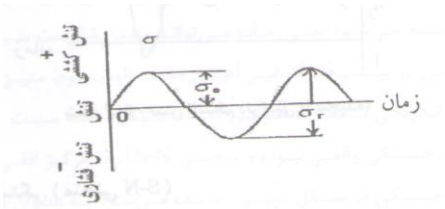
تنش های سیکلی ناشی از پدیده خستگی به چند روش اصلی می تواند اعمال گردند.

7-5-1- سیکل تنش بازگشتی (معکوس)

در شکل 7-2 منحنی تنش بر حسب زمان که به صورت سینوسی است بیشتر در محورهایی که با سرعت ثابت در حال دوران هستند دیده می شود. در این نوع تنش سیکلی ، تنش ماکزیمم و مینیمم با هم مساوی هستند. تنش کششی را مثبت و تنش فشاری را منفی در نظر می گیرند. به عبارت دیگر شکل 7-2 الگوی تنش را در حالت بارگذاری در چرخه کاملاً معکوس تنش نشان می دهد که یک حالت ایده آل می باشد. این حالت می تواند در محوری که تحت بارگذاری خمشی ثابت است ، رخ دهد. در عمل این نوع چرخه رخ نداده و معمولاً توسط دستگاه آزمایش خستگی به وجود می آید.

[1] Fatigue strength
[2] Limiting fatigue

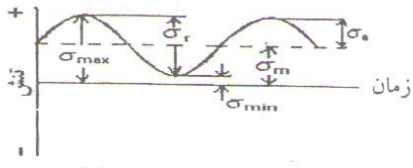
در خستگی سیکل های کشش – فشار از بقیه بیشتر مضر هستند یعنی عوض کردن جهت اعمال بار در خستگی بسیار مؤثر می باشد و دلیل آن به خاطر تیزشدن نوک ترک در فشار و حرکت نابه جایی هاست.



شکل 7-2- سیکل تنش بازگشتی (معکوس)

7-5-2- سیکل تنش تکراری

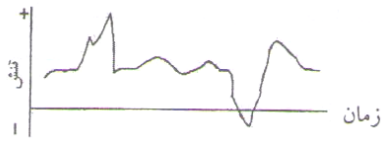
در شکل 7-3 تنش ماکزیمم و تنش مینیمم با هم برابر نیستند. در این شکل هر دو تنش کششی می باشند. اما می تواند تنش ماکزیمم و مینیمم هر دو فشاری و یا یکی فشاری و دیگری کششی باشد. این منحنی نیز بارگذاری یک جهت را نشان می دهد با این تفاوت که یک بار ثابت به طور دائم همراه قطعه می باشد. (پیچ های متصل کننده سرسیلندر به سیلندر خودرو)



شکل 7-3- سیکل تنش تکراری

7-5-3- سیکل تنش نامنظم (ترکیبی)

شکل 7-4 یک سیکل تنشی پیچیده را نشان می دهد که در قسمتهایی مانند بال هواپیما که تحت وزش باد می باشد اتفاق می افتد. به عبارت دیگر شکل 7-4 یک چرخه (سیکل) تنش مرکب را نشان می دهد که در واقعیت در بیشتر قطعات این گونه چرخه (سیکل) تنش اعمال می گردد از جمله در میل لنگ خودروها که شرایط اعمال نیرو بسیار متنوع می باشد.

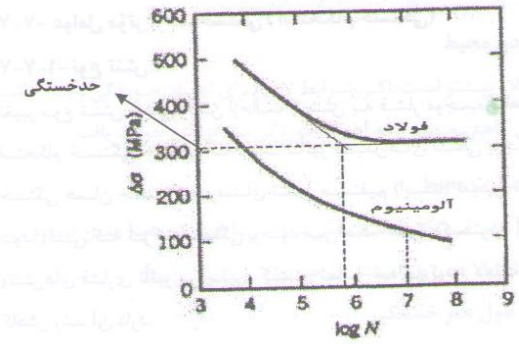


شکل 7-4- تنش نامنظم (ترکیبی یا پیچیده)

7-6- منحنی خستگی (منحنی S-N)

برای نشان دادن رفتار یک جسم در مقابل خستگی و یا به عبارت دیگر برای نشان دادن تعداد دفعات بارگذاری تحت یک سیکل معین از منحنی S-N ((S -(log N)) استفاده می شود ، که در آن S دامنه تنش و N تعداد سیکل شکست (تعداد بارگذاری) می باشد.

تنش می تواند max^{σ} یا min^{σ} باشد و معمولاً این منحنی برای مقدار معین σ_m رسم می شود ولی بیشتر خواص خستگی فلزات در حالت $\sigma_m = 0$ تعیین می شود. شکل 7-5 منحنی S-N را برای فولاد و فلزات غیرآهنی نشان می دهد.



شکل 7-5- منحنی S-N

همانطور که از شکل 7-5 دیده می شود ، تعداد سیکلی که نمونه قبل از شکست می تواند تحمل کند با کاهش تنش افزایش می یابد و نیز دیده می شود که برای بعضی از مواد مانند فولاد و تیتانیم منحنی S-N در تنش معینی افقی می شود. زیرا این تنش ، حد خستگی نامیده می شود یعنی ماده می تواند بدون شکست سیکل های نامحدود را تحمل کند. ولی در بیشتر فلزات غیرآهنی مانند آلومینیوم ، منیزیم و آلیاژهای مس ، منحنی با شیبی تدریجی نسبت به افزایش تعداد سیکل ها به سمت پایین می آید. این مواد دارای حد خستگی واقعی نبوده و منحنی S-N آنها هرگز افقی نمی شود. در این مواد استحکام خستگی در سیکل معینی تعریف می شود به عنوان مثال در 10^8 سیکل برای رسم منحنی S-N اولین نمونه را در تنش بالا قرارداده تا شکست در سیکل کمی اتفاق بیفتد. سپس تنش را کم کرده و نمونه ها را در تنش های پایین تر تحت آزمایش قرار داده تا جایی که یک یا دو نمونه در تعداد معینی سیکل (که معمولاً 10^7 سیکل است) شکستی در آنها اتفاق نیفتد. بیشترین تنشی را که در آن شکست اتفاق نیفتد به عنوان حد خستگی در نظر می گیرند. در مورد فلزاتی که حد خستگی ندارند آزمایش تا 10^8 یا 5×10^8 سیکل ادامه می یابد. معمولاً منحنی S-N با 8 تا 12 نمونه رسم می شود.

7-7- عوامل مؤثر بر عمر خستگی (استحکام خستگی)

7-7-1- نوع تنش

تغییر نوع تنش یعنی رفتن از حالت کشش به فشار موجب کاهش عمر قطعه می شود. استحکام خستگی جسمی که تحت تأثیر سیکل های تنشی پیچشی قرار دارد از استحکام خستگی همان جسم که بر مبنای تنش مستقیم (ایستا) تعیین شده است ، کمتر خواهد بود. وقتی که ترک خستگی به وجود می آید ، آهنگ گسترش آن از تنش های کششی و تنش های فشاری تأثیر می پذیرد. کشش تمایل به باز کردن دهانه ترک و فشار تمایل به کاهش رشد آن دارد.

7-7-2- تنش های پسماند

تنش پسماند کششی : باعث کاهش طول عمر قطعه می شوند و با تعداد سیکل کمتری قطعه می شکند.

تنش پسماند فشاری : باعث افزایش طول عمر قطعه می شوند.

7-7-3- میزان تمرکز تنش

افزایش میزان تمرکز تنش باعث کاهش عمر خستگی می شود.

(هرگونه تغییر در شکل یا سطح مقطع قطعه موجب نوعی تمرکز تنش موضعی می شود.)

7-7-4- سطح تنش

افزایش سطح تنش موجب کاهش عمر خستگی می شود.

7-7-5- کیفیت سطح قطعات (شرایط سطحی)

زبری سطح با وجود خراش هایی بر روی سطح ، موجب کاهش عمر خستگی می شود چرا که این عیوب کانون های تمرکز تنش می باشند.

عمر خستگی یک قطعه را می توان با کوبیدن سطح آن افزایش داد. کوبیدن با چکش کاری سبک سطح قطعه به وسیله یک چکش لبه گرد و یا پاشیدن ساچمه های کوچک فولادی بر روی سطح آن انجام می شود. این عمل نوعی تنش های فشاری به جا مانده

(پسماند) در لایه های سطحی ایجاد کرده و از پیدایش ترکهای خستگی جلوگیری می کند یا آن را به تأخیر می اندازد. عملیات حرارتی سخت کردن سطحی نظیر کربن دهی ، نیتروژن دهی ، با ایجاد تنش های پسماند فشاری در لایه های سطحی ، خستگی را افزایش می دهند.

7-7-6- اثر محیط

7-7-6-1- خورنده بودن محیط

عمر قطعات در محیط خلاء بیشتر است . اگر شرایط لازم برای ایجاد خوردگی وجود داشته باشد ، نه تنها حد خستگی کاهش می یابد بلکه آهنگ خوردگی نیز افزایش خواهد یافت.

7-7-6-2- اثر درجه حرارت محیط

افزایش دما موجب کاهش عمر خستگی قطعات می شود. (با افزایش دما عمل صعود بهتر انجام می شود چون در دمای بالا دیفوزیون بیشتر خواهد بود).

7-8- راه های افزایش طول عمر خستگی

از راه های افزایش طول عمر خستگی می توان به کاهش سختی سطح ، افزایش تنش های پسماند فشاری ، کاهش زبری سطح و کاهش استحکام کششی اشاره کرد.

7-9- اصول آزمون خستگی

یک قطعه و یا سازه ممکن است هنگام کار تحت اثر تنش های نوسانی یا تناوبی قرار گیرد. بندرت اتفاق می افتد که یک قطعه در تمام عمر کاری اش فقط در معرض یک نوع چرخه (سیکل) بارگذاری باشد. در آزمایشگاه ، آزمون های خستگی معمولاً براساس نوعی سیکل بارگذاری یکنواخت ، که به صورت تناوبی ، تکراری و یا نوسانی اعمال می شوند انجام می شود. آزمایش های خستگی در دوره های زمانی طولانی انجام می شوند. گاهی اوقات این آزمون ها ، ماه ها و یا سال ها به طول می انجامد. در نتیجه آزمون های خستگی عموماً برای کنترل کیفی و بازرسی به کار نمی روند.

دستگاه های آزمون خستگی انواع متفاوتی دارند. اما همه آنها دارای دو پارامتر مشترک هستند :

الف) همه آنها باید تعداد دقیق تناوب ها را تا زمان شکست ثبت نمایند.

ب) همه آنها باید به طور دقیق تنش لازم برای ایجاد شکست را ثبت کنند.

7-9-1- انواع روشهای آزمون خستگی (انواع ماشین های تست خستگی)

7-9-1-1- ماشین هایی برای ایجاد تنش های محوری[1] (آزمون خستگی تحت یک محور با نیروی کششی و فشاری)

7-9-1-2- ماشین هایی برای ایجاد تنش های خمشی[2] (آزمون خستگی تحت نیروهای خمشی)

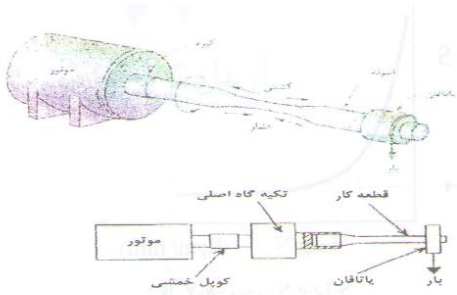
7-9-1-3- ماشین هایی برای ایجاد تنش های چرخشی – خمشی[3] (آزمون خستگی تحت نیروهای پیچشی «دورانی» - خمشی)

7-10- آزمایش خستگی تحت نیروهای چرخشی (پیچشی) – خمشی

این روش نیز به روش تیر یک سر گیردار چرخشی[4] معروف است. به این ترتیب که یک انتهای نمونه آزمون به شکل استوانه ای ماشین کاری شده ، بر روی یک گیره دوار (سه نظام دستگاه) سوار می شود. یک وزنه (W) بر روی سر انتهای دیگر نمونه آویزان خواهد شد. در هر لحظه یک قسمت از نمونه تحت تنش کششی قرار دارد (سطح بالای نمونه). در حالی که قسمت دیگر آن درست قرینه قسمت اول و در سر دیگر قطر سطح مقطع نسبت به اولی قرار دارد ، تحت تأثیر تنش فشاری قرار می گیرد (سطح پایینی نمونه). زمانی که نمونه آزمون به اندازه یک نیم دور (180 درجه) چرخید ، جهت نیروهای وارد بر هر نقطه نمونه آزمون معکوس شده و با کامل شدن یک دور تمام ، نیروها مجدداً به وضعیت اولیه خود باز می گردند. در آزمون خستگی ، دو انتهای نمونه معمولاً به صورت رزوه شده می باشد و نگهدارنده های نمونه به طور بسیار دقیق ، درون راهنماهای (گیره های) ثابتی جای می گیرند تا بارگذاری هم در کشش و هم در فشار کاملاً محوری باشد. باید کاملاً در نظر داشت که نمونه های آزمون خستگی با سطوح صیقل کاری شده تهیه می شوند. نمونه ها ابتدا باید به دقت به شکل و اندازه مورد نظر ماشینکاری شده و سپس پرداخت سطحی شوند. آخرین مرحله صیقل دادن باید با کاغذ سنباده Sic با شماره 600 انجام می شود و جهت سایش سطح باید در امتداد طول قطعه باشد به طوریکه زبری سطح به کمتر از 5 میکروواینچ یا 0/125 میکرومتر کاهش یابد. آهنگ سیکل بارگذاری خستگی بایستی بین 50 تا 120 هرتز (HZ) انتخاب شود.

---

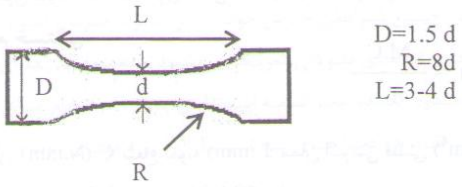
[1]. Tension – Compression axial loading
[2] .Bending fatigue test
[3] .Rotating and bending fatigue test
[4]. Rotating cantilever Beam test



شکل 7-6- شمایی از دستگاه آزمایش خستگی تحت نیروهای پیچشی – خمشی

7-11- شکل و مشخصات نمونه آزمون خستگی

در آزمون خستگی شکل نمونه مورد استفاده به صورت استوانه ای شکل و با ابعاد مشخصی می باشد.



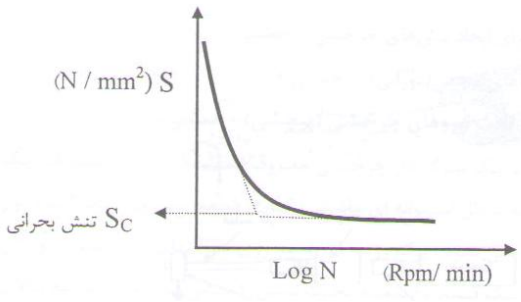
شکل 7-7- شمایی از نمونه آزمون خستگی و مشخصات آن

7-12- نتایج آزمایش

نتایج آزمون خستگی معمولاً به صورت منحنی های S-LOG N نمایش داده می شود.

S : تنش وارده در یک سیکل N : تعداد سیکل تنشی تا وقوع شکست

منحنی شامل دو خط تقریباً مستقیم است. اگر ما این دو خط را طوری امتداد دهیم که با هم برخورد کنند. تنش بحرانی یا تنش حدی ماده به دست خواهد آمد. مهم است که ضمن گزارش نتایج ، روش اعمال تنش ، نوع ماشینی که به کار گرفته شده است ، اندازه یا ابعاد نمونه های آزمایشی (تعداد نمونه ها 12-8 عدد) ، فرکانس چرخش و تعداد سیکل گزارش شوند.



شکل 7-8- منحنی S-LOG N

از منحنی بدست آمده در آزمون خستگی می توان اطلاعات زیر را استخراج نمود.

7-12-1- حداکثر (ماکزیمم) تنش

$$\sigma_{Max}\ (MP) = 10.18 \times \frac{L.F}{d^3}$$

L : طول نمونه (m) F : نیروی اعمال شده (N) d : قطر نمونه (m)

7-12-2- استحکام خستگی

$$(N/mm^2)\ (S) = \frac{M.C}{I}$$

M : گشتاور (N.mm) C : شعاع نمونه (mm) I : ممان اینرسی قطبی (mm4)

گشتاور (M) (N.mm) = F.L

$$\text{ممان اینرسی قطبی}\ (I)(mm^4) = \frac{\pi}{32}\ d^4 = \frac{\pi}{2}\ C^4$$

F : نیروی اعمال شده (N) L : طول بازو (mm) C : شعاع نمونه (mm)

۸
آزمایش خزش

آزمایش خزش[1] ASTM E139-83

8-1- مقدمه

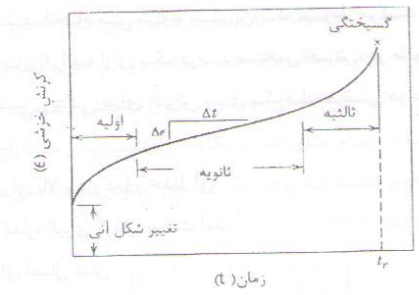
معمولاً مواد در جاهایی استفاده می شوند که دما بالاست و قطعه تحت تنش های مکانیکی – استاتیکی ، قرار دارد (مثلاً روتورهای توربین در موتورهای جت و ژنراتورهای بخار که تحت تنش های گریز از مرکز هستند و خطوط بخار فشار قوی.) تغییر شکل در چنین شرایطی خزش خوانده می شود. خزش ، تغییر شکل دائمی تحت نیروهای ثابت در زمان طولانی تعریف می شود و معمولاً پدیده ای نامطلوب است و اغلب عامل محدود کننده عمر قطعه است. این پدیده در تمام انواع مواد مشاهده شده و برای فلزات فقط در دماهای بالاتر از $0/4\ T_m$ (T_m دمای ذوب مطلق) حائز اهمیت است.

8-2- کلیات

آزمایشات خزش برای اندازه گیری اثرات اعمال طولانی مدت بارهایی طراحی شده اند که کمتر از محدوده الاستیک مواد مورد آزمایش هستند . خزش تغییر شکل پلاستیکی است که از اعمال طولانی مدت نیرو ناشی می شود. اگرچه مقدار نیروی وارده کمتر از محدوده الاستیک آن ماده می باشد اما مواد تمایل دارند تا در دراز مدت تغییر شکل یابند. درجه حرارت های بالا ، شرایط کاری سخت و عوامل دیگر می توانند سرعت ایجاد خزش را در مواد در هنگام کارکرد بالا ببرند. آزمایش خزش یک آزمایش بلند مدت است که در دماهای بالا انجام می شود. نتایج یک آزمایش خزش به طراحی و پیش بینی تأثیرات دما و بارهای معلق موجود بر روی یک سازه که دراز مدت اعمال می شوند ، کمک خواهد نمود.در یک آزمایش ساده خزش ، قطعه در دمای ثابت تحت یک بار یا یک تنش ثابت قرار گرفته و کرنش یا تغییر شکل اندازه گیری می شود و نسبت به زمان ، رسم می شود. بیشتر آزمایش ها از نوع بار ثابت هستند. برای فهم بهتر مکانیزم های خزش ، از آزمایشات تنش ثابت استفاده می کنیم. شکل 8-1 رفتار خزش مواد تحت بار ثابت را به طور شماتیک نشان می دهد. همانطور که در این شکل دیده می شود در اثر اعمال بار یک تغییر شکل ناگهانی رخ می دهد که معمولاً الاستیک است. منحنی خزش شامل سه ناحیه است که در هر کدام نحوه تغییر کرنش با زمان به صورت مشخصی است.

[1] - Creep Testing

ابتدا خزش گذرا یا اولیه رخ می دهد که در آن نرخ کرنش با زمان کم می شود ؛ به عبارتی شیب منحنی با افزایش زمان ، کم می شود. این حالت نشان می دهد که مقاومت مواد در برابر خزش افزایش می یابد یا ماده کار سخت می شود. یعنی با افزایش کرنش ، تغییر شکل ماده سخت تر صورت می گیرد. برای مرحله دوم خزش که به آن خزش پایدار می گویند ، نرخ خزش ثابت است و منحنی ، خطی می شود. این مرحله از خزش معمولاً طولانی ترین زمان را دارد. ثابت بودن نرخ خزش براساس تعادل بین کار سختی و بازیابی توجیه می شود. بازیابی فرآیندی است که ماده تحت آن نرم می شود و قابلیت تغییر شکل خود را دوباره پیدا می کند. نهایتاً برای مرحله سوم خزش ، نرخ خزش تا انهدام نهایی افزایش می یابد. این انهدام اغلب گسیختگی نامیده می شود و از تغییرات ریزساختار یا تغییرات متالورژیکی نتیجه می شود.



شکل 8-1- منحنی کرنش خزشی برحسب زمان در تنش و دمای ثابت

برای فلزات آهنی بیشتر آزمایش های خزش تحت بار تک محوری کششی روی نمونه ای با شکل نمونه کشش انجام می شود. از سوی دیگر برای نمونه های ترد ، آزمایشات فشاری مناسب تر هستند چون در این حالت به دلیل عدم تأثیر نقاط تمرکز تنش برای اشاعه ترک ، برای خواص ذاتی خزش قابلیت مطالعه بیشتری وجود دارد. نمونه های آزمایش فشار معمولاً استوانه قائم یا منشور متوازی السطوح با نسبت های طول به قطر 2 تا 4 هستند. برای بیشتر مواد خواص خزش در نهایت به جهت بار اعمالی وابسته نیست. یکی از مهمترین پارامترهایی که از آزمایش خزش به دست می آید ، شیب منحنی در مرحله دوم خزش است که معمولاً به نرخ خزش حداقل یا نرخ خزش حالت پایدار ($\dot{\varepsilon}_s$) نامگذاری می شود. این پارامتر طراحی برای موقعی که عمر طولانی مورد نظر است ، استفاده می شود. از طرف دیگر برای موقعیت های خزش با عمر نسبتاً کوتاه (مثل پره های توربین در هواپیمای جنگی ، نازل های موتور راکت) ، زمان گسیختگی یا عمر گسیختگی (t_r) ، پارامتر مهم و قابل بررسی است که این پارامتر نیز در شکل 8-1 آمده است. برای تعیین این پارامتر ، آزمایش های خزش تا نقطه انهدام انجام می شوند و به این آزمایشات ، آزمایشات گسیختگی خزش می گوییم. بنابراین دانستن خواص خزشی ماده به مهندس طراح امکان می دهد که از درست کار کردن قطعه برای یک کاربرد

مشخص ، اطمینان پیدا کند. در طی هر آزمایش خزش ، چهار متغیر زمان ، دما ، تنش وارده ، کرنش بدست آمده مد نظر می باشند. عموماً آزمایشات خزش بر روی نمونه های آزمون با دماها و بارهای مختلف انجام می شو. بنابراین یک نمودار مرکب شناخته می شود که تنش حدی (نهایی) را به ازای یک درصد مشخص خزش ، در طول مقاطع زمانی نشان می دهد. برای تعیین ویژگی های خزش برای یک ماده فرضی در دماهای بالا ، به موارد زیر نیاز می باشد :

الف) وسیله ای برای بالا بردن دما و حفظ آن

ب) روشی برای اندازه گیری کرنش به دست آمده [1]

ج) وسیله ای برای اعمال تنش

8-3- شرایط نمونه آزمایش

تقریباً تمام آزمون های خزش به صورت کششی انجام می شوند و نمونه های آزمایش نیز دارای شکلی مشابه نمونه های آزمایش کشش هستند. نمونه های آزمایش خزش کششی ، مقطع گرد یا مستطیلی دارند ولی اندازه آنها استاندارد نشده است . اندازه واقعی نمونه ها به نوع ماشین آزمایش بستگی دارد. ماشین های آزمایش خزش باید خصوصیاتی به شرح زیر داشته باشند :

الف) از قابلیت اعمال و حفظ نیروی کششی ثابت برخوردار باشند.

ب) باید کوره ای مناسب برای حفظ دمای نمونه آزمایش در مقدار مورد نظر و در محدوده بسیار نزدیک به آن را داشته باشد.

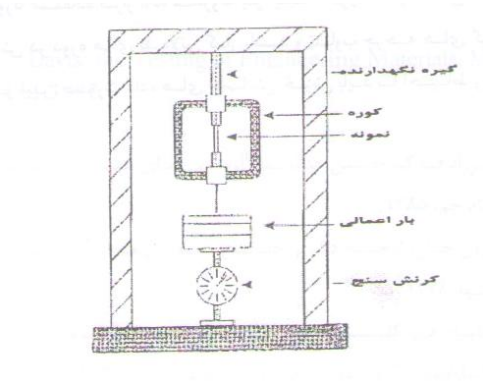
ج) وسایل لازم برای اندازه گیری دقیق افزایش طول نمونه را دارا باشند.

8-4- اجرای آزمایش

در یک آزمون خزش ابتدا نمونه همراه با ترموکوپل و کرنش سنج متصل به آن تا دمای انجام آزمایش گم می شود و سپس بارگذاری انجام می گیرد. نیرو باید به تدریج افزایش یابد و ازدیاد طول ناشی از افزایش بار ، تا رسیدن به تنش اسمی ، باید ثبت شود. ثبت نتایج به منظور تعیین مقادیر نسبی کرنش کشسان و مومسان در آغاز بارگذاری ضروری است. پس از آنکه تغییر شکل مومسان (پلاستیک) اولیه ناشی از اعمال بار به پایان رسید ، کرنش های اندازه گیری شده در فواصل منظمی از زمان ، ثبت می شوند. فواصل

[1]- Xtensometer

زمانی بین اندازه گیری ها ، بستگی به آهنگ خزش دارد. به عبارت دیگر آزمون خزش کششی طوری طراحی شده است که نمونه به صورت قائم در آن قرار گیرد و معمولاً نیروی محوری به گیره های نمونه ، توسط یک سیستم اهرم و بار مرده (آویختن وزنه) اعمال می شود. بایستی توجه داشت که دمای نمونه در طول آزمایش به خوبی تحت کنترل قرار دارد و علاوه بر این ، دما در تمام طول یکنواخت باشد. روش متداول ، استفاده از یک کوره مقاومتی استوانه ای است که روی قاب ماشین کشش نصب می شود و در امتداد قائم قابل جابجایی است. (شکل 8-2)



شکل 8-2- شمایی از دستگاه آزمایش خزش

در طی مدت زمان آزمایش ، حداقل 50 مورد از نقاط داده ای را باید جمع آوری کرد تا بتوان از صحت نتایج بدست آمده اطمینان حاصل نمود. از آنجا که آزمایشات خزش طولانی مدت می باشند ممکن است چندین هفته بین جمع آوری داده ها ، فاصله زمانی وجود داشته باشد. آزمایش های متداول خزش ممکن است برای فولادها بیش از 100/000 ساعت همراه با یک درصد احتمال طولانی شدن ، به طول بیانجامد.

8-5- نتایج آزمایش

در آزمایش خزش ، دما و بار (تنش) وارده در طول آزمایش ثابت باقی می مانند. کرنش ایجاد شده برحسب زمان ، به عنوان نتایج آزمایش در نظر گرفته شده و بر روی یک نمودار ترسیم می شوند. نتایج آزمایش خزش به ترکیب مواد بستگی دارد. به عنوان مثال عناصر آلیاژی نظیر کروم ، نیکل ، مولیبدن و غیره مقاومت به خزش را افزایش می دهند.

عوامل دیگری که بر نتایج آزمون خزش تأثیر می گذارند شامل پروسه تولید ، روش عملیات حرارتی و اندازه دانه ها در ساختار ماده می باشد. بایستی توجه داشت که آزمون خزش رفتار ماده را در شرایط دما و تنش ثابت تعیین می نماید ، در حالی که یک قطعه

ضمن سرویس ، ممکن است مرتباً در چرخه سرما و گرما قرار گیرد و بار متغیری نیز به آن اعمال شود. با وجود این نتایج آزمایش خزش را می توان با اطمینان کافی برای مقاصد طراحی مورد استفاده قرار داد ، مشروط بر اینکه شرایط کار شامل مقادیر نسبتاً ثابتی از دما و تنش در دوره های طولانی کار باشد و تناوب چرخه های گرما و سرما کوتاه باشد در غیر این صورت داده های آزمایش خزش باید با احتیاط زیادی مورد استفاده قرار گیرند.

منابعی برای مطالعه بیشتر

1. Larry Horath ; Fundamentals of Materials Science for Technologists ; Prentice Hall; 2nd Edition; 2001.
2. Harmer E.Davis; the Testing of Engineering Materials. Mc Graw Hill third ed. 1982.
3. فرزاد فدک ، حسن غیاثوند "آزمون های مکانیکی فلزات" ، انتشارات جهان جام جم ، 1385.
4. ورون جان ، ترجمه دکتر حائریان " آزمون مواد " ، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد ، 1378.
5. ویلیام. دی. کلیستر ، ترجمه دکتر شکوه فر " اصول علم و مهندسی مواد " ، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، 1383.
6. حسین تویسرکانی " اصول علم مواد " ، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان ، 1385.
7. جورج ای دیتر ، ترجمه شهره شهیدی " متالورژی مکانیکی " ، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی ، 1369.
8. میرکوکلسنیل ، پیتر لوکاچ ، ترجمه دکتر علی اکبر اکرامی " خستگی فلزات " ، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی ، 1380.
9. ریچارد دبلیو. هرتزبرگ ، ترجمه دکتر علی اکبر اکرامی " تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی " ، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف ، 1385.