
آزمایش کشش

Tension test

آزمایش مکانیکی مواد ۱، تهیه کننده: ش. منصورزاده

1

مقدمه

* برای طراحی موفق یک قطعه در شرایط کار، باید بسته به نیروی اعمالی (کشش، فشار، برش، ...) خواص مکانیکی آن نیرو ملاک طراحی قرار گیرد

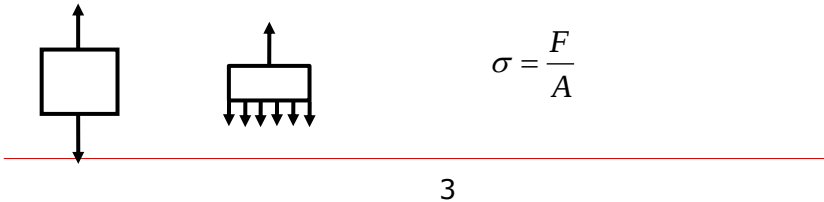
* خواص مکانیکی با آزمایش استاندارد بدست می آید. آزمایشها طبق کتابهای استاندارد ASTM اجرا می شوند. خواص کششی با آزمایش کشش، خواص فشاری با آزمایش فشار و خواص برشی با آزمایش پیچش بدست می آید. به دلیل اهمیت خواص مکانیکی کششی، آزمایش کشش و خواص مکانیکی کششی توضیح داده می شود، اما ابتدا تنش و کرنش مهندسی و حقیقی و انواع تغییر شکل یادآوری می گردد.

2

تنش (Stress)

زمانی که به جسم نیروی خارجی وارد می شود ، در داخل جسم مقاومتی نسبت به تغییر شکل ایجاد می شود که به این مقاومت داخلی تنش می گویند . بعبارتی توزیع نیرو را درون جسم تنش می نامند.

* فرمول تنش: عبارتست از نسبت نیرو به سطح مقطع



* واحد تنش

□ ۱- سیستم SI : پاسکال (Pa): (یادآوری $\frac{N}{m^2} = Pa$)

□ ۲- سیستم انگلیسی : $\frac{lb}{in^2} = psi$

$$1000 \text{ psi} = \text{ksi}$$

□ برای فلزات به دلیل استحکام نسبتا بالا، معمولا از واحدهای فرعی مگا و گیگا پاسکال استفاده می شود.

$$10^6 \text{ Pa} = \text{MPa} \quad , \quad 10^9 \text{ Pa} = \text{GPa}$$

انواع تنش

□ ۱- مهندسی (Engineering stress): نسبت نیرو به سطح مقطع اولیه

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

□ ۲- حقیقی (True stress): نسبت نیرو به سطح مقطع لحظه ای

$$\sigma_t = \frac{F}{A}$$

5

کرنش (Strain)

بر اثر اعمال نیرو جسم دچار تغییر شکل می شود ، تغییر شکل را با کرنش نشان می دهند

* فرمول کرنش: عبارتست از نسبت تغییر طول به طول ، کرنش

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

واحد ندارد

6

انواع کرنش

□ ۱- مهندسی : تغییر طول به طول اولیه

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$$

l_1 طول ثانویه ، l_0 طول اولیه

□ ۲- حقیقی : تغییر طول به طول لحظه ای

$$\varepsilon_t = \ln \frac{l_1}{l_0}$$

7

* کار کردن با تنش و کرنش مهندسی راحت تر از حقیقی ، چون با ابعاد اولیه کار دارد. پس مهندسی را حساب می کنیم
و تنش و کرنش حقیقی بر حسب مهندسی طبق روابط زیر بدست می آید

$$\sigma_t = \sigma(1 + \varepsilon)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon)$$

8

انواع تغییر شکل

در هر نوع بارگذاری (کشش ، فشار ، برش ،) دو نوع تغییر شکل ملاحظه می شود:

□ ۱- کشسان یا الاستیک (Elastic Deformation)

تغییر شکلی که با حذف نیرو از بین رفته و جسم به ابعاد اولیه بر می گردد

□ ۲- مومسان ، دائم یا پلاستیک (Plastic Deformation)

تغییر شکلی که با حذف نیرو از بین نمی رود و جسم به ابعاد اولیه بر نمی گردد

9

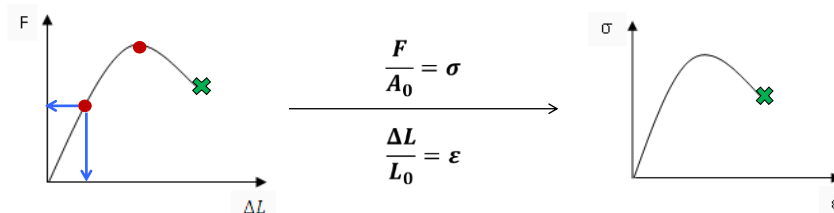
□ با اعمال نیرو ابتدا تغییر شکل الاستیک ظاهر می شود
□ اگر نیرو از حدی بیشتر شود علاوه بر تغییر شکل الاستیک ، پلاستیک هم ظاهر می گردد

□ با باربرداری تغییر شکل الاستیک صفر اما تغییر شکل پلاستیک باقی می ماند

□ اگر نیروی وارده ، آنقدر زیاد باشد که قطعه بشکند ، بعد از شکست ، تغییر شکل الاستیک صفر اما تغییر شکل پلاستیک باقی می ماند

آزمایش کشش (Tension test)

- ۱- ابتدا نمونه استاندارد ساخته می‌شود (مشخصات منطقه باریک شده: قطر ۱۲/۸ mm، طول ۶۰ mm، طول موثر ۵۰ mm که همان طول اولیه)
- ۲- نمونه در فک دستگاه کشش بسته و تحت نیروی کشش تک محوری فزاینده‌ای قرار می‌گیرد
- ۳- نمونه همزمان تغییر شکل داده تا بشکند (نقطه $\times$ اسلاید بعد)
- ۴- دستگاه نمودار نیرو- تغییر طول رسم کرده، برای نقاط انتخابی نیرو و تغییر طول تعیین کرده، نیروها را به عدد ثابت سطح مقطع و تغییر طول ها را به عدد ثابت طول اولیه تقسیم و در واقع تنش و کرنش مهندسی آنها بدست می‌آید و نمودار تنش - کرنش مهندسی رسم¹ می‌کنیم

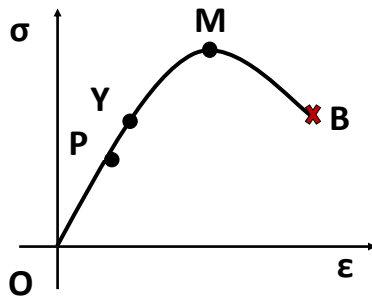


از نمودار تنش - کرنش مهندسی خواص مکانیکی کششی بدست می‌آید

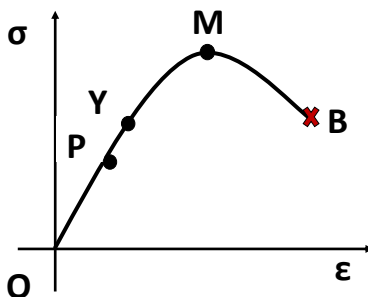
خواص مکانیکی کششی (Tensile properties)

۱- حد تناسب (Proportional limit) □

یا نقطه P، آخرین جایی از نمودار که رابطه ی تنش- کرنش خطی، به عبارتی در محدوده ی OP از نمودار σ - ϵ رابطه خطی



13

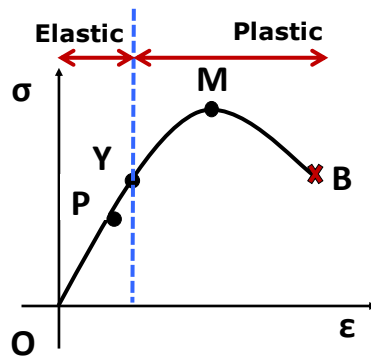


۲- حد الاستیک (Elastic limit) یا نقطه Y □

آخرین جایی از نمودار که تنها تغییر شکل الاستیک داریم (محدوده OY تغییر شکل الاستیک)

جایی که تغییر شکل پلاستیک آغاز می شود (نقطه تسلیم یا Yield point). از این نقطه تغییر شکل پلاستیک به الاستیک اضافه می شود.

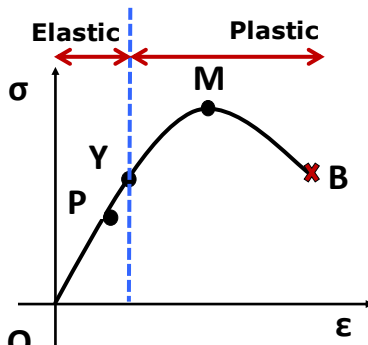
14



□ نقطه ی Y مرز منطقه ی الاستیک و پلاستیک

□ در محدوده ی P تا Y در منطقه الاستیک هستیم اما شکل منحنی در P از حالت خطی خارج می شود و به شکل منحنی در می آید

15



□ در منطقه الاستیک (تا Y) رابطه σ - ϵ خطی فرض شده، طبق قانون هوک

$$\sigma = E \epsilon \quad \text{Hook's law}$$

□ σ تنش مهندسی (Pa) ، ϵ کرنش مهندسی (بدون واحد) ، E ضریب یا مدول یانگ ، ضریب یا مدول الاستیسیته (Pa)

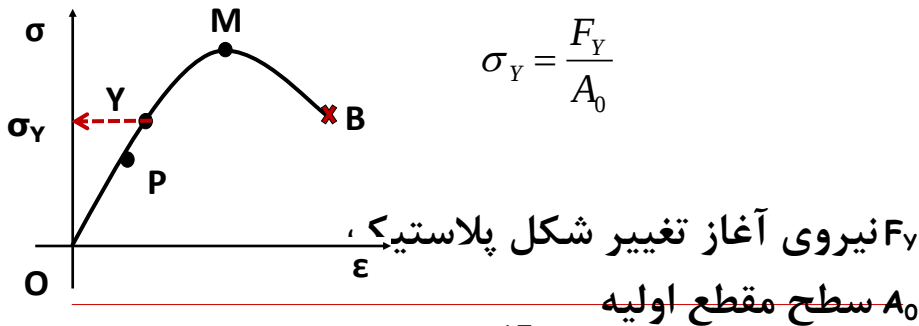
16

۳- استحکام تسلیم (Yield strength)

یا تنش تسلیم ، σ_Y

□ تنش‌ی که به ازای آن تغییر شکل پلاستیک آغاز می‌شود

□ این تنش معادل نقطه ی γ در نمودار



17

□ بزرگترین تنش‌ی که به ازای آن تغییر شکل الاستیک داریم و یا کوچکترین تنش‌ی که تغییر شکل پلاستیک آغاز می‌شود

□ از مشخصات ذاتی ماده ، برای هر جنس عدد معینی (در جدول)

□ σ_Y مهمترین ملاک طراحی قطعات تحت نیرو (رشته ی مکانیک و عمران) ، یعنی نیرویی اعمالی در حدی باشد که تنش قطعه کمتر از σ_Y شود

□ در رشته ی مواد اگر هدف شکل دهی موفق فلزات است باید تنش بیشتر از σ_Y باشد و باید در محدوده ی γ تا M باشیم

18

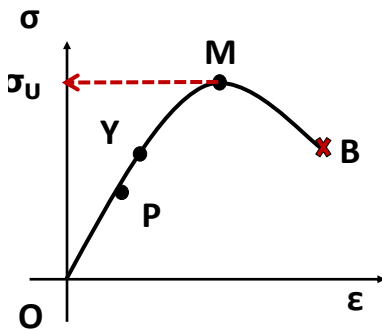
۴- استحکام کششی یا نهایی

(Tensile strength, Ultimate strength)

یا تنش نهایی ، σ_U

□ تعریف: تنش معادل نقطه ی ماکزیمم

□ از مشخصات ذاتی ماده (در جدول)

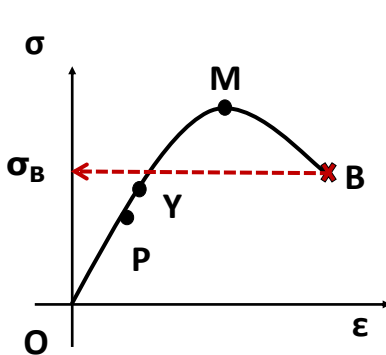
 $F_{\max}$ نیروی ماکزیمم

$$\sigma_U = \frac{F_{\max}}{A_0}$$

□ گاهی σ_U ملاک طراحی

19

□ ۵- استحکام شکست (Breaking strength)

تنش معادل نقطه ی شکست ، σ_B 

$$\sigma_B = \frac{F_B}{A_0}$$

 F_B نیروی شکست

□ در طراحی اهمیت ندارد

20

□ علاوه بر ۵ خاصیت بیان شده ، می توان از آزمایش کشش

انعطاف پذیری ، چقرمگی و جهندگی را بدست آورد

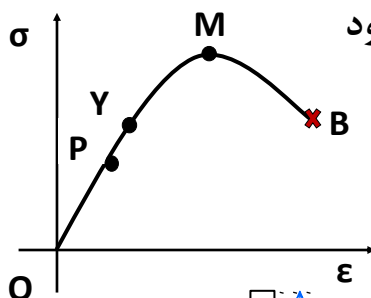
21

انعطاف پذیری (Ductility)

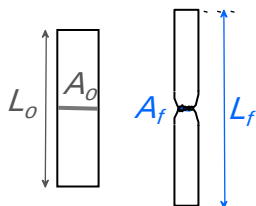
□ مقدار تغییر شکلی که ماده می دهد تا بشکند. تابع محور کرنش است و به ۲ صورت بیان می شود

۱- درصد ازدیاد طول

۲- درصد کاهش سطح مقطع



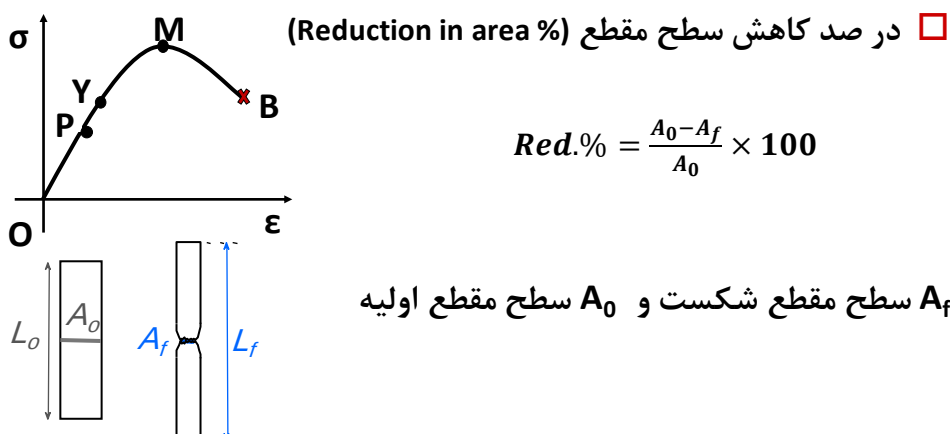
□ درصد ازدیاد طول (Elongation%)



$$Elong.\% = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100 = \varepsilon_f \%$$

l_f سطح مقطع شکست و l_0 سطح مقطع اولیه

22



برای یک ماده با شرایط مشخص این ۲ روش جوابهای متفاوت می دهند .
 بطور کلی هر چه بزرگتر باشند ، ماده تغییر شکل بیشتری می دهد تا بشکند.

23

چقرمگی (Toughness)

مقدار انرژی در واحد حجم که ماده جذب می کند تا بشکند را چقرمگی یا مدول چقرمگی نامند، معادل سطح زیر منحنی تنش- کرنش مهندسی ، تابع محور تنش و کرنش، با U_T نمایش داده ، واحد در سیستم SI ، J/m^3 or Pa ، در سیستم انگلیسی $lb.in/in^3$ or psi

فلزات از نظر میزان تغییر شکل به ۲ دسته
 الف- نرم (Ductile): ابتدا تغییر شکل الاستیک، بعد پلاستیک می دهد تا بشکند ، مانند اکثر فلزات
 ب- ترد (Brittle): تنها تغییر شکل الاستیک می دهد تا بشکند مانند چدن در کشش

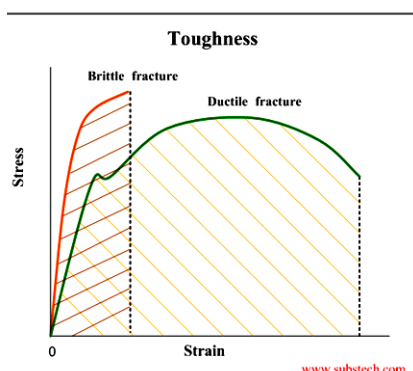
24

چقرمگی بطور تقریبی از روابط زیر بدست می آید
۱- فلز نرم

$$U_T \approx \sigma_u \cdot \varepsilon_f \quad \text{or} \quad U_T \approx \left(\frac{\sigma_u + \sigma_y}{2} \right) \cdot \varepsilon_f$$

۲- فلز ترد

$$U_T \approx \frac{2}{3} \sigma_u \cdot \varepsilon_f$$

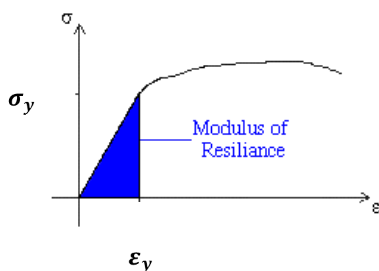


* کرنش شکست در مواد ترد کمتر از ۰.۵٪

25

جهندگی (Resilience)

مقدار انرژی در واحد حجم که ماده جذب می کند تا تغییر شکل الاستیک دهد را جهندگی یا مدول جهندگی نامند، معادل سطح زیر منحنی تنش-کرنش مهندسی در منطقه الاستیک، با U_R نمایش داده، واحد مانند چقرمگی



$$U_R = \frac{1}{2} \sigma_y \cdot \varepsilon_y \xrightarrow{\sigma_y = E \varepsilon_y} = \frac{\sigma_y^2}{2E}$$

کرنش معادل نقطه ε_y یا کرنشی که تغییر شکل پلاستیک آغاز

26

مدول یا ضریب یانگ (E)

عبارت است از مقاومت ماده در برابر تغییر شکل الاستیک (معیار سفتی)

- ثابت تناسب فرمول هوک و برای تعیین ضریب، شیب قسمت خطی منطقه الاستیک (ابتدای منطقه الاستیک) مشخص می شود
- هر چه ضریب بزرگتر، ماده سفت تر یا به عبارتی تحت تنش معین، تغییر شکل الاستیک کمتری می دهد
- ضریب یانگ در مقیاس اتمی : مقاومت اتم های مجاور در مقابل جدا شدن از یکدیگر (یعنی نیروهای پیوند بین اتمی)

27

- هر چه انرژی پیوند بزرگتر ، ضریب یانگ بزرگتر
- Bonding energy : ceramic > metal > polymer so
- Young's modulus : ceramic > metal > polymer

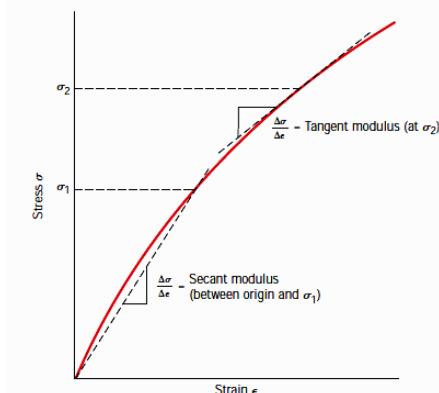
- با افزایش دما ، ضریب یانگ کاهش
- اگر ابتدای منطقه الاستیک، غیر خطی باشد (چدن خاکستری ، بتن و بسیاری از پلیمر ها) برای تعیین ضریب از الف- روش مدول مماسی یا ب- مدول وتری

28

□ الف - مدول مماسی: در تنش σ_2 بر منحنی مماس رسم کرده و شیب خط را گزارش می کنیم

$$E = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$$

□ ب - مدول وتری: نقطه معادل تنش σ_1 روی منحنی مشخص کرده ، بین این نقطه و مبدا یک گزاره



می کنیم

$$E = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$$

29

نکته

□ مقادیر σ_y, σ_u, E اعداد ثابت و از مشخصات ذاتی ماده (در جدول گزارش شده)

□ برای فلزات

$$\sigma_y = 35 - 400 \text{ MPa (35 for Al, 400 for high strength steels)}$$

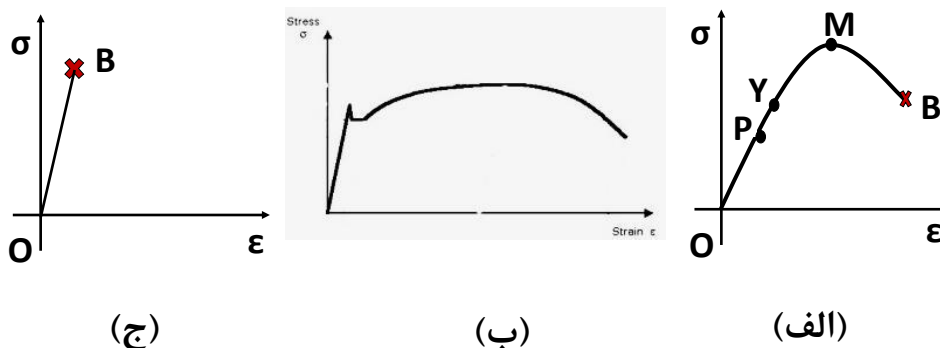
$$\sigma_u = 50 - 3000 \text{ MPa (50 Al, 3000 for high strength steels)}$$

$$E = 45 - 407 \text{ GPa (45 for Mg, 407 for W)}$$

* فولادهای پر استحکام یا استحکام بالا (high strength steels)، فلز منیزیم (Mg)، فلز تنگستن (W)

30

انواع نمودار تنش - کرنش مهندسی کششی فلزات
فلزات در کشش به یکی از ۳ صورت زیر دیده می شوند



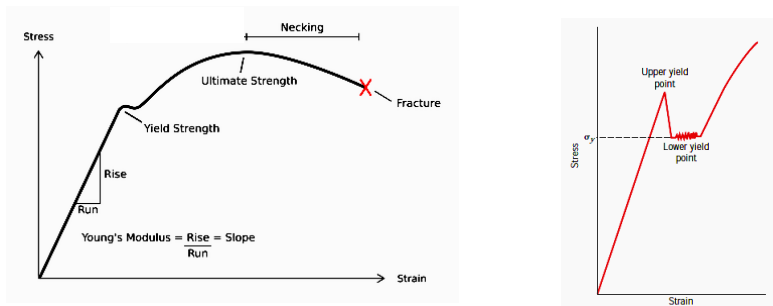
31

- الف - نمودار فلزات نرم: مانند فلزات غیر آهنی (آلومینیم، مس، طلا، تیتانیوم ...)، این نمودار متداول اکثر فلزات
- ب - نمودار فلز نرم: فولاد کم کربن
- ج - نمودار فلز ترد: مانند چدن در کشش که فقط تغییر شکل الاستیک می دهد تا بشکند

* فلزات نرم ابتدا تغییر شکل الاستیک و سپس پلاستیک می دهند تا بشکنند.
اگر نمودار فولاد کم کربن را دقیق تر بررسی کنیم

32

□ در فولاد کم کربن، نمودار بطور خطی بالا می رود تا به نقطه تسلیم بالایی برسد. به نقطه تسلیم بالایی، نقطه تسلیم تیز هم می گویند. سپس نمودار افت می کند و بطور زیگزاگی پیش می رود که به قسمت زیگزاگی نقطه تسلیم پایینی می گویند. تنش معادل نقطه تسلیم پایینی را استحکام تسلیم می نامند. سپس نمودار با تشکیل ماکزیمم به شکست می رسد.



33

□ نقطه تسلیم بالایی (Upper yield point) یا نقطه تسلیم تیز (Sharp yield point)

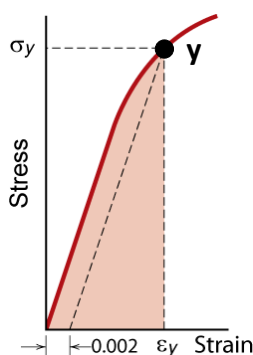
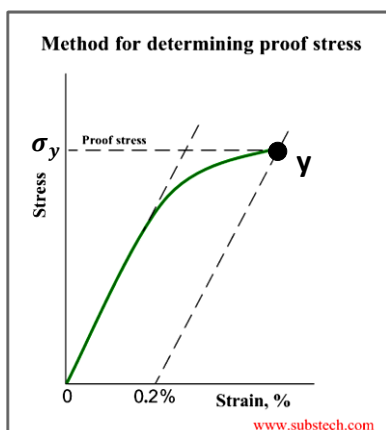
□ نقطه تسلیم پایینی (Lower yield point)

□ برای فولاد کم کربن به راحتی می توان نقطه تسلیم و استحکام تسلیم را تعیین کرد ولی برای نمودار متداول فلزات برای تعیین σ_y, ϵ_y باید از روش 0.2% تصویری استفاده کرد.

34

روش ۰.۲٪ تصویری (0.2% offset method)

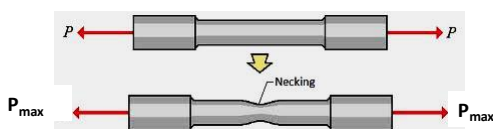
روی محور کرنش عدد ۰.۰۰۲ را مشخص کرده و از آن خطی به موازات قسمت خطی منطقه الاستیک (ابتدای منطقه الاستیک یا OP) رسم می کنیم. محل تلاقی با منحنی نقطه تسلیم (σ_y) و تنش معادل آن استحکام تسلیم (σ_y)



35

گلویی (Necking)

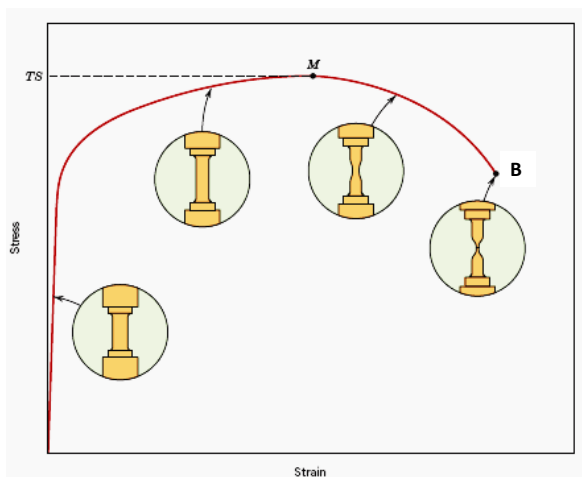
□ در آزمایش کشش، زمانی که نیرو (P) یا تنش مهندسی ماکزیمم می شود در قسمتی از نمونه، در لبه های آن انحنای ظاهر می شود که به این منطقه گلویی گویند (مشاهده گلویی تنها در آزمایش کشش)



□ با ظهور گلویی ادامه تغییر شکل فقط در این ناحیه اتفاق می افتد (موضعی شدن تغییر شکل) تا قطعه به شکست برسد.

ادامه تغییر شکل در گلویی (پیشرفت گلویی) با بزرگ شدن شعاع انحنای گلویی و کاهش سطح مقطع گلویی همراه است.

36



□ با پدیدار شدن گلویی، مناطق خارج از گلویی، مقدار تغییر شکلی که تا نقطه ماکزیمم (M at σ - ϵ) بدست آورند حفظ می کنند اما بیشتر نمی شود

37

□ با تشکیل گلویی، بعد از زمان کوتاهی ماده به شکست می رسد (به همین دلیل شکل دهی موفق فلزات فقط در محدوده y تا M)

تغییر شکل یکنواخت و غیر یکنواخت

نمونه را به اجزا یا المان های کوچک تقسیم بندی کنیم (مش بندی)

□ تغییر شکل یکنواخت (Uniform deformation)

در این حالت تمام المان های ماده بطور مساوی و یکسان تغییر شکل می دهند و مجموع کرنش المان های جسم در هر زمان یک عدد از محور کرنش خواهد بود (مثلا در ثانیه ۱۰ اگر کرنش المان ها را با هم جمع کنیم، معادل کرنش در ثانیه ۱۰ از نمودار تنش-کرنش مهندسی خواهد بود)

38

در نمودار تنش- کرنش مهندسی آزمایش کشش، محدوده OM در وضعیت تغییر شکل یکنواخت

□ تغییر شکل غیر یکنواخت (Non-uniform deformation)

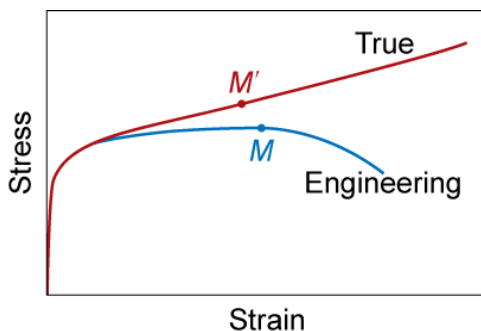
در این حالت تغییر شکل در قسمتی از ماده متمرکز می شود. مثلاً با ظهور گلویی تغییر شکل غیر یکنواخت آغاز می شود.

در نمودار تنش- کرنش مهندسی آزمایش کشش، محدوده MB در وضعیت تغییر شکل غیر یکنواخت

39

مقایسه نمودار تنش- کرنش مهندسی و حقیقی آزمایش کشش

برای یک نمونه مشخص نمودارها به صورت زیر متفاوت می شوند (نقاط M , M' آغاز گلویی). دلیل این تفاوت آن است که



* ابتدا برای دستگاه کشش یک سرعت ثابت کشش تعریف می شود مثلاً 1 mm/min ، و به معنای آن است که دستگاه طوری نیرو اعمال

کند که 2 فک دستگاه در 1 دقیقه، 1 میلی متر از هم فاصله بگیرند و یا سرعت تغییر شکل نمونه 1 mm/min باشد

40

در نمودار نیرو- تغییر طول یا تنش- کرنش مهندسی، اگر نقطه ماکزیمم و یک لحظه قبل را در نظر بگیریم، از لحاظ نیرو تفاوتی ندارند، اما یک لحظه

قبل نیرو روی کل نمونه باعث تغییر شکل می شود ولی در نقطه ماکزیمم این نیرو تنها در گلویی باعث ادامه تغییر شکل می شود. متمرکز شدن نیرو

روی یک قسمت کوچک ماده باعث تغییر شکل ناگهانی و زیاد آن (نسبت به مرحله قبل) می گردد، اما چون برای ماده سرعت ثابت کشش تعریف کردیم، دستگاه سریعاً نیرو را کاهش می دهد

41

□ در نمودار مهندسی از M به بعد کاهش نیرو را داریم و طبق رابطه

$$\sigma = F/A_0$$

تنش مهندسی سیر نزولی می یابد تا جایی که آنقدر سطح مقطع گلویی کم می شود که با کاهش نیرو تحمل نمی آورد و ماده می شکند

□ در نمودار حقیقی از M' به بعد کاهش نیرو را داریم، طبق رابطه

$$\sigma = F/A$$

اما چون کاهش سطح مقطع گلویی بیشتر از کاهش نیرو است تنش حقیقی دائماً بزرگ می شود (سیر صعودی می یابد) تا زمانی که سطح مقطع گلویی آنقدر کوچک می شود که با کاهش نیرو نیز تحمل نمی آورد و نمونه می شکند

42

اهداف آزمایش

□ ۱- گزارش سرعت کشش، ارائه محاسبات بصورت جدول شامل نیرو، تغییر طول، تنش مهندسی، کرنش مهندسی، تنش حقیقی، کرنش حقیقی

□ ۲- تعیین مقادیر E, σ_y, σ_u ، انعطاف پذیری (به دو روش درصد ازدیاد طول و درصد کاهش سطح مقطع)، چقرمگی (با دو فرمول فلز نرم)، جهندگی

□ ۳- رسم نمودارهای زیر روی کاغذ شطرنجی

✓ الف- تنش مهندسی- کرنش مهندسی ($\sigma - \epsilon$)

✓ ب- تنش حقیقی- کرنش حقیقی ($\sigma_t - \epsilon_t$)