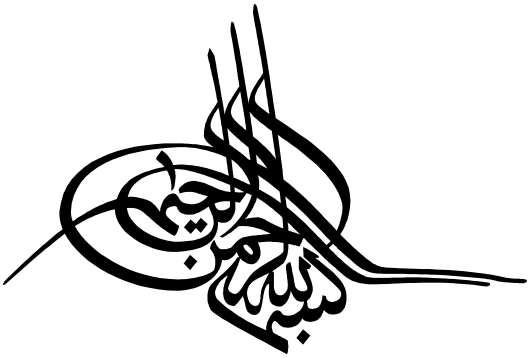


خواص مکانیکی

سری کتاب‌های کمک آموزشی کارشناسی ارشد

مجموعه مهندسی مواد

مؤلف: داریوش کوکبی

ویراستار علمی: فریناز حسینی‌فر

سرشناسه	: کوکبی، داریوش (۱۳۶۵)
عنوان	: خواص مکانیکی
مشخصات نشر	:تهران: مشاوران صعود ماهان، ۱۴۰۱
مشخصات ظاهری	:۲۳۲ص
فروست	:سری کتاب‌های کمک آموزشی کارشناسی ارشد
شابک	: ۲- ۸۳۶- ۴۵۸- ۶۰۰- ۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی یادداشت	:فیپای مختصر : این مدرک در آدرس http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است.
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۲۳۵۰۳۲

کتاب: ..... خواص مکانیکی
مدیر مسئول:..... هادی سیاری، مجید سیاری
مولف:.....داریوش کوکبی
ناشر:.....مشاوران صعود ماهان
مدیر تولید محتوا:.....سمیه بیگی
ویراستار علمی:..... فریناز حسینی‌فر
نوبت و تاریخ چاپ:.....دوم / ۱۴۰۱
تیراژ: ..... ۱۰۰۰ جلد
قیمت:.....۲/۴۹۰/۰۰۰ریال
شابک:..... ۲- ۸۳۶- ۴۵۸- ۶۰۰- ۹۷۸:**ISBN**

انتشـــارات مشاوران صعود ماهان: خیابان ولیعصر، بالاتر از تقـاطع مطهری،
روبروی قنادی هتل بزرگ تهـــران، جنب بانک ملی، پلاک ۲۰۵۰
تلفن: ۴- ۸۸۱۰۰۱۱۳

سخن ناشر

«ن والقلم و ما یسطرون»

کلمه نزد خدا بود و خدا آن را با قلم بر ما نازل کرد.

به پاس تشکر از چنین موهبت الهی، مؤسسه ماهان درصدد برآمده است تا در راستای انتقال دانش و مفاهیم با کمک اساتید مجرب و مجموعه کتب آموزشی خود برای شما داوطلبان ادامه تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد، گام مؤثری بردارد. امید است تلاش‌های خدمتگزاران شما در این مؤسسه پایه‌گذار گام‌های بلند فردای شما باشد.

مجموعه کتاب‌های کمک آموزشی ماهان به‌منظور استفاده داوطلبان کنکور کارشناسی ارشد سراسری و آزاد تألیف شده‌اند. در این کتاب‌ها سعی کرده‌ایم با بهره‌گیری از تجربه اساتید بزرگ و کتب معتبر داوطلبان را از مطالعه کتاب‌های متعدد در هر درس بی‌نیاز کنیم.

دیگر تألیفات ماهان برای سایر دانشجویان به‌صورت ذیل است.

- مجموعه کتاب‌های ۸ آزمون: شامل ۵ مرحله کنکور کارشناسی ارشد ۵ سال اخیر به همراه ۳ مرحله آزمون تألیفی ماهان همراه با پاسخ تشریحی می‌باشد که برای آشنایی با نمونه سوالات کنکور طراحی شده است. این مجموعه کتاب‌ها با توجه به تحلیل ۳ ساله اخیر کنکور و بودجه‌بندی مباحث در هریک از دروس، اطلاعات مناسبی جهت برنامه‌ریزی درسی در اختیار دانشجو قرار می‌دهد.
- مجموعه کتاب‌های کوچک: شامل کلیه نکات کاربردی در گرایش‌های مختلف کنکور کارشناسی ارشد می‌باشد که برای دانشجویان جهت جمع‌بندی مباحث در ۲ ماهه آخر قبل از کنکور مفید است.

بدین‌وسیله از مجموعه اساتید، مولفأن و همکاران محترم خانواده بزرگ ماهان که در تولید و به‌روزرسانی تالیفات ماهان نقش مؤثری داشته‌اند، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌نماییم.

دانشجویان عزیز و اساتید محترم می‌توانند هرگونه انتقاد و پیشنهاد درخصوص تالیفات ماهان را از طریق سایت ماهان به آدرس mahan.ac.ir با ما در میان بگذارند.

مؤسسه آموزش عالی آزاد ماهان

سخن مؤلف

مقدمه مؤلف

با توجه به نیاز روزافزون دانشجویان مبنی بر در اختیار داشتن منابعی قابل اعتماد جهت آمادگی آزمون ورودی مقاطع تحصیلات تکمیلی بر آن شدیم که تجربه حاصل از چندین سال تدریس دوره های آمادگی آزمون را در قالب سری کتب دروس تخصصی آزمون کارشناسی ارشد و دکترای تخصصی مجموعه مهندسی مواد و متالورژی در اختیار دانشجویان قرار دهیم.

کتابی که پیش روی شماست، نیاز به منابع مطالعاتی متنوع را تا حد امکان برطرف کرده و شامل تست های همراه با پاسخ تشریحی کامل از سال ۸۰ می باشد.

از آنجاییکه هیچ اثر تالیفی خالی از ایراد نیست، هر گونه اشکال در متن کتاب و یا هر پرسشی را می توانید به آدرس ایمیل D.kokabi@irost.org ارسال کنید تا در ادامه بتوانیم به حالت ایده آل نزدیکتر شویم.

بر خود لازم میدانم از تمامی دانشجویانی که در این سالها همراه بنده بوده اند سپاسگزار کنم. از پدر و مادر عزیزم و اصلی ترین فرد که انگیزه و انرژی تالیف کتب را در من ایجاد کرد، از صمیم قلب تشکر می کنم و امیدوارم این کتب کمکی هرچند کوچک در راستای اعتلای دانشجویان عزیز مجموعه مهندسی مواد باشند.

موفق باشید

فهرست

عنوان | صفحه

فصل اول – تنش – کرنش ۸
تست‌های کنکور فصل اول ۲۸
فصل دوم – آزمون‌های مکانیکی ۳۷
تست‌های کنکور فصل دوم ۴۶
فصل سوم – مکانیزم‌های مقاوم شدن ۴۸
تست‌های کنکور فصل سوم ۵۷
فصل چهارم – تئوری نابه‌جایی‌ها ۶۴
تست‌های کنکور فصل چهارم ۹۵
فصل پنجم – شکست ۱۱۰
تست‌های کنکور فصل پنجم ۱۲۳
فصل ششم – خستگی ۱۳۳
تست‌های کنکور سراسری فصل ششم ۱۴۵
فصل هفتم – خزش رفتار دمای بالا ۱۵۲
تست‌های کنکور سراسری فصل هفتم ۱۶۱
سوالات کنکور از سال ۹۰ تا ۹۹ ..... ۱۶۶

فصل اول

تنش – کرنش

- رفتار الاستیک و پلاستیک
- تنش و کرنش
- تعریف تنش در نقاط
- قانون هوک در حالت کلی
- برجهندگی
- چقرمگی

فصل اول

تنش – کرنش

مواد همواره در مقابل اعمال نیروهای خارجی جهت حفظ پیوستگی در ساختار، مقاومت می‌کنند. براساس قدرت پیوندهای بین اتم‌ها در مواد مختلف، هر جسم در مقابل نیروها تا میزان خاصی می‌تواند مقاومت کند و پیوستگی خود را حفظ کند که به این میزان مقاومت ماده جهت حفظ پیوستگی، استحکام می‌گوییم.

۱-۱- رفتار الاستیک و پلاستیک

تقریبا تمامی مواد جامد در مقابل بار خارجی قابلیت تغییر شکل را دارا خواهند بود.

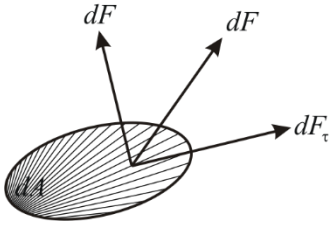
بدلیل کشسان بودن نیروهای بین اتمی، برای تمامی مواد در ابتدای محدوده بارگذاری با کوتاه و بلند شدن فاصله بین اتم‌ها تغییر شکل ایجاد خواهد شد که اصطلاحا به آن تغییر شکل الاستیک (کشسان) گفته می‌شود. دلیل این نامگذاری این است که با برداشتن بار اعمالی و بازگشت اتم‌ها به فاصله تعادلی اولیه (به دلیل رسیدن به حداقل انرژی) این تغییر شکل نیز از بین خواهد رفت.

نکته: در این ناحیه تغییر شکل با میزان بار اعمالی متناسب است و به‌صورت خطی با هم تغییر می‌کنند.

نکته: همواره مواد در مقابل نیروی اعمالی، تغییر ابعاد می‌دهند.

جهت رسیدن به یک قانون یکسان در مورد تمامی مواد، نیاز به نرماله کردن و تعریف کردن ترم‌های جدید به جای نیرو و تغییر ابعاد داریم.

۱-۲- تنش و کرنش



تنش: عبارت است از نیرو بر واحد سطح. همواره نیرو به‌صورت گسترده بر روی سطح در نظر گرفته می‌شود. با توجه به زاویه نیرو نسبت به سطح دو نوع تنش اصلی تعریف می‌شوند.

۱- تنش نرمال: حاصل تقسیم مولفه عمود بر سطح نیرو به مقدار اندازه سطحی که تحت بارگذاری است.

$$\sigma = \frac{dF_n}{dA}$$

۲- تنش برشی: حاصل تقسیم مولفه مماسی نیرو به اندازه سطح بارگذاری شده است.

$$\tau = \frac{dF_t}{dA}$$

➢ واحدهای تنش به‌صورت نیرو بر سطح هستند.

$$\text{تنش} = \frac{\text{پوند نیرو}}{\text{اینچ مربع}} = \frac{Lb}{in^2} = psi \quad \Rightarrow \quad 1ksi = 1000psi$$

$$\frac{\text{نیوتن}}{\text{متر مربع}} = \frac{N}{m^2} = Pa \quad \Rightarrow \quad \frac{kN}{m^2} = kPa \quad , \quad \frac{MN}{m^2} = \frac{N}{mm^2} = MPa$$

$$1MPa = 145psi \quad \Rightarrow \quad 1000MPa = 145ksi$$

کرنش: عبارت است از نسبت تغییرات یک بعد جسم بر اندازه اولیه بعد موردنظر.

$$\text{کرنش} = \frac{\text{تغییرات}}{\text{طول اولیه}} = \frac{\Delta L}{L_\circ}$$

در صورتی که تغییرات لحظه‌ای مدنظر باشد تغییرات طول در بازه زمانی کوتاه بین دو لحظه مشخص نسبت به طول در لحظه اولیه این بازه به عنوان کرنش و به‌صورت انتگرال زیر معرفی می‌شود:

$$\text{کرنش} = \int_{L_\circ}^{L_f} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_f}{L_\circ}$$

نکته: کرنش به دلیل هم‌واحد بودن صورت و مخرج عبارت تعریف شده در آن، یک کمیت بدون واحد است.

نکته: با توجه به تعریف‌های صورت گرفته، به‌صورت لحظه‌ای و یا با استفاده از مقادیر اولیه دو نوع تنش ـ کرنش خواهیم داشت.

۱- تنش و کرنش مهندسی: با استفاده از مقادیر ابعادی اولیه نمونه محاسبات مربوط به آن انجام می‌شوند.

$$\sigma_{eng} = S = \frac{F}{A_\circ}$$

$$e_{eng} = e = \frac{L_f - L_\circ}{L_\circ}$$

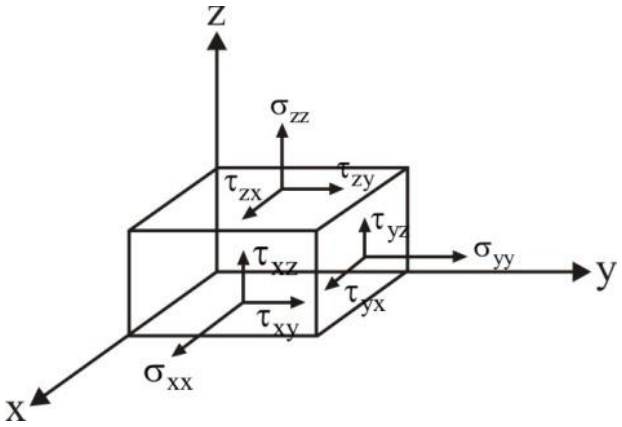
۲- تنش و کرنش حقیقی: با استفاده از سطح مقطع و طول لحظه‌ای محاسبات مربوط به آن انجام می‌شوند.

$$\sigma_{true} = \sigma = \frac{f}{A_i}$$

$$e_{true} = \varepsilon = \ln \frac{L_f}{L_\circ}$$

۱-۳- تعریف تنش در نقاط

در صورتی‌که بخواهیم جهات و صفحات اعمالی تنش را مشخص کنیم نیاز به تعریف یک سلول واحد مکعبی در مختصات دکارتی داریم که بتوانیم تنش‌ها را اندیس‌گذاری کنیم، چرا که در نهایت در بررسی‌های موجود برای تعیین رفتار مکانیکی اجسام در شرایط واقعی در اغلب اوقات به دلیل اینکه بارهای موجود بر روی جسم چندمحوری است، نیاز به استفاده از این اندیس‌ها و نامگذاری‌ها داریم. در شرایطی که در تمامی جهات و صفحات بارگذاری داشته باشیم، مولفه‌های مجزای تنش به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:



نکته: تنش‌های نرمال معمولا با یک اندیس مشخص می‌شوند که نشان‌دهنده جهت و راستای اعمال آن است و از آنجایی که جهت با صفحه عمود بر آن هم‌نام هستند، در نتیجه σ_x یعنی تنش نرمال در جهت x و عمود بر صفحه x (صفحه zy).

نکته: تنش‌های برشی دومولفه‌ای هستند که مولفه اول اندیس در آنها نشان‌دهنده صفحه‌ای است که تنش برشی در آن وارد می‌شود و اندیس دوم نشان‌دهنده جهت اعمالی تنش موردنظر است.

نکته: در مورد تنش‌های نرمال مقادیر عددی مثبت به‌عنوان تنش کششی و مقادیر عددی منفی به‌عنوان تنش فشاری در نظر گرفته می‌شوند.

نکته: در مورد تنش‌های برشی صرفا دو مورد تعیین‌کننده علامت تنش برشی هستند: ۱- جهت و راستای تنش و ۲- صفحه‌ای که تنش در آن وارد می‌شود.

- نتیجه: اگر تنش برشی در راستای مختصاتی مثبت و در روی صفحه‌ای مثبت وارد شود، مقدار آن مثبت است. (راستای منفی و صفحه منفی هم مقداری مثبت برای تنش برشی می‌سازند.)

اگر تنش برشی در راستای مختصاتی و صفحه اعمالی با علامت‌های متفاوت وارد شود، مقداری منفی در نظر گرفته می‌شود.

نکته: تمامی مولفه‌های تنشی را می‌توان در یک ماتریس مربعی ۳×۳ نمایش داد که آن را تانسور تنش می‌نامیم و قطر اصلی این ماتریس تنش‌های نرمال را مشخص می‌کنند.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

نکته: درایه‌های روی قطر اصلی در صورتی تنش‌های اصلی هستند که تمام درایه‌های موجود بر روی سطر و ستون شامل آن درایه، صفر باشد.

نکته: همواره در هر نقطه بر روی جسم که بخواهیم تانسور تنش را بنویسیم (به عبارتی در هر زاویه و جهت اولیه) می‌توان نتیجه گرفت که مجموع سه تنش نرمال یکسان است.

$$\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_{x'} + \sigma_{y'} + \sigma_{z'}$$

نکته: با در نظر گرفتن کلیه فرض‌ها و شرایط جهت جلوگیری از چرخش جسم موردنظر، تنش‌های برشی باید دو به دو با هم برابر باشند. به عبارتی $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ، $\tau_{zx} = \tau_{xz}$ و $\tau_{yz} = \tau_{zy}$.

نکته: در نهایت شش مولفه تنشی در کل بر روی قطعه می‌توانند وجود باشند که سه مولفه نرمال و سه مولفه برشی هستند.

۱-۴- رفتار مواد در کشش

آزمایش کشش از مهم‌ترین آزمایش‌های قابل انجام جهت بررسی خواص مکانیکی ماده است. مواد تحت کشش رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهند.

۱-۴-۱- رفتار نوع اول (الاستیسیته):

ناحیه الاستیک در مواد، اولین ناحیه و در واقع اولین واکنش ماده به بارگذاری بر روی آن است. این رفتار که به رفتار کشسان مواد نیز معروف است، بیان‌کننده تغییراتی است که در ابعاد ماده به میزان مشخصی ایجاد شده و پس از بار برداری به دلیل اینکه این تغییر ابعاد ناشی از جابه‌جایی اتم‌ها و خاصیت فنریت پیوندها بوده، اتم‌ها به فواصل تعادلی برگشته و ابعاد ماده نیز به میزان اولیه بازمی‌گردد.

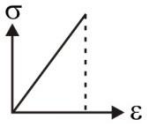
نکته: تغییرشکل ماده در این ناحیه برگشت‌پذیر است.

بار و تغییر ابعاد در ماده در این ناحیه رابطه خطی دارند. به‌طوری که می‌توان با معرفی کردن یک ثابت، این رابطه را به تساوی تبدیل کرد. این رابطه را هوک برای اولین بار معرفی کرد که به قانون هوک هم شناخته می‌شود.

$$F \propto x \quad \Rightarrow \quad F = kx \quad \Rightarrow \quad \sigma = E\varepsilon \, , S = Ee$$

نکته: به ثابت قانون هوک، مدول یانگ یا مدول الاستیسیته گفته می‌شود.

نکته: بر روی منحنی تنش ـ کرنش، مدول الاستیک شیب ناحیه خطی است.



نکته: به دلیل تغییر ابعاد کم و یا کرنش‌های بسیار کم در ناحیه الاستیک در مقابل تنش‌های در محدوده MPa نتیجه می‌شود که مقدار مدول یانگ را می‌توان به واحد GPa بیان کرد.

نکته: مقدار مدول الاستیک (مدول یانگ) به میزان صلبیت پیوندهای مواد ارتباط دارد. در نتیجه مواد با پیوند کووالانسی و یونی بیشترین مقادیر مدول الاستیک را دارند.

$$E_{\text{کووالانسی}} \geq E_{\text{یونی}} \geq E_{\text{فلزی}} \geq E_{\text{واندروالسی}}$$

نکته: مدول الاستیک یک خاصیت ذاتی ماده است و با اعمال کار مکانیکی و حرارتی بر روی ساختار تغییر نمی‌کند.

نکته: به دلیل وابستگی مقدار مدول الاستیک به قدرت پیوند اتمی و کاهش صلبیت پیوند با افزایش دما، می‌توان گفت که مدول الاستیک مواد تنها با تغییر دما تغییر می‌کند.

$$T \uparrow \longrightarrow \downarrow \text{قدرت پیوند} \longrightarrow E \downarrow$$

نکته: در انتهای ناحیه الاستیک رفتار از حالت خطی خارج می‌شود که قانون هوک در آن برقرار نیست اما با تقریب خوبی می‌توان از آن صرفنظر کرد.

قانون هوک در حالت کلی

در صورتی که ماده تحت بارگذاری چندمحوری قرار داشته باشد و خواص مواد را هم با تقریب مناسبی همسانگرد در نظر بگیریم در این صورت حتی در بارگذاری تک محوری هم علاوه بر کرنش در جهت بارگذاری، در سایر ابعاد و جهات مختصاتی هم کرنش در ماده اتفاق می‌افتد.

کرنش محوری = تنش تک محور / الاستیک

کرنش جانبی = – (تنش تک محور × ثابت (مختص ماده)) / الاستیک

علامت منفی به دلیل تفاوت در کاهش یا افزایش آن در مقایسه با کرنش محوری است.

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}$$

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu\varepsilon_x = -\nu\frac{\sigma_x}{E}$$

نکته: ν یا ثابت پواسون مقدار عددی ثابتی است که در محاسبات لحاظ می‌شود.

نکته: مقدار ثابت یا نسبت پواسون برای مواد کاملا همسانگرد ۰/۲۵ بوده اما برای تمامی فلزات با تقریب مناسبی نزدیک به عدد ۰/۳۳ است و در صورتی که بارگذاری در تمامی جهات صورت گیرد، کرنش‌های الاستیک در هر جهت از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y))$$

به همراه این تنش‌های نرمال، تنش‌های برشی اعمال شده بر روی مکعب واحد، کرنش‌های برشی را با توجه به روابط زیر تولید می‌کنند:

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G}\tau_{xy}$$

$$\gamma_{xz} = \frac{1}{G}\tau_{xz}$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G}\tau_{yz}$$

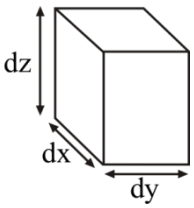
ثابت تناسب‌های خطی بین تنش و کرنش برشی هم در ناحیه الاستیک مدول برشی الاستیک نامیده می‌شود.

نکته: مقادیر G نیز همانند E از تست کشش محاسبه می‌شوند.

در حالتی که تغییرات ابعادی را در هر سه بعد جسم در نظر بگیریم، می‌توانیم تغییر حجم نمونه را به‌صورت زیر محاسبه کنیم:

طول‌های ثانویه $\begin{cases} dy + dx.\varepsilon_x \\ dy + dy.\varepsilon_y \\ dz + dz.\varepsilon_z \end{cases}$

حاصل‌ضرب طول‌های سه بعد = حجم مکعب



کرنش حجمی الاستیک متوسط $\Delta = \frac{\text{تنش متوسط}}{\text{الاستیک حجمی مدول}} = \frac{\text{حجم اولیه} - \text{حجم ثانویه}}{(dx.dy.dz)}$

نکته: در ناحیه الاستیک حجم ماده ثابت نیست.

نکته: تنش متوسط، میانگین تنش‌های نرمال وارده بر جسم است و همواره داریم:

$$\frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \sigma_m$$

با افراز رابطه Δ در نهایت $\Delta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$ خواهد بود و با توجه به روابط کرنش سه بعدی در ناحیه الاستیک داریم:

$$\Delta = \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

از طرفی $\Delta = \frac{\sigma_m}{k}$ و در نهایت می‌توان رابطه بین k و E را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$k = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

نکته: رابطه مهم بین مدول برشی و مدول الاستیک $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ است.

حالت کرنش صفحه‌ای

این حالت هنگامی رخ می‌دهد که یک بعد نسبت به دو بعد دیگر طویل‌تر باشد و در این حالت کرنش در یک بعد صفر می‌باشد. ($\varepsilon_3 = 0$) در این حالت روابط تنش و کرنش به صورت زیر می‌باشد:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}\left[(1-\upsilon^2)\sigma_1 - \upsilon(1+\upsilon)\sigma_2\right]$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E}\left[(1-\upsilon^2)\sigma_2 - \upsilon(1+\upsilon)\sigma_1\right]$$

$$\varepsilon_3 = 0 \Rightarrow \frac{1}{E}\left[\sigma_3 - \upsilon(\sigma_1 + \sigma_2)\right] = 0 \Rightarrow \sigma_3 = \upsilon(\sigma_1 + \sigma_2)$$

حالت تنش صفحه‌ای ($\sigma_3 = 0$)

حالتی است که در آن تنش در یک بعد صفحه باشد. رابطه تنش و کرنش در این حالت به‌صورت زیر است:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\upsilon^2}(\varepsilon_1 + \upsilon\varepsilon_2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\upsilon^2}(\varepsilon_2 + \upsilon\varepsilon_1)$$

برجهندگی (Resiliency)

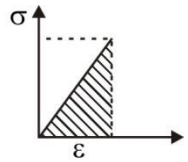
براساس قانون بقای انرژی، وقتی جسمی تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، انرژی وارده به جسم صرف ایجاد تغییرشکل می‌شود و به‌صورت انرژی تغییرشکلی در جسم باقی می‌ماند و همچنین مقداری از آن به‌صورت حرارت از جسم خارج می‌شود.

در منطقه الاستیک پس از بار برداری تمامی این تغییر شکل از بین می‌رود، به‌عبارتی تمام انرژی ذخیره شده در جسم از آن خارج می‌شود و اصطلاحا میزان انرژی ذخیره شده در این ناحیه را خاصیت فنریت ماده می‌نامند و همان‌طور که قبلا ذکر شد در محدوده الاستیک بعد از بار برداری جسم ابعاد اولیه خود را به‌دست خواهد آورد. حال اگر بار را افزایش دهیم وارد منطقه‌ای بنام مومسان یا پلاستیک خواهیم شد که تغییرشکل در این منطقه، تغییرشکل دائمی خواهد بود. نقطه‌ای که تغییرشکل از حالت الاستیک به حالت پلاستیک تبدیل می‌شود را نقطه تسلیم می‌گویند.

- بدلیل اینکه در عمل تعیین دقیق نقطه تسلیم مشکل است به‌طور قراردادی سطحی از تنش را در نظر می‌گیریم که بواسطه اعمال آن $0/2\%$ $\left(\frac{2}{1000}\right)$ کرنش در ماده ایجاد شده باشد.

- هرچه میزان انرژی ذخیره شده الاستیک برای ماده‌ای بالاتر باشد، ماده موردنظر فنر بهتری است.

جهت محاسبه مقدار این انرژی نیاز به محاسبه سطح زیر منحنی تنش ـ کرنش در این ناحیه داریم. به عبارتی مقدار انرژی ذخیره شده برابر است با:



به دلیل ایجاد یک ناحیه مثلثی در منطقه الاستیک سطح زیر منحنی به‌صورت زیر است:

$$U = \frac{۱}{۲}\sigma_{max}\varepsilon_{max}$$

ε_{max}: حد کرنش الاستیک

σ_{max}: حد تنش ماکزیمم در حالت الاستیک

به دلیل وابستگی خطی σ و ε به همدیگر، از روی رابطه اصلی نمی‌توان تعریفی از ماده با فنریت بهتر داشت.

با استفاده از رابطه هوک داریم:

$$U = \frac{۱}{۲}\frac{\sigma^{۲}}{E} = \frac{۱}{۲}E\varepsilon^{۲}$$

نکته: هرچه σ_{max} (حد تحمل ناحیه الاستیک) بالاتر و مدول الاستیک کمتر باشد. ماده فنر مطلوب‌تری محسوب می‌شود و به عبارتی جاذب بهتری برای انرژی است.

نکته: مقدار برجهندگی را به‌صورت انرژی بر واحد حجم محاسبه می‌کنند که مهمترین واحد آن $\frac{J}{cm^{۳}}$ است و رابطه این واحد با MPa به‌صورت زیر است:

$$\frac{J}{cm^{۳}} = \frac{Nm}{۱۰^{-۶}m^{۳}} = ۱۰^{۶}\frac{N}{m^{۳}} = \frac{MN}{m^{۲}} = MPa \quad \Rightarrow \quad ۱\,MPa = ۱\frac{J}{cm^{۳}}$$

۱-۴-۲- رفتار نوع دوم

حالت الاستیک ـ پلاستیک همگن

در تست مکانیکی کشش وقتی سطح تنشی را بالاتر می‌بریم برای مواد متفاوت در تنش‌های متفاوت و مشخصی اصطلاحا حالت کشسان پیوندها تحمل اعمال بار بیشتر را نداشته و برخی پیوندها شکسته می‌شوند و اصطلاحا تغییرشکل ایجاد شده در ماده غیرقابل برگشت می‌شود که به آن تغییرشکل دایمی و منطقه مورد نظر موم‌سان و پلاستیک نامیده می‌شود.

در این ناحیه ارتباط بین تنش و کرنش خطی نیست بلکه برای مواد مختلف، رفتارهای متفاوتی را خواهیم داشت. در این ناحیه مشاهده می‌شود که هرچه میزان تنش افزایش پیدا می‌کند، برای ایجاد مقدار یکسانی از کرنش به تنش‌های بیشتری نیاز خواهد بود.

- مفهوم بیان شده تعریف پدیده کارسختی یا کرنش‌سختی است که عبارت است از بالاتر بردن سطح تنشی موردنیاز جهت ایجاد یک مقدار کرنش یکسان.

نکته: تغییرشکل پلاستیک عبارت است از حرکت غیرقابل برگشت عیوبی مانند نابه‌جایی‌ها در ماده.

نکته: عامل اصلی ایجاد کارسختی در مواد برخورد و برهم‌کنش نابه‌جایی‌ها با یکدیگر و با موانع است.

روابط متعددی برای بیان رفتار فلزات مختلف در این ناحیه ارائه شده‌اند که از میان آنها عمومی‌ترین و کاربردی‌ترین رابطه را هولومان ارائه کرد:

این رابطه تجربی بوده و ارتباط بین تنش و کرنش حقیقی را با یک رابطه توانی بیان می‌کند.

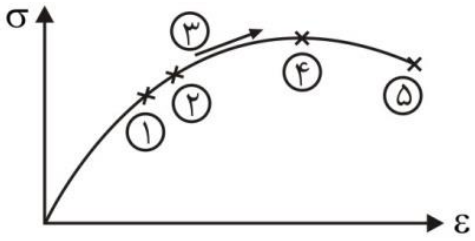
$$\sigma = k\varepsilon^{n}$$

k در این رابطه عدد ثابت است و مقدار تنش حقیقی در $\varepsilon = ۱/۰$ است و n توان کارسختی نامیده می‌شود که شیب منحنی $\log\sigma - \log\varepsilon$ است.

$$n = \frac{d\log\sigma}{d\log\varepsilon}$$

سطوح استحکام در مواد

در منحنی تنش کرنش مهندسی فلز است به‌طور عمومی منحنی به‌صورت مقابل به‌دست می‌آید که به بررسی و تعریف نقاط مهم آن می‌پردازیم:



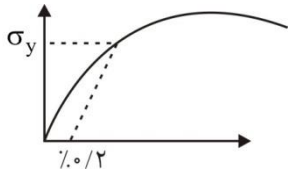
۱- سطح تنش حد نسبت خطی: سطح تنشی است که پایین‌تر از آن نسبت تنش و کرنش خطی است و از رابطه هوک تبعیت می‌کند.

۲- حد الاستیک: سطح تنشی است که پایین‌تر از آن تمام کرنش‌ها برگشت‌پذیر هستند. رفتار ماده در حالت الاستیک همواره خطی نیست که به این بخش رفتار Anelastic گفته می‌شد. به این صورت که اگر ماده‌ای را تا نقطه‌ای درون ناحیه پلاستیک بارگذاری کرده و سپس بار برداری کنیم، بخشی از تغییر شکل برگشت‌پذیر نیاز به زمان جهت بازگشت به حالت اولیه دارند که این وابسته بودن به زمان، همان رفتار Anelastic است.

نکته: دلیل وابسته به زمان بودن بازگشت این مقدار از کرنش، پدیده نفوذ اتم‌های بین‌نشین است که به واسطه وابسته به زمان بودن نفوذ است.

۳- شروع تغییرشکل پلاستیک (تنش تسلیم) yield stress

به دلیل وجود دو حد بالا، تشخیص نقطه دقیق تنش تسلیم سخت بوده و این نقطه را به‌صورت قراردادی طبق استاندارد ASTM E۸−۶۹ تنش در کرنش ۰/۰۰۲٪ در نظر می‌گیریم.



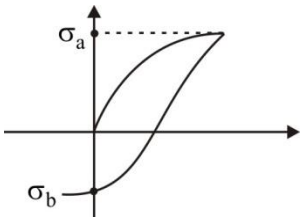
۴- ماکزیمم تنش: اصطلاحا آن را Ultimate tensile Strength می‌نامند و نقطه‌ای است که در آن تغییرشکل یکنواخت (همگن) پلاستیک تمام شده و تغییرشکل غیریکنواخت شروع می‌شود.

۵- تنش شکست: تنشی است که ماده در آن دچار جدایش و دوتکه شدن می‌شود.

نکته: رابطه هولومان برای منحنی تنش ـ کرنش حقیقی صحت دارد.
نکته: این رابطه از نقطه شروع تغییرشکل پلاستیک تا نقطه max بارگذاری متناظر در منحنی $\sigma-\varepsilon$ مهندسی برقرار است.
نکته: هرچه میزان n بالاتر باشد، برای یک مقدار مشخص کرنش نیاز به سطوح تنشی بالاتر داریم.

اثر باوشینگر

در صورتی که ماده‌ای تا بعد از نقطه تسلیم بارگذاری شود، سپس بار برداری شده و در جهت مخالف (کششی ← فشاری یا بالعکس) تا بعد از نقطه تسلیم آن بارگذاری شود، مشاهده می‌شود که تنش تسلیم در حالت دوم کاهش یافته است. دلیل این رفتار به خاصیت هیسترزیس ناشی از بار برداری و بارگذاری مجدد مرتبط است که مقداری از کرنش در ماده باقی می‌ماند و به عبارتی کرنش کردن ماده در جهت مخالف راحت‌تر خواهد بود.



➢ از اثر باوشینگر در تئوری پلاستیسیته صرفنظر می‌شود.

نکته: مقدار $n=1$ نشان‌دهنده رفتار کاملا الاستیک است (یعنی ماده دارای ناحیه پلاستیک نیست) و مقدار $n=0$ نشان‌دهنده رفتار کاملا پلاسیتک است و مقدار $0<n<1$ یک ماده کارسخت‌شونده را مشخص می‌کند.

خواص ناحیه پلاستیک

براساس تعاریف اولیه تنش و کرنش حقیقی و مهندسی می‌توانیم ارتباط‌های زیر را که در حل مسائل بسیار کاربردی هستند را استخراج کنیم:

$$e=\frac{\Delta L}{\varepsilon_\circ}=\frac{L-L_\circ}{L_\circ}=\frac{L}{L_\circ}-1 \quad\Rightarrow\quad \frac{L}{L_\circ}=1+e \quad\Rightarrow\quad \varepsilon=\ln\frac{L}{L_\circ}=\ln(1+e)$$

در ناحیه پلاستیک و با تقریب بیشتری در ناحیه الاستیک می‌توانیم حجم ماده را ثابت فرض کنیم. در نتیجه داریم:

$$V_\circ=V$$

$$A_\circ L_\circ=AL \quad\Rightarrow\quad \frac{A}{A_\circ}=\frac{L}{L_\circ} \quad\Rightarrow\quad \varepsilon=\ln\frac{L}{L_\circ}=\ln\frac{A_\circ}{A}$$

برای تنش حقیقی و مهندسی هم داریم:

$$\sigma=\frac{P}{A} \quad , \quad S=\frac{P}{A_\circ}$$

$$\Rightarrow \quad \sigma=\frac{P}{A_\circ}\frac{A_\circ}{A} \xrightarrow{\frac{A_\circ}{A}=\frac{L}{L_\circ}=1+e} \sigma=\frac{P}{A_\circ}(1+e)=S(1+e)$$

درصد کاهش سطح مقطع (r) پارامتر دیگریست که برای بیان تغییرشکل‌های مواد تعریف می‌شود:

$$r=\frac{A_{\circ}-A}{A_{\circ}}=۱-\frac{A}{A_{\circ}}=۱-\frac{L_{\circ}}{L}=۱-\frac{۱}{۱+e} \quad \Rightarrow \quad r=\frac{e}{۱+e}$$

$$r=۱-\frac{L_{\circ}}{L} \quad \Rightarrow \quad ۱-r=\frac{L_{\circ}}{L} \quad \Rightarrow \quad \frac{L}{L_{\circ}}=\frac{۱}{۱-r} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon=\ln\frac{۱}{۱-r}$$

- در صورتی که سطح ماده را دایره‌ای در نظر بگیریم، داریم:

$$\varepsilon=\ln\frac{A_{\circ}}{A}=\ln\frac{\pi\frac{D_{\circ}^{۲}}{۴}}{\pi\frac{D^{۲}}{۴}}=\ln\left(\frac{D_{\circ}}{D}\right)^{۲}=۲\ln\frac{D_{\circ}}{D}$$

غیریکنواختی در رفتار پلاستیک

با افزایش بیشتر سطح تنشی از کرنش و تنش مشخصی که بیشتر می‌رویم رفتار تغییرشکل ماده به‌صورت غیریکنواخت می‌شود و اصطلاحا مقدار بیشتری از تغییر شکل در ضعیف‌ترین بخش ماده متمرکز می‌شود و ماده دچار یک باریک‌شدگی یا به عبارتی گردنی شدن در بخش خاصی می‌شود و در نهایت از منطقه گردنی شده دچار شکست می‌شود.

- این بخش‌های ضعیف قسمت‌هایی در ماده هستند که دارای عیوب داخلی می‌باشند. البته در یک ماده بدون عیب دقیقا بخش میانی ماده دچار گلویی شدن می‌شود.

پس از اینکه تغییر شکل همگن ماده و در واقع نهایت تحمل ماده در برابر بارگذاری و تغییرشکل یکنواخت در نقطه UTS به پایان رسید، باریک شدگی ماده از ضعیف‌ترین آن ادامه می‌یابد. به همین دلیل به این نقطه شروع گلویی شدن گفته می‌شود و از این به بعد تقریبا تمامی تغییرشکل در این ناحیه متمرکز می‌شود و سطح تنش در منحنی تنش کرنش مهندسی افت می‌کند.

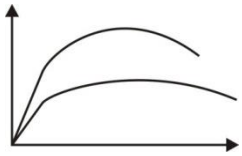
- در نهایت به دلیل محدودکننده‌های تغییرشکل و وجود نقایص در این ناحیه و همچنین تفاوت در رفتار تغییرشکلی نقایص و زمینه، این فصل مشترک‌ها از هم جدا شده و قبل از باریک شدن کامل و بسیار زیاد، نمونه دچار شکست می‌شود.

نکته: شکست نهایی در ناحیه گلویی شده ناگهانی بوده که آن را شکست ترد می‌نامیم.

در منحنی تنش کرنش مقدار نیرو به‌دلیل برگشت الاستیک بخش‌های خارج از منطقه الاستیک کاهش می‌یابد در نتیجه سطح تنشی افت می‌کند. در نتیجه با توجه به تعریف $S-e$ به دلیل استفاده از سطح مقطع اولیه (ثابت)، منحنی تنش ـ کرنش مهندسی از این نقطه به بعد افت می‌کند اما در منحنی $\sigma-\varepsilon$ به دلیل استفاده از سطح مقطع لحظه‌ای، به دلیل بیشتر بودن اثر کاهش سطح مقطع که در مخرج عبارت تنش قرار دارد، مشاهده می‌شود که تنش حقیقی روند افزایشی خود را البته با شیب ضعیف‌تری ادامه می‌دهد.

نکته: به همین دلیل است که برای تنش UTS (استحکام کششی نهایی) از مقدار متناظر موجود روی منحنی مهندسی استفاده می‌شود چرا که عدد موجود در روی منحنی حقیقی اثر انعطاف‌پذیری ماده را نیز در خود دارد.

از نظر مهندسی موادی که بالاترین تغییرشکل یکنواخت را از خود نشان دهند، مطلوب‌تر هستند، در نتیجه برای محاسبه ماکزیمم کرنش یکنواخت داریم:



$$F=\sigma A \quad \Rightarrow \quad dF=\sigma dA+Ad\sigma$$

در نقطه گردنی شدن با توجه به نمودار $S-e$ یک نقطه max داریم، به عبارتی:

$$dF=0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d\sigma}{\sigma}=-\frac{dA}{A} \qquad (1)$$

از طرفی طبق فرض قبلی حجم را ثابت در نظر می‌گیریم و داریم:

$$AL=cte \quad \Rightarrow \quad AdL+LdA=0 \quad \Rightarrow \quad -\frac{dA}{A}=\frac{dL}{L} \qquad (2$$

با توجه به تعریف $\varepsilon=\frac{dL}{L}$ و جایگذاری در روابط (۱) و (۲) نتیجه می‌شود که:

$$\sigma=\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \xrightarrow[\text{رابطه هولومان}]{\text{با استفاده از}} \sigma=k\varepsilon^n \quad \Rightarrow \quad k\varepsilon^n=kn\varepsilon^{n-1} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_u=n$$

- به عبارتی در نقطه max بارگذاری حد کرنش یکنواخت همواره توان کارسختی است.

نکته: علاوه بر غیریکنواختی کرنش پس از شروع گردنی، در این منطقه حالت سه محوری تنش ایجاد می‌شود (به عبارتی بارگذاری تک محوری است اما در نمونه در سه جهت تنش دیده می‌شود).

نکته: وجود حالت سه محوری تنش باعث می‌شود که قبل از رسیدن قطر نمونه به مقادیر بسیار کم نمونه دچار شکست می‌شود.

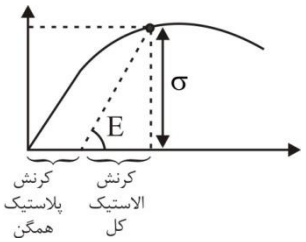
نکته: آنیل کردن ماده باعث کاهش کارسختی ماده می‌شود.

نکته: قابلیت کارسختی شدن ماده متناسب با مقدار توان کارسختی است.

نکته: هرچه ماده دارای استحکام بالاتر باشد، مقدار n و به عبارتی (ε_u) بزرگ‌تر می‌شود.

نکته: همانطور که اشاره شد، پس از پایان ناحیه الاستیک و در ناحیه پلاستیک هم مقدار بسیار کمی کرنش الاستیک خواهیم داشت.

نکته: جهت محاسبه مقدار کرنش الاستیک و پلاستیک در هر میزان از تنش سیلان به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم:



$$k\varepsilon_{tot}^n=\sigma \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_p=\varepsilon_{tot}-\varepsilon_e$$

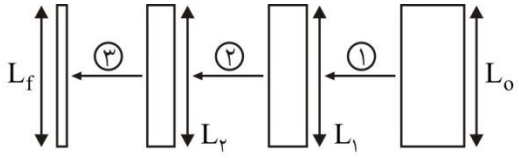
$$\sigma=kn^n \quad , \quad \sigma=S(1+e)$$
$$\exp(\varepsilon)$$

نکته: به دلیل اینکه رابطه هولومان با جایگذاری $\varepsilon_u=n$ مقدار σ_{UTS} را به‌دست می‌دهد، با استفاده از رابطه $S_U=k\left(\frac{n}{e}\right)^n$ می‌توان مستقیما مقدار S_{UTS} را به‌عنوان استحکام تسلیم محاسبه کرد.

قابلیت جمع‌پذیری کرنش‌ها

در اکثر فرآیندهای صنعتی همواره نمی‌توان تمامی تغییرشکل موردنیاز را در یک مرحله اعمال کرد و معمولا در چند مرحله با انجام عملیات حرارتی جهت نرم کردن ساختار بین این مراحل ماده دچار تغییرشکل‌های شدید پس از چند مرحله خواهد شد. به‌طور مثال تولید فویل‌های بسیار نازک در حد میکرونی از آلومینیوم از ورق‌های کار شده با ضخامت چند سانتی‌متری از Al طی چندین مرحله انجام‌پذیر خواهد بود.

جهت به‌دست آوردن مجموع کرنش ایجاد شده در ماده هر دو رابطه کرنش حقیقی و مهندسی را آزمایش می‌کنیم.



$$e_{tot}=\frac{L_f-L_\circ}{L_\circ}$$

$$e_1=\frac{L_1-L_\circ}{L_\circ}\quad,\quad e_2=\frac{L_2-L_1}{L_1}\quad,\quad e_3=\frac{L_3-L_2}{L_2}\quad\Rightarrow\quad e_1+e_2+e_3\neq e_{tot}$$

- نتیجه: کرنش‌های مهندسی طی یک پروسه چندمرحله‌ای بر روی یک جسم جمع‌پذیر نیستند.

$$\varepsilon_{tot}=\ln\frac{L_f}{L_\circ}$$

$$\varepsilon_1=\ln\frac{L_1}{L_\circ}\quad,\quad \varepsilon_2=\ln\frac{L_2}{L_1}\quad,\quad \varepsilon_3=\ln\frac{L_f}{L_2}$$

$$\Rightarrow\quad \varepsilon_1+\varepsilon_2+\varepsilon_3=\ln\left(\frac{L_1\times L_2\times L_f}{L_\circ\times L_1\times L_2}\right)=\ln\left(\frac{L_f}{L_\circ}\right)=\varepsilon_{tot}$$

- نتیجه: کرنش‌های حقیقی طی یک پروسه چندمرحله‌ای جمع‌پذیر است.

نکته: از آنجایی که معمولا در فرآیندها و سوالات مقادیر کرنش مهندسی و یا درصد کاهش سطح مقطع برای مراحل تغییرشکل داده می‌شوند، با روابط تبدیلی باید در نهایت مجموع کرنش‌های حقیقی را به‌دست آوریم چرا که سایر ترم‌های تغییر ابعادی قابلیت جمع‌پذیری را ندارند.

چقرمگی (Toughness)

همزمان با اعمال تنش و ایجاد تغییرشکل در ماده به دلیل افزایش نقایص ناشی از افزایش سطح نیروی اعمالی، از آنجایی که هر نقص در ماده دارای انرژی مختص خود است، می‌توان گفت میزان انرژی درونی و انرژی ذخیره شده در ماده در حال افزایش است که این انرژی از نیرویی که ما صرف تغییر شکل ماده می‌کنیم تامین می‌شود.

ماده تا نقطه شکست انرژی جذب می‌کند. در هر میزان کرنش، مقدار انرژی جذب شده توسط ماده از سطح زیرمنحنی تنش کرنش آن محاسبه می‌شود. به عبارتی با استفاده از رابطه $\int\sigma d\varepsilon$ که میزان این انرژی جذب شده با عنوان چقرمگی ماده شناخته می‌شود.

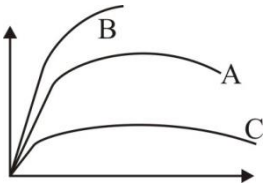
میزان انرژی جذب شده یا کارپلاستیک $=\int\sigma d\varepsilon=\int k\varepsilon^n d\varepsilon=\frac{k\varepsilon^{n+1}}{n+1}$

نکته: ترد بودن ماده یعنی قابلیت جذب انرژی کم در مقابل اعمال نیرو.

از اینرو می‌توان گفت که هرچه ماده قابلیت تغییرشکل بالاتری داشته باشد، می‌تواند مقدار انرژی بیشتری را در خود ذخیره کند.

استحکام و چکش‌خواری (داکتیلیته) مفاهیمی هستند که دقیقا در مقابل هم قرار دارند. در صورتی که مفهوم چقرمگی جمع بین این دو است. عبارتی که بیشتر استفاده می‌شود، چقرمگی شکست ماده است که در واقع بیان‌کننده حداکثر جذب انرژی توسط ماده تا قبل از نقطه شکست است.

به‌طور کلی مواد با توجه به شکل منحنی تنش و کرنش آنها به دو دسته کلی مواد نرم (داکتیل) و مواد ترد یا سخت و شکننده تقسیم می‌شوند. در مواد نرم منطقه الاستیک در مقایسه با منطقه پلاستیک کوچک بوده و فلز قبل از شکست تغییرشکل موم‌سان قابل توجهی خواهد داشت. برعکس در مواد ترد تغییرشکل موم‌سان زیاد نیست و ماده بعد از وارد شدن به منطقه موم‌سان یا در منطقه کشسان دچار شکست خواهد شد.



ماده با منحنی $\sigma-\varepsilon$ شبیه به C مواد با نرمی و شکل‌پذیری بالا هستند. منحنی B نماینده مواد با استحکام بالاست در حالیکه منحنی A جمع هر دو خاصیت را دربردارد، یعنی استحکام قابل قبول و در کنار آن انعطاف‌پذیری که می‌تواند مناسب باشد، به عبارتی ماده A دارای بیشترین میزان چقرمگی است.

۱-۴-۳- رفتار نوع سوم

الاستیک ـ پلاستیک ناهمگن

نمونه کششی ممکن است منحنی $\sigma-\varepsilon$ ایجاد کند که پس از منطقه کشسان دارای یک سری دندانه در قسمت سهمی شکل منحنی باشد. این حالت مشخص‌کننده رفتاری است که اصطلاحا تغییرشکل ناهمگن یا غیریکنواخت در ماده نامیده می‌شود.
این رفتار در دو شرایط متفاوت رخ می‌دهد:

۱- رفتار تغییرشکل فلزات hcp در گستره وسیعی از دمای آزمون کشش اینگونه است. اصولا این فلزات تمایل دارند که با ترکیبی از لغزش در صفحات لغزش و دوقلویی در مناطق مجزا به‌طور موم‌سان تغییرشکل دهند.

- دلیل موضوع دندانه‌دار شدن منحنی $\sigma-\varepsilon$ در فلزات دارای مکانیزم تغییرشکل از طریق دوقلویی این است که هر دندانه از منحنی همراه با جوانه‌زنی و رشد نوارهای دوقلویی است.

نکته: غالبا این برآمدگی‌های تغییرشکلی همراه با صداهای ضعیف است که مشخص‌ترین آنها Tin Cry است.
نکته: وقتی نرخ کرنش ماده تحت تغییر شکل در آزمایش کشش بیشتر از نرخ جابه‌جایی فک‌ها (نرخ کرنش اعمال شده) باشد، بار افت کرده و دندانه‌ای شدن در منحنی مشاهده می‌شود.

۲- فلزات مکعبی مرکز پر که در دمای کم تحت کشش قرار می‌گیرند و یا فلزات مکعبی وجه مرکز پر که هم در دمای کم و هم تحت نرخ کرنش‌های بالا تحت کشش قرار می‌گیرند، به دلیل جلوگیری از لغزش مناسب نابه‌جایی‌ها در این شرایط سخت و براساس نکته ذکر شده دارای منحنی‌های دندانه‌دار خواهند شد.

۱-۴-۴- رفتار نوع چهارم

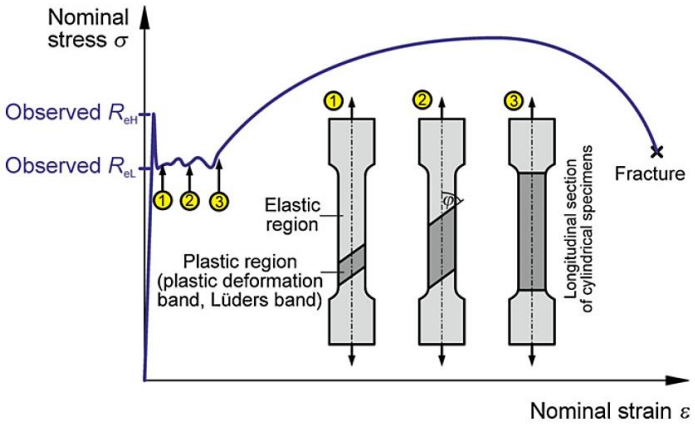
الاستیک ـ پلاستیک ناهمگن ـ پلاستیک همگن

در منحنی $\sigma-\varepsilon$ بیشتر آلیاژهای پایه آهن مکعبی مرکز پر و برخی آلیاژهای غیرآهنی مانند آلیاژهای تیتانیم، مولیبدن و آلومینیوم منطقه‌ای باریک از تغییرشکل موم‌سان ناهمگن منطقه الاستیک را از منطقه پلاستیک همگن جدا می‌کند.

نکته: معمولا گستره این منطقه ناهمگن در حد ٪۳ـ۱ کرنش است.

این قسمت از منحنی ناشی از واکنش بین اتم‌های محلول و نابجایی‌هاست. پس از بارگذاری ماده تا نقطه R_{eH} که عنوان نقطه تسلیم بالا تعریف شده است، در ماده یک نوار تغییرشکل موضعی دیده می‌شود.

شروع ناگهانی تغییرشکل موم‌سان که همراه با این نوار لودر است، مسئول افت اولیه نیرو تا نقطه R_{eL} است که به‌عنوان نقطه تسلیم پایین تعریف شده است.



نکته: به دلیل اینکه نقطه تسلیم بالا به تمرکز تنش در نمونه، در یک راستا بودن نمونه با فک‌های کشش و سایر عوامل اجرایی آزمون حساس است و پراکندگی زیادی در مقادیر آن مشاهده می‌شود بنابراین در این مواد، نقطه تسلیم پایینی به‌عنوان استحکام تسلیم ماده لحاظ می‌شود.

بقیه قسمت ناهمگن تغییرشکل ناشی از حرکت نوار یا نوارهای لودرز در کل مقطع سنجه طول است. وقتی که تغییرشکل در تمام قسمت‌های سنجه طول پخش شد، ماده به‌صورت همگن شروع به تغییرشکل می‌کند.

نکته: سقوط اولیه در نمودار $\sigma-\varepsilon$ را ریزش بهمن نابه‌جایی هم می‌گویند. به عبارتی این افت همراه با آزاد شدن یکباره مقدار زیادی نابه‌جایی همراه است.

می‌توان پدیده نقطه تسلیم را در دو دلیل تشریح کرد:

۱- وجود نابه‌جایی‌های ذاتا متحرک که توسط موانعی به‌صورت دینامیک قفل شده‌اند(به عبارتی این قفل شدن می‌تواند باز هم اتفاق بیفتد).

۲- عدم وجود نابجایی‌های متحرک کافی برای شروع سیستم شدن در ماده حین افزایش سطح تنش.

نکته: رفتار نوع سوم که به دلیل اثر پورتوین ـ لوشاتلیه بود و اساسا دوقلویی شدن مکانیزم دندانه‌ای شدن بود ممکن است در دستگاه‌های با دقت کمتر شناسایی نشود، در حالیکه مکانیزم اصلی رفتار نوع چهارم قفل و آزاد شدن نابه‌جایی‌هاست.

نکته: رشد نوار لودر یعنی ادامه لاغر شدن نمونه در طول سنجه تا اینکه به‌طور کامل این لاغر شدن در نمونه اتفاق بیفتد.

نکته: باندهای لودر حداکثر تا ۵ عدد در سطح نمونه ایجاد می‌شوند.

۱-۵- مخازن جدارنازک تحت فشار

بررسی تنش‌ها در یک مخزن جدار نازک تحت فشار مبنای بسیار مهمی در تحلیل شکست و خستگی این مخازن است. مخزنی استوانه‌ای به طول L ، شعاع متوسط r و ضخامت دیوار t را در نظر بگیرید که تحت فشار یک گاز یا مایع داخلی به میزان p باشد. در این حالت مختصات مورداستفاده، مختصات استوانه‌ای است. سه نوع تنش در این مخازن تعریف می‌شود:

۱- تنش شعاعی: به دلیل اینکه ضخامت پوسته این مخازن نازک در نظر گرفته می‌شود (معمولا $\frac{r}{t} \geq ۱۰$) و درون آن نیز با یک فشار یکنواخت p از سیال درونی پر شده است، تنش شعاعی در این مخازن با فرض قابل قبولی صفر در نظر گرفته می‌شود.

۲- تنش مماسی: تنش مماسی یا زاویه‌ای در واقع تنشی است که بر پوسته مخزن وارد می‌شود و جهت آن در راستای چرخش محیطی طول پوسته است. با استفاده از روابط مقاومت مصالح مقدار این تنش به‌صورت زیر است:

$$\sigma_t = \frac{pr}{t}$$

نکته: تنش مماسی را به تنش هوپ نیز نامگذاری می‌کنند.

۳- تنش محوری: این استوانه‌ها در راستای محور اصلی هم تحت یکسری تنش قرار می‌گیرند که با توجه به سطح مورد اعمال تنش که در این حالت برابر سطح مقطع جداره مخزن است (حاصل‌ضرب ضخامت در مقدار متوسط محیط مخزن) می‌توان تنش طولی را به‌صورت زیر نوشت:

$$\sigma_L = \frac{pr}{۲t} = \sigma_{axial}$$

نکته: با مقایسه معادلات بالا می‌بینیم که تنش مماسی دو برابر تنش محوری است. بنابراین انتظار می‌رود که شکست در مخازن تحت اثر تنش هوپ و در راستایی عمود بر این تنش رخ دهد.

۱-۶- اثر دما و آهنگ کرنش بر رفتار کشش

تغییر دما و آهنگ بارگذاری تاثیرات مهمی بر استحکام و شکل‌پذیری ماده دارد. معادلاتی که به بیان این تاثیرات می‌پردازند، به معادلات حالت یا بنیادی معروف هستند.

افزایش دما باعث می‌شود که قدرت باندهای اتمی کاهش پیدا کند، نرخ و سهولت حرکت نابه‌جایی‌ها بالا رود و این موارد باعث کاهش استحکام می‌شود.

از طرفی با افزایش نرخ کرنش (بارگذاری) سهولت حرکت نابه‌جایی‌ها کم شده و مکانیزم تغییرشکل ممکن است متفاوت شود و البته استحکام ماده افزایش می‌یابد.

در کل منحنی تنش ـ کرنش برای یک ماده معین با افزایش دما و کاهش آهنگ بارگذاری، افت می کند. میزان این تغییرات به نوع ماده هم بستگی دارد. فلزات مکعبی مرکز پر و مواد سرامیکی نسبت به فلزات مکعبی وجه پر بیشتر به تغییرات T و $\dot{\varepsilon}$ حساس بوده و حساسیت مواد جامد پلیمری حساسیت بالاتری دارند.

کاربردی‌ترین رابطه بنیادی به‌صورت زیر است:

$$\sigma = C\dot{\varepsilon}^m$$

m : ضریب حساسیت به آهنگ کرنش

$\dot{\varepsilon}$: آهنگ کرنش

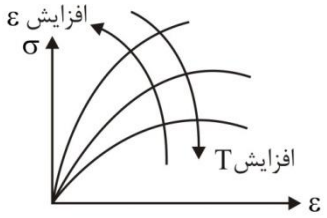
C : ثابت ماده

σ: تنش حقیقی

برای بیشتر مواد مقدار m کم و بین ۰/۰۲ تا ۰/۲ تغییر می‌کند.

$\dot{\varepsilon}$ هرچه بالاتر برود، نابه‌جایی‌ها فرصت حرکت کافی نداشته و مکانیزم دوقلویی فعال می‌شود.

نکته: به‌طور کلی رفتار را می‌توان بر روی نمودار $\sigma - \varepsilon$ به‌صورت زیر نمایش داد.



۱-۷- دایره موردتنش در دو بعد

از این روش ترسیمی برای نشان دادن حالت تنش در نقطه‌ای روی یک صفحه می‌توان استفاده کرد. در واقع هنگامی که یک تنش اصلی (خواه کششی، فشاری، یا صفر) از ابتدا معلوم باشد، یک امتداد اصلی هم معین خواهد بود. در چنین حالتی برای تعیین تنش‌هایی که در صفحه قائم بر امتداد اصلی عمل می‌کنند، از دایره مور استفاده می‌شود. تنها شرط لازم آن است که محور قائم بر صفحه موردنظر یک امتداد اصلی باشد. کاربرد مهم رسم دایره مور، فراهم آوردن تصویری از تنش‌ها در هر صفحه‌ای است که نسبت به دستگاه مختصات اولیه $x-y$ چرخیده باشد. در این صفحات برای یافتن تنش قائم و برشی معادلات زیر را داریم:

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{۲} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{۲}\cos ۲\varphi + \tau_{xy}\sin ۲\varphi$$

$$\tau_\varphi = -\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{۲}\sin ۲\varphi + \tau_{xy}\cos ۲\varphi$$

که با مرتب کردن، مجذور و جمع کردن معادله‌های فوق به معادله دایره می‌رسیم. بنابراین دایره مور، دایره‌ای به مختصات σ_φ و τ_φ است که شعاع آن برابر τ_{max} و مرکز آن به فاصله $\frac{\sigma_x + \sigma_y}{۲}$ از مبدا مختصات قرار دارد. در استفاده از دایره مور چند نکته مهم وجود دارد که باید توجه شود.

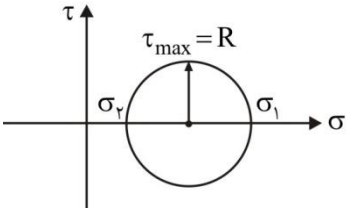
۱- تنش‌های قائم در امتداد محور طول‌ها رسم می‌شوند؛ تنش‌های کششی در جهت مثبت و تنش‌های فشاری در جهت منفی نشان داده می‌شوند.

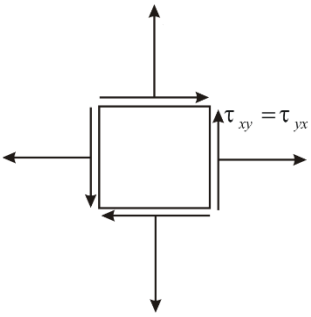
۲- تنش‌های برشی در امتداد محور عرض‌ها رسم می‌شوند. تنش برشی که سبب چرخش ساعتگرد جزء تنش می‌شود در جهت مثبت و تنشی که سبب چرخش پادساعتگرد چرخش می‌شود در جهت منفی رسم می‌شود.

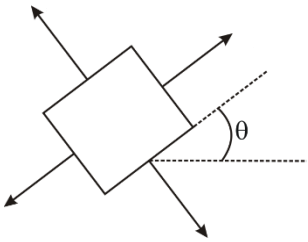
۳- زاویه‌های بین دو صفحه یا امتداد نشان داده شده روی دایره، دو برابر زاویه‌های نظیر روی صفحه فیزیکی حاوی چرخش هستند.

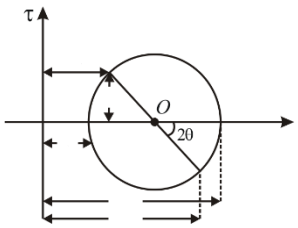
۴- هر نقطه روی دایره مور، مقدار و جهت تنش‌های برشی و عمودی واقع بر هر صفحه از یک المان فیزیکی را نشان می‌دهد.

۵- زاویه θ در روی المان فیزیکی به وسیله زاویه ۲θ در روی دایره مور نشان داده می‌شود.









مرکز دایره $\left|\begin{matrix}\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}\\ 0\end{matrix}\right.$

شعاع دایره $R=\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}=\tau_m$

τ_m ماکزیمم تنش برشی است.

$$\tan 2\theta=\frac{2\pi}{\sigma_x-\sigma_y}\quad,\quad \tau_{max}=\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}$$

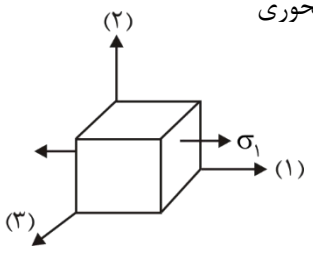
$$\tau_{max}=\pm\sqrt{(\sigma_x-\sigma_y)^2+4\tau^2}$$

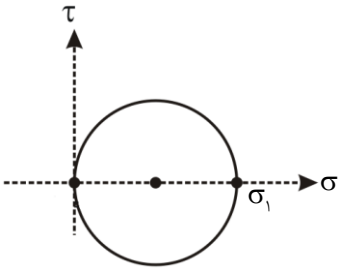
نکته: تنش برشی حداکثر نصف تنش نرمال است و تنش اصلی حداکثر خود تنش نرمال است $(\sigma_{max}=\sigma_x)$ و $\left(\tau_{max}=\frac{\sigma_x}{2}\right)$

نکته: پس در صفحه‌ای که تنش برشی اکسترمم است تنش نرمال میانگین تنش‌های اصلی است.

- حالت‌های خاص دایره مور

۱- کشش تک محوری



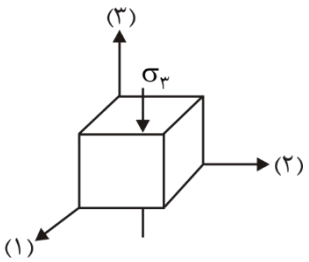


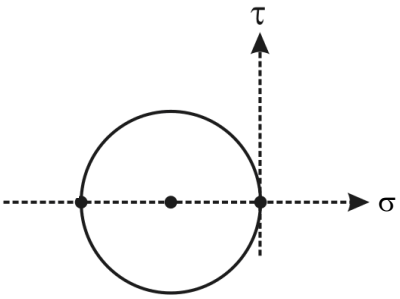
$\sigma_1>0$

$\sigma_2=\sigma_3=0$

$\tau_{max}=\frac{\sigma_1}{2}$

۲- فشار تک محوری





$\sigma_3<0$

$\sigma_1=\sigma_2=0$

$\tau_{max}=\frac{|\sigma_3|}{2}$

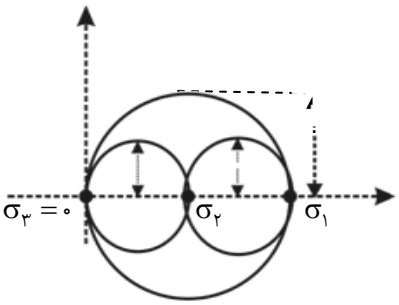
۳- کشش دو محوری

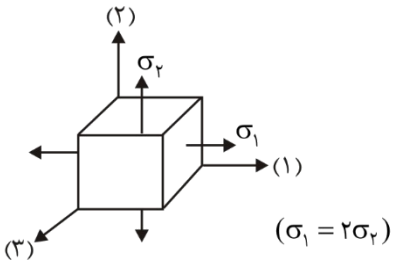
$$\tau_1 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_2}{2}$$

$$\tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1}{2}$$

$$\tau_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

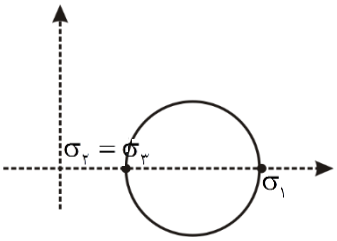
$$\tau_{max} = \frac{1}{2}\sigma_1 = \tau_2$$

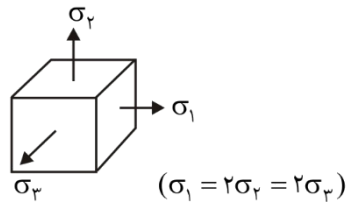




۴- کشش سه بعدی

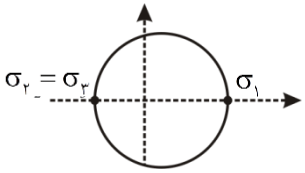
$$\tau_{max} = \tau_2 = \tau_3$$

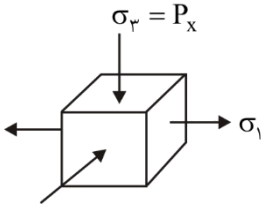




۵- کشش یک بعدی بعلاوه فشار دوبعدی (فشار هیدرواستاتیک دوبعدی)

$$\tau_{max} = \tau_2 = \tau_3 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$





نکته: در کشش هیدرواستاتیک (تنش‌هایی مساوی در سه بعد بر جسم وارد شوند) دایره مور به یک نقطه تبدیل می‌شود.

چرا که: $\frac{P_h - P_h}{2} = \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_{max} = 0$

نکته: تنش هیدرواستاتیک به طور مساوی در سه بعد بر جسم وارد می‌شود که فقط باعث تغییر حجم ماده شده و در تغییر شکل مومسان اثری ندارد. $(\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3})$

۱-۸- معیارهای تسلیم برای مواد فلزی

رفتار متفاوت جامدات در مقابل کشش بررسی شد، اما تمامی این بررسی‌ها برای یک بارگذاری کششی تک‌محوری است. قطعه‌ای که تحت بارگذاری چندمحوری قرار می‌گیرد در سطح تنش‌هایی متفاوت از تنش تسلیم در حالت تحت کشش تک‌محوری دچار تسلیم می‌شود. جهت تعیین امکان تسلیم شدن یا نشدن ماده در بارگذاری چند بعدی از این معیارها استفاده می‌شود.

- این معیارها فقط و فقط تسلیم شدن و یا نشدن نمونه تحت بارگذاری مورد نظر را پیش بینی می‌کنند.

معیارهای تسلیم در حالت چندمحوری غالبا تجربی هستند. نکته مهمی که در تمامی این معیارها رعایت شده این است که فشار جانبی هیدروستاتیک در هیچ شرایطی باعث ایجاد تسلیم نمی‌شود.

۱-۸-۱- معیار تسلیم ترسکا

ساده‌ترین نظریه شکست نظریه تنش برشی حداکثر می‌باشد. براساس این نظریه تسلیم در ماده وقتی رخ می‌دهد که تنش برشی حداکثر از مقدار تنش برشی در تنش کششی تک‌محوری بیشتر شود. این نظریه به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

τ_{max}: حداکثر تنش برشی

σ_3 و σ_1: به‌ترتیب بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین تنش‌های کشش اصلی

نکته: نظریه تنش نرمال حداکثر برای مواد ترد صادق است (رفتار نوع اول) در این حالت شکست در ماده وقتی رخ می‌دهد که حداکثر تنش کششی یا فشاری از استحکام کششی یا فشاری تک‌محوری بیشتر شود.

نکته: در بارگذاری تک‌محوری ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$)، استحکام تسلیم برشی برابر با نصف استحکام تسلیم در کشش است.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_0}{2}$$

نکته: در حالت برش خالص ($\sigma_1 = -\sigma_3 = k$) و $\sigma_2 = 0$ مقدار ماکزیمم تنش برشی پیش‌بینی می‌کند که تسلیم در حالتی رخ می‌دهد که $k = \frac{\sigma_y}{2}$.

نکته: به دلیل سادگی معیار، در بیشتر طراحی‌های مهندسی غیرپیچیده از این معیار استفاده می‌شود.

نکته: در صورتی که تنش میانی هم مقداری باشد که صرفنظر کردن از آن ممکن است محاسبات را دچار اشتباه کند که در این حالت به معیار سیستم فون ـ میزز می‌پردازیم.

۱-۸-۲- معیار تسلیم فون ـ میزز

معیار فون ـ میزز برمبنای بهتری با داده‌های آزمون واقعی تولید شده است. بنابر این نظریه، تسلیم وقتی رخ می‌دهد که انرژی واپیچشی در آزمون کشش که همراه با تغییرشکل است مساوی با انرژی واپیچشی در قطعه‌ای شود که تحت بارگذاری چندمحوری است (نکته اینکه در این تحلیل انرژی کشسان که همراه با تغییر حجم است منظور نشده است).

برای این حالت یک تنش معادل (σ_e) در نظر می‌گیریم و داریم:

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2}[(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{\frac{1}{2}}$$

که در این شرایط σ_1، σ_2 و σ_3 همان تنش‌های اصلی هستند.

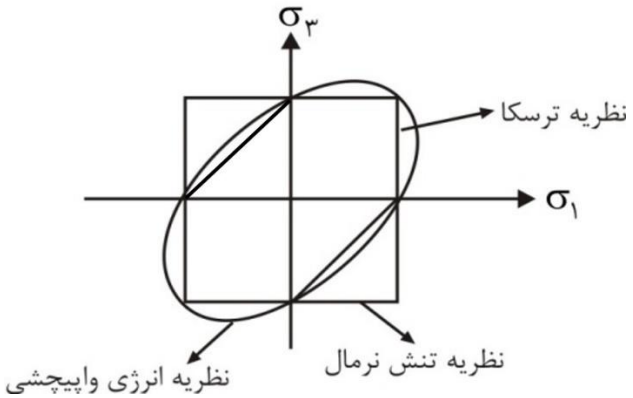
نکته: در صورتی که اشاره نشده باشد که تنش داده شده در صورت سوال، تنش‌های اصلی هستند، این فرض را انجام می‌دهیم.

اگر این تنش معادل با استحکام تسلیم کششی تک‌محوری برابر شود، تسلیم در بارگذاری چندمحوری اتفاق می‌افتد.

$$\sigma_y = \sigma_e$$

نکته: ارتباط بین تنش برشی خالص و تنش تسلیم تک‌محوری در نظریه فون ـ میزز به‌صورت $\sigma_y = \sqrt{3}k$ است.

نکته: محدوده شکست برای نظریه‌های تنش نرمال، تنش برشی و انرژی واپیچشی در نمودار برحسب تنش‌های اصلی در زیر ارائه شده است. شکست وقتی رخ می‌دهد که ترکیب تنش‌ها خارج از محدوده‌ای باشد که برای هر نظریه مشخص شده است.



نکته: براساس منحنی‌ها هر سه نظریه شرایط تسلیم یکسانی را برای بارگذاری تک‌محوری و بارگذاری دومحوری هم‌جهت (کشش ـ کشش یا فشار ـ فشار) پیش‌بینی می‌کنند.

نکته: بیشتری اختلاف بین نظریه‌ها در پیچیش خالص است که در این حالت پیش‌بینی فون میزز ۱۵/۵٪ بیشتر از نظریه ترسکا است.

نکته: از آنجایی که تنش تسلیم تک‌محوری عددی ثابت است، در این شرایط مشخص می‌شود که ترسکا معیار محافظه‌کار تری است.

نکته: در صورتی که در سوال نظریه مورد استفاده ذکر نشده بود، از معیار ترسکا استفاده می‌کنیم.

نکته: در صورتی که $\sigma_e = \sigma_y$ می‌گوییم در نقطه تسلیم هستیم، اگر $\sigma_e < \sigma_y$ باشد، در ناحیه الاستیک هستیم و در صورتی که $\sigma_e > \sigma_y$ باشد، ماده تسلیم شده است.

تست‌های کنکور فصل اول

مهندسی مواد ۸۰

۱- برای حالت تنشی $\sigma_3 = 0$ و $\sigma_2 = \frac{1}{2}\sigma_1$، نسبت استحکام تسلیم معیار ترسکا به استحکام تسلیم معیار فون- میزز چقدر است؟(مهندسی مواد - ۸۰)

۱) $\frac{1}{2}$ ۲) $\frac{\sqrt{3}}{2}$ ۳) $\frac{2}{\sqrt{3}}$ ۴) $\frac{2}{\sqrt{2}}$

۲- اگر مدول الاستیسیته یک فولاد تقریباً سه برابر مدول الاستیسیته آلومینیوم باشد تحت تأثیر یک نیروی کششی مساوی در منطقه الاستیک، سطح مقطع آلومینیوم باید چند برابر سطح مقطع فولاد باشد، تا یک کرنش مساوی حاصل شود؟(مهندسی مواد - ۸۰)

۱) ۶ ۲) ۴ ۳) ۳ ۴) ۱/۵

۳- اگر استحکام کششی فولادی ۸۴۰(MPa) و کل کرنش مهندسی در ماکزیمم نیرو در آزمایش کشش برابر با $e_t = 0/3$ باشد، مقدار کرنش مهندسی پلاستیک e_p ایجاد شده در این شرایط کدام است؟ $\left[E = 21\times10^4\,(MPa)\right]$ (مهندسی مواد - ۸۰)

۱) ۰/۲۶۶ ۲) ۰/۲۹۲ ۳) ۰/۲۹۶ ۴) ۰/۲۹۸

مهندسی مواد ۸۱

۴- یک قطعهٔ آلومینایی از داخل کوره ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد به داخل آب صفر درجه انداخته می‌شود، مقدار تنش حرارتی ایجاد شده در آن چند MPa می‌باشد؟(مدول الاستیسیته آلومینا ۴۰۰GPa و ضریب انبساط حرارتی را (8×10^{-6}) بر درجه سانتیگراد در نظر بگیرید.) (مهندسی مواد - ۸۱)

۱) ۱۶۰۰ ۲) ۲۰۰۰ ۳) ۲۴۰۰ ۴) ۳۲۰۰

۵- میله‌ای به طول L_0 در اثر فشار یک بعدی به طول $\frac{1}{2}L_0$ می‌رسد. کرنش طول حقیقی و مهندسی به ترتیب عبارتند از: (مهندسی مواد - ۸۱)

۱) $\ln\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{2}$ ۲) $\ln 2$ و $-\frac{1}{2}$ ۳) $\ln 2$ و -2 ۴) $\ln\frac{1}{2}$ و $-\frac{1}{2}$

۶- در کدامیک از حالات تنشی زیر، معیارهای تسلیم وان میزز و ترسکا شرایط تسلیم یکسانی را پیش‌بینی نمی‌کنند؟ (مهندسی مواد - ۸۱)

۱) $\sigma_3 = 0$ و $\sigma_1 > \sigma_2 > 0$ ۲) $\sigma_3 = 0$ و $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$

۳) $\sigma_1 = 0$ و $\sigma_2 = \sigma_3 < 0$ ۴) $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ و $\sigma_1 > 0$

۷- رابطه بین تنش حقیقی σ و تنش مهندسی S، یعنی $\sigma = S(1+e)$ که e در آن کرنش مهندسی است، در ناحیه ..... صادق است. (مهندسی مواد - ۸۱)

۱) پلاستیک ۲) الاستیک

۳) الاستیک و پلاستیک ۴) پلاستیک و در محدوده تنش تسلیم و تنش ماکزیمم

۸- پدیده گلویی شدن در آزمایش کشش، وقتی رخ می‌دهد که : (مهندسی مواد - ۸۱)

۱) $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} > \sigma$ ۲) $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma$ ۳) $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} < \sigma$ ۴) $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$

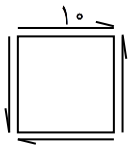
۹- قطعهای تحت آزمایش کشش پس از تسلیم وارد منطقه پلاستیک شده و سپس تحت تنش فشاری تا ناحیه پلاستیک قرار گرفته است. آزمایش فوق نشان می‌دهد که نقطه تسلیم در حالت فشار، کمتر از نقطه تسلیم در قسمت اول می‌باشد. کدام گزینه بیانگر این پدیده معروف است؟(مهندسی مواد - ۸۱)

۱) اتمسفر کاترل (Costrel atmosphere)
۲) اثر پیرکرنشی (Strain aging)
۳) اثر باوشینگر (Bauschinger effect)
۴) اثر کرنش نرمی (Strain softening)

۱۰- رابطه بین تنش و کرنش مادهای از رابطه $\sigma = ۲۴۰\varepsilon^{۰/۵}$ (MPa) پیروی می‌کند. کار انجام شده بر واحد حجم در این ماده تا نقطه گلویی شدن چند MPa است؟(مهندسی مواد - ۸۱)

۱) ۱۶۹/۷ ۲) ۵۶/۵ ۳) ۱۶/۹ ۴) ۱۰/۷

۱۱- با توجه به شکل زیر در سیستم دوبعدی، تنشهای اصلی چه مقدار می‌باشند؟(مهندسی مواد - ۸۱)



۱) ۱۰- و ۱۰
۲) ۲۰- و ۲۰
۳) ۱۰- و ۱۰-
۴) ۲۰- و ۲۰-

مهندسی مواد ۸۲

۱۲- استحکام تسلیم مادهای ۱۰۰۰MPa و استحکام کششی آن ۱۲۰۰MPa است. اگر مدول الاستیک ماده ۲۰۰GPa باشد، میزان کرنش الاستیک ماده در نقطه ناپایداری چقدر است؟ (مهندسی مواد - ۸۲)

۱) ۰/۰۰۱ ۲) ۰/۰۰۲ ۳) ۰/۰۰۵ ۴) ۰/۰۰۶

مهندسی مواد ۸۳

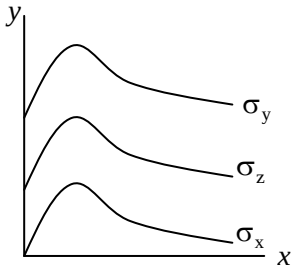
۱۳- سرعت بارگذاری (نرخ کرنش) بر کدام خاصیت ماده تأثیر کمتری دارد؟ (مهندسی مواد - ۸۳)

۱) شکلپذیری ۲) استحکام نهایی ۳) مدول یانگ (E) ۴) استحکام تسلیم

۱۴- مدول الاستیک یک تک کریستال سرامیکی در جهت <۱۰۰> برابر $۰/۹\times۱۰^{۱۱}$ (Pa) میباشد. مدول الاستیک این بلور در جهت <۰۱۰> برابر است با: (مهندسی مواد - ۸۳)

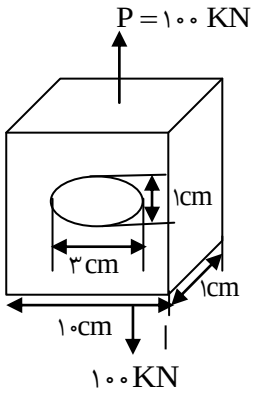
۱) $۰/۶۱\times۱۰^{۱۱}$ (Pa) ۲) $۱/۲۳\times۱۰^{۱۱}$ (Pa) ۳) $۰/۳\times۱۰^{۱۱}$ (Pa) ۴) $۰/۹\times۱۰^{۱۱}$ (Pa)

۱۵- وضعیت تغییرات تنش در نوک یک ترک به صورت نمودار زیر نشان داده شده است. کدام گزینه صحیح است؟



۱) کرنش دو بعدی (Plane Strain) با تغییر شکل پلاستیک در نوک ترک
۲) تنش دو بعدی (Plane Stress) با تغییر شکل الاستیک در جهت سه محور
۳) کرنش سه بعدی
۴) تنش دو بعدی (Plane Stress) با تغییر شکل پلاستیک در نوک ترک

۱۶- نمونه‌ای طبق شکل زیر تحت تنش قرار می‌گیرد. حداکثر تنش ایجاد شده در نمونه برابر است با:
(مهندسی مواد - ۸۳)



۱) ۳۰۰MPa
۲) ۴۰۰MPa
۳) ۷۰۰MPa
۴) ۱۰۰۰MPa

۱۷- طراحی یک قطعه فولاد زنگ نزن ۳۱۶ برای کاربرد در $۸۵۰^{\circ}C$ بر مبنای یک درصد کرنش در هزار ساعت و ضریب اطمینان ۳ انجام شده است. در صورتی که رابطه ذیل بین تنش اعمالی و نرخ کرنش در این دما وجود داشته باشد، تنش مجاز برای این قطعه چقدر است؟ $(\sigma = ۱۰^{۶}\dot{\varepsilon}^{\circ} + ۱۱۰ \ , \ \sigma = MPa, \dot{\varepsilon}^{\circ} = h^{-۱})$ (مهندسی مواد-۸۳)

۱) $\sigma = ۷۱۰MPa$
۲) $\sigma = ۳۶۰MPa$
۳) $\sigma = ۲۷۰MPa$
۴) $\sigma = ۴۰MPa$

۱۸- فولاد کم کربن دارای $E = ۲۱۰GPa$ میباشد. اگر میله‌ای از این فولاد تا حد الاستیک (۵۰۰MPa) بارگذاری شود، میزان انرژی کرنش ذخیره شده برابر است با: (مهندسی مواد - ۸۳)

۱) $۰/۵۹۵\frac{kj}{m^{۳}}$
۲) $۱/۱۹\frac{kj}{m^{۳}}$
۳) $۵۹۵\frac{kj}{m^{۳}}$
۴) $۱۱۹۰\frac{kj}{m^{۳}}$

۱۹- منحنی تنش - کرنش مادهای از رابطه $\sigma(MPa) = ۱۶۰ + ۵۶۲(\varepsilon)^{۰/۵}$ پیروی میکند. اگر نمونهای از این ماده با سرعت کرنش $۱۰^{-۴}\left(\frac{۱}{sec}\right)$ کشیده شود زمان لازم جهت شروع گلویی شدن (Necking) برابر است با: (مهندسی مواد - ۸۳)

۱) ۲۵۰sec
۲) ۵۰۰sec
۳) ۲۵۰۰sec
۴) ۵۰۰۰sec

➢ مهندسی مواد ۸۴

۲۰- ضریب الاستیک حساسیت زیادی به ریز ساختار ماده ندارد، زیرا این خاصیت: (مهندسی مواد - ۸۴)

۱) بیشتر تابع دماست.
۲) تابع اندازه دانههاست.
۳) تابع نیروهای پیوند اتمی است.
۴) تابع درجه همسان گردی ماده است.

۲۱- معادله تنش - کرنش یک نمونه آلومینیومی چند بلوری به صورت $\sigma = ۲۵ + ۲۰۰\varepsilon^{۰/۵}$ است. انرژی تغییر شکل در واحد حجم بهنگام تغییر شکل تا کرنش یکنواخت یک چقدر است؟ (مهندسی مواد - ۸۴)

۱) $۱/۱۲\times۱۰^{۸}\frac{J}{m^{۳}}$
۲) $۱/۵۸\times۱۰^{۸}\frac{J}{m^{۳}}$
۳) $۲/۲۵\times۱۰^{۸}\frac{J}{m^{۳}}$
۴) $۳/۱۶\times۱۰^{۸}\frac{J}{m^{۳}}$

۲۲- فولاد کم کربنی تا حد الاستیک آن یعنی ۵۰۰MPa بارگذاری میشود. میزان انرژی الاستیک ذخیره شده برابر است با: $(E = ۲۱۰GPa)$ (مهندسی مواد - ۸۴)

۱) $۲۹۷/۵\frac{KJ}{m^{۳}}$
۲) $۵۹۵\frac{KJ}{m^{۳}}$
۳) $۱۱۹۰\frac{KJ}{m^{۳}}$
۴) $۱۴۹۰\frac{KJ}{m^{۳}}$