

به نام خداوند بخشنده مهربان



# خواص مکانیکی مواد

مجموعه:

مهندسی متالورژی و مواد

مؤلفان:

کیانوش طاهرخانی

فاطمه مسین زاده



آمادگی آزمون دکتری

طاهرخانی، کیانوش ۱۳۶۵

خواص مکانیکی مواد

مشاوران صعود ماهان، ۱۴۰۱ - کیانوش طاهرخانی - فاطمه حسینزاده (۱۳۶۶)

۲۲۹ صفحه

براساس کتاب خواص مکانیکی مواد آمادگی آزمون دکتری مهندسی متالورژی و مواد

ISBN:978-600-458- 667-2

فهرستنویسی بر اساس اطلاعات فیپا.

فارسی و لاتین - چاپ اول

۱- خواص مکانیکی مواد

۲- آزمون دوره‌های تحصیلات تکمیلی

کیانوش طاهرخانی - فاطمه حسینزاده

ج - عنوان

کتابخانه ملی ایران ۳۸۰۲۰۶۳

۲- آزمونها و تمرینها

۴- دانشگاهها و مدارس عالی - ایران - آزمونها

انتشارات مشاوران صعود ماهان



- نام کتاب: ..... خواص مکانیکی مواد
- مدیران مسئول: ..... مجید و هادی سیاری
- مولفان: ..... کیانوش طاهرخانی - فاطمه حسینزاده
- مدیر برنامه‌ریزی و تولید محتوا: ..... سمیه بیگی
- ناشر: ..... مشاوران صعود ماهان
- نوبت و تاریخ چاپ: ..... چاپ اول / ۱۴۰۱
- تیراژ: ..... ۱۰۰۰ نسخه
- قیمت: ..... ۲/۴۹۰/۰۰۰ ریال
- شابک: ..... ISBN ۹۷۸-۶۰۰-۴۵۸-۶۶۷-۲

انتشارات مشاوران صعود ماهان: تهران - خیابان ولیعصر، بالاتر از تقاطع ولیعصر مطهری، پلاک ۲۰۵۰

تلفن: ۸۸۱۰۰۱۱۳ و ۸۴۰۱۳۱۳

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به موسسه آموزش عالی آزاد ماهان می‌باشد. و هرگونه اقتباس و

کپی‌برداری از این اثر بدون اخذ مجوز پیگرد قانونی دارد.

برنام تو

ایمان داریم که هر تغییر و تحول بزرگی در مسیر زندگی بدون تحول معرفت و نگرش میسر نخواهد بود. پس بیایید با اندیشه توکل، تفکر، تلاش و تحمل در توسعه دنیای فکریمان برای نیل به آرامش و آسایش توأمان اولین گام را برداریم. چون همگی یقین داریم دانایی، توانایی می آورد.

**شاید باشید و دلی را شاد کنید.**

**برادران سیاری**

**۳۹**

---

## مقدمه مؤلف

---

در سال‌های اخیر به دلیل گرایش فراوان دانشجویان رشته مهندسی مواد برای ورود به دوره تحصیلات تکمیلی و رقابت فشرده آنها در آزمون‌های دکتری، نیاز به منبعی که داری پاسخ کاملاً تشریحی، صحیح و به دور از اشکالات علمی تست‌های کنکور را دارا باشد، کاملاً احساس می‌شود. کتاب حاضر شامل درس نامه، تست‌های طبقه‌بندی شده مربوط به هر فصل، تست‌های دسته‌بندی شده و شامل آزمون‌های دکتری سال‌های ۹۱ تا ۹۳ همراه با پاسخ تشریحی کامل می‌باشد.

جای دارد از همه اساتید بزرگوار دانشگاه‌های مختلف کشور در زمینه مهندسی مواد و متالورژی به ویژه اساتید دانشکده مهندسی مواد و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر و علم و صنعت ایران کمال تشکر را داشته باشیم.

همواره بر این باوریم که اثرمان عاری از ایراد نیست. بنابراین صمیمانه از اساتید محترم، همکاران گرامی دانشگاهی و دانشجویان عزیز در خواست می‌شود هر گونه تصحیح، پیشنهاد، انتقاد و نظر خود را در خصوص مطالب این کتاب یادآور شده که مزید تشکر و امتنان خواهد بود.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزمان

آنان که از فواسته هایشان گذشتند،

سختی‌ها را به جان خریدند

و خود را سپر بلای مشکلات و ناملايمات کردند

کیانوش طاهرخانی

فاطمه حسین زاده

# فهرست مطالب

## خواص مکانیکی مواد

### فصل اول: مبانی مکانیکی تنش و کرنش ..... ۱۳

- ۱-۱) مفاهیم تنش و کرنش ..... ۱۵
- ۱-۲) حالت‌های اعمال تنش ..... ۱۶
- ۱-۳) دایره مور ..... ۱۷
- ۱-۴) رابطه تنش و کرنش در تغییر شکل الاستیک ..... ۱۸
- ۱-۵) معیارهای تسلیم مواد ..... ۱۸
- ۱-۵-۱) معیار ترسکا (تنش برشی ماکزیمم) ..... ۱۸
- ۱-۵-۲) معیار فون مایزر (انرژی اعوجاجی) ..... ۱۸

### فصل دوم: آزمایش‌های مکانیکی ..... صفحه

- ۱-۲) آزمایش کشش تک‌محوری ..... ۲۱
- ۲-۱-۱) منحنی تنش - کرنش ..... ۲۲
- ۲-۱-۲) منحنی تنش - کرنش الاستیک - پلاستیکی یکنواخت ..... ۲۲
- ۲-۱-۳) منحنی تنش - کرنش الاستیک - پلاستیکی غیریکنواخت ..... ۲۶
- ۲-۱-۴) منحنی تنش - کرنش الاستیک - پلاستیکی غیریکنواخت - پلاستیکی یکنواخت ..... ۲۷
- ۲-۱-۵) منحنی تنش - کرنش الاستیک - پلاستیکی غیریکنواخت - پلاستیکی یکنواخت ..... ۲۷
- ۲-۱-۶) قابلیت ارتجاعی یا فنریت ..... ۲۸
- ۲-۱-۷) چقرمگی ..... ۲۸
- ۲-۱-۸) عوامل مؤثر بر منحنی تنش - کرنش ..... ۲۹
- ۲-۲) آزمایش فشار ..... ۳۱
- ۲-۳) آزمایش سختی ..... ۳۱
- ۲-۳-۱) خط انداختن یا ایجاد خراش ..... ۳۱
- ۲-۲-۲) برگشت دینامیکی یا واجهشی ..... ۳۱
- ۲-۳-۳) روش‌های نفوذی ..... ۳۱
- ۲-۴) آزمایش ضربه ..... ۳۳
- تست‌های طبقه‌بندی شده فصل اول و دوم ..... ۳۵
- پاسخ تشریحی تست‌های طبقه‌بندی شده فصل اول و دوم ..... ۴۴

### فصل سوم: نابه‌جایی‌ها ..... صفحه

- ۱-۳) استحکام یک کرسیتال بدون نقص ..... ۵۴
- ۲-۳) انواع عیوب موجود در شبکه‌های کریستالی ..... ۵۴
- ۱-۲-۳) عیوب نقطه‌ای ..... ۵۴
- ۲-۲-۳) عیوب خطی ..... ۵۵

.....	۳-۲-۳	عیوب سطحی	۵۵
.....	۳-۳	نابجایی و انواع آن	۵۵
.....	۱-۳-۳	بردار برگرز	۵۷
.....	۴-۳	عبور نابجایی از موانع	۵۸
.....	۱-۴-۳	صعود نابجایی‌های لبه‌ای	۵۸
.....	۲-۴-۳	لغزش متقاطع	۵۹
.....	۵-۳	نابجایی در شبکه‌های کریستالی مختلف	۵۹
.....	۱-۵-۳	نابجایی‌ها در شبکه FCC	۶۰
.....	۲-۵-۳	نابجایی‌ها در شبکه BCC	۶۲
.....	۳-۵-۳	نابجایی‌ها در شبکه HCP	۶۲
.....	۶-۳	برخورد نابجایی‌ها	۶۳
.....	۱-۶-۳	برخورد دو نابجایی لبه‌ای با بردارهای برگرز عمود بر هم	۶۳
.....	۲-۶-۳	برخورد دو نابجایی لبه‌ای با بردارهای برگرز موازی باهم	۶۴
.....	۳-۶-۳	برخورد یک نابجایی پیچی و یک نابجایی لبه‌ای	۶۴
.....	۴-۶-۳	برخورد دو نابجایی پیچی با همدیگر	۶۴
.....	۷-۳	دانسیته برخورد نابجایی‌ها	۶۶

#### فصل چهارم: مکانیزم‌های تغییر فرم پلاستیک ..... صفحه

.....	۱-۴	لغزش	۶۹
.....	۳-۴	مؤلفه تنش برشی بحرانی	۷۰
.....	۴-۴	سیستم‌های لغزشی در ساختارهای کریستالی	۷۱
.....	۱-۴-۴	سیستم‌های لغزشی در مواد FCC	۷۱
.....	۲-۴-۴	سیستم‌های لغزشی در مواد HCP	۷۲
.....	۳-۴-۴	سیستم‌های لغزشی در مواد BCC	۷۲
.....	۵-۴	منحنی تنش برشی- کرنش برشی تک کریستال‌ها	۷۲
.....	۶-۴	مکانیزم‌های کرنشی سختی یا کار سختی تک کریستال‌ها	۷۲
.....	۷-۴	اثر باوشینگر	۷۳
.....	۸-۴	تغییر فرم پلاستیک با دوقلویی شدن	۷۴
.....	۹-۴	اختلاف بین لغزش و دوقلویی شدن	۷۵
.....		تست‌های طبقه‌بندی‌شده فصل سوم و چهارم	۷۶
.....		پاسخ تشریحی تست‌های طبقه‌بندی‌شده فصل سوم و چهارم	۹۲

#### فصل پنجم: مکانیزم‌های استحکام دهی ..... صفحه

.....	۱-۵	مقاوم کردن در اثر ریز کردن اندازه دانه‌ها	۱۰۷
.....	۲-۵	کرنش سختی یا کار سختی	۱۰۸
.....	۳-۵	پیر کرنشی	۱۰۹
.....	۴-۵	مقاوم کردن با تشکیل محلول جامد	۱۱۰
.....	۵-۵	مقاوم کردن به وسیله ذرات ریز	۱۱۱
.....	۱-۵-۵	رسوب سختی	۱۱۲

۱۱۲	۲-۵-۵) پراکنده سختی.....
۱۱۳	۶-۵) مقاوم کردن با افزودن الیاف.....
۱۱۳	۷-۵) افزایش استحکام با عملیات حرارتی سخت کردن.....
۱۱۴	۱-۷-۵) مشخصات استحاله مارتنزیتی.....
۱۱۵	تست های طبقه بندی شده فصل پنجم.....
۱۱۹	پاسخ تشریحی تست های طبقه بندی شده فصل پنجم.....

## فصل ششم: شکست (Fracture)..... صفحه

۱۲۳	۱-۶) شکست و انواع آن.....
۱۲۳	۱-۱-۶) شکست.....
۱۲۳	۲-۱-۶) تعریف انواع شکست.....
۱۲۵	۲-۶) استحکام پیوستگی تئوری فلزات.....
۱۲۸	۳-۶) تئوری شکست ترد گریفیث شکست.....
۱۲۹	۴-۶) اوروان (Orowan).....
۱۳۰	۵-۶) تمرکز تنش و ضریب تمرکز تنش.....
۱۳۰	۶-۶) ضریب تمرکز تنش.....
۱۳۱	۷-۶) عوامل خارجی مؤثر بر شکست.....
۱۳۱	۸-۶) ضریب شدت تنش (Stress intensity factor).....
۱۳۱	۹-۶) انواع ترک ها را از نظر بارگذاری می توان به سه دسته تقسیم نمود.....
۱۳۲	۱۰-۶) رابطه بین ضریب شدت تنش و انرژی.....
۱۳۲	۱۱-۶) اندازه منطقه پلاستیک نوک ترک.....
۱۳۲	۱۲-۶) فاکتور شدت تنش مؤثر.....

## فصل هفتم: خستگی فلزات (Fatigue)..... صفحه

۱۳۵	مقدمه.....
۱۳۵	۱-۷) مشخصات شکست خستگی.....
۱۳۵	۱-۱-۷) سه عامل لازم و مهم برای ایجاد شکست خستگی عبارتند از.....
۱۳۶	۲-۷) سیکل های تنشی.....
۱۳۶	۳-۷) منحنی خستگی S-N یا منحنی Wohler.....
۱۳۷	۴-۷) انواع خستگی.....
۱۳۷	۵-۷) مراحل خستگی.....
۱۳۸	۶-۷) عوامل مؤثر بر جوانه زنی ترک خستگی عبارتند از.....
۳۸	۷-۷) مقطع شکست خستگی.....
۱۳۸	۸-۷) مکانیک رشد ترک خستگی.....
۱۴۱	۹-۷) عوامل مؤثر روی عمر یا استحکام خستگی.....
۱۴۳	۱۰-۷) نقشه های Master Diagram.....
۱۴۴	۱۱-۷) حساسیت به فاق یا شیار در خستگی.....
۱۴۴	۱۲-۷) اثر اندازه دانه بر خستگی.....



۱۴۵.....	۱۳-۷) اثرات تغییرات دامنه تنش بر خستگی (خسارت خستگی)
۱۴۵.....	۱۴-۷) وابستگی خواص خستگی به ساختار
۱۴۵.....	۱۵-۷) اثر انرژی خطای انباشتگی بر خستگی

### فصل هشتم: خزش (Creep) ..... صفحه

۱۴۷.....	۱-۸- تعریف خزش
۱۴۷.....	۲-۸- عوامل مؤثر بر کاهش استحکام ناشی از افزایش دما
۱۴۸.....	۳-۸- منحنی خزش
۱۴۹.....	۴-۸- تئوری آندرد
۱۵۰.....	۵-۸- آزمایش گسیختگی از ناشی از تنش
۱۵۰.....	۶-۸- تغییرات ساختاری حین خزش
۱۵۱.....	۷-۸- انرژی فعال سازی خزش در مرحله دوم (خزش پایدار)
۱۵۲.....	۸-۸- اثر برخی از متغیرهای متالورژیکی بر خزش
۱۵۲.....	۱-۸-۸- اندازه دانه
۱۵۳.....	۲-۸-۸- ترکیب شیمیایی
۱۵۳.....	۳-۸-۸- کار مکانیکی
۱۵۳.....	۴-۸-۸- عناصر آلیاژی
۱۵۳.....	۵-۸-۸- بازبایی و تبلور مجدد
۱۵۴.....	۹-۸- پیش بینی عمر خزشی
۱۵۵.....	۱۰-۸- رهایی تنش
۱۵۶.....	تست های طبقه بندی شده ششم، هفتم و هشتم
۱۶۶.....	پاسخ تست های طبقه بندی شده فصل ششم، هفتم و هشتم

### فصل نهم: مجموعه سوالات و آزمون های سراسری دکتری ..... صفحه

۱۷۳.....	مجموعه سوالات ۱
۱۷۶.....	پاسخ تشریحی مجموعه سوالات ۱
۱۷۸.....	مجموعه سوالات ۲
۱۸۲.....	پاسخ تشریحی مجموعه سوالات ۲
۱۸۵.....	مجموعه سوالات ۳
۱۸۹.....	پاسخ تشریحی مجموعه سوالات ۳
۱۹۲.....	مجموعه سوالات ۴
۱۹۶.....	پاسخ تشریحی مجموعه سوالات ۴
۱۹۹.....	مجموعه سوالات ۵
۲۰۳.....	پاسخ تشریحی مجموعه سوالات ۵
۲۰۷.....	مجموعه سوالات ۶
۲۱۲.....	پاسخ تشریحی مجموعه سوالات ۶
۲۱۴.....	سوالات خواص مکانیکی مواد دکتری سال ۱۳۹۱
۲۱۶.....	پاسخ تشریحی سوالات خواص مکانیکی مواد دکتری سال ۱۳۹۱

۲۱۸.....	سوالات خواص مکانیکی مواد دکتری سال ۱۳۹۲
۲۲۰.....	پاسخ تشریحی سوالات خواص مکانیکی مواد دکتری سال ۱۳۹۲
۲۲۲.....	سوالات خواص مکانیکی مواد دکتری سال ۱۳۹۳
۲۲۵.....	پاسخ تشریحی سوالات خواص مکانیکی مواد دکتری سال ۱۳۹۳
۲۲۹.....	منابع

# فصل اول

## مبانی مکانیکی تنش و کرنش

### آنچه در این فصل می‌خوانیم

- ✓ مفاهیم تنش و کرنش
- ✓ رابطه تنش و کرنش در تغییر شکل الاستیک
- ✓ معیارهای تسلیم مواد



### مبانی مکانیکی تنش و کرنش

#### ۱-۱) مفاهیم تنش و کرنش

تنش و کرنش دو مفهوم مکانیکی هستند که در قطعاتی که تحت تأثیر نیروهای داخلی و یا خارجی قرار دارند به وجود می‌آیند.

تنش به دو طریق محاسبه می‌گردد: مهندسی و حقیقی. تنش مهندسی را با  $S$  نشان می‌دهند که برابر است با نسبت نیرو به سطح مقطع اولیه ( $A_0$ ). در مقابل، تنش حقیقی برابر است با نسبت نیرو به سطح مقطع لحظه‌ای ( $A$ ) که آن را با  $\sigma$  نشان می‌دهند. از طرفی تنش ممکن است، عمودی یا برشی باشد. تنش عمودی در امتداد عمود بر سطح مقطع یا صفحه مورد نظر اعمال می‌شود و می‌تواند به صورت کششی و یا فشاری باشد. تنش برشی در صفحه موردنظر یا سطح مقطع اعمال می‌گردد که آن را با  $\tau$  نشان می‌دهند.

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

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

واحد تنش در سیستم بین‌المللی SI، نیوتن بر مترمربع ( $\frac{N}{m^2}$ ) است که به نام پاسکال (Pa) معروف می‌باشد و واحد

بزرگ‌تر  $\frac{N}{mm^2} = \frac{MN}{m^2}$  که برابر با  $10^6$  Pa است و آن را با مگاپاسکال (MPa) نشان می‌دهند. واحد دیگری نیز برای تنش

استفاده می‌شود که همان پوند بر اینچ مربع ( $\frac{lb}{in^2}$ ) می‌باشد که با psi نشان می‌دهند یا  $1000 \frac{lb}{in^2}$  که با ksi مشخص

می‌کنند. بین دو واحد تنش MPa و psi رابطه زیر برقرار است:

$$1 \text{ MPa} = 145 \text{ psi} \quad (3-1)$$

اگر یک میله‌ای به طول اولیه  $L_0$  تحت نیروی کششی  $F$  قرار گیرد با افزایش نیرو، طول آن بیشتر و سطح مقطع آن کوچکتر می‌شود. اگر مقدار افزایش طول  $\Delta L$  باشد، کرنش خطی متوسط مهندسی ( $e$ ) برابر است با نسبت افزایش طول به طول اولیه و چنانچه لگاریتم طبیعی طول ثانویه ( $L$ ) به طول اولیه محاسبه شود، کرنش حقیقی ( $\epsilon$ ) به دست می‌آید. کرنش یک مقدار بدون واحد است چون واحدهای صورت و مخرج یکسان است. کرنش‌های حقیقی طبق قرارداد با عدد و کرنش‌های مهندسی با درصد بیان می‌شود.



$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4-1)$$

$$\varepsilon = \text{Ln} \frac{L}{L_0} \quad (5-1)$$

بین کرنش مهندسی و حقیقی در تمامی تغییر شکل‌های الاستیک و پلاستیک و یا مجموع آن‌ها صادق است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon = \text{Ln}(1+e) \quad (6-1)$$

کرنش حقیقی یک کمیت جمع‌پذیر است. یعنی اگر جسمی در چند مرحله تغییر شکل یابد و کرنش‌های متفاوتی در هر مرحله به آن اعمال شود، کرنش حقیقی نهایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \dots = \text{Ln} \frac{L_2}{L_1} + \text{Ln} \frac{L_3}{L_2} + \text{Ln} \frac{L_4}{L_3} + \dots \quad (7-1)$$

این مطلب در مورد کرنش‌های مهندسی صادق نیست.

کمیت کاهش سطح مقطع ( $r$ ) یا کرنش سطحی از شاخص‌های فرم‌پذیری و انعطاف‌پذیری ماده است که هر چه بیشتر باشد ماده فرم‌پذیرتر است. این کمیت غیر جمع‌پذیر است و معمولاً برحسب درصد بیان می‌شود.  $r$  به صورت زیر بیان می‌شود، که در آن  $A_0$  سطح مقطع اولیه و  $A$  سطح مقطع نهایی است.

$$(8-1)$$

$$r = \frac{A_0 - A}{A_0} = 1 - \frac{A}{A_0}$$

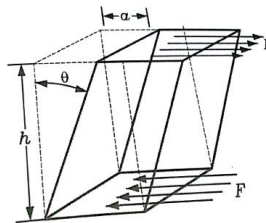
ارتباط بین پارامترهای کرنش حقیقی و مهندسی و کرنش سطحی با روابط زیر بیان می‌گردد:

$$r = \frac{e}{1+e} \quad (9-1)$$

$$\varepsilon = \text{Ln} \frac{1}{1-r} \quad (10-1)$$

در اثر اعمال نیروی برشی، اجسام دچار کرنش برشی می‌شوند. تغییری که در زاویه نسبت به حالت قائمه آن وجود دارد کرنش برشی نامیده می‌شود و از رابطه زیر بدست می‌آید که در آن  $a$  مقدار جابجایی و  $h$  فاصله بین صفحات است (شکل ۱-۱).

$$\gamma = \frac{a}{h} = \tan \theta \approx \theta \quad (11-1)$$

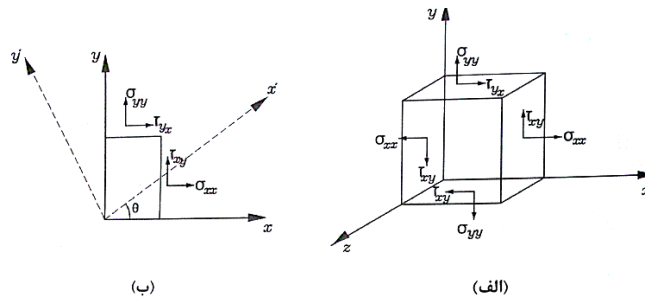


شکل (۱-۱) ایجاد کرنش برشی در اثر اعمال نیروی برشی



۲-۱) حالت‌های اعمال تنش

تنش می‌تواند در یک نقطه و یا در شرایط دو بعدی (تنش صفحه‌ای) اعمال شود. شکل (۲-۱) مؤلفه‌های عمودی و برشی تنش اعمالی در یک نقطه و در صفحاتی که با محورهای X و Y و زاویه  $\theta$  دارند نشان می‌دهد.  $\sigma_{xx}$  یا  $\sigma_x$  تنش عمودی در صفحه X و در جهت X می‌باشد. چون این تنش در صفحه‌ای عمود بر جهت X اعمال می‌شود، پس عمودی است. طبق قرارداد، مقادیر تنش‌های عمودی را مثبت و مقادیر تنش‌های فشاری را منفی در نظر می‌گیرند. برای تنش‌های برشی از دو اندیس استفاده می‌شود. اندیس اول صفحه‌ای را مشخص می‌کند که تنش در آن اعمال می‌شود و اندیس دوم جهت اعمال تنش را تعیین می‌نماید. برای مثال،  $\tau_{yx}$  تنش برشی روی صفحه عمود بر محور Y و در جهت X می‌باشد. با توجه به اینکه در مکعب صفحات دوجه‌دو متناظر هستند بنابراین، حالت تنش دارای تنش مؤلفه است: سه مؤلفه عمودی:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  و سه مؤلفه برشی:  $\tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{xy}$  (در برخی منابع به جهت سهولت  $\sigma_{ii}$  به صورت  $\sigma_i$  نشان داده می‌شود).



شکل (۲-۱) الف- مؤلفه‌های تنش‌های اعمالی در یک نقطه. ب- مؤلفه‌های تنش اعمالی در صفحاتی که با محورهای X و Y زاویه  $\theta$  دارند.

با در نظر گرفتن حالت دوبعدی تنش (تنش صفحه‌ای) خیلی از مسائل آسان می‌شود. چنین حالتی وقتی به وجود می‌آید که یک بعد از قطعه نسبت به دو بعد دیگر خیلی کوچک باشد. در این حالت سیستم تنشی شامل دو تنش عمودی  $\sigma_x$  و  $\sigma_y$  و یک تنش برشی  $\tau_{xy}$  می‌باشد. برای بدست آوردن مقدار تنش‌ها در مختصات  $x'y'$  و صفحاتی مانند  $x'$  و  $y'$  که زاویه  $\theta$  با محورهای X و Y دارند از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\sigma_{x'x'} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos \theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (12-1)$$

$$\sigma_{y'y'} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} + \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \cos \theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (13-1)$$

$$\tau_{x'y'} = -\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (14-1)$$

برای هر حالت تنشی می‌توان یک سیستم مختصاتی را تعریف کرد که دارای محورهایی عمود به صفحاتی باشد که روی آن‌ها تنش‌های عمودی حداکثر وجود دارند، ولی تنش‌های برشی روی آن‌ها صفر است. این صفحات، صفحات اصلی نامیده می‌شوند و تنش‌های عمودی به این صفحات تنش‌های اصلی نامیده می‌شوند. در حالت تنش صفحه‌ای، دو تنش اصلی  $\sigma_{11}$  و  $\sigma_{22}$  وجود دارند که زاویه بین آن‌ها  $90^\circ$  می‌باشد. در حالت سه‌بعدی نیز سه تنش اصلی  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  وجود دارد. براساس قرارداد،  $\sigma_1$  بزرگ‌ترین تنش اصلی از نظر جبری می‌باشد و  $\sigma_3$  از نظر جبری کوچک‌ترین تنش اصلی است.

$$\sigma_{\max} = \sigma_{11} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \left[ \left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (15-1)$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_{22} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \left[ \left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16-1)$$

در زاویه  $45^\circ$  نسبت به جهت تنش‌های اصلی، بیشترین تنش برشی ایجاد می‌شود که مقدار آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma_{\max} = \left[ \left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17-1)$$

در این صورت رابطه‌های (۱۵-۱) و (۱۶-۱) به صورت زیر درمی‌آید:

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \tau_{\max} \quad (18-1)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \tau_{\max} \quad (19-1)$$

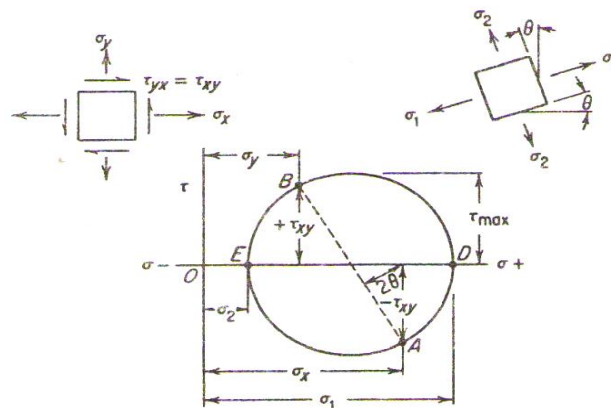
### ۳-۱) دایره مور

دایره مور وسیله‌ای گرافیکی و مهم برای مشخص کردن حالت تنش در یک نقطه روی صفحه‌ای که از آن می‌گذرد، می‌باشد. این دایره محاسبه تنش‌های اصلی و نیز مقدار تنش‌ها در دوران را آسان می‌کند. شکل (۳-۱) دایره مور برای حالت تنش صفحه‌ای را نشان می‌دهد که در آن  $O$ ،  $R$ ،  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\tau_{\max}$  به ترتیب مرکز دایره مور، شعاع دایره مور، بزرگ‌ترین تنش اصلی، کوچک‌ترین تنش اصلی و حداکثر تنش برشی است.

$$O = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \quad (20-1)$$

$$R = \left[ \left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21-1)$$

$$R = \tau_{\max} \quad (22-1)$$



شکل (۳-۱) دایره مور برای حالت تنش صفحه‌ای

$$\sigma_1 = O + R \quad (23-1)$$

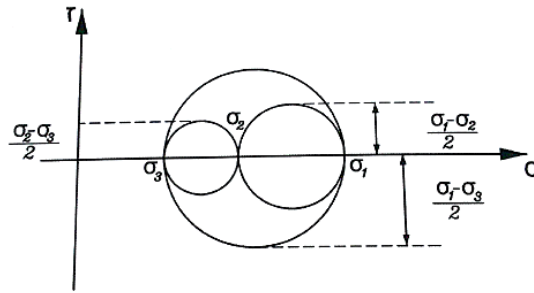
$$\sigma_2 = O - R \quad (24-1)$$

شکل (۴-۱) دایره‌های مور را برای حالت سه‌بعدی تنش نشان می‌دهد. این سه دایره با استفاده از سه تنش اصلی  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  و روابط  $\sigma_1 - \sigma_2$ ،  $\sigma_1 - \sigma_3$ ،  $\sigma_2 - \sigma_3$  و با شرط  $\sigma_3 \leq \sigma_2 \leq \sigma_1$  ترسیم شده‌اند. می‌توان نشان داد که تمام حالات تنشی ممکنه، درون منطقه هاشورزده و یا روی مرزهای آن قرار دارد. بزرگ‌ترین تنش برشی در صفحه ۳-۱ قرار دارد.



$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

(۲۵-۱)



شکل (۴-۱) دایره مور برای حالت سه‌بعدی تنش

### ۴-۱ رابطه تنش و کرنش در تغییر شکل الاستیک

در منطقه الاستیک یا کشسان، جسم جامد تا یک حد معین از نیرو پس از برطرف شدن نیروی خارجی، به ابعاد اولیه خود بازخواهد گشت و برگشت‌پذیر است. در این منطقه، روابط قانون هوک صادق است. قانون هوک بین ارتباط خطی بین تنش الاستیک و کرنش الاستیک است و ضریب تناسب آن‌ها مدول الاستیسیته است ( $E$ ). مدول ینگ جزء مشخصات ذاتی ماده می‌شود. نوع پیوندهای بین اتمی و دما پارامترهای مؤثر بر  $E$  می‌باشند. هر چه پیوند بین اتمی ضعیف‌تر باشد یا دمابالا باشد، مدول ینگ کاهش می‌یابد. عوامل خارجی مانند عملیات حرارتی یا کار مکانیکی تأثیری بر  $E$  ندارند.

$$\sigma_x = E \varepsilon_x \quad (۲۶-۱)$$

در اثر اعمال نیروی کششی و ایجاد کرنش کششی در جهت  $x$ ، در جهت‌های  $y$  و  $z$  نیز انقباض به وجود می‌آید. باتجربه مشخص شده است که کرنش عرضی جزء ثابتی از کرنش طولی می‌باشد. این مقدار ثابت، نسبت پواسون ( $\nu$ ) نامیده می‌شود. بنابراین:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_y = -\nu \varepsilon_x = -\nu \frac{\sigma_x}{E} \quad (۲۷-۱)$$

نسبت پواسون برای ماده کاملاً ایزوتروپ الاستیک برابر  $\nu = 0.25$  است ولی برای اغلب فلزات حدود  $\nu = 0.33$  می‌باشد.

در حالت سه‌بعدی نیز روابط زیر بین مؤلفه‌های تنش و کرنش برقرار است:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (۲۸-۱)$$

$$\sigma_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (۲۹-۱)$$

$$\sigma_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_y + \sigma_x)] \quad (۳۰-۱)$$

تنش‌های برشی اعمال نیز باعث ایجاد کرنش‌های برشی می‌شود:

(۳۱-۱)

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

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

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

در روابط بالا  $\tau$  و  $\gamma$  تنش و کرنش برشی و  $G$  مدول الاستیسیته برشی یا مدول صلبیت می‌باشد که از آزمایش پیچش بدست می‌آید. روابط مفید دیگری نیز از ادغام روابط بالا بدست می‌آید از جمله:



$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (32-1)$$

$$\sigma_x \sigma_y \sigma_z = \frac{E}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (33-1)$$

ثابت الاستیک دیگر، مدول الاستیسیته حجمی ( $K$ ) است. مدول حجمی عبارت است از نسبت فشار هیدرواستاتیک ( $P$ ) به تغییر حجم ایجاد شده:

$$K = \frac{\sigma_m}{\Delta} = \frac{-P}{\Delta} = \frac{1}{\beta} \quad (34-1)$$

که در آن  $\beta$  قابلیت تراکم،  $\Delta$  کرنش حجمی  $(\Delta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)$  و  $\sigma_m$  تنش هیدرواستاتیک ( $\sigma_m = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$ ) می‌باشد.

$$K = \frac{\sigma_m}{\Delta} = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (35-1)$$

#### ۵-۱) معیارهای تسلیم مواد

معیار تسلیم بیانگر شرایطی است که تغییر شکل از حالت الاستیک وارد منطقه پلاستیک خواهد شد. در حال حاضر بررسی‌های زیادی برای تعیین معیارهای تسلیم مواد صورت گرفته است و بر این اساس برای پیشگویی تسلیم در فلزات تغییر فرم پذیر دو معیار ترسکا و فون مایز، کاربرد بیشتری دارند.

##### ۱-۵-۱) معیار ترسکا (تنش برشی ماکزیمم)

این شرط بیان می‌کند که زمانی جسم به نقطه‌ی تسلیم می‌رسد که اختلاف میان حداکثر و حداقل تنش‌های اصلی ( $\sigma_1$  و  $\sigma_3$ ) به مقدار ثابتی معادل با دو برابر تنش برشی حداکثر برسد.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = K = 2\tau_{\max} \quad (36-1)$$

برای کشش تک محوری  $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$  و  $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_0$  داریم:

$$\tau_0 = \frac{\sigma_0}{2} \quad (\text{تنش تسلیم برشی})$$

برای حالت برش تنها ( $\sigma_1 = -\sigma_3 = K$  و  $\sigma_2 = 0$ ) داریم:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2K = \sigma_0$$

##### ۱-۵-۲) معیار فون مایز (انرژی اعوجاجی)

فون مایز پیش‌بینی کرد تسلیم در حالت زیر اتفاق می‌افتد ( $\sigma_0$  تنش تسلیم می‌باشد):

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (37-1)$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2} \quad (38-1)$$

## فصل دوم

### آزمایش‌های مکانیکی

آنچه در این فصل می‌فخوانیم

- ✓ آزمایش کشش
- ✓ آزمایش فشار
- ✓ آزمایش سختی
- ✓ آزمایش ضربه

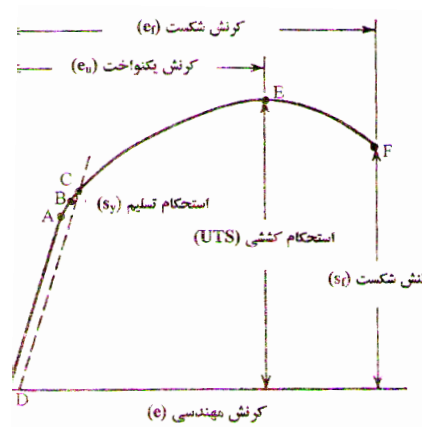


### آزمایش‌های مکانیکی

برای تعیین خواص مکانیکی و رفتار مواد در برابر نیروهای مختلف، نیاز به انجام آزمایش‌های مکانیکی مختلفی می‌باشد. اغلب این آزمایش‌ها به صورت استاندارد درآمده‌اند. در این فصل آزمایش‌های مکانیکی متداول نظیر و کشش، سختی و ضربه مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

#### ۱-۲) آزمایش کشش تک‌محوری

اطلاعات اساسی مهمی در خصوص خواص مکانیکی فلزات و آلیاژها از آزمایش کشش به دست می‌آید. در این آزمایش نمونه‌ای که با اندازه و شکل استاندارد تهیه می‌شود در دستگاه مخصوصی تحت نیروی کشش محوری قرار می‌گیرد تا اینکه نمونه بشکند، نمونه‌سازی (شکل هندسی و ابعاد نمونه)، طول اولیه نمونه، دما و سرعت کشش پارامترهای مؤثر بر آزمایش کشش محسوب می‌شوند. این آزمایش، مخرب بوده و به عنوان یک تست حجمی محسوب می‌شود. نیروی اعمالی و مقدار افزایش طول در فواصل زمانی معین در طی آزمایش به وسیله دستگاه ثبت می‌گردد و سپس با استفاده از فرمول‌های ذکر شده به تنش و کرنش تبدیل می‌شوند (شکل ۱-۲). این منحنی به طور کلی دارای سه منطقه می‌باشد: ناحیه خطی یا الاستیک، ناحیه تغییر شکل پلاستیک یکنواخت و ناحیه تغییر شکل غیریکنواخت.



شکل (۱-۲) منحنی شماتیک تنش - کرنش مهندسی



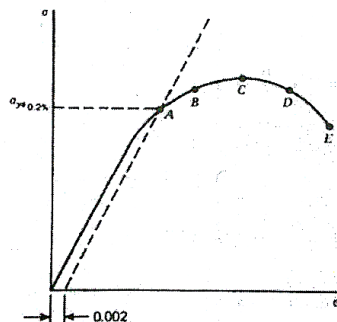
## ۲-۱-۱) منحنی تنش - کرنش

در ابتدا منحنی به صورت خطی بالا می‌رود و اگر نیرو برداشته شود، نمونه دوباره به حالت اولیه خود برمی‌گردد. به این قسمت از نمودار، منطقه الاستیکی یا کشسان خطی می‌گویند. شیب نمودار در این منطقه، مدول یانگ (E) نامیده می‌شود. همچنین در این ناحیه قانون هوک برقرار است. در منطقه الاستیک، تنش مهندسی و حقیقی باهم برابر هستند ( $\sigma = S$ ) بنابراین می‌توان نتیجه گرفت:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{و} \quad S = Ee \quad (2-2)$$

استحکام تسلیم ( $\sigma$ ) که در نقطه‌ی C در منحنی نشان داده شده است. تنشی است که در آن ماده شروع به تغییر شکل پلاستیک می‌کند. در طراحی مهندسی این استحکام، تنشی است که در آن مقدار کمی تغییر فرم پلاستیک معمولاً به اندازه ۰/۲ درصد یا ۰/۰۰۲ به وجود می‌آید. این کرنش پلاستیکی دائمی به اندازه OD می‌باشد. استحکام تسلیم از جمله مشخصات غیر ذاتی ماده است. مثلاً با عملیات حرارتی شدیداً تغییر می‌کند. مختصات این نقطه هم در معادلات الاستیک و هم در پلاستیک صادق است.

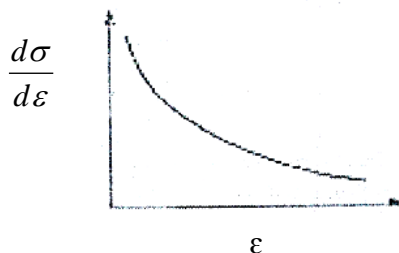
برای به دست آوردن تنش تسلیم قراردادی، روی منحنی تنش - کرنش یک خط با کرنش ۰/۰۰۲ به موازات قسمت خطی منحنی رسم می‌کنیم. محل تقاطع، تنش تسلیم ۰/۲٪ است (شکل ۲-۲).



شکل (۲-۲) روش به دست آوردن تنش تسلیم قراردادی ۰/۲٪

## ۲-۱-۲) منحنی تنش - کرنش الاستیک - پلاستیکی یکنواخت

با انجام تغییر فرم پلاستیک پس از نقطه C، ماده دچار کار سختی می‌شود و ماده نیاز به نیرو یا تنش بیشتر برای ادامه تغییر شکل پلاستیک دارد. در نتیجه استحکام آن افزایش می‌یابد. در ناحیه CE تغییر فرم پلاستیک یکنواخت است و در تمامی طول نمونه اتفاق می‌افتد و سطح مقطع لحظه به لحظه کوچک‌تر می‌شود ولی چون تأثیر کار سختی بیشتر است، استحکام بالاتر می‌رود. شیب منحنی در این ناحیه معرف نرخ کار سختی ( $\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ ) است. از آنجایی که شیب ناحیه سهمی شکل ثابت نیست در نتیجه نرخ کار سختی نیز ثابت نمی‌باشد، بلکه تابع کرنش می‌باشد. با افزایش کرنش نرخ کار سختی کاهش می‌یابد (شکل ۲-۳). هر چه نرخ کار سختی بیشتر باشد قابلیت شکل‌پذیری ماده کاسته می‌شود زیرا ادامه تغییر شکل به تدریج دشوارتر است.



شکل (۲-۳) منحنی شماتیک کرنش - نرخ کار سختی



در طی تغییر فرم الاستیک تغییرات کمی در حجم ماده اتفاق می‌افتد، طول نمونه مرتباً افزایش می‌یابد ولی سطح مقطع در ناحیه‌ی الاستیک تقریباً ثابت است. بنابراین در ناحیه‌ی الاستیک حجم ماده ثابت نمی‌باشد. هنگامی که ماده وارد ناحیه‌ی پلاستیک می‌شود تغییر در سطح مقطع آغاز می‌گردد ولی همواره یک قانون کلی در این ناحیه صادق است که:

$$A_0 L_0 = AL = \text{ثابت} \quad (2-2)$$

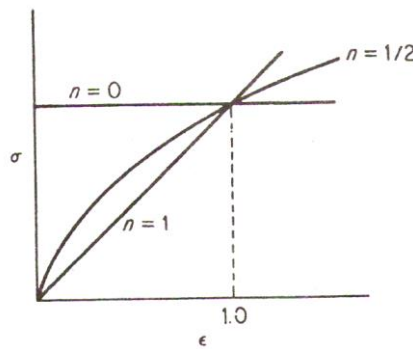
به قانون فوق‌الذکر "حجم ثابت" اطلاق می‌شود. بنابراین می‌توان رابطه‌ای بین تنش مهندسی و حقیقی در محدوده‌ی پلاستیک که حجم ثابت است بیان کرد:

$$\sigma = S(1+e) \quad (3-2)$$

منحنی در ناحیه‌ی پلاستیک یکنواخت به شکل مهمی مشاهده می‌شود که ناشی از حرکت غیرقابل برگشت نابجایی‌ها در مواد است. معادله ریاضی حاکم برای این ناحیه خطی نمی‌باشد و به رابطه هولومان معروف است:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (4-2)$$

$n$  توان کار سختی است و مقدار آن بین صفر تا یک می‌باشد.  $K$  ثابت ماده است که برابر تنش حقیقی در یک کرنش حقیقی  $\varepsilon = 1$  می‌باشد و به نام ضریب استحکام نامیده می‌شود و واحد  $K$  همان واحد تنش است. مقدار  $n$  به عملیات حرارتی و مکانیکی بستگی دارد. برای مواد در حالت آنیل شده این مقدار زیاد است و برای مواد کار سرد شده کمترین مقدار را دارد. به‌طور کلی  $n$  با کاهش استحکام و افزایش تحرک نابجایی‌ها افزایش می‌یابد. مقدار  $n$  تمایل ماده به کار سختی را نشان می‌دهد. هر چه این تمایل بیشتر باشد (مانند فولاد آنیل شده یا کم کربن ساده) این مقدار بیشتر است. شکل ۲-۴ منحنی تنش کرنش را برای سه مقدار مختلف  $n$  نشان می‌دهد.

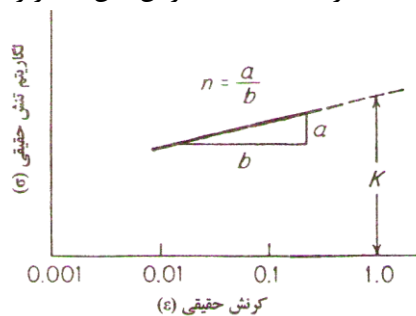


شکل (۴-۲) منحنی تنش - کرنش برای سه مقدار مختلف  $n$

اگر از رابطه هولومان، لگاریتم بگیریم خواهیم داشت:

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \quad (5-2)$$

مشاهده می‌شود با رسم نمودار لگاریتم  $\sigma$  برحسب لگاریتم  $\varepsilon$  (شکل ۲-۵) می‌توان یک خط داشت که شیب آن مقدار  $n$  را مشخص می‌نماید. اگر معادله هولومان کاملاً درست باشد باید همواره یک خط راست در این نمودار داشته باشیم. ولی چون این رابطه تجربی است پس همواره به‌صورت یک خط راست نیست. بنابراین، این مقدار را در کرنش موردنظر محاسبه می‌کنند.



شکل (۵-۲) نمودار لگاریتم  $\sigma$  برحسب لگاریتم  $\varepsilon$



برای اصلاح رابطه هولومان، روابط دیگری نیز در این خصوص پیشنهاد شده‌اند مانند:

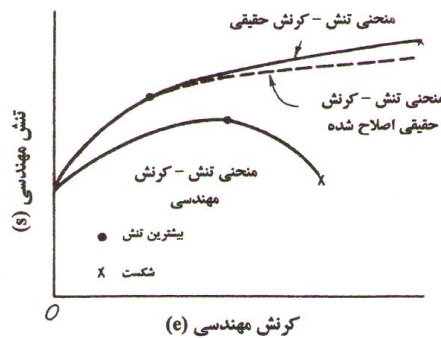
$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (۶-۲)$$

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (۷-۲)$$

$\sigma_0$  مقدار تنش تسلیم ماده می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که نرخ کار سختی  $(\frac{d\sigma}{d\varepsilon})$  برابر با توان کار سختی  $(n)$  نیست. در واقع ممکن است این پارامتر برحسب یک متغیر آزمایش به دو گونه متفاوت تغییر کند. رابطه‌ی بین این دو پارامتر به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = n \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (۸-۲)$$

منحنی‌های تنش - کرنش حقیقی و مهندسی در یک آزمایش کشش تفاوت‌های اساسی را نشان می‌دهند، در حالیکه منحنی مهندسی به یک بار حداکثر می‌رسد و سپس تا شکست کم می‌شود، منحنی حقیقی به‌طور پیوسته تا شکست افزایش می‌یابد (شکل ۶-۲). منحنی تنش - کرنش مهندسی نشان‌دهنده‌ی واقعی مشخصات تغییر فرم فلزات نیست زیرا بر اساس ابعاد اولیه نمونه می‌باشد و این ابعاد مرتباً در طی آزمایش تغییر می‌کند. در محاسبات مهندسی پس از عبور از نقطه استحکام نهایی، چون سطح مقطع شدیداً کاهش می‌یابد. بنابراین نیروی لازم برای تغییر فرم نیز کاهش پیدا می‌کند و چون این نیرو تقسیم بر سطح مقطع اولیه نمونه می‌گردد بنابراین پس از عبور از نقطه ماکزیمم، افت شدید تنش به وجود می‌آید اما در حقیقی همواره تنش در اثر کار سختی سیر صعودی دارد تا اینکه نمونه دچار شکست شود.



شکل (۶-۲) نمودار تنش - کرنش حقیقی و منحنی تنش - کرنش مهندسی

گلوبی شدن در حداکثر بار در طی تغییر فرم کششی یک ماده نرم اتفاق می‌افتد. بالاترین نقطه در نمودار تنش - کرنش مهندسی بیانگر  $F_{max}$  یا نقطه‌ی ناپایداری است. در یک ماده کاملاً پلاستیک ایده‌آل که در آن کار سختی صورت نمی‌گیرد. به محض تسلیم ماده، گلوبی شدن اتفاق می‌افتد. اما یک ماده واقعی تحت کرنش سختی قرار می‌گیرد و بنابراین قابلیت مقاومت در برابر تغییر فرم آن افزایش می‌یابد. این اثر با کاهش تدریجی سطح مقطع نمونه در اثر افزایش طول مقابله می‌شود. گلوبی شدن یا تغییر فرم موضعی در حداکثر نیرو وقتی صورت می‌گیرد که افزایش تنش ناشی از کاهش سطح مقطع نمونه بیشتر از افزایش قابلیت تحمل نیروی فلز در اثر کار سختی باشد. ثابت می‌شود در نقطه‌ی ناپایدار  $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma$  است. با قرار دادن این معادله در رابطه‌ی ۲-۷ ساده‌ای به دست می‌آید که از آن مقدار کرنش  $\varepsilon_u$  تعیین می‌گردد:

$$\varepsilon_u = n \quad (۹-۲)$$

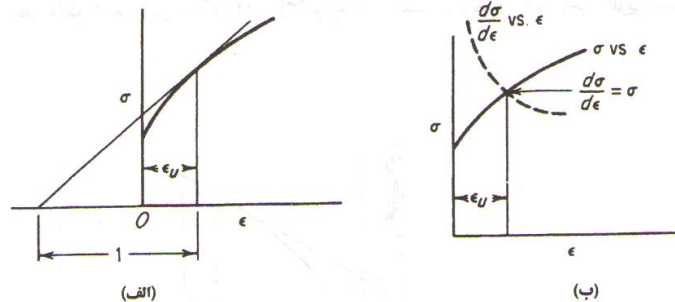
استحکام کشش یا استحکام کشش نهایی (UTS) که بیانگر تنش متناظر با نقطه‌ی ناپایداری است از جنس مهندسی بیان می‌شود زیرا کمیتی متأثر از قدرت ماده است.

$$S_u = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (۱۰-۲)$$





این نکته قابل توجه است که قبل از گلوبی شدن  $\frac{d\sigma}{d\epsilon} > \sigma$  و پس از آن  $\frac{d\sigma}{d\epsilon} < \sigma$  است. پس با داشتن منحنی  $\sigma - \epsilon$  در محدوده پلاستیکی و تهیه یک مثلث قائم الزاویه با ضلع  $\epsilon = 1$  و زاویه  $45^\circ$  و مماس کردن آن بر منحنی  $\sigma - \epsilon$ ، نقطه ماکزیمم به دست می آید (شکل ۷-۲ الف). گفتنی است نقطه گردنه شدن جایی اتفاق می افتد که شیب یا تانژانت در آن نقطه برابر ۱ باشد. با استفاده از معادله  $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma$ ، می توان با رسم منحنی های  $\sigma - \epsilon$  و  $\frac{d\sigma}{d\epsilon} - \epsilon$  روی یک نمودار و تعیین محل تقاطع آن ها نیز مقدار تنش نهایی و کرنش  $\epsilon_{11}$  را مشخص نمود. (شکل ۷-۲ ب).



شکل (۷-۲) تعیین تنش در نقطه گلوبی شدن با استفاده از منحنی  $\sigma - \epsilon$

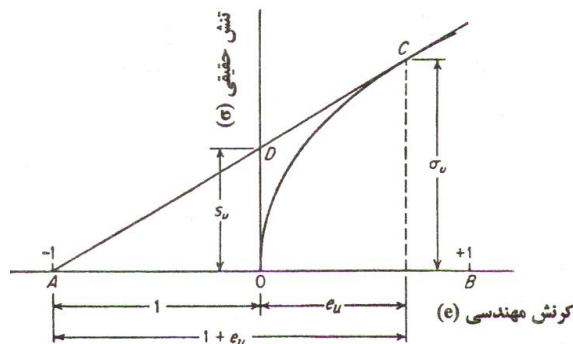
بنابراین اگر منحنی  $\sigma - e$  را رسم کنیم و نقطه  $A$  به فاصله  $e = 1$  در سمت چپ نقطه  $O$  را تعیین نمائیم و سپس از آن نقطه مماسی بر منحنی رسم کنیم، محل تماس، نقطه  $\sigma_{11}$  را تعیین می کند و نقطه مترادف آن روی محور کرنش،  $e_{11}$  را مشخص می کند. شیب در آن نقطه  $\frac{d\sigma}{de} = \frac{\sigma}{1+e}$  می باشد. نمودار نشان داده شده در شکل ۸-۲ این روش را نشان می دهد.

$$\sigma_{11} = S_u(1 + e_{11})$$

$$S_u = \frac{\sigma_{11}}{1 + e_{11}} = \frac{d\sigma}{de}$$

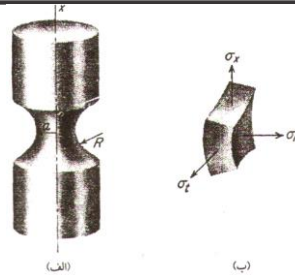
$$\frac{S_u}{\sigma_{11}} = \frac{1}{1 + e}$$

(۱۱-۲)



شکل (۸-۲) تعیین تنش در نقطه گلوبی شدن با استفاده از منحنی  $\sigma - e$

تشکیل یک ناحیه گردنی شده در نمونه کششی، یک حالت سه بعدی تنش را در آن ناحیه ایجاد می کند. ناحیه گلوبی شده مانند یک شیار عمل می کند. در این منطقه دو تنش شعاعی و عرضی علاوه بر تنش به وجود می آیند. این باعث می شود که استحکام ماده در آن منطقه افزایش یابد و یا به عبارتی دیگر به تنش طولی بیشتری برای تغییر فرم نیاز باشد. بنابراین میدان تنش سه بعدی باعث مهار پلاستیکی ماده از تغییر فرم در منطقه دچار کاهش سطح مقطع شده، می شود (شکل ۹-۲).



شکل (۲-۹) توزیع تنش کششی سه‌بعدی در ناحیه گلوبی شده

در منحنی تنش - کرنش حقیقی، پس از نقطه گلوبی شدن، ماده براساس میدان تنش سه‌بعدی ایجاد شده عمل می‌کند و رفتار واقعی را از خود نشان می‌دهد. این منحنی با تقسیم نیروی کششی محوری بر کوچک‌ترین سطح مقطع نمونه در منطقه گلوبی شده به دست می‌آید که بیشتر از تنش مورد نیاز برای تغییر فرم نمونه کششی ساده است. برای حذف تأثیر ایجاد میدان تنشی سه‌بعدی و اصلاح منحنی تنش - کرنش حقیقی، یک رابطه ریاضی بیان شده است که بر این اساس، تنش تک‌محوری اعمالی در آزمایش کشش ( $\sigma$ )، با این فرض که گلوبی شدن تنش‌های سه‌بعدی ایجاد نکند، از رابطه زیر به دست می‌آید:

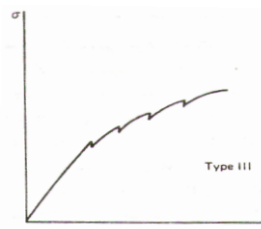
$$\sigma = \frac{\sigma_a}{\left(1 + \frac{2R}{a}\right) \text{Ln} \left(1 + \frac{a}{2R}\right)} \quad (2-12)$$

که در آن  $\sigma_a$  تنش محوری اندازه‌گیری شده می‌باشد (نیرو تقسیم‌بر کوچک‌ترین سطح مقطع) که با در نظر گرفتن تأثیر تنش‌های سه‌بعدی به دست می‌آید.  $a$  شعاع نمونه در منطقه گلوبی شدن و  $R$  نیز شعاع انحنای گلوبی می‌باشد. در شکل ۲-۶ منحنی اصلاح شده تنش - کرنش نشان داده شده است.

### ۲-۱-۳ منحنی تنش - کرنش الاستیک - پلاستیکی غیریکنواخت

گاهی اوقات منحنی تنش - کرنش، رفتاری دنداندار روی بخش سهمی شکل، پس از حد الاستیک از خود نشان می‌دهد. چنین رفتاری همان‌طور که در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است، نمایانگر تغییر غیریکنواخت در ماده است. این رفتار حداقل تحت شرایط زیر اتفاق می‌افتد:

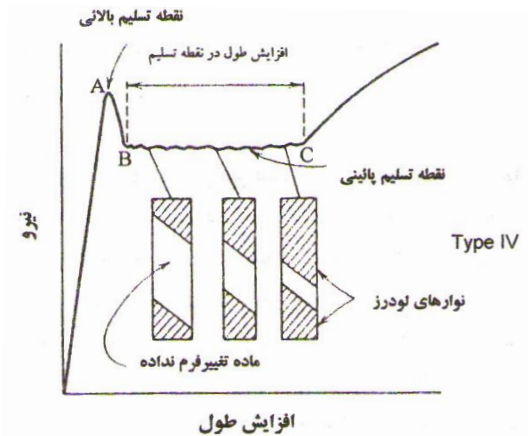
- ۱- وقتی فلزات با ساختار کریستالی hcp در محدوده‌ای از دما تحت آزمایش قرار گیرد. این گونه مواد با دو مکانیزم لغزش و دوقلوبی شدن تغییر فرم پلاستیک می‌دهند. هنگامی که هر دو مکانیزم همزمان فعال شوند، نیرو افت می‌کند و وقتی که میزان فعالیت حداقل یکی از این مکانیزم‌ها کاهش می‌یابد، استحکام افزایش پیدا می‌کند.
- ۲- وقتی فلزات bcc در دماهای پایین تحت آزمایش قرار گیرند.
- ۳- وقتی فلزات آهنی bcc که دارای اتم کربن و یا نیتروژن به صورت محلول می‌باشند، یا آلیاژهای رقیق محلول جامد آلومینیوم تحت آزمایش قرار می‌گیرند. در اثر اعمال تنش، نابجایی‌ها از تجمع اتم‌های حل شونده رها می‌شوند و در نتیجه افت داریم. اگر اتم‌های حل شونده بتوانند با سرعت زیاد نفوذ کرده و نابجایی‌ها را مجدداً قفل نمایند، بار بیشتری مجدداً باید اعمال شود تا فرآیند تغییر شکل ادامه یابد.



شکل (۲-۱۰) منحنی تنش - کرنش یک نمونه که رفتار دنداندار روی بخش سهمی منحنی دارد.



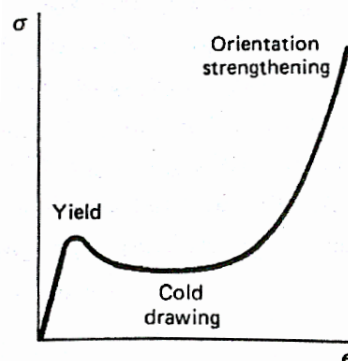
۲-۱-۴) منحنی تنش - کرنش الاستیک - پلاستیکی غیریکنواخت - پلاستیکی یکنواخت در اغلب آلیاژهای bcc و برخی آلیاژهای غیر آهنی یک منطقه کوچک تغییر فرم یکنواخت، نواحی الاستیکی را از پلاستیکی یکنواخت در منحنی تنش - کرنش جدا می‌کند (شکل ۲-۱۱)



شکل (۲-۱۱) رفتار الاستیک - پلاستیکی غیریکنواخت - پلاستیکی یکنواخت

منحنی تا نقطه A به‌طور الاستیکی تحت بار قرار می‌گیرد. این نقطه را نقطه تسلیم بالایی می‌گویند. پس از این نقطه، در ماده یک نوار تغییر فرم موضعی به نام نوار لودرز به وجود می‌آید که موجب افت ناگهانی اولیه بار به نقطه B می‌گردد. نقطه B را نقطه تسلیم پایینی می‌گویند. به دلیل حساس بودن نقطه تسلیم بالایی به پارامترهای دستگاه کشش، نقطه تسلیمی پایینی را به‌عنوان استحکام تسلیم گزارش می‌دهند و بقیه منطقه تغییر فرم یکنواخت مربوط به گسترش نوار لودرز در تمام طول نمونه می‌باشد. گاهی بیش از یک باند ممکن است بطور همزمان در طول نمونه تشکیل و گسترش یابد. وقتی تغییر فرم در تمام نقاط طول نمونه پخش شد (نقطه C) آنگاه تغییر فرم به‌صورت یکنواخت ادامه می‌یابد. هر دندان در فاصله BC نشان‌دهنده تشکیل یک باند لودرز جدید است. این بخش از منحنی می‌تواند در اثر واکنش‌های نابجایی با اتم‌های حل شونده باشد. نوارهای لودرز در زاویه‌ای حدود  $45^\circ$  نسبت به محور اعمال تنش تشکیل می‌شوند.

۲-۱-۵) منحنی تنش - کرنش الاستیک - پلاستیکی غیریکنواخت - پلاستیکی یکنواخت این نوع رفتار در حالت تغییر فرم برخی پلیمرهای کریستالی بوجود می‌آیند. در این نوع منحنی‌ها نیز نقاط تسلیم بالا و پایین مشاهده می‌شود ولی مرحله تغییر فرم پلاستیک نهایی آن‌ها متفاوت با رفتار نوع قبل می‌باشد (شکل ۲-۱۲)



شکل (۲-۱۲) رفتار الاستیک - پلاستیکی غیریکنواخت - پلاستیکی یکنواخت



در ابتدا تسلیم شدن با تخریب ساختار کریستالی اولیه پلیمر اتفاق می‌افتد. این موجب افت اولیه بار و سفید شدن نمونه در ناحیه با تغییر فرم زیاد می‌گردد. اگر شکست درست پس از گلوبی شدن اتفاق نیفتد، ادامه کرنش منجر به ایجاد شبکه کریستالی جدیدی که منظم‌تر و قوی‌تر است، می‌گردد. هر چه بیشتر این نوع ساختار تشکیل شود، پلیمر مقاومت بیشتری نسبت به تغییر فرم به دست می‌آورد و منحنی شروع به افزایش مجدد می‌نماید.

### ۲-۱-۶) قابلیت ارتجاعی یا فنریت

توانایی ماده برای جذب انرژی وقتی که به‌طور الاستیکی تغییر فرم می‌دهد و سپس در حالت باربرداری باعث برگشت ماده به حالت اولیه می‌شود را قابلیت ارتجاعی می‌گویند. قابلیت ارتجاعی با پارامتری به نام مدول ارتجاعی اندازه‌گیری می‌شود که انرژی کرنشی (در واحد حجم) لازم برای تحت تأثیر تنش قرار دادن ماده از تنش صرفاً تنش تسلیم است. این خاصیت به انرژی الاستیک ماده بستگی دارد که سطح زیر منحنی تنش - کرنش در ناحیه الاستیک است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$U = \frac{1}{2} S_y e_y = \frac{1}{2} E e_y^2 \quad (2-13)$$

### ۲-۱-۷) چقرمگی

چقرمگی یک ماده، میزان توانایی جذب انرژی ماده تا مرحله شکست می‌باشد. یکی از راه‌هایی که می‌توان با آن چقرمگی را تعریف کرد، این است که آن را برابر با سطح زیر منحنی تنش - کرنش فرض نمود. این مساحت نشان‌دهنده مقدار کار در واحد حجم می‌باشد که می‌توان روی ماده اعمال شود بدون اینکه باعث شکست ماده گردد. بنابراین هر چه این مساحت بیشتر باشد چقرمگی ماده نیز بیشتر است.

$$\frac{W}{V} = \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (2-14)$$

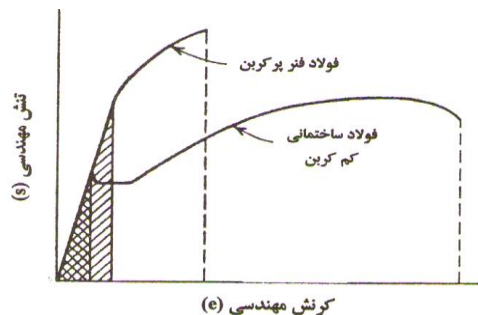
شکل ۲-۱۳ منحنی‌های تنش-کرنش برای دو ماده با تافنس‌های متفاوت را نشان می‌دهد. فولادهای پرکربن استحکام تسلیم و نهایی بیشتری نسبت به فولاد با کربن متوسط دارد. گرچه فولاد ساختمانی نرم‌تر است و استحکام کمتری دارد ولی چون مساحت کل زیر منحنی تنش - کرنش بیشتری دارد، ماده چقرمه‌تر است. بنابراین مشاهده می‌شود که چقرمگی پارامتری است که هم به استحکام و هم به داکتیلیتی ماده بستگی دارد. چقرمگی فولادهای ساختمانی و مواد نرم از تقریبی زیر به دست می‌آید:

$$U_T \approx S_u \cdot e_f \quad (2-15)$$

$$U_T \approx \frac{S_y + S_u}{2} e_f \quad (2-16)$$

برای مواد ترد منحنی تنش - کرنش مشابه یک سهمی در نظر گرفته می‌شود و از رابطه تقریبی زیر به‌دست می‌آید:

$$U_T \approx \frac{1}{3} S_u \cdot e_f \quad (2-17)$$

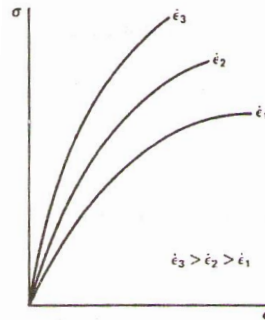


شکل (۲-۱۳) منحنی‌های تنش - کرنش برای دو ماده با تافنس‌های مختلف



## ۲-۱-۸ عوامل مؤثر بر منحنی تنش - کرنش

سرعت بارگذاری یا به عبارتی سرعتی که با آن کرنش اعمال می‌شود، دمای آزمایش و جهت نمونه‌برداری تأثیر زیادی روی منحنی تنش-کرنش دارد. با افزایش سرعت کرنش، قابلیت تغییر فرم ماده کاهش و استحکام آن افزایش می‌یابد. در یک کرنش ثابت، استحکام ماده با افزایش سرعت کرنش بیشتر می‌شود (شکل ۲-۱۴). علت آن عدم تحرک نابجایی‌ها در سرعت‌های کرنش بالا می‌باشد. همچنین مدول الاستیسیته ماده نیز افزایش می‌یابد.



شکل (۲-۱۴) تأثیر سرعت کرنش روی منحنی تنش - کرنش مواد به صورت شماتیک

سرعت کشش به صورت  $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$  و با واحد قراردادی  $S^{-1}$  (بر ثانیه) تعریف می‌شود. اگر سرعت حرکت فک دستگاه کشش

برابر  $V = \frac{dL}{dt}$  باشد روابط زیر برقرار است:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{t} = \frac{V}{L} \quad (۲-۱۸)$$

$$e = \frac{e}{t} = \frac{V}{L_0} \quad (۲-۱۹)$$

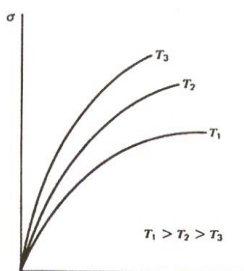
$$\dot{\epsilon} = \frac{e}{1+e} \quad (۲-۲۰)$$

رابطه کلی بین تنش سیلان و سرعت کرنش در دما و کرنش ثابت به صورت زیر است:

$$\sigma = C(\dot{\epsilon})^n \quad (۲-۲۱)$$

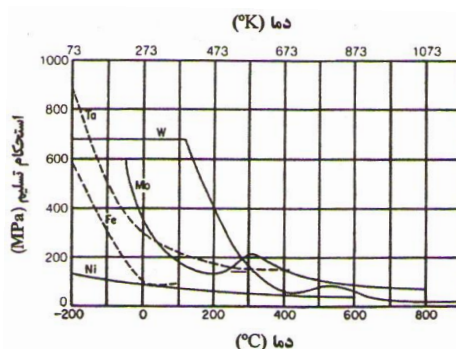
پس هر چه  $\dot{\epsilon}$  بیشتر باشد استحکام بالاتر است، به این مکانیزم مقاوم شدن در اثر سرعت کرنش می‌گویند. ثابت  $C$  مقدار تنش سیلان در سرعت کرنش برابر با ۱ مشخص می‌نماید. پارامتر  $n$  میزان حساسیت به سرعت کرنش نامیده می‌شود که با رسم منحنی  $\log \sigma$  بر حسب  $\log \dot{\sigma}$  و محاسبه شیب آن به دست می‌آید. مقدار آن برای فلزات در دمای اتاق کمتر از ۱/۰ می‌باشد، ولی با افزایش دما افزایش می‌یابد. هر چه ماده نرم‌تر باشد مقدار حساسیت به سرعت کرنش آن بیشتر است.

شکل منحنی تنش - کرنش و مشخصات شکست مواد شدیداً به دمای آزمایش بستگی دارد. به‌طور کلی با افزایش دما، استحکام کاهش و میزان قابلیت تغییر فرم افزایش می‌یابد. همچنین، مدول الاستیسیته ماده نیز کاهش پیدا می‌کند، گرچه اتفاق افتادن پدیده‌هایی نظیر رسوب‌گذاری، پیرکرنشی یا تبلور مجدد در یک محدوده خاص دمایی ممکن است این رفتار عمومی را تغییر دهد. شکل ۲-۱۵ تأثیر دما را به صورت شماتیک روی تنش استحکام یک ماده نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۵) تأثیر دمای روی منحنی تنش - کرنش یک ماده به صورت شماتیک

مشخص شده است که تأثیر دما، برخلاف تأثیر سرعت کرنش، موجب کاهش استحکام تسلیم ماده می‌گردد. میزان تأثیر دما روی خواص کششی ماده بستگی زیادی به ساختار کریستالی ماده دارد. برای فلزات bcc تنش تسلیم به سرعت با کاهش درجه حرارت افزایش می‌یابد، در حالیکه برای فلزات fcc تنش تسلیم به طور جزئی وابسته به درجه حرارت است اما سرعت کار سختی با افزایش درجه حرارت کم می‌شود. این عامل باعث می‌شود تا منحنی تنش - کرنش این فلزات با افزایش درجه حرارت صاف شود و استحکام کششی بیشتر به درجه حرارت نسبت به تنش تسلیم بستگی دارد. تغییر شکل پلاستیک بر اثر کشش در درجه حرارت بالا با تشکیل بیش از یک گردنه در نمونه، شکل پیچیده‌ای پیدا می‌کند (شکل ۲-۱۶).



fcc با Ni و bcc

شکل (۲-۱۶) تأثیر درجه حرارت

معمولاً مشاهده می‌شود که خواص کششی محصولات کار شده در همه جهات یکنواخت نیست. استحکام تسلیم و در حد کمتری استحکام نهایی، خواص هستند که بیشتر تحت تأثیر جهت قرار می‌گیرند. بسته به نوع جهت‌گیری خاصی که وجود دارد، استحکام تسلیم در جهت عمود به جهت تغییر فرم اصلی (جهت طولی)، ممکن است بیشتر یا کمتر از تنش تسلیم در جهت طولی باشد. یکی از مواردی که می‌توان در آن غیریکنواختی خواص مکانیکی یا ناهمسانگردی را مشاهده نمود قطعات کار شده می‌باشد. چقرمگی شکست این قطعات در جهت‌های مختلف متفاوت است و بسته به محل و جهت تهیه نمونه از آن‌ها دارد.

هر گونه ناپیوستگی در شکل هندسی و یا ترکیب شیمیایی مثل ترک، حفرات گازی و انقباضی، آخال‌ها و... باعث می‌شوند. خطوط گسترده نیرو در اطراف آن تجمع کنند، در نتیجه نیرو در پی آن تنش در اطراف موضع فوق به صورت موضعی بالا می‌رود به طوری که ممکن است حتی بیشتر از تنش شکست ماده شود. در نتیجه قطعات دچار شکست زودرس می‌شوند. ورق‌هایی که در آن یک حفره بیضی با قطر بزرگ ۲a و قطر کوچک ۲b ایجاد شده است در نظر بگیرید، حال قطعه فوق را عمود بر قطر کوچکش بارگذاری می‌کنیم. تنش ماکزیمم ( $\sigma_{max}$ ) که در انتهای حفره منحنی شکل و رئوس آن ایجاد می‌شود در شرایطی که بارگذاری عمود بر قطر بزرگ بیضی صورت گرفته باشد، خواهد بود. ( $K_t$  فاکتور تمرکز تنش می‌باشد).

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} = 1 + \frac{2a}{b} \quad (2-22)$$

$$\sigma_{max} = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b}\right) \quad (2-23)$$