

# فصل چہارم

## خواص مکانیکی مواد

## مقدمه

- عکس العمل مواد در مقابل بارگذاریهای خارجی در شرایط خاص محیط کار یا آزمایشگاه **رفتار یا خواص مکانیکی** نامیده می شود.
- موارد زیر را می توان از خواص مکانیکی مثال زد:
  - رفتار تنش-کرنش ماده (stress-strain)
  - چقرمگی (toughness)
  - سختی (hardness)
  - خستگی (fatigue)
  - خزش (creep)
  - شکست (fracture)

# مقدمه

- لزوم مطالعه

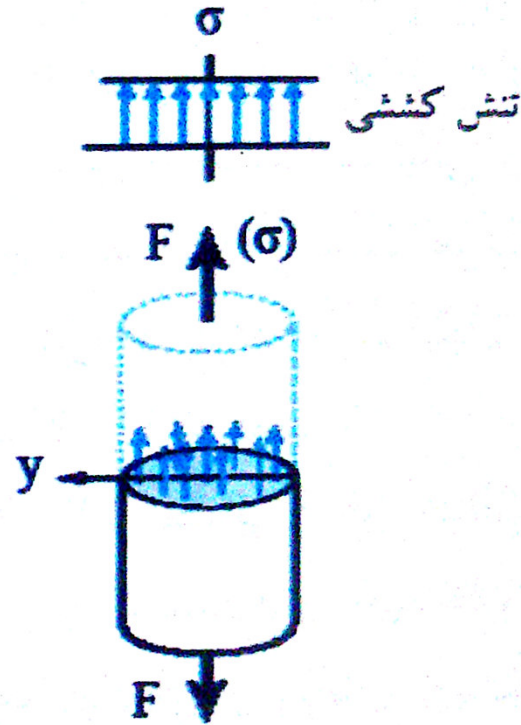
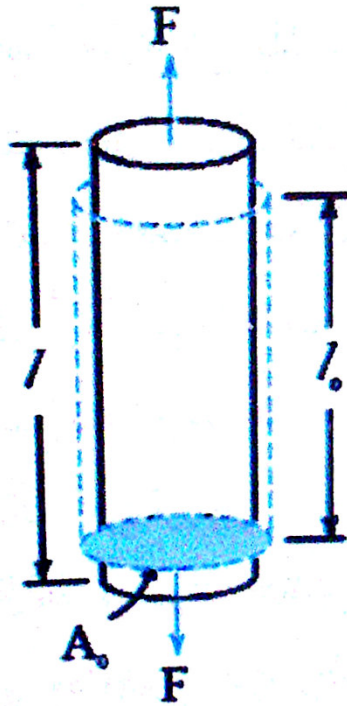
در طراحی سازه ها و اجزاء، مهندس باید از موادی که خواص آنها از قبل مشخص است، استفاده کند تا تغییر شکل و یا خرابی ناخواسته در قطعه حین بارگذاری روی ندهد.

- کلید حل خواص مکانیکی است. خواص مکانیکی پل ارتباطی بین بارگذاری و پاسخ سازه است.

- لذا مهندس ناگزیر است تا از خواص مکانیکی و نحوه اندازه گیری و نحوه ارائه آنها مطلع باشد.

- خواص مکانیکی توسط آزمایشهای دقیق تعیین میگردد. شرایط آزمایش باید تا حد امکان به شرایط بارگذاری نزدیک باشد.

# تعریف تنش

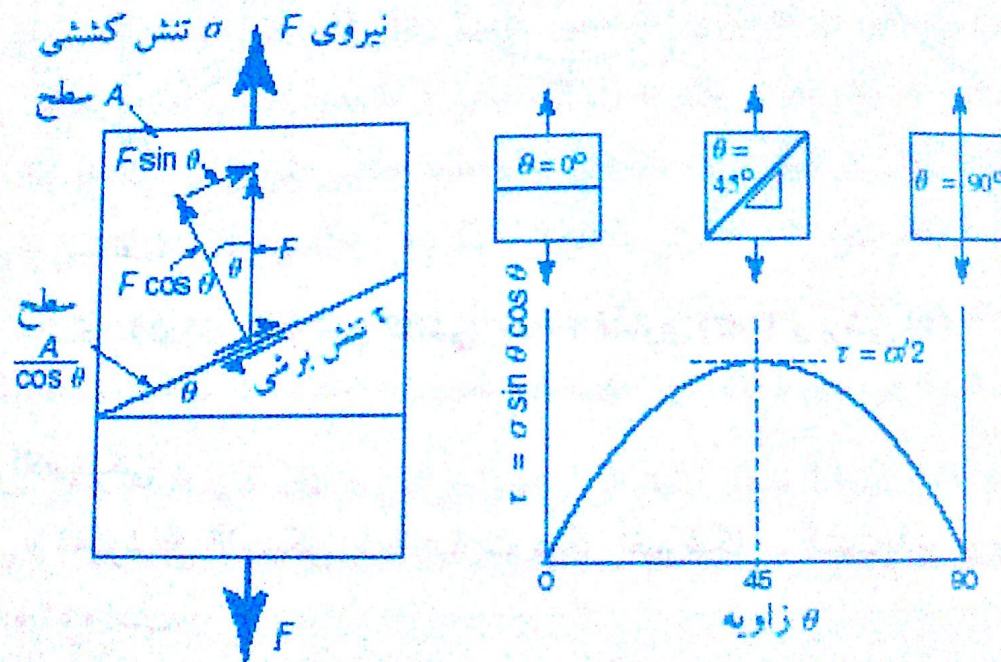


- مقدار نیروی داخلی وارد بر سطح مقطعی بسیار کوچک- یا بر هر نقطه فیزیکی از سطح مقطع- تنش نامیده می شود و با  $\sigma$  نمایش داده می شود.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} , \quad 1 Pa = 1 \frac{N}{m^2}$$

شکل (۵-۱): تنش تک محوری

هرگاه سطح مقطع مورد مطالعه عمود بر محور میله نباشد:



شکل (۲-۵): مؤلفه‌های تنش تک محوری در یک مقطع دلخواه با زاویه  $\alpha$

$$\text{تنش نرمال } \sigma_n = \frac{F'}{A'} = \frac{F \cos \alpha}{A / \cos \alpha} = \frac{F}{A} \cos^2 \alpha = \sigma \cos^2 \alpha$$

$$\text{تنش برشی } \sigma_t = \tau = \frac{F \sin \alpha}{A'} = \frac{F}{A} \sin \alpha \cos \alpha = \frac{1}{2} \sigma \sin 2\alpha$$

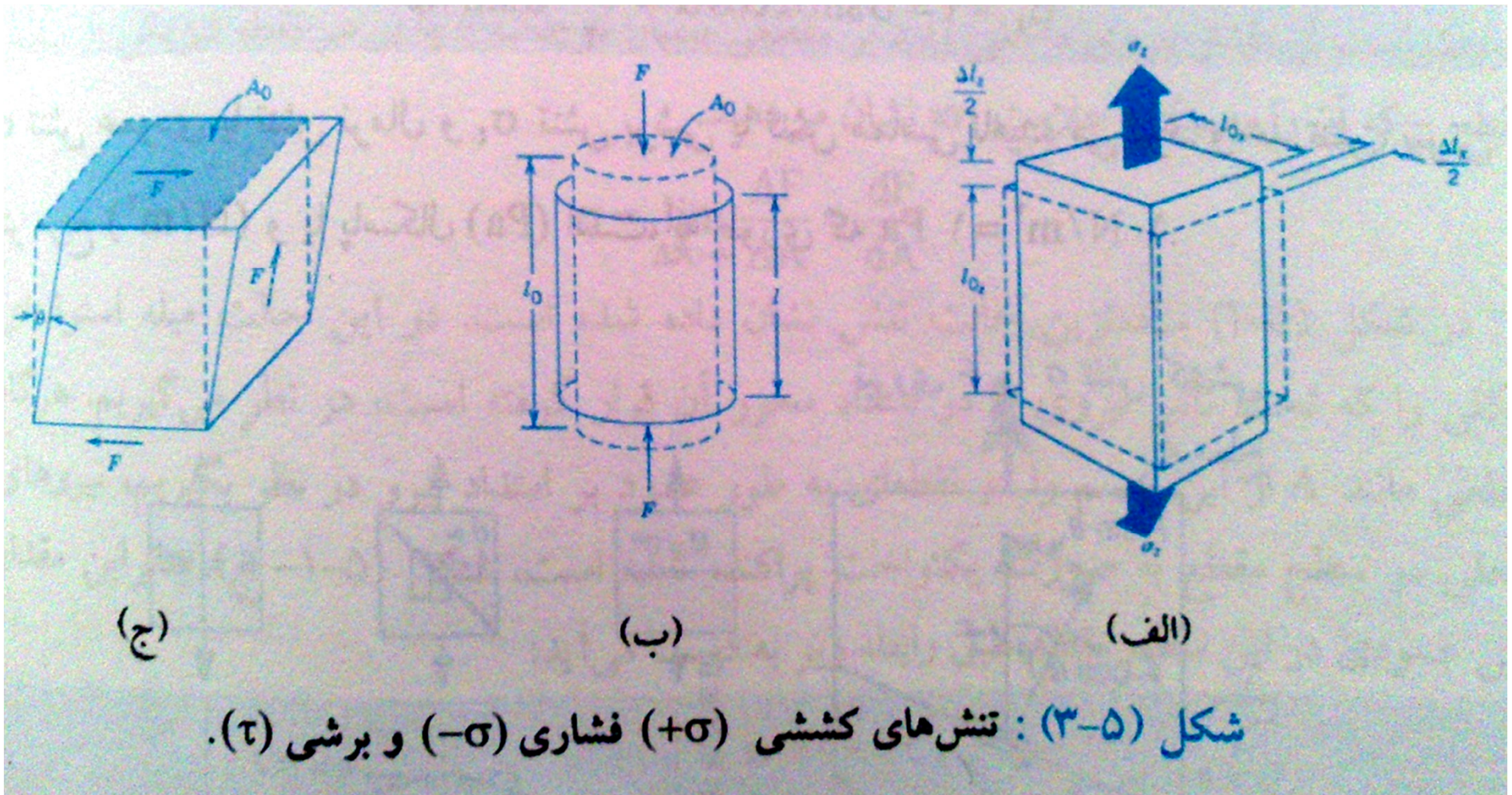
## • انواع تغییر شکل

- تغییر شکل الاستیک یا کشسان یا برگشت پذیر
- تغییر شکل پلاستیک یا مومسان یا دائمی

## • انواع تنش ایجاد شده در قطعه تحت بارگذاری

- تنش کشش
- تنش فشاری
- تنش برشی

## انواع تنشهای ایجاد شده در قطعه و اثرات هر یک



# تغییر شکل الاستیک

- این وضعیت هنگامی اتفاق می افتد که با **حذف بار اعمال شده** به قطعه **تمام تغییر شکل‌های ایجاد شده به حالت اول خود برگردد**.
- تغییرات طول توسط پارامتری بی بعد به نام **کرنش** تعریف می شود:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_1 - L_0}{L_0}$$

- بنابراین در تغییر شکل الاستیک رابطه بین تنش و کرنش بصورت خطی و از **قانون هوک** تبعیت می کند:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

مدول الاستیکی ←



# تغییر شکل الاستیک

## • تعریف مدول برشی:

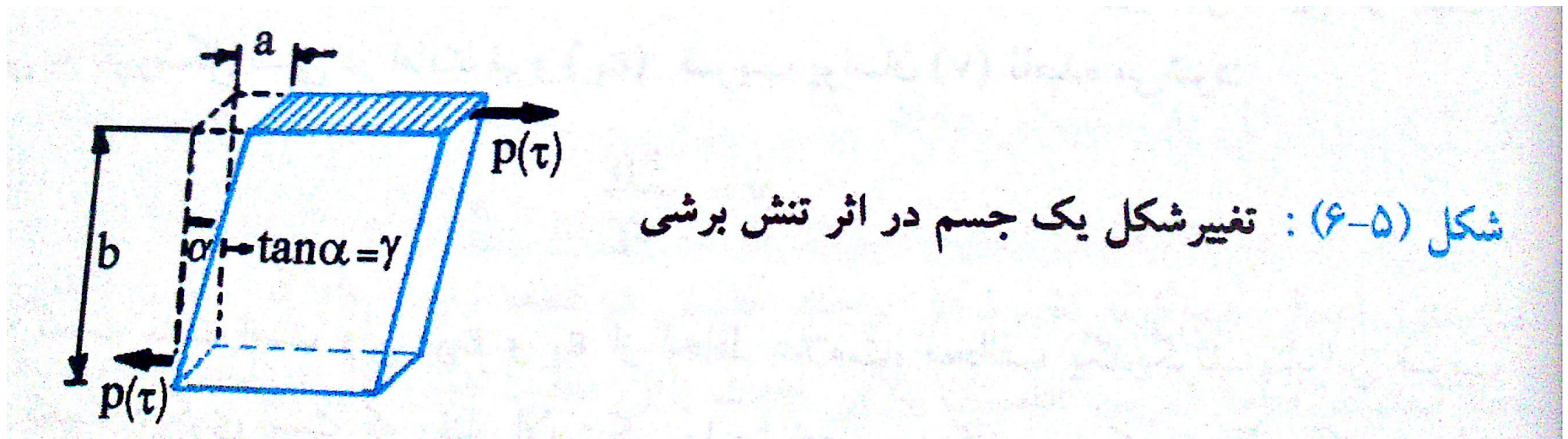
در محدوده الاستیک رابطه مشابهی با قانون هوک، بین تنش برشی و تغییر شکل نسبی برشی وجود دارد.

← مدول برشی

$$\tau = G \cdot \gamma$$

→ کرنش برشی

$$\gamma = \tan \alpha = a/b$$



# تغییر شکل الاستیک

## • ضریب پواسون

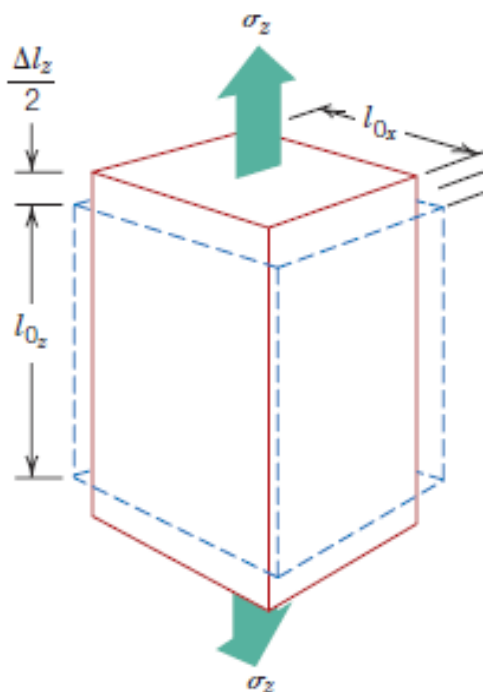
همزمان با تغییر شکل الاستیک جسم در راستای نیرو، تغییر شکل در جهات دیگر هم صورت می گیرد.

نسبت کرنش جانبی (عرضی) به کرنش محوری (طولی) را نسبت یا ضریب پواسون گویند.

$$\nu = - \frac{\epsilon_D}{\epsilon_L}$$

عدد پواسون همچنین به تغییر حجم نسبی مواد ( $\Delta V/V_0$ ) بستگی دارد.  $\nu$  برای مواد مختلف بین 0 و 0.5 می باشد.  $\nu$  برای لاستیک نرم برابر 0.49 است که بیشترین مقدار است و بدین معناست که  $\Delta V/V_0 = 0$ .

# تغییر شکل الاستیک



$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

- وقتی جسمی در آزمایش کشش تک محوره در راستای Z بارگذاری می شود، در این راستا دچار افزایش طول و کرنش می شود.
- این افزایش طول در راستای Z مصادف با کاهش طول در راستای X, Y می باشد و موجب کرنش در راستای X, Y می شود.
- در مواد همسانگرد (isotropic) کرنشهای  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  برابر می باشند.
- علامت منفی به دلیل انقباضی بودن کرنش در جهت عمود بر کشش است.

# تغییر شکل الاستیک

- بعضی از مواد وجود دارند که چنانچه در یک جهت کشیده شوند، در جهت دیگر نیز منبسط میشوند. در این مواد ضریب پواسون منفی است. مثل فومهای پلیمری.
- مقداری ضریب پواسون بصورت تئوری 0.25 است. اما در عمل برای فلزات بین 0.25-0.35 در تغییر است.
- حداکثر ضریب پواسون برابر 0.5 است. در این حالت تغییر حجمی در ماده حین تغییر شکل روی نمی دهد.
- در مواد همسانگرد، مدول یانگ، مدول برشی و ضریب پواسون طبق رابطه زیر به هم مربوطند:

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

- در اغلب فلزات مقدار  $G$  حدود  $0.4E$  می باشد.

جدول (۵-۲): مدول الاستیکی و برشی و ضریب پواسان تعدادی از مواد با ساختار تقریباً همسانگرد، [۵].

$\nu$	G MN/m <sup>2</sup> =Mpa	E MN/m <sup>2</sup> =Mpa	نام ماده
۰/۳۶	۴۶۰۰۰	۱۲۵۰۰۰	مس
۰/۳۳	۲۶۰۰۰	۷۲۰۰۰	آلومینیوم
۰/۳۳	۸۲۰۰۰	۲۱۵۰۰۰	آهن
۰/۲۸	۱۸۰۰۰	۴۵۰۰۰	منیزیم
۰/۳۴	۲۰۸۰۰۰	۵۵۰۰۰	قلع
۰/۴۰	۵۵۰۰	۱۶۰۰۰	سرب
۰/۳۳	۴۰۵۰۰	۱۰۵۰۰۰	تیتان
۰/۳۰	۱۱۸۰۰۰	۳۲۰۰۰۰	مولیبدن
۰/۳۱	۷۸۵۰۰	۲۱۰۰۰۰	نیکل
۰/۳۸	۲۹۴۰۰	۸۰۵۰۰	نقره
۰/۴۲	۲۸۲۲۰	۸۰۲۰۰	طلا
۰/۲۹	۳۴۰۰۰	۹۴۰۰۰	روی
۰/۴۲	۳۰	۱۰۰	لاستیک
۰/۲۰	۲۴۰۰	۵۰۰۰	لاستیک سخت

## مدول الاستیک یا ضریب یانگ (E)

- این مقدار برای هر ماده در یک دمای ثابت عدد ثابتی می باشد.

- عوامل موثر بر مدول الاستیک

- جهات کریستالی

- دما

- عناصر آلیاژی

# اثرات جهات کریستالی بر مدول الاستیک

- **تعریف مواد ایزوتروپ یا همسانگرد:** موادی که خواص آنها در تمام جهات یکسان باشد.
- **تعریف مواد ان ایزوتروپ یا ناهمسانگرد:** موادی که در آن خواص ماده در جهات کریستالی مختلف متفاوت باشد.
- بنابراین تنها مواد **تک کریستال** را می توان از دسته مواد ناهمسانگرد نامید که چنین خاصیتی دارند.

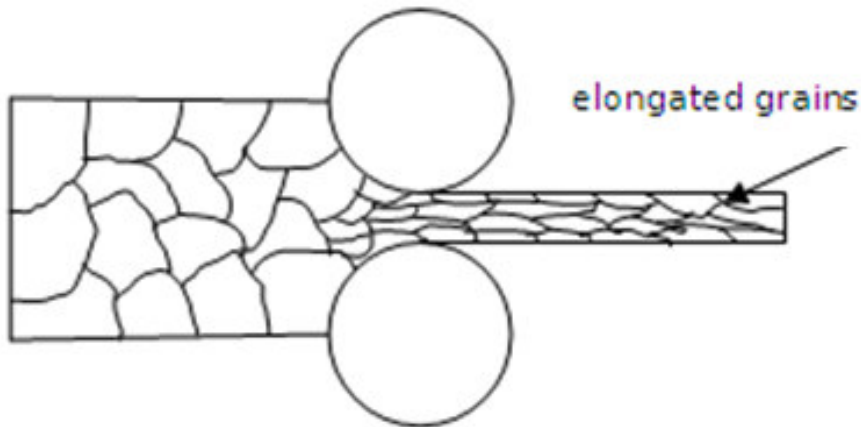
جدول (۵-۱): ارتباط مدول الاستیکی و مدول برشی در تک کریستال چند فلز نسبت به دو جهت مختلف کریستالوگرافی (واحد به  $\text{MN/m}^2 = \text{MPa}$ )، [۵].

نام فلز	$E_{\langle 111 \rangle}$	$E_{\langle 100 \rangle}$	$G_{\langle 111 \rangle}$	$G_{\langle 100 \rangle}$	$E^*$	$G^*$
مس	۱۹۴۰۰۰	۶۸۰۰۰	۳۱۰۰۰	۷۴۰۰۰	۱۲۵۰۰۰	۴۶۰۰۰
آلومینیوم	۷۷۰۰۰	۶۴۰۰۰	۲۵۰۰۰	۲۹۰۰۰	۷۲۰۰۰	۲۷۰۰۰
آهن - $\alpha$	۲۸۳۰۰۰	۱۲۴۰۰۰	۶۱۰۰۰	۱۱۸۰۰۰	۲۱۵۰۰۰	۸۲۰۰۰

\*حد متوسط برای حالت تقریباً همسانگرد (ایزوتروپ)

# اثرات جهات کریستالی بر مدول الاستیک

- مواد پلی کریستال از تعداد زیادی دانه تشکیل شده است و هریک از دانه ها از لحاظ ساختار شبکه کریستالی تقریبا بدون نظم خاصی در جهات مختلف قرار گرفته اند. بنابراین خواص الاستیکی بستگی به جهات کریستالی ندارد و تا حدودی دارای یکنواختی در تمام جهات کریستالی می باشد.

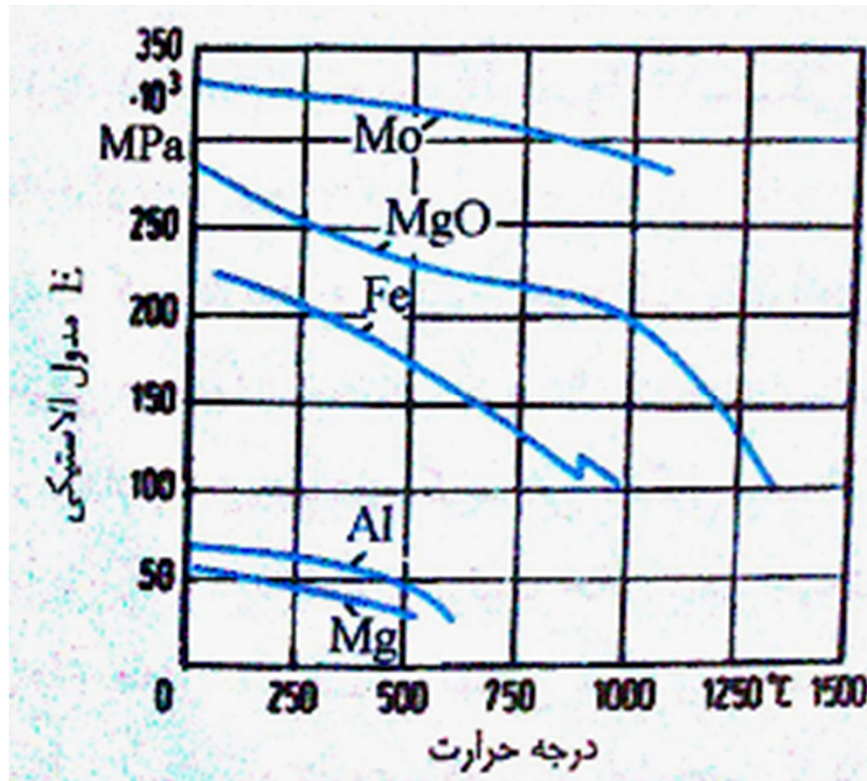


- البته عملیاتی مثل نورد، دانه های یک قطعه چند بلوری را در یک جهت خاص جهت دار می کند که این امر سبب ایجاد رفتاری متفاوت در مقابل تغییر شکل الاستیک و درجهات مختلف می شود.



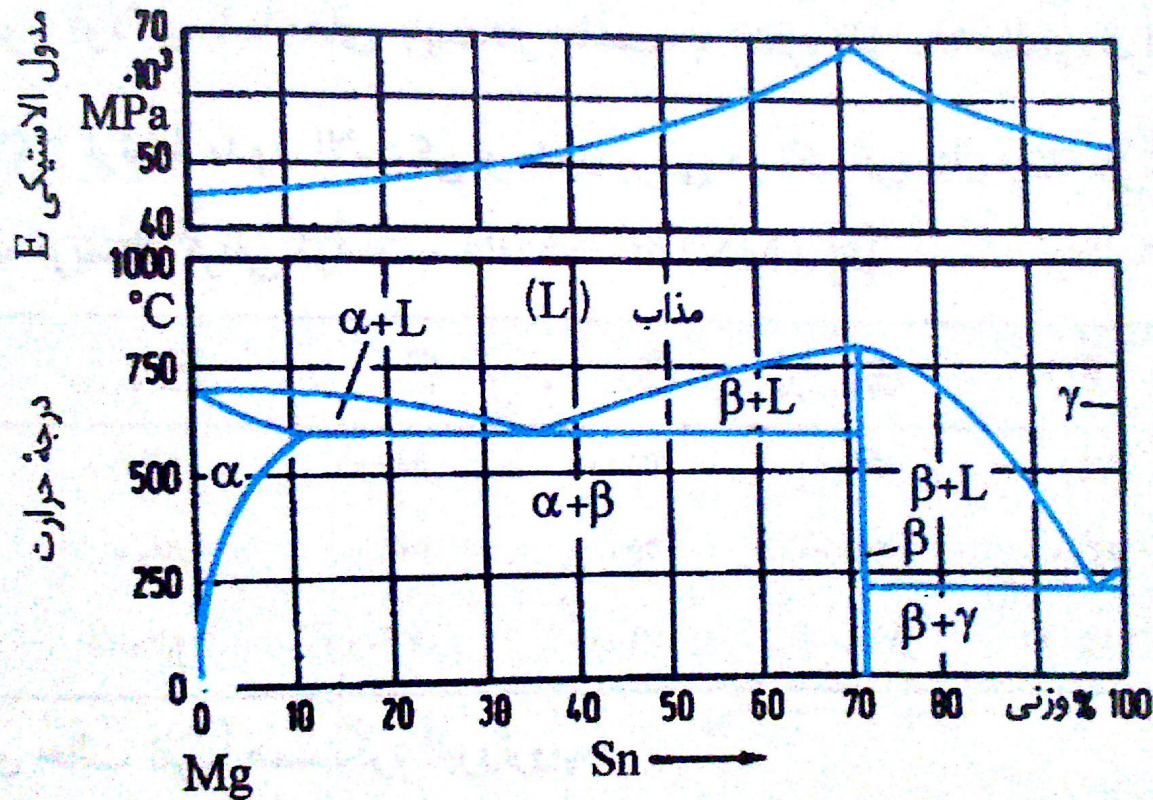
# اثرات دما بر مدول الاستیک

- مدول الاستیک به قدرت اتصالات اتمی در شبکه کریستالی بستگی دارد. افزایش دما باعث سست شدن پیوند بین اتمی و کاهش مدول الاستیک خواهد شد. در فلزات و سرامیک این تاثیر کمتر از مواد مصنوعی می باشد.



شکل (۴-۵) : تأثیر دما بر روی مدول الاستیکی، [۶].

# اثرات عناصر آلیاژی بر مدول الاستیک



شکل (۵-۵): وابستگی مدول الاستیکی نسبت به تغییر درصد وزن در آلیاژ Mg-Sn، [۶].

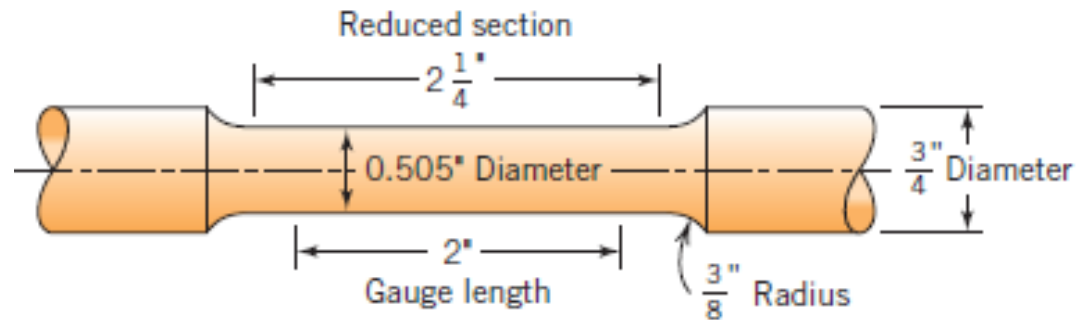
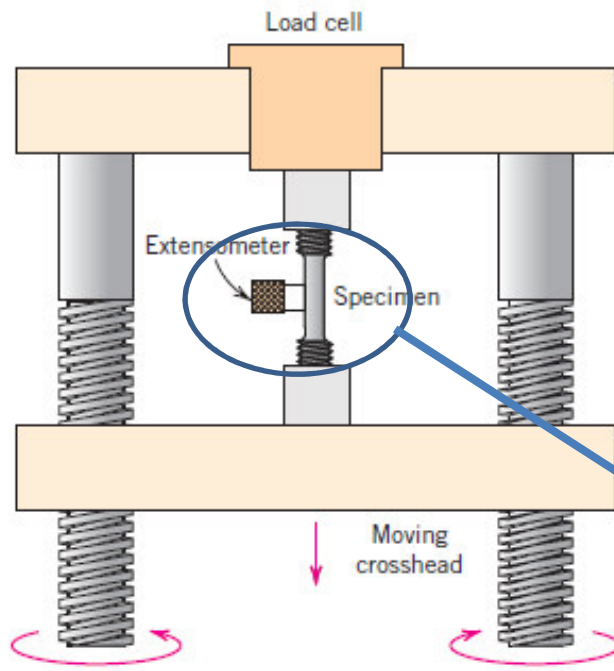
# منحنی تنش-کرنش مواد

## آزمایش کشش-ASTM E8, E8M

- آزمایش کشش (Tension Test) یکی از آزمایشهای بسیار متداول برای تعیین خواص مکانیکی است.
- نیروی کششی به یک قطعه باریک با یک نرخ ثابت و پیوسته به تدریج اعمال میشود تا در آن تغییر شکل پلاستیک و نهایتاً شکست روی دهد. لذا جزء تستهای مخرب است.
- شکل و ابعاد قطعه باید بصورت استاندارد باشد. معمولاً سطح مقطع دایروی است، ولی میتواند به شکل مستطیل نیز باشد.
- شکل استخوانی به این علت است که تغییر شکلهای و شکست در قسمت میانی روی دهد.

# منحنی تنش-کرنش مواد

## آزمایش کشش-ASTM E8, E8M



# منحنی تنش-کرنش مواد

## آزمایش کشش-ASTM E8, E8M

- قطر استاندارد در حدود 12.8 mm در قسمت میانی و طول آن باید حداقل چهار برابر این مقدار (در حدود 60 mm) باشد.
- برای محاسبه شکل پذیری از طول 50 mm قسمت میانی استفاده میشود.
- خروجی دستگاه تست کشش، بصورت نیرو در برابر تغییر طول میباشد. این منحنی بدست آمده وابسته به ابعاد قطعه (طول و سطح مقطع) میباشد.
- برای آنکه بتوان از نتایج بدست آمده در هر قطعه و ابعادی بتوان استفاده نمود، باید نتایج بی بعد باشند. برای حذف و کم کردن وابستگی به ابعاد هندسی، نتایج بر حسب پارامترهای بی بعد یا نرمال شده باید بیان شوند.
- برای این منظور بجای استفاده از بار از تنش مهندسی و بجای استفاده از تغییر طول از کرنش مهندسی استفاده میشود.

# منحنی تنش-کرنش مواد

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad 1 Pa = 1 \frac{N}{m^2}$$

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

## • انواع تنش و کرنش

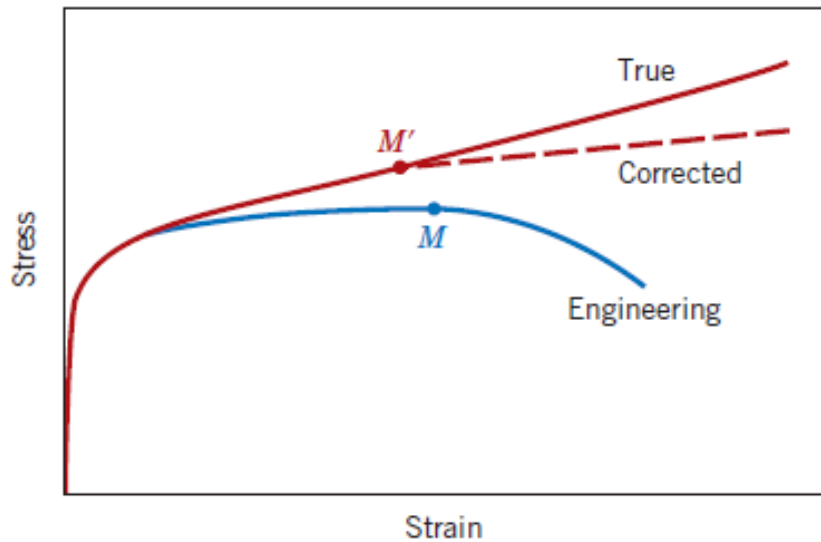
- تنش-کرنش مهندسی

- تنش-کرنش حقیقی

مشخصا باید به گونه ای خواص واقعی ماده در ارزیابی های ما مورد استفاده قرار گیرد. برای همین منظور در رابطه تنش، باید سطح مقطع در هر لحظه اعمال گردد. با این توضیح تعریف جدیدی از تنش با نام تنش حقیقی معرفی می شود.

# منحنی تنش-کرنش مواد

- در نمودار تنش-کرنش مهندسی مشاهده شد که بعد از نقطه استحکام کششی، تنش کاهش می یابد.
- در صورتیکه به دلیل پدیده گلویی شدن و کاهش سطح مقطع، تنش در این منطقه افزایش می یابد. بنابراین گاهی مناسب است از تنش-کرنش حقیقی استفاده شود.



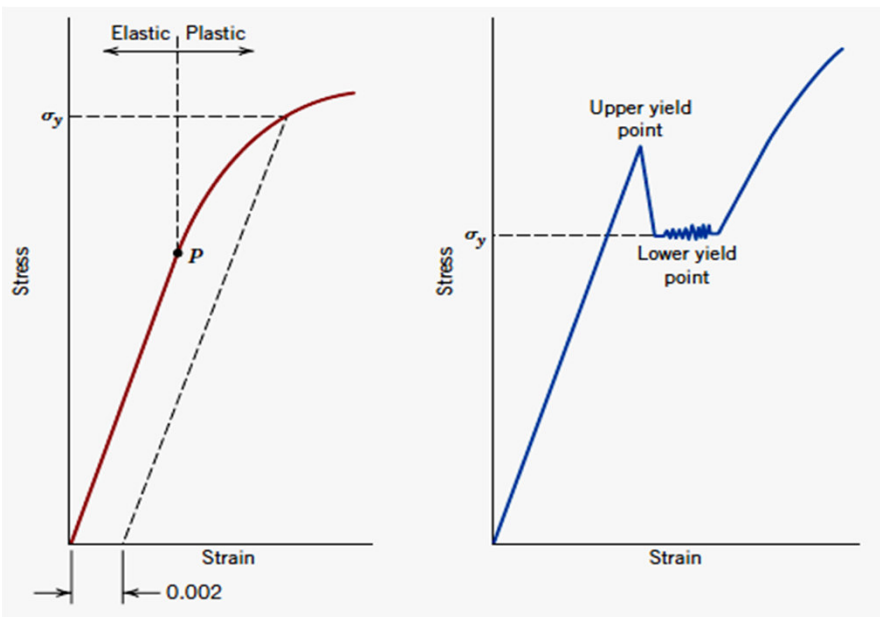
- چنانچه در ماده حین تغییر شکل هیچ تغییر حجمی روی ندهد (فقط در نقطه تسلیم):

$$\sigma_T = \sigma(1 + \epsilon) , \quad \epsilon_T = \ln(1 + \epsilon)$$

- در بقیه موارد تنش/کرنش حقیقی با توجه به میزان بار، سطح مقطع و طول محاسبه می شود.

# تغییر شکل پلاستیک - Plastic deformation

- در اغلب فلزات رفتار الاستیک فقط تا کرنش حدود 0.005 ادامه می یابد.
- چنانچه مواد بیش از این مقدار دچار کرنش شوند، دیگر تنش متناسب با کرنش نیست و تغییر شکل دائمی یا پلاستیک در ماده روی میدهد. یعنی با برداشتن بار ماده به شکل اولیه خود برنمیگردد.

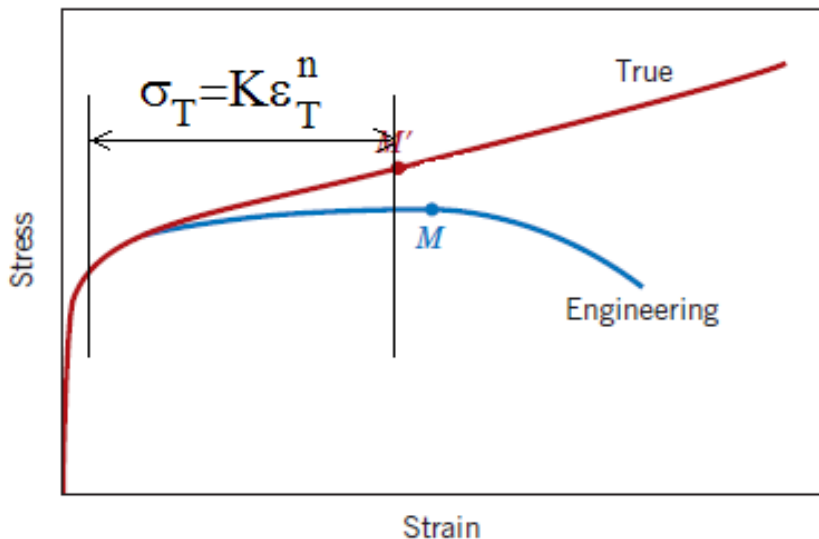


- در اغلب فلزات عبور از منطقه الاستیک به پلاستیک تدریجی است.
- هرچه در منطقه پلاستیک پیش رویم، انحنای بیشتر می شود.



# تغییر شکل پلاستیک - Plastic deformation

- اختلاف تنش-کرنش حقیقی و مهندسی در منطقه الاستیک بسیار ناچیز است.
- عمده تفاوت در منطقه تغییر شکل پلاستیک است. در نمودار تنش/کرنش حقیقی، تنش لازم برای اعمال کرنش حقیقی، همواره افزایشی است.
- در پلاستیسیته تمامی محاسبات بر مبنای تنش/کرنش حقیقی است.
- برای بیشتر فلزات رفتار پلاستیک از آغاز تسلیم تا آغاز گلویی شدن را میتوان طبق رابطه زیر مدل کرد:



$$\sigma_T = K \epsilon_T^n$$

- $n$  و  $K$  ثوابت وابسته به جنس ماده هستند.
- مقدار  $n$  از یک کوچکتر است. به آن توان کرنش سختی گویند.

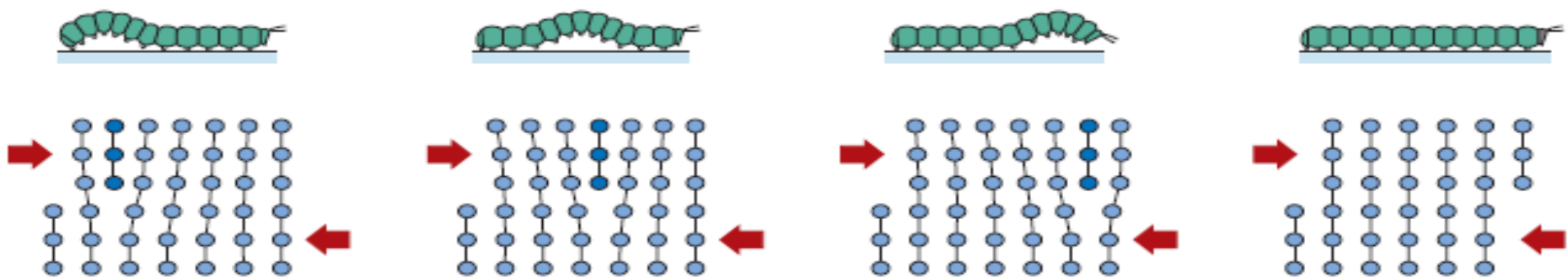
# تغییر شکل پلاستیک - Plastic deformation

- ثوابت  $K$  و  $n$  برای تعدادی از مواد

<i>Material</i>	<i>n</i>	<i>K</i>	
		<i>MPa</i>	<i>psi</i>
Low-carbon steel (annealed)	0.26	530	77,000
Alloy steel (Type 4340, annealed)	0.15	640	93,000
Stainless steel (Type 304, annealed)	0.45	1275	185,000
Aluminum (annealed)	0.20	180	26,000
Aluminum alloy (Type 2024, heat treated)	0.16	690	100,000
Copper (annealed)	0.54	315	46,000
Brass (70Cu-30Zn, annealed)	0.49	895	130,000

## تغییر شکل پلاستیک - مقیاس اتمی

- از دیدگاه اتمی، اتمها پیوندهای قبلی خود در موقعیت فعلی را شکسته و پیوندهای جدید با همسایه های جدید ایجاد می کنند.
- این امر در تعداد وسیع اتمها باعث جابجایی اتمها می شود. بنابراین با برداشتن تنش، اتمها به موقعیت قبلی خود باز نمی گردند.
- مکانیزم جابجایی اتمها و تغییر شکل ماده برای مواد بلوری و غیربلوری متفاوت است.
- در مواد بلوری جابجایی اتمها و تغییر شکل پلاستیک ماده توسط فرایند لغزش (slip) روی می دهد. در این فرایند نابجاییها حرکت می کنند.

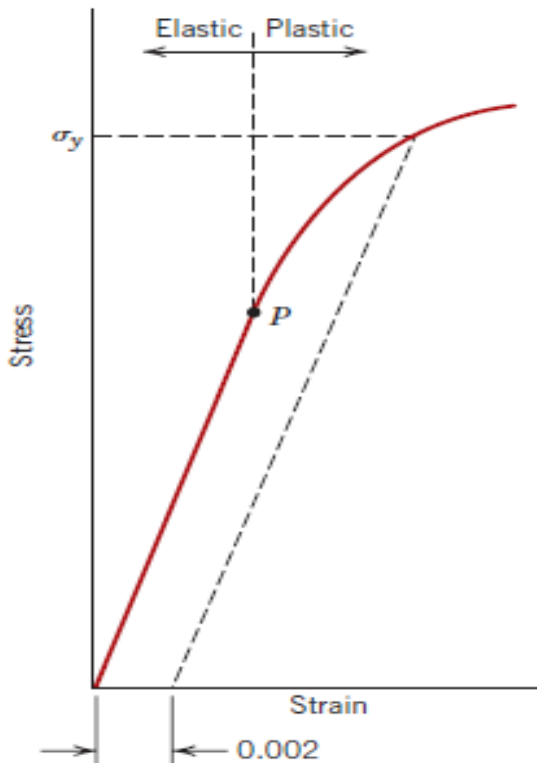


# تسلیم - Yielding

- اغلب سازه ها بگونه ای طراحی می شوند که تنها تغییر شکل الاستیک بدهند و تغییر شکل دائمی پلاستیک، باعث عملکرد نامناسب آنها می شود.

- لذا لازم است تا تنش که در آن تغییر شکل پلاستیک یا پدیده تسلیم روی می دهد، مشخص شود. (در تسلیم کرنشهای بزرگ در برابر تغییر تنش کوچک روی می دهد).

- در موادی که تغییر رفتار از حالت الاستیک به پلاستیک بصورت تدریجی روی می دهد، نقطه تسلیم جایی است که نمودار از حالت خطی خارج می شود. به این نقطه حد تناسب گویند. (نقطه P) تعیین حد تناسب در برخی نمودارها مشکل است. لذا یک خط راست از کرنش 0.002 موازی خط الاستیک رسم می شود تا نمودار را قطع کند. به این تنش، استحکام تسلیم گویند.



# استحکام تسلیم – Yield Strength

✓ به نقطه بدست آمده نقطه تسلیم و به تنش بدست آمده استحکام تسلیم گویند.

✓ تنش تسلیم در مرتبه Mpa است.

✓ کلمه استحکام بدین سبب بکار می رود که نشان دهنده مشخصه ماده باشد.

✓ برای موادی که رفتار الاستیک از ابتدا غیرخطی است استفاده از خط موازی در

کرنش  $\epsilon=0.002$  عملی نیست. لذا در این

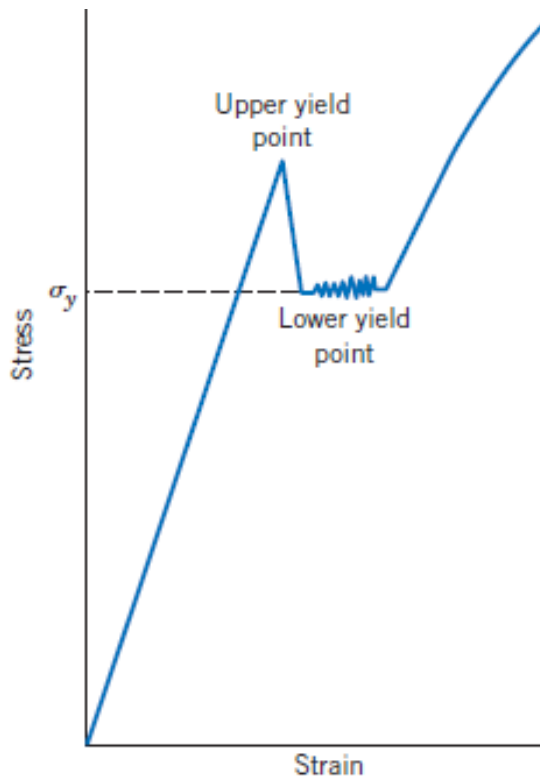
حالت از تنش معادل با کرنش  $\epsilon=0.005$  به

عنوان استحکام تسلیم استفاده می شود.

✓ در برخی فولادها مرز الاستیک-پلاستیک با یک شکستگی

ناگهانی در نمودار معین است. در این مواد نقطه تسلیم پایین

به عنوان استحکام تسلیم در نظر میگیرند.



# استحکام کششی – Tensile Strength

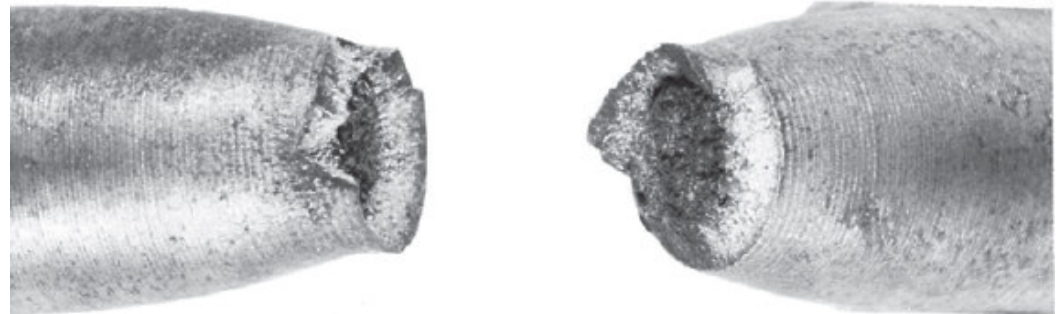
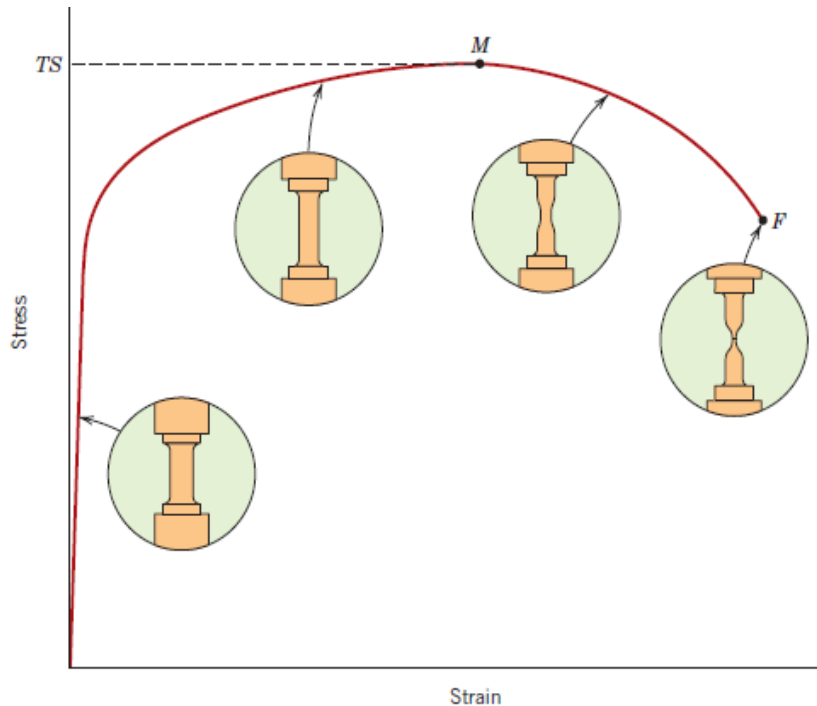
- بعد از تسلیم، تنش لازم برای تغییر شکل پلاستیک در فلزات افزایش می یابد تا به یک مقدار حداکثر در نقطه  $M$  برسد. سپس تنش کاهش می یابد تا در نقطه  $F$  بشکند.

- به حداکثر تنش در نمودار تنش- کرنش (نقطه  $M$ ) استحکام کششی گویند.

- این تنش حداکثر تنشی است که یک

سازه میتواند تحمل کند. چنانچه تنش به این مقدار برسد و در آن باقی بماند، منجر به شکست خواهد شد.

- تا قبل از این نقطه، تغییر شکل در قسمت میانی یکنواخت است.



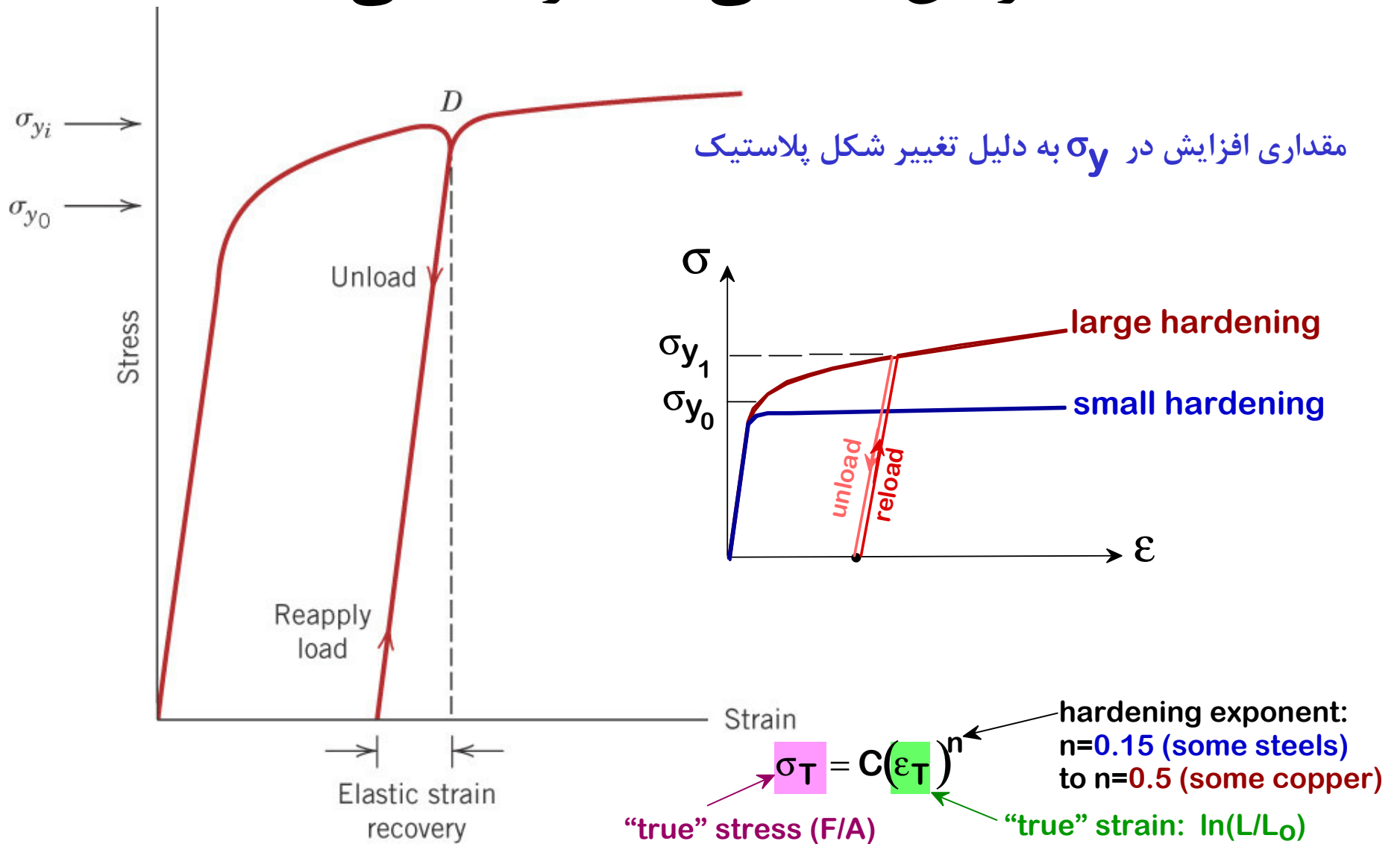
# گلویی شدن-necking

- بعد از نقطه استحکام کششی، قسمتی از جسم شروع به کاهش سطح مقطع یا گلویی شدن میکند. سپس مابقی تغییر شکل، محدود به قسمت گلویی شده میشود و در نهایت شکست روی میدهد.
- به تنشی که در آن شکست روی می دهد، استحکام شکست گویند.
- استحکام کششی در مواد گوناگون متفاوت و از 50 Mpa برای آلومینیوم تا 3000 Mpa برای فولادهای استحکام بالا متغیر است.
- معمولا وقتی صحبت از استحکام ماده برای مقاصد طراحی است، منظور استحکام تسلیم است. زیرا در استحکام کششی، ماده دچار تغییر شکل پلاستیک زیادی میشود که کاربردی نیست.
- استحکام شکست در فرایند شکل دهی فلزات مهم می باشد.

<i>Metal Alloy</i>	<i>Yield Strength, MPa (ksi)</i>	<i>Tensile Strength, MPa (ksi)</i>	<i>Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)]</i>
Aluminum	35 (5)	90 (13)	40
Copper	69 (10)	200 (29)	45
Brass (70Cu–30Zn)	75 (11)	300 (44)	68
Iron	130 (19)	262 (38)	45
Nickel	138 (20)	480 (70)	40
Steel (1020)	180 (26)	380 (55)	25
Titanium	450 (65)	520 (75)	25
Molybdenum	565 (82)	655 (95)	35



# گرنش سختی یا کار سختی



# شکل پذیری - Ductility

- شکل پذیری معیاری برای اندازه گیری میزان تغییر شکل پلاستیک ماده قبل از وقوع شکست در ماده است.

- به موادی که تغییر شکل پلاستیک کمی قبل از شکست داشته باشند، مواد ترد (Brittle) گویند.

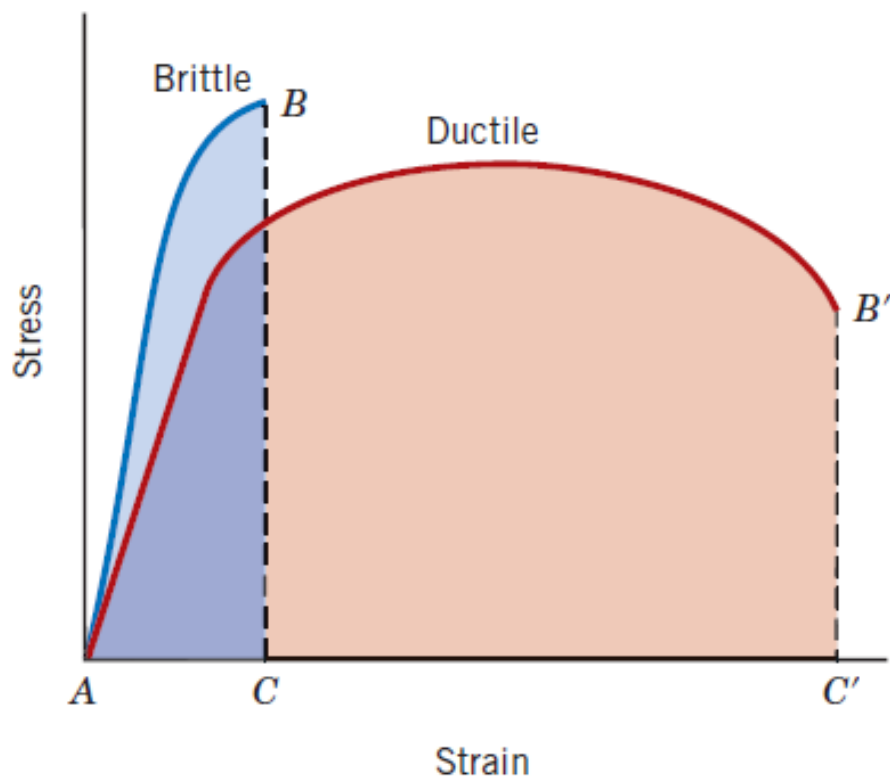
- به مواد دارای تغییر شکل پلاستیک قابل توجه قبل از شکست، مواد شکل پذیر (ductile) گویند.

- میزان شکل پذیری بصورت کمی به دو صورت

بیان می شود:

❖ درصد افزایش طول

❖ درصد کاهش سطح مقطع



# شکل پذیری-درصد افزایش طول %EL

- درصد افزایش طول برابر درصد کرنش پلاستیک در لحظه شکست است.

$$\%EL = \left( \frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100$$

- که  $l_f$  طول قطعه در لحظه شکست و  $l_0$  طول اولیه آن است.
- نکته مهم: برای محاسبه درصد افزایش طول در تست کشش، قسمتی از بخش میانی نمونه بکار میرود. از طرفی بعد از نقطه استحکام کششی، پدیده گلویی شدن رخ داده و عمده تغییر شکل پلاستیک تا لحظه شکست در این نقطه متمرکز میشود.
- لذا چنانچه طول اولیه قطعه کوچک در نظر گرفته شود، کسر زیادی از نمونه دچار پدیده گلویی شده و در نتیجه برای %EL عدد بالایی بدست می آید.
- بنابراین مقدار طول اولیه نباید کوچکتر از 50 mm باشد.

# شکل پذیری-درصد کاهش سطح %RA

- درصد کاهش سطح مقطع بصورت زیر تعریف میشود:

$$\%RA = \left( \frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$

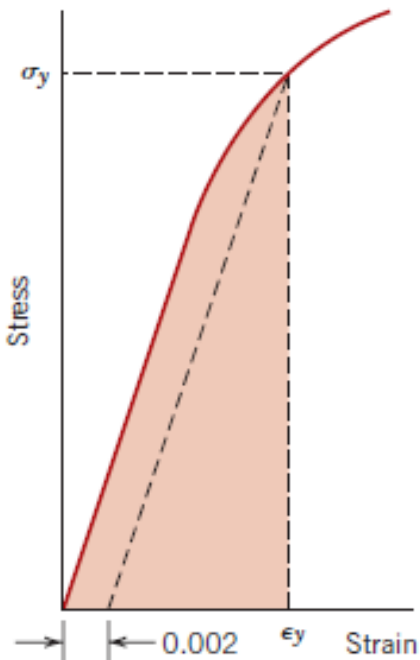
- که  $A_f$  سطح مقطع در لحظه شکست و  $A_0$  سطح مقطع اولیه است.
- %RA مستقل از طول اولیه است. برای اغلب مواد %EL و %RA یکسان نیستند.
- اغلب فلزات دارای شکل پذیری نسبتاً متوسطی در دمای اتاق هستند. با کاهش دما مواد رفتار تردتری پیدا میکنند.
- دانش شکل پذیری مواد به دو دلیل اهمیت دارد:
  - میزان تغییر شکل پلاستیک قبل از شکست در یک سازه مورد نیاز طراحان
  - میزان تغییر شکل پلاستیک مجاز در طی فرایند ساخت و تولید

# خاصیت ارتجاعی - Resilience

• خاصیت ارتجاعی بیانگر توانایی ماده در جذب انرژی هنگام تغییر شکل الاستیک و بازگرداندن این انرژی پس از باربرداری است.

• برای بیان آن از مدول ارتجاعی  $U_r$  استفاده میشود. مدول ارتجاعی برابر میزان انرژی کرنشی بر واحد حجم ماده برای تغییر شکل ماده از حالت بی باری تا نقطه تسلیم میباشد.

• از لحاظ عددی، مدول ارتجاعی برابر مساحت زیر نمودار تنش-کرنش تا نقطه تسلیم میباشد. ( $J/m^3$ )



$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon$$

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y = \frac{\sigma_y^2}{2E}$$

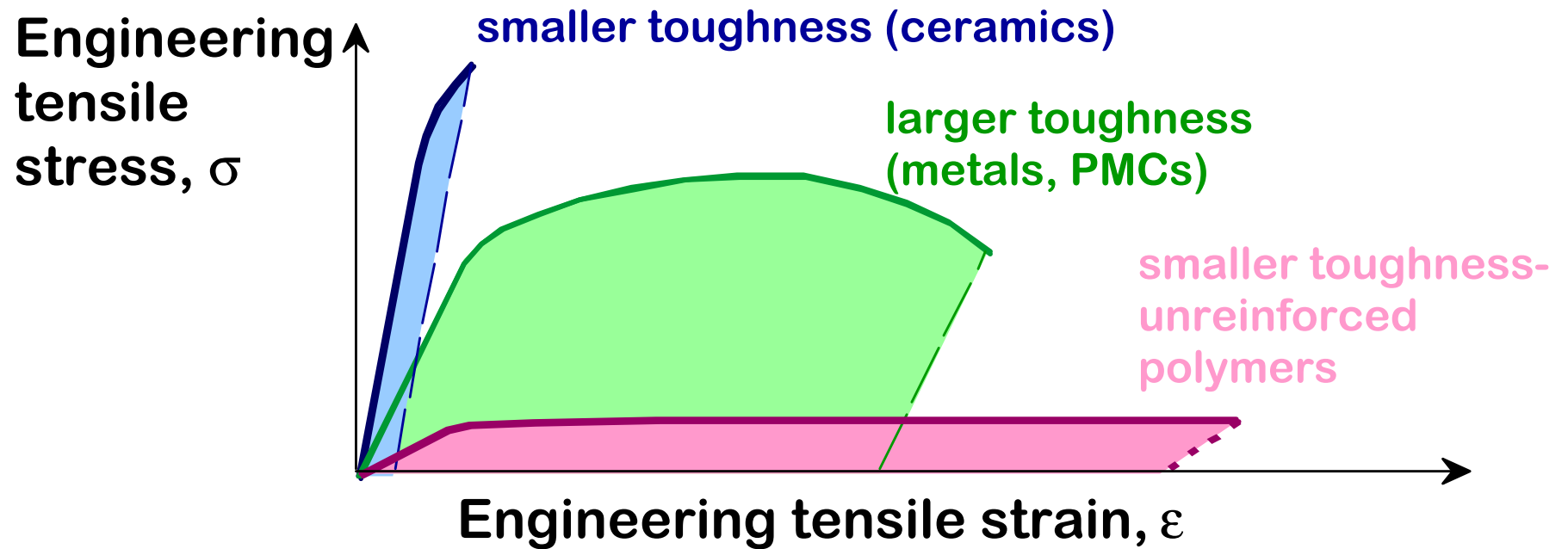
برای مواد با رفتار الاستیک خطی:

• موادی که خاصیت ارتجاعی خوبی دارند، دارای استحکام تسلیم بالا و مدول الاستیسیته پایین می باشند. (ساخت فنرها)

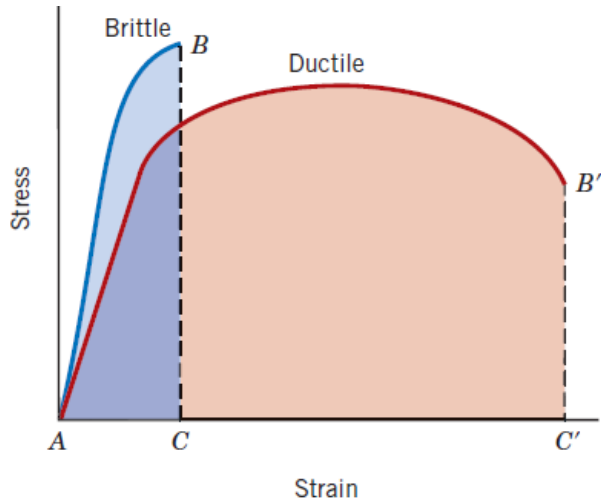
# چقرمگی - Toughness

- دو تعریف گوناگون برای چقرمگی وجود دارد:
  1. چقرمگی شکست خاصیتی از ماده است که بیانگر میزان مقاومت ماده در برابر شکست، در زمان حضور ترک در ماده میباشد.
  2. بیان دیگر چقرمگی، توانایی ماده در میزان جذب انرژی و انجام تغییر شکل پلاستیک، قبل از شکست میباشد.
- از آنجائیکه در عمل، امکان ناپذیر یا بسیار پر هزینه است تا ماده ای ساخت که بدون هرگونه عیبی باشد و یا در طول کارکرد دچار عیب و ترک نشود، لذا چقرمگی شکست یکی از خواص مهم مکانیکی در طراحی مواد سازه ای میباشد.
- اندازه گیری چقرمگی شکست در دو شرایط متفاوت:
  1. شرایط بارگذاری استاتیکی
  2. شرایط بارگذاری دینامیکی با نرخ کرنش بالا

# چقرمگی - Toughness



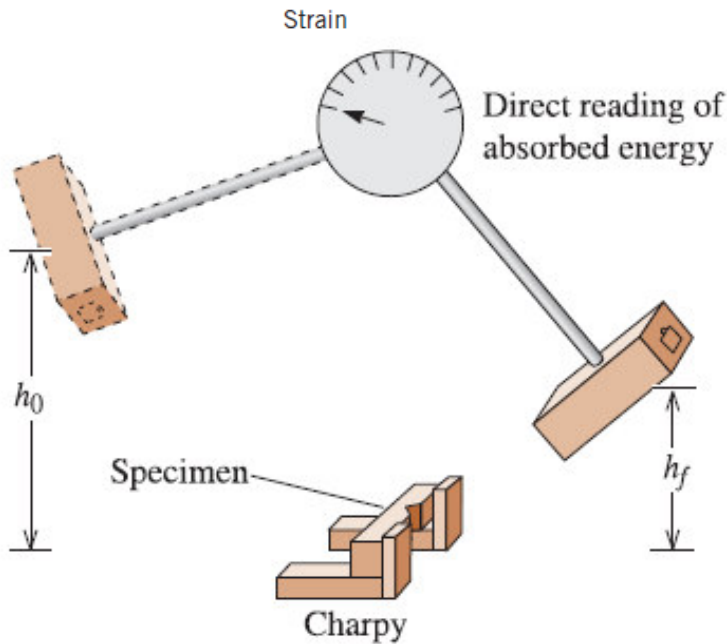
# چقرمگی



- در شرایط بارگذاری استاتیکی (نرخ کرنش پایین)، برای اندازه گیری چقرمگی از نتایج تست کشش استفاده میشود.

- در این حالت چقرمگی برابر است با مساحت زیر نمودار تنش-کرنش تا نقطه شکست (واحد  $J/m^3$ ).

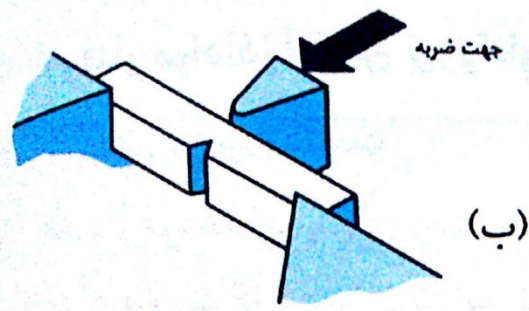
- در شرایط بارگذاری دینامیکی (نرخ کرنش بالا) از تست ضربه برای یک قطعه شکاف دار (notch) استفاده میشود.



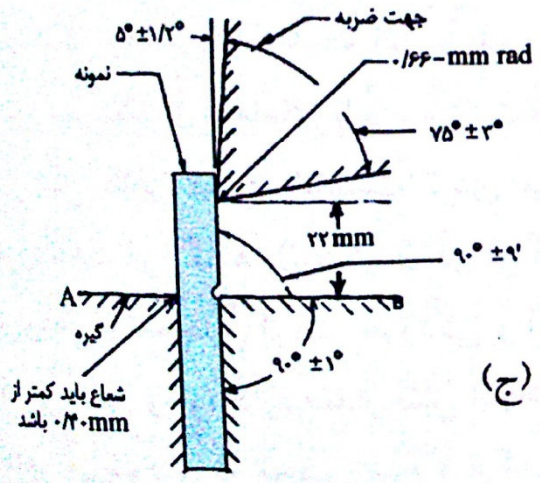
- برای چقرمگی بالا، فلز باید مستحکم و در عین حال شکل پذیر باشد.

- مواد ترد با وجود استحکام بالا، دارای چقرمگی کمتری نسبت به مواد شکل پذیر هستند.

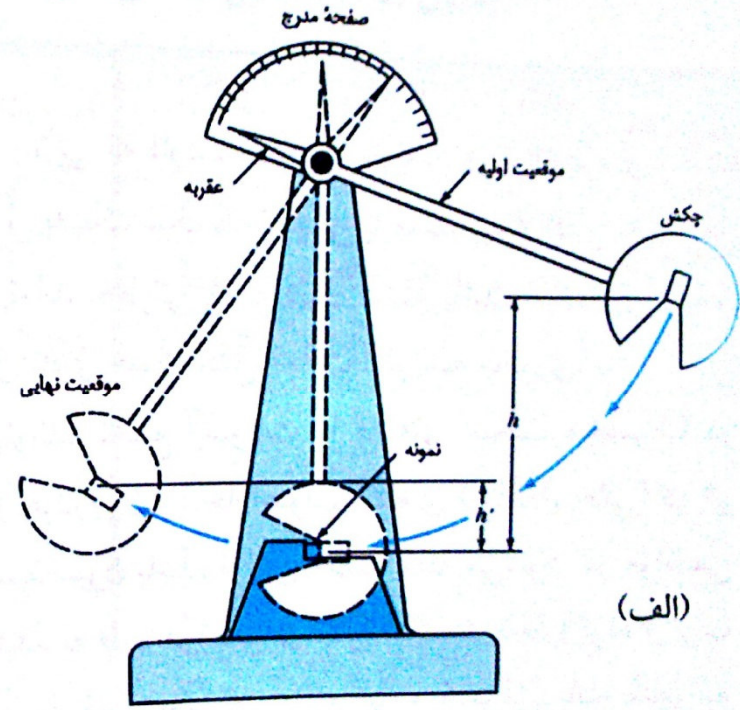




(ب)

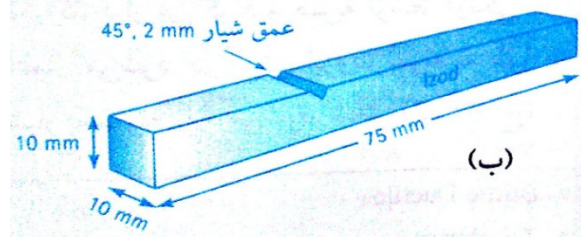


(ج)

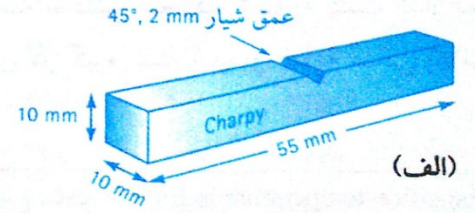


(الف)

شکل (۵-۴۶): (الف) شکل شماتیکی از دستگاه آزمایش ضربه، (ب) نحوه قرار گرفتن نمونه در دستگاه در روش چارپی، (ج) نحوه قرار گرفتن نمونه درون دستگاه آزمایش در روش ایزود، [۳].



(ب)



(الف)

شکل (۵-۴۷): نمونه استاندارد ضربه برای: (الف) روش چارپی، (ب) روش ایزود

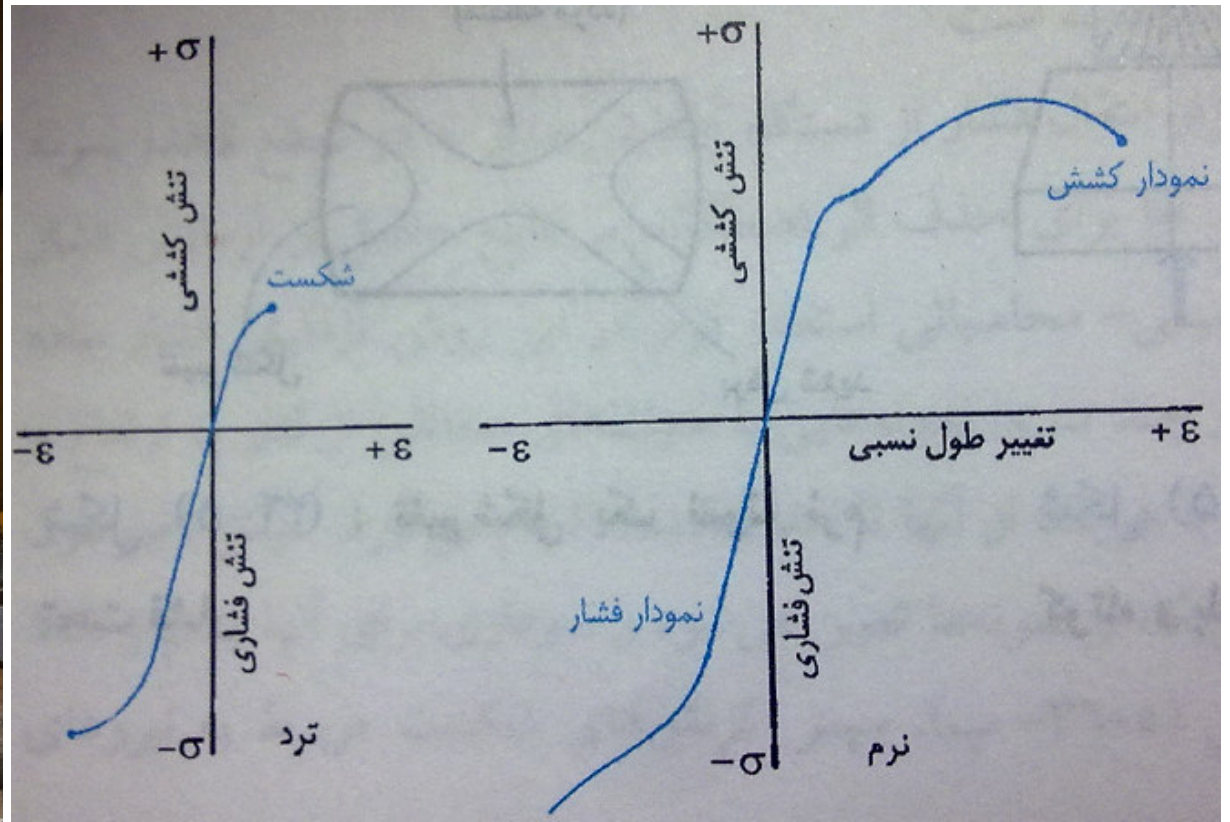
# مطالعه رفتار مواد در مقابل فشار

## ۱- آزمایش فشار – ASTM E9

- چنانچه قطعه در عمل تحت نیروهای فشاری باشد و خواص آن مورد نیاز باشد، از آزمایش تست فشار (compression test) استفاده میشود.
  - اساس این آزمایش همانند تست کشش است، تنها نیروی اعمالی فشاری است.
  - در این حالت، نیرو، تنش و کرنش منفی میباشند.
  - مزایا و معایب تست فشار:
1. تست کشش به دلیل راحتی انجام، مقبولیت بیشتری دارد.
  2. تست فشار برای موادی که تحت کرنشهای زیاد و تغییر شکل پلاستیک قرار دارند، مطلوب است. (پدیده گلویی شدن در تست کشش)
  3. برای موادی که در کشش ترد هستند (بتون) کاربرد دارد.
  4. مشکل بشکه ای شدن و یا کمانش در تست فشار.

# مطالعه رفتار مواد در مقابل فشار

## آزمایش فشار – ASTM E9



# مطالعه رفتار مواد در مقابل فشار

## آزمایش فشار – ASTM E9

- در زمینه تست فشار موارد زیر قابل توجه است:
- مدول الاستیکی مواد در فشار و کشش یکسان است.
- در مواد نرم نتایج بدست آمده از آزمایش فشار و کشش یکسان است.
- در مواد ترد نتایج حاصل از تست کشش و فشار تفاوت قابل ملاحظه ای با یکدیگر خواهند داشت.
- استحکام فشاری تنش است که به ازای آن اولین نشانه از ترک یا شکست روی سطح نمونه ظاهر می شود (  $\sigma = \frac{F_{\max}}{A_0}$  )
- بر خلاف آزمایش کشش از آغاز تغییر شکل تا لحظه شکست نیرو افزایش می یابد زیرا سطح مقطع نمونه تا لحظه شکست افزایش می یابد.

# مطالعه رفتار مواد در مقابل فشار

ASM International

(a) کمانش -  $L/D > 5$

(b) برش -  $L/D > 2.5$

(c) بشکه ای شدن دوبل -  $L/D > 2$  و اصطکاک موجود

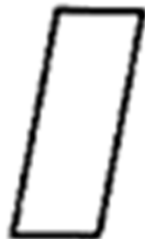
(d) بشکه ای شدن -  $L/D < 2$  و اصطکاک موجود

(e) تغییر شکل همگن -  $L/D < 2$  و عدم وجود اصطکاک

(f) تغییر شکل نا پایدار در مواد نرم



(a)



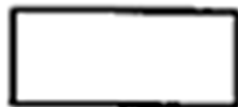
(b)



(c)



(d)



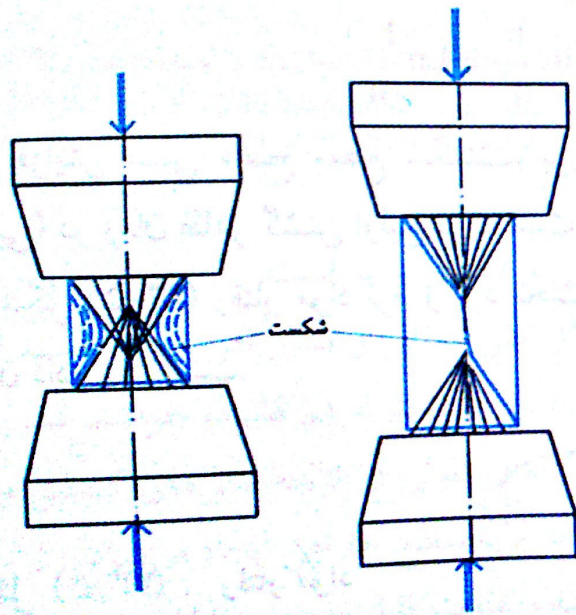
(e)



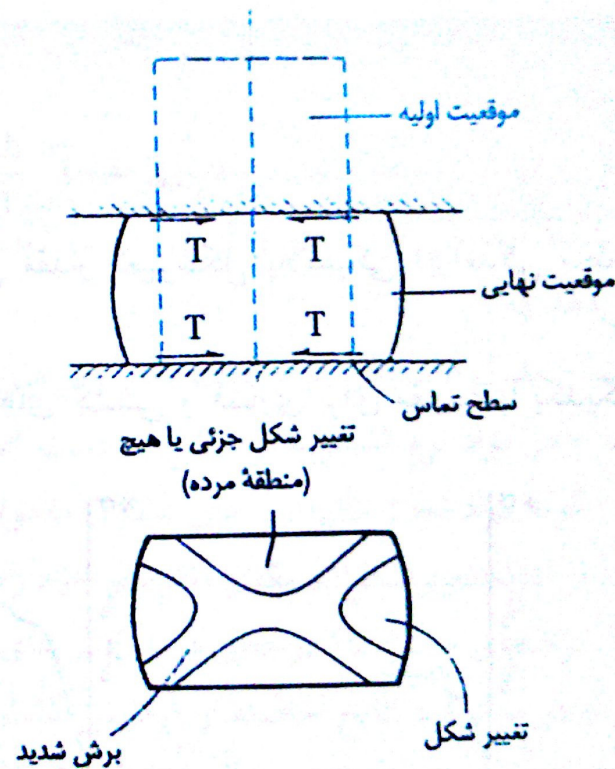
(f)

# عوامل تاثیر گذار بر نتایج آزمایش فشار

## ۱- حالت تنش و اصطکاک



شکل (۳۵-۵) : شکست دو نمونه ترد کوتاه و بلند تحت فشار



شکل (۳۴-۵) : تغییر شکل یک نمونه نرم تحت فشار

## عوامل تاثیر گذار بر نتایج آزمایش

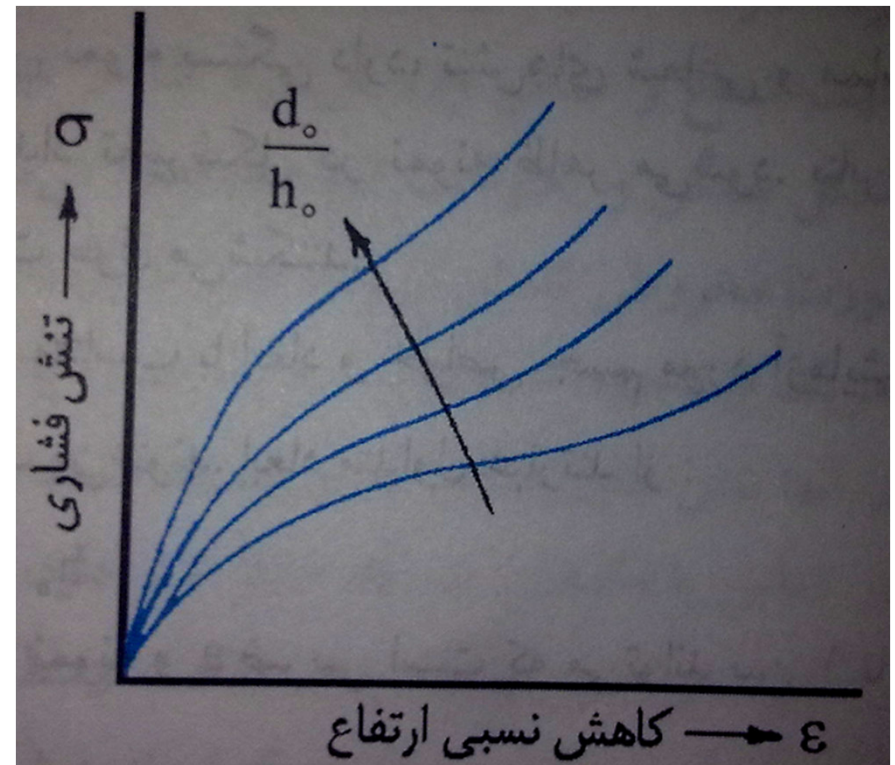
۳- میزان پرداختکاری سطح نمونه

۴- شکل نمونه

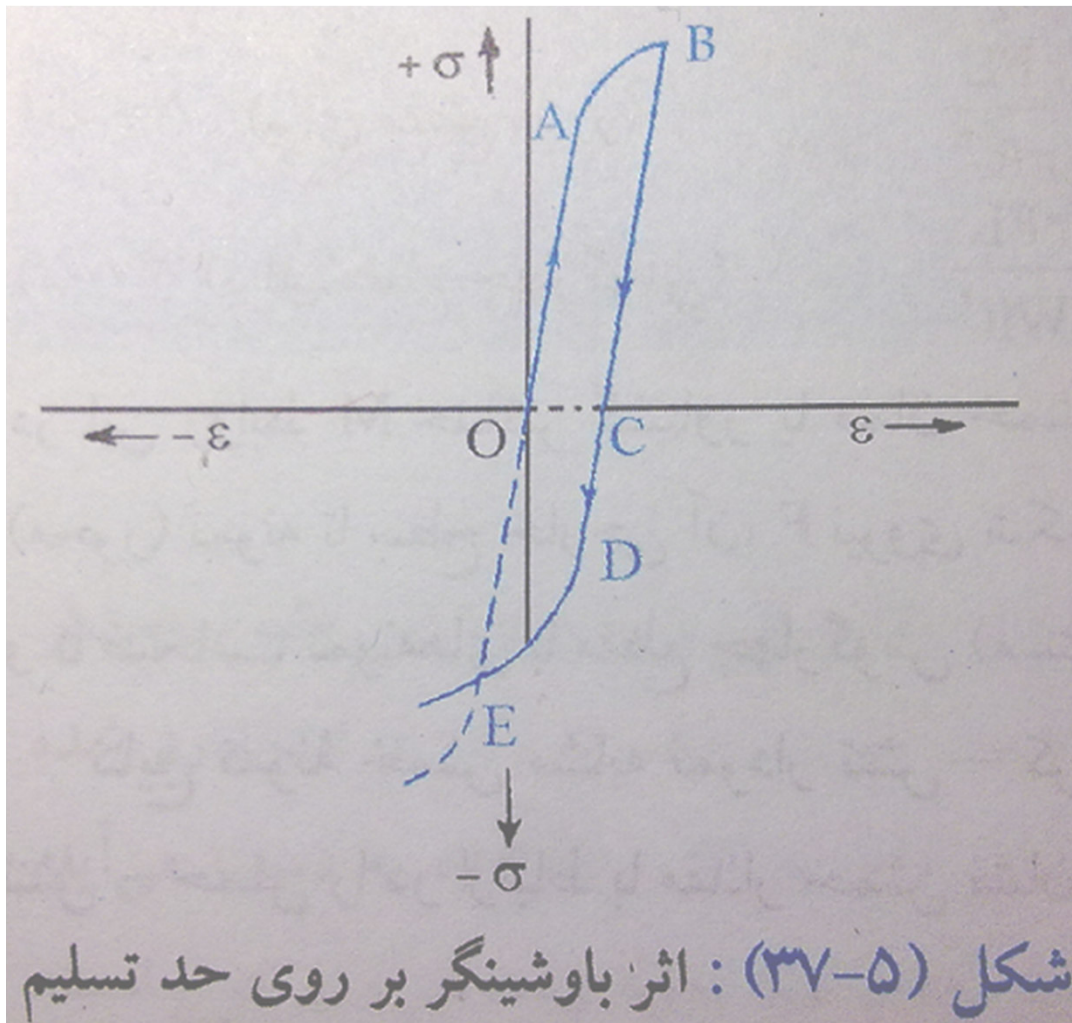
معمولا نمونه های استوانه ای شکل استحکام بیشتری نسبت به نمونه های مکعبی با همان سطح قاعده و ارتفاع نشان می دهد

۲- نسبت ارتفاع به قطر نمونه

- توصیه می شود از نمونه هایی استفاده شود که نسبت ارتفاع به قطر نمونه ۲ باشد.
- سطوح تماس قطعه و ابزار به حد کافی روغنکاری شود



**اثر باوشینگر:** نمونه ای در تست کشش ابتدا تا نقطه B تحت نیروی کششی قرار می دهیم. در اینجا نقطه A تنش تسلیم ماده را نشان می دهد. سپس بار را از نمونه برداشته (BC) و نمونه را تحت فشار قرار می دهیم. در این حالت منحنی CDE را بدست می آوریم. در این حالت مقدار تنش در نقطه D تسلیم در فشار را نشان می دهد. تسلیم در فشار کمتر از تسلیم در کشش است. اختلاف بین تسلیم کشش و فشار را اثر باوشینگر می نامند.

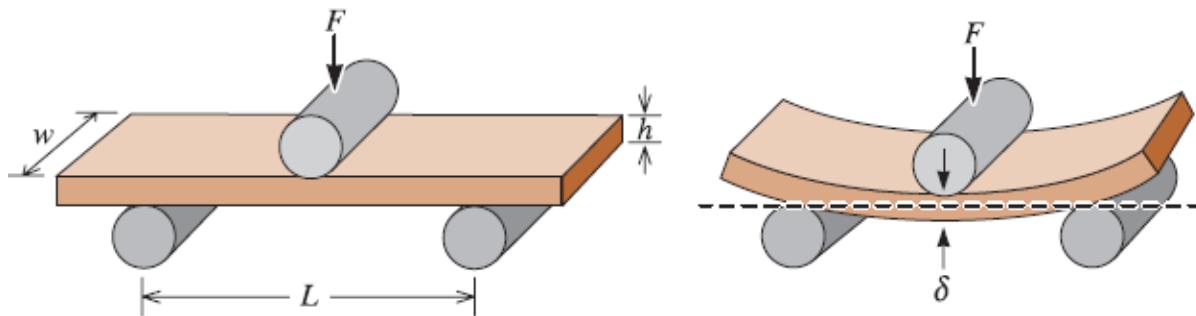




# مطالعه رفتار مواد در مقابل خمش

## آزمایش خمش سه نقطه ای

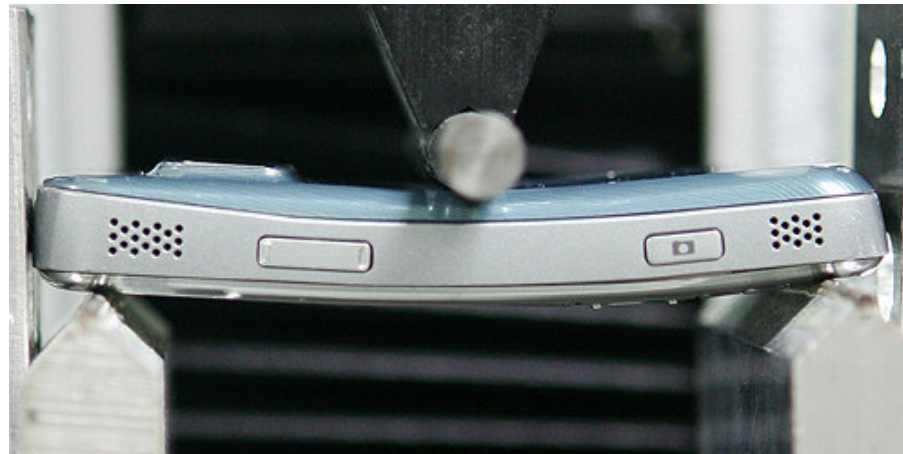
- در شرایطی که قطعه در معرض بار خمشی قرار دارد و استحکام خمشی قطعه مد نظر باشد، از تست خمش (bending test) استفاده میشود.
- قطعه در بین دو تکیه گاه قرار میگیرد. سپس وسط قطعه توسط یک (خمش سه نقطه) یا دو تکیه گاه (خمش چهار نقطه) در معرض بارگذاری قرار میگیرد.
- توزیع تنش کششی و فشاری در طول سطح مقطع هنگام خمش متغیر است.



# مطالعه رفتار مواد در مقابل خمش

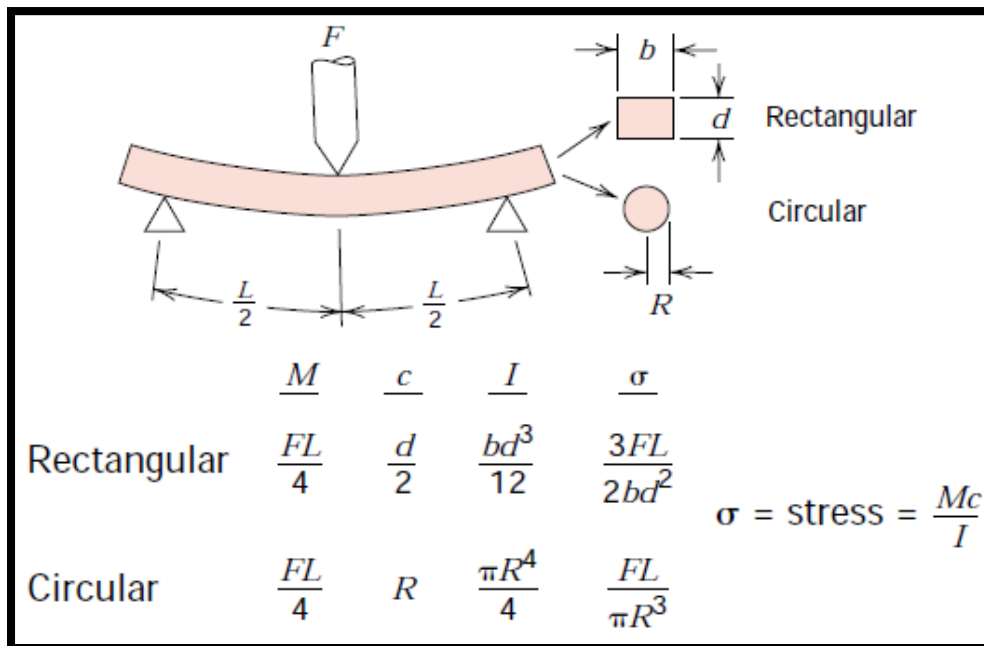
## آزمایش خمش سه نقطه ای

- در تعیین خواص مواد ترد همچون سرامیکها نمیتوان از تست کشش استفاده نمود. به سه علت زیر:
  1. تهیه قطعه خاص تست کشش مشکل است.
  2. قسمتهایی که داخل گیره دستگاه قرار میگیرد، خرد میشوند.
  3. کرنش بسیار کمی به آنها میتوان اعمال نمود.
- بنابراین برای تعیین خواص این مواد از تست خمش استفاده میشود. بارگذاری معمولاً تا شکست قطعه ادامه می یابد.
- از تست خمش، استحکام خمشی، استحکام شکست و مدول شکست مواد ترد یافت میشود.



# مطالعه رفتار مواد در مقابل خمش

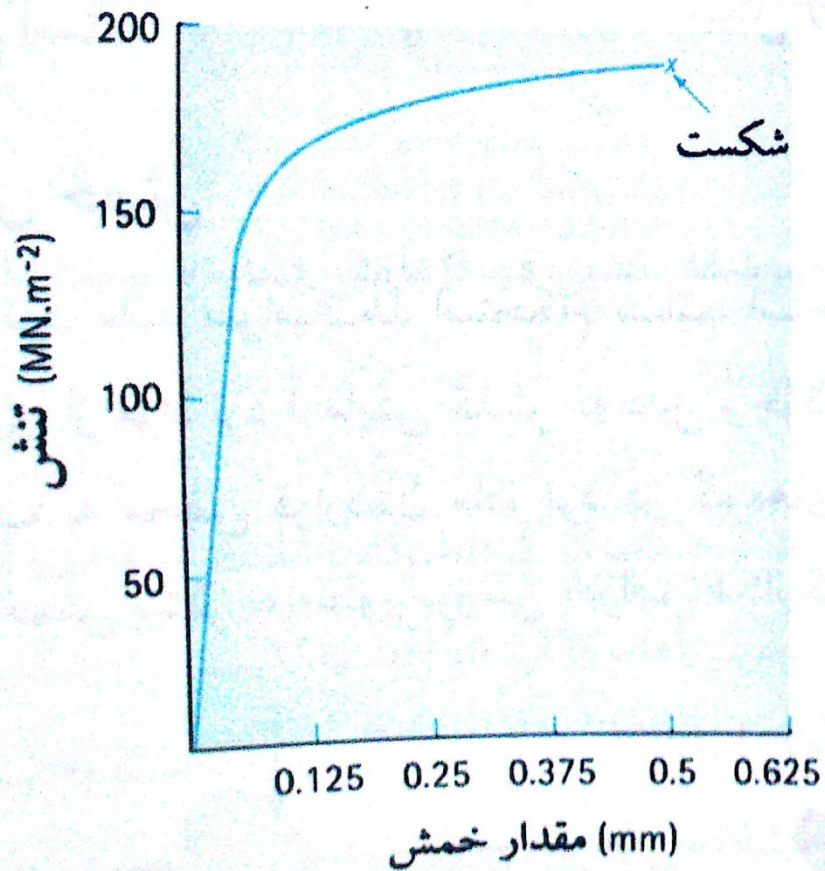
## آزمایش خمش سه نقطه ای



در کل، تنش نشات گرفته از بارگذاری و کرنش نشات گرفته از تغییر شکل موجود در جسم است. اما تنش و کرنش از هم مستقل نبوده و توسط خواص مکانیکی به هم مربوطند.

Material	Tensile Strength (psi)	Compressive Strength (psi)	Flexural Strength (psi)
Polyester—50% glass fibers	23,000	32,000	45,000
Polyester—50% glass fiber fabric	37,000	27,000 <sup>a</sup>	46,000
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99% pure)	30,000	375,000	50,000
SiC (pressureless-sintered)	25,000	560,000	80,000

# آزمایش خمش سه نقطه ای



شکل (۵-۳۹): نمودار تنش - خمش

برای Mgo، [۱].

# سختی (hardness)

- سختی بیانگر میزان مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک موضعی ماده (فرورفتگی) میباشد.
- آزمایشهای اولیه برای تعیین سختی بر مبنای توانایی یک ماده در خراش ماده دیگر بود. معیار کیفی آن موس Mohs نام داشت و برای نرمترین ماده مثل طلق یک و برای سخت ترین ماده مثل الماس ۱۰ بود.
- در آزمایشهای اخیر، یک جسم کوچک تحت شرایط خاص به سطح ماده مورد آزمایش فشرده میشود. عمق و سائز فرورفتگی ایجاد شده اندازه گیری و به سختی جسم مرتبط میشود.
- در مواد نرم، عمق فرورفتگی بیشتر و شماره سختی کوچکتر است.
- اعداد سختی همگی نسبی هستند.

# سختی (hardness)

## • دلایل اهمیت آزمایش سختی

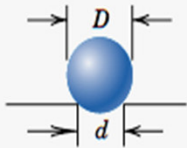
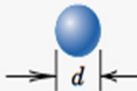
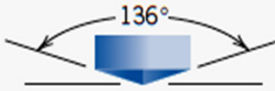
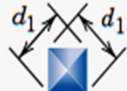
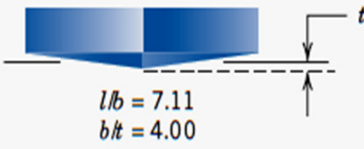
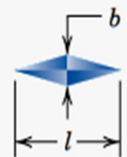
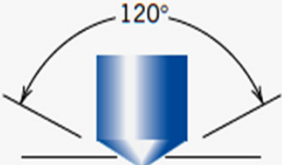

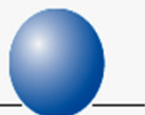

- I. تستهای سختی بسیار بیشتر از تستهای دیگر مورد استفاده است. به دلایل زیر:  
این تستها ساده و ارزان هستند. نیاز به تهیه قطعات خاص نیست و ابزار انجام آن ارزان است.
- II. آزمایش غیر مخرب است.
- III. برخی دیگر از خواص ماده نظیر استحکام کششی از این آزمایش بدست می آید.

## • انواع تستهای سختی

1. راکول – Rockwell
2. برینل – Brinell
3. نوپ و ویکرز – Knoop and Vickers

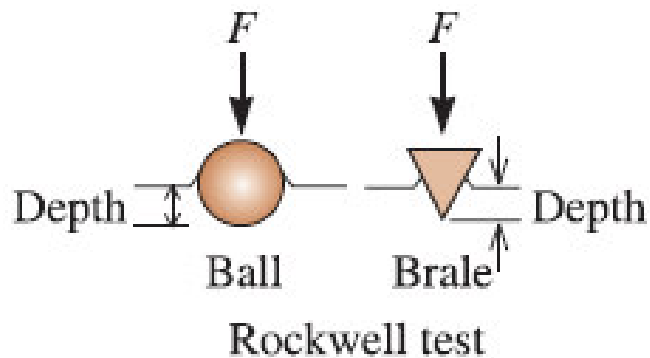
# سختی (hardness) • انواع تستهای سختی

**Table 6.5** Hardness-Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number <sup>a</sup>
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			$P$	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			$P$	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			$P$	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> <li>{ Diamond cone;</li> <li>{ <math>\frac{1}{16}</math>, <math>\frac{1}{8}</math>, <math>\frac{1}{4}</math>, <math>\frac{1}{2}</math> in.-diameter steel spheres</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>60 kg</li> <li>100 kg</li> <li>150 kg</li> </ul> Rockwell	
				<ul style="list-style-type: none"> <li>15 kg</li> <li>30 kg</li> <li>45 kg</li> </ul> Superficial Rockwell	

# سختی (hardness)

## تست سختی راکول - ASTM E18



- یکی از رایج ترین تستهای سختی سنجی است.
- دو نوع سنبه دارد: کرووی از جنس فولاد سخت و مخروطی از جنس الماس
- سنبه کرووی دارای قطرهای مختلف است.
- در تعیین سختی دو بارگذاری فرعی و اصلی صورت میگیرد. در بارگذاری فرعی اولیه، مقدار بار کمتری اعمال شده ( $10\text{kg}$ ) و سپس در بارگذاری اصلی، بار بزرگتری اعمال می شود.
- این امر به دلیل افزایش دقت آزمایش است.
- دو نوع سختی سنجی راکول: راکول - راکول سطحی



# سختی (hardness)

## تست سختی راکول

**Table 6.6a Rockwell Hardness Scales**

Scale Symbol	Indenter	Major Load (kg)
A	Diamond	60
B	$\frac{1}{16}$ -in. ball	100
C	Diamond	150
D	Diamond	100
E	$\frac{1}{8}$ -in. ball	100
F	$\frac{1}{16}$ -in. ball	60
G	$\frac{1}{16}$ -in. ball	150
H	$\frac{1}{8}$ -in. ball	60
K	$\frac{1}{8}$ -in. ball	150

- تست راکول سطحی برای قطعات نازک کاربرد دارد.
- ترکیبات گوناگون بار فرعی و بار اصلی بعلاوه نوع سنبه در آزمایش راکول نامگذاری می شود.
- در نهایت نتاج تست بصورت عدد سختی و نوع بارگذاری معرفی می شوند: **80HRB**
- **HR** معرف تست سختی راکول و **B** معرف نوع بارگذاری است.

بارگذاری ثانویه	بارگذاری اولیه	راکول
60-100-150	10 kg	راکول
15-30-45	3 kg	راکول سطحی

# سختی (hardness)

## تست سختی راکول

- حداکثر سختی راکول ۱۳۰ می تواند باشد. هرچند که اعداد بالای ۱۰۰ و زیر ۲۰ غیر دقیق می باشند.
- دلایل بوجود آمدن خطا در سختی سنجی راکول:
  - قطعه خیلی نازک باشد؛ ضخامت باید حداقل ۱۰ برابر میزان فرورفتگی باشد.
  - فرورفتگی نزدیک لبه ایجاد شود.
  - دو فرو رفتگی نزدیک هم ایجاد شوند. فاصله بین مراکز فرو رفتگی به قطر  $d$  حداقل  $3d$  باشد.

# سختی (hardness)

## تست سختی راکول

- عدد سختی راکول از رابطه  $R=C_1-C_2t$  بدست می آید که در آن  $C_1$  و  $C_2$  اعداد ثابتی هستند. برای مخروط الماسی  $C_1$  برابر ۱۰۰ و برای ساچمه فولادی برابر ۱۳۰ می باشد. ضمن اینکه برای هر دو نوع  $C_2$  برابر ۵۰۰ می باشد.

## • امتیازات روش راکول

- سرعت عمل بالا، چون سختی مستقیماً از طریق صفحه مدرج خوانده می شود.
- برای اندازه گیری سختی های بالا مناسب است

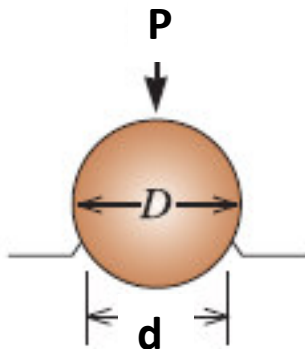
# سختی (hardness)

## تست سختی برینل - ASTM E10

- در این آزمایش یک سنبه کرومی شکل با قطر 10 mm بر روی سطح فلز اثرگذاری میکند. جنس آن از فولاد سخت شده یا کربید تنگستن است.
- میزان بار بین 500-3000 kg است که با پله های 500 kg افزایش می یابد.
- حین تست بار به مدت چند ثانیه (10-30 s) ثابت نگه داشته میشود.
- سختی برینل HB تابعی از سایز فرورفتگی ایجاد شده و میزان بار اعمالی است.
- قطر فرورفتگی توسط میکروسکوپ مخصوص که مقیاس اندازه گیری روی عدسی آن مدرج شده است، اندازه گیری می شود.

$$HB = \frac{2P}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

- P بار، D قطر کره اثر گذار و d قطر حفره ایجاد شده است.
- سختی برینل از جنس تنش است.



Brinell test

# سختی (hardness)

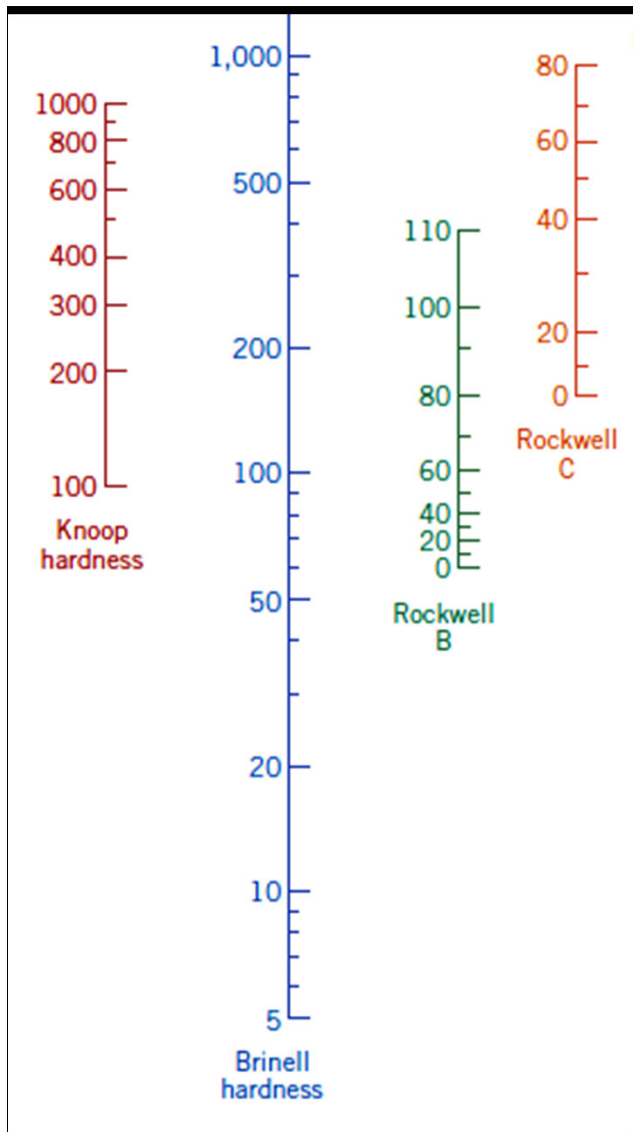
## تست سختی نوپ و ویکرز – ASTM E92

- در این روش، یک سنبه هرمی شکل از جنس الماس برای سختی سنجی بکار میرود.
- نیروی اعمالی بسیار کمتر از تستهای راکول و برینل است و بین 1-1000 g است.
- قطر فرورفتگی توسط میکروسکوپ مخصوص اندازه گیری می شود.
- سطح جسم در این روش باید به دقت صاف و صیقلی شود.
- در این روش فرو رفتگی ایجاد شده بسیار کوچک است. لذا برای سطوح کوچک نیز قابل اجرا هستند.
- تست سختی نوپ را میتوان برای مواد ترد نیز بکار برد.

$$HK = \frac{14.2P}{l^2} , HV = \frac{1.854P}{d_1^2}$$

- P بار و  $d_1$  و l حداکثر قطر فرورفتگی ایجاد شده در جسم است.

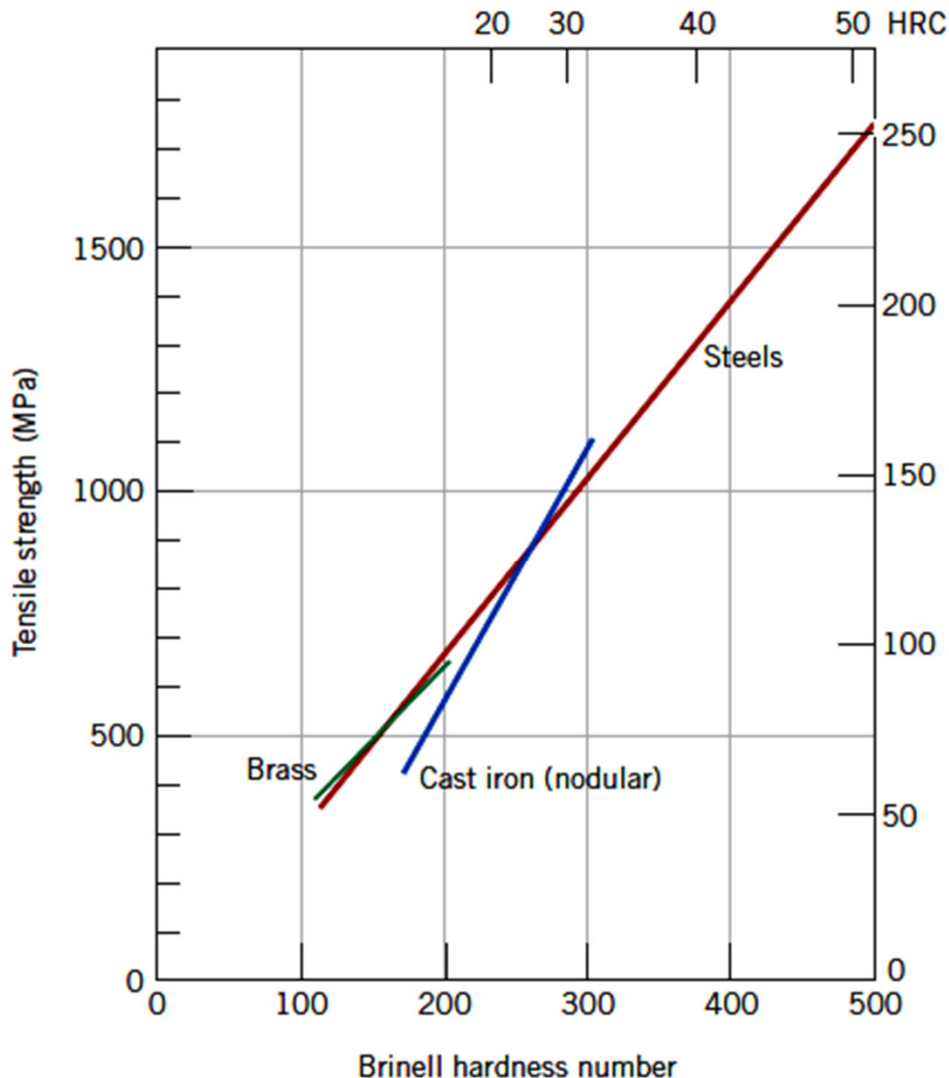
# سختی (hardness)



## تبدیل معیارهای سختی به یکدیگر – ASTM E140

- بعضا نیاز است تا مقیاسهای سختی بدست آمده از یک روش به مقیاس دیگر تبدیل شود.
- سختی خاصیتی از ماده است که تعریف دقیقی ندارد و نیز بین روشهای مختلف سختی سنجی تشابهی وجود ندارد.
- لذا روش تبدیل فراگیری برای سختی سنجی به روشهای مختلف وجود ندارد.
- چگونگی تبدیل مقیاسهای مختلف با توجه به نوع ماده و از روشهای تجربی مشخص میشود.

# سختی (hardness)



## ارتباط سختی با استحکام کششی

- استحکام کششی و سختی ارتباط تنگاتنگی دارند.
- البته مطابق شکل این ارتباط برای تمامی مواد خطی نیست.
- در اغلب فولادها رابطه سختی برینل و استحکام کششی بصورت زیر است:

$$TS (MPa) = 3.45 \times HB$$

# سیستم‌های آلیاژی



## تبلور ابتدایی یا کریستالیزاسیون

اتمها در حالت مایع و گاز به شکل منظمی کنار هم قرار نمی گیرند و پیوسته در حال حرکتند.

با شروع انجماد بلوری شدن مذاب شروع می شود و این عملیات در دو مرحله به انجام می رسد:

۱- جوانه زنی

۲- رشد جوانه

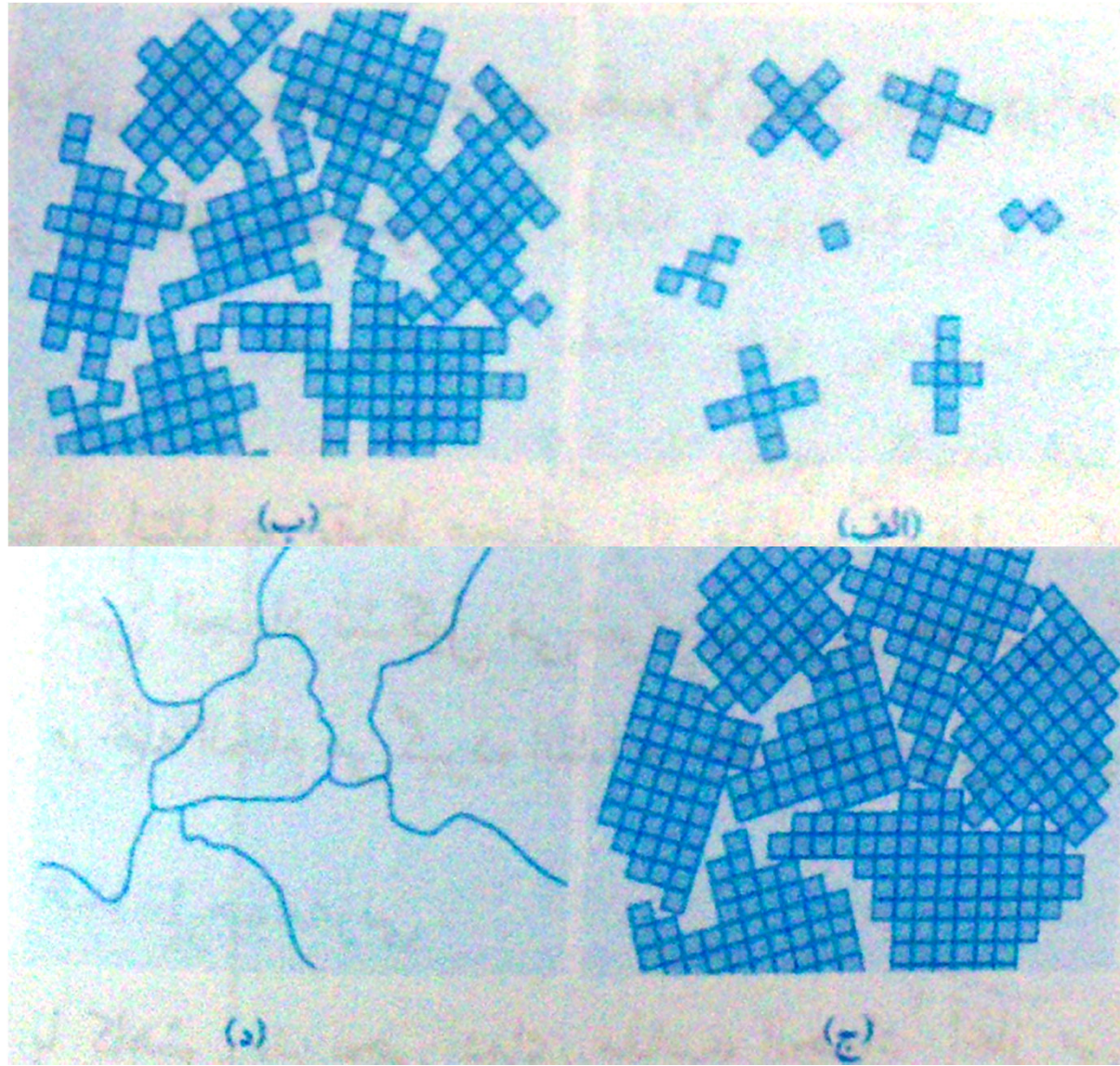
## ۱- جوانه زنی

- با کاهش تدریجی دما انجماد آغاز می شود. ابتدا در نقاط مختلف مذاب که حرکت کندتری دارند به شکل منظمی کنار هم قرار می گیرند و کریستالهای کوچک به عنوان جوانه انجماد شکل می گیرند.
- اگر مذاب حاوی ناخالصی باشد برای تشکیل جوانه کاهش جزئی دما لازم است در حالیکه مذاب خالص کاهش دمای بیشتری نیاز دارد. جوانه زنی روی سطح ناخالصی به عنوان جوانه زنی ناهمگن معروف است.
- جوانه ها بسیار کوچک و ناپایدارند و ممکن است دوباره ذوب شوند. وقتی جوانه از اندازه بحرانی گذشت پایدار شده و می تواند رشد کند.

## ۲- رشد جوانه

رشد جوانه به سرعت انتقال حرارت از مذاب و قسمت منجمد شده به دیواره قالب و محیط اطراف بستگی دارد.

- جوانه رشد کرده تا جاییکه بلورهای مجاور به یکدیگر مماس می شوند. هر بلور با شکل خارجی متفاوت دانه نامیده می شود.
- تعداد و اندازه دانه تابع دو عامل است: سرعت جوانه زنی و سرعت رشد جوانه ها.
- هرچه سرعت جوانه زنی بیشتر باشد اندازه دانه ریزتر خواهد شد.

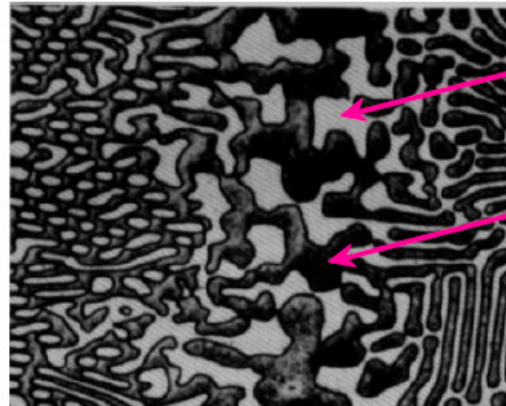


شکل شماتیکی به وجود آمدن دانه‌های کریستالی

# تعاریف

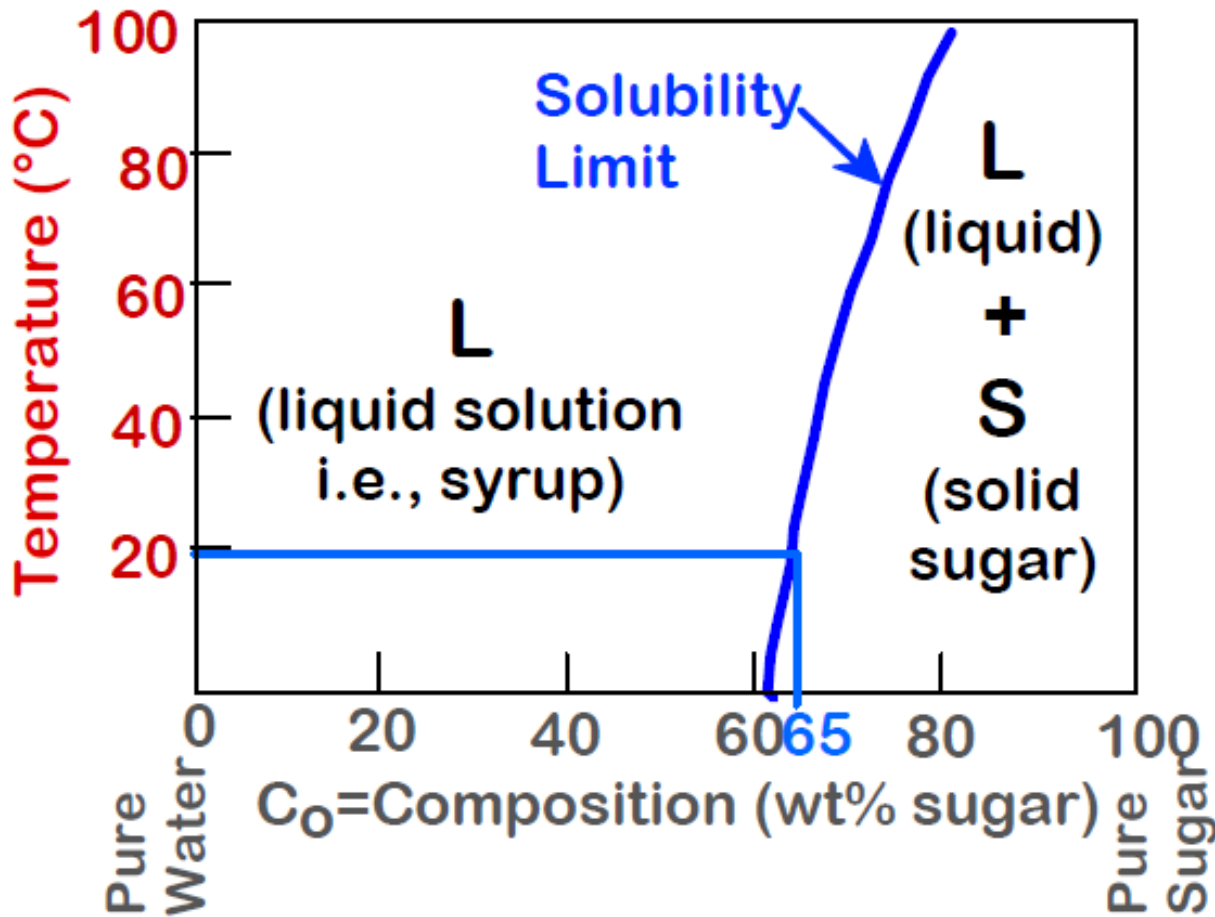
- ۱- **آلیاژ**: یک فلز پایه به همراه یک یا چند جزء دیگر.
- ۲- **سیستم آلیاژی**: تمام آلیاژهای ممکن که می تواند از چند جزء یا تعداد معینی جزء بدست آید.
- ۳- **فاز**: یک منطقه از ماده که دارای خواص فیزیکی و شیمیایی یکنواختی است.
- ۴- **محلول**: فازی با بیش از یک جزء
- ۵- **مخلوط**: ماده ای با بیش از فاز
- ۶- **حد حلالیت**: حداکثر از یک جزء که می تواند در دمای معین در جزء دیگر حل شود. این مقدار با افزایش دما افزایش می یابد.

Aluminum-Copper Alloy



$\beta$  (lighter phase)

$\alpha$  (darker phase)

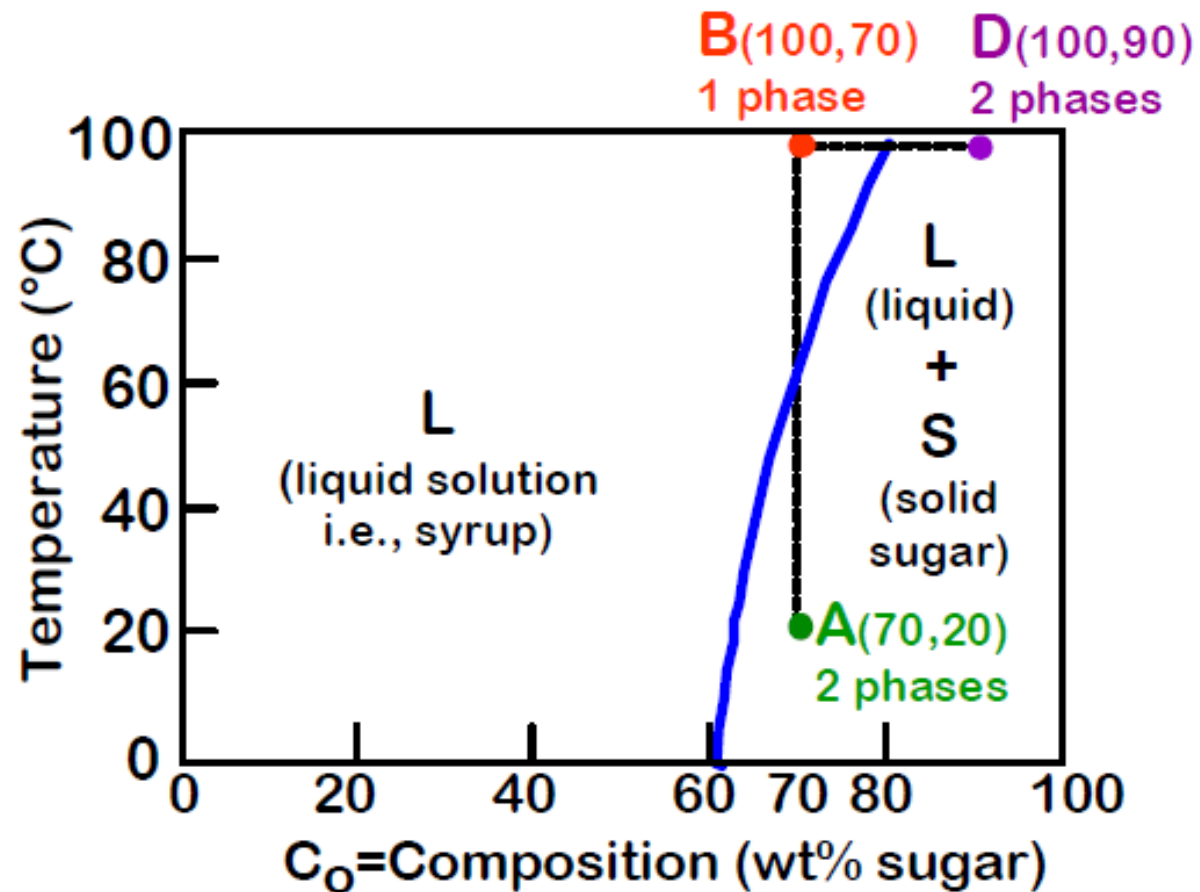


به عنوان مثال حد  
حلالیت در دمای  
۲۰ درجه سانتیگراد  
۶۵٪ وزنی شکر است.

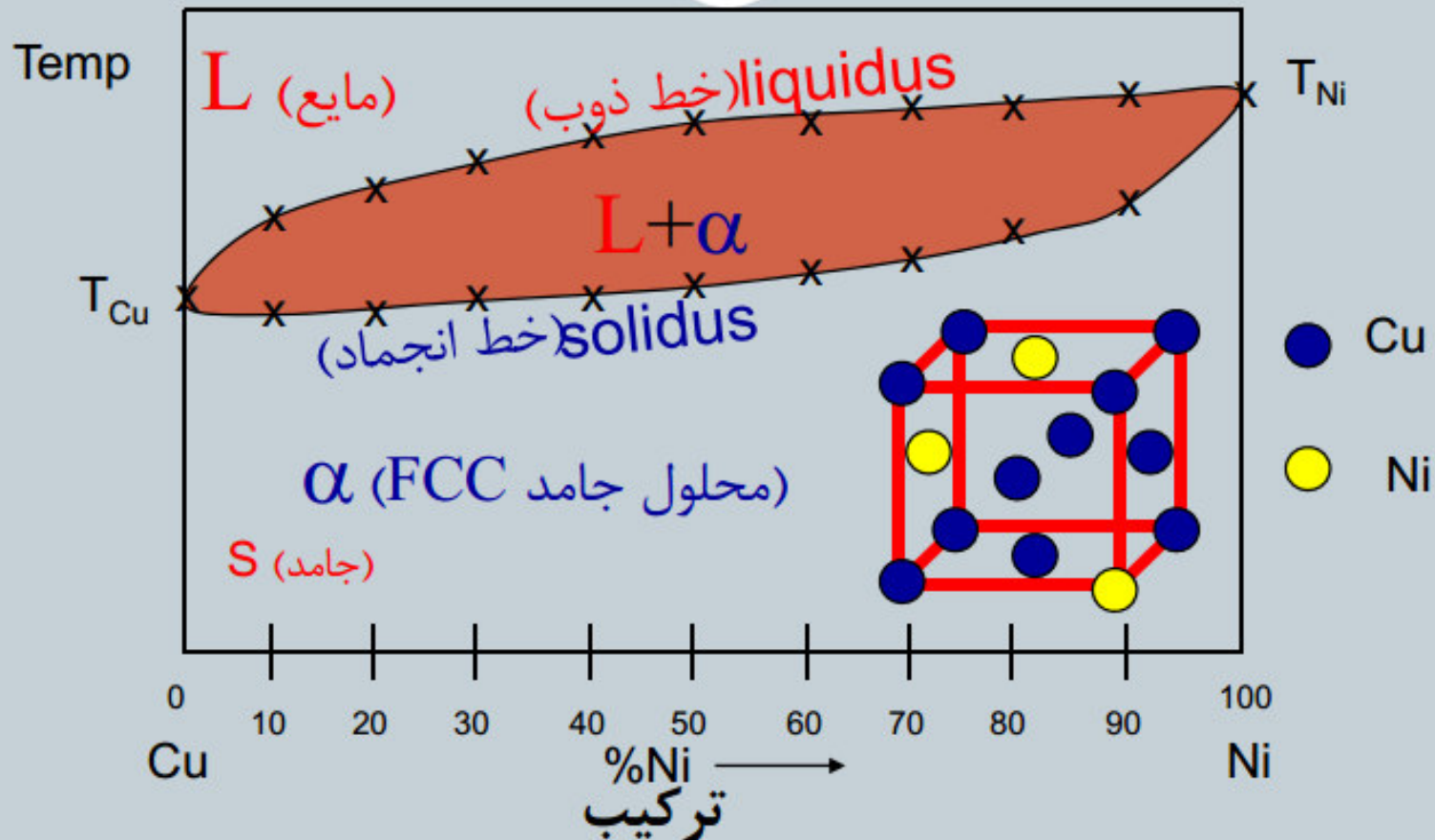
# اثرات دما و درصد اجزا بر روی فازها

- Changing  $T$  can change # of phases: path **A** to **B**.
- Changing  $C_o$  can change # of phases: path **B** to **D**.

- water-sugar system



# نمودار فازی دوتایی: انحلال کامل در حالت مایع و جامد

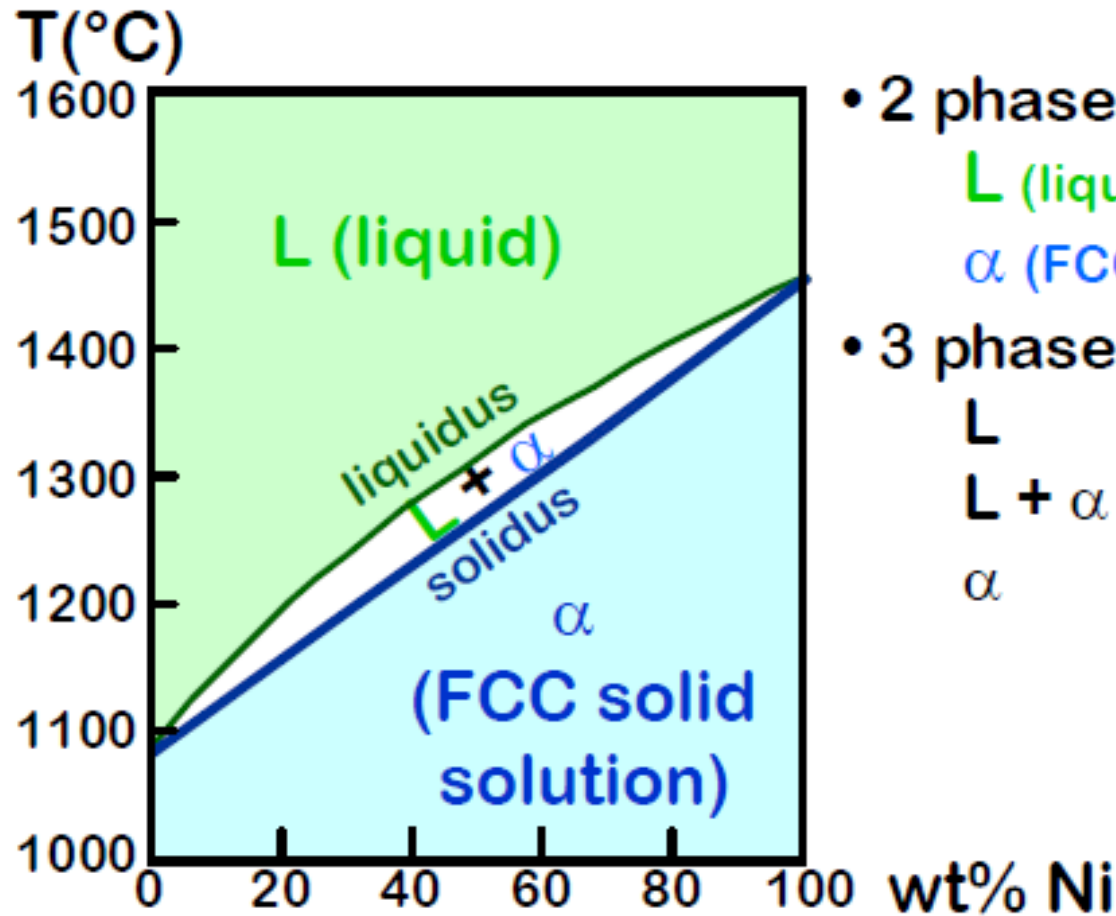


- مرز بین منطقه L و L+α را لیکوئیدوس / خط ذوب (LIQUIDUS) و مرز بین منطقه α و L+α را سالییدوس / خط انجماد (SOLIDUS) می نامند.
- منطقه بین خط ذوب و انجماد، گستره انجماد است.



# دیاگرام فازی مس-نیکل (نمودار فاز دو تایی)

- Phase Diagram for Cu-Ni system



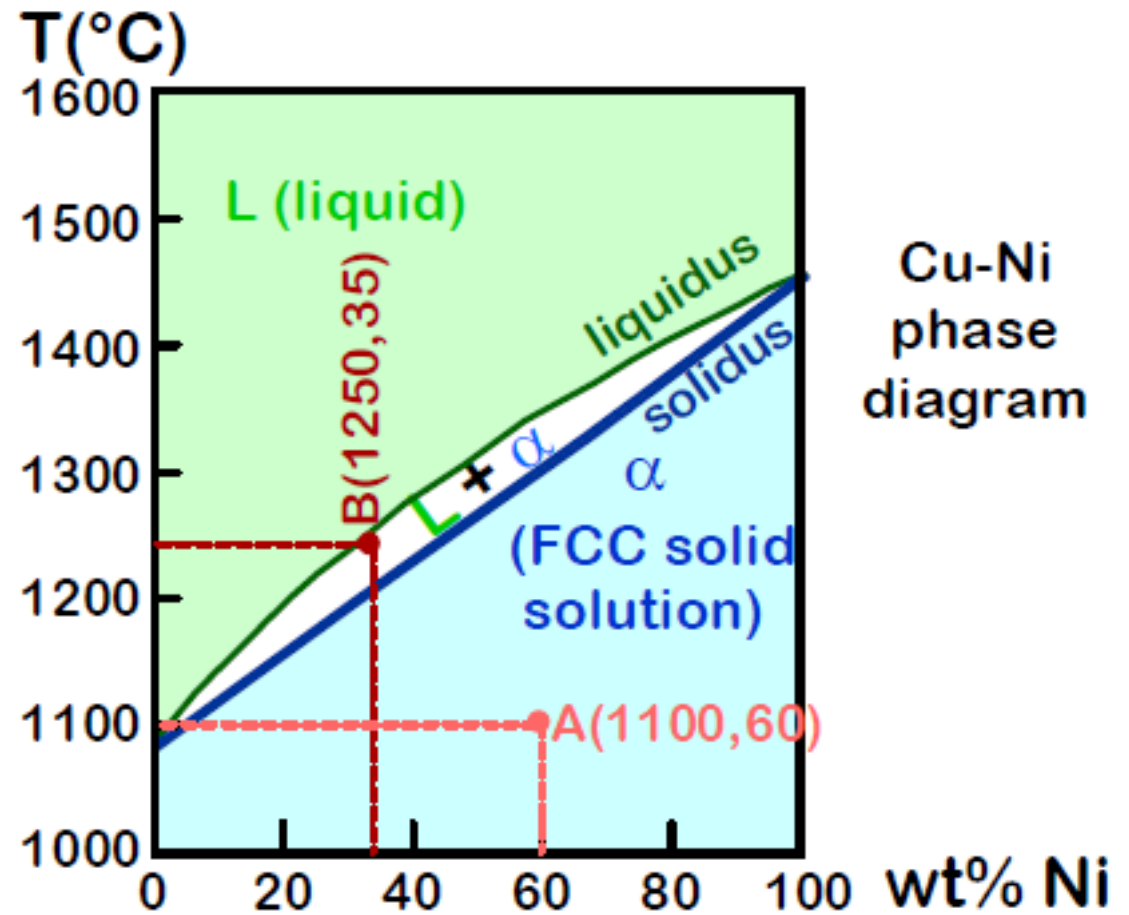
- 2 phases:
  - L (liquid)
  - $\alpha$  (FCC solid solution)
- 3 phase fields:
  - L
  - $L + \alpha$
  - $\alpha$

# دیاگرام فازی مس-نیکل

- **Examples:**

A(1100, 60):  
1 phase:  $\alpha$

B(1250, 35):  
2 phases: L +  $\alpha$



## مثال: دیاگرام تعادلی آب نمک

مخلوط ۱۰٪ و ۲۰٪ نمک را از محیط سرد می‌کنیم.

- ۱- محلول مایع تا زمانی که به خط \* می‌رسیم.
- ۲- یخ روی جداره تشکیل می‌شود تا به خط \*\* می‌رسیم.
- ۳- در زیر دمای ۲۱- درجه مخلوط جدایی ناپذیر یخ و نمک داریم.

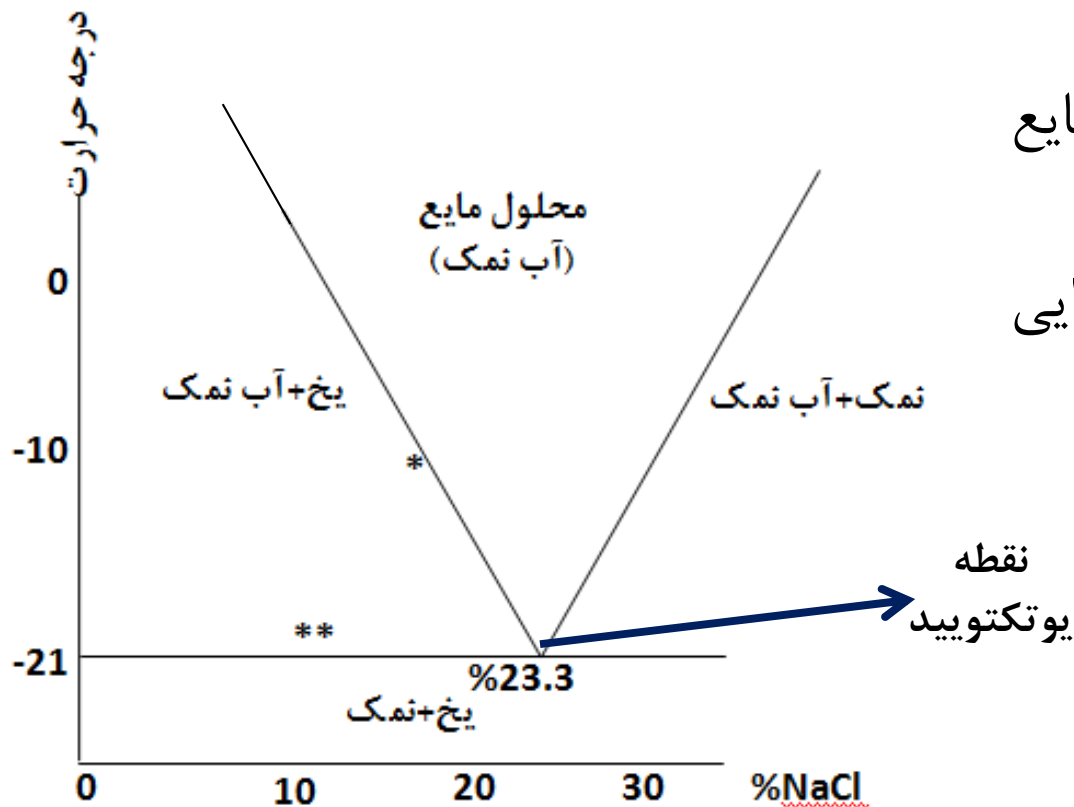
### برای مخلوط ۲۳.۳٪:

۱- تا دمای ۲۱- درجه محلول مایع داریم

۲- بعد از این دما مخلوط جدایی ناپذیر یخ و نمک داریم.

در نقطه یوتکتوئید:

مایع ← جامد + جامد



برای معرفی یک آلیاژ در دمای معین به چهار سوال باید پاسخ دهیم:

۱- ترکیب کلی عناصر و درصد هریک

۲- تعداد فازها

۳- ترکیب هر فاز

۴- نسبت فازها در کل

# ترکیب فازها

- با دانستن  $T$  (درجه حرارت) و  $C_0$  (ترکیب اجزاء) می توان ترکیب هر فاز را بدست آورد:

- Examples:**

$C_0 = 35\text{wt\%Ni}$

At  $T_A$ :

Only Liquid (L)

$C_L = C_0 (= 35\text{wt\% Ni})$

At  $T_D$ :

Only Solid ( $\alpha$ )

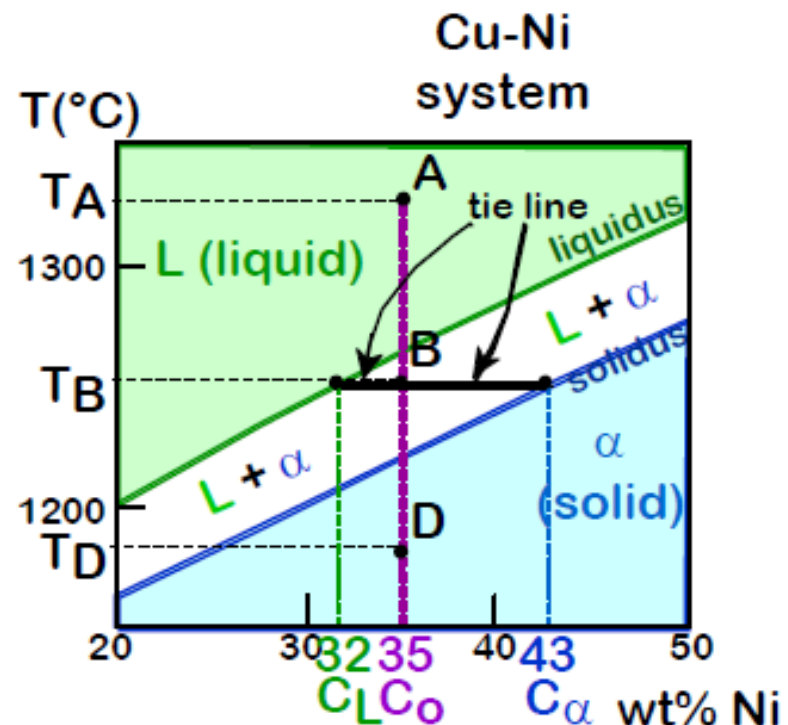
$C_\alpha = C_0 (= 35\text{wt\% Ni})$

At  $T_B$ :

Both  $\alpha$  and L

$C_L = C_{\text{liquidus}} (= 32\text{wt\% Ni here})$

$C_\alpha = C_{\text{solidus}} (= 43\text{wt\% Ni here})$



# ترکیب فازها-قانون اهرم

- با دانستن  $T$  (درجه حرارت) و  $C_0$  (ترکیب اجزاء) می توان ترکیب وزنی هر فاز را بدست آورد:

- Examples:**

$C_0 = 35\text{wt}\% \text{Ni}$

At  $T_A$ : Only Liquid (L)

$$W_L = 100\text{wt}\%, W_\alpha = 0$$

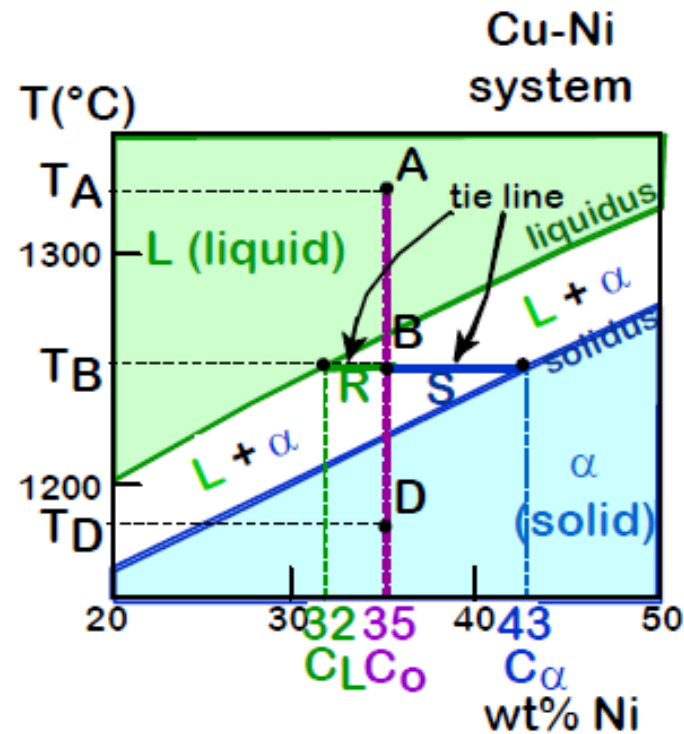
At  $T_D$ : Only Solid ( $\alpha$ )

$$W_L = 0, W_\alpha = 100\text{wt}\%$$

At  $T_B$ : Both  $\alpha$  and L

$$W_L = \frac{S}{R+S} = \frac{43 - 35}{43 - 32} = 73\text{wt}\%$$

$$W_\alpha = \frac{R}{R+S} = 27\text{wt}\%$$



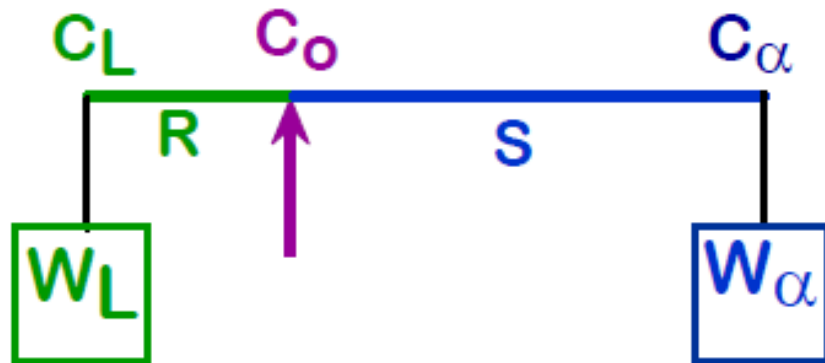
# قانون اهرم

- Sum of weight fractions:  $W_L + W_\alpha = 1$
- Conservation of mass (Ni):  $C_o = W_L C_L + W_\alpha C_\alpha$
- Combine above equations:

$$W_L = \frac{C_\alpha - C_o}{C_\alpha - C_L} = \frac{S}{R+S}$$

$$W_\alpha = \frac{C_o - C_L}{C_\alpha - C_L} = \frac{R}{R+S}$$

- A geometric interpretation:



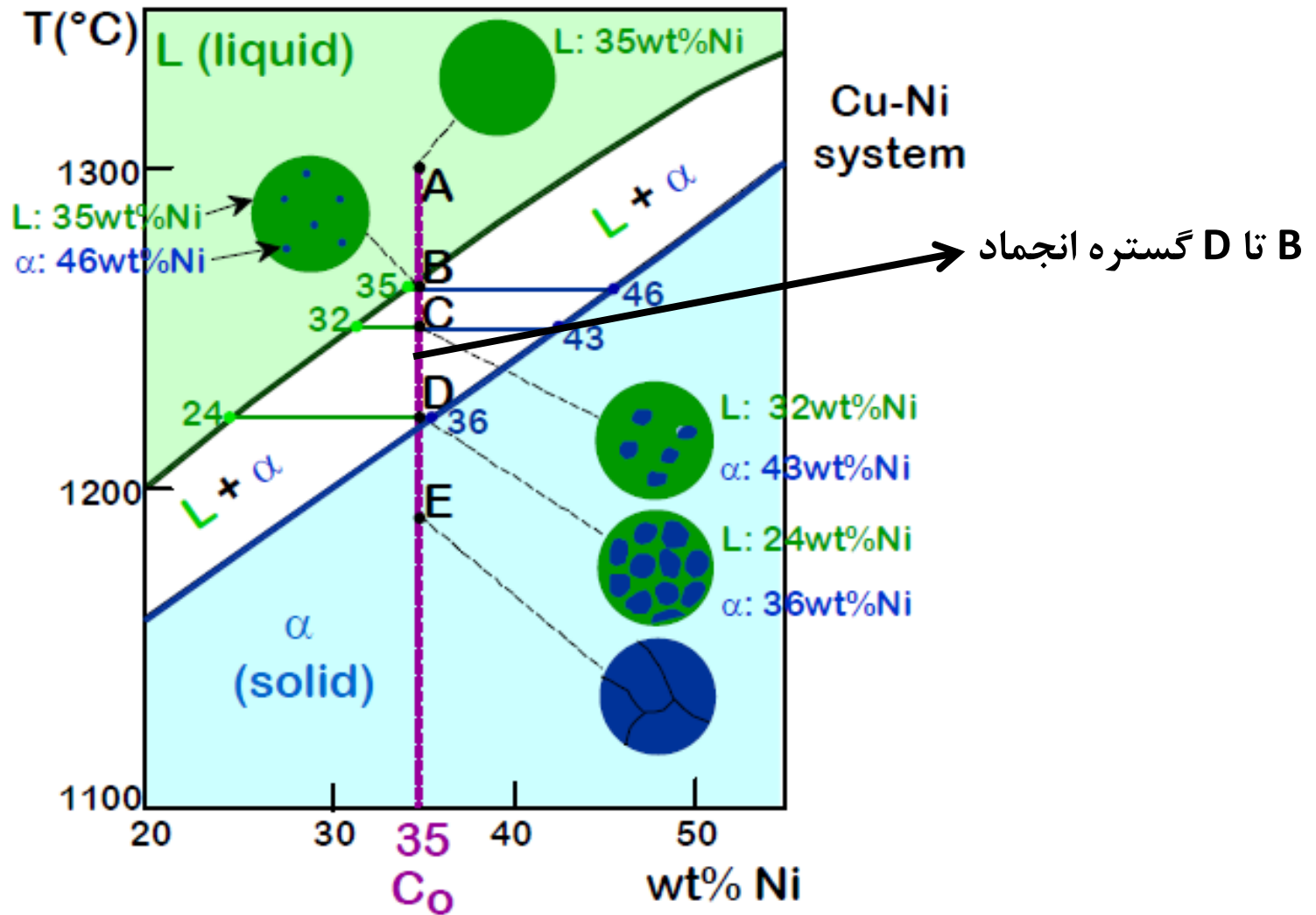
moment equilibrium:

$$W_L R = W_\alpha S$$

$$1 - W_\alpha$$

solving gives Lever Rule

# دیاگرام تعادلی مس-نیکل: سرد شدن از دمای ۱۳۰۰ درجه تا دمای ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد

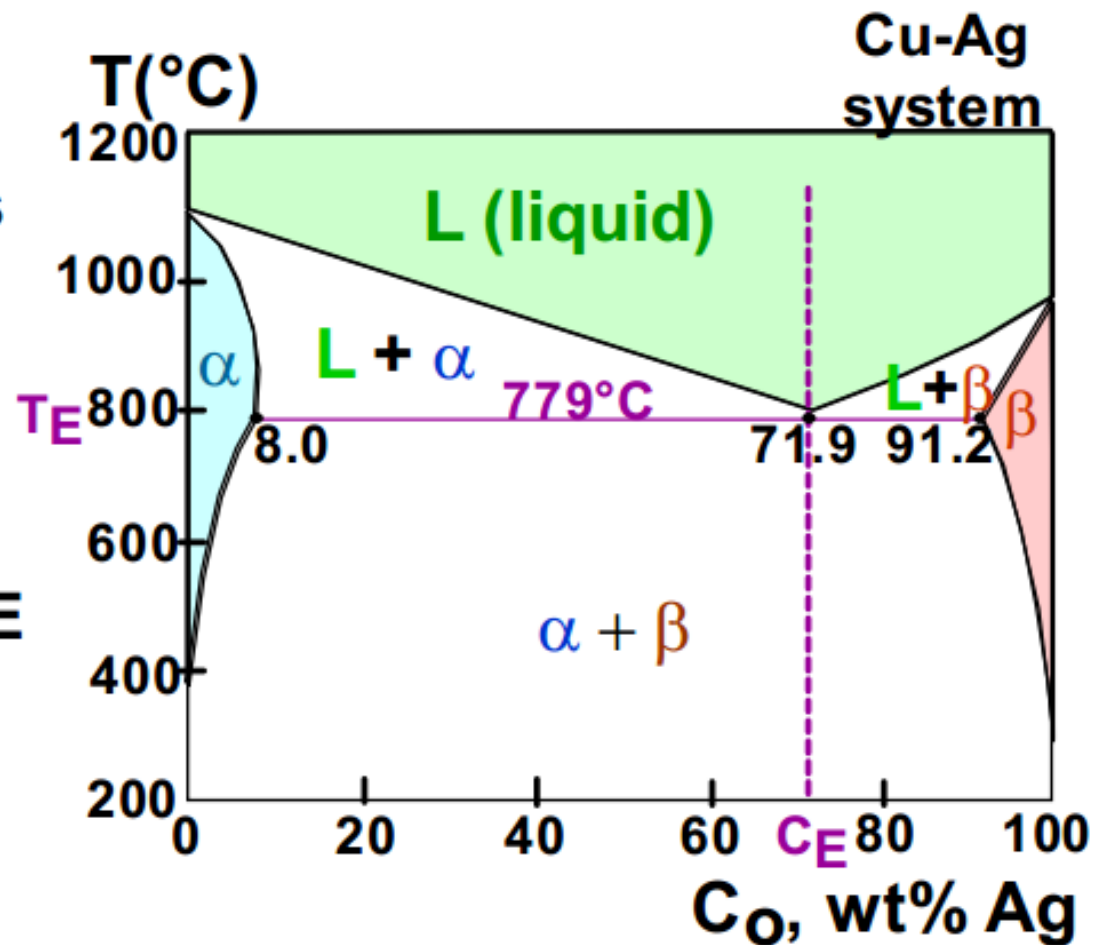




# نمودار تعادلی مس-نقره با سیستم یوتکتیک

## Ex.: Cu-Ag system

- 3 single phase regions (L,  $\alpha$ ,  $\beta$ )
- Limited solubility:
  - $\alpha$ : mostly Cu
  - $\beta$ : mostly Ag
- $T_E$ : No liquid below  $T_E$
- $C_E$ : Min. melting T composition



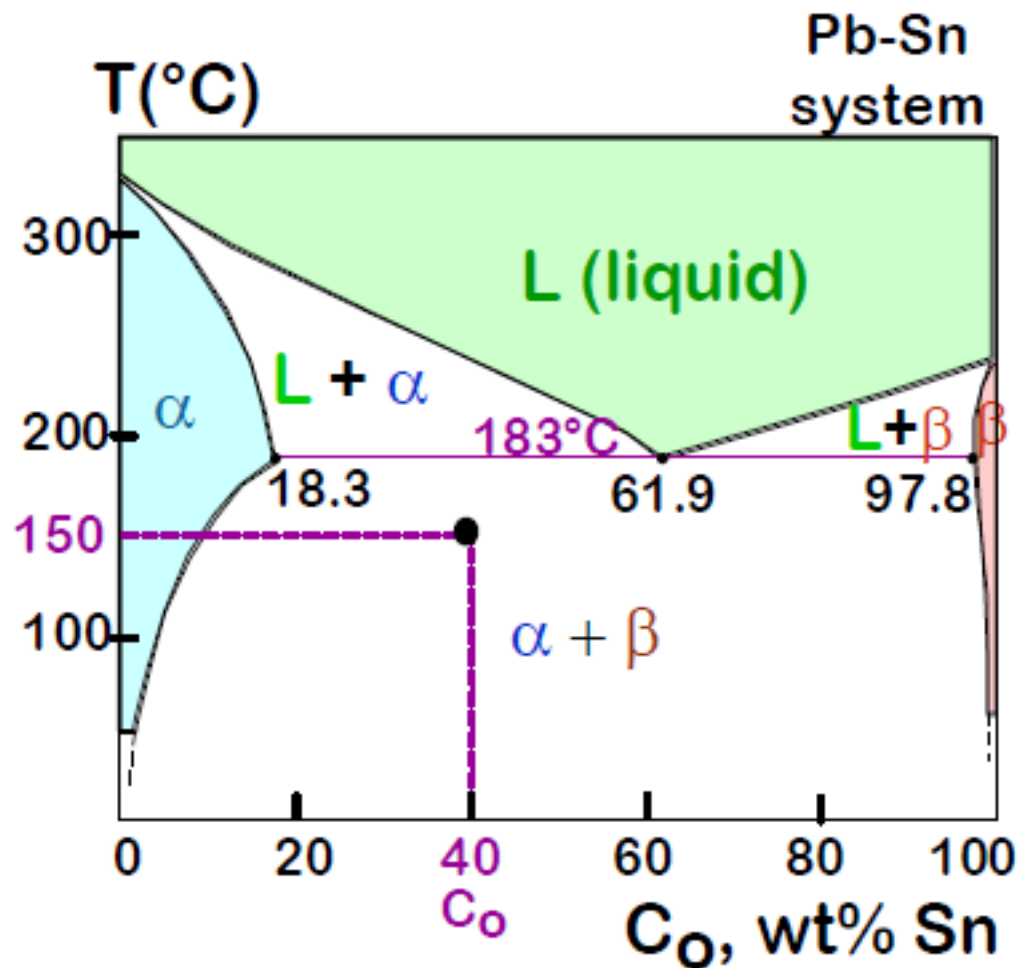
## مثال: سیستم آلیاژی قلع-سرب

- For a 40wt%Sn-60wt%Pb alloy at 150C, find...

--the phases present:

$\alpha + \beta$

--the compositions of the phases:



## مثال: سیستم آلیاژی قلع-سرب

- For a 40wt%Sn-60wt%Pb alloy at 150C, find...

--the phases present:  $\alpha + \beta$

--the compositions of the phases:

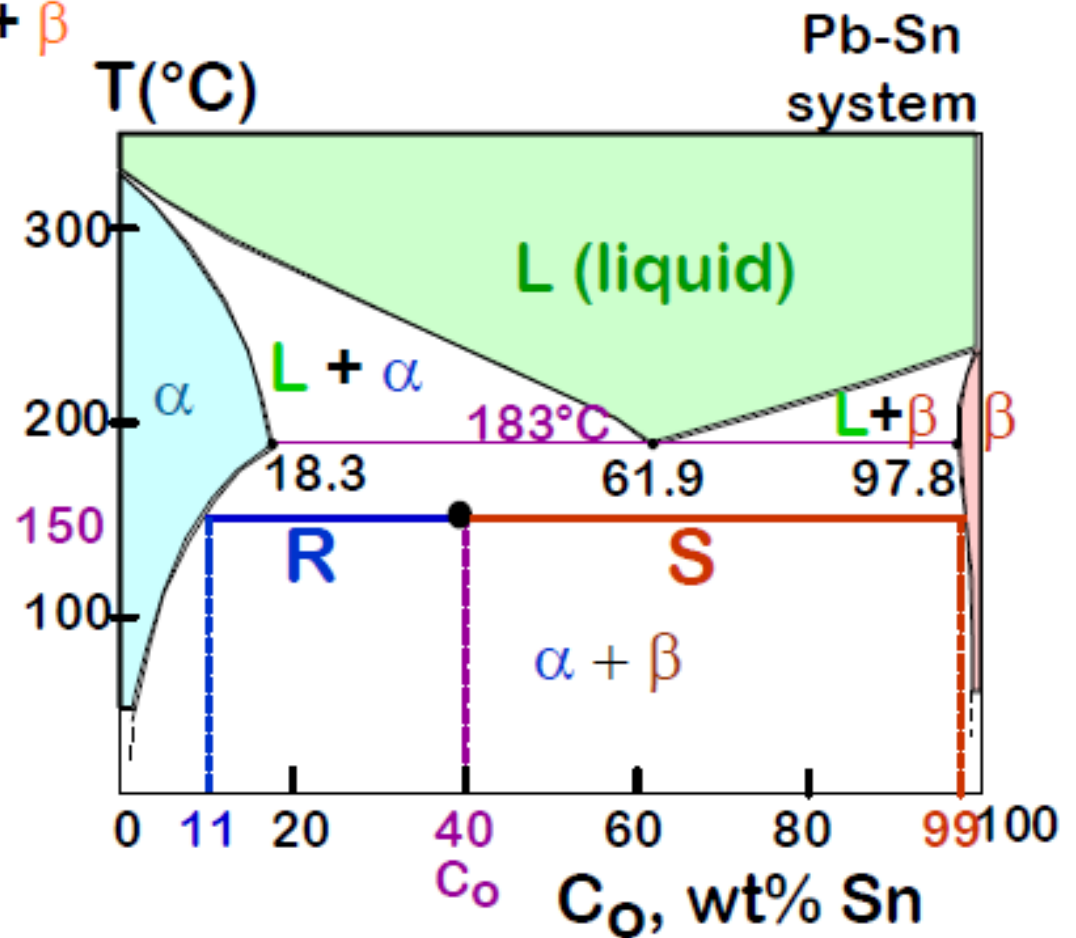
$$C_{\alpha} = 11\text{wt\%Sn}$$

$$C_{\beta} = 99\text{wt\%Sn}$$

--the relative amounts of each phase:

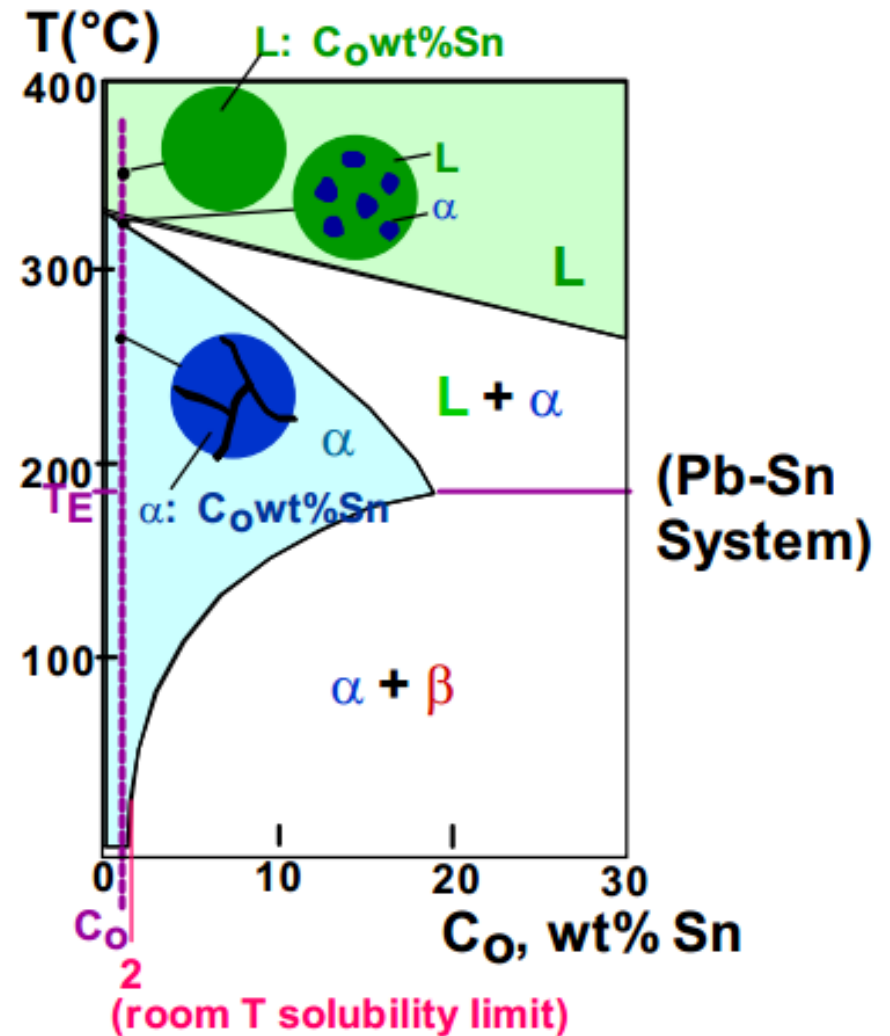
$$W_{\alpha} = \frac{59}{88} = 67\text{wt\%}$$

$$W_{\beta} = \frac{29}{88} = 33\text{wt\%}$$



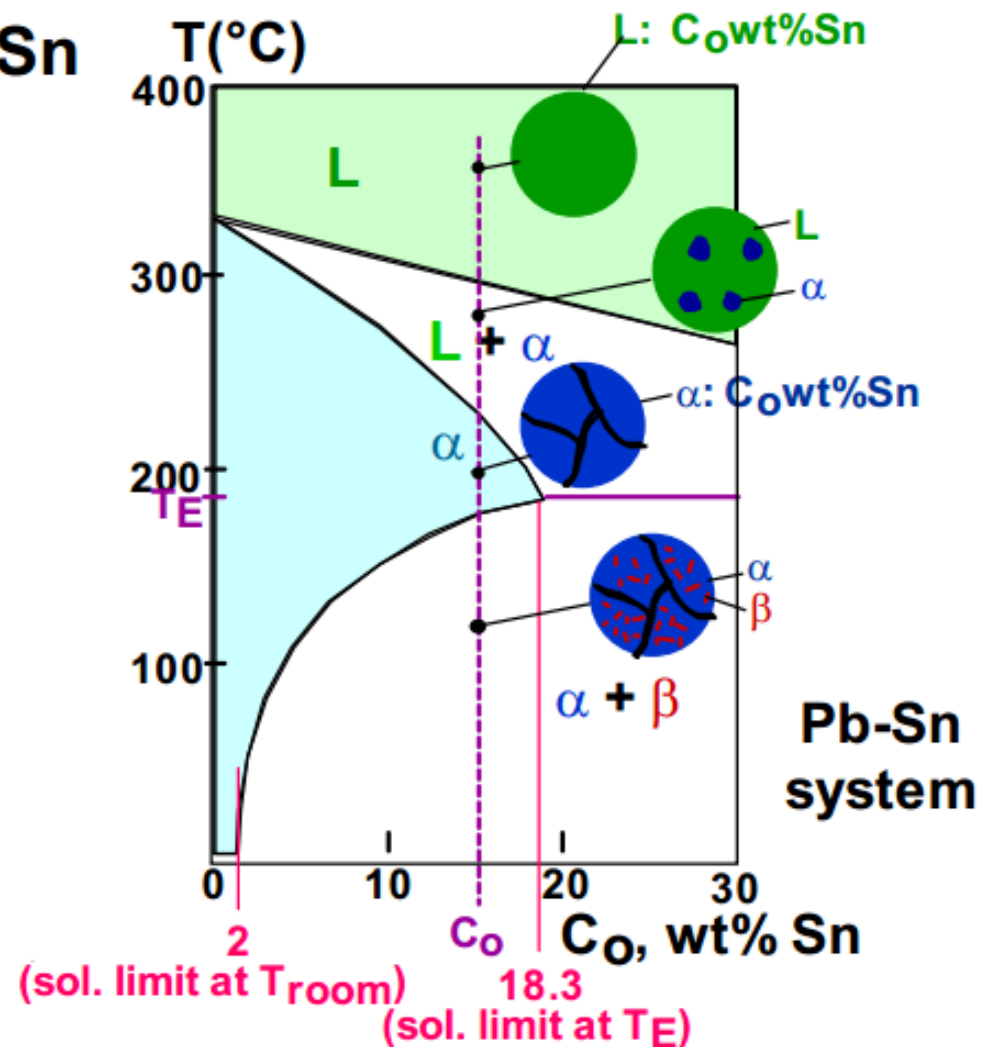
# بررسی ریز ساختار در سیستم یوتکتیک-۱

- $C_0 < 2\text{wt}\% \text{Sn}$
- **Result:**  
--polycrystal of  $\alpha$  grains.



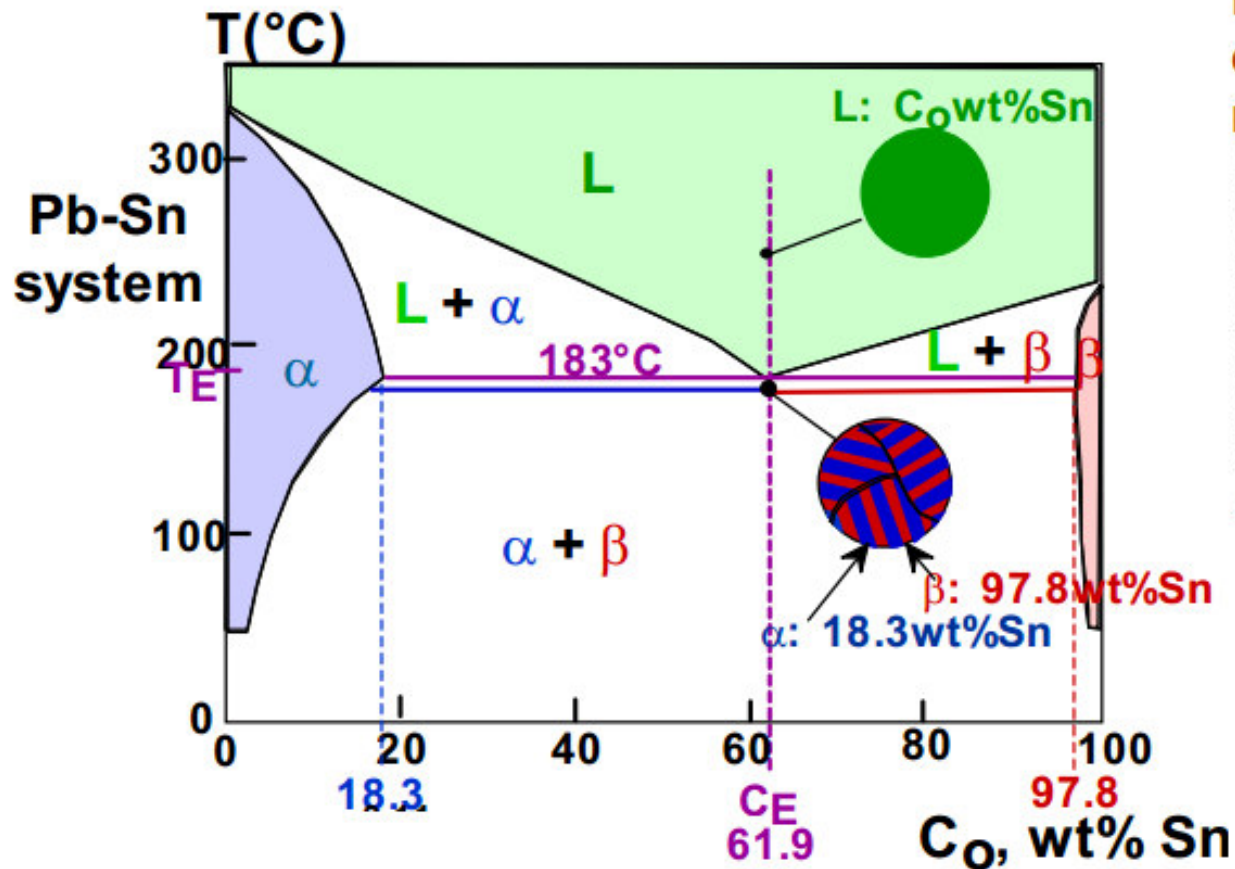
## بررسی ریز ساختار در سیستم یوتکتیک-۲

- $2\text{wt}\% \text{Sn} < C_0 < 18.3\text{wt}\% \text{Sn}$
- **Result:**  
-- $\alpha$  polycrystal with fine  $\beta$  crystals.

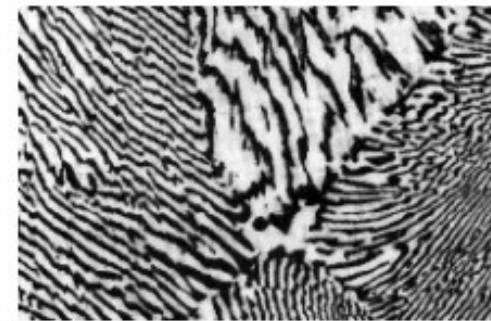


## بررسی ریز ساختار در سیستم یوتکتیک-۳

- $C_0 = C_E$
- **Result: Eutectic microstructure**  
--alternating layers of  $\alpha$  and  $\beta$  crystals.

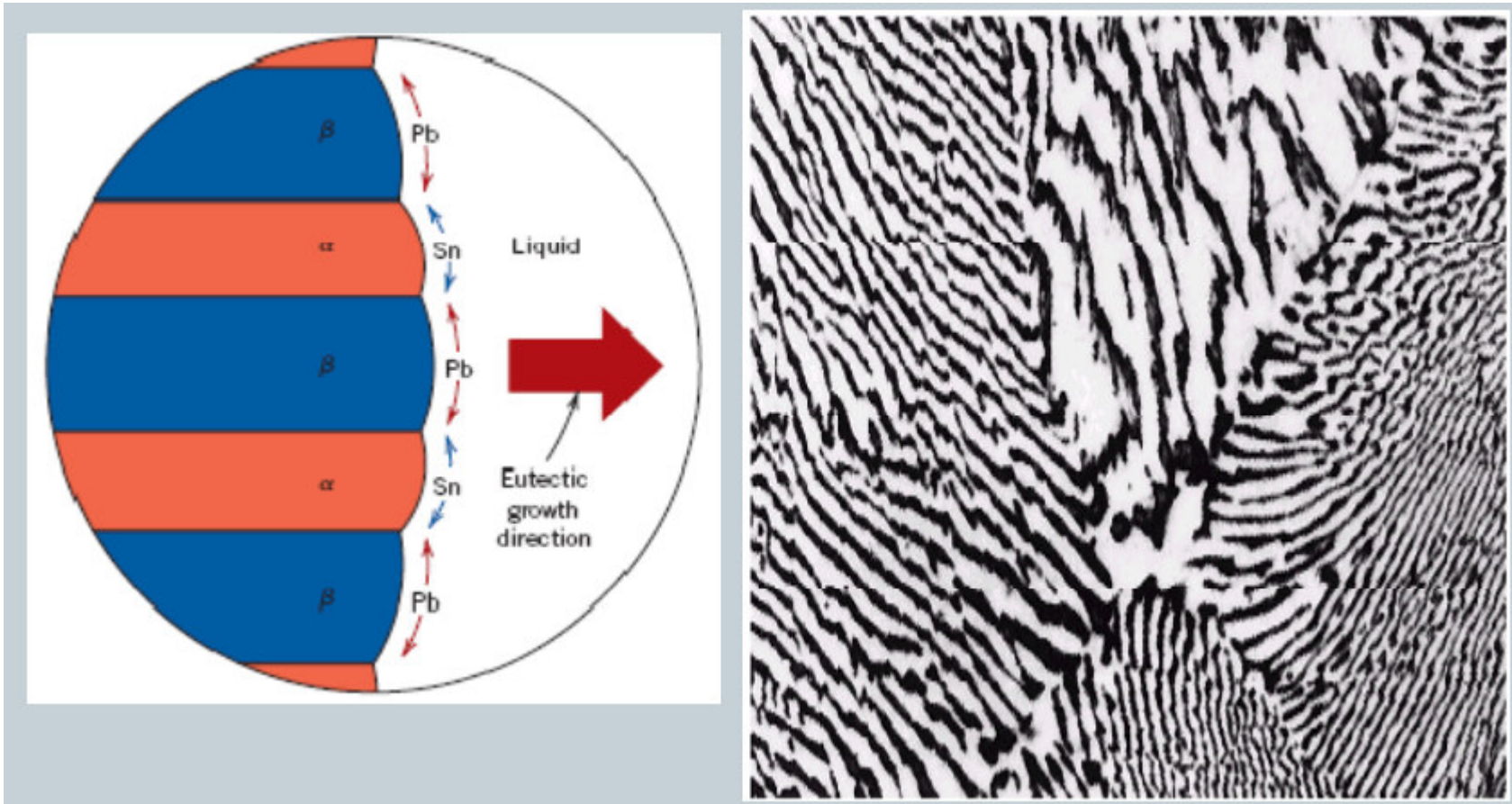


Micrograph of Pb-Sn eutectic microstructure



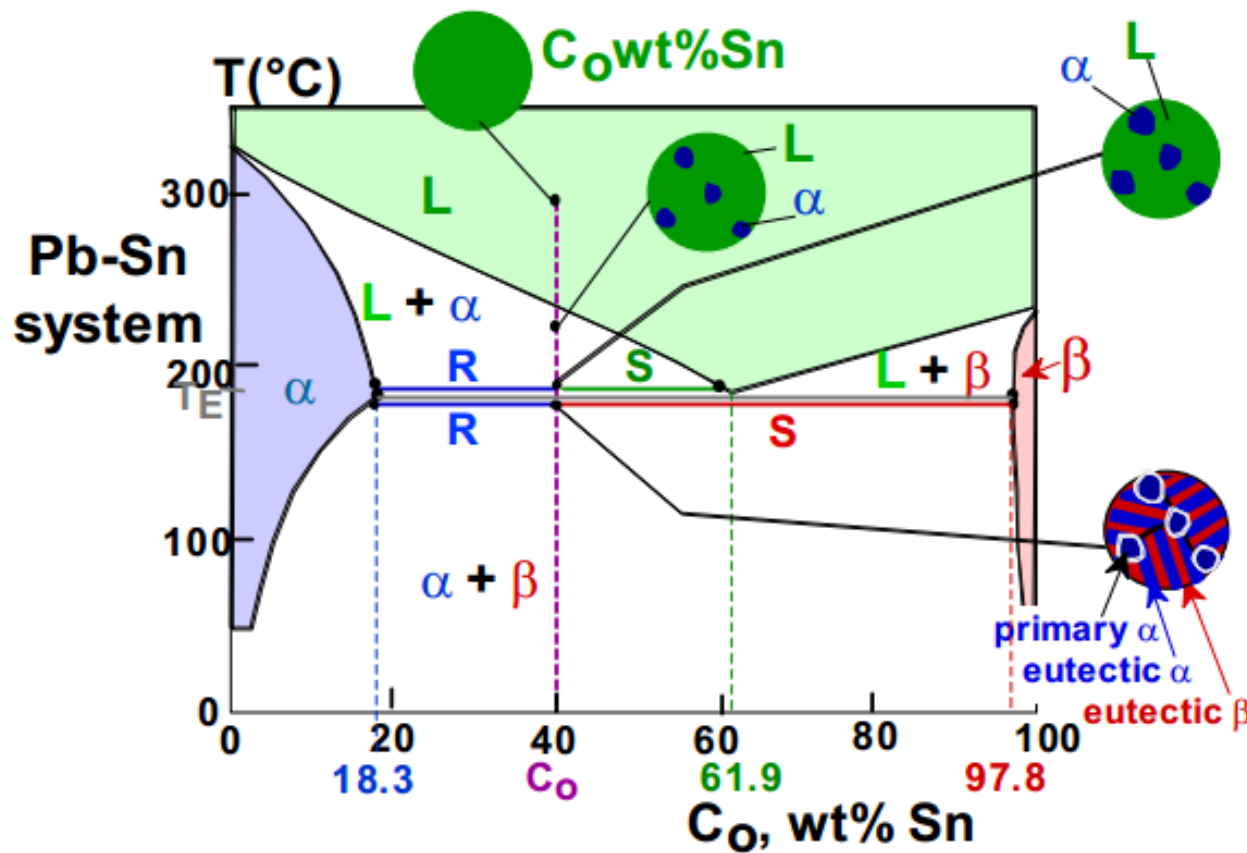
160  $\mu\text{m}$

# ساختار لایه ای یوتکتیک



## بررسی ریز ساختار در سیستم یوتکتیک-۴

- $18.3\text{wt}\% \text{Sn} < C_0 < 61.9\text{wt}\% \text{Sn}$
- **Result:**  $\alpha$  crystals and a eutectic microstructure



- **Just above  $T_E$ :**

$$C_\alpha = 18.3\text{wt}\% \text{Sn}$$

$$C_L = 61.9\text{wt}\% \text{Sn}$$

$$W_\alpha = \frac{S}{R+S} = 50\text{wt}\%$$

$$W_L = (1 - W_\alpha) = 50\text{wt}\%$$

- **Just below  $T_E$ :**

$$C_\alpha = 18.3\text{wt}\% \text{Sn}$$

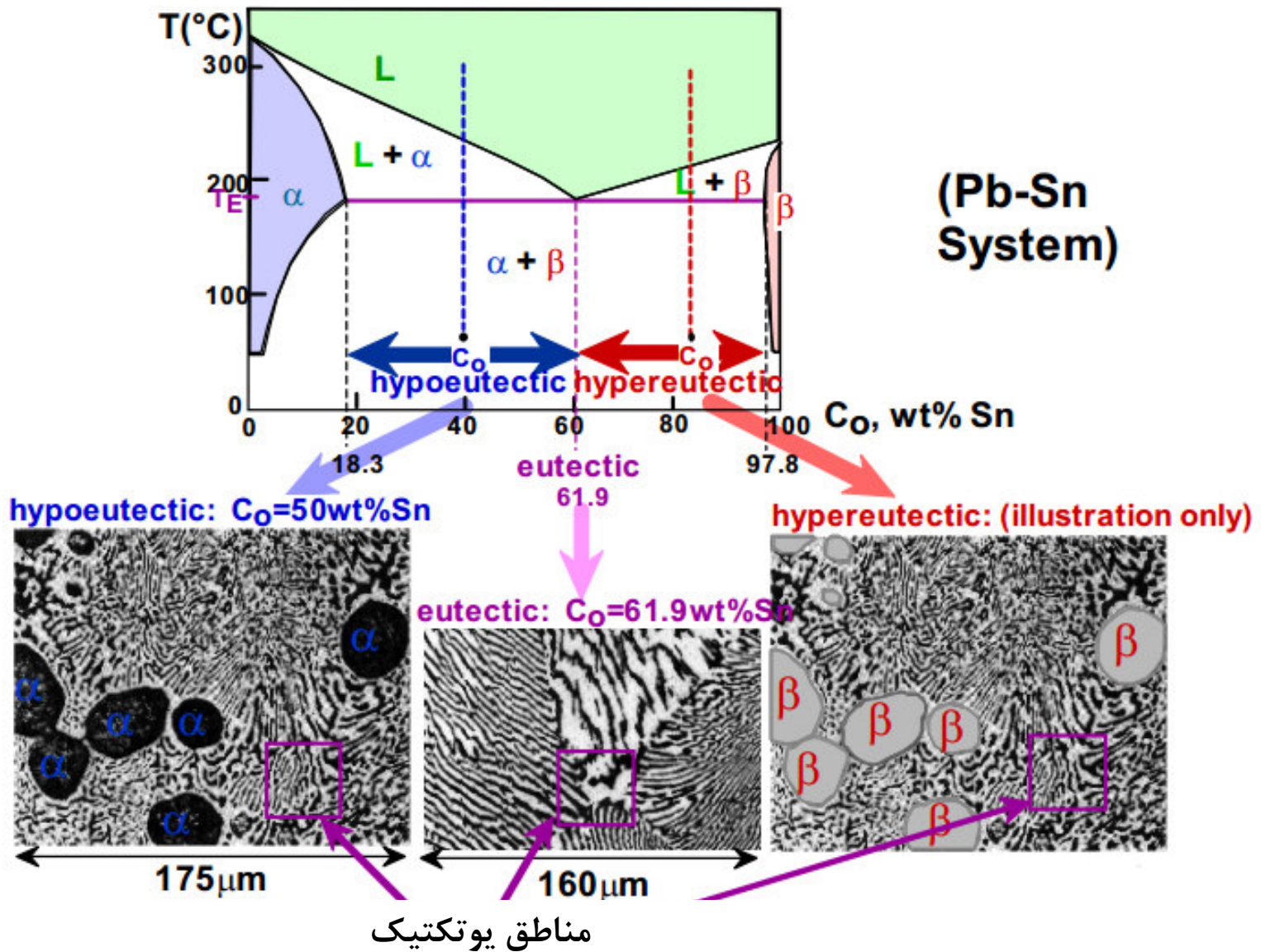
$$C_\beta = 97.8\text{wt}\% \text{Sn}$$

$$W_\alpha = \frac{S}{R+S} = 73\text{wt}\%$$

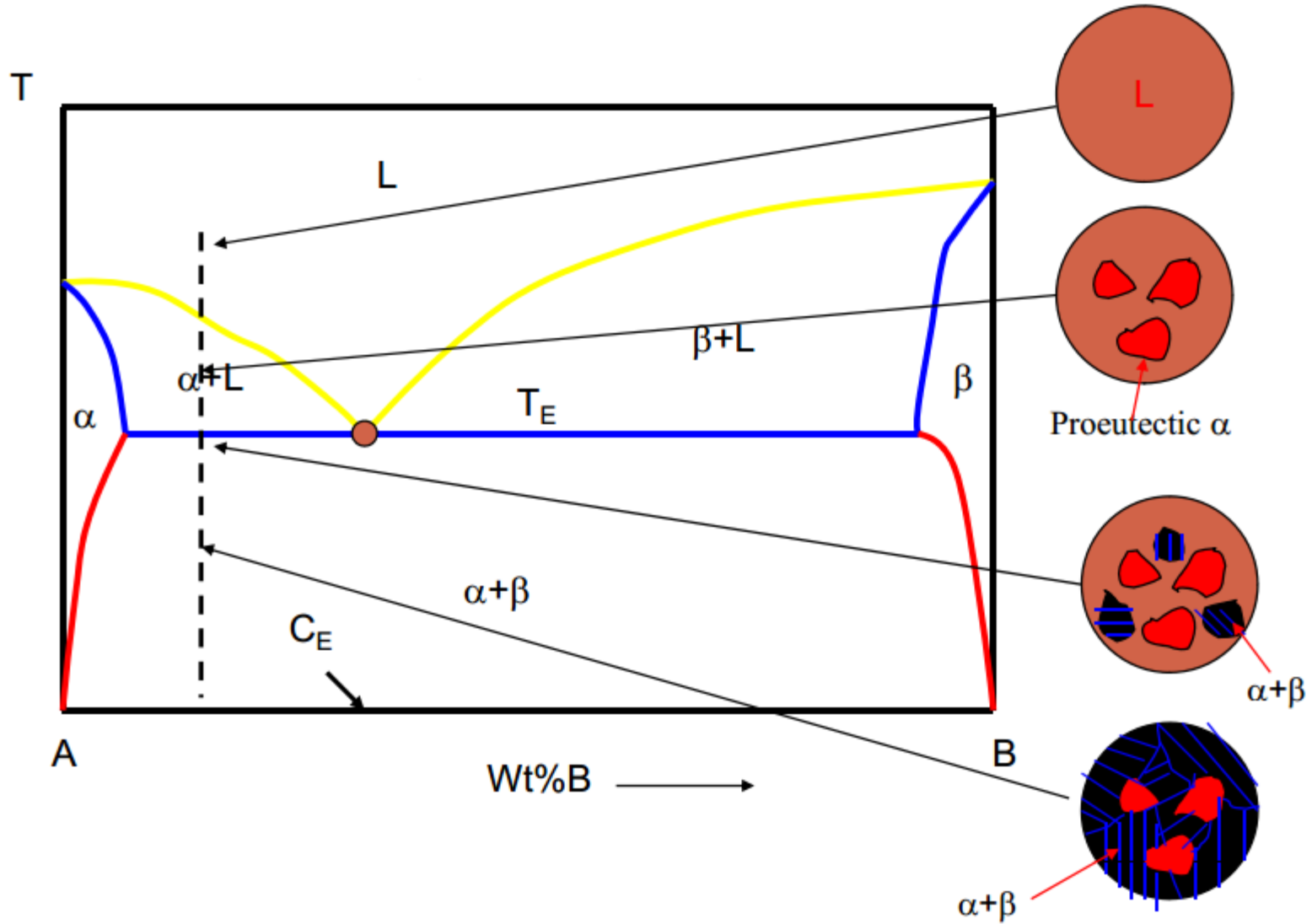
$$W_\beta = 27\text{wt}\%$$



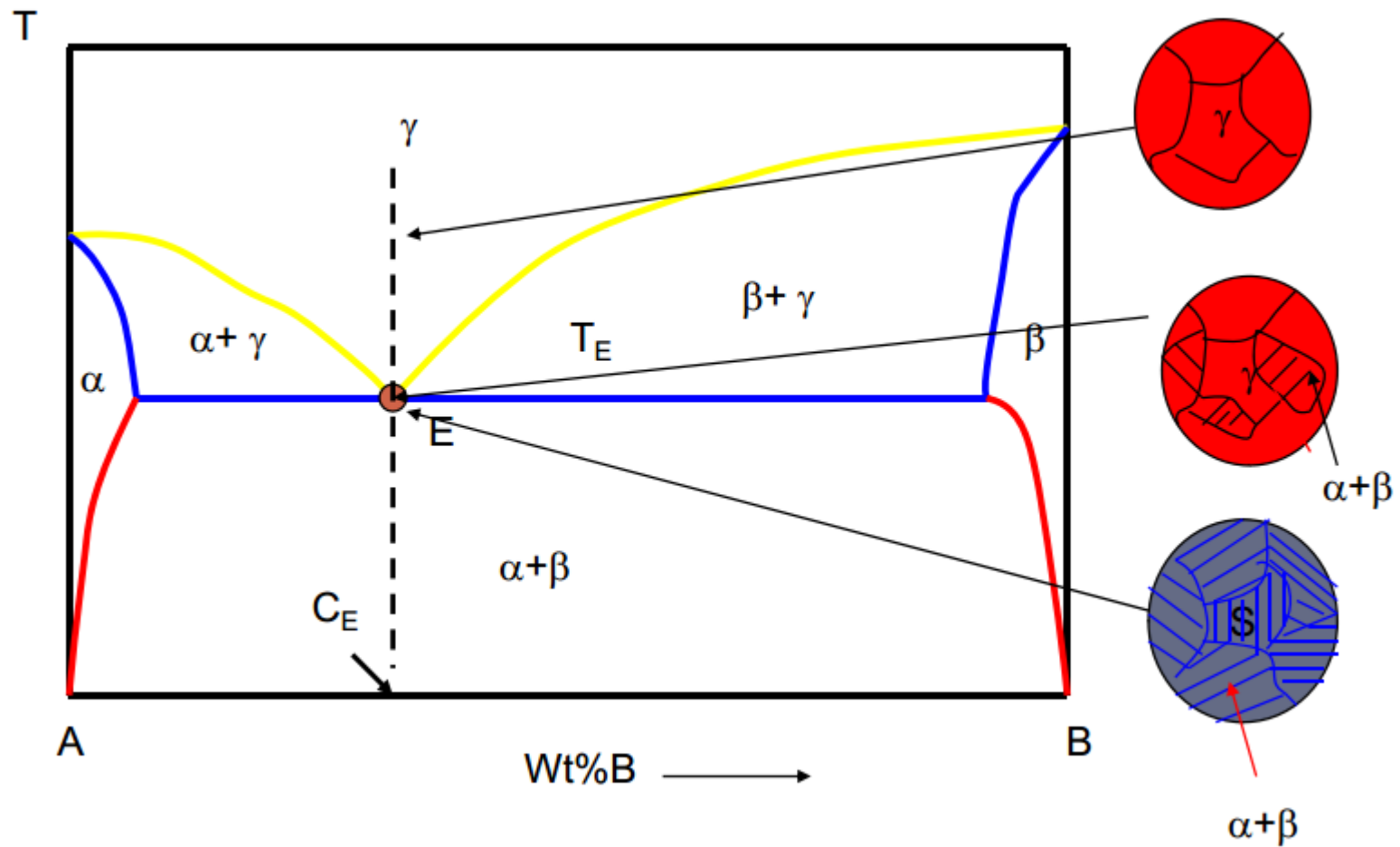
# هیپو یوتکتیک-هایپر یوتکتیک



# انجماد آلیاژی با ترکیب هیپو یوتکتیک



# انجماد آلیاژی با ترکیب یوتکتوئید



# دیاگرام تعادلی آهن-کربن

- فولادها گروهی از آلیاژهای آهن-کربن و عناصر دیگرند که بیشترین کاربرد را در صنعت و فن آوری دارند. ساختار بلوری آهن قبل از ذوب شدن، دو بار تغییر می کند. ابتدا آهن در  $912^{\circ}\text{C}$  ساختار آهن از  $bcc$  به  $fcc$  و در  $1394^{\circ}\text{C}$  دوباره به  $bcc$  تبدیل می شود و تا هنگام ذوب در  $1538^{\circ}\text{C}$  ساختار  $bcc$  باقی می ماند.

## ❖ اثر کربن بر فازهای آهن

- اضافه کردن کربن به آهن اثرات بسیار مهمی بر روی فازهای یاد شده و همچنین دماهای تعادلی آن ها دارند. کربن در فضاهای خالی بین اتم های آهن در شبکه های بلوری  $bcc$  و  $fcc$  (به صورت بین نشینی) جای گرفته و به ترتیب محلول های جامد بین نشینی فریت و آستنیت را به وجود می آورد. سمنتیت زمانی به وجود می آید که کربن فولاد بیش تر از حد حلالیت کربن در فریت و یا آستنیت باشد.
- ✓ فریت یا آهن الفبا ( $\alpha$ ):
- محلول جامد بین نشینی کربن در آهن  $bcc$  است. حلالیت کربن در فریت بسیار کم است به طوری که حد حلالیت کربن در فریت حداکثر  $0.02\%$  درصد در  $727^{\circ}\text{C}$  است که با کاهش دما به طور پیوسته کاهش یافته و در دمای اتاق به مقدار ناچیزی خواهد رسید.

# دیاگرام تعادلی آهن-کربن

**آستنیت** عبارت از محلول جامد بین نشینی کربن در آهن با شبکه بلوری **fcc** است کربن با وارد شدن در شبکه بلوری آهن آستنیتی، ناحیه تشکیل و پایداری آستنیت را در فولادها گسترش می دهد. فضاهای بین اتمی ساختار **fcc** از فضاهای بین اتمی فریت **bcc** بزرگ تر است با این وجود به علت بزرگ تر بودن قطر اتم های کربن از قطر جاهای خالی، انحلال کربن در آستنیت با کرنش همراه است بیشینه حلالیت فقط ۲/۱۱ درصد کربن است.

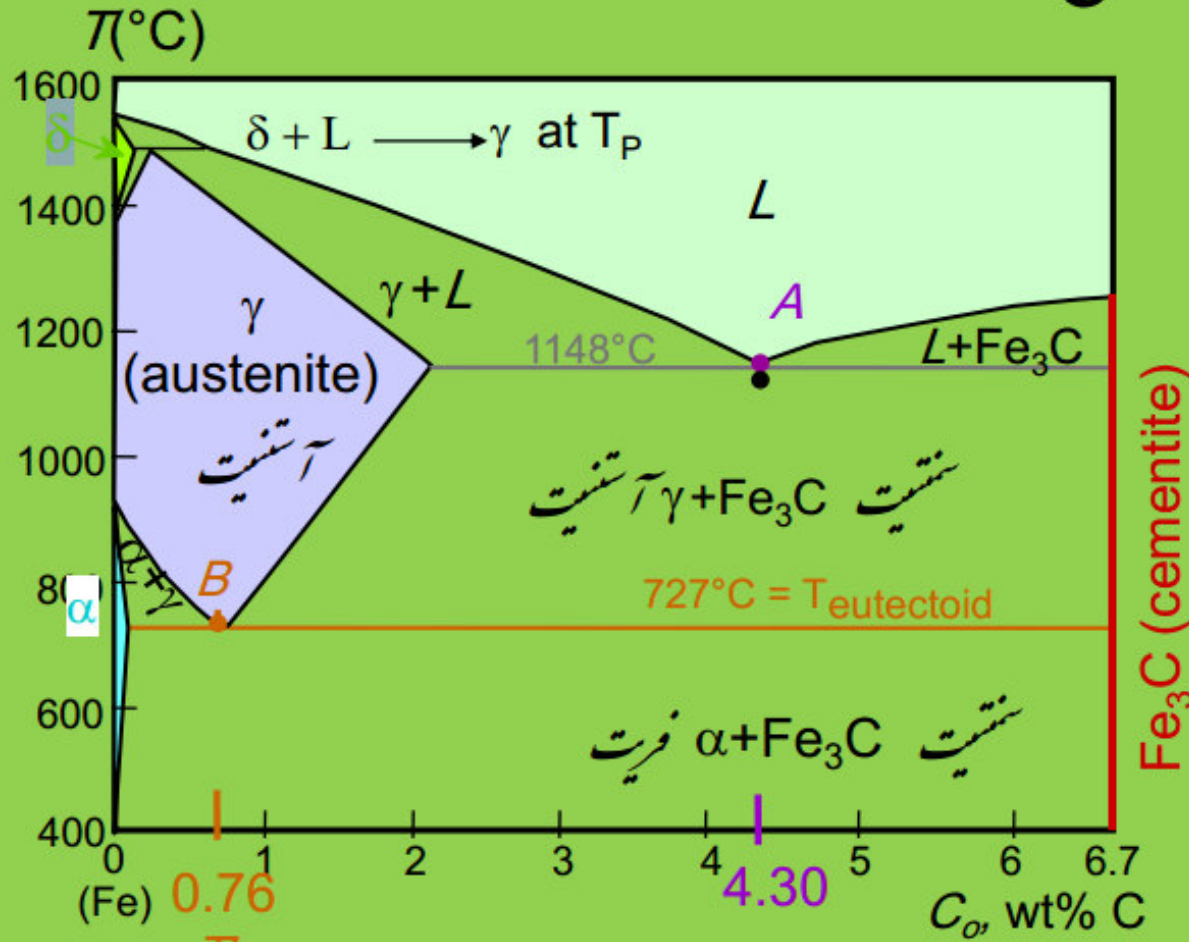
## ✓ فریت دلتا ( $\delta$ ):

محلول جامد بین نشینی کربن در آهن دلتا است. فریت دلتا فقط رز نظر علمی مورد توجه قرار گرفته و کاربرد صنعتی چندانی ندارد. حلالیت کربن در فریت  $\delta$  کم است ولی به دلیل بالاتر بودن دما به مراتب از حلالیت در فریت  $\alpha$  زیادتر است.

## ✓ کاربید آهن یا سمنتیت:

در صورتی که درصد کربن در فولادها بیش تر از حد حلالیت آن در آستنیت یا فریت باشد، فاز جدیدی موسوم به کاربید آهن یا سمنتیت به وجود می آید. این فاز ترکیبی با نسبت ثابت و مشخص یک اتم کربن و سه اتم آهن است که دارای ۶/۶۷ درصد کربن بوده و به صورت  $Fe_3C$  نشان داده می شود. **سمنتیت** دارای سلول واحد ارتورومبیک (مکعب مستطیل) است و در هر سلول واحد ۱۲ اتم **Fe** و ۴ اتم **C** قرار دارد که درصد وزنی کربن در آن ۶/۶۷ درصد خواهد شد. **سمنتیت** فازی شکننده و ترد است.

# نمودار فازی Fe-Fe<sub>3</sub>C



Eutectoid

at **A**:  $L \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$

at **B**:  $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C} (T_E, C_{\gamma} = C_E)$

# نمودار فازی Fe-Fe<sub>3</sub>C

- سه واکنش سه فازی مجزا در نمودار قابل تشخیص است.
- در دمای  $1495^{\circ}\text{C}$  برای آلیاژی با درصد کربن کم، واکنش موسوم به پری تکتیک اتفاق می افتد. به سبب بالا بودن دما این واکنش ارزش مهندسی ندارد.
- در دمای  $1148^{\circ}\text{C}$  یک واکنش یوتکتیک با  $4/3$  درصد وزنی کربن رخ می دهد. چدن ها که معمولا  $2/5$  تا  $4$  درصد کربن دارند این واکنش را از خود نشان می دهند.
- آخرین واکنش سه فازی واکنش یوتکتوئید (شبه یوتکتیک) است که در دمای  $727^{\circ}\text{C}$  با  $0/77$  درصد کربن رخ می دهد. آلیاژهایی با کم تر از  $2/11$  درصد کربن که محلول جامد تک فاز آن ها ( $\gamma$ ) طی واکنش یوتکتوئید به مخلوط دو فازی تبدیل می شود فولاد خوانده می شود.

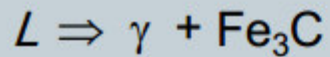
## تجزیه آستنیت ( $\gamma$ ):

- ✓ تغییر فاز کلیدی در این نمودار تجزیه ی آستنیت تک فاز ( $\gamma$ ) به دو فاز فریت و کاربید در اثر کاهش درجه حرارت است.
- ✓ با کنترل این واکنش که ناشی از تفاوت زیاد حلالیت کربن در  $\alpha$  و  $\gamma$  است، می توان به کمک عملیات حرارتی به گستره وسیعی از خواص دست یافت.
- ✓ فولادی با ترکیب یوتکتوئید ( $0.77\%$  درصد کربن) را در نظر بگیرید. در دمای بالاتر از  $727^\circ\text{C}$  فقط آستنیت ( $\gamma$ ) موجود است و  $0.77\%$  درصد وزنی کربن به شکل محلول جامد در ساختار  $\text{fcc}$  حل شده است. وقتی فولاد تا دمای  $727^\circ\text{C}$  سرد شود، تغییراتی به طور هم زمان رخ می دهد. آهن می خواهد از ساختار مکعب با وجوه مرکز پر ( $\text{fcc}$ ) آستنیت به ساختار مکعب مرکز پر ( $\text{bcc}$ ) تبدیل شود ولی فریت فقط می تواند  $0.02\%$  درصد کربن در خود داشته باشد کربن اضافی، سمنتیت را با ترکیب  $\text{Fe}_3\text{C}$  که حاوی مقدار زیادی کربن است، تشکیل می دهد. در واقع واکنش یوتکتوئید:  
$$\alpha(\text{Ferrite}) + \text{Fe}_3\text{C} (\text{cementite}) \rightleftharpoons (\text{Austenite}) \gamma$$
- ✓  $0.77 \text{ wt}\% \text{C} \rightleftharpoons 0.02 \text{ wt}\% \text{C} + 6.67 \text{ wt}\% \text{C}$
- ✓ مخلوط فریت ( $\alpha$ ) و سمنتیت ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) به علت شباهت به مروارید در بزرگ نمایی های کم به نام کلی پرلیت ( $\text{Pearlite}$ ) (مروارید گونه) خوانده می شود.
- ✓ پرلیت: میکروساختار فریت و کاربید لایه ای با ترکیب یوتکتوئید

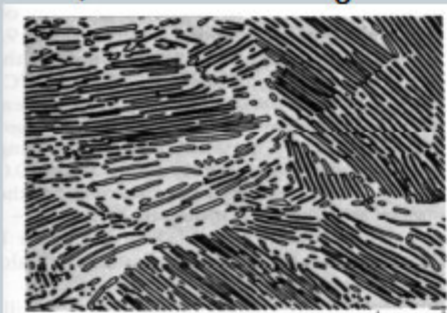
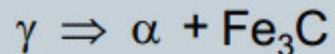


# ریزساختار حاصل از تجزیه آستنیت ( $\gamma$ ):

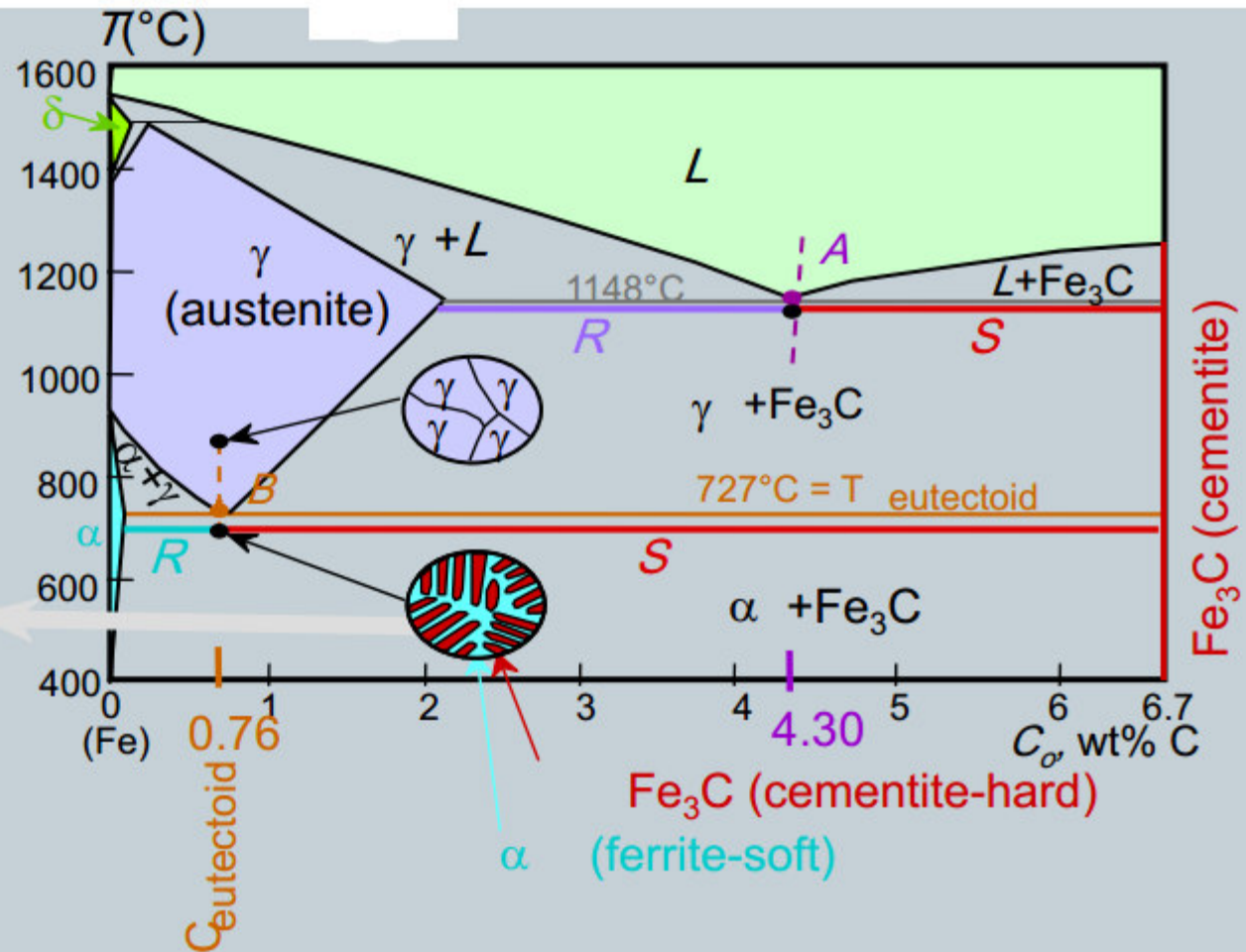
-Eutectic (A):



-Eutectoid (B):



120  $\mu\text{m}$



ریزساختار شامل لایه های متناوب فازهای  $\alpha$  و  $\text{Fe}_3\text{C}$  می باشد. ✓

فولادهایی که کمتر از نقطه یوتکتوئید (کمتر از ۰/۷۷ درصد وزنی کربن)، کربن داشته باشند به فولادهای هیپویوتکتوئید (hypoeutectoid) موسوم اند و ساختار یک فولاد هیپویوتکتوئیدی حاوی فریت پری یوتکتوئید (فریت اولیه) (proeutectoid ferrite) و دانه های پرلیت است.

- a) composition of Fe<sub>3</sub>C and ferrite (α)  
 b) the amount of carbide (cementite) in grams that forms per 100 g of steel

$$C_o = 0.40 \text{ wt\% C}$$

$$C_\alpha = 0.022 \text{ wt\% C}$$

$$C_{Fe_3C} = 6.70 \text{ wt\% C}$$

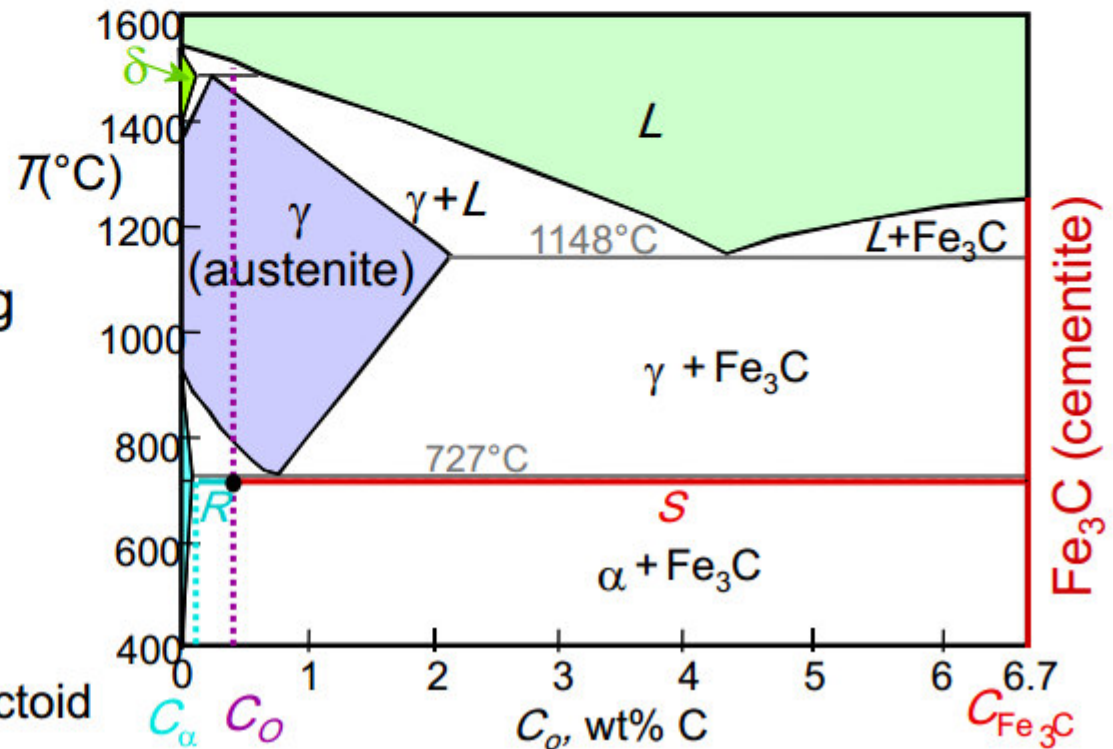
$$\frac{Fe_3C}{Fe_3C + \alpha} = \frac{C_o - C_\alpha}{C_{Fe_3C} - C_\alpha} \times 100$$

$$= \frac{0.4 - 0.022}{6.7 - 0.022} \times 100 = 5.7g$$

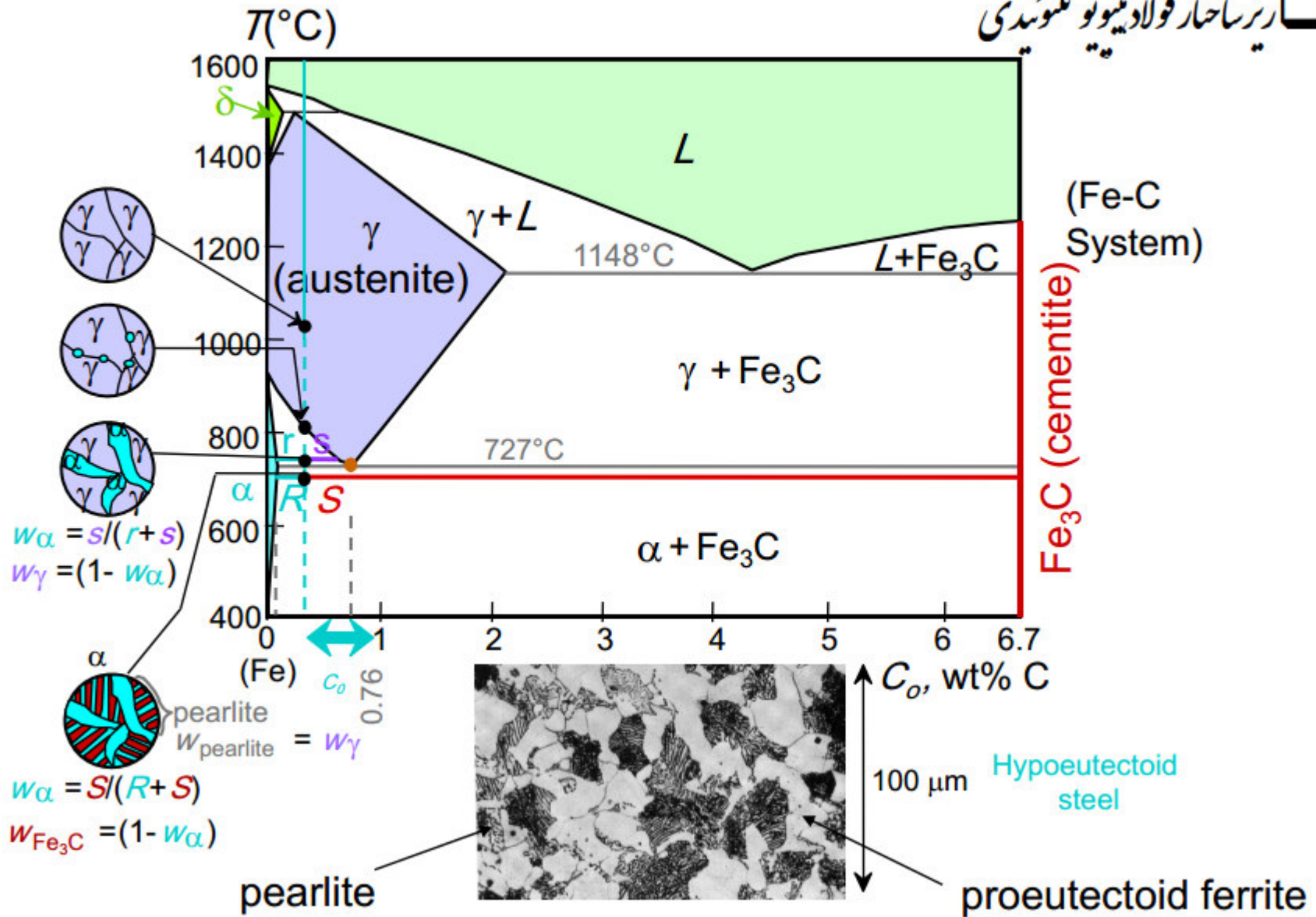
$$Fe_3C = 5.7g$$

$$\alpha = 94.3g$$

proeutectoid carbide = hypereutectoid

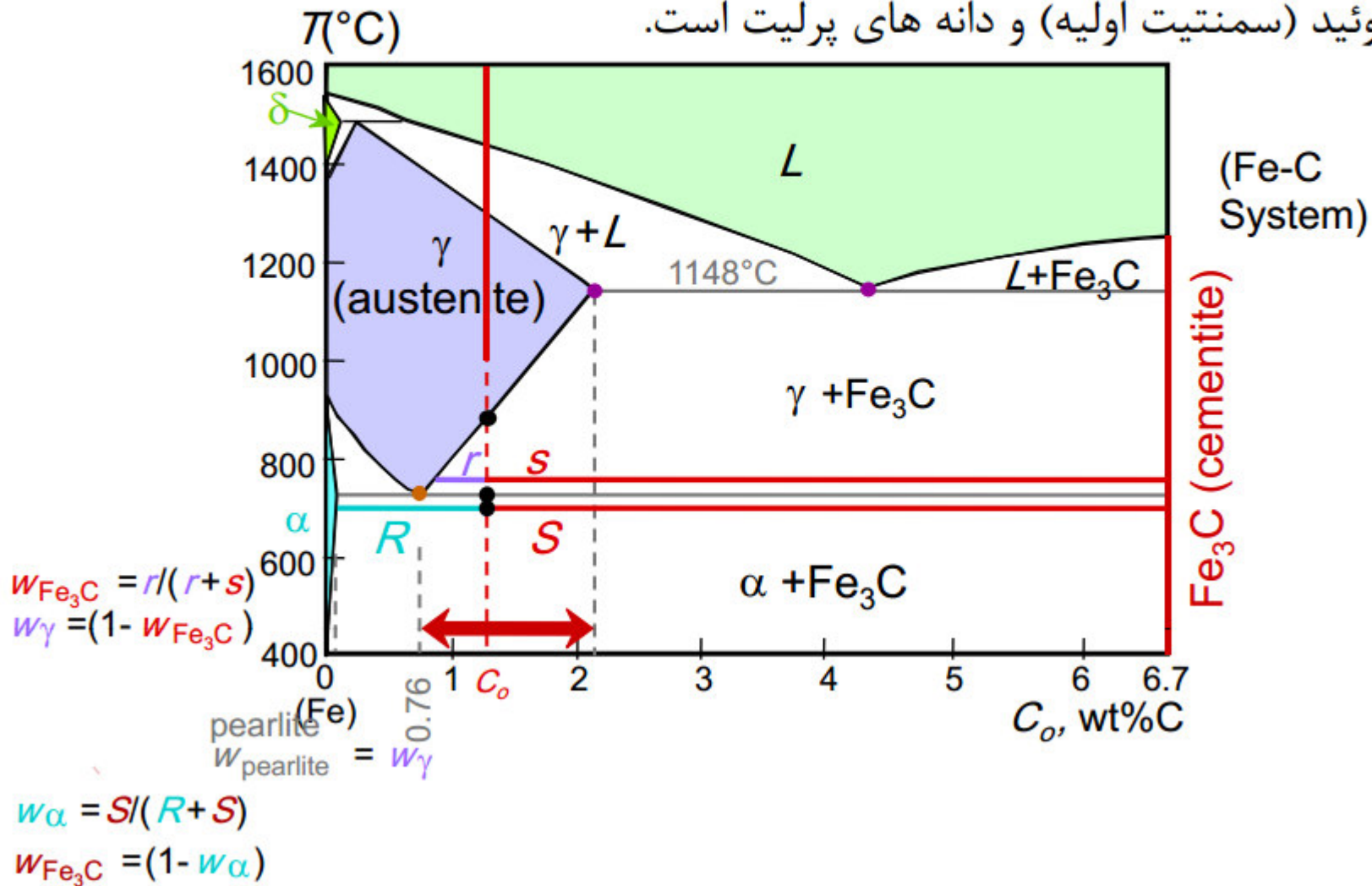


ریز ساختار فولاد میو پکتوئیدی



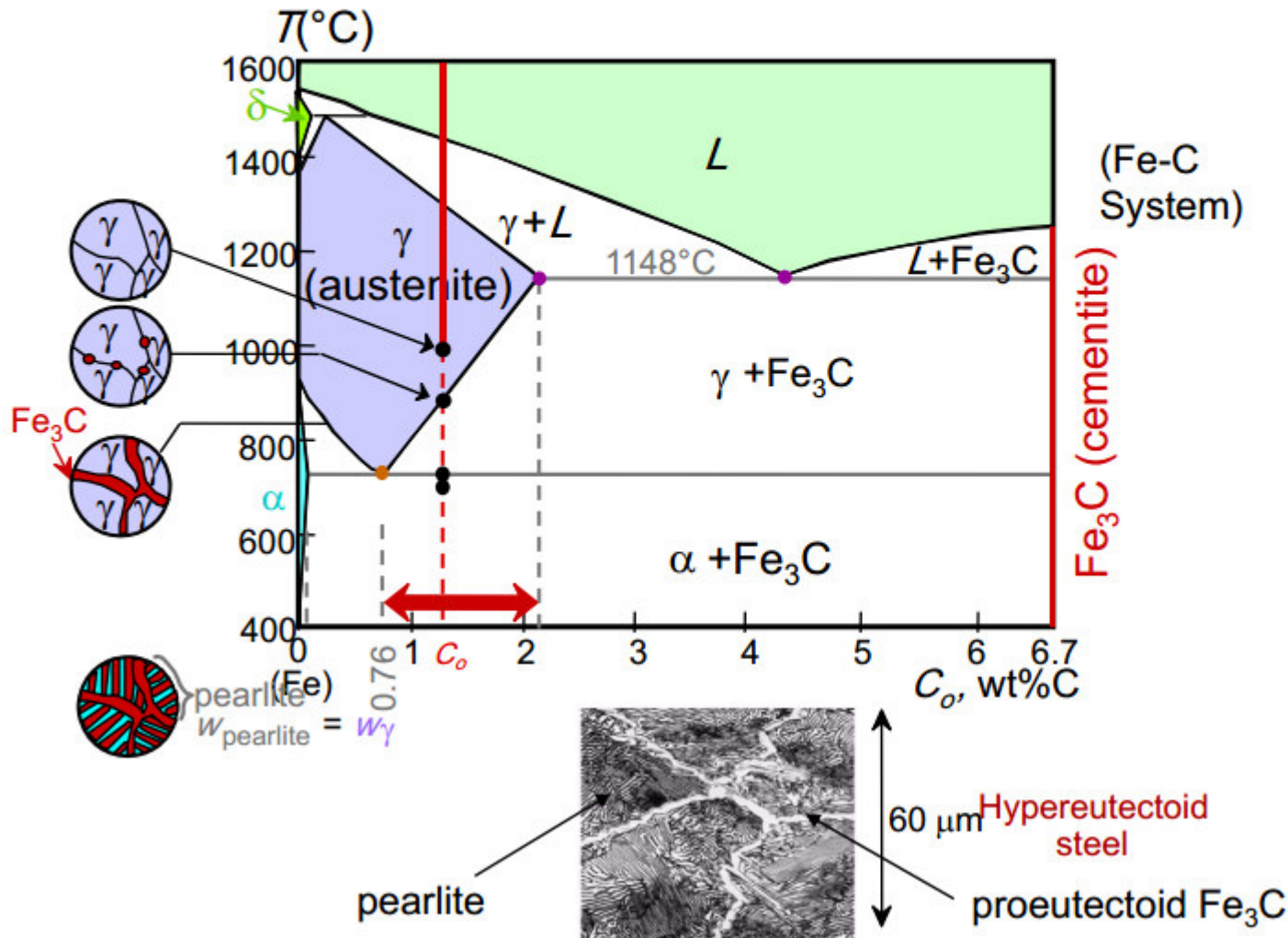
## □ فولاد هیپریوتکتوئیدی

فولادی که مقدار کربنش بیش از کربن نقطه یوتکتوئید باشد به فولاد هیپریوتکتوئید (hypereutectoid) موسوم است. ساختار یک فولاد هیپریوتکتوئیدی حاوی سمنتیت پرییوتکتوئید (سمنتیت اولیه) و دانه های پرلیت است.



## ❖ ریزساختار یک فولاد هیپریوتکتوئیدی

ساختار یک فولاد هیپریوتکتوئیدی حاوی سمنتیت پریوتکتوئید (سمنتیت اولیه) و دانه های پرلیت است.



# عملیات حرارتی (Heat Treatment)

- به مجموعه عملیاتی که در آن **گرم کردن تا دمای معینی** پایین تر از دمای ذوب و **نگهداشتن در آن دما در زمان معینی** و سپس **سرد کردن با سرعت مشخصی** به انجام می رسد.
- اساسا عملیات حرارتی به منظور دستیابی به **خواص مکانیکی و ریز ساختار** مورد نظر صورت می گیرد.
- خواص مکانیکی مورد دستیابی شامل سختی، شکل پذیری، چقرمگی، استحکام و ... می باشند
- ریزساختار نیز مربوط به ساختار، شکل دانه، جهت دانه، نوع فاز و ... می باشد.

# عملیات حرارتی (Heat Treatment)

برخی از عملیات حرارتی های مهم عبارتند از:

۱- آنیل کردن (تابکاری) Annealing

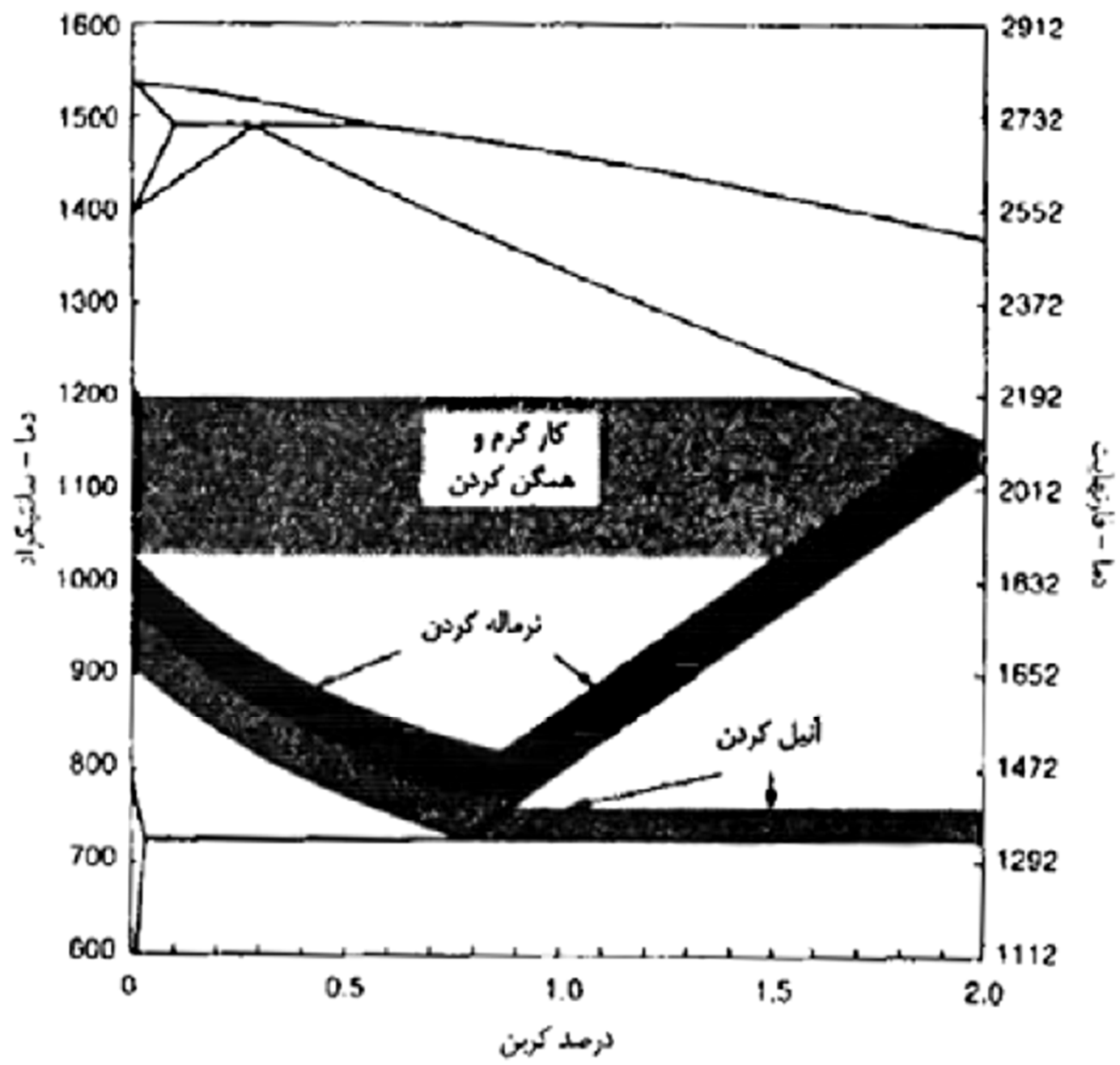
۲- نرمالیزه کردن Normalizing

۳- کرووی کردن Spherodizing

۴- همگن سازی Hemogenising

۵- تنش زدایی Stress relieving

۶- ....





# آنیل کردن

آنیل کامل عبارت از حرارت دادن فولاد در گستره دمایی نشان داده شده در شکل ۵-۱ و سپس سرد کردن آهسته، معمولاً در کوره است. تحت شرایط فوق آهنگ سرد شدن در حدود  $0.2/0$  درجه سانتیگراد بر ثانیه است. همچنان که از شکل ۵-۱ مشخص است، گستره دمایی آستنیته کردن برای آنیل کامل، تابع درصد کربن فولاد است. بدین صورت که، برای فولادهای هایپروتکتوئید حدود  $50$  درجه سانتیگراد بالای خط  $A_3$  و برای فولادهای هایپروتکتوئید

حدود  $50$  درجه سانتیگراد بالای خط  $A_1$  است.

# آنیل کردن

دماهای بحرانی  $A_1$  و  $A_3$  تا حدودی تحت تأثیر

عناصر آلیاژی در فولادها تغییر می‌کند. بنابراین، به طور کلی در عملیات آنیل کامل، فولادهای هیپووتکتوئید را در ناحیه تکفازی آستنیت و فولادهای هایپریوتکتوئید را در ناحیه دوفازی آستنیت - سمنتیت حرارت می‌دهند.

علت آستنیت کردن فولادهای هایپریوتکتوئید در ناحیه دوفازی آستنیت - سمنتیت این است که سمنتیت پرویوتکتوئید در این فولاد به صورت کروی و مجتمع شده در آید. اگر چنین فولادی تا بالای خط  $A_{cm}$  حرارت داده شود، در ضمن آهسته سرد شدن سمنتیت پرویوتکتوئید به صورت شبکه پیوسته‌ای در مرز دانه‌های آستنیت رسوب می‌کند و در نتیجه منجر به ترد و شکننده شدن فولاد می‌شود.

# نرمالیزه کردن Normalizing

نرماله کردن یکی دیگر از انواع روشهای عملیات حرارتی است که میکروساختار حاصل همانند آنیل کردن شامل پرلیت، مخلوطی از پرلیت و فریت و یا مخلوطی از پرلیت و سمنتیت (بستگی به ترکیب شیمیایی فولاد) است.

در نرماله کردن، دمای آستنیته کردن برای فولادهای هیپوئوتکتوئید کمی بالاتر از گستره دمایی مربوط به آنیل کردن است در حالی که برای فولادهای هایپریوتکتوئید از گستره دمایی حدود ۵۰ درجه سانتیگراد بالای  $A_{cm}$  استفاده می شود.

برخلاف آنیل کامل که فولاد در کوره

سرد می شود در عملیات نرماله کردن قطعات پس از آستنیته شدن در هوا سرد می شوند

سرد کردن با شرایط غیرتعادلی

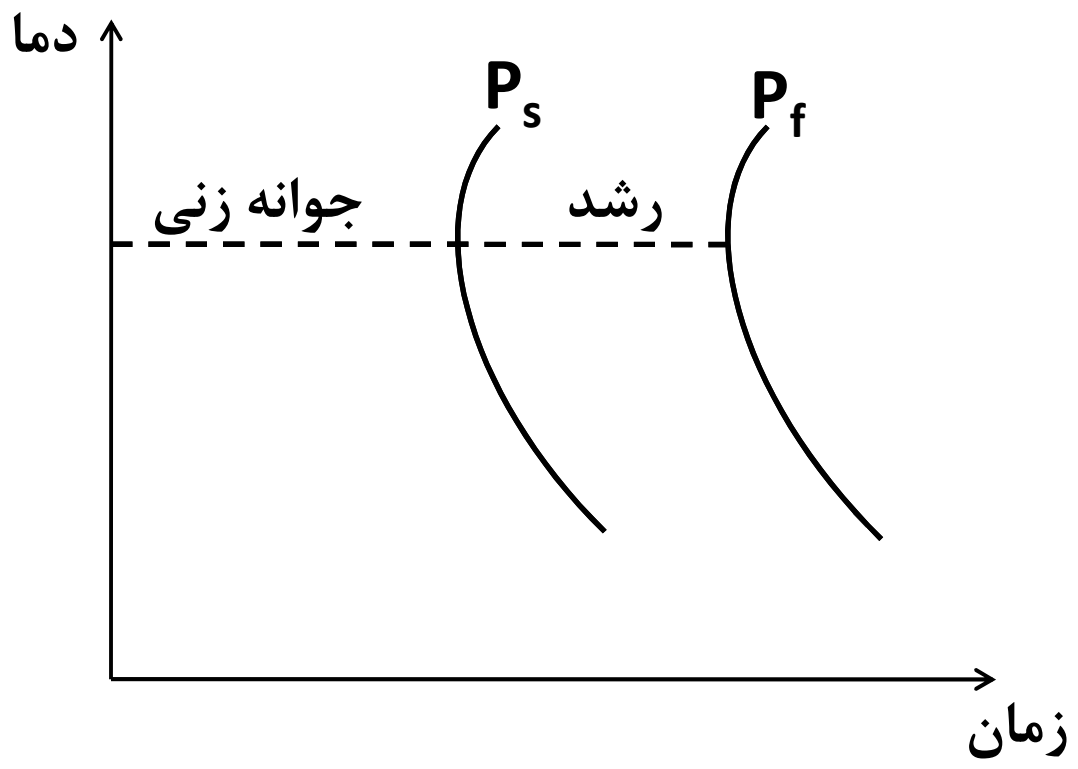
## Time Temperature Transform-TTT

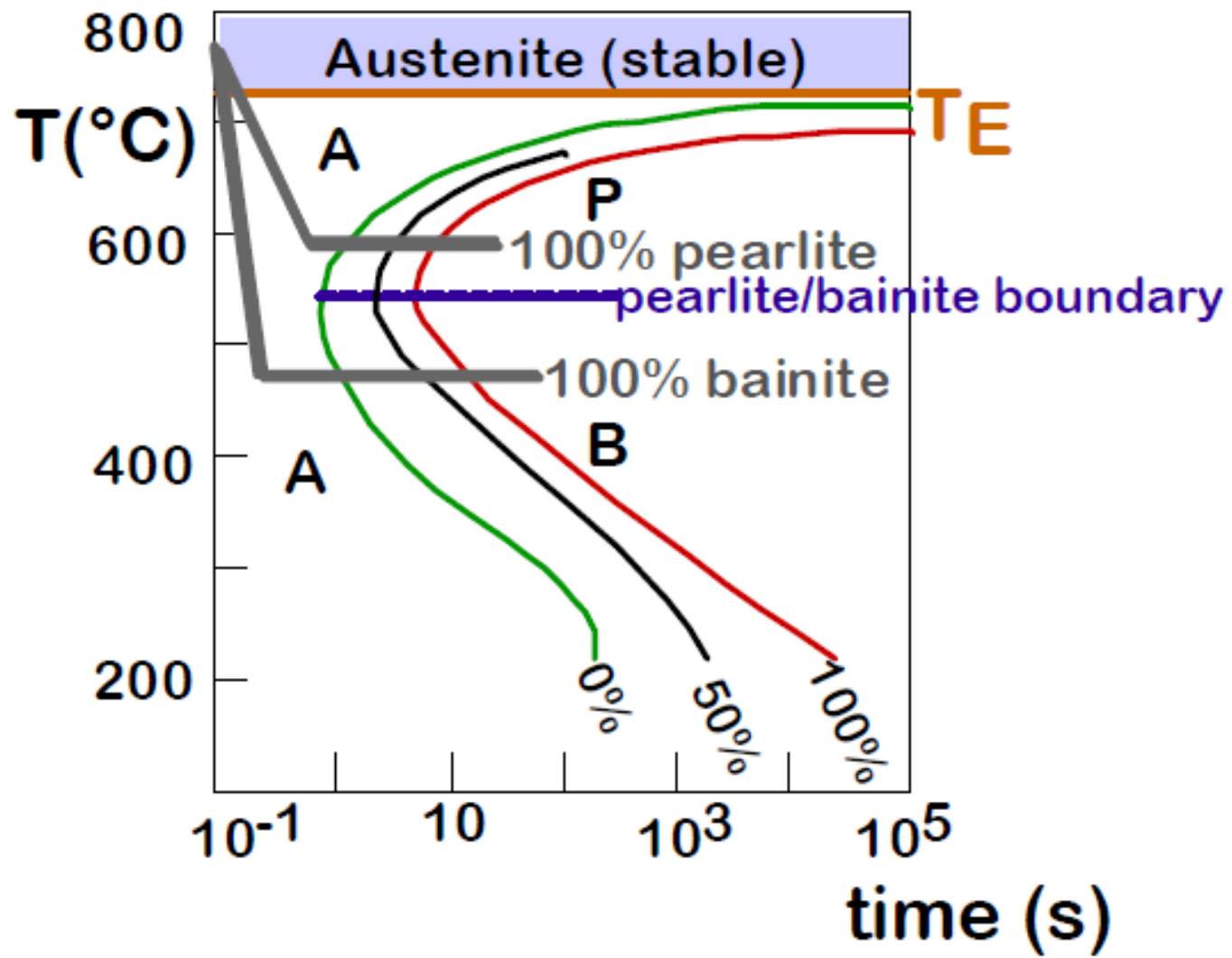
• آنچه در مورد دیاگرام تعادلی ملاحظه شد، شرط مهم سرد کردن بسیار آهسته (تعادلی) مطرح بود. ما فقط می توانیم از دیاگرام تعادلی استفاده کنیم که کل قطعه دمای یکسانی در هر لحظه داشته باشد. به طوریکه در هر دما به فلز اجازه داده شود کلیه واکنشهای محتمل را کامل کند.

• ولی در صنعت شرایط متفاوت است. یعنی زمان سرد کردن در ملاحظات ما وارد می شود.

• برای این منظور از دیاگرامهای TTT استفاده می شود.

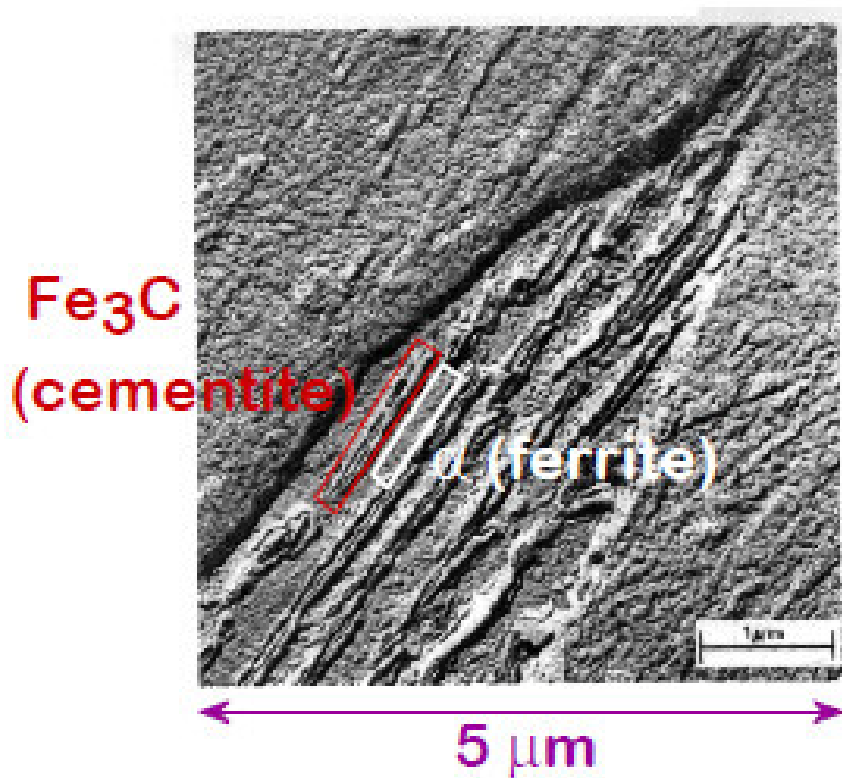
برای تهیه دیاگرام TTT نمونه بسیار نازکی از فولاد مورد استفاده را آماده کرده، سپس از دمای آستنیت به داخل حمام نمک با دمای معینی (مثلا ۶۰۰ درجه) سرد کرده سپس برای مدت معینی در آن دما نگه داشته و با ثبت زمان به آب می اندازند. پس از بررسی میکروسکوپی قطعه شروع و پایان انجام تحول فازی را در آن دما (مثلا ۶۰۰ درجه) پیدا می کنند. آنچه در مورد فولاد در دیاگرام TTT قابل مشاهده است به صورت زیر می باشد.





## • باینیت

اگر سرد کردن به گونه ای باشد که تا دمای ۵۵۰ درجه به منحنی TTT برخورد نکنیم، ذرات آلفا و سمنتیت به صورت تفکیک ناپذیر شکل می گیرند به طوری که در زیر میکروسکوپ در بزرگنمایی ۲۰۰ شکل پر را تداعی می کند.



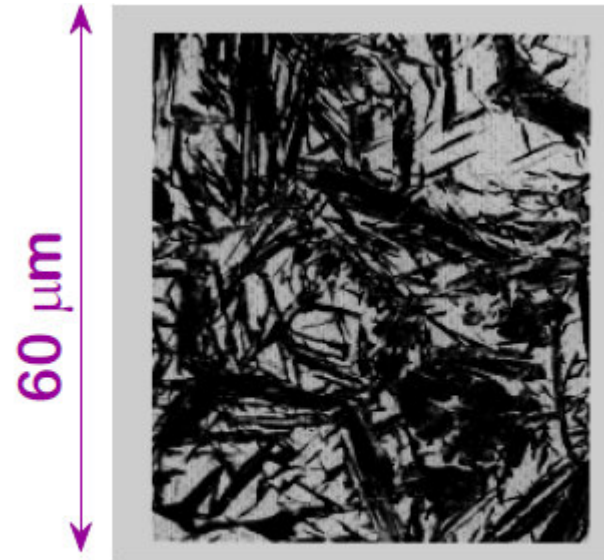
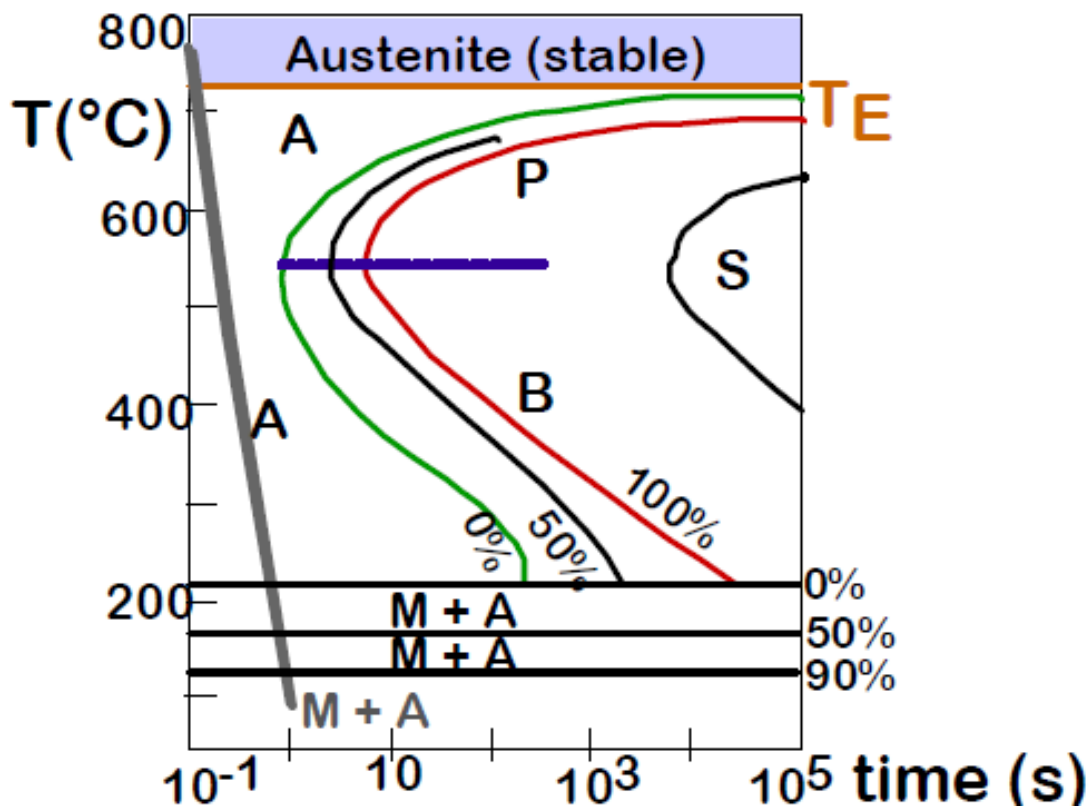


## • مارتنزیت

اگر سرعت سرد کردن به گونه ای باشد که قطعه داخل محیط سرد ۳۰۰ درجه قرار گیرد و دماغه منحنی را قطع نکند دیگر پرلایت و باینیت تشکیل نشده و فازی به نام مارتنزیت تشکیل می شود. ساختار مارتنزیت به صورت bct می باشد.

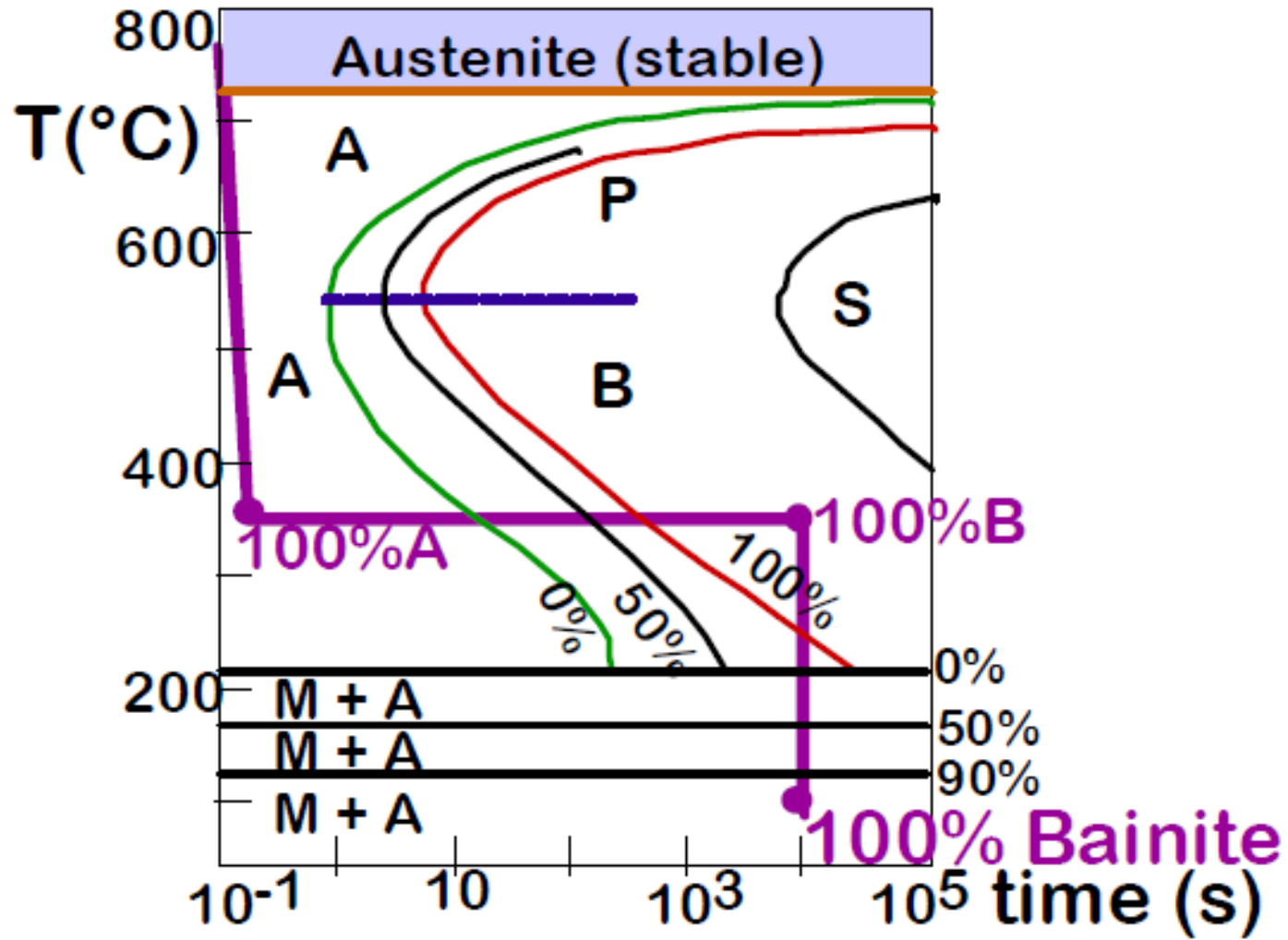
مارتنزیت ساختاری ترد و شکننده دارد. در واقع به دلیل کاهش ناگانی دما اتمهای کربن در داخل شبکه fcc گیر افتاده و ارتفاع شبکه را افزایش می دهد. لذا شبکه bct بوجود می آید. شکل مارتنزیت به صورت سوزنی شکل می باشد.

به همین جهت است که مارتنزیت را در دمایی بین ۲۰۰ تا ۶۰۰ درجه تمپر می کنند تا علاوه بر حذف تمرکز تنش، خشونت ساختار سوزنی نیز گرفته شود.

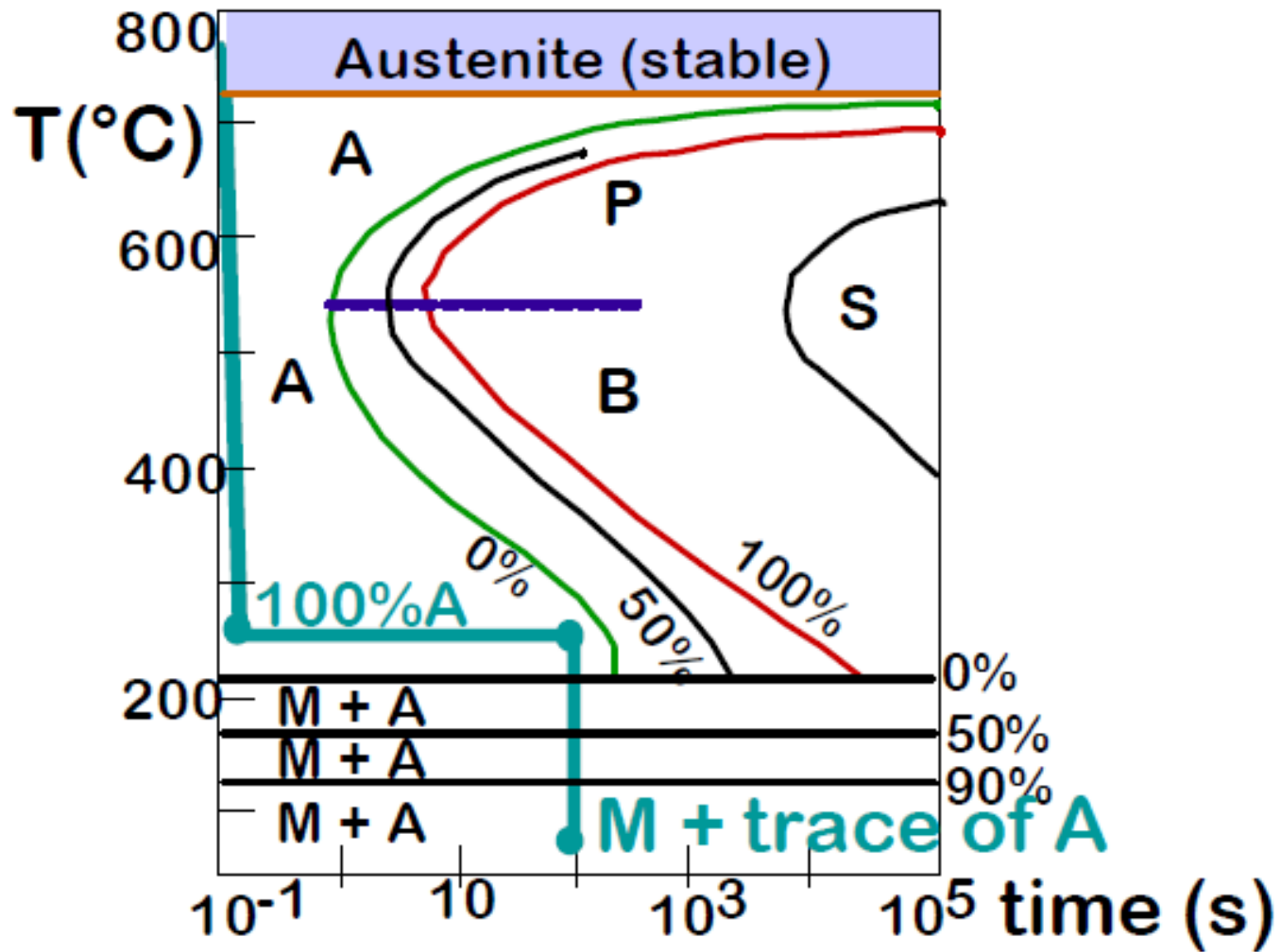


— Martensite needles  
 — Austenite

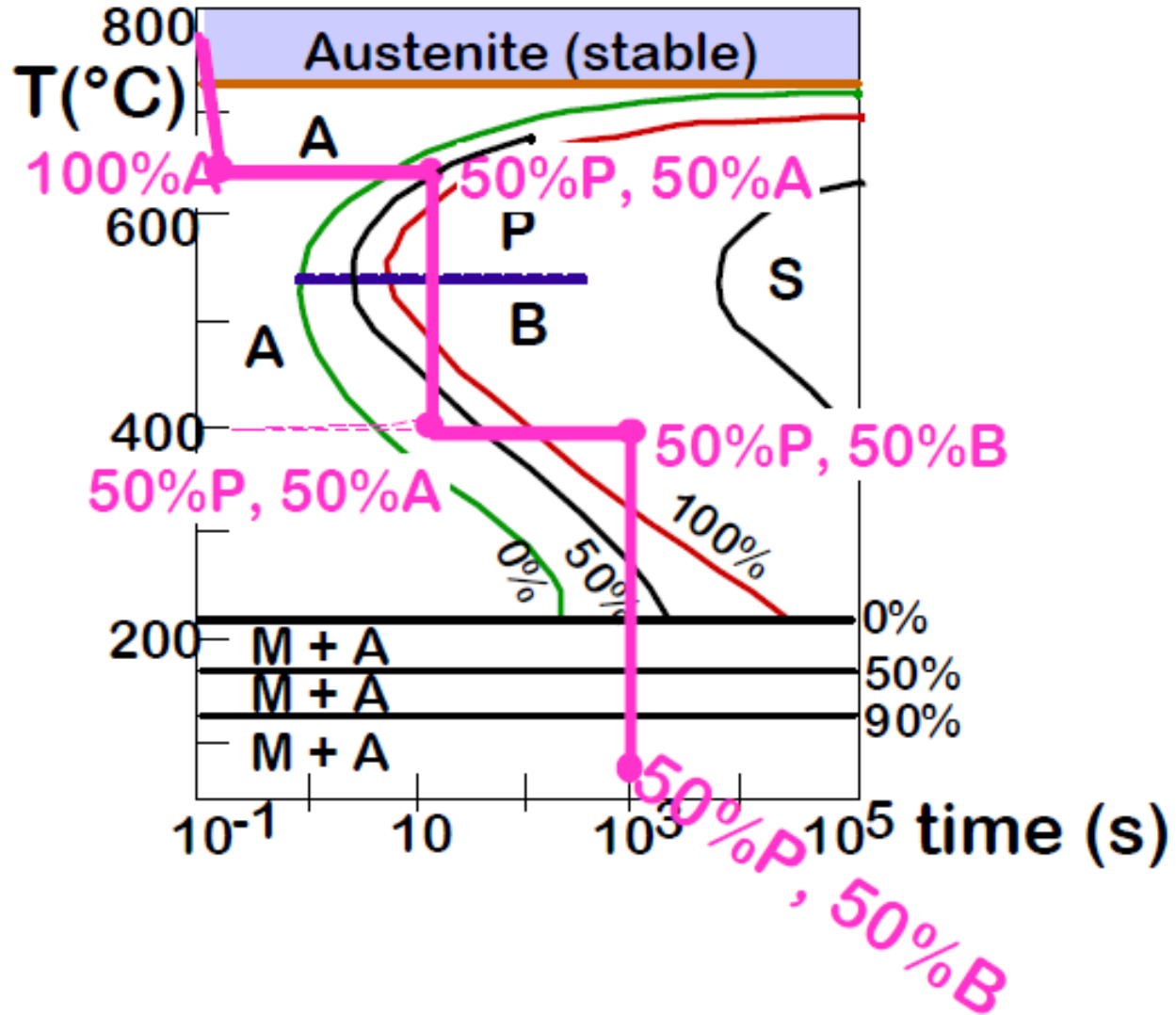
# مثال ١



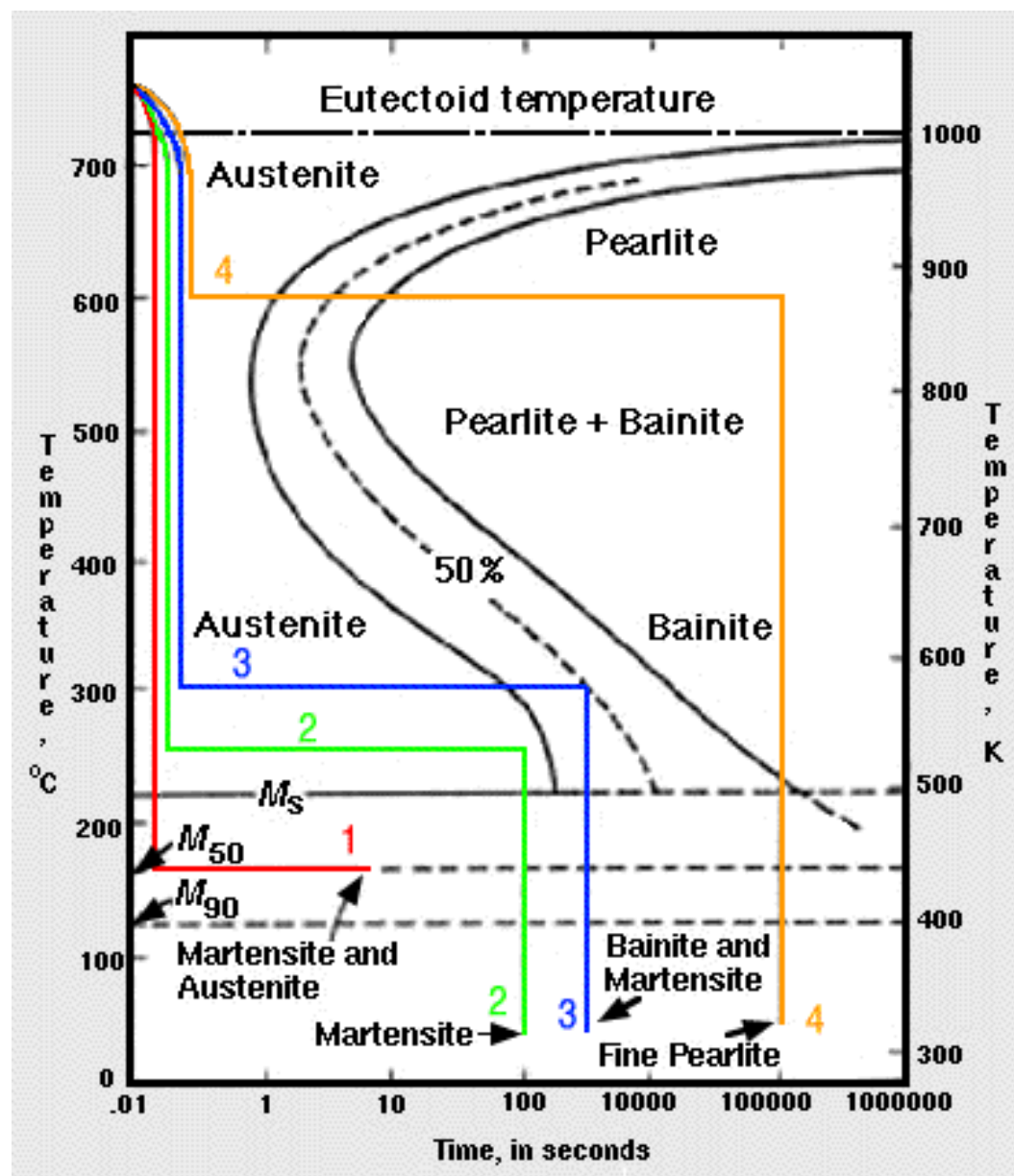
## مثال ٢

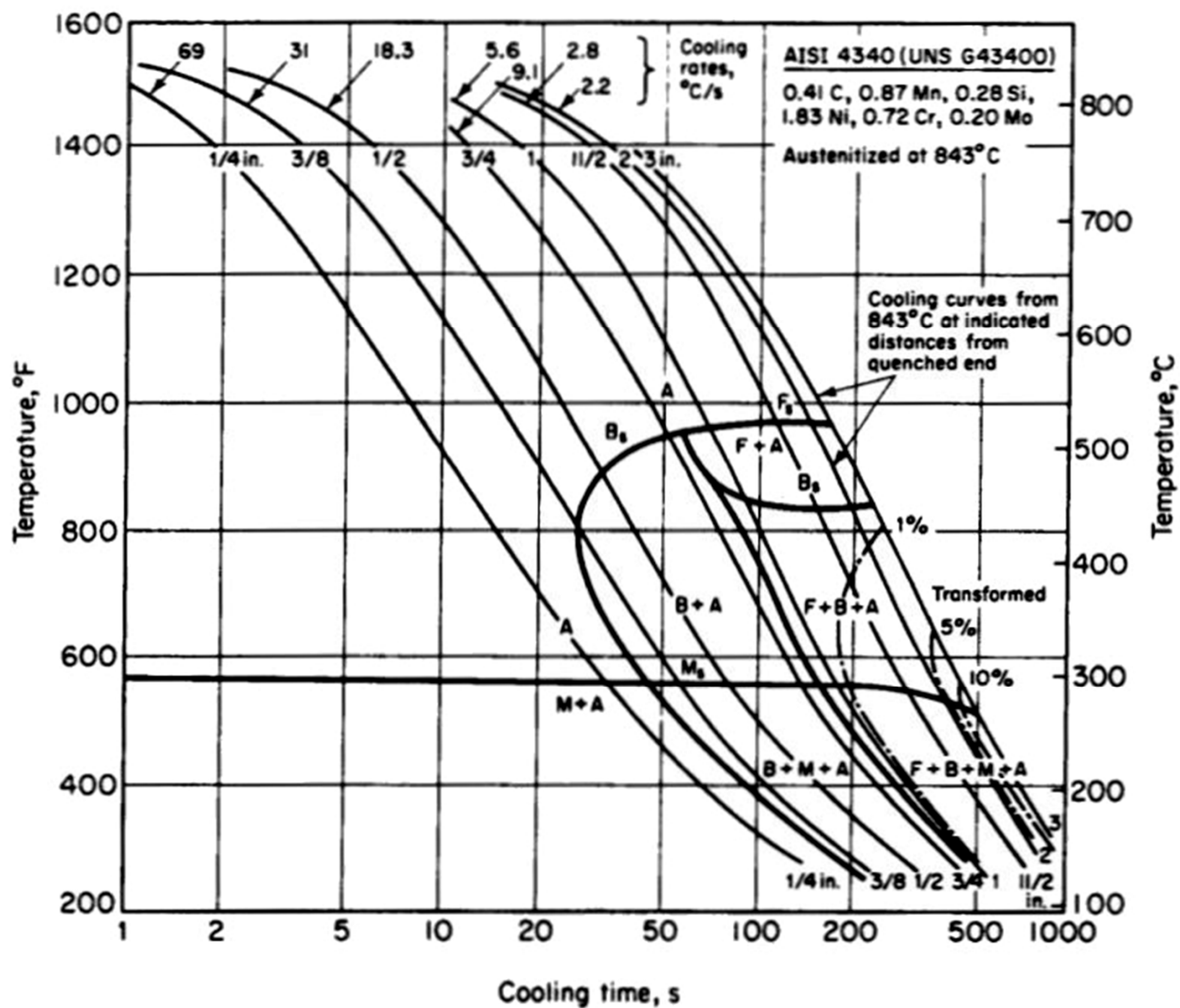


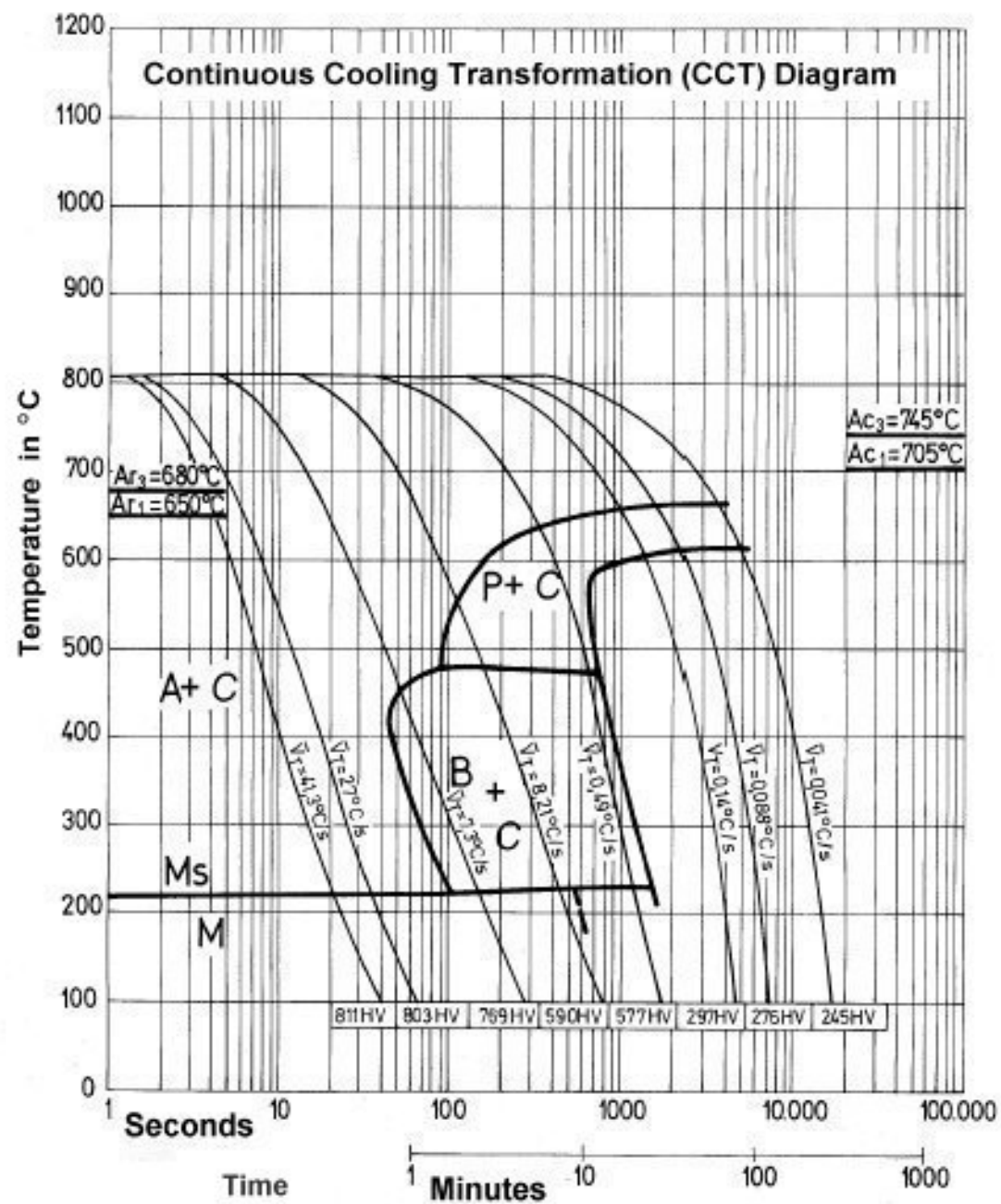
# مثال ٣



# مثال ٤

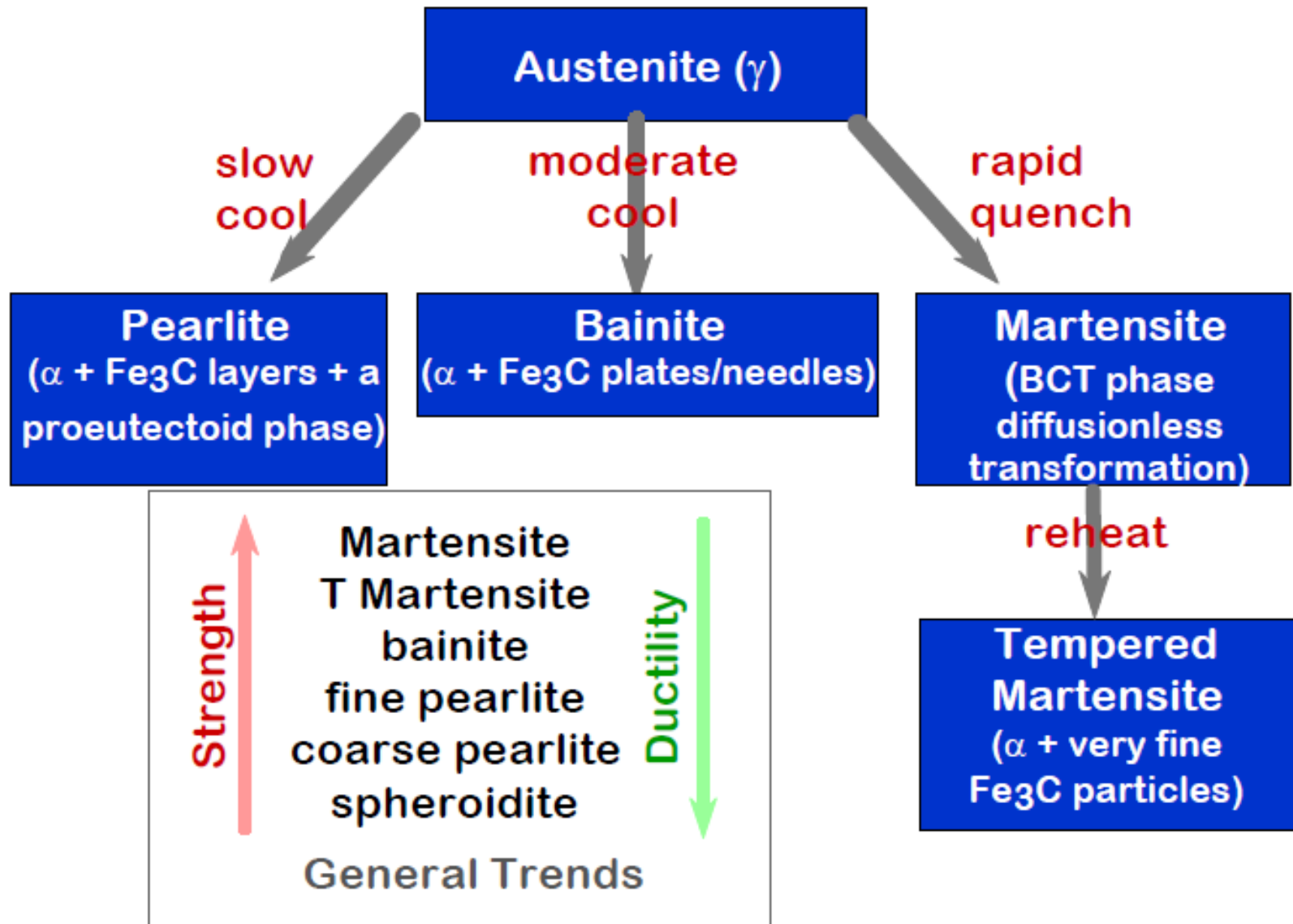








# جمع بندی



# تقسیم بندی فولادها

در این قسمت به تقسیم بندی فولادها در استاندارد (American ) AISI Iron and Steel Institute) پرداخته می شود.

۱- فولادهای کاربردی

۱- فولاد کربنی

۲- فولاد کم آلیاژی

۳- فولاد ضد زنگ

۴- فولاد ابزار

۲- فولادهای ریختگی

فولاد های کم کربن و کم آلیاژ با **۴ رقم** نمایش داده می شود:

۱- **رقم اول** نشانگر عنصر آلیاژی است: ۱- فولاد کربنی ۲- فولاد نیکلی ۳- فولاد کروم-نیکل ۴- فولاد مولیبدن دار ۵- فولاد کروم دار ۶- فولاد کروم-وانادیوم دار ۸- فولاد کروم-نیکل-مولیبدن ۹- فولاد سیلیسیم دار

۲- **رقم دوم** اطلاعاتی از فولاد می دهد: **برای فولاد کربنی**: ۰- فولاد زیمنس-ماتین ۱- فولاد کربنی با گوگرد زیاد و فسفر کم ۲- گوگرد و فسفر زیاد ۳- دارای منگنز. **برای فولاد آلیاژی** درصد عنصر آلیاژی را نشان می دهد

۳- **رقم سوم و چهارم** درصد کربن را نشان می دهد.

# فولاد ضد زنگ

این فولاد با ۳ رقم نمایش داده می شود.

رقم اول نشانگر گروه است

– اگر با ۲ شروع شود یعنی فولاد ضد زنگ آستنیتی کروم-نیکل-  
منگنز

– اگر با ۳ شروع شود فولاد ضد زنگ حاوی کروم-نیکل

– اگر با ۴ شروع شود فولاد ضد زنگ فریتی یا مارتنزیتی

– اگر با ۵ شروع شود فولاد ضد زنگ مقاوم در برابر حرارت

رقم دوم و سوم شماره سریال و بعضا بیانگر مرغوبیت فولاد است.

مثال ظروف آشپزخانه: ۳۰۲ یا ۸-۱۸

# فولاد ابزار

- ۱- فولاد ابزار سرد کار
- ۲- فولاد ابزار گرم کار
- ۳- فولاد تندبر