

علم مواد مہندی

تھیہ و تنظیم: محمد خلیلی سواد کوہی

تاریخچه:

از زمانی که انسان فلز را شناخت، متالورژی را به عنوان یک هنر فرا گرفت. صنعت متالورژی از دیر باز در جهان به عنوان یک صنعت مادر شناخته شده و با پیشرفتهای روز افزون تکنولوژی نقش آن اشکار می گردد.

دوره فلزات بعد از عصر حجر و از حدود ۶ تا ۷ هزار سال قبل از هجرت آغاز شده است. شاید مس اولین فلزی است که بطور خالص و طبیعی و جدا از مواد معدنی مورد استفاده بشر قرار گرفته است.

در عصر حاضر می توان متالورژی را مادر صنعت دانست. در دنیای صنعتی امروز بی شک اگر آلیاژهای خاص و کاربر با کمک علم متالورژی به وجود نمی آمد هم اکنون ما شاهد خیلی از پیشرفتهای بشر نبودیم.

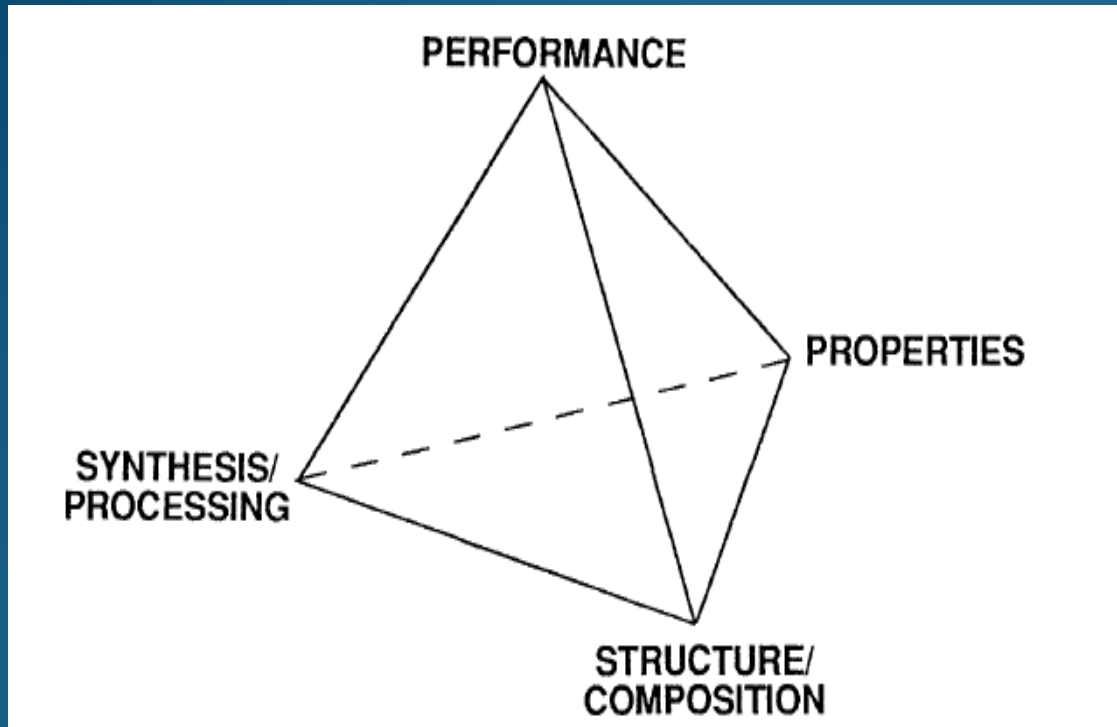
مواد مهندسی به سه بخش اصلی تقسیم بندی می شوند:

فلزات : رسانای حرارت و الکتریسیته بوده و شکل پذیر هستند (به علت پیوند فلزی).

سرامیک ها: دارای پیوند کووالانت و یونی بوده و در نتیجه سختی بالا و دیرگدازی بالایی دارد.

پلیمر ها : دارای مولکول های بزرگ و طویلی بوده که از تکرار واحدهای سازنده کوچکتر ایجاد می شود.

۴ محور اصلی علم و مهندسی مواد



- ۱ فرایند
- ۲ ساختار
- ۳ خواص
- ۴ کارآیی

در واقع علم و مهندسی مواد ارتباط این ۴ عنصر را جستجو و بررسی می کند. در علم و مهندسی مواد به این نکته توجه می شود که اغلب خواص مواد علاوه بر ترکیب شیمیایی به ساختار درونی آن ها نیز بستگی دارد. در واقع با اطلاع از ترکیب شیمیایی یک آلیاژ نمی توان در مورد خواص آن اظهار نظر قطعی کرد زیرا باید مشخصات ساختاری آن نیز مشخص باشد.

به طور خلاصه، ساختار یک ماده به نحوه ی چینش اجزای درونی آن مرتبط است. بسته به ابعاد جزء سازنده ی درونی ماده، می توان سطوح مختلف ساختاری برای هر ماده تعریف کرد.

سطوح ساختاری مواد

مشخصه ی ساختاری	مقیاس (m)
ساختار هسته ای	10^{-15}
ساختار اتمی	10^{-10}
ساختار کریستالی یا شیشه ای	10^{-9}
ساختار محلول جامد ها و ترکیبات	10^{-9}
ساختار دانه و مرزدانه ها	10^{-8}
اندازه و شکل دانه ها و فازها	10^{-7} تا 10^{-3}
تجمع دانه ها و فازها	10^{-5} تا 10^{-2}
سازه ی مهندسی	10^3 تا 10^{-3}

محدوده ی قابل کنترل برای تغییر خواص

خواص مواد را از نظر حساسیت به ریزساختار، می توان به دو دسته تقسیم کرد:

۱ **خواص غیر حساس به ریزساختار:** برخی از خواص مانند دانسیته، ضریب انبساط حرارتی و گرمای ویژه ی مواد تقریباً مستقل از ریزساختار ماده است.

۲ **خواص حساس به ریزساختار:** برخی خواص مانند استحکام تسلیم، استحکام کششی، شکل پذیری، چقرمگی شکست، استحکام خستگی و استحکام خزشی به شدت تابع تاریخچه ی عملیات حرارتی و یا مکانیکی آن ها دارد و در نتیجه شدیداً تابع ریزساختار هستند. در واقع در این موارد، با داشتن ترکیب شیمیایی نمی توان خواص ماده را حدس زد.

ساختار اتمی:

اتم متشکل از پروتون و نوترون در هسته و الکترون ها در حال حرکت به دور هسته است. پروتون و الکترون هر دو از نظر الکتریکی باردار هستند.

عدد اتمی (Z) = تعداد پروتون های اتم
عدد جرمی (A) = مجموع تعداد پروتون ها و نوترون ها در هسته

$$A=Z+N$$

که در این رابطه N تعداد نوترون های اتم است.
عدد آواگادرو (N_A): یک مول از هر ماده 6.02×10^{23} اتم دارد.

ساختار الکترونی:

۱- والانس (n):

به تعداد الکترون های لایه آخر والانس گفته می شود که نقش تعیین کننده ای در خواص شیمیایی ماده دارند زیرا الکترون های لایه ی آخر در واکنش های شیمیایی و پیوند برقرار کردن با دیگر اتمها شرکت می کنند.
براساس تعداد الکترون های لایه آخر می توان عناصر را به ۴ دسته تقسیم کرد:

فلز	$n= 1,2,3$
شبه فلز	$n= 4$
نافلز	$n=5,6,7$
گاز خنثی	$n=8$

ساختار الکترونی:

- ۲- الکترونگاتیویته: معیاری برای تمایل به جذب الکترون است. فلزات تمایل زیادی به از دست دادن الکترون دارند و در نتیجه الکتروپوزیتیو هستند. نافلزات تمایل زیادی به جذب الکترون دارند و در نتیجه الکترونگاتیو هستند.
- ۳- **جدول تناوبی:** براساس آرایش الکترونی تمام عناصر در یک جدول تناوبی آرایش یافته اند. در واقع جدول تناوبی راهنمای مناسبی برای اطلاع از خواص شیمیایی عناصر مختلف است. از آن جایی که عناصر موجود در هر گروه تعداد الکترون والانس برابر دارند؛ بنابراین قابل انتظار است که دارای خواص شیمیایی و فیزیکی یکسان باشند.

پیوندهای بین اتمی

اتم ها به دو صورت با همدیگر پیوند دارند:

۱- پیوندهای اولیه (اصلی): این پیوندها شامل پیوندهای یونی، کوالانسی و فلزی هستند و به طور کلی پیوندهایی قوی هستند.

۲- پیوندهای ثانویه (فرعی): این پیوندها شامل پیوندهای واندروالس و هیدروژنی هستند که نسبتاً ضعیف هستند. در این پیوندها انتقال و اشتراک الکترون وجود ندارد.

البته قابل ذکر است که پیوندهای بین اتمی موجود در برخی موارد ممکن است خالص نباشد و ترکیبی از پیوندهای فوق باشد.

پیوندهای اولیه

۱- پیوند فلزی:

(الف) این نوع پیوند در فلزات و آلیاژهای آن ها یافت می شود.

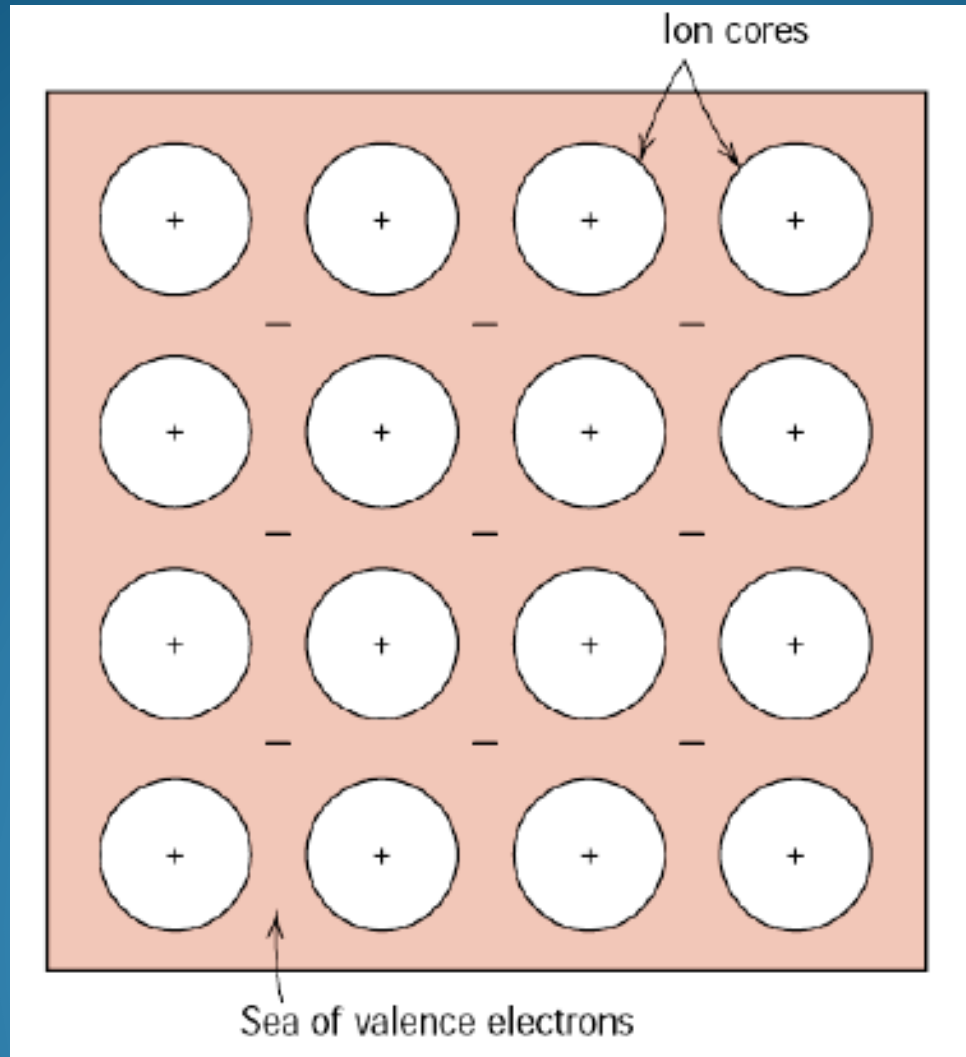
(ب) مهم ترین مشخصه ساختار الکترون فلزات؛ دارا بودن الکترون آزاد است.

(پ) مدلی که برای تشریح پیوند فلزی ارائه شده است بر اساس مدل "دریای الکترون آزاد" است در این مدل الکترون های آزاد به صورت دریایی از الکترون های آزاد که تعلق خاص به یک اتم ندارند در نظر گرفته می شوند و الکترون های غیروالانس باقیمانده و هسته ی اتم (تشکیل هسته های یونی را می دهند. هسته های یونی دارای بار خالص مثبت هستند و در این دریای الکترون شناورند.

(ت) عامل اتصال اتم ها در پیوند فلزی، جاذبه ی بین الکترون های آزاد و هسته ی یونی با بار مثبت است.

(ث) ماهیت پیوند فلزی غیرجهت داراست.

پیوند فلزی:



۲- پیوند یونی:

الف) این نوع پیوند در ترکیباتی یافت، شود که متشکل از یک عنصر الکترونگاتیو و یک عنصر الکتروپوزتیو باشند.

ب) پیوند اتمی حاکم در بسیاری از سرامیک ها، یونی است.

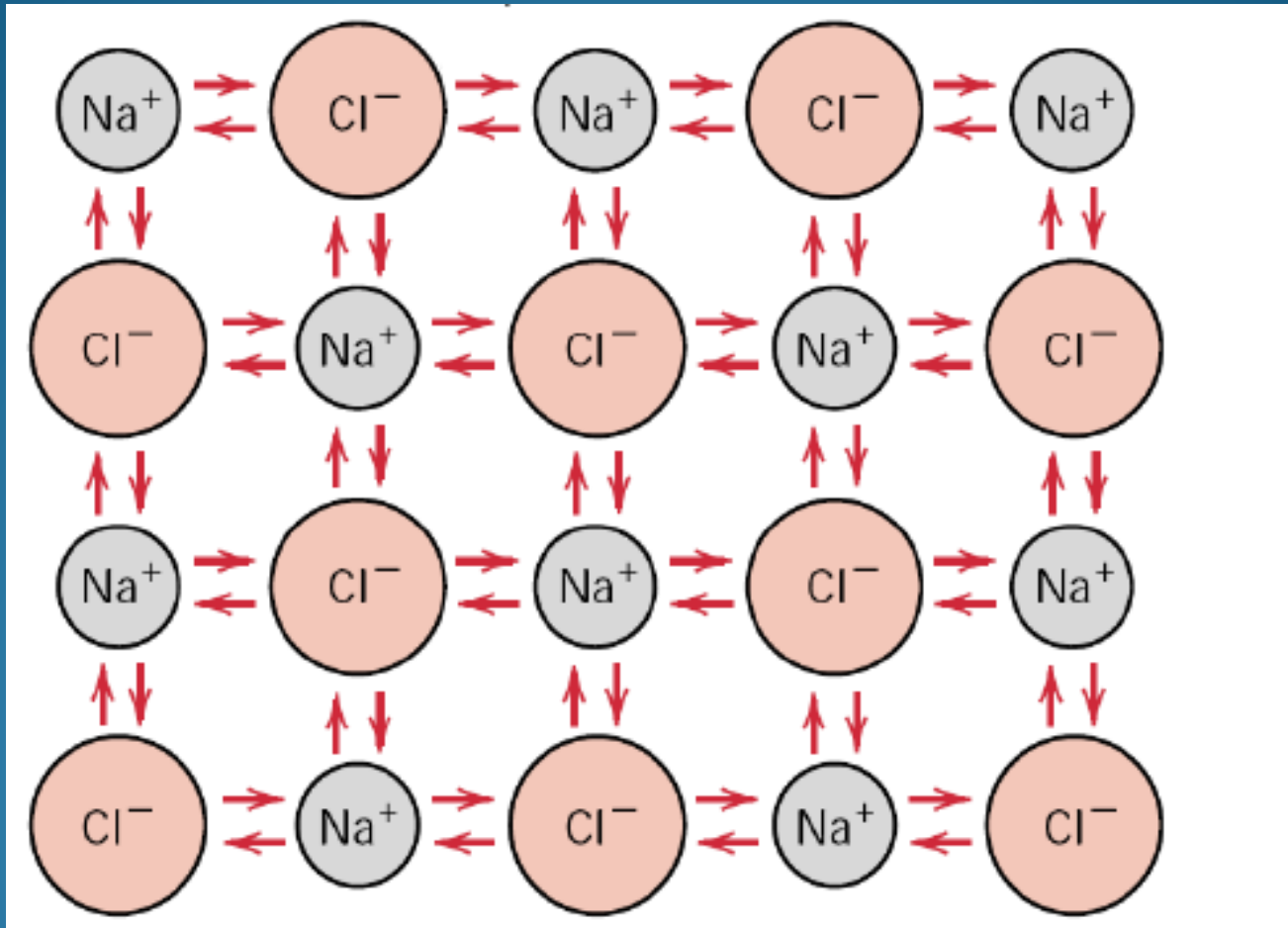
پ) پیوند یونی براساس انتقال و داد و ستد الکترون است.

ت) در این پیوند عنصر فلزی با دادن الکترو نه‌ای لایه ظرفیت خود به عنصر نافلز موجب می شود تا هر دو عنصر به آرایش گاز پایدار است که در NaCl می رسند و فلز به یون مثبت (کاتیون) و نافلز به یون منفی (آنیون) تبدیل می شود.

ث) عامل پیوند، جاذبه الکترواستاتیکی بین یون مثبت و یون منفی است.

ج) ماهیت پیوند یونی، غیرجهت دار است یعنی مقدار پیوند در تمام جهات اطراف یک اتم یکسان است.

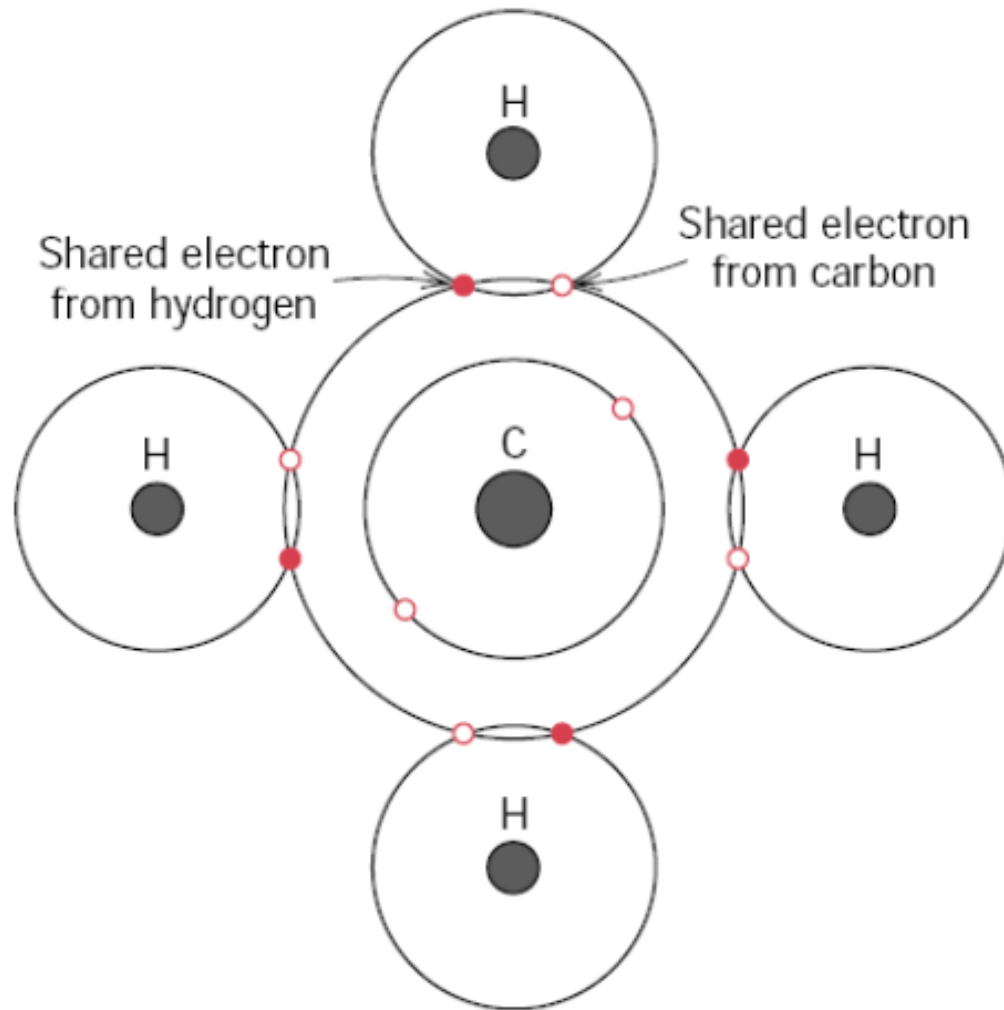
پیوند یونی:



۳- پیوند کووالانسی:

- الف) پیوند کووالانسی به شکل خالص در الماس، سیلیکون و ژرمانیوم یافت می شود.
- ب) پیوند کووالانسی براساس شراکت الکترون است. در این پیوند نزدیک شدن دو هسته موجب ایجاد یک اربیتال الکترونی جدید شامل الکترون های به شراکت گذاشته شده میشود. در این حالت الکترون های به شراکت گذاشته شده را می توان متعلق به هر دو اتم دانست.
- پ) یکی از مهم ترین مشخصه های پیوند کووالانسی جهت دار بودن آن است. به علت نامتقارن بودن شکل اربیتال ها، قدرت پیوند بین اتمی در تمام جهات یکسان نیست.

پیوند کووالانسی:

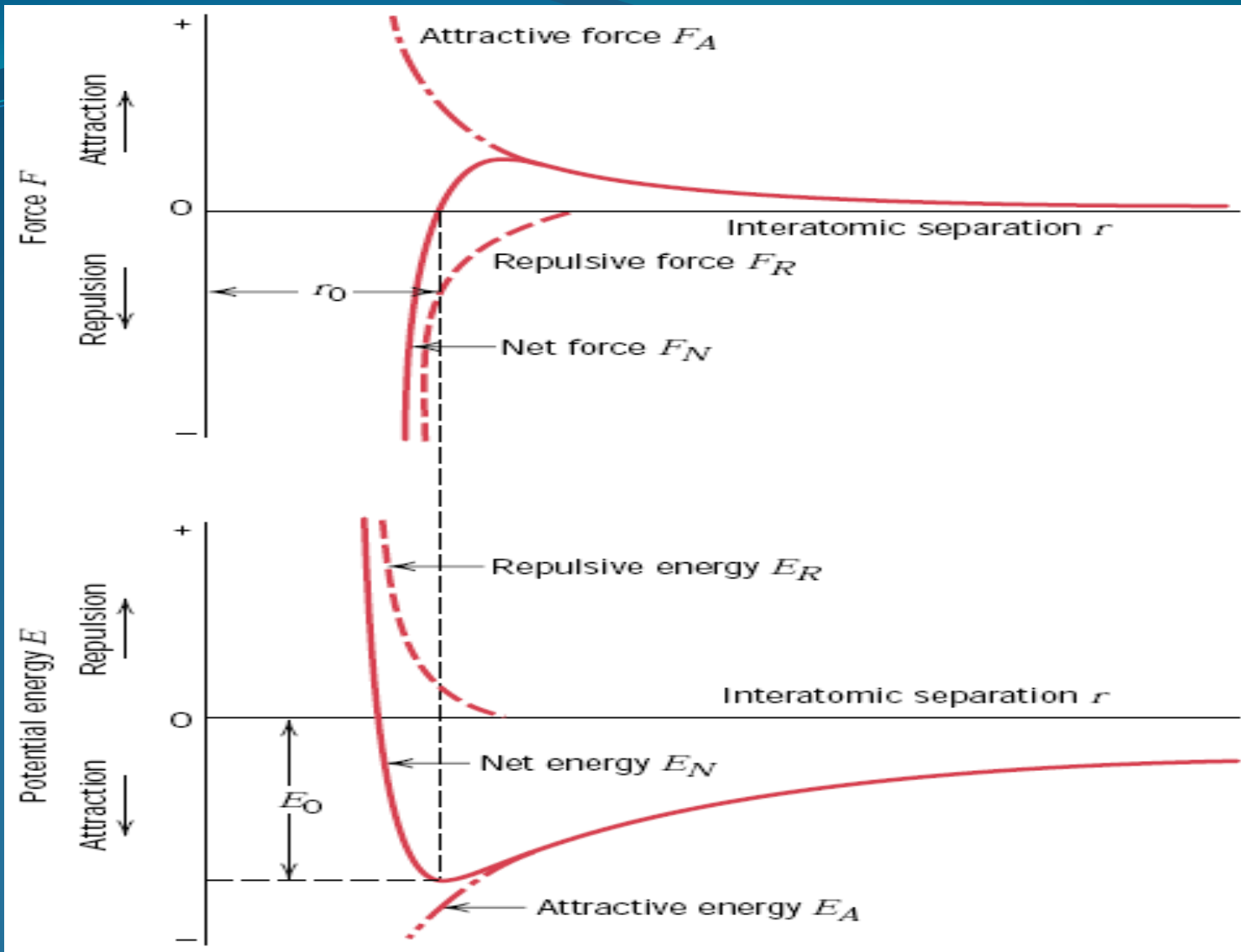


انرژی پیوندی:

منحنی تغییرات نیروی بین اتمی (و انرژی پتانسیل) بر حسب فاصله ی بین اتمی

اصول پیوند اتمی را میتوان با در نظر گرفتن اندرکنش دو اتم ایزوله که از فاصله ای دور به هم نزدیک می شوند، درک کرد. در فواصل دور؛ اندرکنش ها قابل صرف نظر کردن است. با نزدیک شدن دو اتم به هم؛ دو نوع نیروی بین اتمی (جاذبه و دافعه) بین آن ها شکل می گیرد. مقدار آن ها تابعی از فاصله ی بین اتمی است.

۱. منشأ نیروی جاذبه، بستگی به نوع پیوند اتمی دارد و به طور کلی ناشی از نیروی بین مراکز با بار مثبت و منفی است.
۲. منشأ نیروی دافعه، هم پوشانی الکترون های لایه ی آخر است که با هر چه بیشتر نزدیک شدن دو اتم، مقدار آن افزایش می یابد.
۳. نیروی خالص بین دو اتم مجموع این دو نیرو است؛



$$F_N = F_A + F_R$$

هنگامی که F_N برابر صفر شود، اتم ها در فاصله ی $r=r_0$ در حالت تعادل قرار دارند.

انرژی پیوندی:

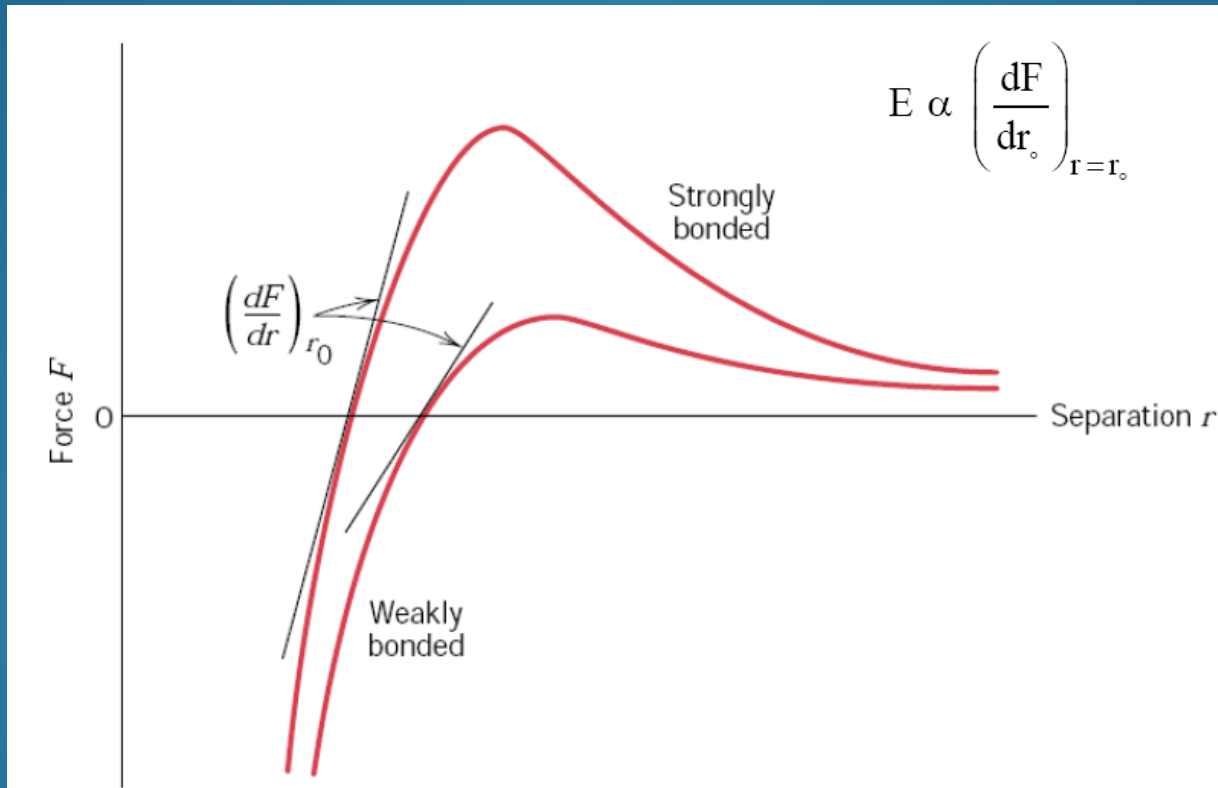
مهمترین مشخصه منحنی انرژی-فاصله، نقطه مینیمم آن است. انرژی متناظر با فاصله ی تعادلی r_0 ، انرژی پیوند است. انرژی پیوندی E_0 حداقل انرژی مورد نیاز برای جدا کردن و یا شکستن پیوند است. انرژی پیوندی تابع نوع پیوند بین اتمی است.

نوع پیوند	انرژی پیوندی (kJ)
یونی	625–1550
کووالانسی	520–1250
فلزی	100–800
واندروالسی	<40

برخی خواص مواد وابسته به انرژی پیوندی و شکل منحنی انرژی فاصله است.

به طور کلی با افزایش انرژی پیوندی؛ دمای ذوب و مدول یانگ افزایش می یابد و ضریب انبساط حرارتی کاهش می یابد.

در مقیاس اتمی؛ مقدار مدول یانگ تابعی از مقاومت پیوند اتمی در برابر تغییر فاصله ی تعادلی اتم هاست. در واقع مدول یانگ متناسب است با شیب نمودار نیروی بین اتمی - فاصله در نقطه ی r_0 .



نمودار نیرو- فاصله برای دو ماده با مدول الاستیسیته ی بالا و پائینی

مواد را از نظر نظم اتمی می توان به سه دسته تقسیم کرد:

-مواد بی نظم: مثل گازها

-مواد با نظم بلند دامنه (کریستال): در این مواد (کریستال ها)، اتم ها در طی فاصله های طولانی اتمی دارای نظم تکرار شونده یا آرایش پریودی هستند. در واقع طی انجماد، اتم ها خود را در یک الگوی سه بعدی تکرار شونده آرایش می دهند به صورتی که هر اتم بانزدیک ترین اتم همسایه پیوند دارد. در این مواد، عدد همسایگی برای اتم های بالک در سرتاسر کریستال حفظ می شود.

-مواد با نظم کم دامنه (آمورف): در این مواد نظم اتمی تا چند فاصله ی اتمی حفظ می شود و عدد همسایگی متغیر است.

-یکی از روش های تهیه مواد آمورف فلزی، سریع سرد کردن مذاب آن ها با سرعت های در حدود 10^6 K/Sec است. در این سرعت های بالای انجماد با اتم ها فرصت کافی برای آرایش منظم در موقعیت های مشخص اتمی را ندارند.

سیستم های بلوری (سیستم های تبلور)

از آنجا که ساختارهای بلوری مختلفی وجود دارند گاهی راحت تر است که آنها را بر مبنای شکل سلول واحد و یا آرایش اتمی گروه بندی کنیم. این روش فقط بر پایه ی هندسی سلول واحد یعنی شکل سلول واحد متوازی السطوح و بدون توجه به موقعیت اتم ها در سلول واحد است. در این روش یک سیستم مختصاتی X, Y, Z برقرار می شود. شکل هندسی سلول واحد به طور کامل توسط ۶ پارامتر تعیین میشود:

طول بردار در امتداد محور X

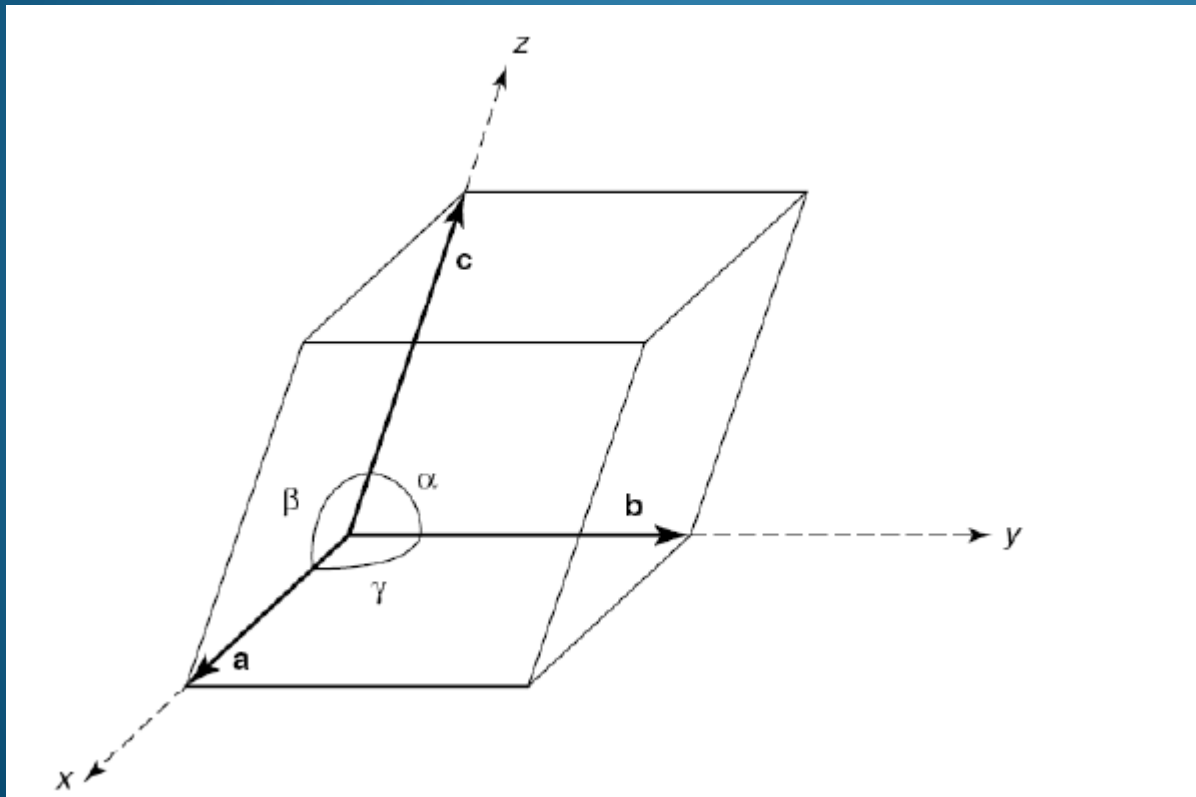
طول بردار در امتداد محور Y

طول بردار در امتداد محور Z

زاویه ی بین بردار b و c

زاویه ی بین بردار a و b

زاویه ی بین بردار a و c



سیستم های بلوری :

بر این اساس هفت تلفیق احتمالی α , β , γ , a , b , c وجود دارد که هر کدام یک سیستم بلوری یا سیستم تبلور جداگانه را مشخص می کنند. این هفت سیستم بلوری عبارتند از:

۱. مکعبی
۲. تتراگونال
۳. هگزاگونال
۴. ارتورمبیک
۵. رمبوهدرال
۶. مونوکلینیک
۷. تری کلینیک

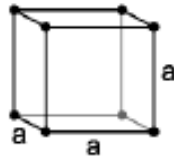
. مشخصات هفت سیستم بلوری و شکل هندسی آن ها در ادامه می آید.

شکل هندسی سلول واحد

زوایای بین محورها

ارتباط پارامترهای شبکه

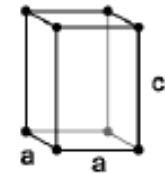
سیستم بلوری



$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

$$a = b = c$$

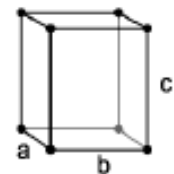
مکعبی



$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

$$a = b \neq c$$

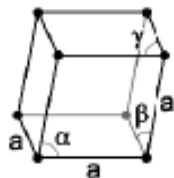
تتراگونال



$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

$$a \neq b \neq c$$

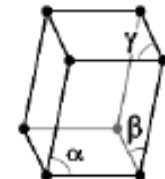
اورتورومبیک



$$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$$

$$a = b = c$$

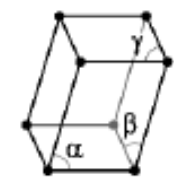
رومبوهدرال
(تریگونال)



$$\beta = \gamma = 90^\circ \neq \alpha$$

$$a \neq b \neq c$$

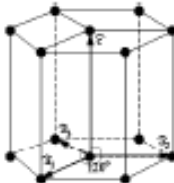
مونوکلینیک



$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$

$$a \neq b \neq c$$

تری کلینیک



$$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$$

$$a = b \neq c$$

هگزاگونال

اندیس های بلوری:

جهات و صفحات بلوری در فضا توسط علائمی به نام اندیس های بلوری تعریف می گردند. عموماً از سیستم میلر برای اندیس گذاری صفحات و جهات بلوری استفاده می شود. روش تعیین اندیس های جهات در شبکه مکعبی:

از مبدا مختصات برداری به موازات جهت مورد نظر رسم می شود.

مولفه های بردار بر روی سه محور مختصات تعیین می شوند.

مولفه های بردار به کوچکترین اعداد صحیح تبدیل می شوند.

اندیس میلر یک جهت در براکت و به صورت $[hkl]$ نشان داده می شود.

ولی تمام جهات هم نوع به صورت $\langle hkl \rangle$ نشان داده می شوند.

مثلاً اندیس جهات قطری در مکعب به شکل $\langle 111 \rangle$ نشان داده می شود که شامل چهار جهت زیر است:

$$[\bar{1} 11], [1 \bar{1} 1], [11 \bar{1}], [111]$$

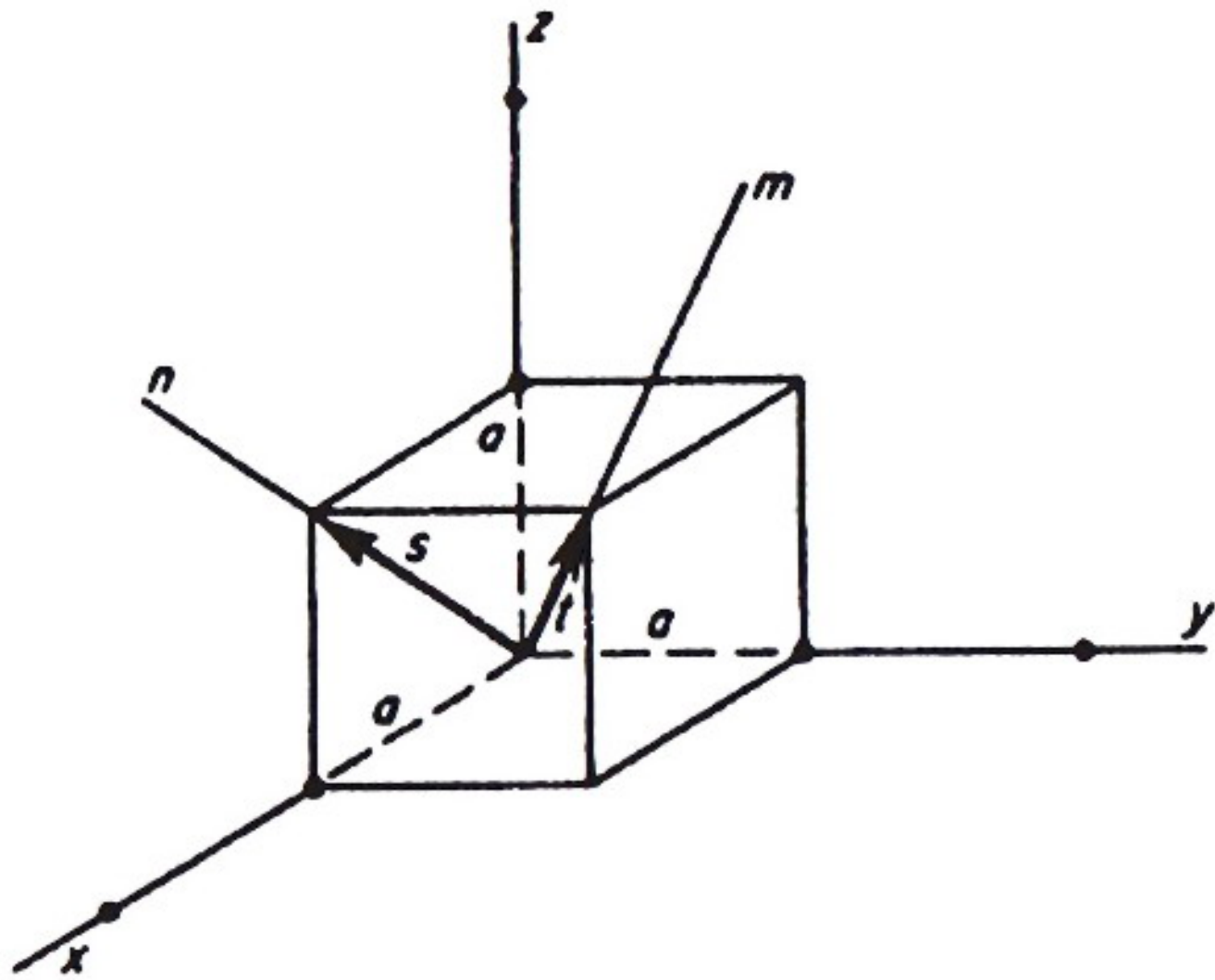


Fig. 1.13 The $[111]$ and $[101]$ directions in a cubic crystal; directions m and n , respectively.

روش تعیین اندیس های صفحات در شبکه مکعبی

- نقاط تقاطع صفحه مورد نظر با محورهای مختصات تعیین و مختصات آن ها تعیین می شود.
- اندیس میلر صفحه متناسب با معکوس مختصات نقاط تقاطع با محورهاست که باید به کوچکترین اعداد صحیح تبدیل شوند.

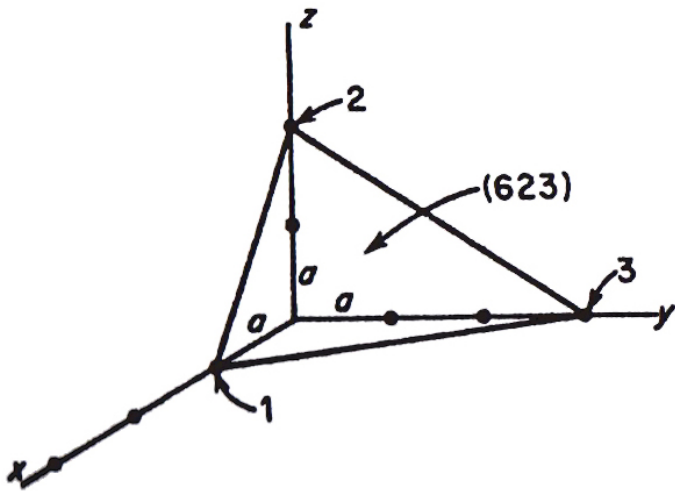


Fig. 1.15 The intercepts of the (623) plane with the coordinate axes.

$$\left(\frac{1}{1}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2} \right)$$
$$(623)$$

اندیس میلر یک صفحه در پراونتز و به صورت (hkl) نشان داده می شود.

ولی تمام صفحات هم نوع به صورت $\{hkl\}$ نشان داده می شوند.

مثلا اندیس صفحات اکتاهدرال در مکعب به شکل $\{111\}$ نشان داده می شود که شامل چهار صفحه زیر است:

$$(\bar{1}11), (1\bar{1}1), (11\bar{1}), (111)$$

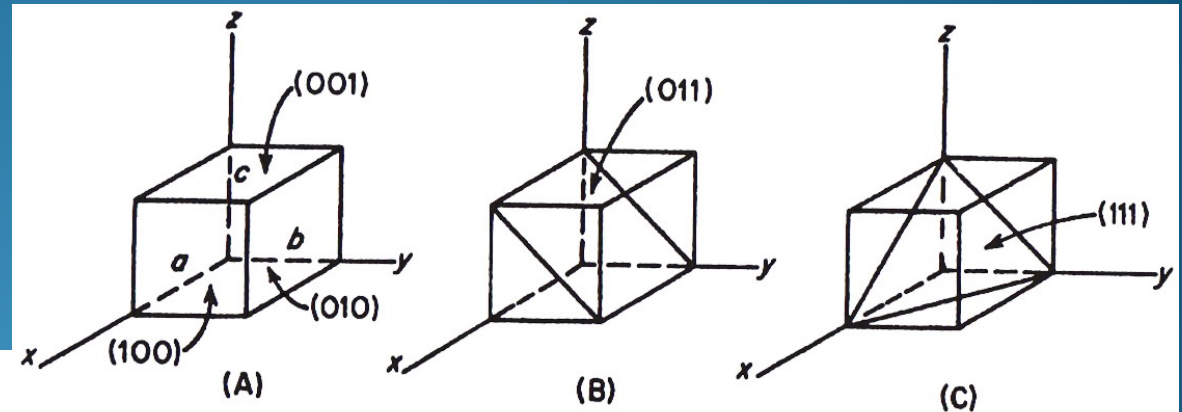


Fig. 1.16 (A) Cube planes of a cubic crystal: a (100); b (010); c (001). (B) The (011) plane. (C) The (111) plane.

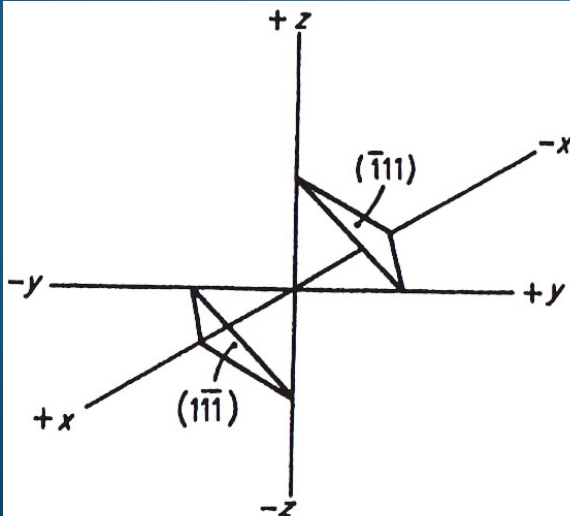


Fig. 1.17 The $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ and (111) planes are parallel to each other and therefore represent the same crystallographic plane.

نکته مهم:

اندیس میلر یک صفحه و جهت عمود بر آن صفحه یکسان هستند.

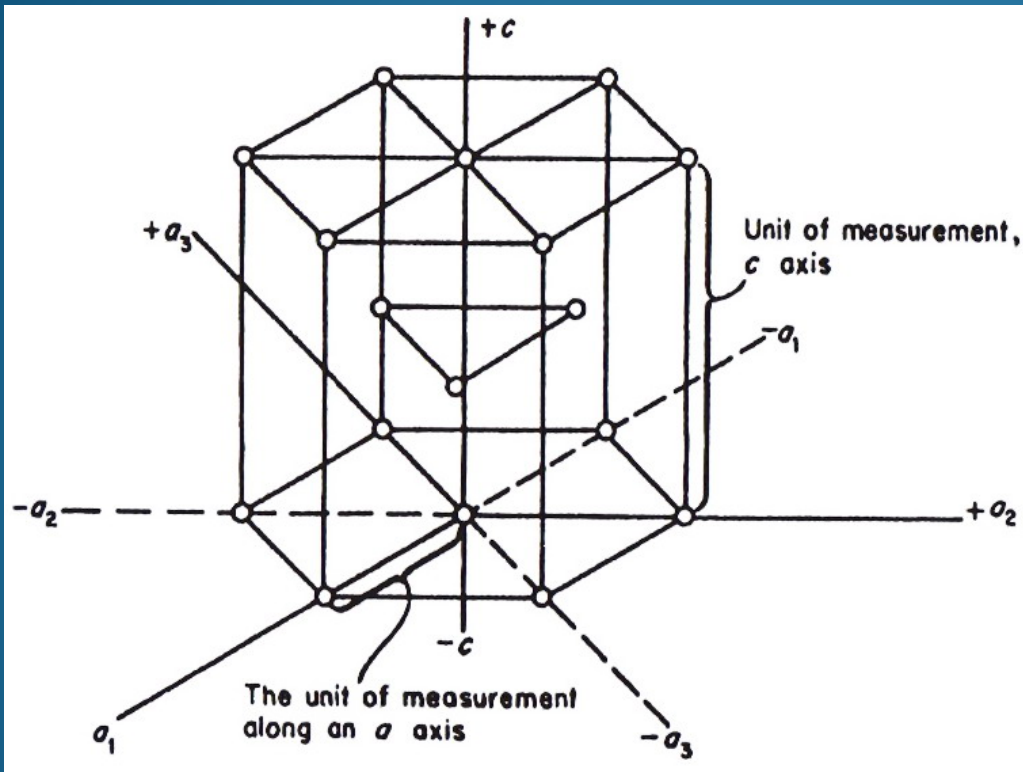
مثلا اندیس وجه مکعب که عمود بر محور X است (100) و اندیس محور X نیز برابر $[100]$ است.

همچنین اندیس صفحه کتاهدرال در مکعب (111) و اندیس قطر مکعب که عمود بر آن است نیز $[111]$ است.

اندیس های میلر در شبکه هگزاگونال

نکته:

اندیس میلر صفحات و جهات در بلور های هگزاگونال به صورت چهار رقمی بیان می شود و همواره:



$hkil$

$$h + k = -i$$

Fig. 1.18 The four coordinate axes of a hexagonal crystal.

$$\left(\frac{1}{1}, \frac{1}{\infty}, \frac{1}{-1}, \frac{1}{\infty} \right)$$

$$\left(10\bar{1}0 \right)$$

$$\left(\frac{1}{\infty}, \frac{1}{\infty}, \frac{1}{\infty}, \frac{1}{1} \right)$$

(0001)

c Intercept = $\frac{1}{2}$

$-a_2$

a_2

$-a_3$ Intercept is -1

a_1 a_1 Intercept is +1

a_3

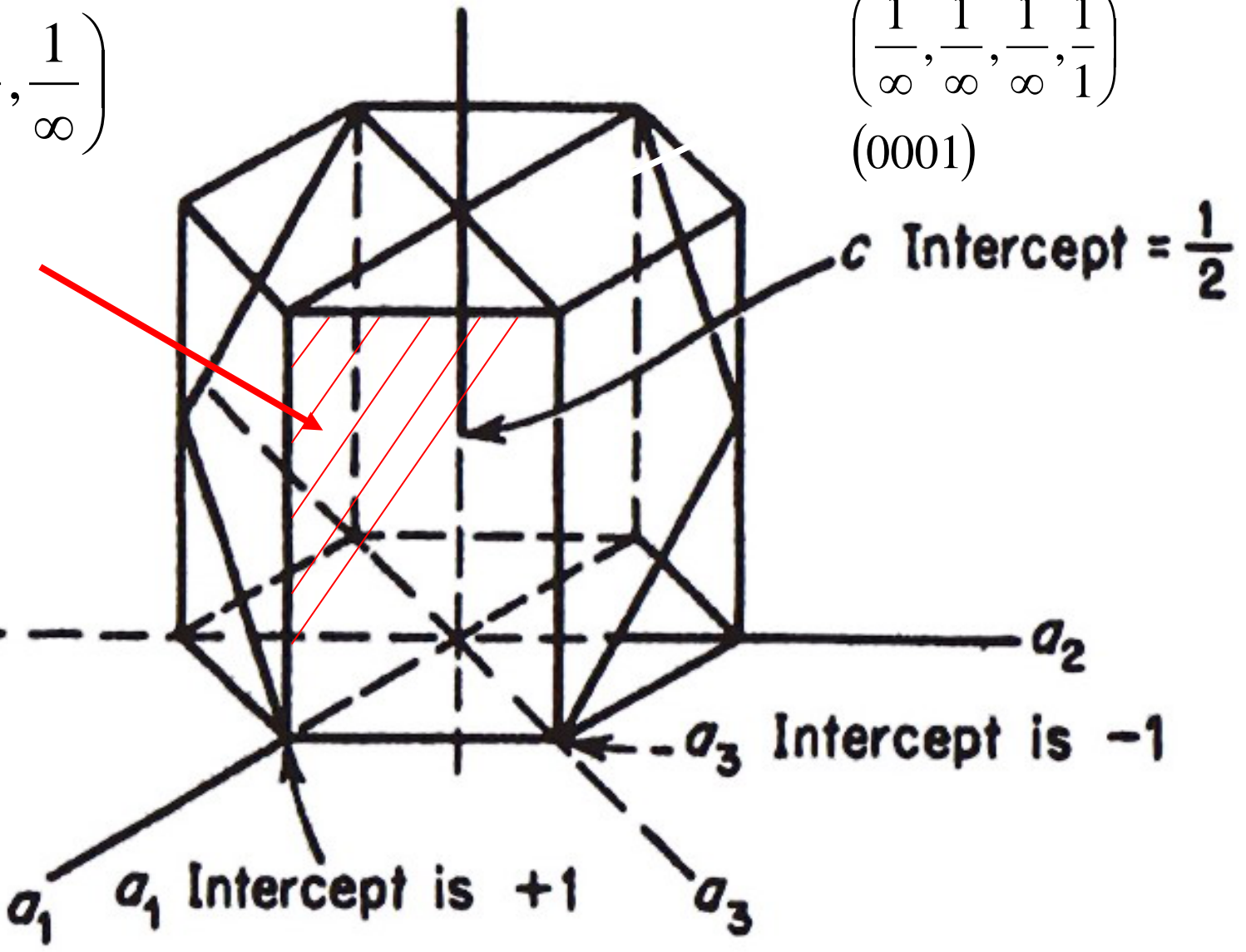


Fig. 1.19 The $(10\bar{1}2)$ plane of a hexagonal metal.

ساختار بلوری فلزات

اغلب فلزات به صورت یکی از ساختارهای ساده زیر متبلور می‌شوند:

۱- مکعبی

Simple Cubic (SC)

مکعب ساده

Body Centered Cubic (BCC)

مکعب مرکز دار

Face Centered Cubic (FCC)

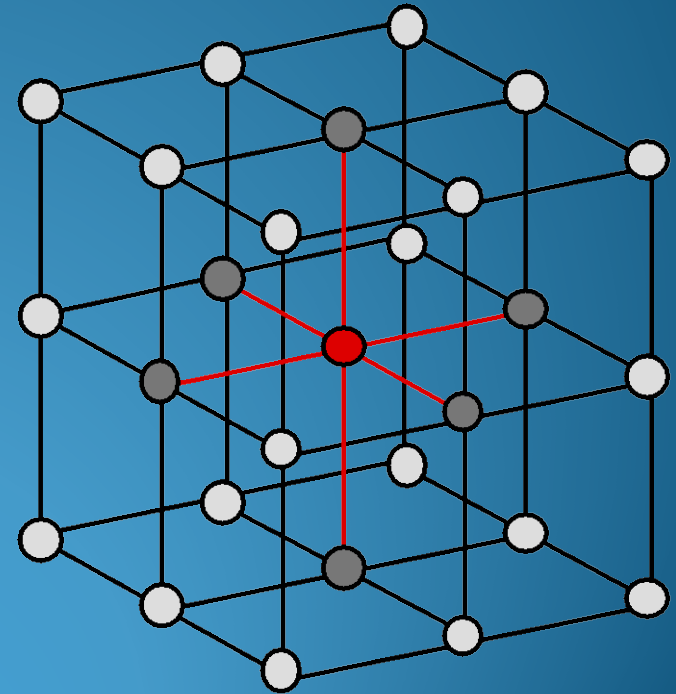
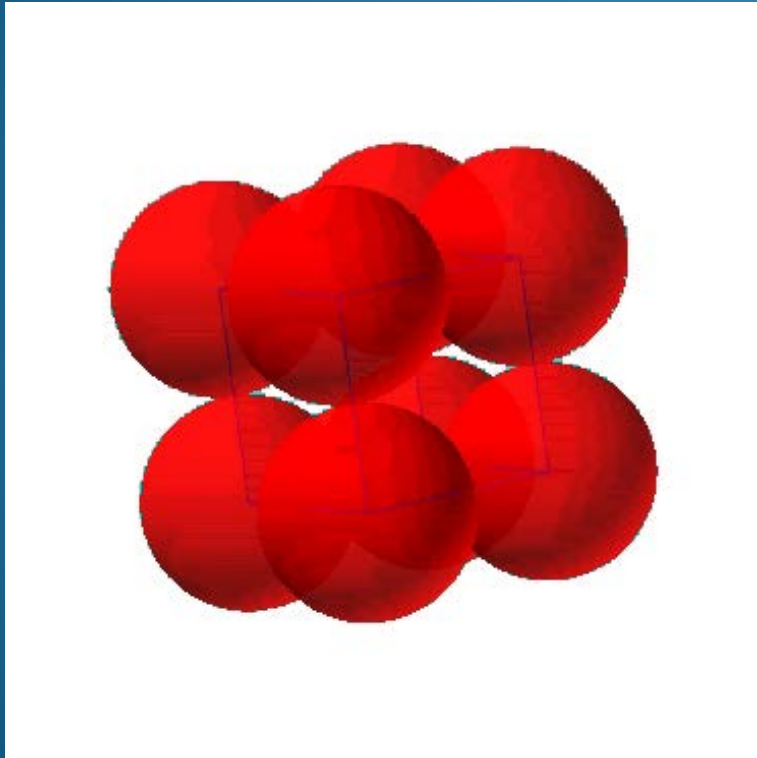
مکعب با وجوه مرکزدار

Hexagonal Close Pack (HCP)

۲- هگزاگونال فشرده

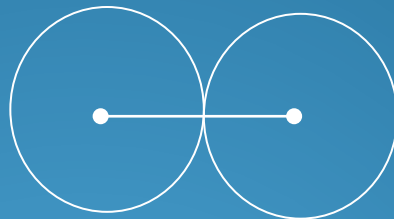
مکعب ساده (SC) Simple Cubic

در ساختار مکعبی ساده، اتم‌ها در گوشه‌های مکعب واقع هستند. در ساختار مکعبی ساده (SC)، هر اتم واقع در گوشه مکعب به ۸ سلول تعلق دارد. بنابراین سهم هر سلول از اتم‌های واقع در رئوس، یک هشتم است. پس به هر سلول واحد در شبکه (SC) یک اتم تعلق می‌گیرد.



یک بلور فلزی را می‌توان به صورت ساختار حاصل از چیدن کره‌هایی سخت در کنار هم در نظر گرفت که آن را مدل کرات سخت (**Hard-Ball Model**) می‌نامند. شعاع کره‌ها در این مدل نصف فاصله مراکز دو اتم به هم چسبیده است. با توجه به مدل کرات سخت، شعاع اتمی (کره‌ها) با توجه به اندازه یال مکعب که پارامتر شبکه (**Lattice Parameter**) نامیده می‌شود قابل محاسبه است. در ساختار مکعبی ساده اگر اندازه یال شبکه a باشد در این صورت رابطه آن با شعاع اتمی به صورت زیر است:

$$a = 2R$$

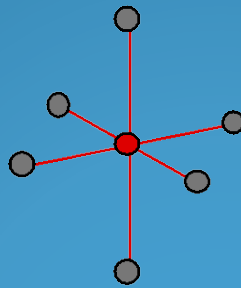
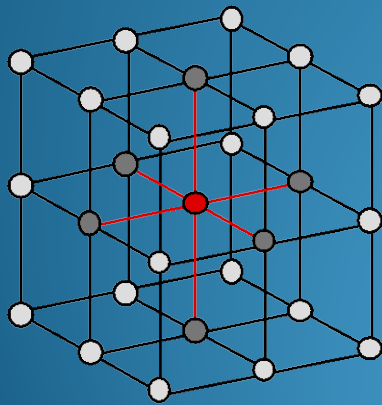


بدیهی است حجم شبکه a^3 و $\frac{4}{3}\pi R^3$ حجم یک اتم خواهد بود.

عدد همسایگی (Coordination Number)

عدد همسایگی یک شبکه بلوری برابر با تعداد نزدیک‌ترین اتم‌های همسایگی یک اتم در شبکه است.

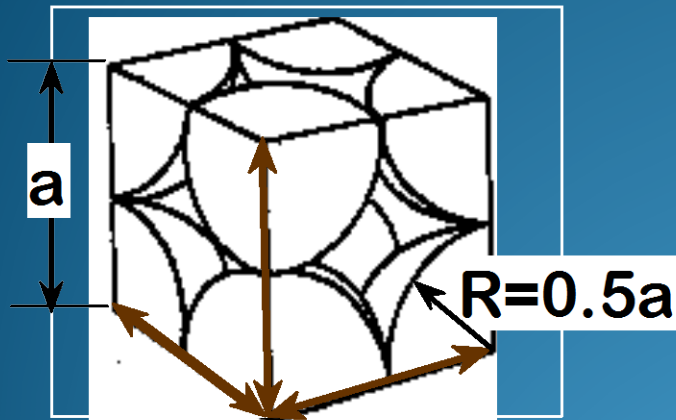
در شبکه مکعبی ساده هر اتم، شش اتم را در همسایگی چسبیده به خود دارد و لذا عدد همسایگی این شبکه بلوری برابر ۶ است.



CN (Coordination No) = 6

ضریب تراکم اتمی (Atomic Packing Factor)

نسبت حجم اتم ها در یک سلول واحد به حجم سلول واحد ضریب تراکم اتمی APF نامیده می شود.



close-packed directions
contains $8 \times 1/8 =$
1 atom/unit cell

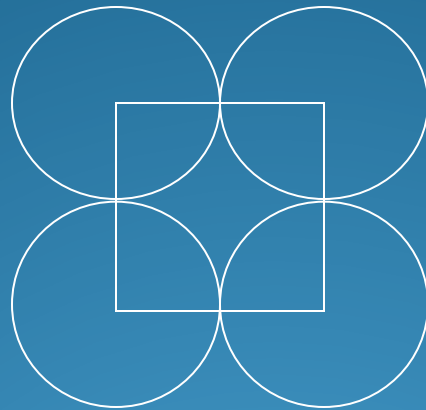
$$APF = \frac{\text{atoms unit cell} \times \text{volume atom}}{\text{volume unit cell}}$$

The diagram illustrates the calculation of the Atomic Packing Factor (APF) for a simple cubic unit cell. The numerator consists of the number of atoms per unit cell (1) multiplied by the volume of one atom ($\frac{4}{3} \pi (0.5a)^3$). The denominator is the volume of the unit cell (a^3). Arrows and labels identify each part: 'atoms unit cell' points to the '1', 'volume atom' points to the atom volume term, and 'volume unit cell' points to the a^3 term.

$$APF = 0.524$$

تراکم چگالی صفحه ای (Planar Packing Density)

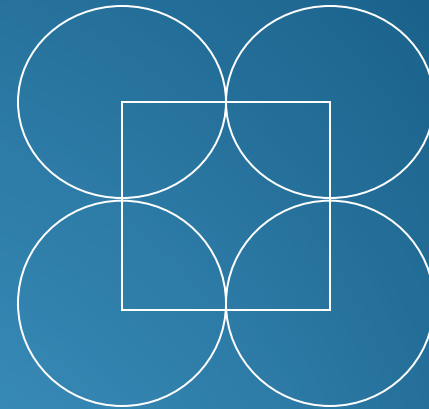
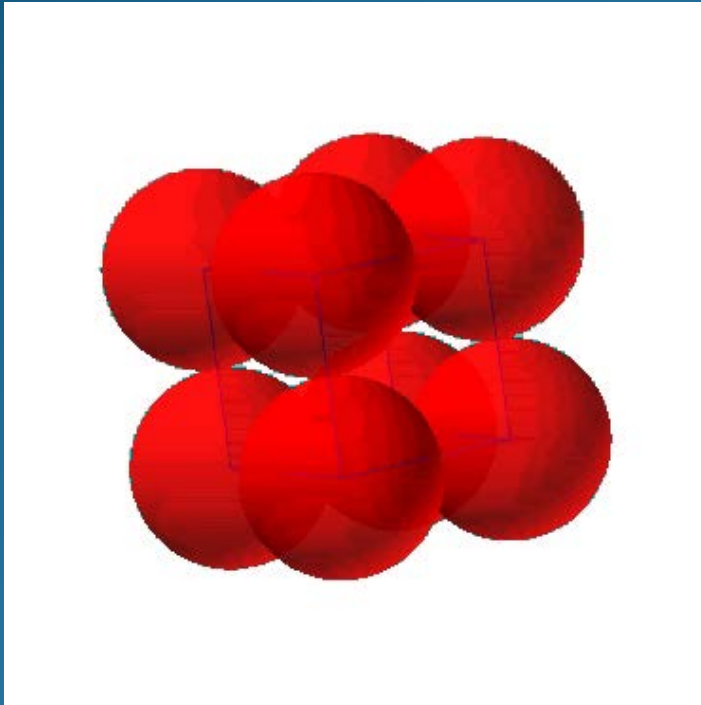
کسری از مساحت یک صفحه اتمی را که توسط اتم ها اشغال شده، تراکم چگالی صفحه ای PPD می نامند. مثلاً در وجوه مکعب:



$$PPD_{[100]} = \frac{4 \times \frac{1}{4} \times \pi R^2}{a^2} = \frac{\pi R^2}{(2R)^2} = 0.785$$

در سیستم SC، ۳ صفحه متراکم {100} داریم.

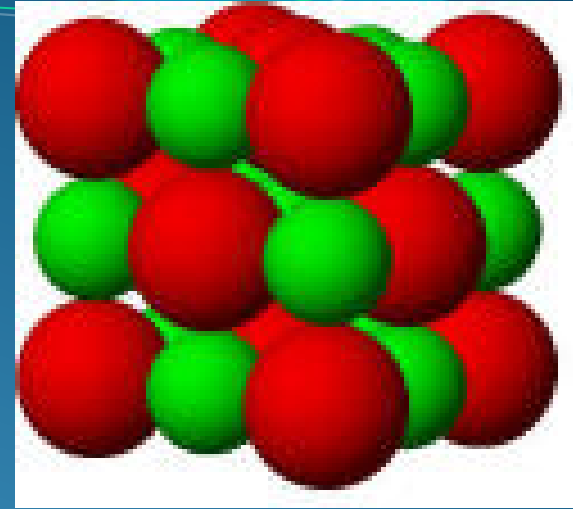
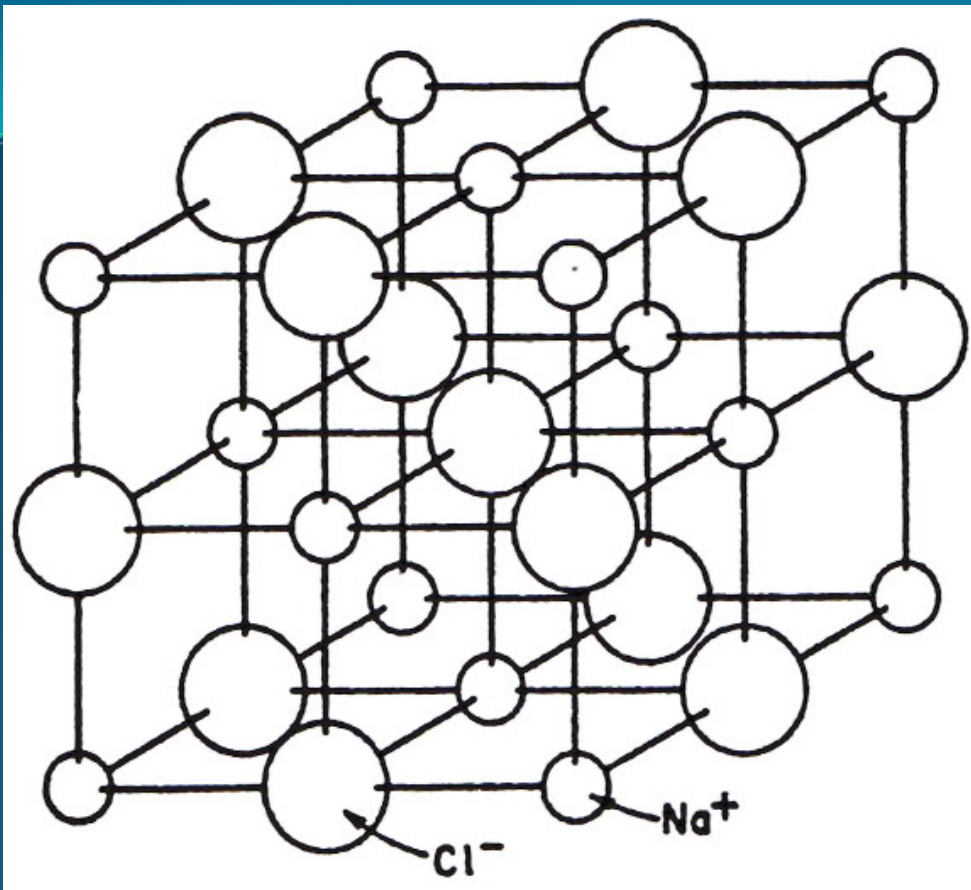
جهت فشرده و متراکم جهاتی هستند که در آن ها اتم ها با یکدیگر
مماس هستند.



در سیستم مکعبی ساده، یال های مکعب، جهت فشرده ساختار
هستند. در این سیستم ۳ جهت متراکم $\langle 100 \rangle$ داریم.

سیستم مکعبی ساده به دلیل تراکم اتمی پایین و دانسیته کم آن ساختاری پرانرژی است.

لذا تبلور مواد در این ساختار بلوری بسیار نادر است (عنصر پلونیوم Po و اکسیژن و فلورئور در حالت جامد).



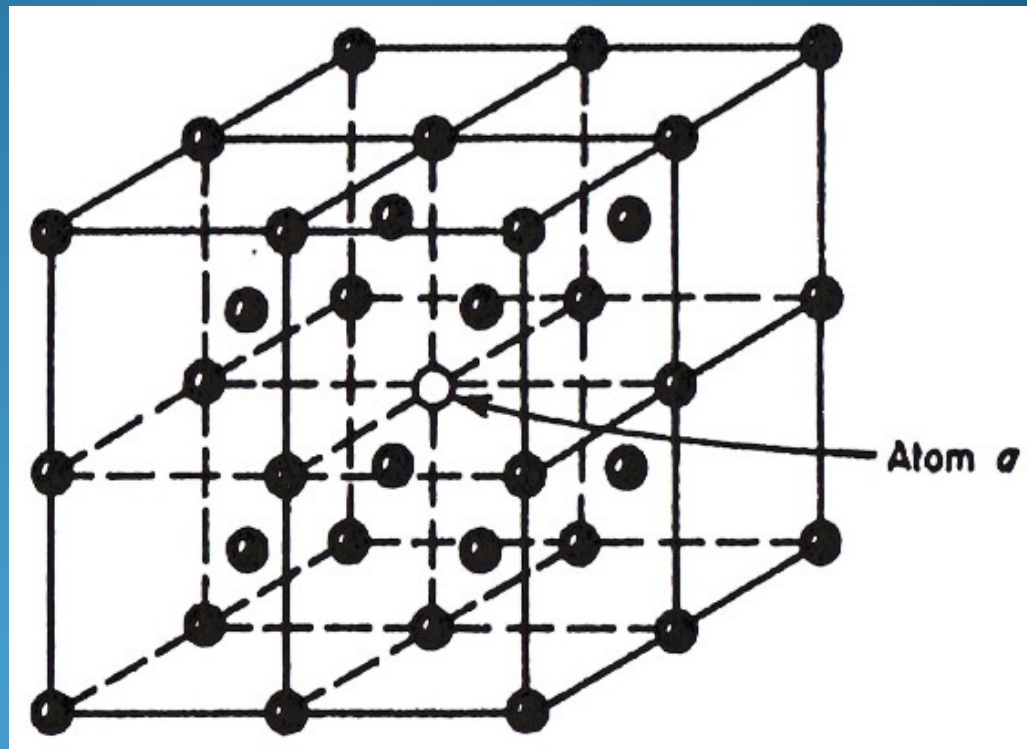
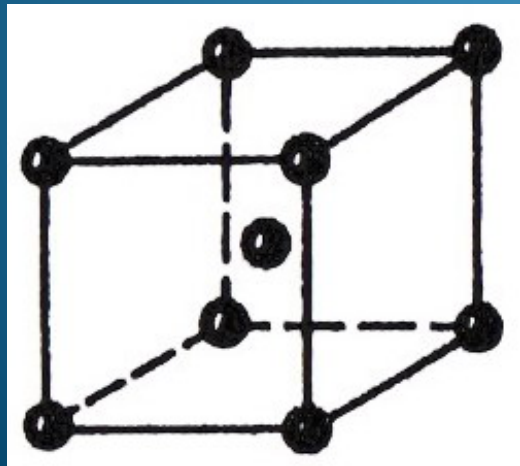
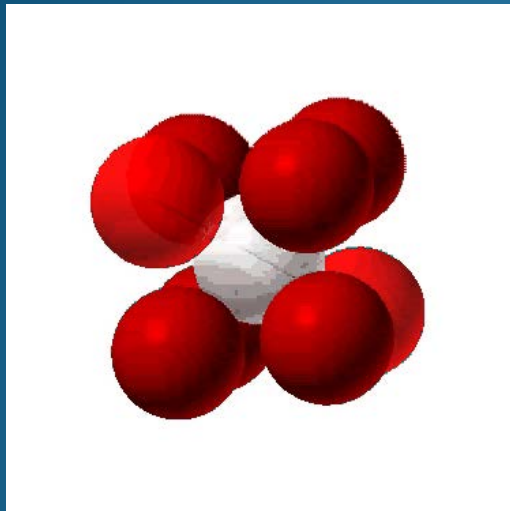
شبکه بلوری سدیم کلرید

شبکه بلوری سدیم کلرید یک جامد یونی است که آن مکعبی ساده است. هر یون توسط ۶ یون غیرهم‌نام احاطه شده است.

ساختار مکعبی مرکز دار (Body Centered Cubic (BCC))

در ساختار مکعبی مرکز دار، هر اتم واقع در گوشه مکعب به ۸ سلول تعلق دارد و سهم هر سلول از اتم‌های واقع در رئوس، یک هشتم است. ولی اتم مرکزی هر سلول فقط به همان سلول متعلق است.

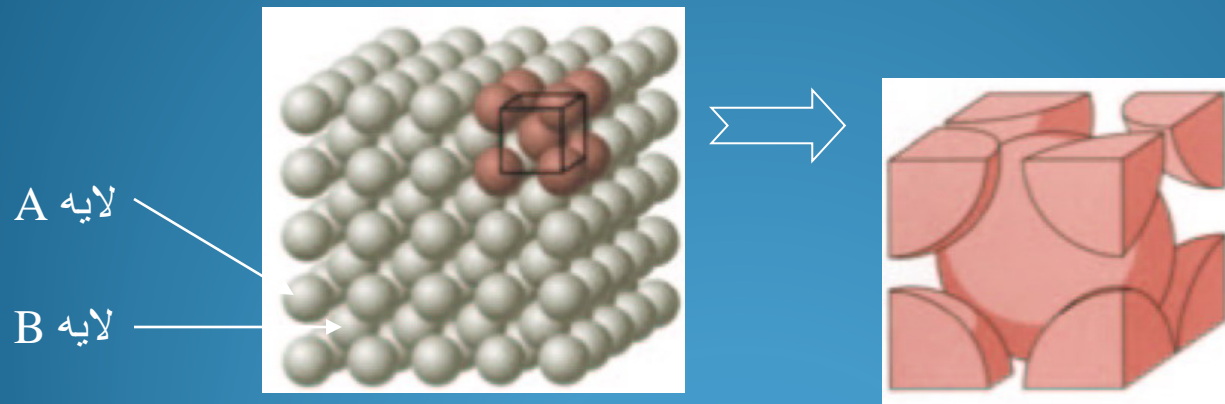
پس به هر سلول واحد در شبکه (BCC) دو اتم تعلق می‌گیرد.



در ساختار مکعبی مرکزدار (BCC)، اتم مرکزی با اتم‌های واقع در گوشه در یک راستا هستند.

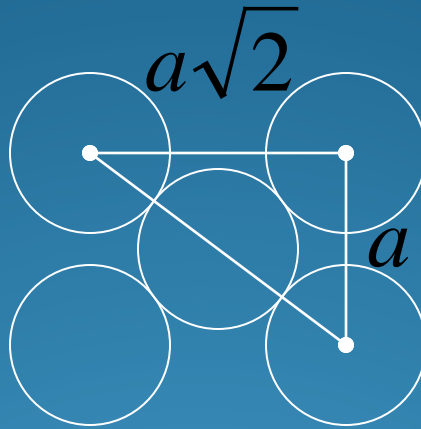
چهار قطر مکعب $\langle 111 \rangle$ ، جهات فشرده ساختار هستند و شش صفحه $\{110\}$ صفحات متراکم این سیستم هستند.

در ساختار (BCC)، اتم مرکزی با اتم‌های گوشه فرقی با هم ندارند.



چیدمان صفحات اتمی در این ساختار به صورت $ABABAB\dots$ است.

در ساختار مکعبی مرکزدار اگر اندازه یال شبکه a باشد در این صورت رابطه آن با شعاع اتمی به صورت زیر است:



تصویر مقطع بلور BCC در صفحه (110).

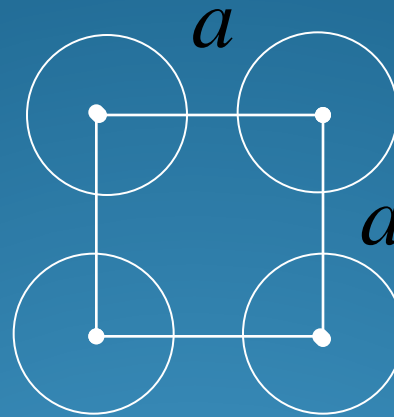
$$(4R)^2 = a^2 + (a\sqrt{2})^2 \Rightarrow a = \frac{4}{\sqrt{3}} R$$

در شبکه مکعب مرکز دار هر اتم، هشت اتم را در همسایگی چسبیده به خود دارد و لذا عدد همسایگی این شبکه بلوری برابر ۸ است.

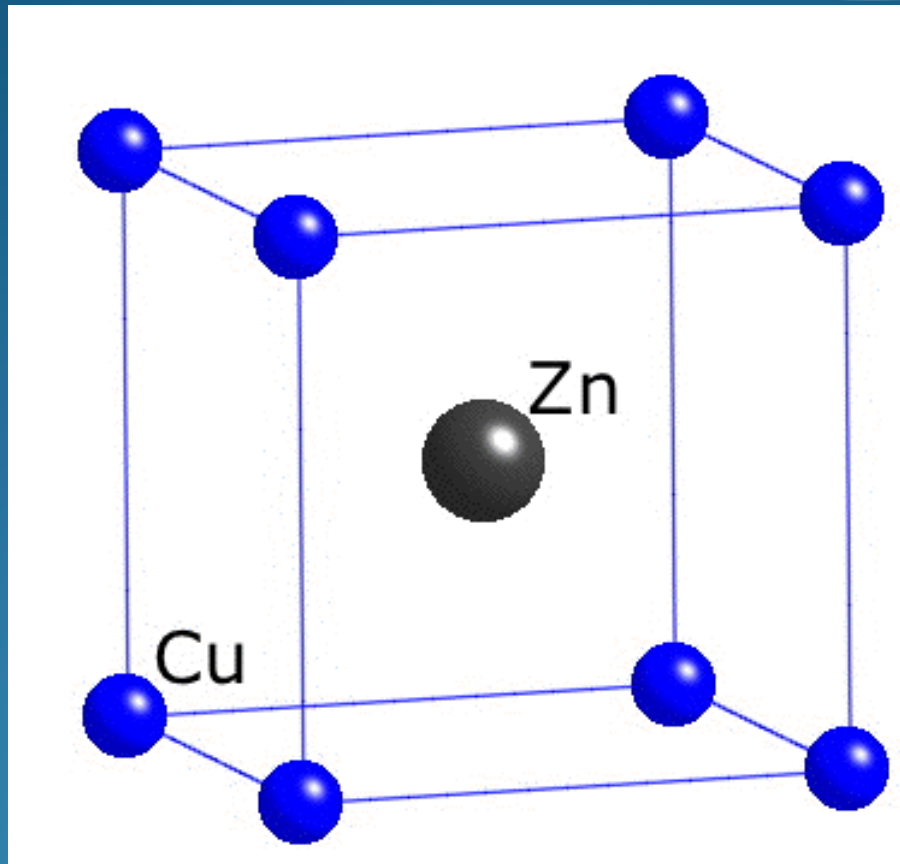
ضریب تراکم اتمی در شبکه BCC برابر است با:

$$APF = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi R^3}{\left(\frac{4}{\sqrt{3}} R \right)^3} = 0.68$$

تراکم چگالی صفحه ای PPD در وجوه یک سیستم بلوری BCC برابر است با:



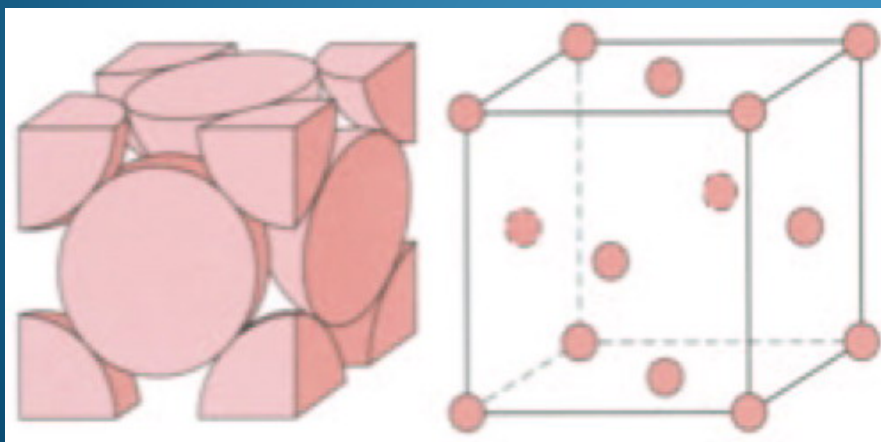
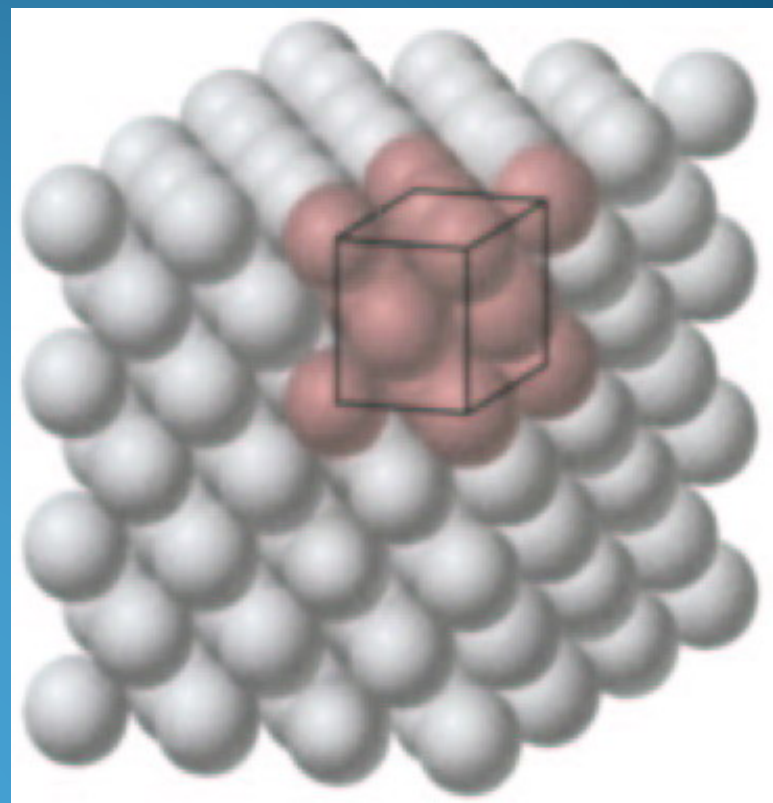
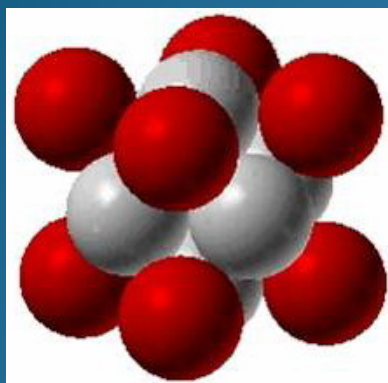
$$PPD_{[100]} = \frac{4 \times \frac{1}{4} \times \pi R^2}{a^2} = \frac{4 \times \frac{1}{4} \times \pi R^2}{\left(\frac{4}{\sqrt{3}} R\right)^2} = 0.585$$

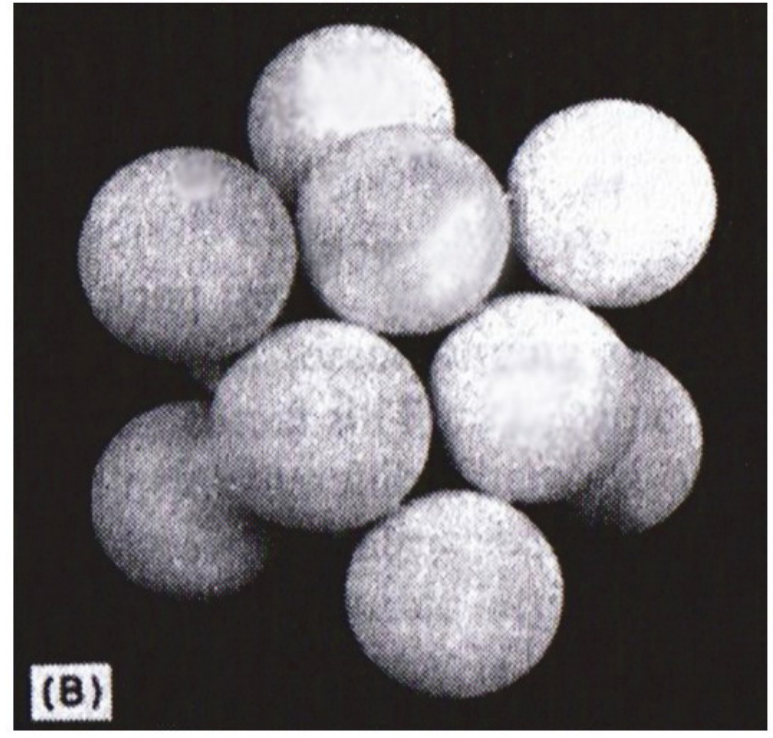
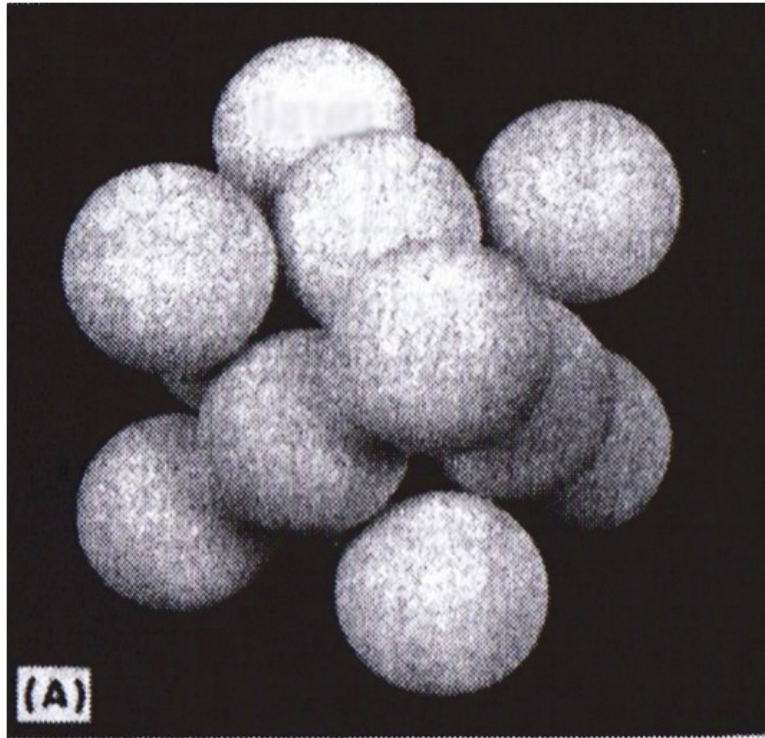


Brass, Cubic lattice, with a motif of Cu $(0,0,0)$
and Zn $(\frac{1}{2},\frac{1}{2},\frac{1}{2})$

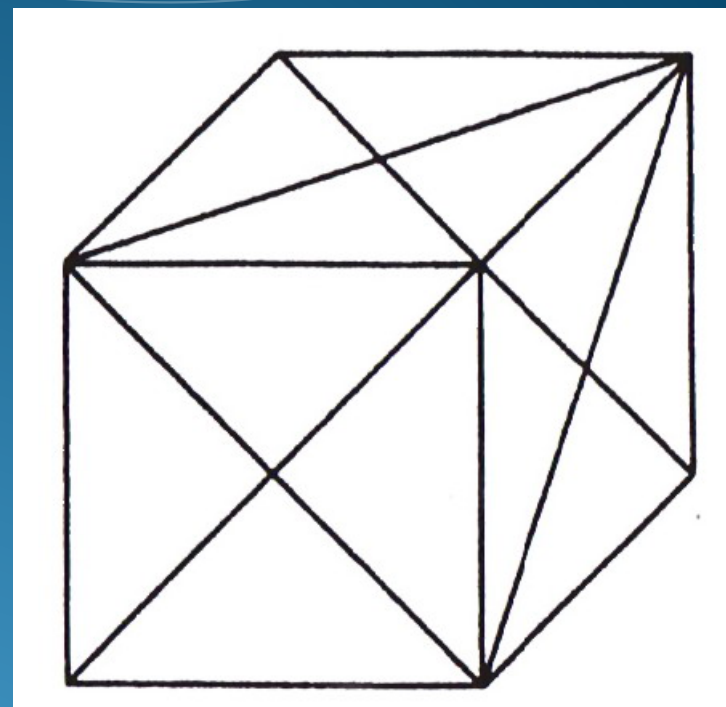
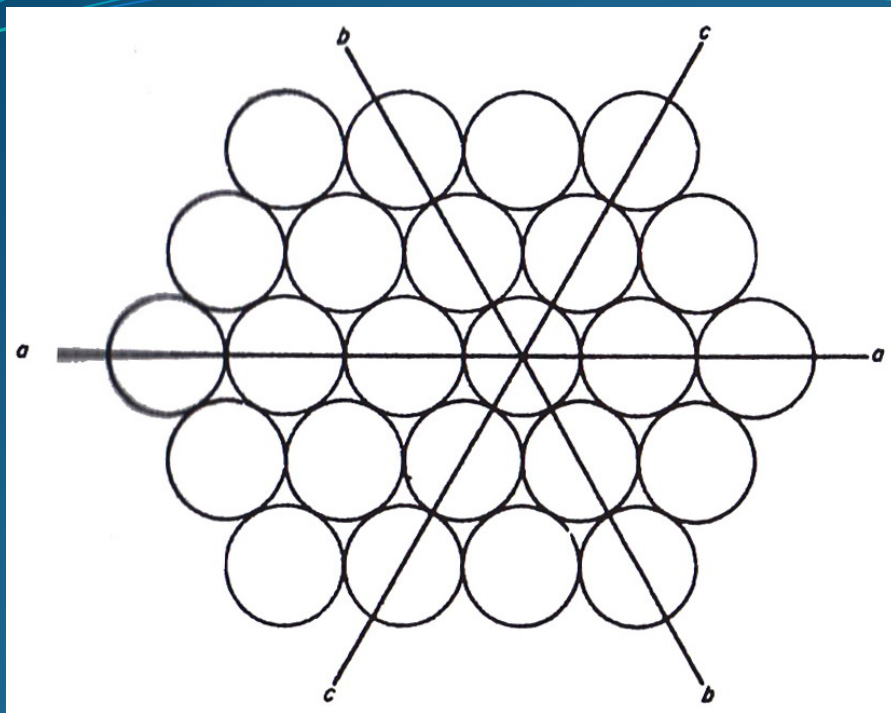
ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار (Face Centered Cubic (FCC)

در ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار، اتم‌ها (یا کره‌ها در مدل کرات سخت) تا حد امکان به هم فشرده هستند.





در ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار، اتم‌ها در صفحات $\langle 111 \rangle$ (Octahedral Planes) کاملاً به هم فشرده هستند. در این ساختار ۴ صفحه فشرده اکتاهدرال وجود دارد.



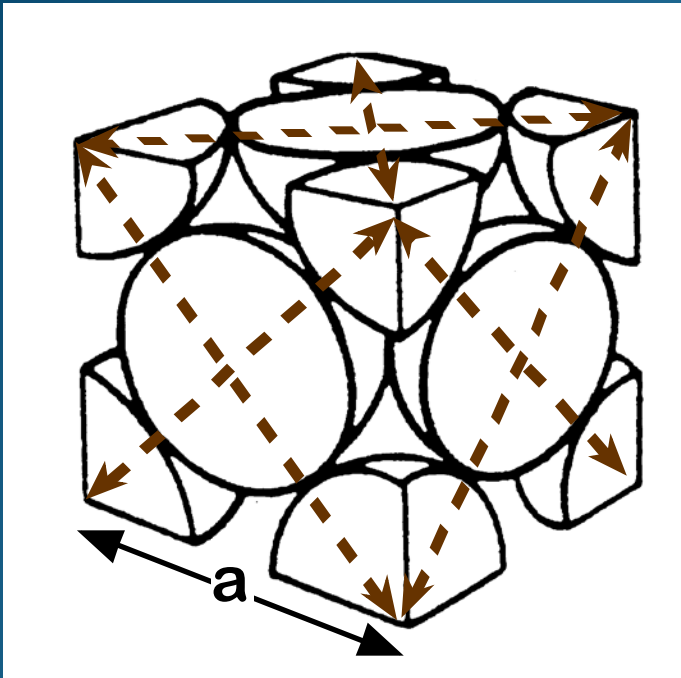
در هر صفحه اکتاهدرال ۳ جهت فشرده وجود دارد که در طول این جهات اتم‌ها با هم در تماس هستند. در ساختار (FCC)، **۶ جهت فشرده** وجود دارد که به موازات اقطار سه وجه مجاور هم هستند.

وجود ۴ صفحه فشرده در شبکه مکعبی با وجوه مرکزدار و ۳ جهت فشرده در هر صفحه فشرده موجب می‌شود که فلزات با این شبکه بلوری خواص فیزیکی ویژه‌ای نسبت به سایر فلزات داشته باشند. مثلاً قابلیت تغییر شکل در این فلزات بسیار زیاد است.

در ساختار مکعبی مرکزدار (FCC)، هر اتم واقع در گوشه مکعب به ۸ سلول تعلق دارد و هر اتم واقع در مرکز هر وجه به دو سلول مجاور هم متعلق است. پس به هر سلول واحد در شبکه (FCC) ۴ اتم تعلق می‌گیرد.

$$8 \times \frac{1}{8} = 1$$
$$\Rightarrow 1 + 3 = 4$$
$$6 \times \frac{1}{2} = 3$$

APF & PPF: FCC



Close-packed directions:
 length = $4R$
 $= \sqrt{2} a$

$$\text{APF} = \frac{\text{atoms unit cell} \times \text{volume atom}}{\text{volume unit cell}}$$

$4 \times \frac{4}{3} \pi (\sqrt{2}a/4)^3$

APF = 0.74

$$PPD_{[100]} = \frac{\pi R^2 + 4 \times \frac{1}{4} \times \pi R^2}{a^2} = \frac{2 \times \pi R^2}{\left(\frac{4}{\sqrt{2}} R\right)^2} = 0.785$$

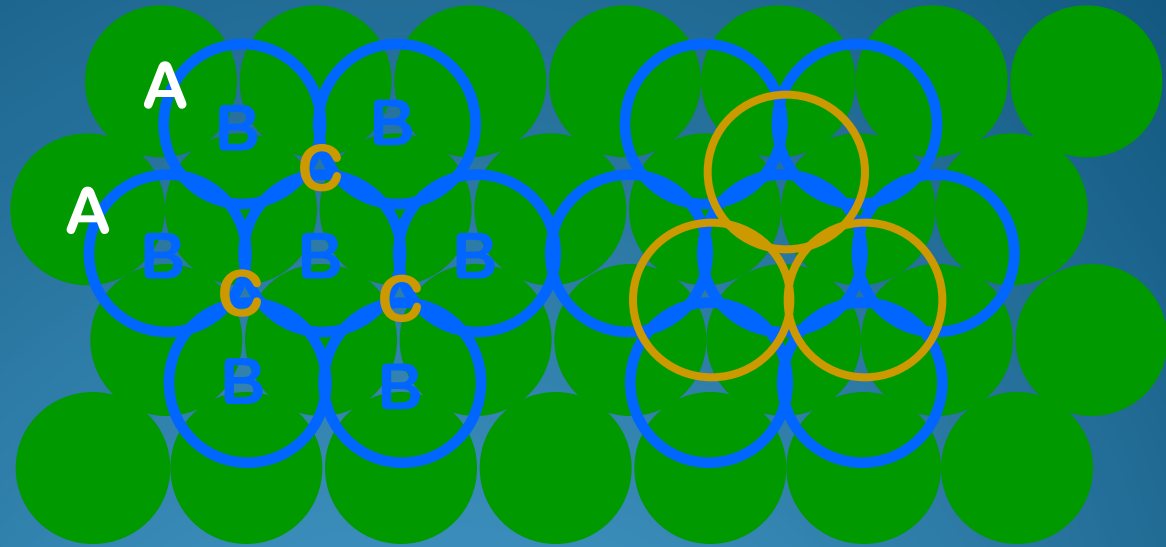
FCC STACKING SEQUENCE

- ABCABC... Stacking Sequence
- 2D Projection

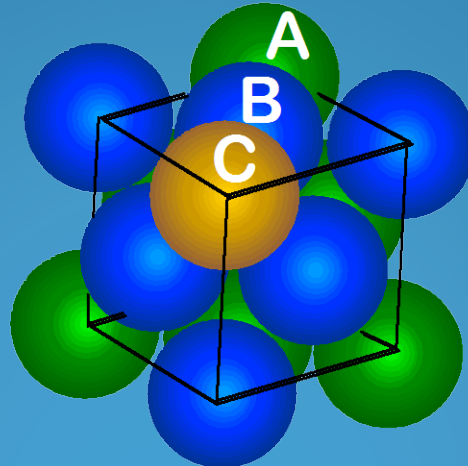
A sites

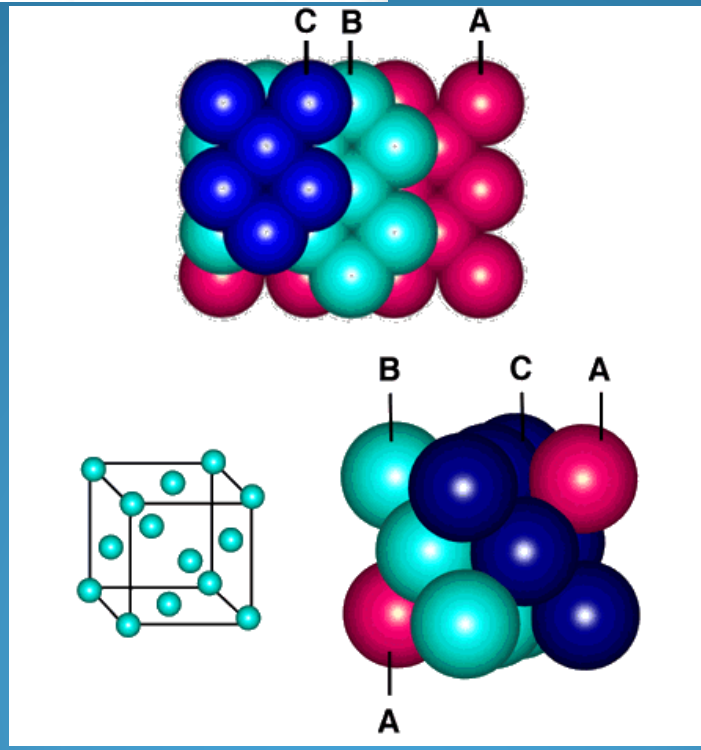
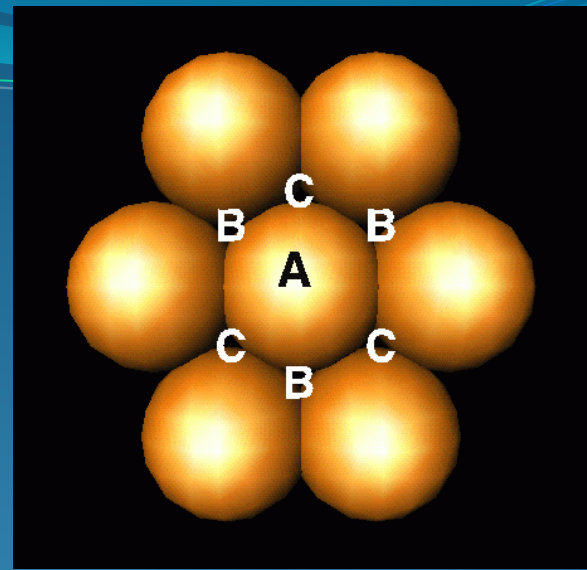
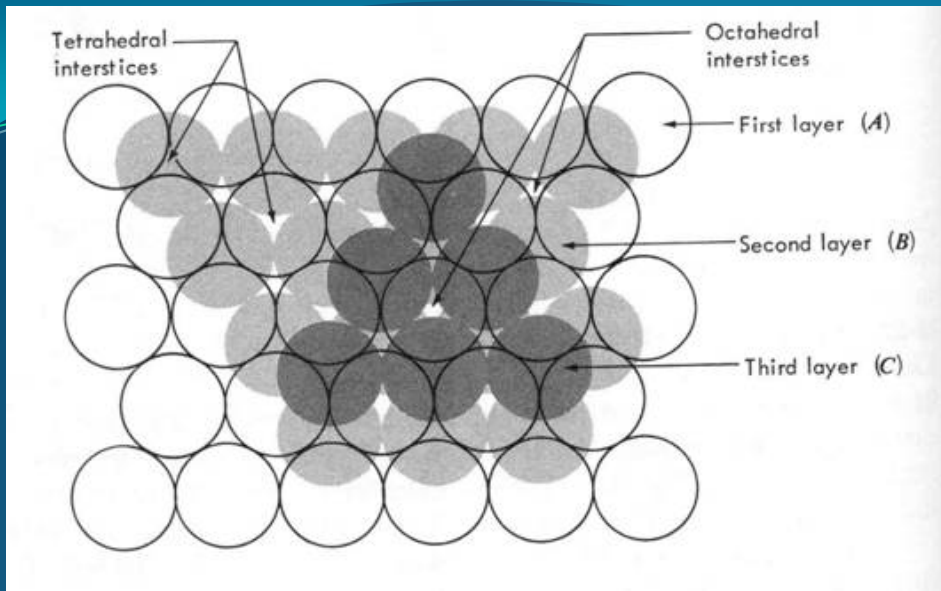
B sites

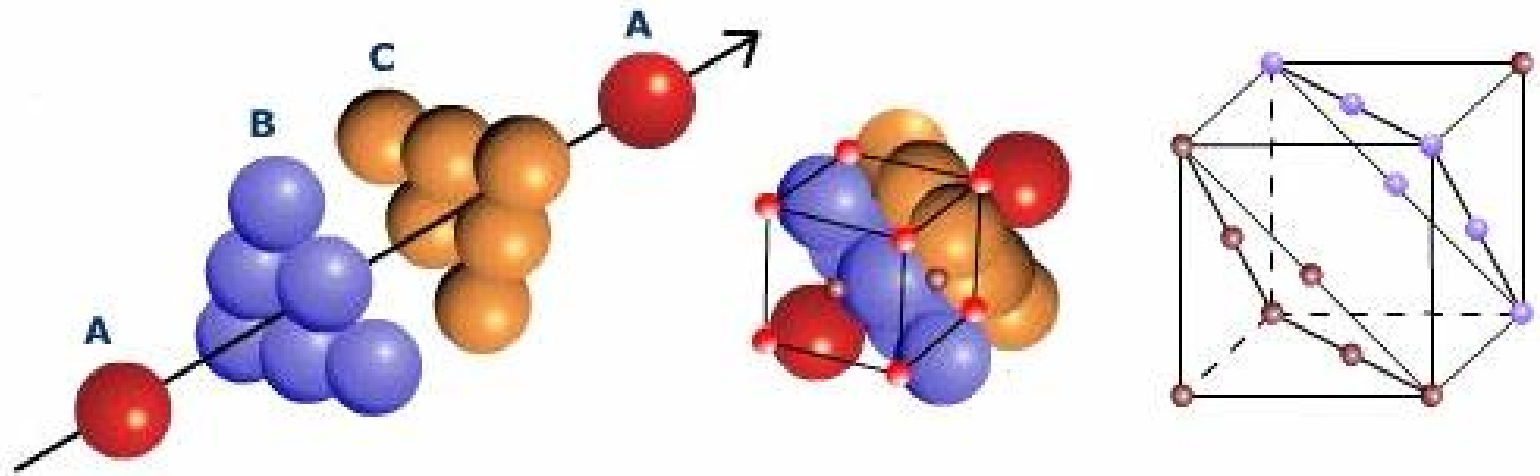
C sites



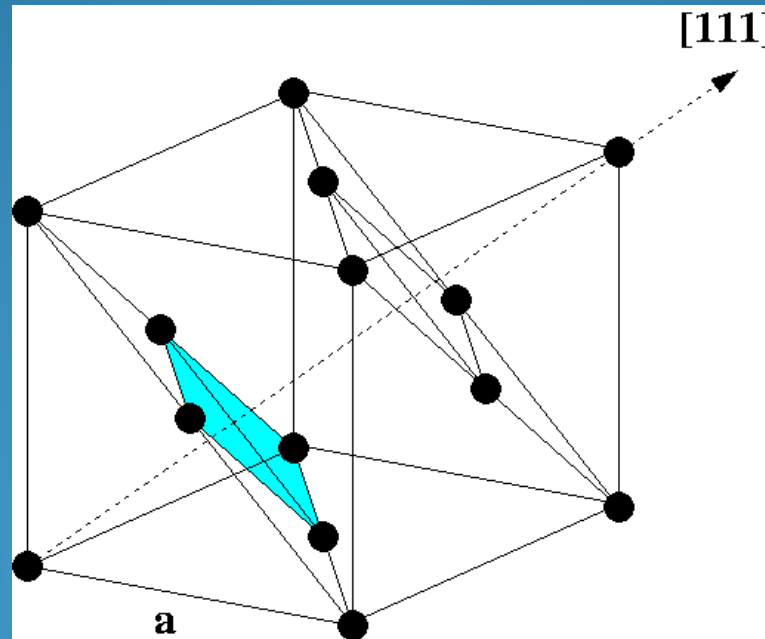
- FCC Unit Cell

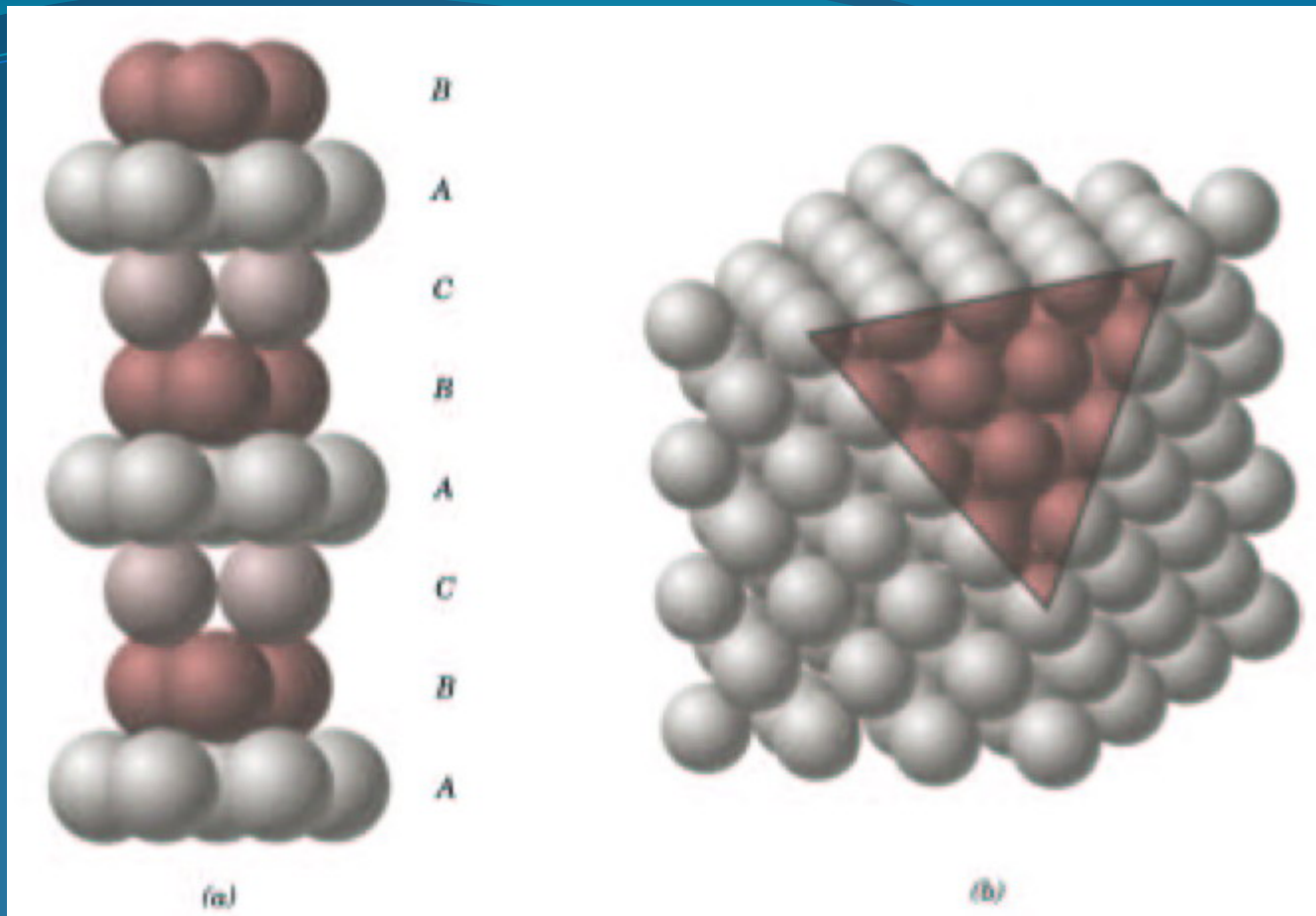






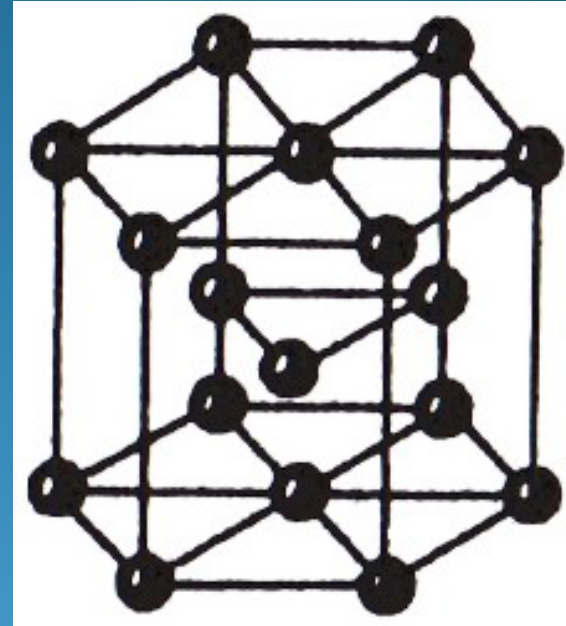
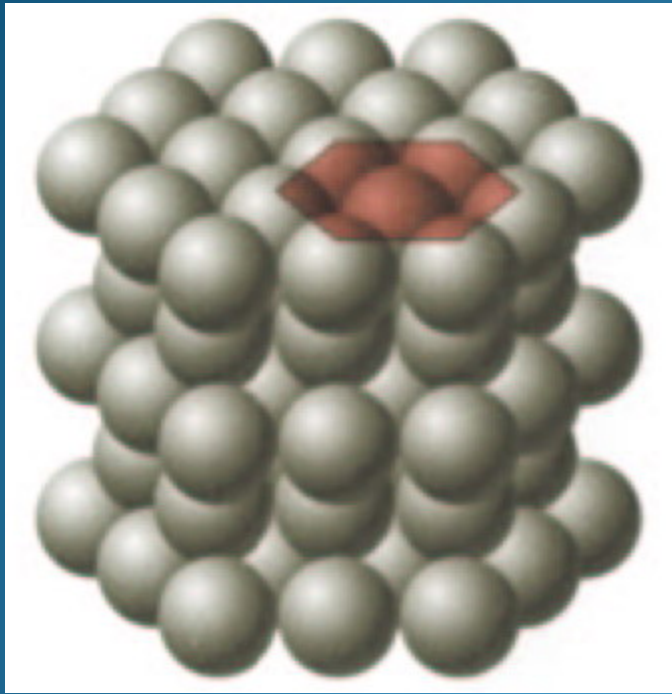
Cubic Close Packing





چیدمان متوالی صفحات اتمی در ساختار FCC به صورت
ABCABCABC

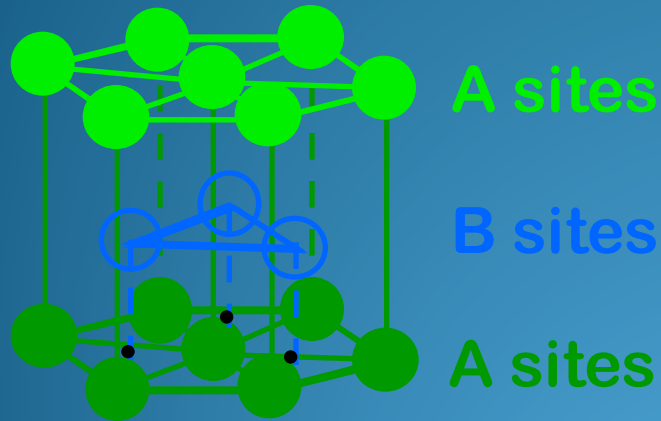
ساختار هگزاگونال فشرده (HCP) Hexagonal Closed Pack



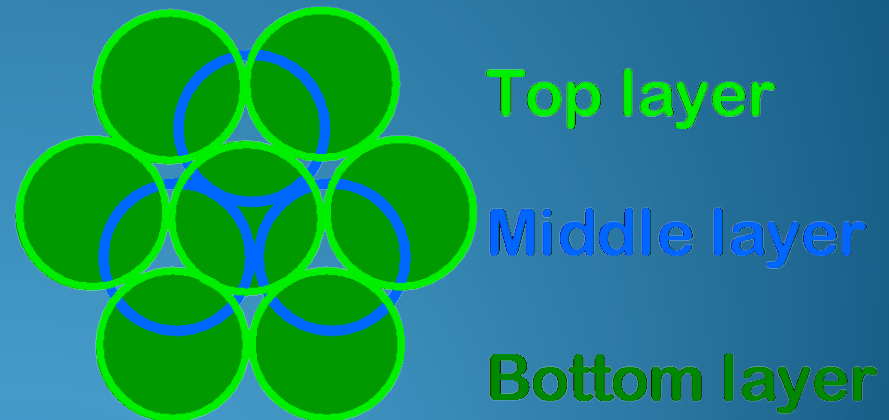
در ساختار هگزاگونال فشرده، اتم‌های صفحه بالای سلول درست روی اتم‌های صفحه پایین سلول هستند ولی اتم‌های صفحه میانی موقعیت متفاوتی دارند.

HEXAGONAL CLOSE-PACKED STRUCTURE (HCP)

- ABAB... Stacking Sequence
- 3D Projection



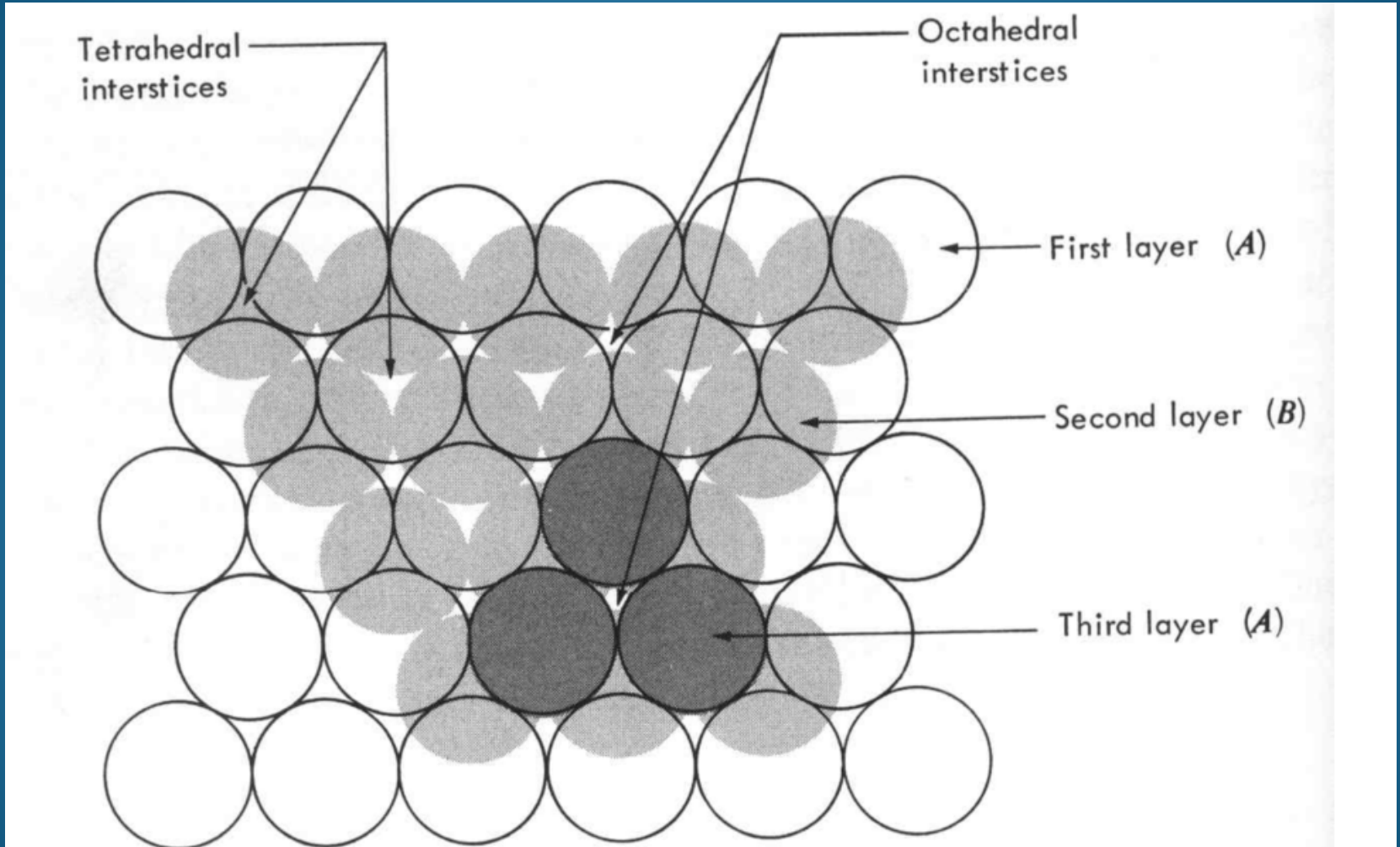
- 2D Projection

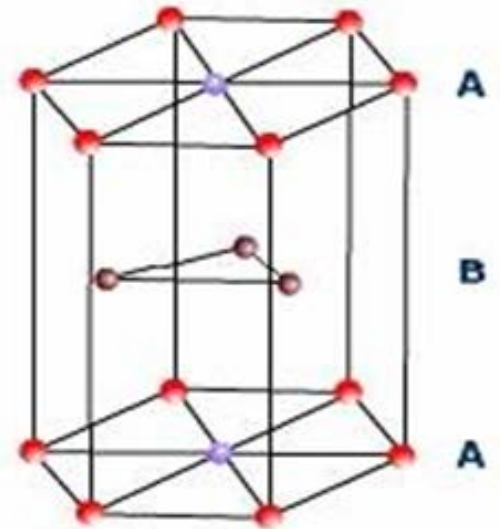


APF for a HCP structure = 0.74

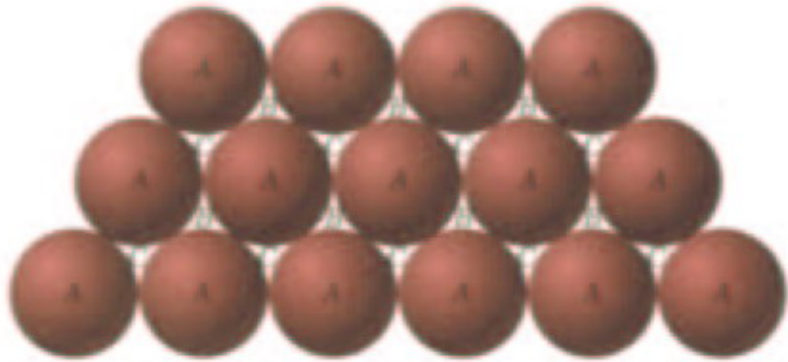
$PPF_{[0001]} = 0.92$

در ساختار HCP، صفحه قاعده بلور بیشترین فشردگی اتمی را دارد (۱ صفحه فشرده) و مثل صفحه اکتاهدرال در ساختار FCC دارای ۳ جهت فشرده است.

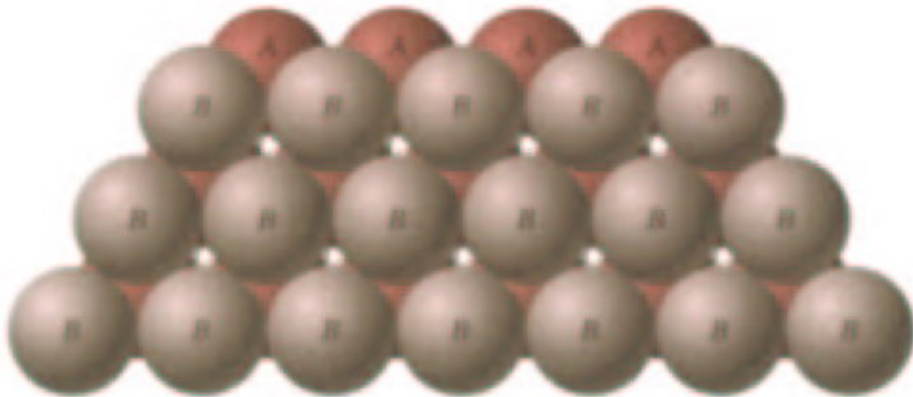




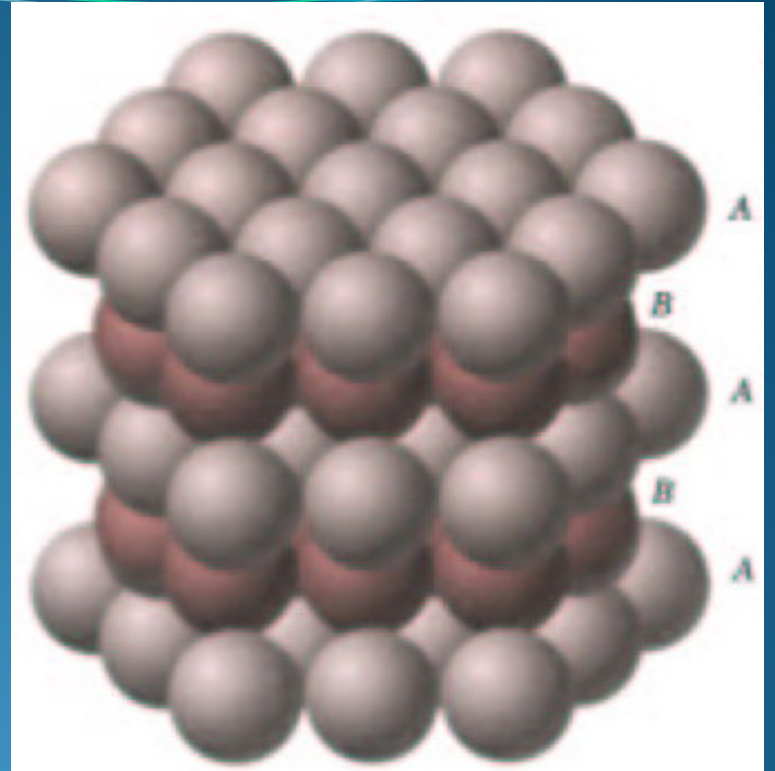
Hexagonal Close Packing



(a)

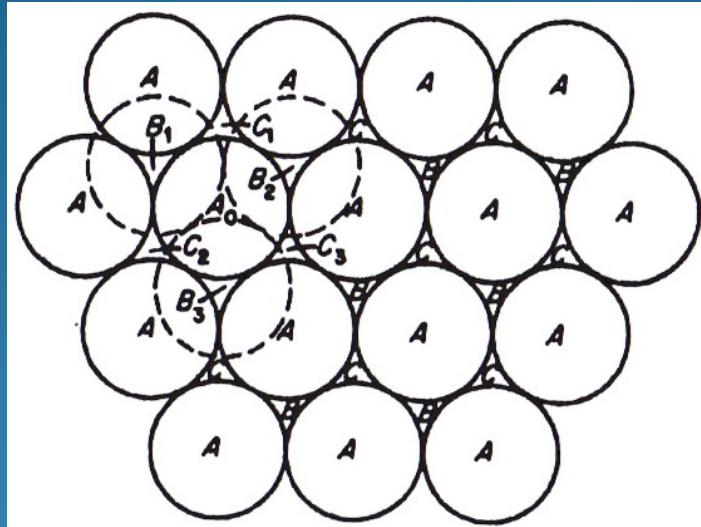


(b)



چیدمان متوالی صفحات اتمی در ساختار هگزاگونال فشرده
به صورت ABABAB

عدد همسایگی در سیستم های FCC و HCP با توجه به شکل برابر ۱۲ است. (اتم های اطراف اتم A_0 را بشمارید!).

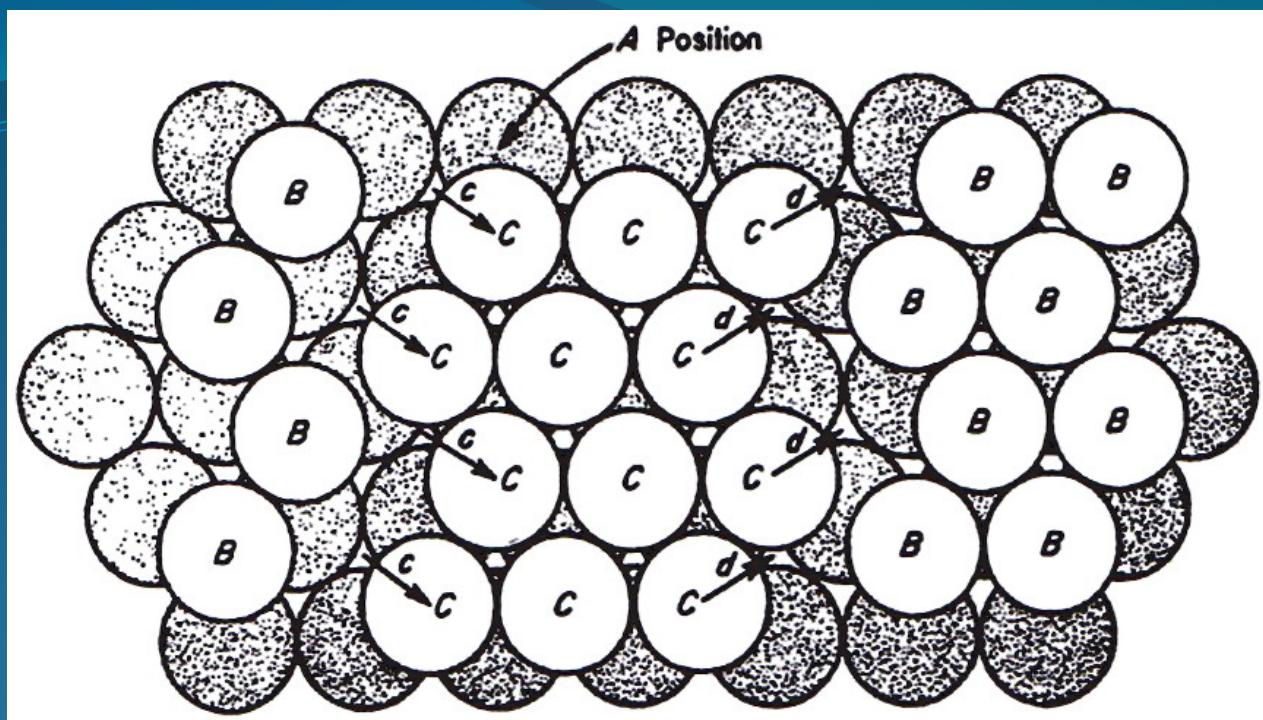


در ساختار (HCP)، هر اتم واقع در گوشه به ۶ سلول تعلق دارد و هر اتم واقع در مرکز هر قاعده به دو سلول مجاور هم متعلق است. با احتساب ۳ اتم موجود در درون ساختار، به هر سلول واحد ۶ اتم تعلق می گیرد.

$$\left(12 \times \frac{1}{6}\right) + \left(2 \times \frac{1}{2}\right) + 3 = 6$$

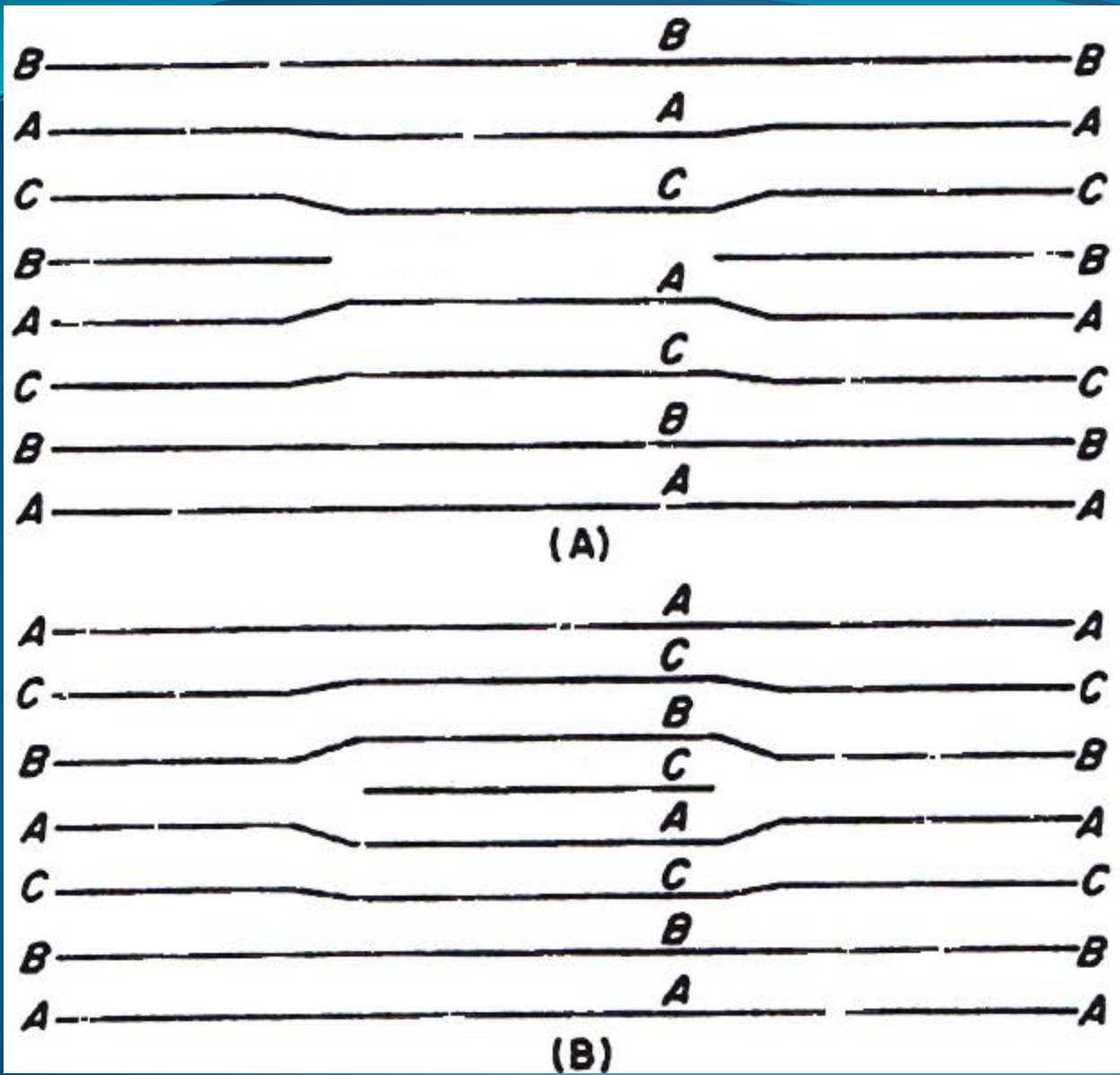
مقایسه سیستم های FCC و HCP نشان می دهد که عدد همسایگی در هر دو سیستم برابر ۱۲ و ضریب تراکم اتمی آنها برابر 0.74، و ضریب تراکم صفحه ای در صفحات فشرده آنها $PPF_{[0001]}=PPF_{[111]}=0.92$ است. بنابراین دو سیستم از جهاتی مشابه هم هستند.

توالی چیدمان صفحات اتمی در شبکه FCC به صورت ABCABCABC... و در ساختار HCP به صورت ABABAB... است. بنابراین یک جابجایی عرضی در یکی از صفحات فشرده میتواند ساختمان شبکه را از HCP به FCC و یا بالعکس تغییر دهد.



توالی چیدمان در شبکه FCC به صورت ABCABCABC... است. ممکن است در ناحیه ای از بلور چیدمان ناقص بوده و به صورت ABCA... CABCA... در آید. این نقص و ناپیوستگی چیدمانی را **نقص در چیده شدن (Stacking Fault)** می گویند.

نقص در چیده شدن ممکن است **ذاتی** و یا **عارضی** باشد.



یک نقص در چیده شدن
ذاتی را می توان با حذف
بخشی از صفحه فشرده
ایجاد کرد.

با اضافه شدن بخشی از
یک صفحه فشرده نیز
یک نقص در چیده شدن
عارضی تشکیل می شود.

نکته:

تغییر ساختمان اتمی از HCP به FCC یا بالعکس در ضمن گرمایش و یا سرمایش در برخی از فلزات، با ایجاد نقص در چیده شدن صفحات اتمی میسر می گردد.

بررسی های میکروسکوپی TEM نشان داده است که پدیده جوانه زنی در استحاله آلوتروپیک فلز کبالت در ۴۲۰ درجه سانتیگراد از HCP (پایدار در دمای پایین) به FCC (پایدار در دمای بالا) و بالعکس با ایجاد شدن مناطق نقص در چیده شدن اتفاق می افتد. (تبدیل ساختمان بلوری در یک عنصر و یا یک ترکیب را در یک دمای معین، استحاله آلوتروپیک می گویند.)

مقایسه آرایش اتمی در ساختمان کریستالی فلزات

ساختمان	تعداد اتم در سلول واحد	عدد همسایگی	تعداد جهات متراکم	تعداد صفحات متراکم	تراکم فضایی	R رابطه اتمی و
SC	1	6	3 $\langle 100 \rangle$	3 {100}	0.52	$a = 2R$
BCC	2	8	4 $\langle 111 \rangle$	6 {110}	0.68	$a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$
FCC	4	12	6 $\langle 110 \rangle$	4 {111}	0.74	$a = \frac{4R}{\sqrt{2}}$
HCP	6	12	3 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$	1 (0001)	0.74	$a = 2R$

ساختار بلوری عناصر فلزی

Table 1.1 Crystal Structure of Some of the More Important Metallic Elements

Face-centered Cubic	Closed-packed Hexagonal	Body-centered Cubic
Iron (911.5 to 1396°C)	Magnesium	Iron (below 911.5 and from 1396 to 1538°C)
Copper	Zinc	Titanium (882 to 1670°C)
Silver	Titanium (below 882°C)	Zirconium (863 to 1855°C)
Gold	Zirconium (below 863°C)	Tungsten
Aluminum	Beryllium	Vanadium
Nickel	Cadmium	Molybdenum
Lead		Alkali Metals (Li, Na, K, Rb, Ca)
Platinum		

اندازه شعاع اتمی برخی از فلزات

Table 3.1 Atomic Radii and Crystal Structures for 16 Metals

<i>Metal</i>	<i>Crystal Structure^a</i>	<i>Atomic Radius^b</i> (nm)	<i>Metal</i>	<i>Crystal Structure</i>	<i>Atomic Radius</i> (nm)
Aluminum	FCC	0.1431	Molybdenum	BCC	0.1363
Cadmium	HCP	0.1490	Nickel	FCC	0.1246
Chromium	BCC	0.1249	Platinum	FCC	0.1387
Cobalt	HCP	0.1253	Silver	FCC	0.1445
Copper	FCC	0.1278	Tantalum	BCC	0.1430
Gold	FCC	0.1442	Titanium (α)	HCP	0.1445
Iron (α)	BCC	0.1241	Tungsten	BCC	0.1371
Lead	FCC	0.1750	Zinc	HCP	0.1332

^a FCC = face-centered cubic; HCP = hexagonal close-packed; BCC = body-centered cubic.

^b A nanometer (nm) equals 10^{-9} m; to convert from nanometers to angstrom units (Å), multiply the nanometer value by 10.

محاسبه دانسیته تئوریک فلزات

دانسیته تئوریک فلزات از رابطه کلی زیر قابل محاسبه است:

$$\rho = \frac{n A}{V_c N_A}$$

atoms/unit cell → n Atomic weight (g/mol) → A

Volume/unit cell (cm³/unit cell) → V_c Avogadro's number (6.023 x 10²³ atoms/mol) → N_A

مثلا برای فلز مس داریم:

- crystal structure = FCC: 4 atoms/unit cell
- atomic weight = 63.55 g/mol (1 amu = 1 g/mol)
- atomic radius $R = 0.128 \text{ nm}$ (1 nm = 10^{-7} cm)

$$V_C = a^3 ; \text{ For FCC, } a = 4R\sqrt{2} ; V_C = 4.75 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$$

$$\rho = \frac{4 \times A}{\left(\frac{4R}{\sqrt{2}}\right)^3 \times N_A} = \frac{4 \times 63.55}{\left(\frac{4 \times 0.128 \times 10^{-7}}{\sqrt{2}}\right)^3 \times 6.023 \times 10^{23}}$$

Result: theoretical $\rho_{\text{Cu}} = 8.89 \text{ g/cm}^3$

$$\rho_{\text{theoretical}} \succ \rho_{\text{actual}}$$

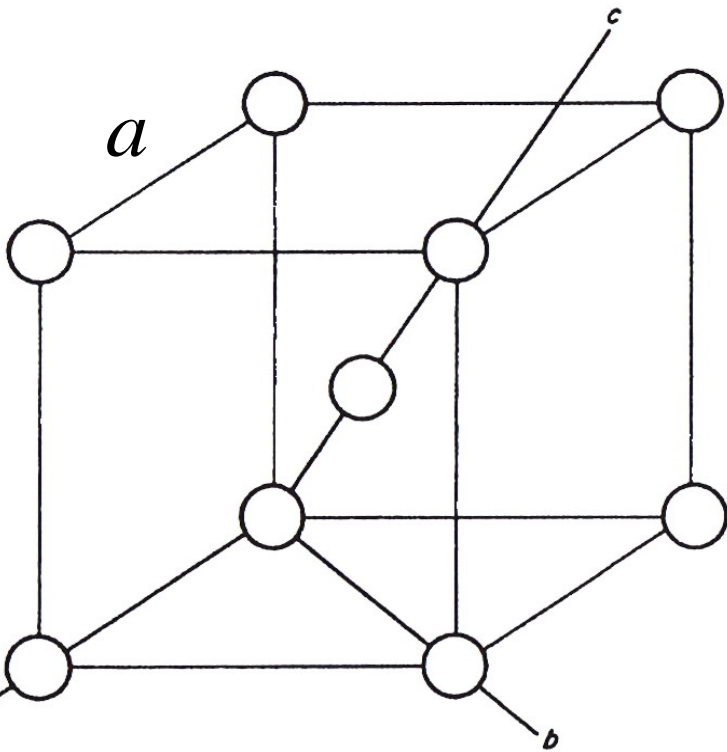
ناهمسانگردی (Anisotropy)

اگر خواص یک ماده مستقل از جهت باشد به آن همسانگرد (Isotrop) گفته می شود. در غیر این صورت ماده ناهمسانگرد خواهد بود. عموماً خواص فیزیکی بلورها تابعی از جهت بلوری است به این دلیل که فشردگی اتم ها در جهات مختلف با هم متفاوت است و فواصل اتم ها در جهات مختلف یکسان نیست.

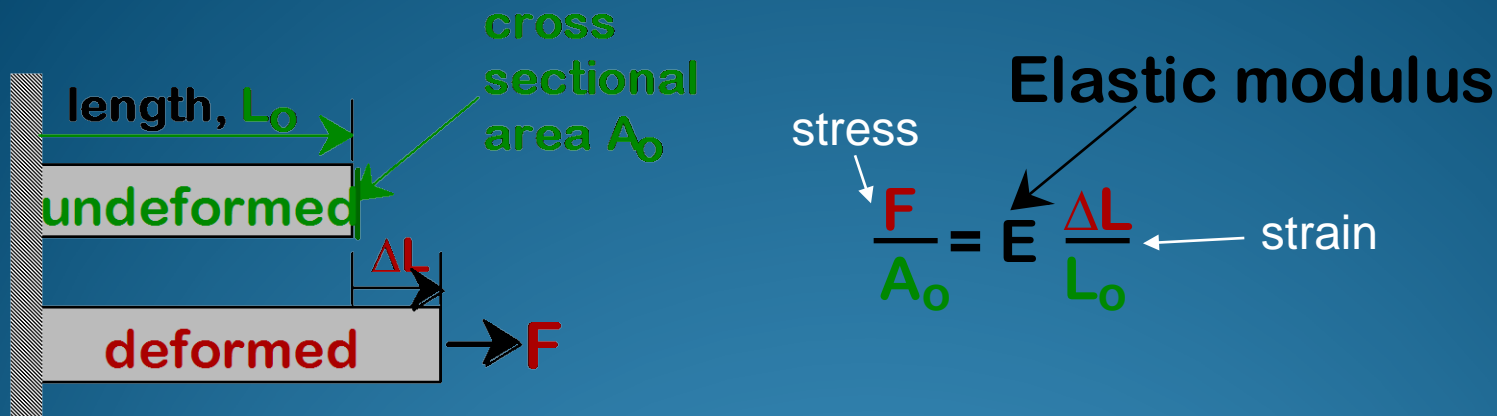
مثلاً در یک بلور BCC، فاصله اتمها در ۳ جهت اصلی a و b و c بترتیب برابر:

$$a, \sqrt{2}a, \sqrt{\frac{3}{2}}a$$

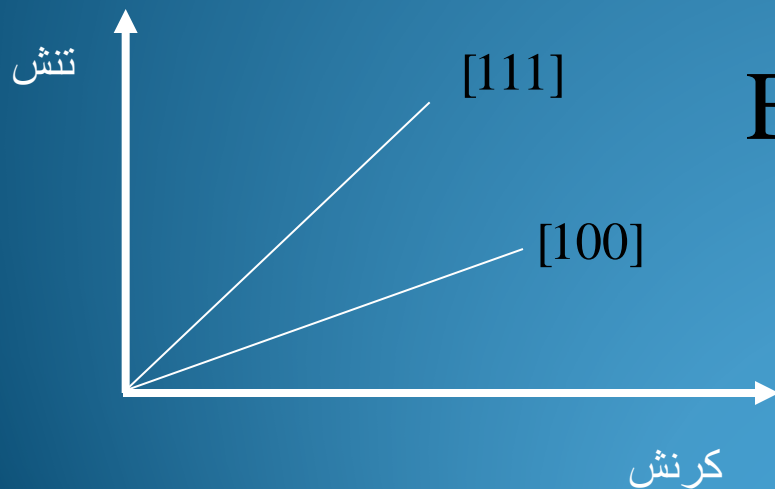
می باشد.



مدول الاستیک (Elastic modulus) ، E



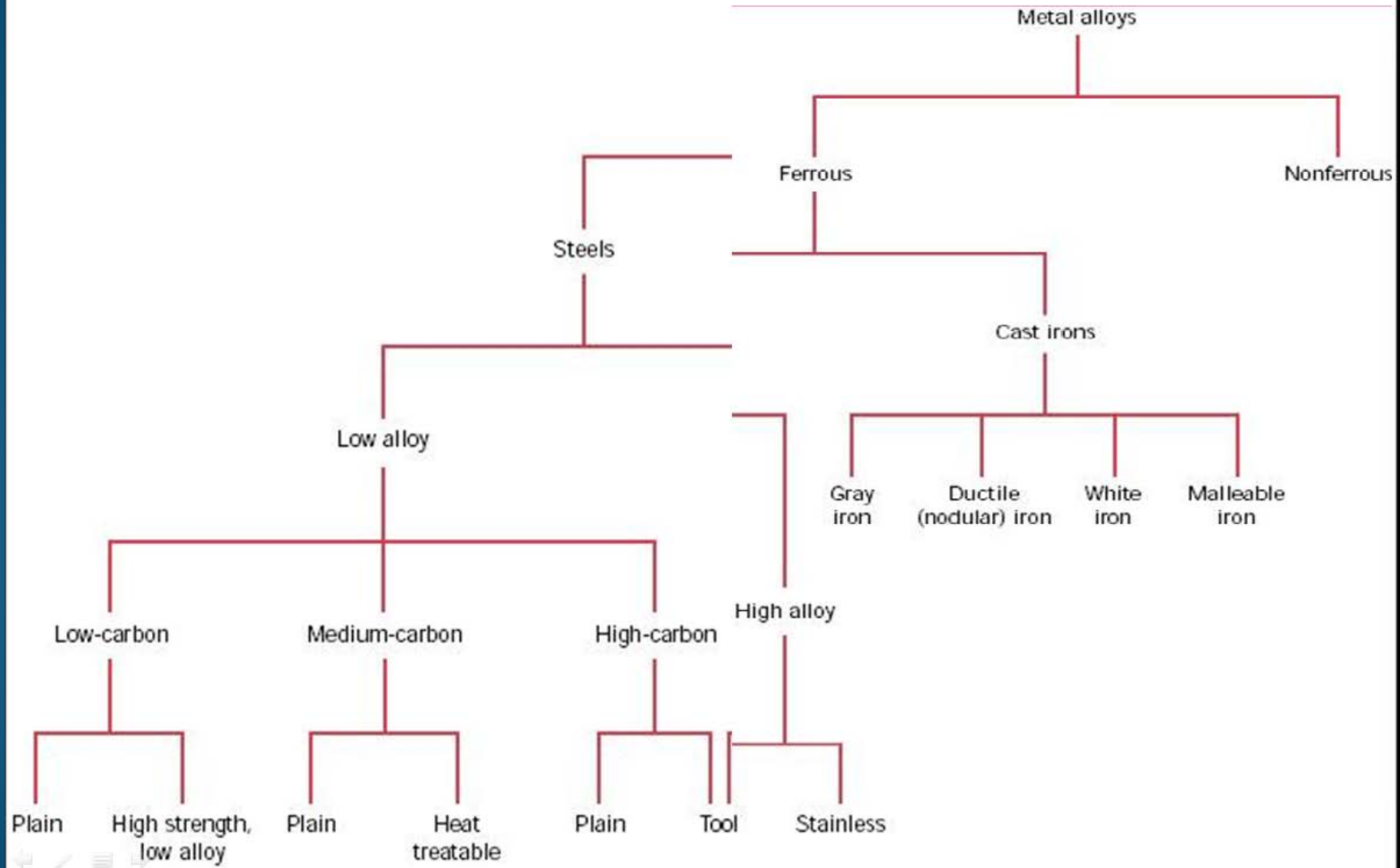
مثالی دیگر از ناهمسانگردی مکانیکی: مدول الاستیک آهن BCC تابعی از جهت کشش تک بلور آن است.



$$E_{[111]} = 2E_{[100]}$$

به دلیل جاذبه بیشتر اتمی در جهات متراکم تر، مدول الاستیک در راستای جهات فشرده بلور بیشتر است.





آلیاژهای آهنی:

برای بیان دامنه وسیعی از آلیاژهایی به کار می رود که عنصر اصلی تشکیل دهنده آنها آهن (ferrous alloys) و آلیاژهای آهنی هستند. (iron-based) است یا به عبارت دیگر پایه آهنی. این آلیاژها به سه گروه اصلی تقسیم می شوند:

• B. آهن کار شده (wrought iron)

• Г. چدن (cast iron)

• Д. فولاد (steel)

آهن کار شده که دیگر به صورت تجاری تولید نمی شود، آهن تقریبا "خالصی" است که شامل ناخالصی های غیر فلزی به صورت سرباره است. امروزه آهن کار شده در حقیقت از فولاد کم کربن تولید شود. کیفیت این نوع آلیاژ توسط درصد کربن و منگنز پایین مشخص می گردد. (کربن کمتر از ۰/۰۸ درصد و منگنز کمتر از ۰/۰۶ درصد).

چدن آلیاژی از آهن و کربن است که عموما ۳ تا ۵ درصد کربن و ۱ تا ۳ درصد سیلیسیم دارد.

فولاد:

فولاد را در گذشته به صورت آلیاژی از آهن و کربن توصیف می کردند اما امروزه با وجود برخی از مهم ترین انواع فولاد نظیر فولادهای زنگ نزن فریتی نوع ۴۰۹ که در آنها کربن یک ناخالصی است که مقدار آن در حد چندجزء در میلیون است، دیگر نمی توان از توصیف آلیاژ آهن و کربن برای فولاد استفاده کرد. طبق تعریف، فولاد باید شامل حداقل ۵۰٪ آهن و یک یا چند عنصر آلیاژی دیگر باشد. این عناصر معمولاً شامل کربن، منگنز، سیلیسیم، نیکل، کرم، وانادیم، مولیبدن، تیتانیوم، نیوبیم و آلومینیوم هستند.

رایج ترین نوع فولاد، فولاد کربنی ساده (plain carbon steel) است که معرف فولادی شامل آهن و کربن به همراه مقادیر اندکی منگنز، سیلیسیم یا آلومینیوم است.

یکی دیگر از انواع مهم فولادها، فولاد آلیاژی است که علاوه بر عناصر ذکر شده در بالا، مقادیر قابل توجهی از عناصری نظیر کرم، نیکل و مولیبدن آن را از فولاد کربنی ساده متمایز می کند. بخش خاصی از فولادهای آلیاژی، فولادهای زنگ نزن (stainless steel) هستند که حداقل ۱۱/۵ درصد کرم دارند.

تقسیم بندی فولادها:

- ✓ فولادها به روشهای مختلفی تقسیم بندی می شوند که تقسیم بندی آنها می تواند بر اساس موارد زیر باشد:
- ✓ بر اساس ترکیب شیمیایی، مانند فولاد کربنی، فولاد کم آلیاژ، فولاد زنگ نزن و ...
- ✓ بر اساس روش تولید مانند روش کوره الکتریکی و ...
- ✓ بر اساس روش ساخت، مانند نورد گرم، نورد سرد و ...
- ✓ بر اساس شکل محصول مانند ورق، لوله، میله، صفحه و ...
- ✓ بر اساس روش اکسیژن زدایی مانند فولاد آرام، نیمه آرام، جوشان و ...
- ✓ بر اساس ریز ساختار مانند فریتی، پرلیتی، مارتنزیتی
- ✓ بر اساس استحکام مورد نیاز
- ✓ بر اساس عملیات حرارتی مانند بازپختی، کوئنچ و تمپر و...
- ✓ بر اساس کیفیت محصول مانند فولاد با کیفیت آهنگری، کیفیت تجاری و ...
- ✓ بر اساس کاربرد مانند فولاد فنر، فولاد ساختمانی، فولاد ابزار و ...

تقسیم بندی فولادها:

جدول (۱-۱) روش های تقسیم بندی فولادها

نوع فولاد	اساس تقسیم بندی
زیمنس - مارتین، بسمر، قوس الکتریکی	روش تولید
فولادهای ساختمانی، ابزار، گرم کار و غیره.	کاربرد در صنعت
فولادهای ساده کربنی و آلیاژی	عناصر آلیاژی و مقدار آن
فولادهای فریتی، فریتی - پرلیتی، آستنیتی، مارتنزیتی و دو فازی	ساختار میکروسکوپی ۱
فولادهای مقاوم به حرارت، خوردگی و اکسید شدن، سایش و فولادهای مغناطیسی	خواص شیمیایی

تقسیم بندی بر اساس ترکیب شیمیایی

انواع فولادها

۱- فولادهای ساده کربنی (Fe-C)

۲- فولادهای آلیاژی (Fe-C + Alloy Elements)

تقسیم بندی انواع فولادهای ساده کربنی:

۱- فولادهای کم کربن (Low Carbon Steel):

$0.25 < \%C < 0.3$

۲- فولادهای کربن متوسط (Medium Carbon Steel):

$0.25 < \%C < 0.65$

۳- فولادهای با کربن بالا (High Carbon Steel):

$0.65 < \%C$

فولاد کربنی ساده:

فولادهای ساده کربنی به آن دسته از فولادها اطلاق می شوند که عناصر تشکیل دهنده آن آهن به اضافه درصد معینی کربن (گاهی مقدار کمی منگنز هم اضافه می شود) و مقدار ناچیزی عناصر ناخالصی مثل: فسفر و گوگرد است. بنابراین عنصر کربن موثرترین عنصری است که در این گروه از فولادها وجود دارد و سبب ایجاد تنوع بسیار در خواص این دسته از فولادها می گردد. فولادهای ساده کربنی از نظر کمی بیشترین کاربرد صنعتی را دارند.

کم کربن

• میزان کربن کمتر از ۰/۲۵٪ است




کربن متوسط

• میزان کربن بین حدود ۰/۲۵ درصد تا حدود ۰/۶۵ درصد می باشد.

پر کربن

• میزان کربن بیشتر از ۰/۶۵٪ می باشد.

جدول (۱-۲) ویژگی های مهم و نمونه ای از موارد کاربرد فولادهای ساده کربنی

تصویر	ویژگی های مهم و موارد کاربرد	نوع فولاد	ردیف
	<p>این فولادها از خواص شکل پذیری، ماشین کاری و قابلیت جوشکاری و مغناطیسی خوبی برخوردار می باشند. و برای عموم قطعات مهندسی مثل ساخت سازه های ساختمانی، پلها، صنایع کشتی سازی و بدنه واگنها و غیره بکار می روند. بطوری که بیشترین مصرف را در صنعت دارند.</p>	کم کربن	۱
	<p>این فولادها علاوه بر داشتن خواص ماشین کاری و جوشکاری مناسب از قابلیت سختی پذیری بالایی برخوردار هستند و در ساخت قطعات و تجهیزات صنعتی مثل: چرخ و محور واگن، قطعات خودرو، ماشین آلات و دستگاه های نورد مورد استفاده قرار می گیرند.</p>	کربن متوسط	۲
	<p>این فولادها به دلیل دارا بودن مقدار کربن زیاد سخت هستند و ماشین کاری، تغییر شکل و جوشکاری آنها مشکل است. لذا در مواردی که به سختی بالایی نیاز باشد از فولادهای ساده پرکربن استفاده می شود مانند: تیغ های برش، غلتک نورد و کاربرد دارند.</p>	پرکربن	۳

فولادهای آلیاژی:

۱-۳-۲ فولادهای آلیاژی

نمودار (۱-۴)



فولادهای آلیاژی شامل دسته های متنوعی از فولادها می شوند که محتوی مقادیر مختلفی از عناصر آلیاژی مثل: کروم، وانادیم، نیکل، مس، تنگستن، تیتانیوم، مولیبدن، سیلیسیم و غیره می باشند. این فولادها متناسب با نوع و مقدار عناصر آلیاژی، خواص ویژه ای را بدست می آورند و کاربردهای صنعتی خاصی پیدا می کنند که در ادامه معرفی می شوند.

مهمترین عناصر آلیاژی فولاد:

تقسیم بندی فولادهای آلیاژی:

Ni-Cr-Mo-Mn-V-Ti-W-Nb-Si-Co-Cb,...

۱- فولادهای میکروآلیاژ (Micro Alloy Steel):

در این نوع فولادها با افزودن حداکثر چند صدم یا چند دهم درصد از عناصر **Ti, V, Nb** استحکام بسیار بالایی ایجاد می شود.

۲- فولادهای کم آلیاژ (Low Alloy Steel):

$\Sigma\% \text{Alloy Elements} \leq 5\%$

۳- فولادهای پر آلیاژ (High Alloy Steel):

$\Sigma\% \text{Alloy Elements} > 5\%$

جدول (۱-۳) مهمترین عناصر آلیاژی و تاثیر آن روی خواص فولاد

نام عنصر	تاثیر بر خواص فولاد
کروم	سختی، استحکام و مقاومت در برابر خوردگی را افزایش می دهد
نیکل	سختی، انعطاف پذیری و مقاومت در برابر خوردگی را افزایش می دهد.
تنگستن	قابلیت انعطاف پذیری فولاد آب داده را بالا می برد و مقاومت آن را در مقابل حرارت زیاد می کند.
مولیبدن	اثر آن مانند تنگستن و نیکل است
وانادیوم	استحکام را بالا می برد و باعث می شود فولاد حتی در درجات حرارت بالا را حفظ کند.
کبالت	استحکام و سختی را افزایش می دهد و خواص مغناطیسی را بهتر می کند

	سختی	استحکام کششی	تنش تسلیم	ازدیاد طول نسبی	کاهش سطح مقطع	انرژی ضربه	استحکام دمای بالا	مقاومت سایشی	قابلیت آهنگری	قابلیت ماشینکاری	مقاومت خوردگی
سیلیسیم (Si)	+	+	2+	-	≈	-	+	3-	-	-	?
منگنز (Mn) در فولادهای پرلیتی	+	+	+	≈	≈	≈	≈	2-	+	-	?
منگنز (Mn) در فولادهای آستنیتی	3-	+	-	3+	≈	?	?	?	3-	3-	?
کرم (Cr)	2+	2+	2+	-	-	-	+	+	-	?	3+
نیکل (Ni) در فولادهای پرلیتی	+	+	+	≈	≈	≈	+	2-	-	-	?
نیکل (Ni) در فولادهای آستنیتی	2-	+	-	3+	2+	3+	3+	?	3-	3-	2+
آلومینیوم (Al)	?	?	?	?	-	-	?	?	2-	?	?
تنگستن (W)	+	+	+	-	-	≈	3+	3+	2-	2-	?
وانادیم (V)	+	+	+	≈	≈	+	2+	2+	+	?	+
کبالت (Co)	+	+	+	-	-	-	2+	3+	-	≈	?
مولیبدن (Mo)	+	+	+	-	-	+	2+	2+	-	2+	?
مس (Cu)	+	+	2+	≈	≈	≈	+	?	≈	≈	+
گوگرد (S)	?	?	?	-	-	-	?	?	3+	?	-
فسفر (P)	+	+	+	-	-	3-	?	?	2+	?	?

≈: تقریباً بدون تاثیر +: افزایش خواص -: کاهش خواص ? : تاثیر نامشخص اعداد: شدت افزایش و کاهش

معرفی انواع فولادها

فولادها بر اساس کاربرد و روشهای عملیات حرارتی به انواع زیر تقسیم می شود :

- ✓ فولاد های سمانتاسیون
- ✓ فولادهای عملیات حرارتی شونده
- ✓ فولادهای فنر
- ✓ فولادهای خوش تراش
- ✓ فولادهای نیترووره
- ✓ بلبرینگ
- ✓ زنگ نزن و ...

فولادهای سمانتاسیون

درصد کربن این فولادها پایین و حداکثر ۰.۳٪ درصد است. این فولادها علاوه بر کربن عناصر آلیاژی دیگر نظیر: منگنز، سیلیسیم، کرم، مولیبدن و نیکل دارا می باشند و تحت عملیات حرارتی کربن دهی تولید می شوند. به دلیل درصد پایین کربن بعد از عملیات حرارتی سخت کاری سختی بالایی نخواهند داشت. اگر سطح فولاد با عملیات کربن دهی پرکربن شود سختی سطح بالا می رود. حداکثر نفوذ کربن ۲ میلیمتر زیر سطح خواهد بود. فولادهای سمانته سطحی سخت و مغزی نرم و چقرمه و مقاومت به سایش بالایی خواهند داشت و در عین حال مقاومت به ضربه بالایی نیز دارند.

فولادهای عملیات حرارتی پذیر:

درصد کربن این فولادها بیش از ۰.۳٪ درصد است بنابراین در نتیجه عملیات حرارتی در روغن یا آب به خوبی سخت می شوند. برای اصلاح و بهبود خواص مکانیکی در این فولادها مقداری عناصر آلیاژی به آنها اضافه می شود. این فولادها تا مغز سخت می شوند (مخصوصاً قطعاتی که نازک بوده و نیز در آب سرد می شوند). پس از عملیات حرارتی بایستی بلافاصله تمپر شوند تا از ترک خوردن احتمالی آنها جلوگیری شود. این فولادها به دو دسته آلیاژی و کربنی تقسیم می شوند. فولادهای ساده کربنی فولادهایی هستند که مقادیر کمی از عناصر آلیاژی مانند منگنز (حداکثر ۰.۹٪) به آنها اضافه می شود. در اثر عملیات حرارتی مغز قطعه ساخته شده از این فولاد چندان سخت نمی شود.

دلایل کلی افزودن عناصر آلیاژی به فولادها عبارتند از:

✓ افزایش سختی پذیری

✓ افزایش استحکام قطعه در دماهای بالا و پایین

✓ افزایش مقاومت به سایش

✓ افزایش خواص مغناطیسی

✓ افزایش انرژی لازم برای شکستن قطعه

فولادهای فنر:

فنرها اجسامی هستند که در اثر اعمال نیرو و بعد از برداشتن آن، دوباره به شکل و ابعاد اولیه خود باز می گردند. به دلیل بالا بودن نیروها و تغییر شکلهایی که به فنرهای مورد استفاده در صنعت وارد می شود لازم است که حد الاستیک قطعه را بالا برد یعنی فولاد تحت تنشهای بالا $21000 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$ بتواند از خود تغییر شکل الاستیک نشان دهد از طرفی فنرها تحت نیروهای متغیر می باشند و بنابراین فولاد مورد نیاز برای این قطعات باید از مقاومت به خستگی بالایی برخوردار باشد در نتیجه برای ساخت فنرها از فولادهایی استفاده می شود که دارای مقادیر مناسبی از سیلیسیم ، منگنز ، کرم ، وانادیم و مولیبدن باشند. فولادهایی که در برابر حرارت مقاوم باشند حاوی کرم ، وانادیم و تنگستن هستند . فولادهای مقاوم در برابر خوردگی حاوی کرم ، نیکل و مولیبدن (فولادهای زنگ نزن) هستند .

فولادهای خوش تراش:

مقدار گوگرد در فولاد باید پایین باشد چون فولاد در حین عملیات آهنگری (فورج) و نورد گرم از خود رفتار تردی نشان می دهد و قطعه کار ترک می خورد با وجود این در مواردی که لازم است قابلیت ماشین کاری فولاد افزایش یابد و به جای براده های طویل براده های کوتاه تشکیل شود تا حد معینی به فولاد (۰/۳۵ - ۰/۰۸) درصد گوگرد اضافه می کنند.

برای افزایش قابلیت ماشین کاری فولاد می توان از فولادهای سرب دار و فسفردار نیز همراه با گوگرد (۰/۱۵ - ۰/۲) استفاده کرد .

فولادهای خوش تراش برای عملیات آهنگری و نورد گرم که در دمای بالا انجام می گیرد مناسب نمی باشد . فسفر نیز اگر مقدارش بیش از ۰/۲ باشد مقاومت ضربه فولاد کاهش می یابد. به طور کلی کاهش هزینه ماشین کاری در استفاده از فولادهای خوش تراش ممکن است به دلایل زیر باشد :

- ۱- عمر طولانی ابزار به دلیل اصطکاک پایین
- ۲- سرعتهای برش بالا
- ۳- قدرت مورد نیاز پایین
- ۴- دقت بالا در قطعات ماشین کاری شده
- ۵- سطح صاف قطعات بعد از ماشین کاری از عملیات بعدی جلوگیری می کند
- ۶- حداقل dressing ابزار به علت سایش بسیار پایین.

فولادهای بلبرینگ و رولبرینگ:

بلبرینگها و رولبرینگها قطعاتی هستند که تحت سایش و نیروهای فشاری شدیدی قرار دارند لذا بایستی از فولادهای ساخته شوند که ضمن داشتن مقاومت به سایش بالا ، در اثر نیروهای فشاری نیز لهیده نشوند. فولادهای مناسب برای این منظور بایستی حاوی کربن بالا (حدود یک درصد) و کرم نسبتا بالا (حدود ۱/۵ درصد) باشند که پس از عملیات حرارتی سختی آنها تا ۶۴ HRC افزایش یابد.

فولادهای نیتروراسیون:

با انجام عملیات حرارتی نیتروراسیون بر روی فولادهای نیتروژن (ازت) در سطح فولاد نفوذ داده می شود این عملیات در یک محیط حاوی نیتروژن در دمای 480-580 درجه سانتیگراد بر روی فولادهای خاصی انجام می شود. برای انجام این عملیات قطعات ابتدا عملیات حرارتی، تمپر و در صورت نیاز ماشین کاری می شوند. همچنین بعد از عملیات لازم نیست که قطعه از دمای بالا در محیطهای سرد کننده قوی مانند آب یا روغن سرد شود لذا خطر ترک خوردن قطعه نیز کم خواهد بود. از مزایای دیگر آن می توان به ارزان بودن و عدم تغییر ساختار کریستالی اشاره کرد. سختی حاصله در این عملیات نسبت به سختی حاصل از سمانتاسیون بیشتر و نفوذ آن کمتر است. فولادهای حاوی آلومینیوم مهمترین نوع فولادهای نیترووره شونده هستند. از این دسته فولادها می توان به فولادهای ابزار گرم اشاره کرد.

فولادهای زنگ نزن:

این فولادها در مواردی که نیاز به مقاومت به خوردگی بالا باشد مورد استفاده قرار می گیرند. عامل اصلی مقاومت به خوردگی این فولادها، کرم است. میزان کرم در فولادهای زنگ نزن بیش از ۱۰ درصد است. هر فولادی که درصد کربن آن زیاد است در برابر خوردگی مقاوم نیست. پس فولادهای زنگ نزن حاوی مقادیر کم کربن هستند. برای بهبود سایر خواص فولادهای زنگ نزن به این فولادها نیکل، مولیبدن و آلومینیوم اضافه می کنند.

فولادهای زنگ نزن به ۵ دسته تقسیم می شوند:

- ۱- فولادهای زنگ نزن آستنیتی
- ۲- فولادهای زنگ نزن فریتی
- ۳- فولادهای زنگ نزن مارنریتی
- ۴- فولادهای زنگ نزن دوبلکس
- ۵- فولادهای زنگ نزن سختی رسوبی شونده

فولادهای زنگ نزن آستنیتی (نگیر)

درصد کرم این فولادها (۲۶-۱۶) و درصد نیکل (۲۰-۶) است. این مقدار نیکل موجب می شود که فولاد حاصل غیر مغناطیسی (نگیر) شود. در برخی از فولادهای این گروه منگنز جانشین نیکل می شود و این فولادها عملیات حرارتی پذیر نیستند. تنها عملیات حرارتی که بر روی این فولادها انجام می گیرد عملیات حرارتی تنش گیری و آنیل کامل است. این گروه در میان سایر گروههای فولادهای زنگ نزن مقاومت به خوردگی بالاتری دارد و در بسیاری از محیطهای خورنده غیر فعال است.

..... -304-308-316-321-347

فولادهای زنگ نزن فریتی (بگیر)

این فولادها کم کربن (۰/۱) و حاوی ۱۰ الی ۲۷ درصد کرم هستند. این فولادها نیز عملیات حرارتی نمی شوند. این فولادها مغناطیس شونده (بگیر) هستند و تنها عملیات حرارتی که بر روی این فولادها انجام می گیرد عملیات آنیل است. مقاومت به خوردگی این فولادها نسبت به گروه آستنیتی کمتر و نسبت به گروه مارتنزیتی بیشتر است.

..... - 430

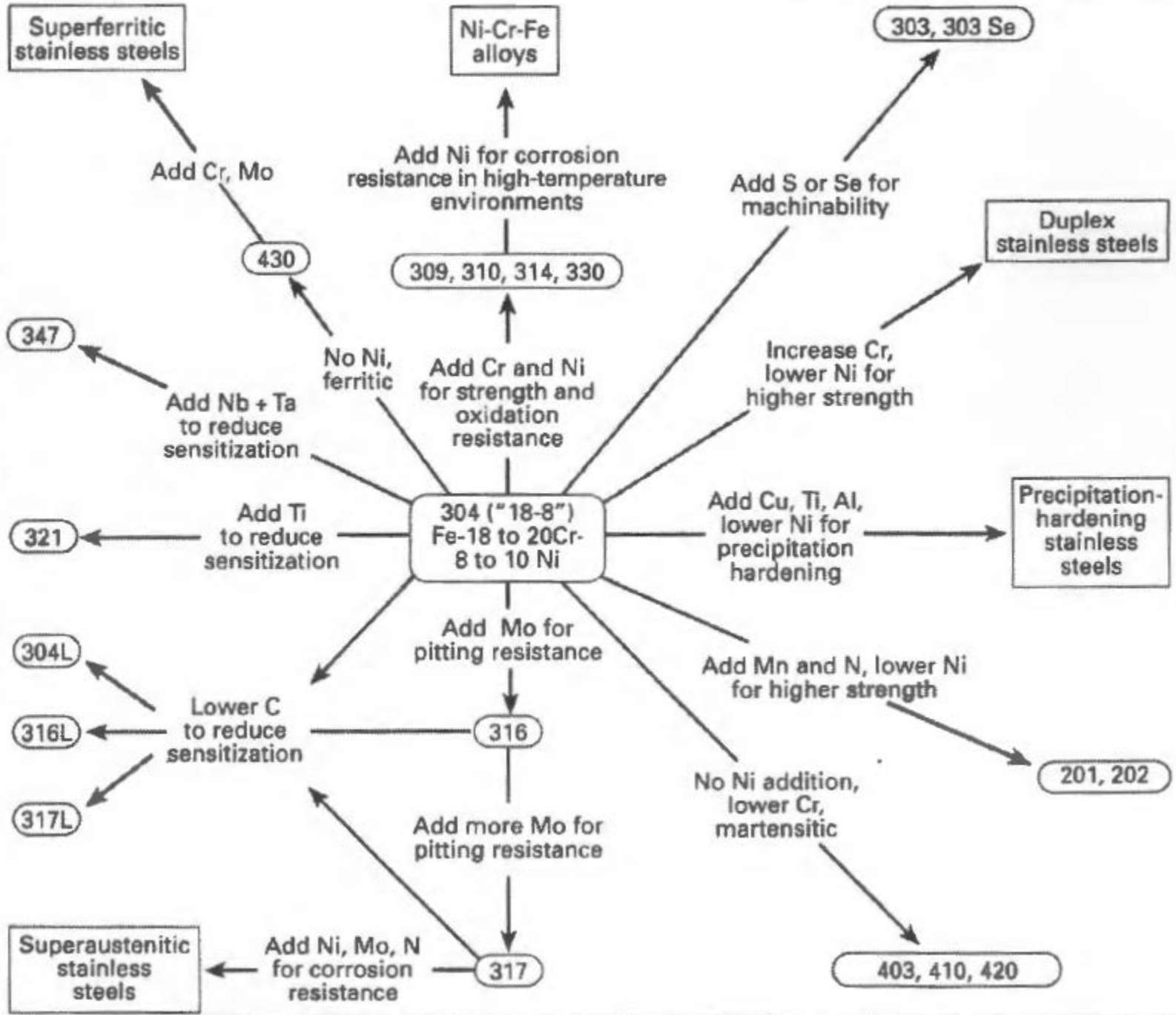
فولادهای زنگ نزن ماتنزیتی (بگیر)

مقدار کربن این گروه ۰/۴-۰/۱ درصد و حاوی ۱۴-۱۱ درصد کرم هستند. این فولادها بعلت داشتن کربن نسبتا زیاد می توانند همانند سایر فولادهای کربنی و آلیاژی سخت شوند اما درجه سخت کاری این فولادها بالا تر است. در این فولادها لزوما با افزایش کرم مقاومت به خوردگی افزایش نمی یابد زیرا همانطوری که می دانیم میل ترکیبی کربن با کرم زیاد است و کاربیدهای درشت کرم خود ممکن است منبع خوردگی باشد به همین دلیل مقاومت به خوردگی با افزایش زیاد کرم ممکن است کاهش یابد .

..... -420-410-403

فولادهای زنگ نزن سختی رسوبی شونده

سختی این فولادها را می توان با عملیات حرارتی تا ۴۲ HRC افزایش داد. اما روش سخت کاری این فولادها متفاوت با سایر فولادها بوده و اساسا شبیه سخت کاری آلیاژهای غیر آهنی است و با افزایش Al , Cu , Ti و ... تشکیل رسوب سخت کاری صورت می گیرد.



دیاگرام آہن - کربن

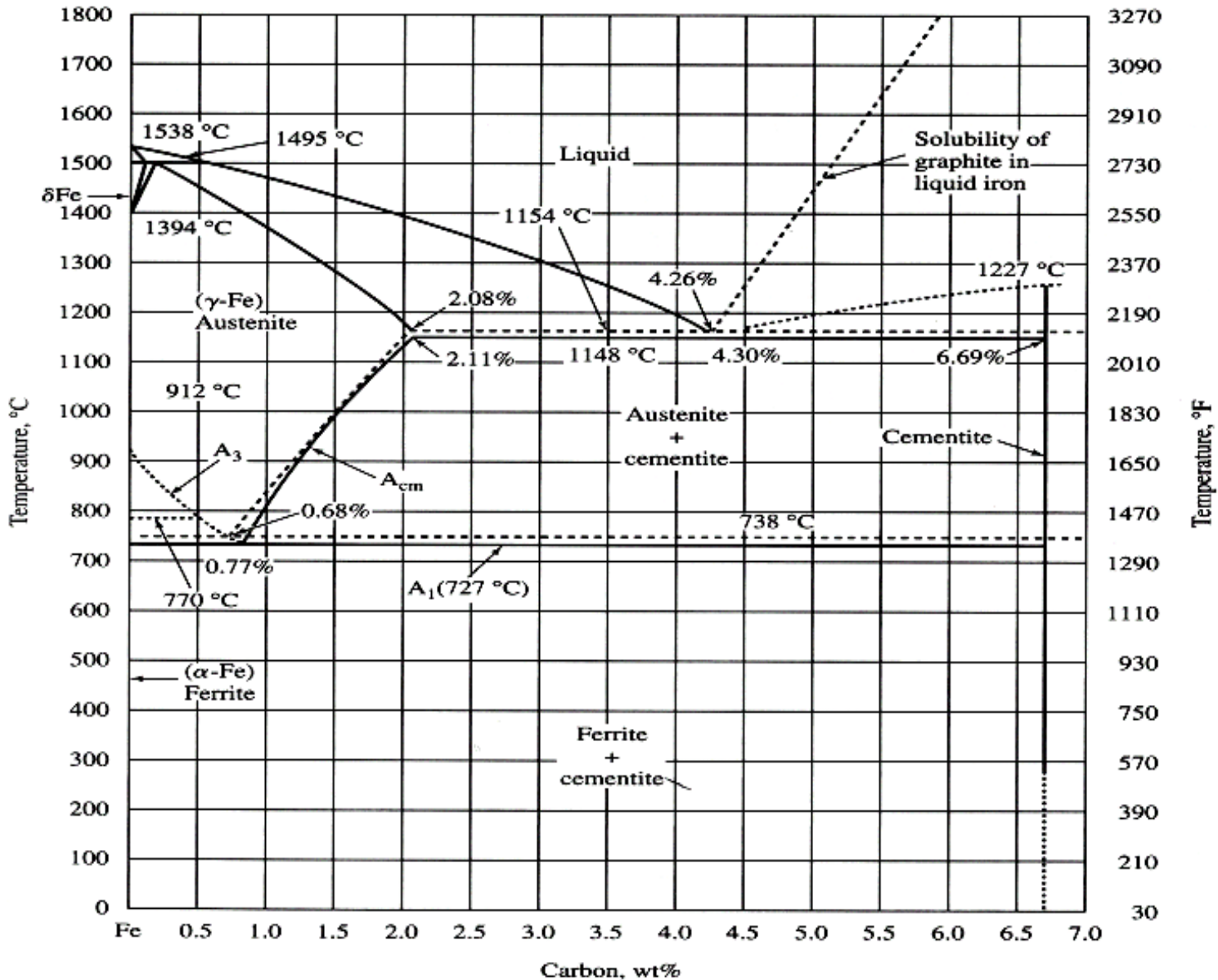
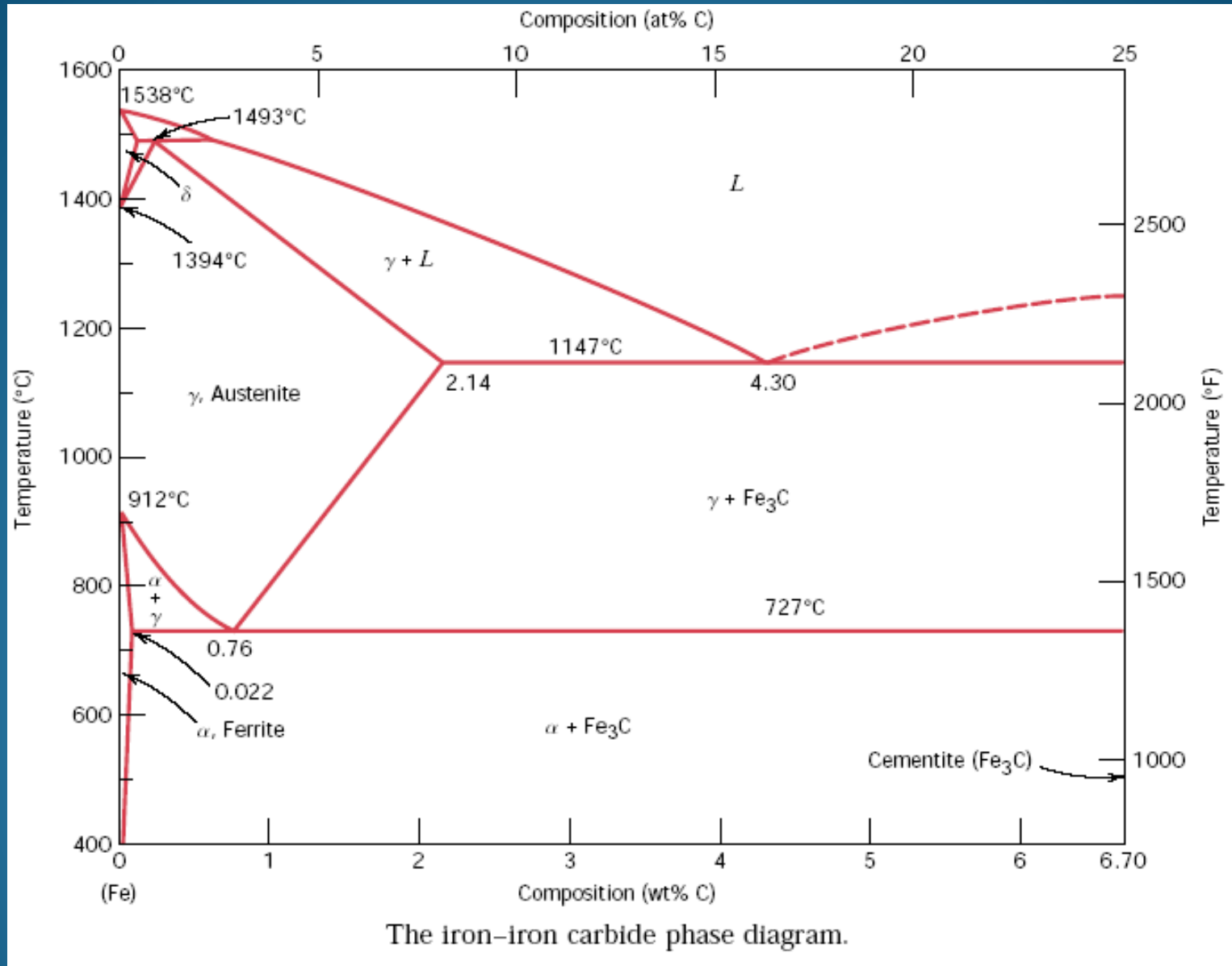
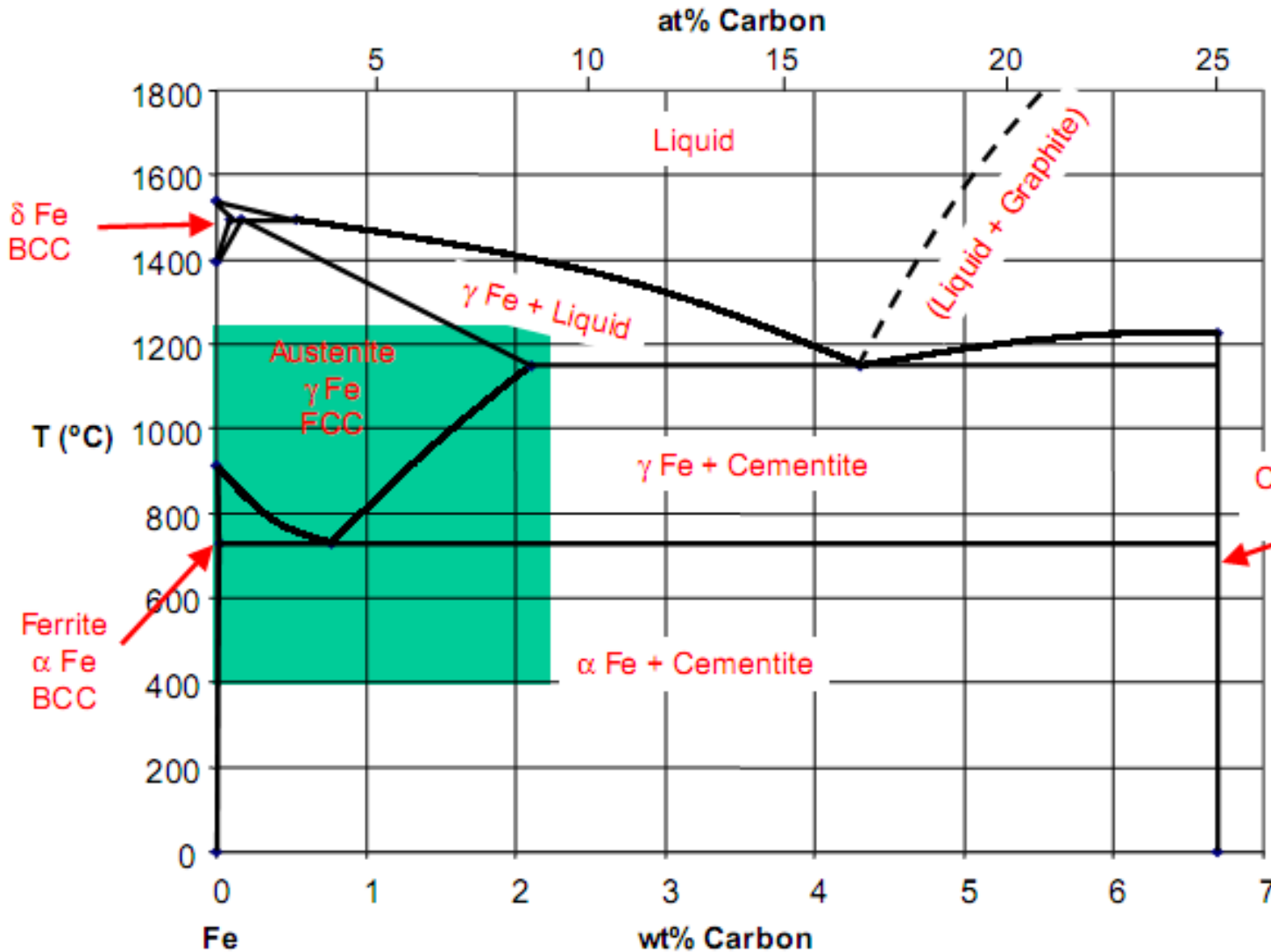


Figure 6-11 Carbon may occur in iron in the form of cementite (solid lines) or graphite (broken lines). (From *Metals Handbook Desk Edition*, ASM International, 1985, p. 28.2. With permission.)

دیاگرام آهن - کربن



Steels – the Basics Revisited



Most steels are based on the "metastable" phase diagram Fe – Fe₃C.

The region of most interest is around the eutectoid reaction
 $\gamma \Rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$.

فازهای موجود در دیاگرام آهن - کربن

فریت α : محلول جامد کربن در آهن آلفا، ساختار این فاز BCC بوده و معمولاً در دمای محیط پایدار است. این فاز قابلیت مغناطیس شدن را دارد.

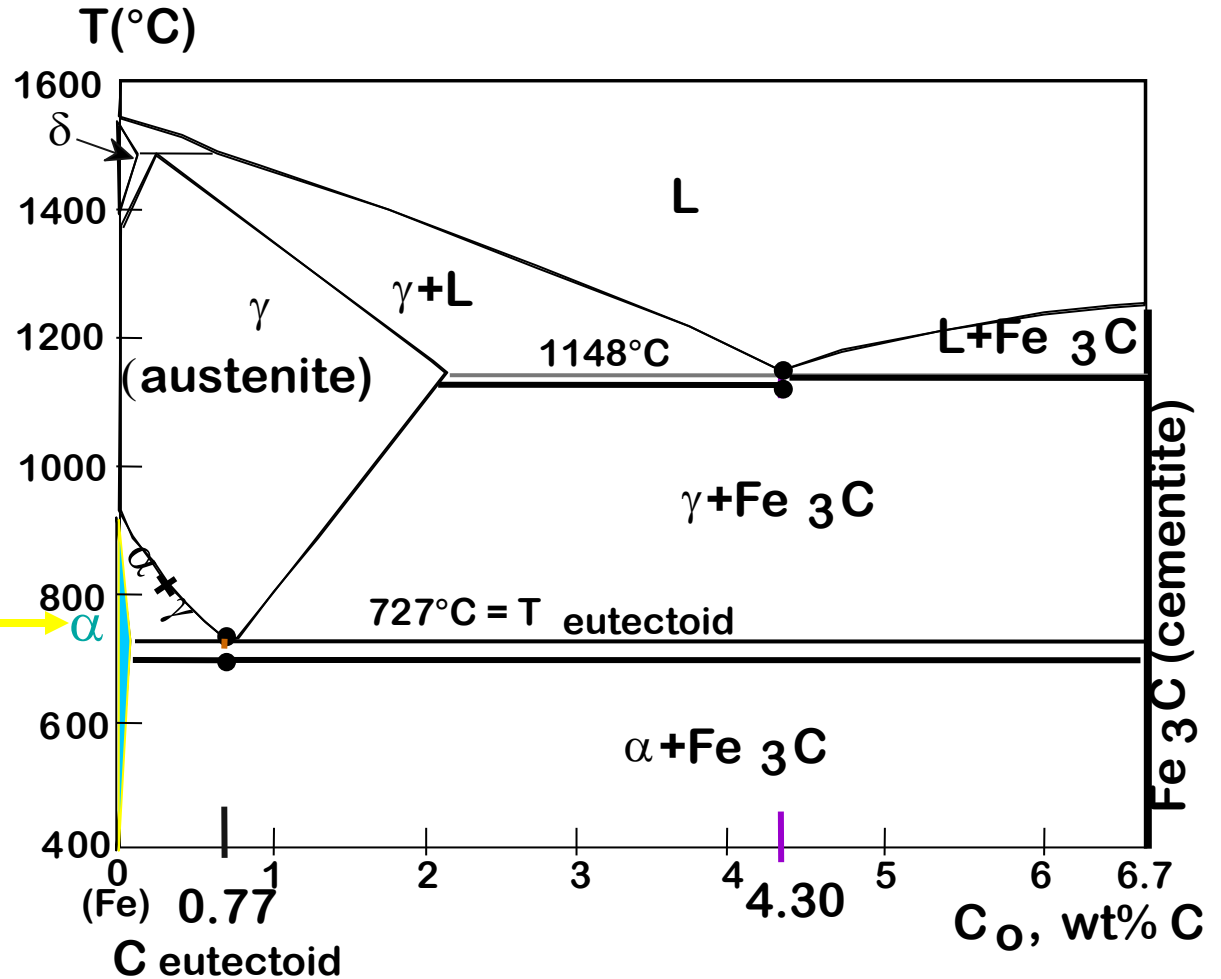
آستنیت : محلول جامد کربن در آهن گاما، این فاز دارای ساختار FCC بوده و قابلیت مغناطیس شدن را ندارد.

فریت δ : محلول جامد کربن در آهن دلتا، ساختار این فاز BCC بوده و در دمای بالا پایدار است.

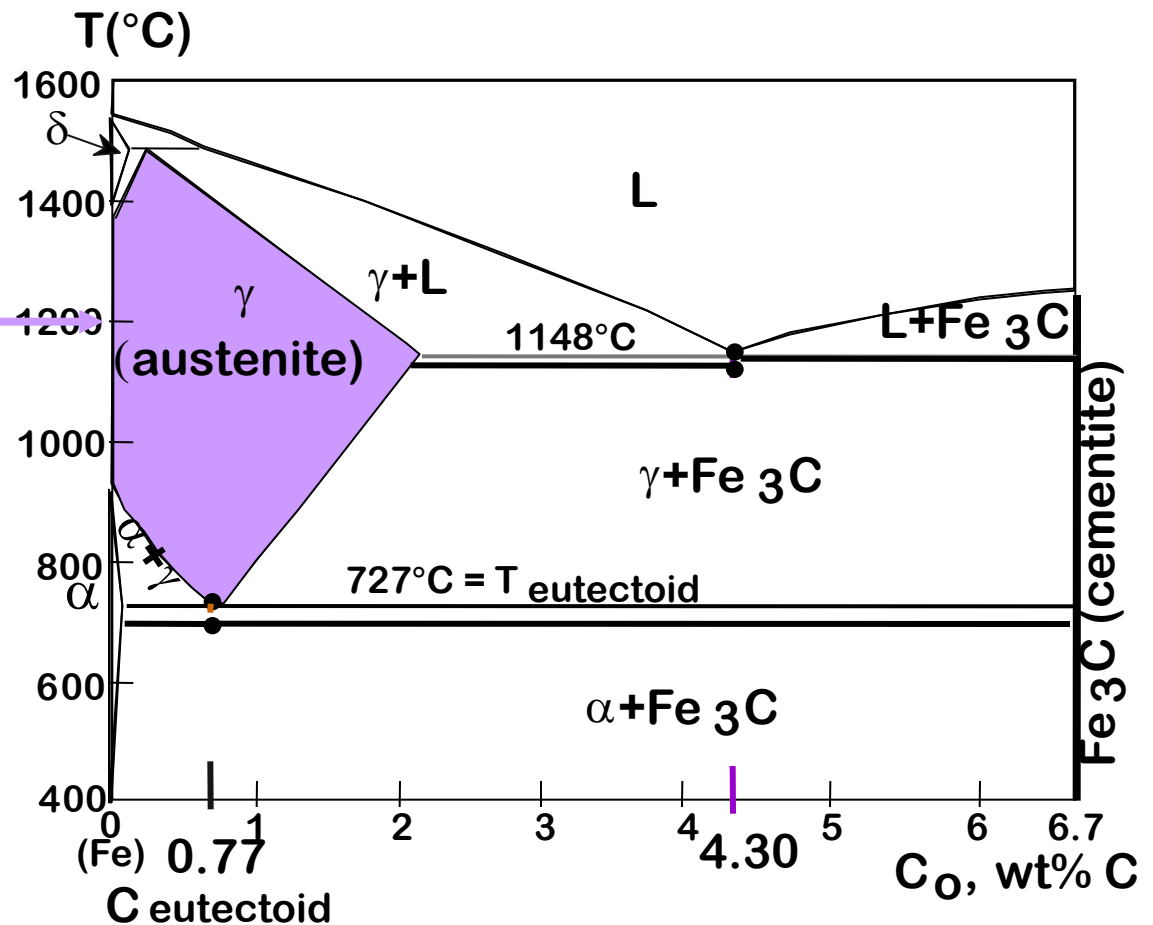
سمنتیت : کاربید آهن با ترکیب Fe_3C

فازهای موجود در دیآگرام آهن - کربن

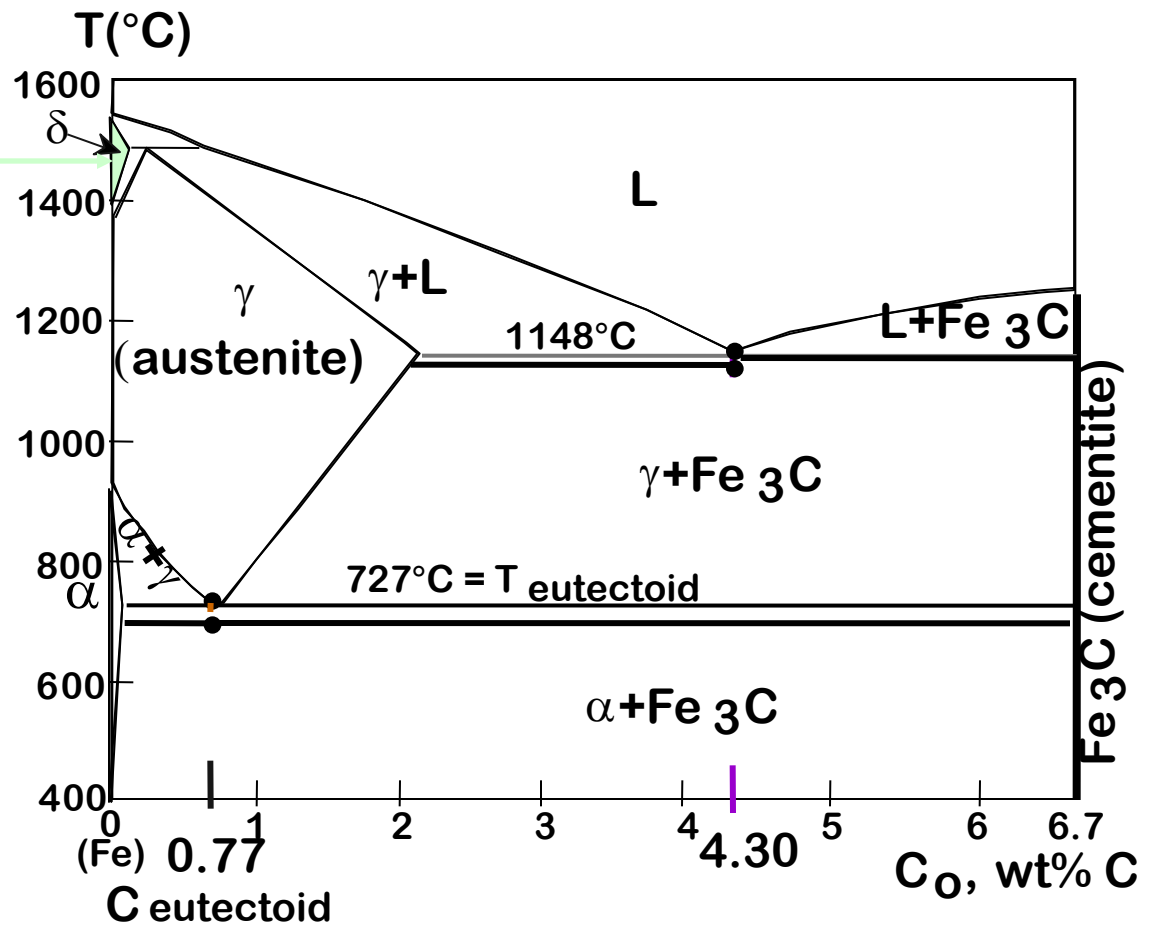
فریت α : محلول جامد کربن در آهن آلفا، ساختار این فاز BCC بوده و معمولاً در دمای محیط پایدار است. این فاز قابلیت مخنطایس شدن را دارد.



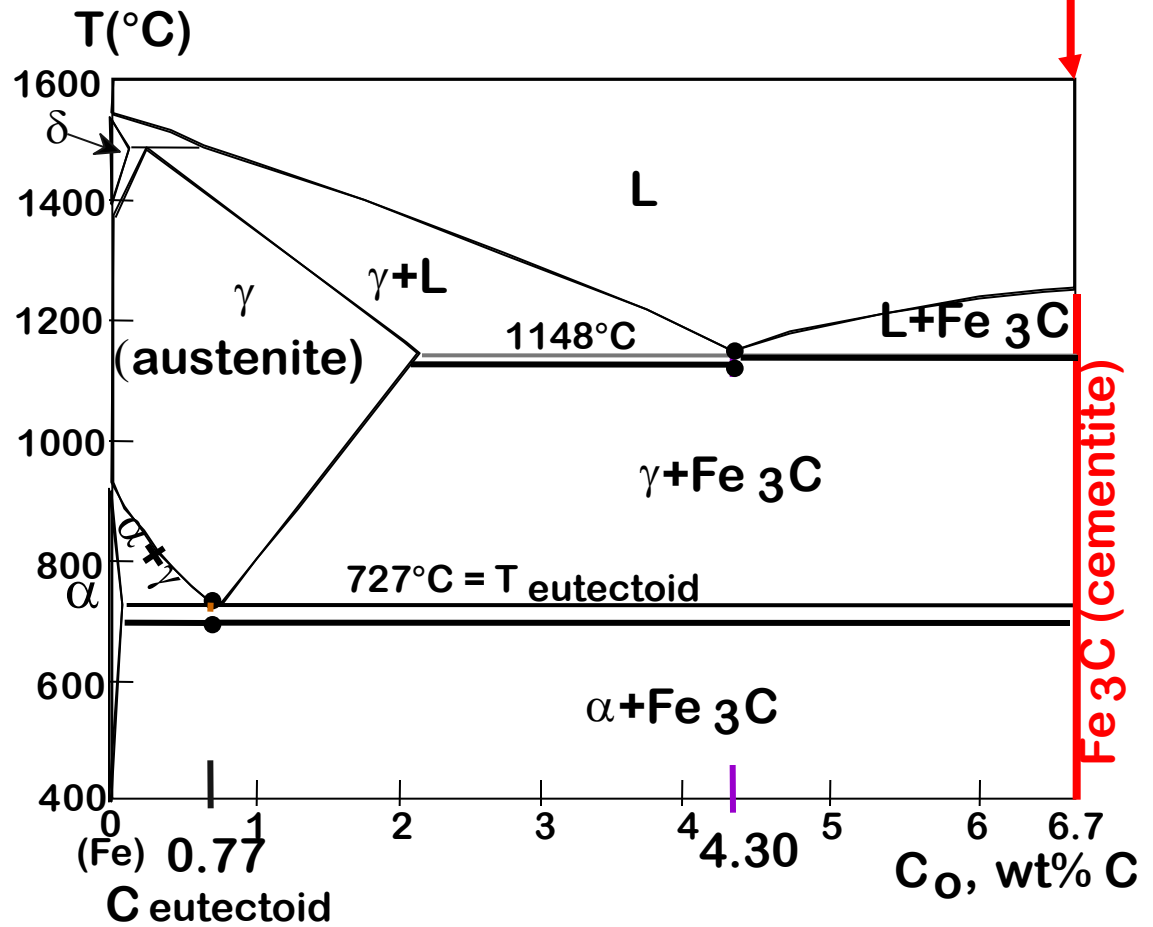
آستنیت : محلول جامد کربن در آهن گاما، این فاز دارای ساختار FCC بوده و قابلیت مغناطیس شدن را ندارد.



فریت δ : محلول جامد کربن در آهن دلتا، ساختار این فاز BCC بوده و در دمای بالا پایدار است.



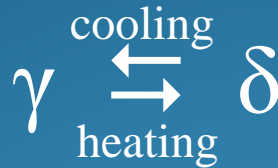
سمتیت : کاربید آهن با ترکیب Fe_3C



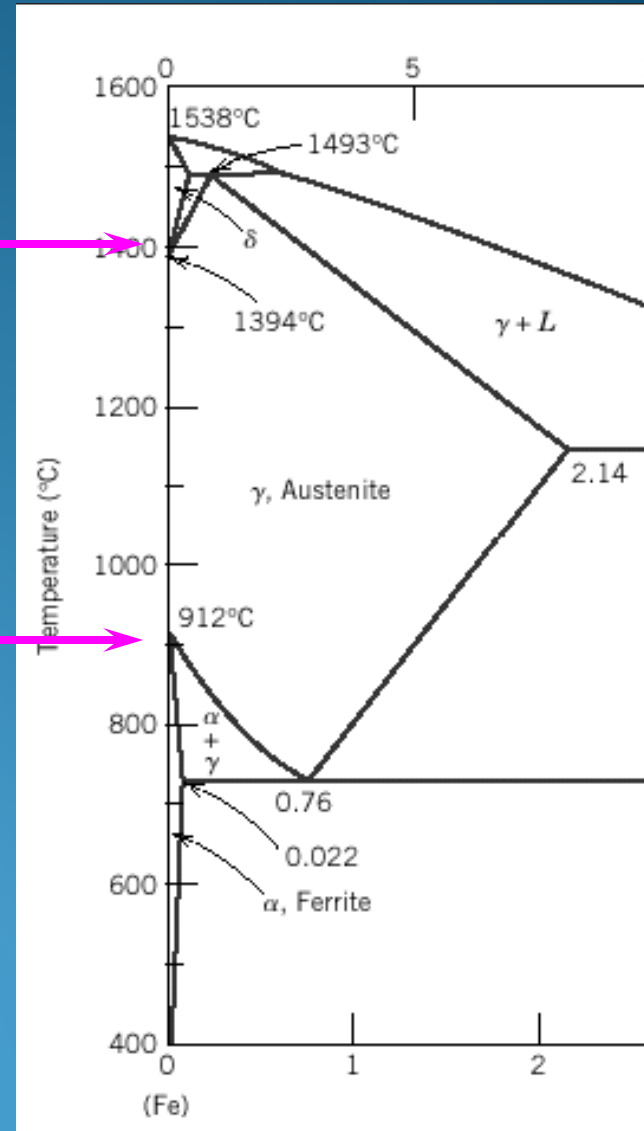
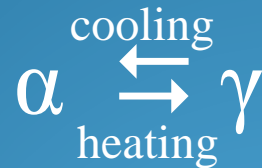
تبدیل‌های فازی در دیاگرام آهن - کربن

استتاله پلی‌مرفیسم در آهن خاص

At 1394 °C:



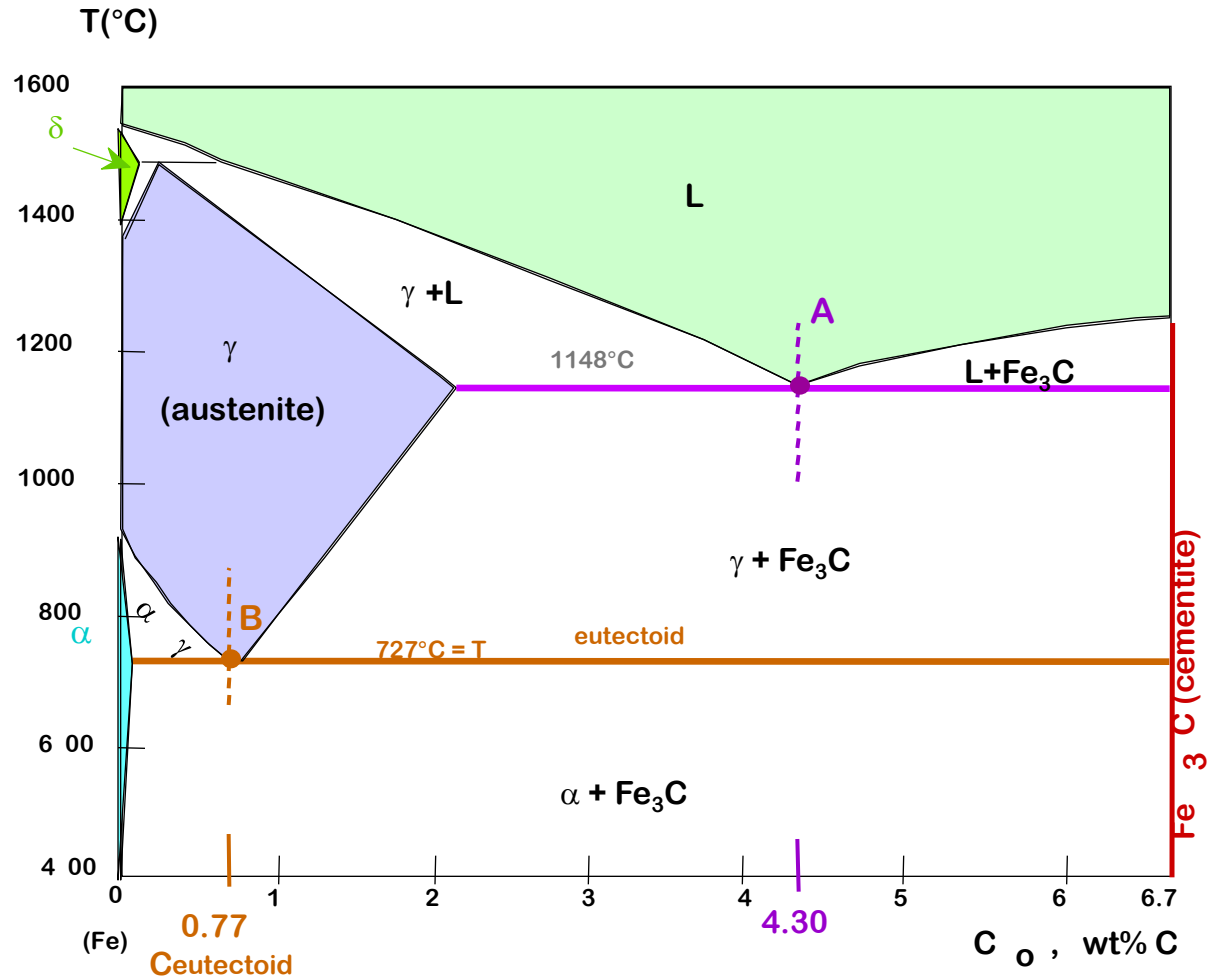
At 912 °C:



تبدیل‌های فازی در دیاگرام آهن - کربن

Eutectic (A):
 $L \rightarrow \gamma + Fe_3C$

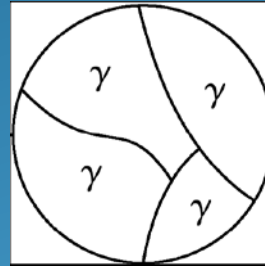
Eutectoid (B):
 $\gamma \rightarrow \alpha + Fe_3C$



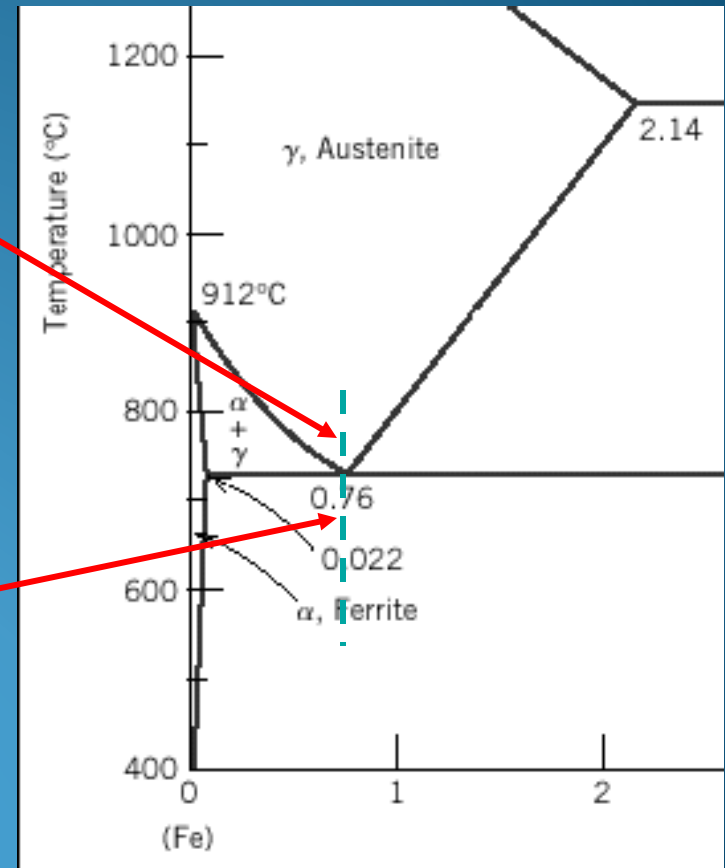
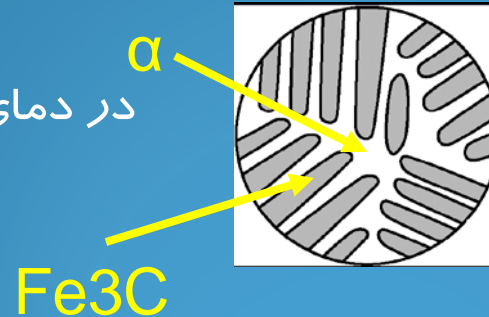
تشکیل ریز ساختار در فولادها

فولادی با ترکیب یوتکتوئید (۰٫۷۷٪C)

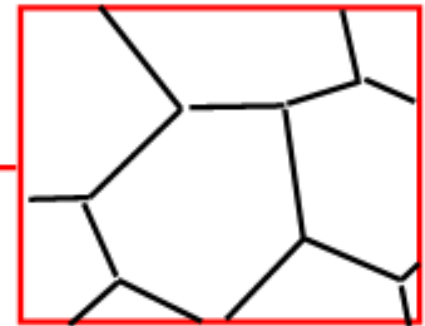
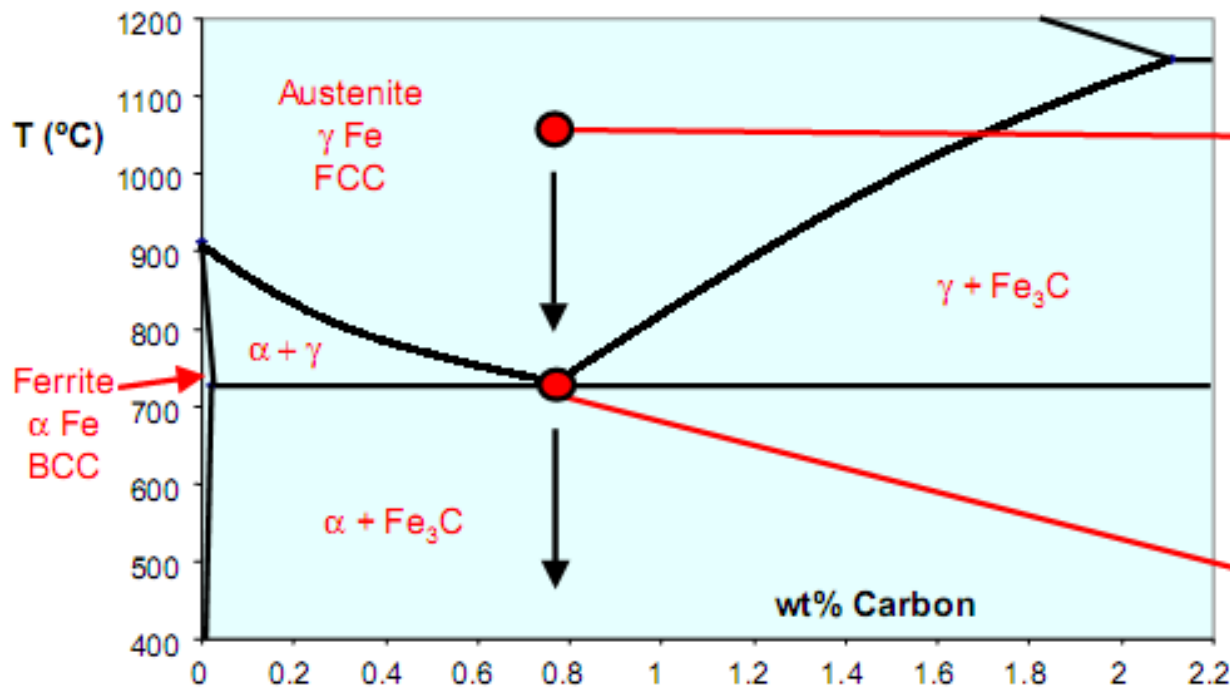
در دمای بیش از 727°C : آستنیت



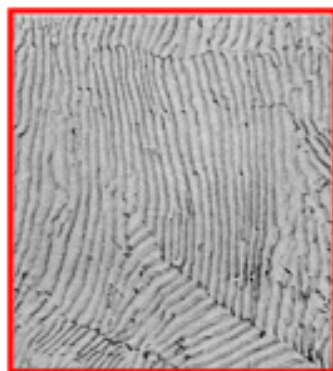
در دمای بیش از 727°C : پرلیت



Eutectoid (0.8wt%C) Carbon Steels

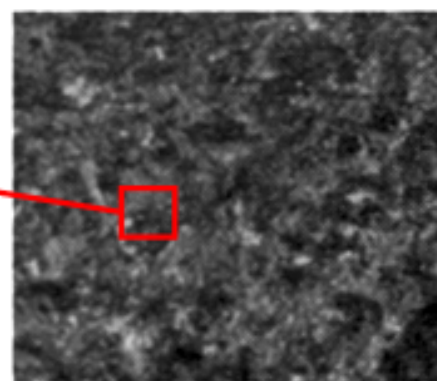


50 – 500 μm



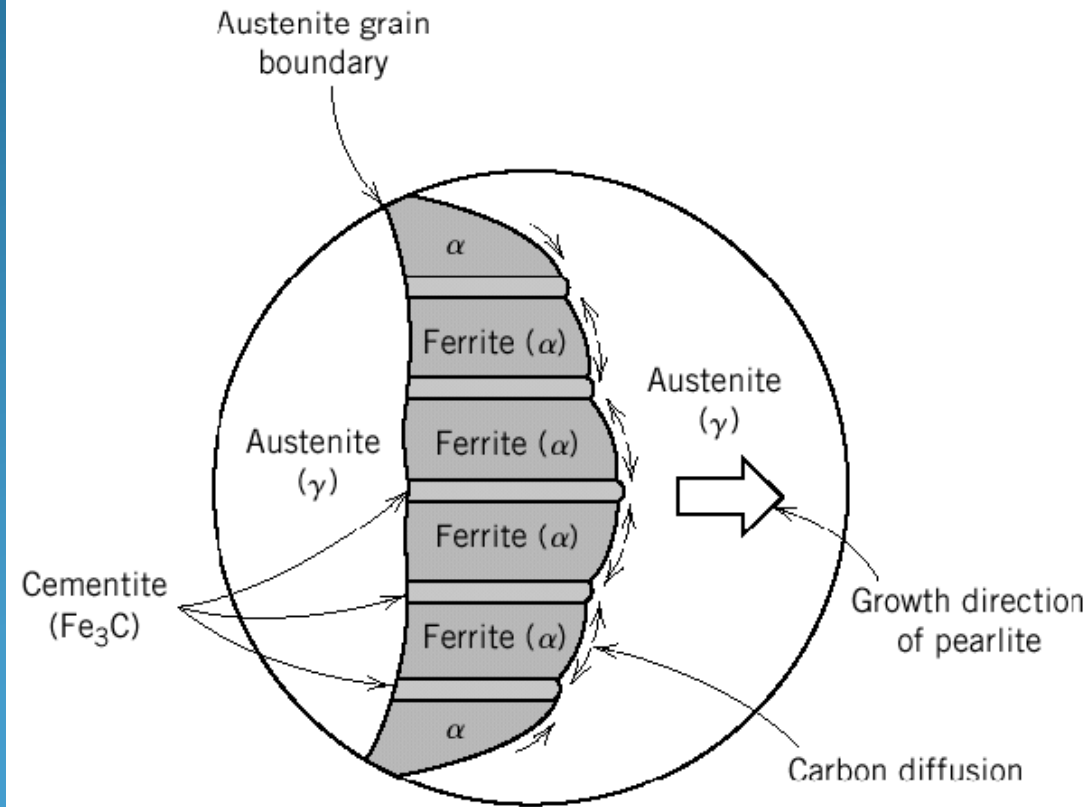
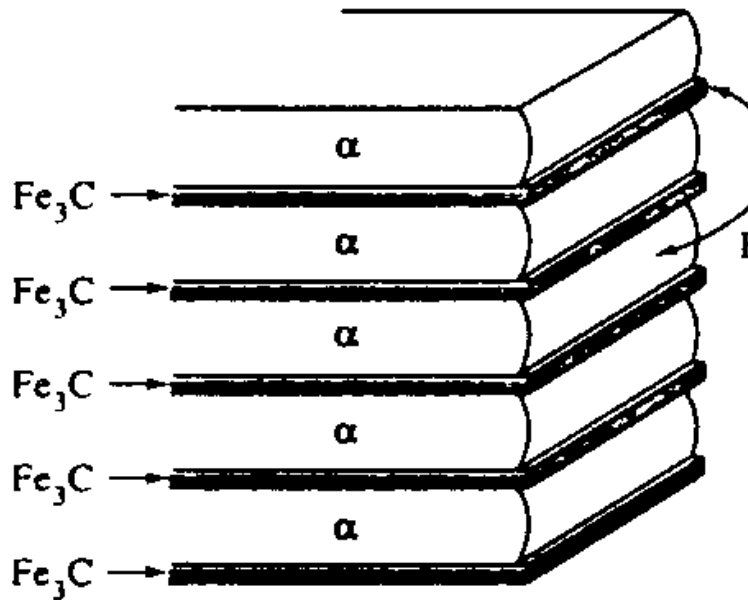
Pearlite

1-10 μm



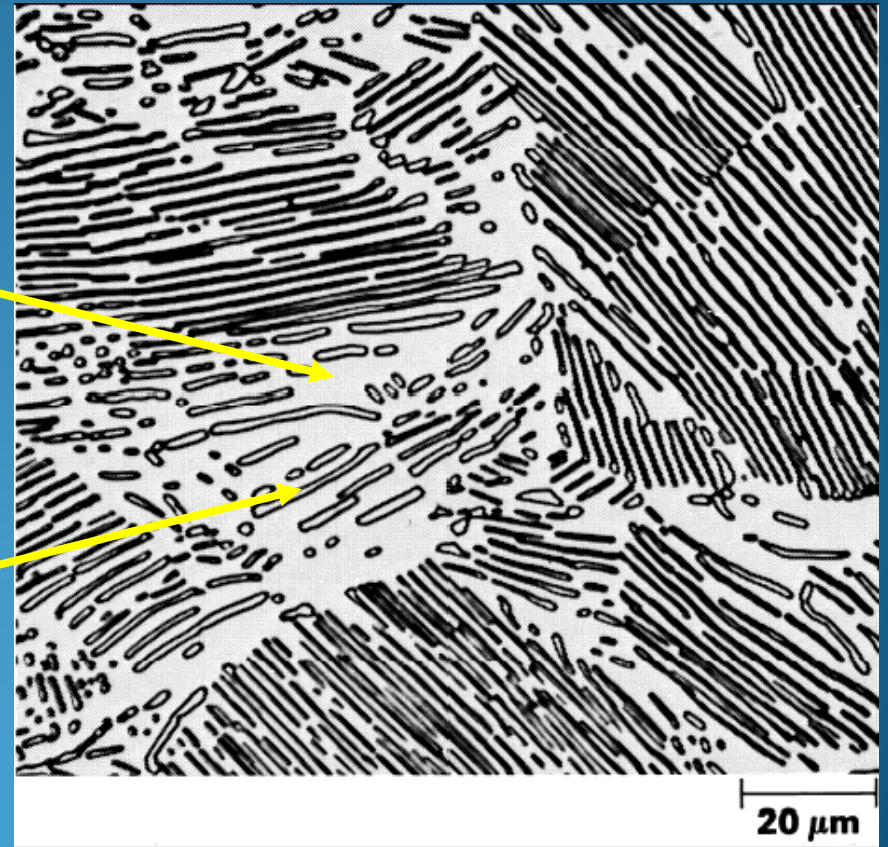
تشکیل ریز ساختار در فولادها

تشکیل پرلیت



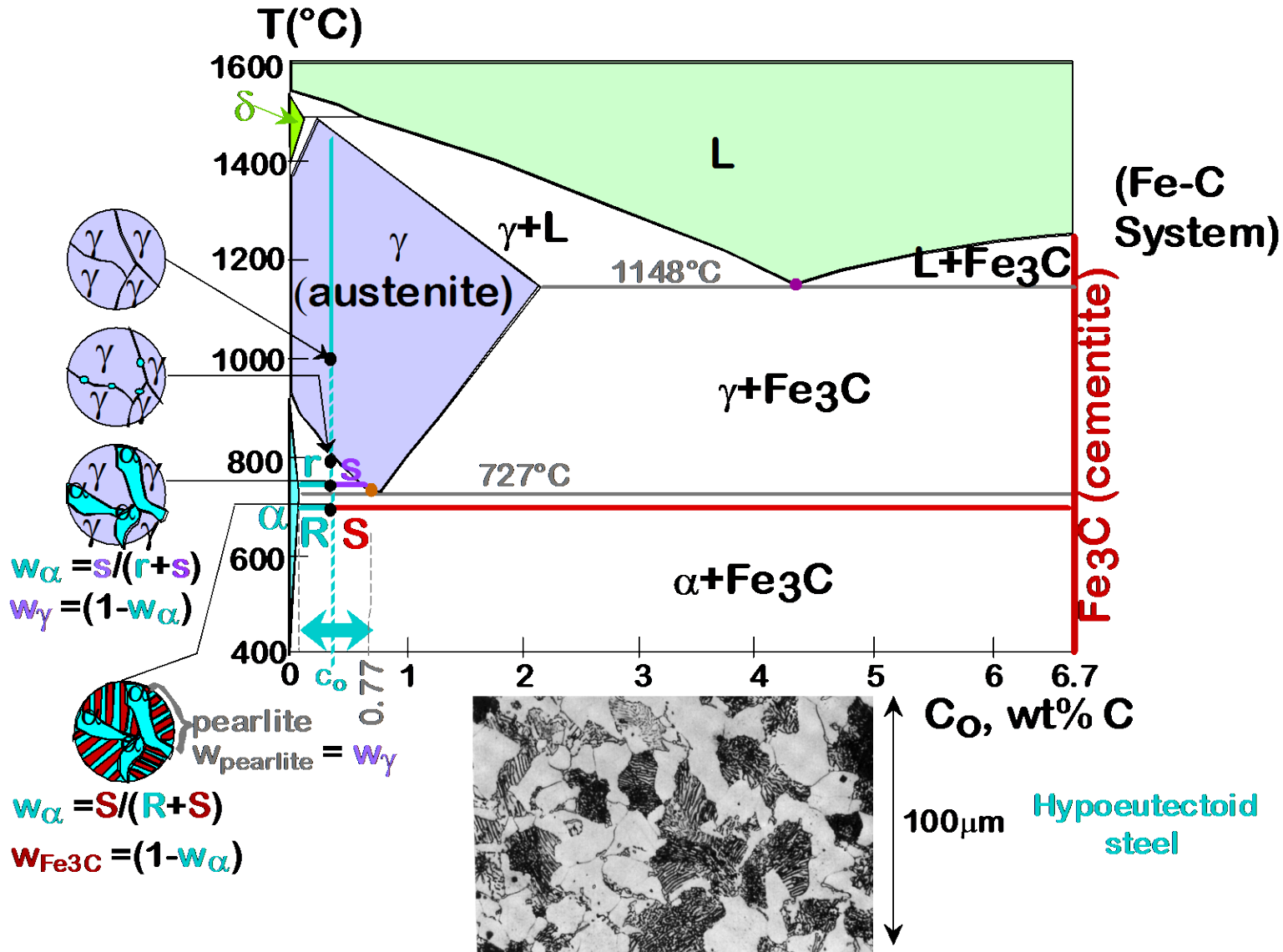
تشکیل ریز ساختار در فولادها

ریز ساختار تمام پرلیتی

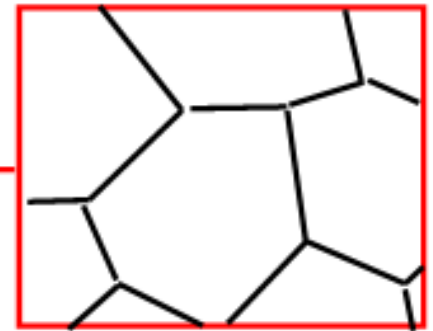
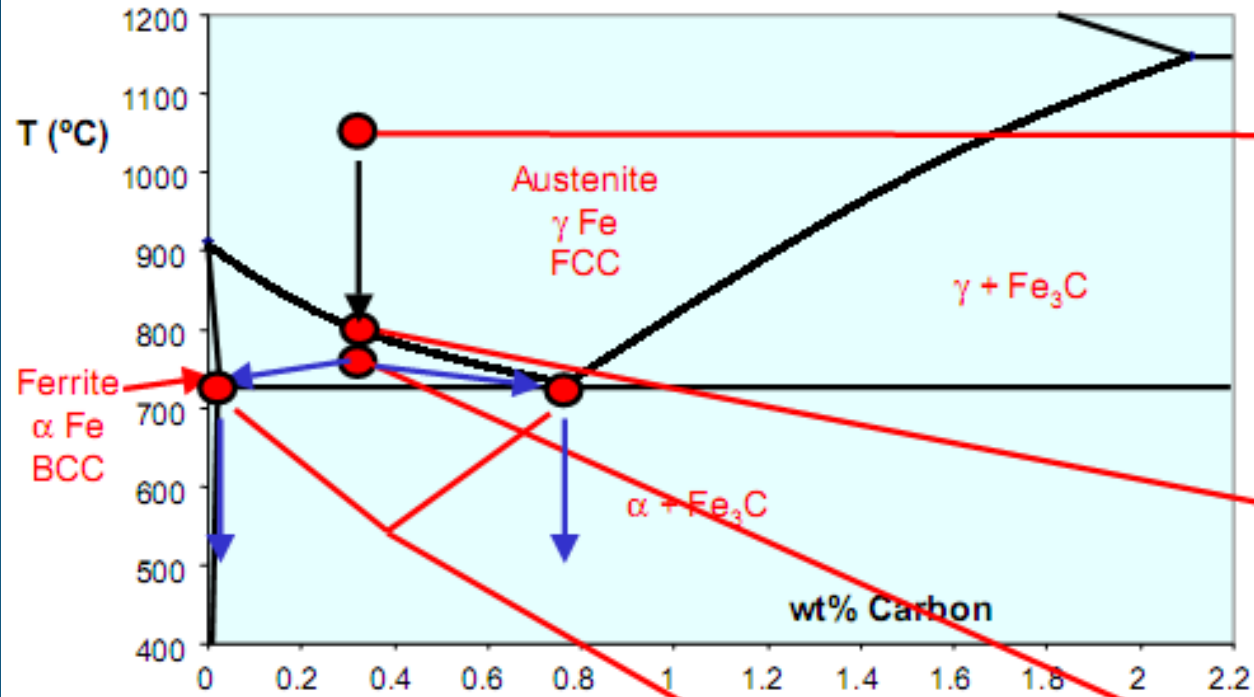


تشکیل ریز ساختار در فولادها

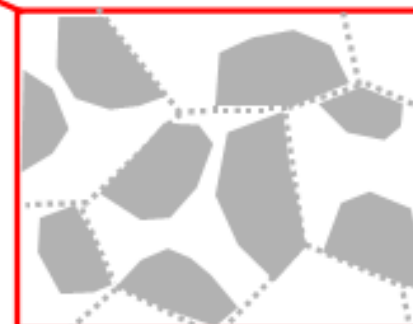
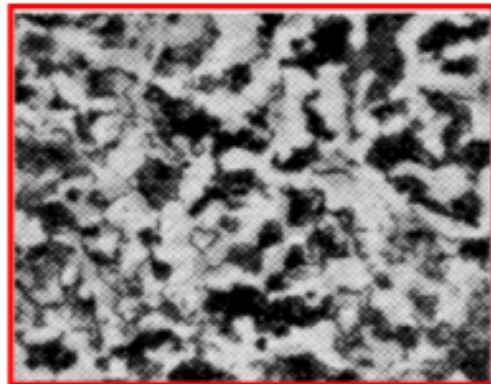
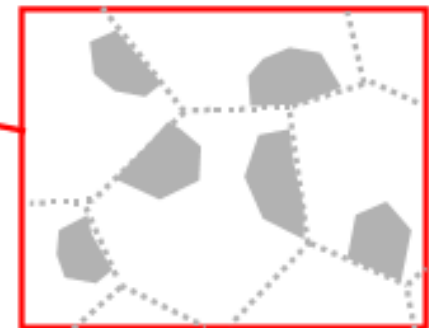
فولادی با ترکیب هیپوئکتوئید (بیش از ۰.۷۷٪ C)



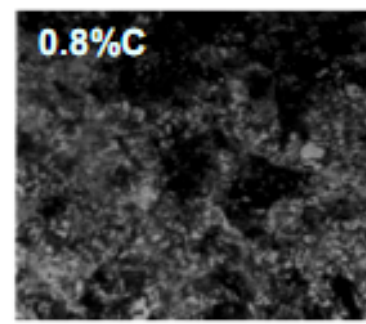
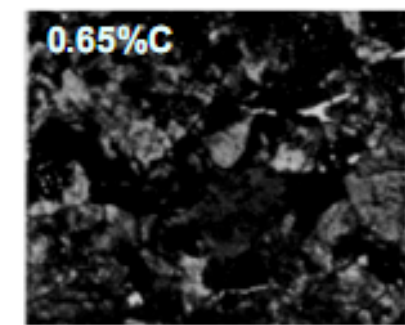
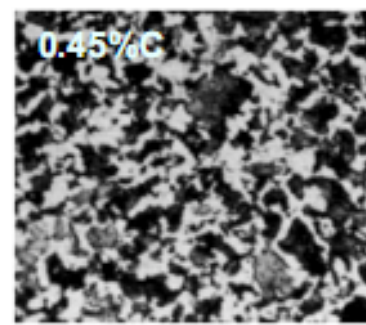
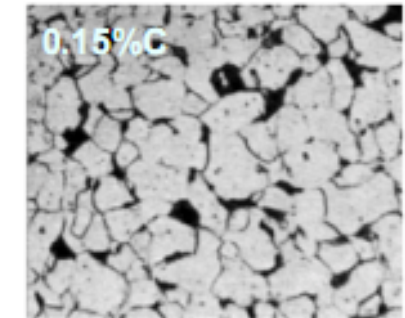
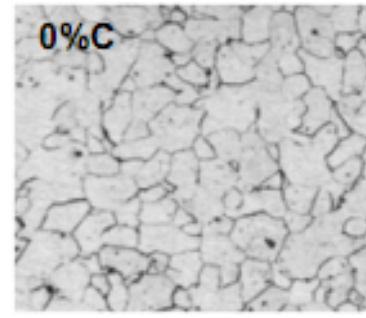
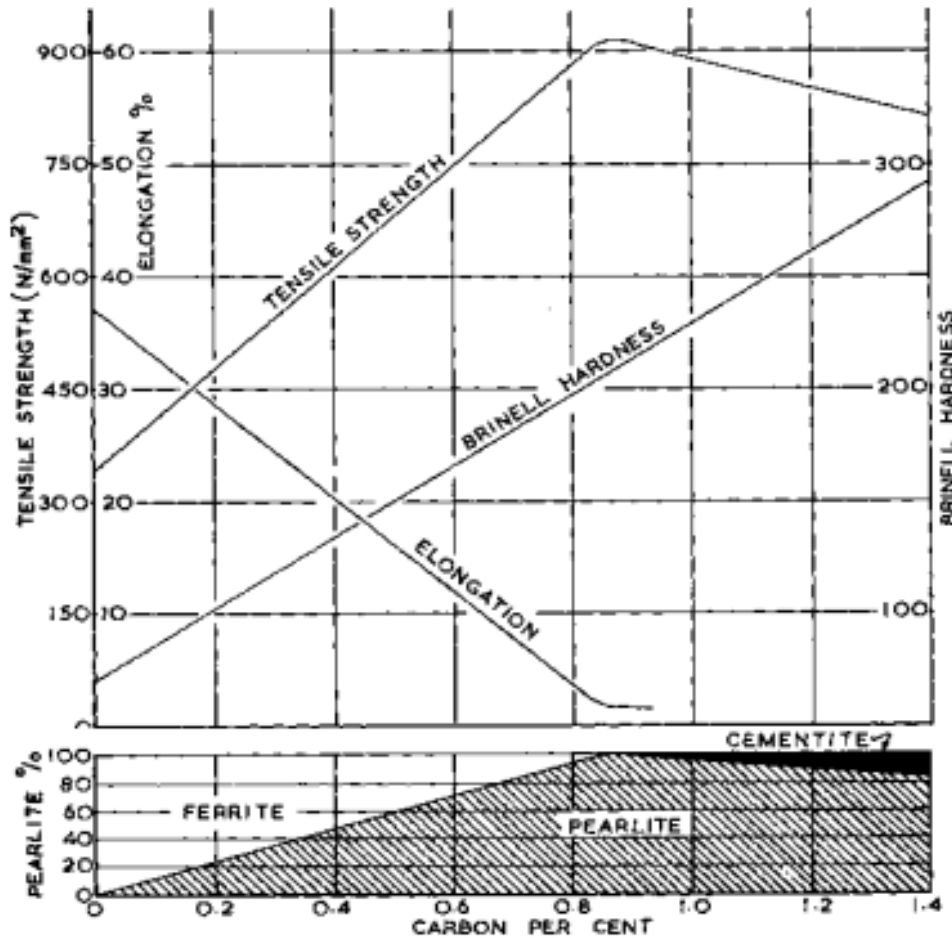
Plain Carbon Steels



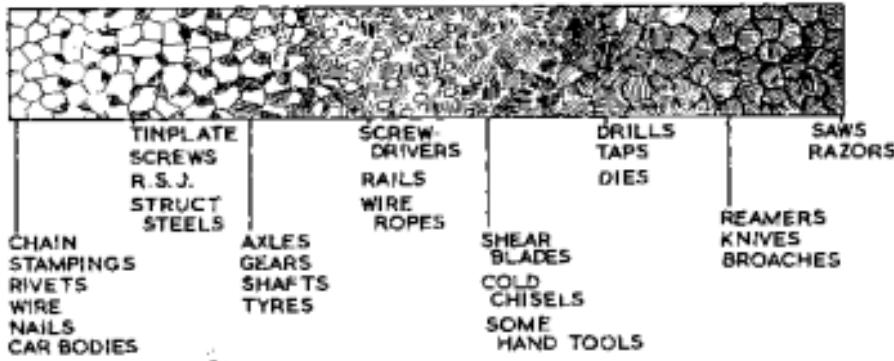
50 – 500 μm



Plain Carbon Steels



10µm

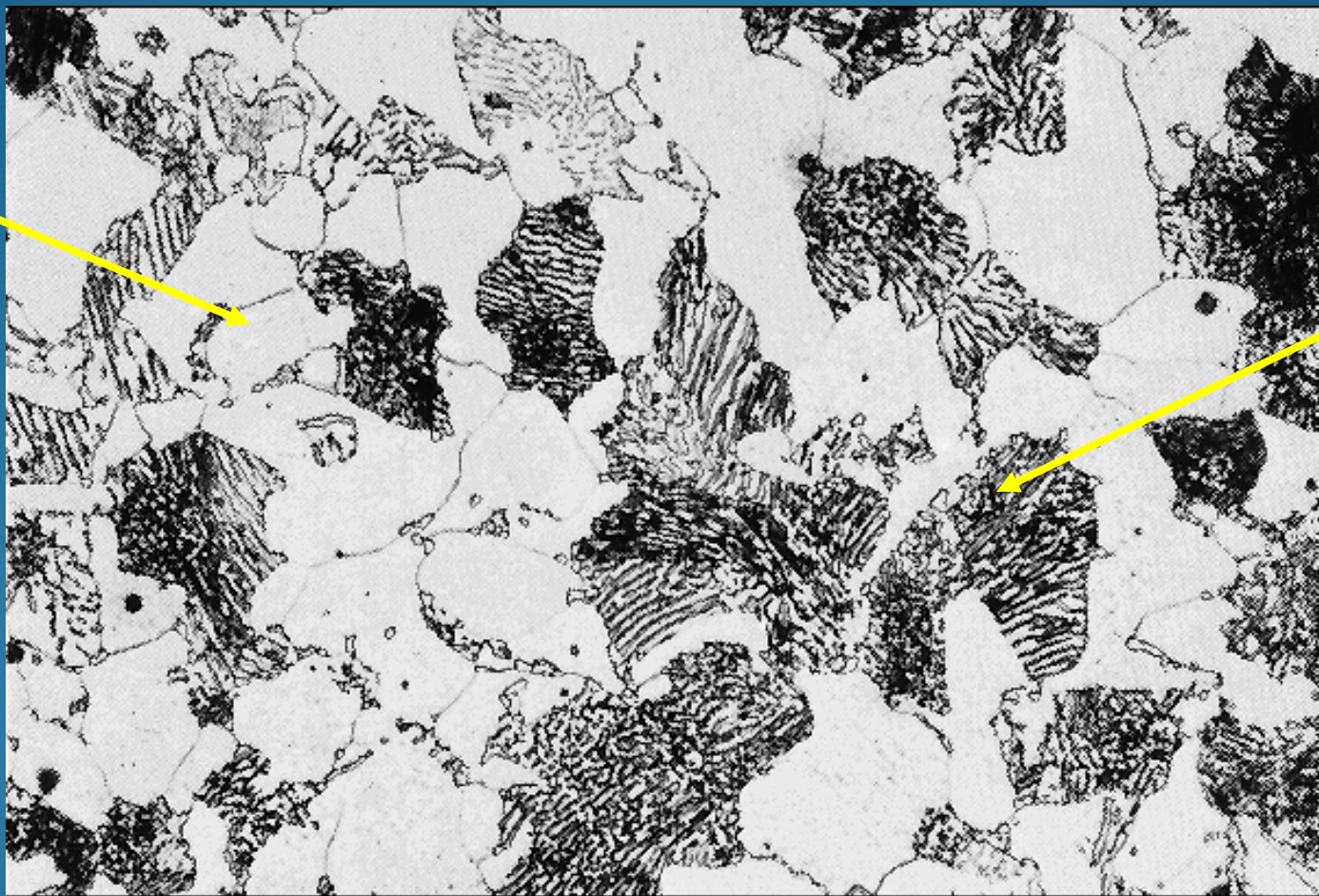


Typical microstructures and properties of "normalised" (slow cooled) carbon steels.

فولادی با ترکیب هیپوئیتکتوئید (کمتر از ۰.۷۷٪ C)

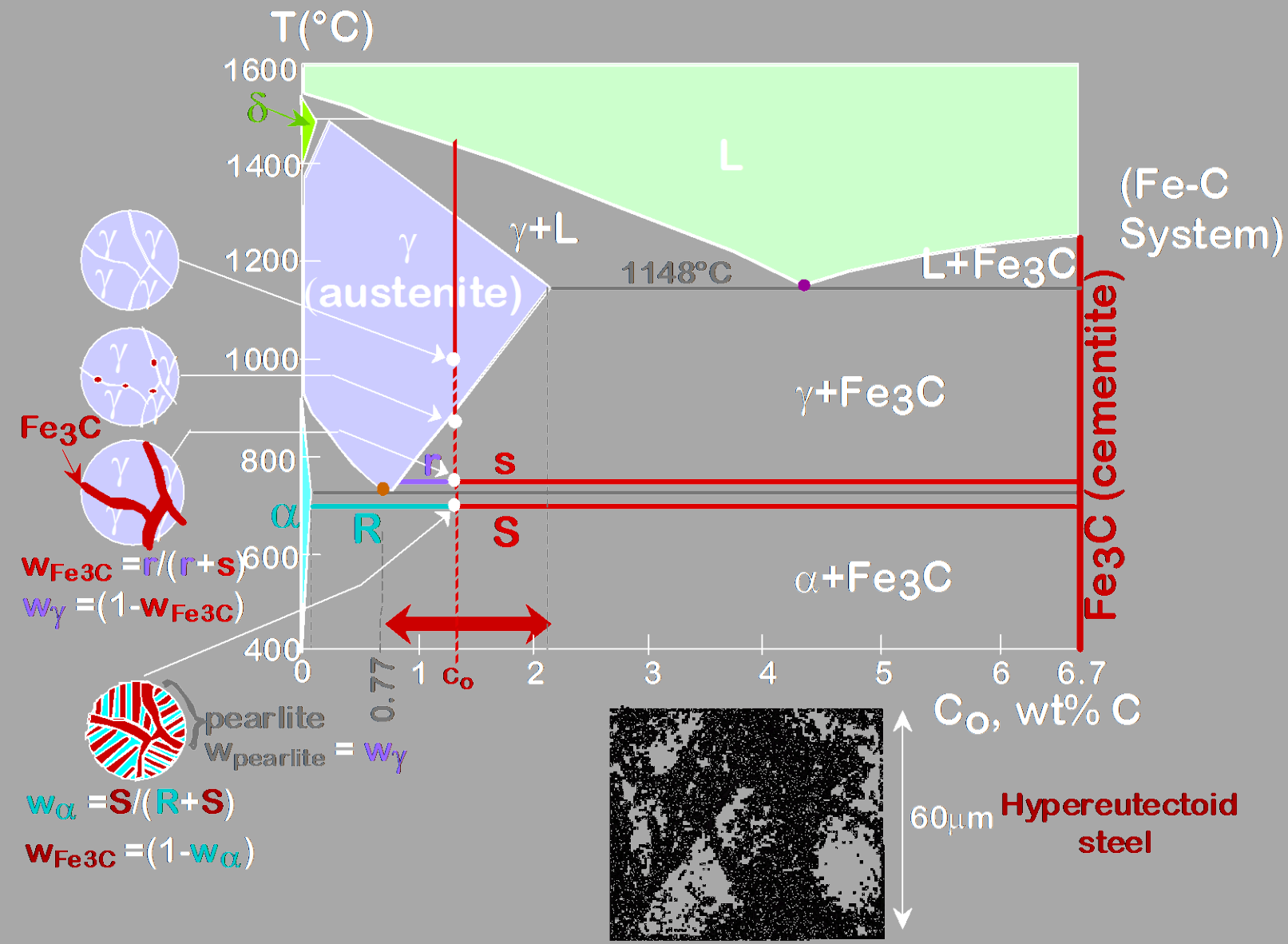
ریز ساختار فریت - پرلیتی

فاز α اولیه



پرلیت

فولادی با ترکیب هایپرئوتکتوئید (بیش از ۰.۷۷٪C)

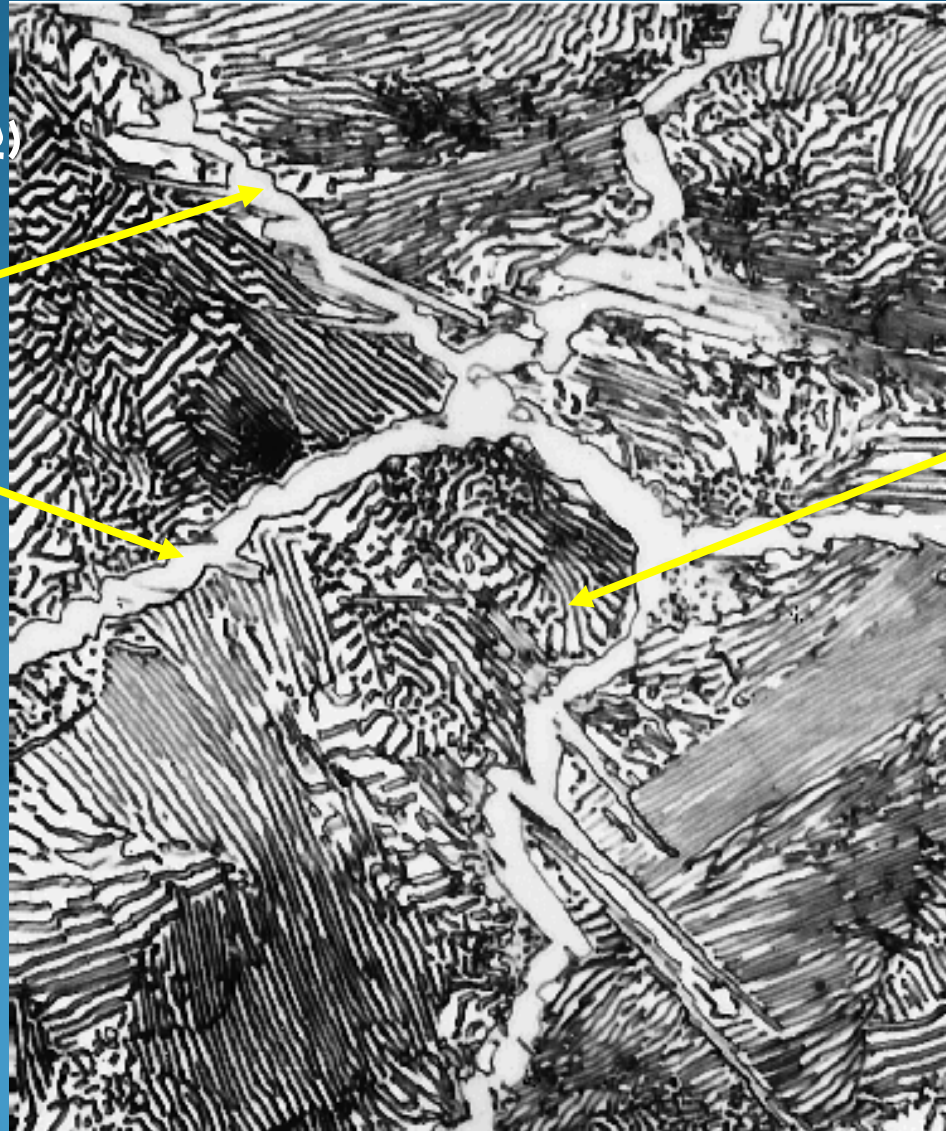


فولادی با ترکیب هایپریتکتوئید (بیش از ۰.۷۷٪C)

ریز ساختار سمنتیت- پرلیتی

فاز Fe_3C اولیه

پرلیت



فولادهای هیپریوتکتوئید و هیپریوتکتوئید

یوتکتوئید (0.77 wt% C) :

پرلیت (لایه های متناوب فریت و سمنتیت)

هیپریوتکتوئید (< 0.77 wt% C) :

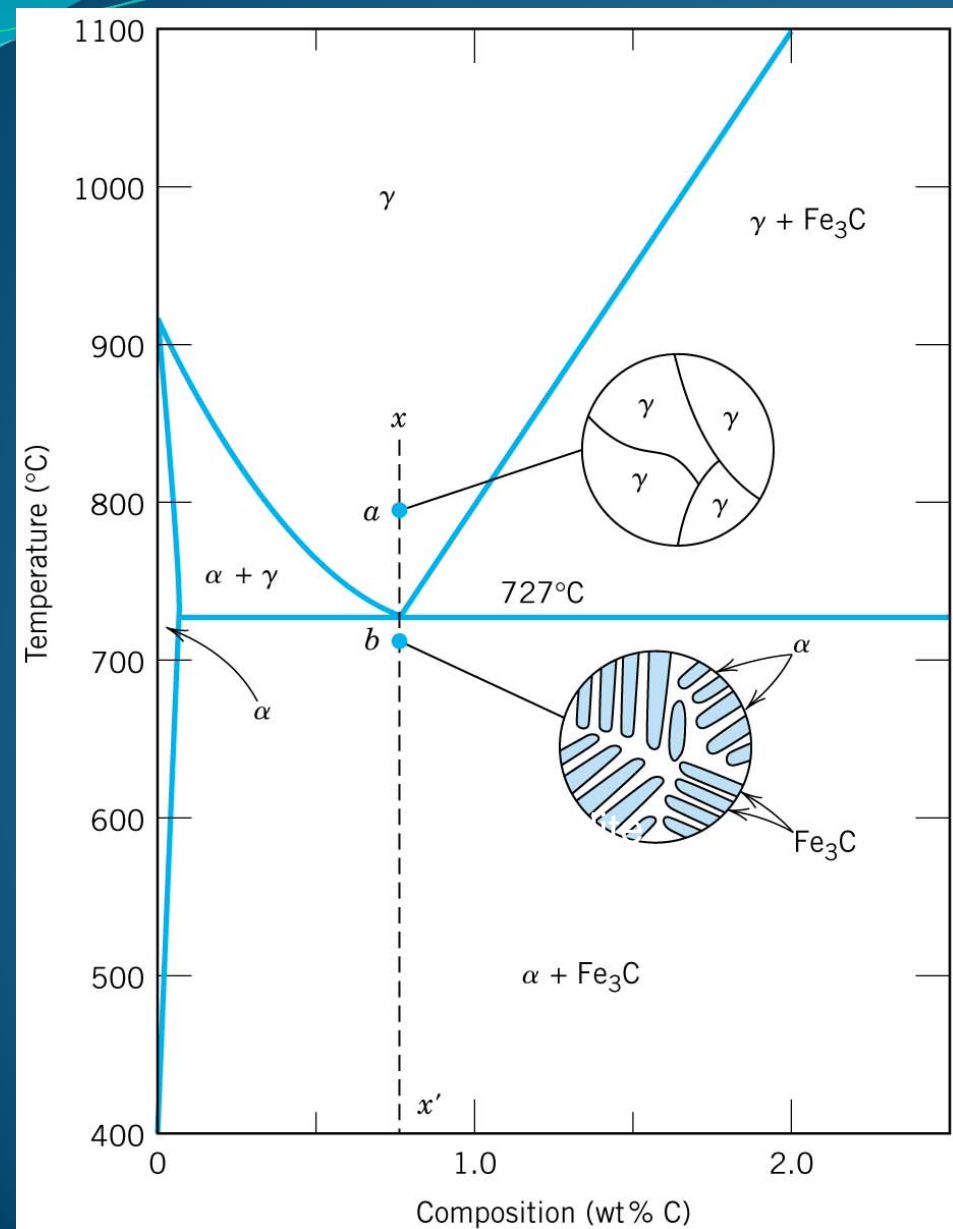
فریت - پرلیت

هیپریوتکتوئید (> 0.77 wt% C) :

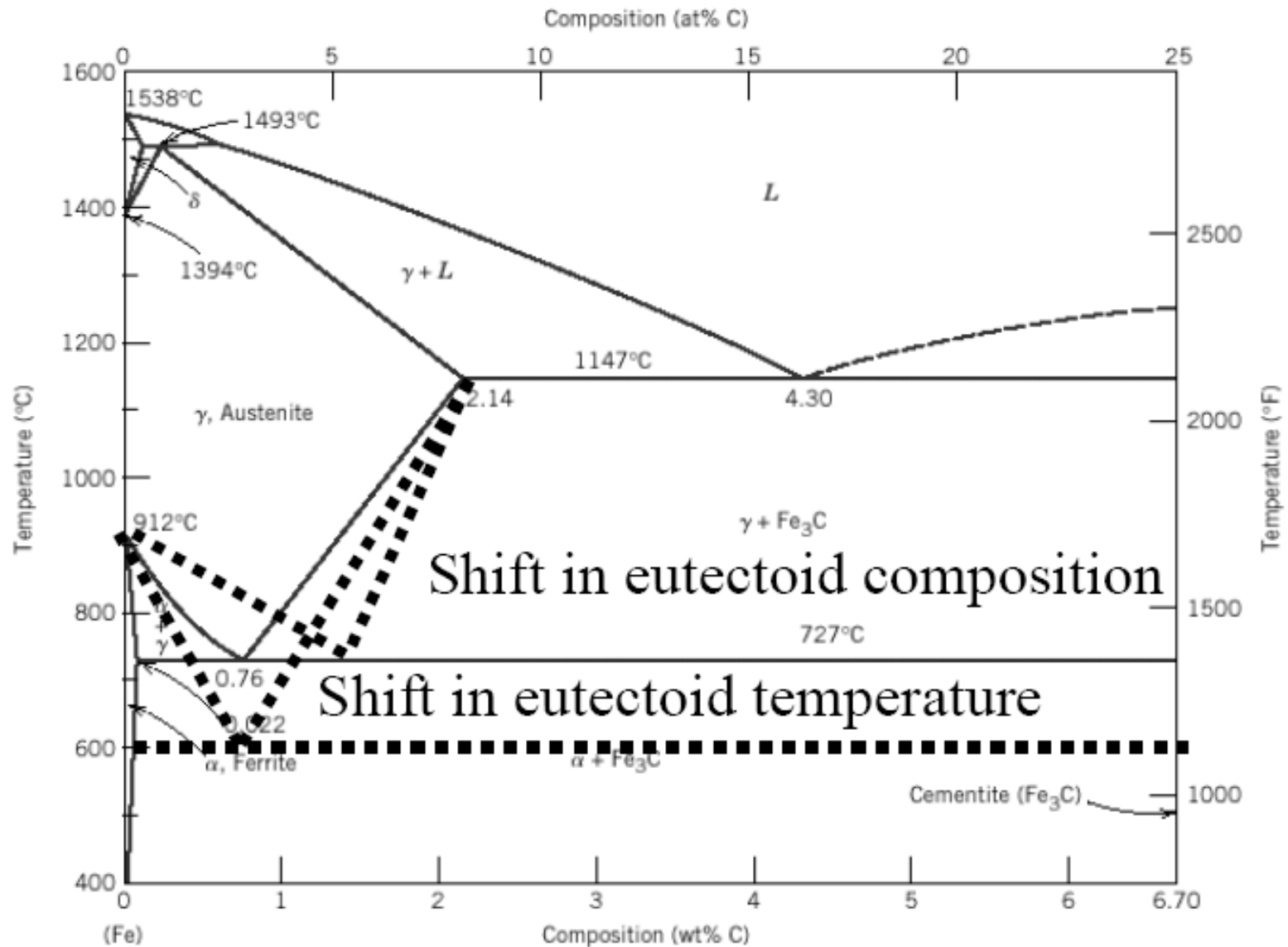
پرلیت - سمنتیت

فریت یک فاز نرم و سمنتیت یک فاز سخت است.

با افزایش مقدار کربن، سختی و استحکام فولاد افزایش می یابد.



تأثير عناصر آلياژی بر دياگرام آهن - کربن



اثرات سرعت (نرخ) سرد کردن

- در سرد شدن تعادلی، سرعت سرد شدن بسیار آهسته است به گونه ای در هر لحظه شرایط تعادلی حفظ می شود.
- در بیشتر کاربردهای عملی سرد شدن تعادلی بسیار آهسته و کند بوده و مورد نیاز نیست، و در واقع سرد شدن غیر تعادلی مطلوب بوده و نیاز عملیاتی را برآورده می سازد.

اثرات سرد شدن غیر تعادلی:

تغییر دمای انجام استحاله ها و تغییرات فازی
تشکیل و ایجاد فازهای غیر تعادلی در دمای محیط (مارتنزیت و بینیت)

استحاله های فازی غیر تعادلی در فولادها

مارتنزیت:

سخت و ترد

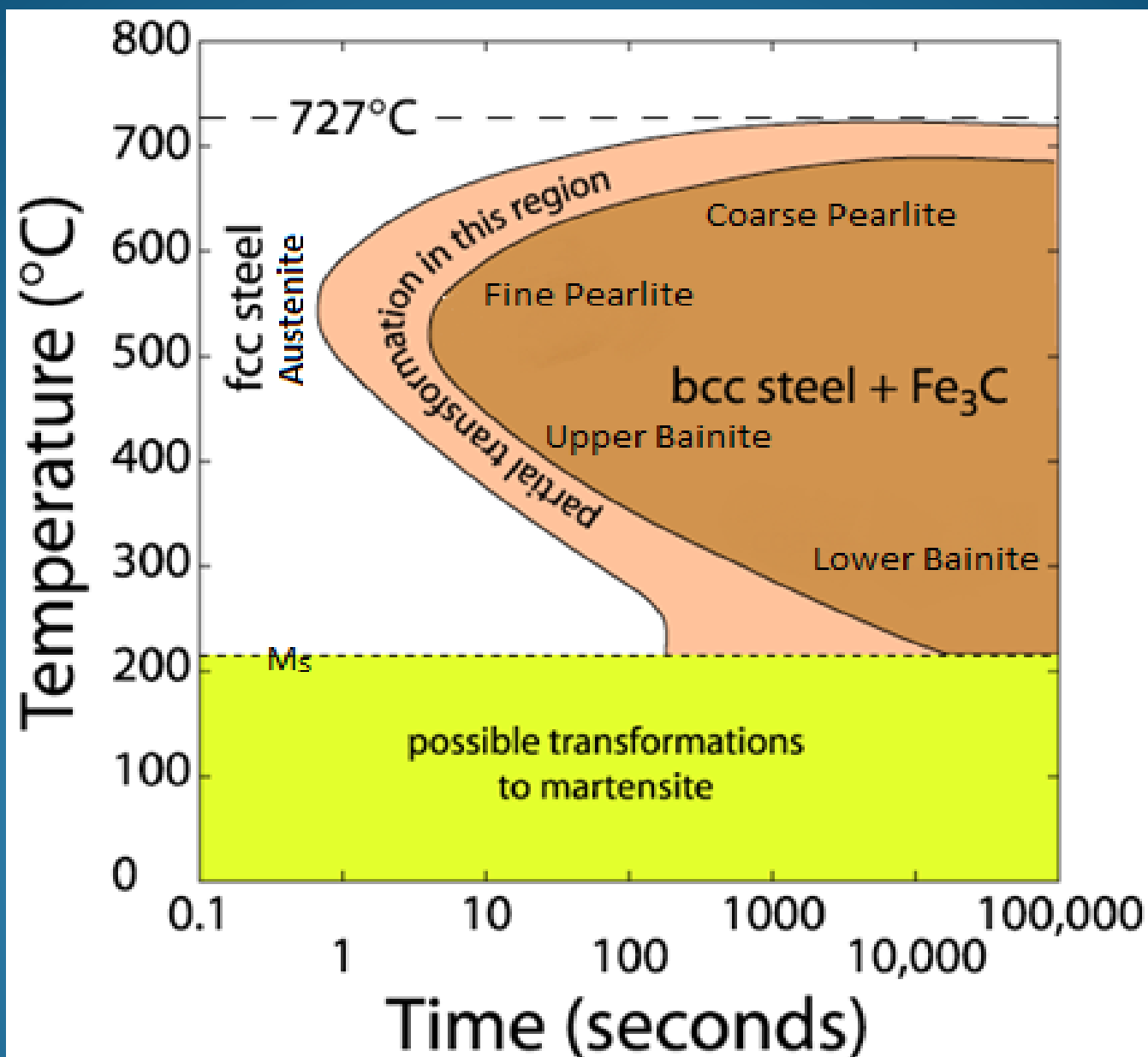
معمول سرد شدن سریع آستنیت
مملول جامد اشباع از اتم های کربن
سفتی و استحکام بالا
تافنس (چقرمگی) کم

بینیت (بینایت):

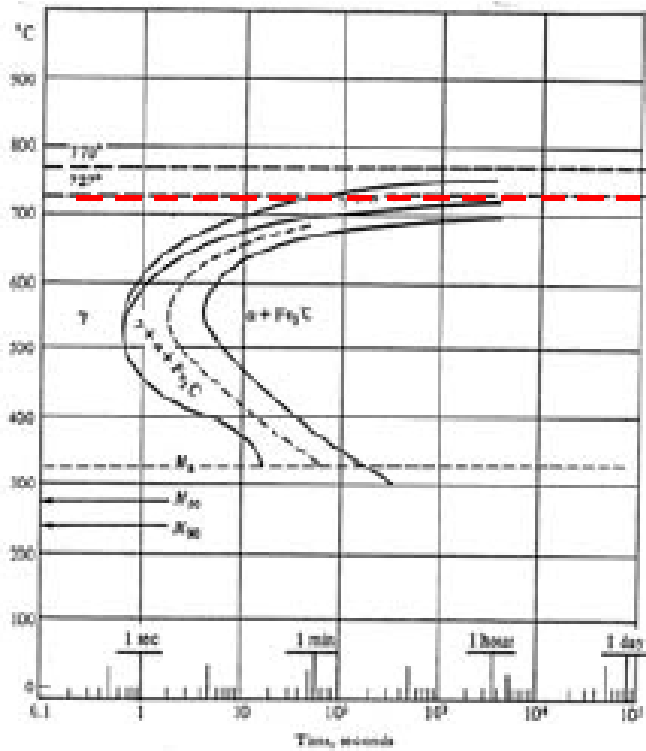
دارای مشخصاتی از پرلایت و مارتنزیت
توزیع ذرات ریز سمانتیت در زمینه فریت
استحکام و تافنس خوب

Temperature-Time-Transformation

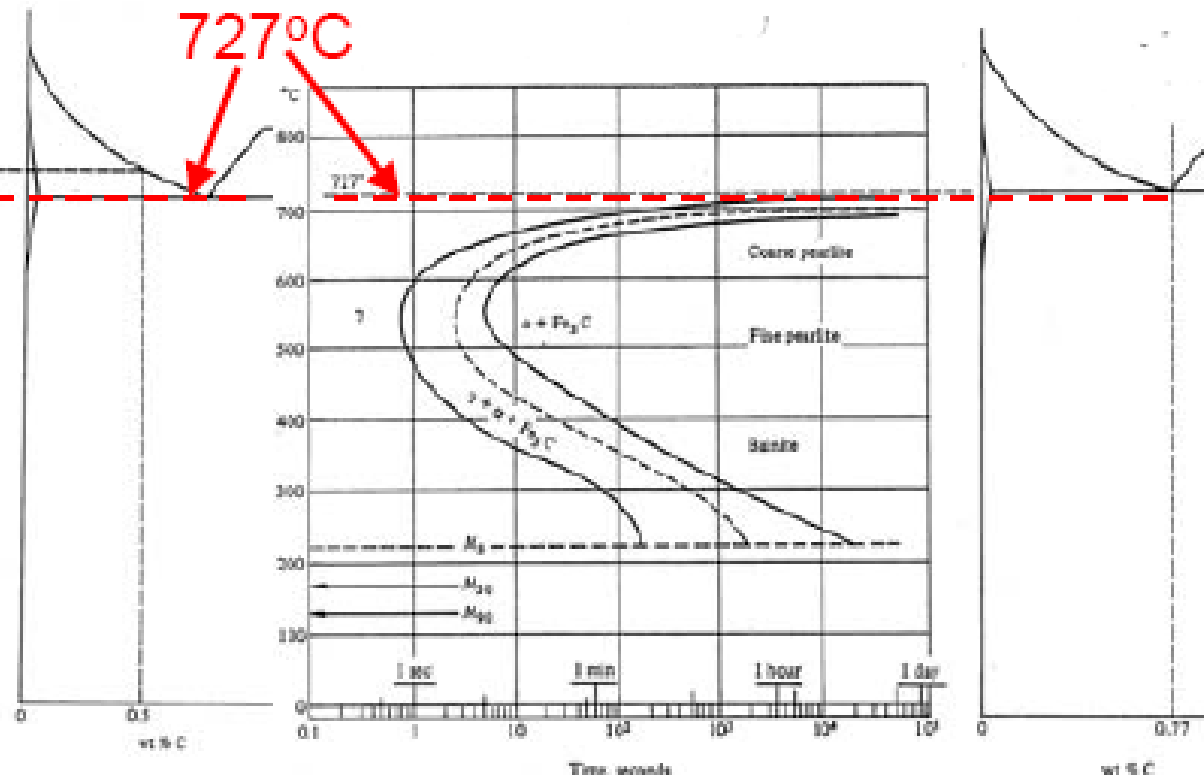
دیاگرام‌های دما-زمان-استحاله



دیگرام‌های دما- زمان - استحاله: فولادهای هیپویوتکتوئید

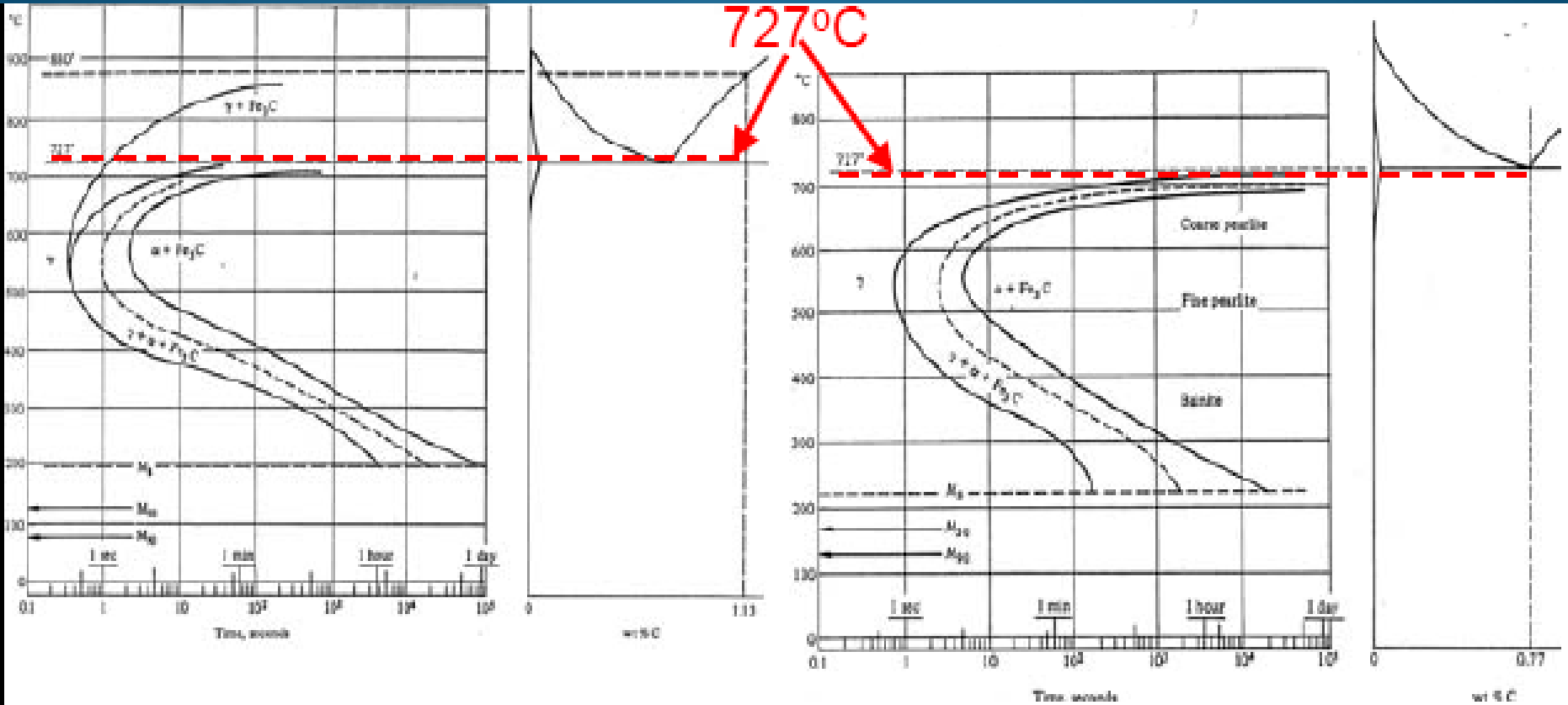


Hypoeutectoid



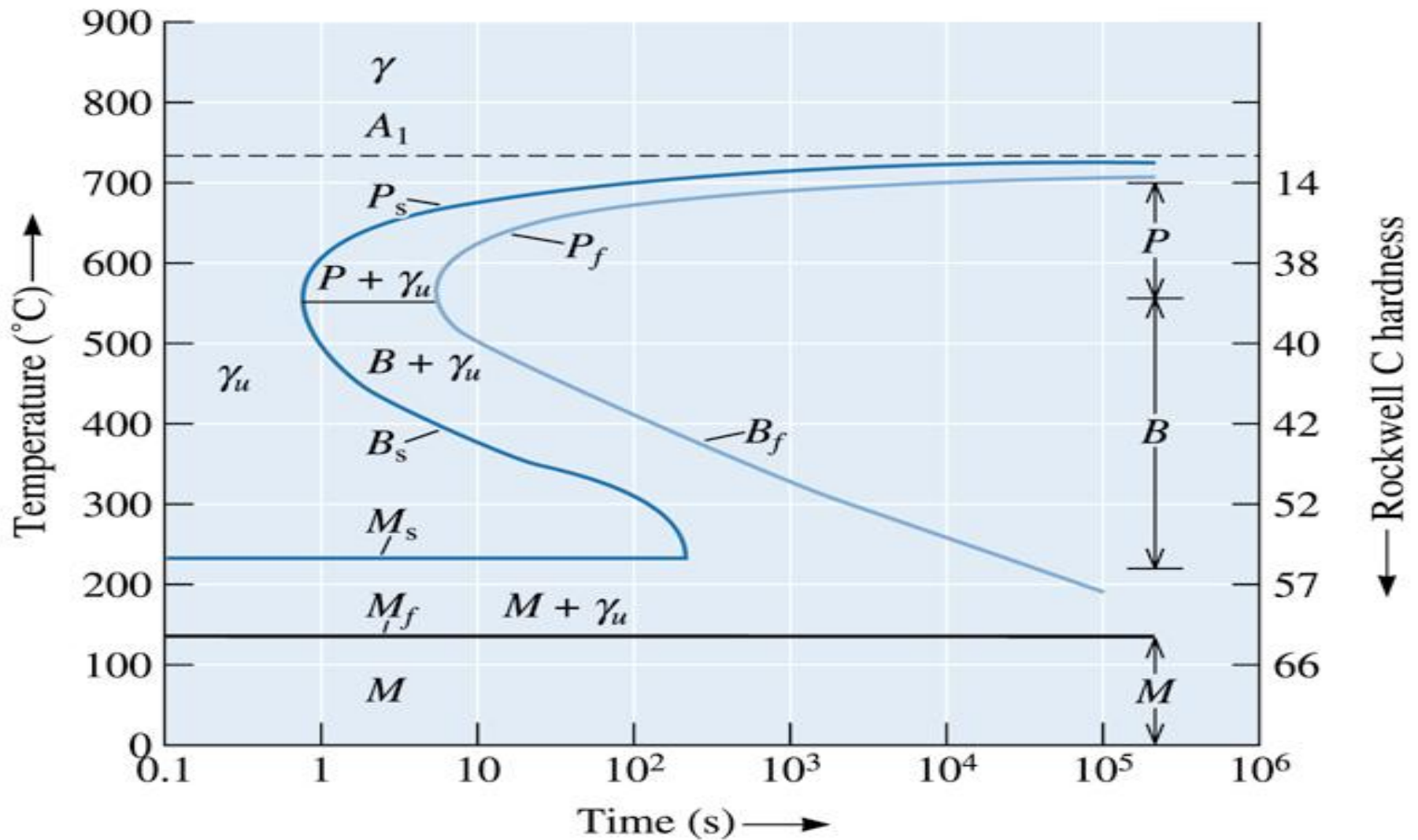
Eutectoid

دیagramهای دما- زمان - استحاله: فولادهای هیپریوتکتوئید

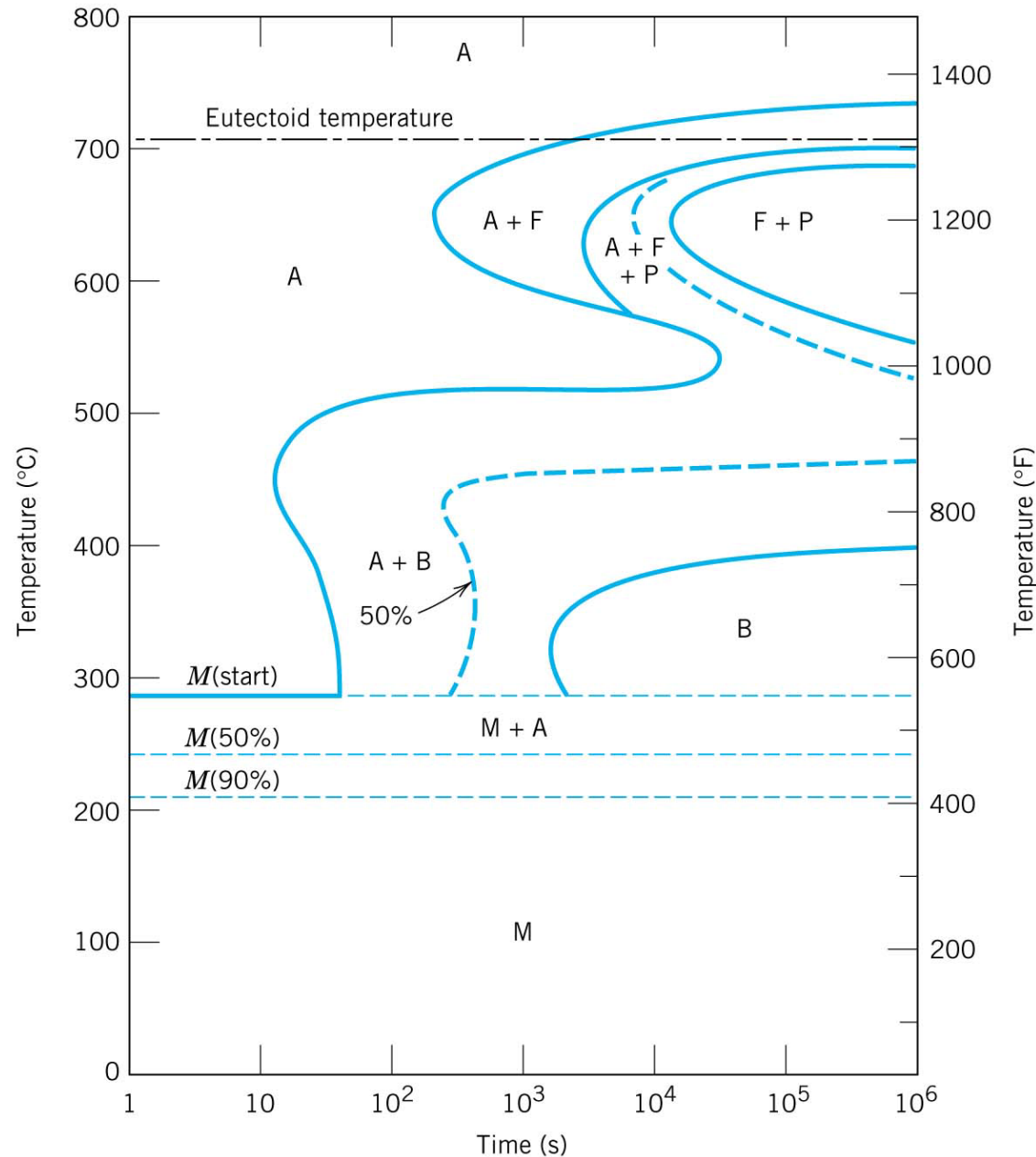


Hypereutectoid

Eutectoid



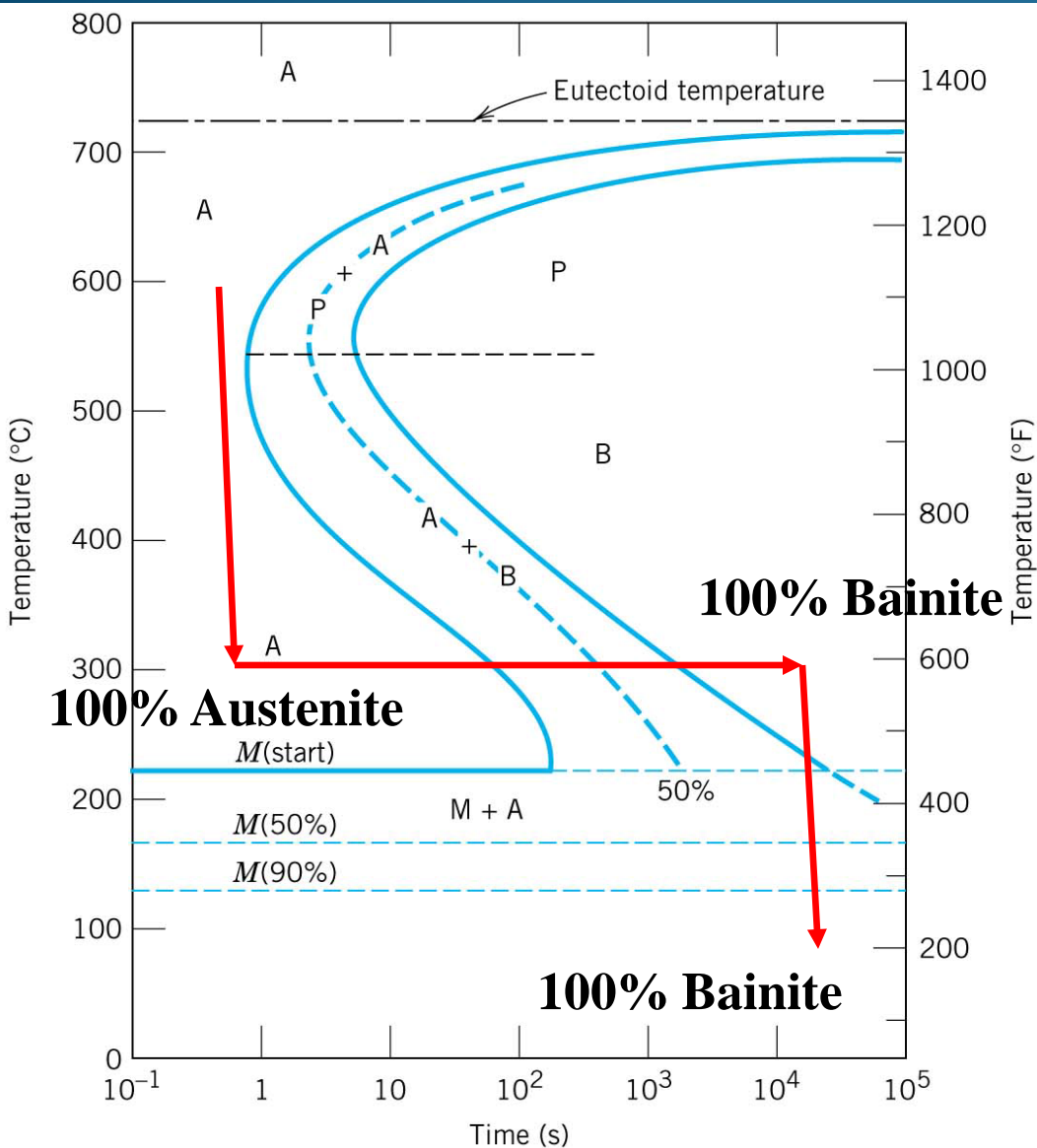
دیاگرام TTT در فولادهای آلیاژی



تشکیل ریز ساختار در فولادها

مثال ۱

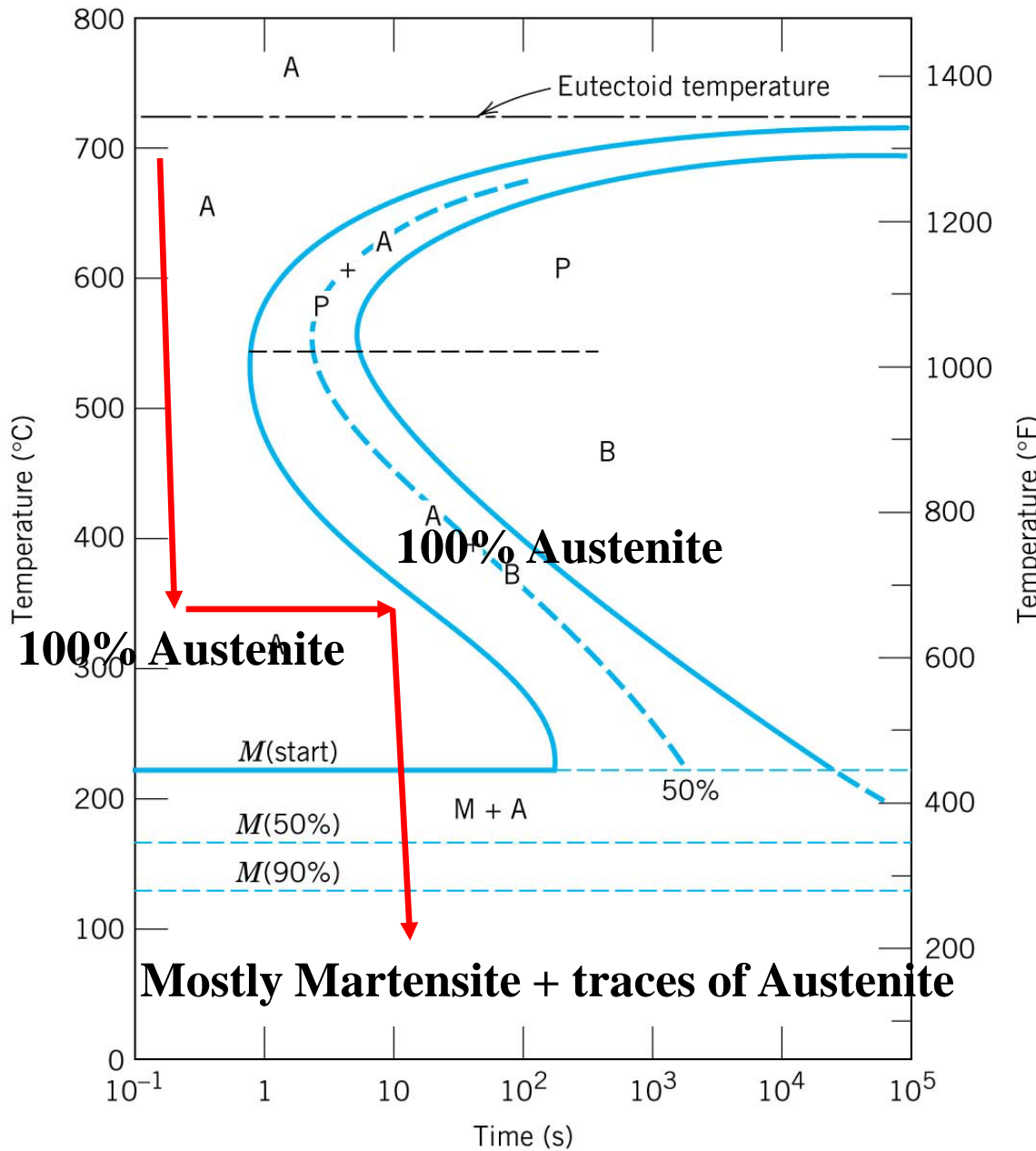
Rapidly cool to 350 C
Hold for 10000 seconds
Rapidly cool to room T



تشکیل ریز ساختار در فولادها

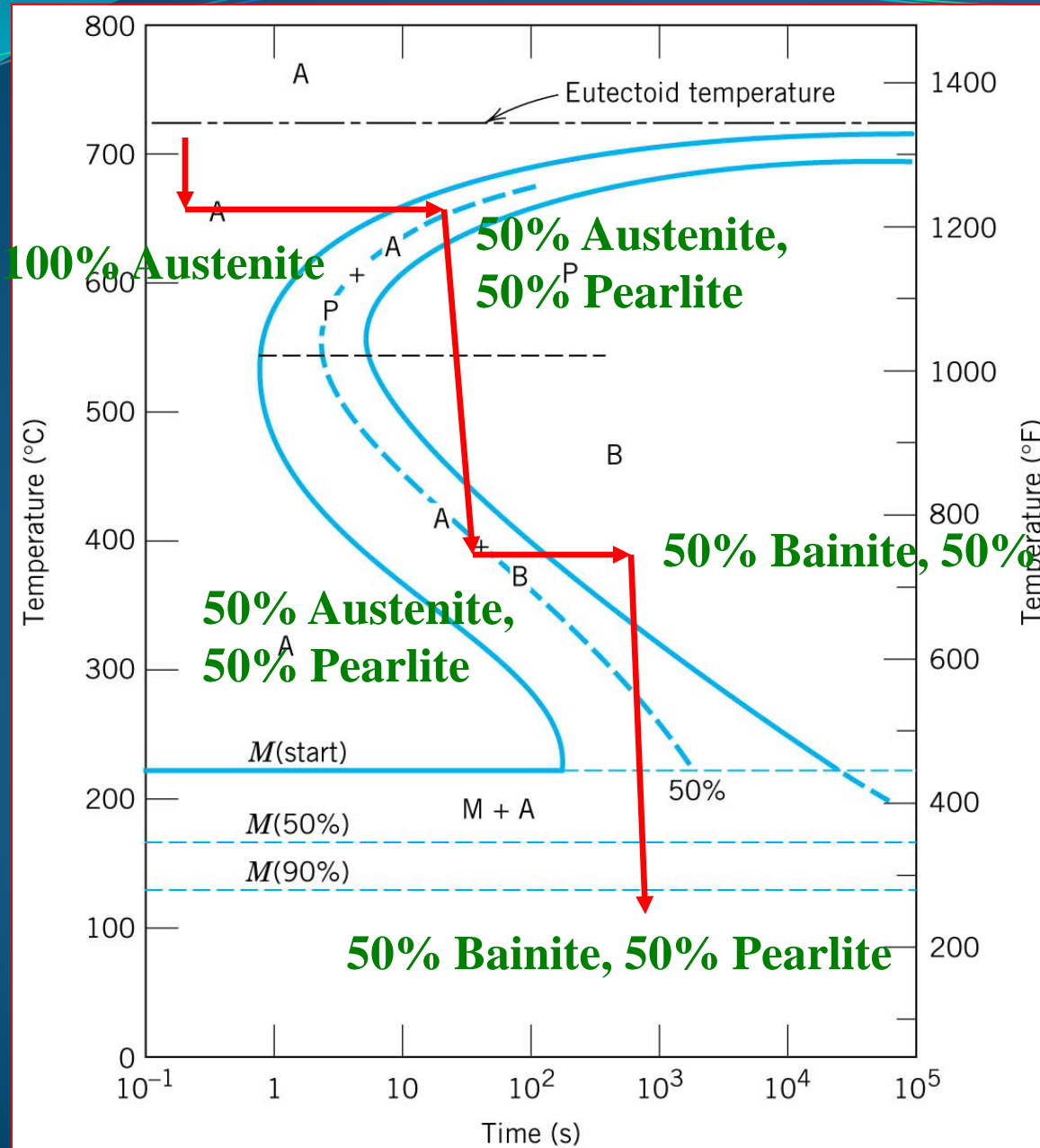
مثال ۲

Rapidly cool to 250 C
Hold for 100 seconds
Rapidly cool to room T



تشکیل ریز ساختار در فولادها

مثال ۳



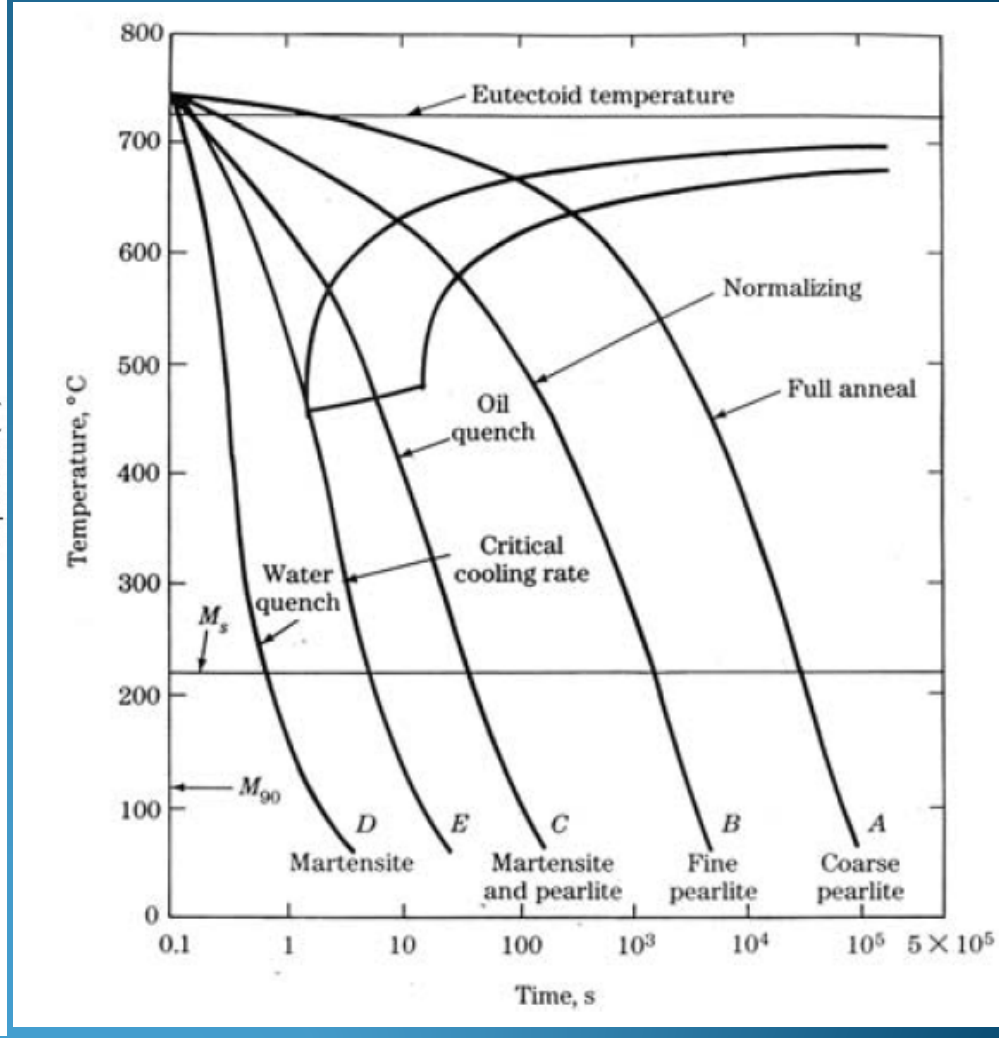
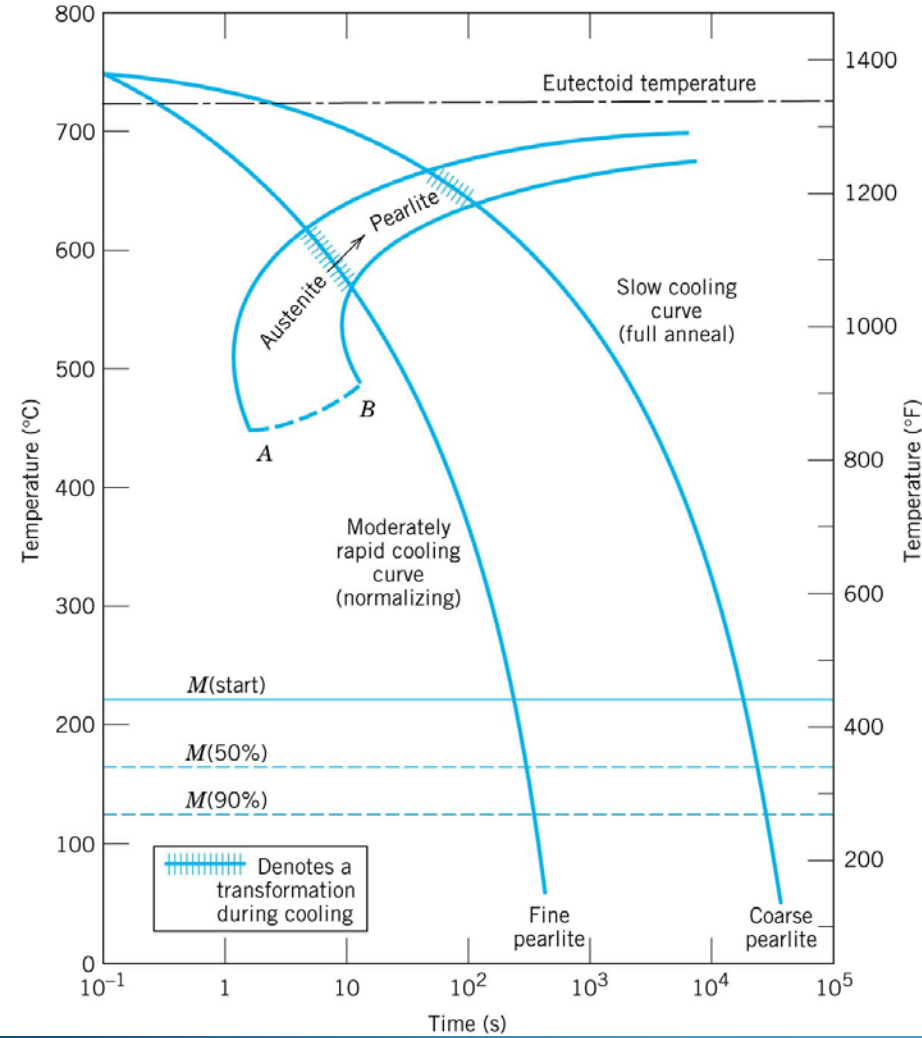
Rapidly cool to 650 C
Hold for 20 seconds
Rapidly cool to 400 C
Hold for 1000 seconds
Rapidly cool to room T

50% Bainite, 50% Pearlite

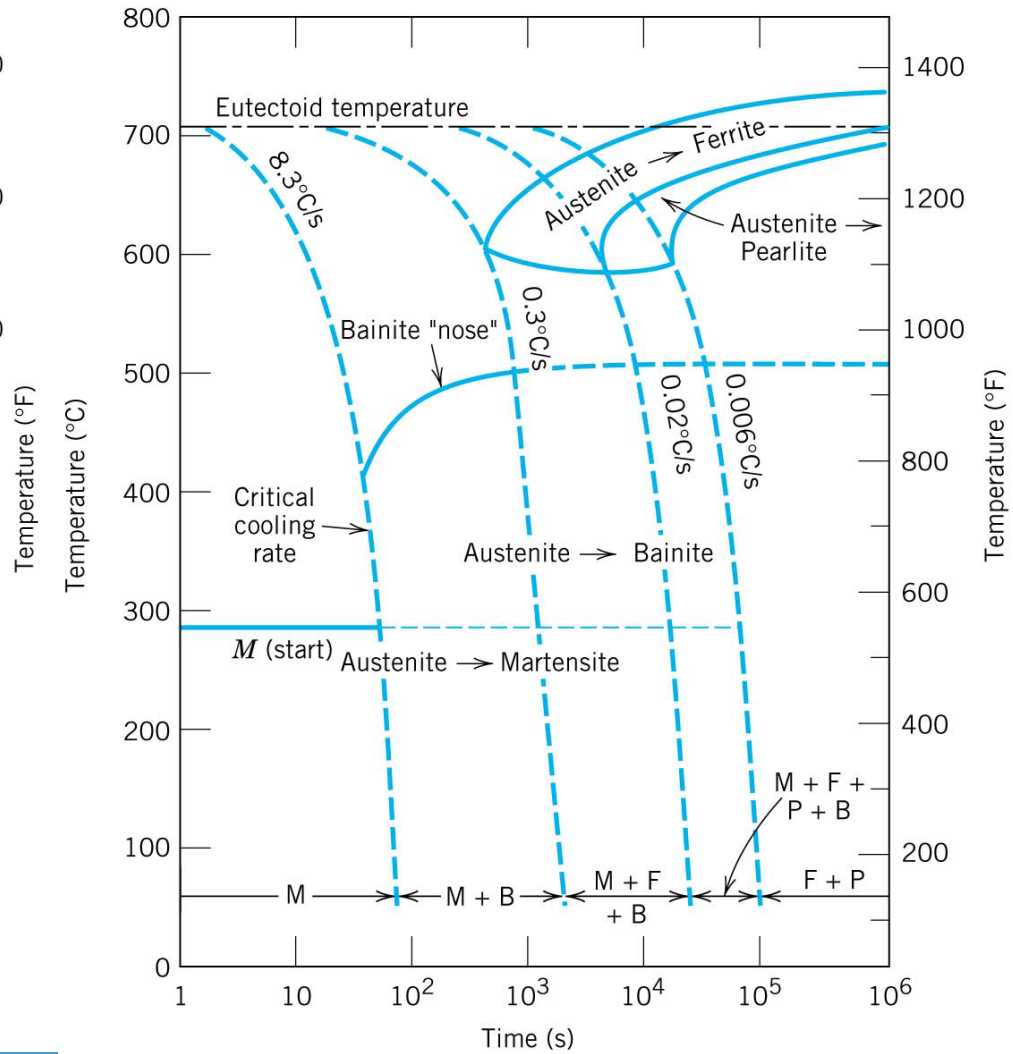
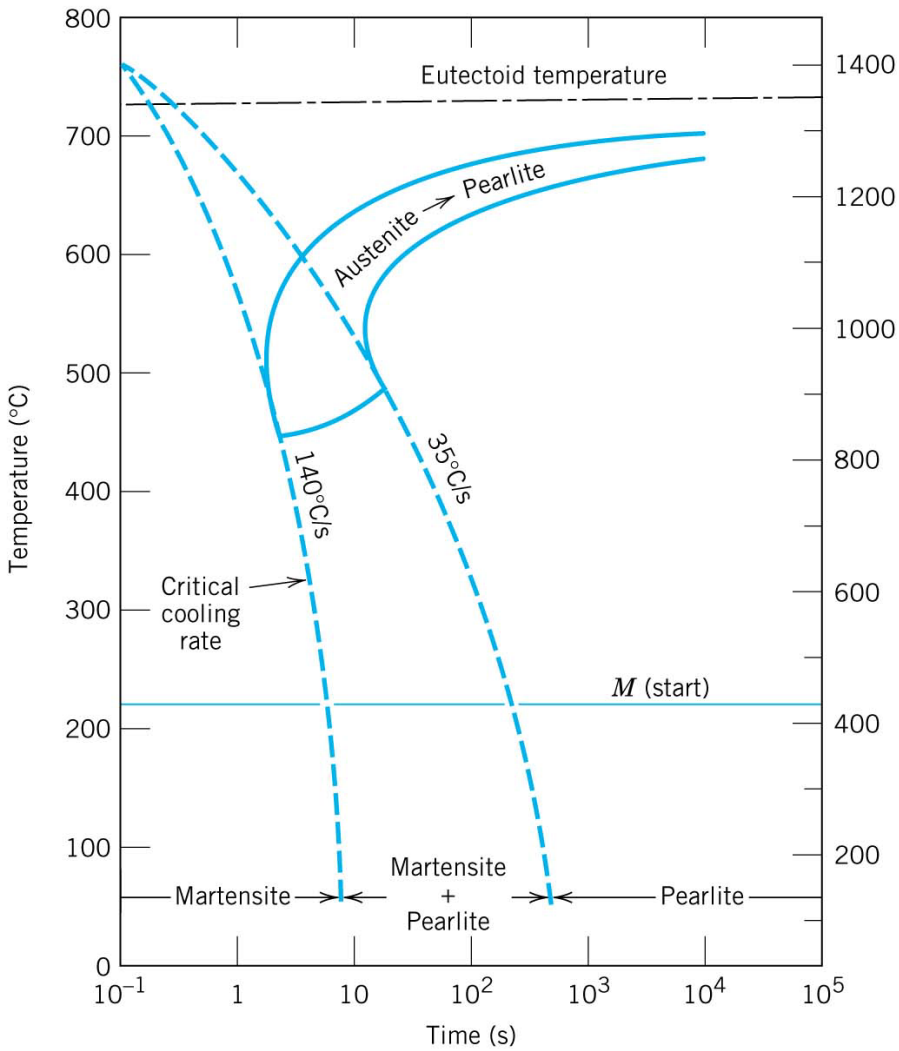
50% Austenite,
50% Pearlite

50% Bainite, 50% Pearlite

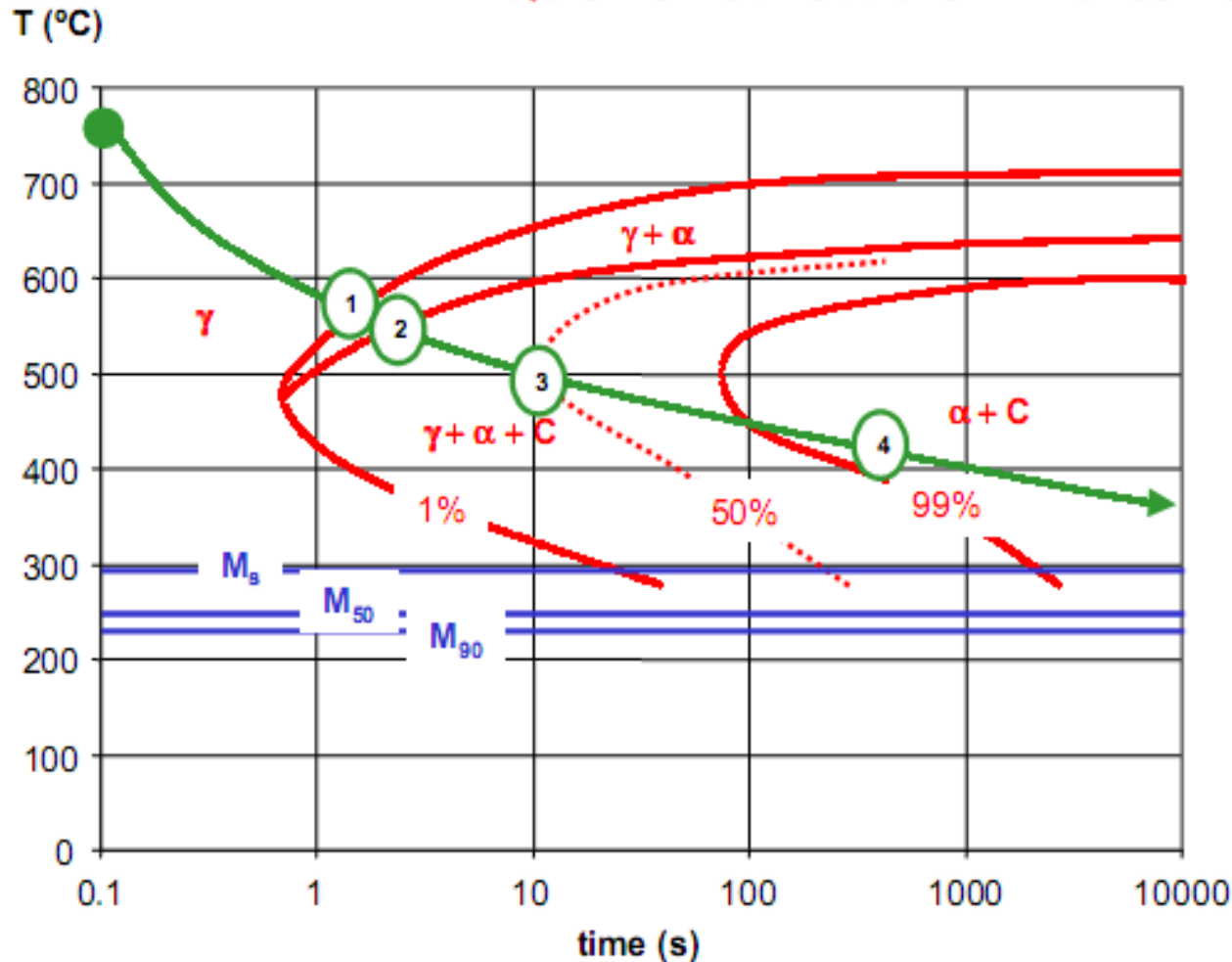
دیگرام های سرد شدن پیوسته



دیاگرام های سرد شدن پیوسته



Quenched steels - Martensite



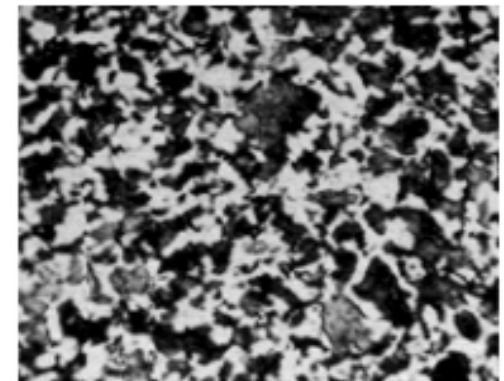
Slow cooling:

1: α nucleates at γ grain boundaries and grows into γ grains.

2: Cementite starts to form: α and C grow together into γ grains as "pearlite".

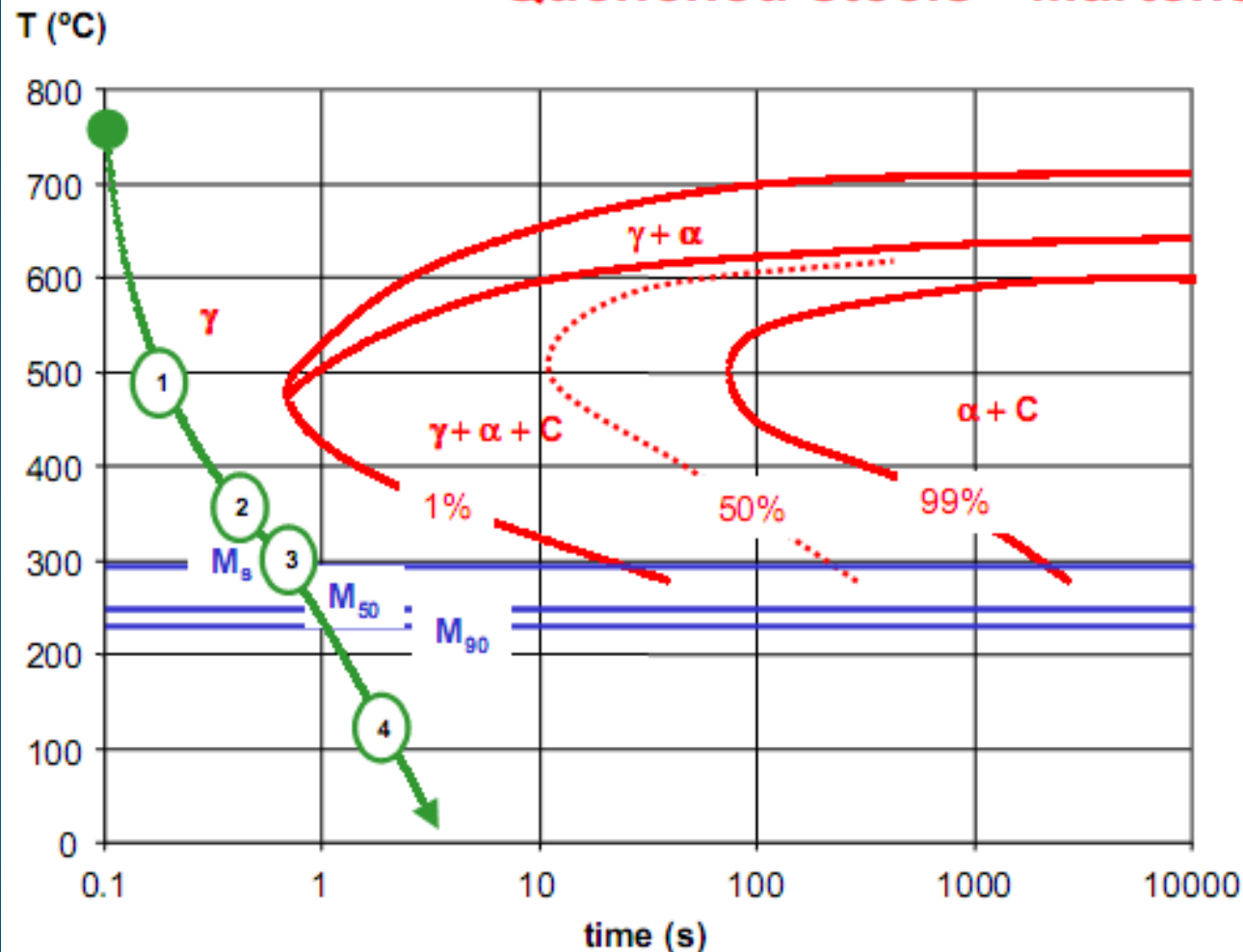
3: 50% of the γ has been transformed

4: Decomposition of the γ into α and pearlite is complete.



Time - Temperature - Transformation diagram for "2340" steel:
0.37% C, 0.7% Mn, 3.4% Ni.

Quenched steels - Martensite



Rapid cooling ("quenching"):

1: γ is supercooled past the diffusion-controlled transformation "nose". Too fast for α to nucleate.

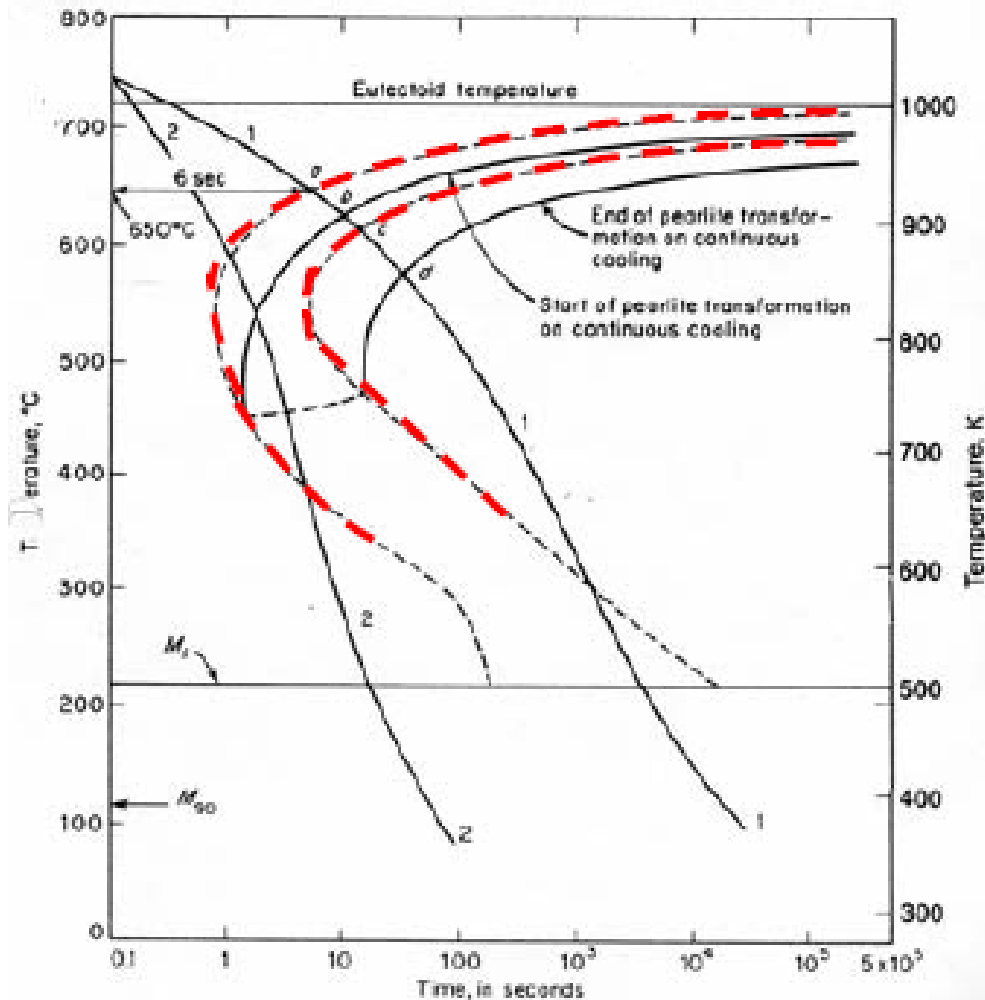
2: γ now well below normal transformation T, but diffusion is very slow; carbon is "stuck" in supersaturated solution.

3: At M_s temperature, $\gamma \Rightarrow \alpha$ free energy change big enough to force rapid diffusionless transformation to near- α structure but with trapped carbon atoms – "martensite"

4: $\gamma \Rightarrow$ martensite transformation is complete.

Time – Temperature – Transformation diagram for "2340" steel:
0.37% C, 0.7% Mn, 3.4% Ni.

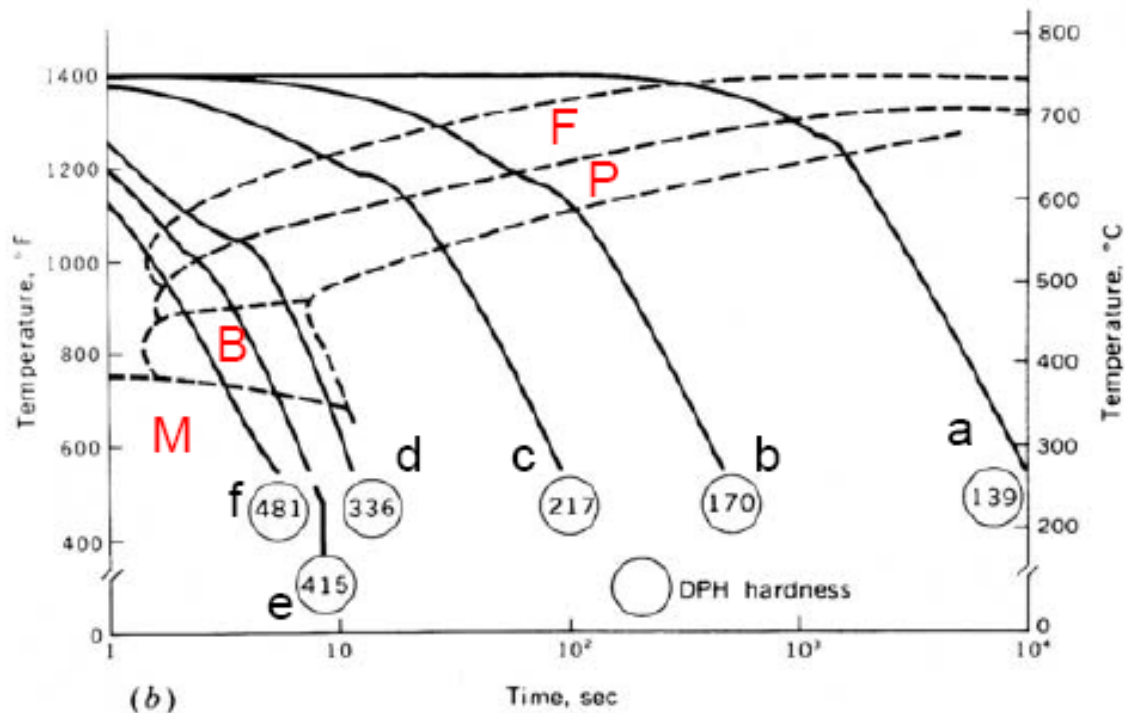
دیاگرام های سرد شدن پیوسته



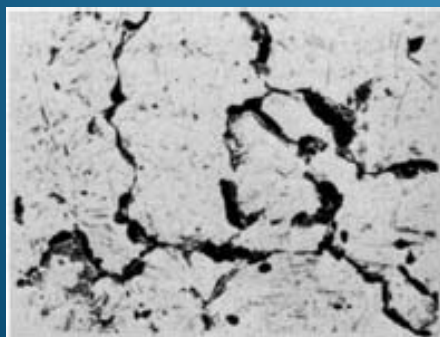
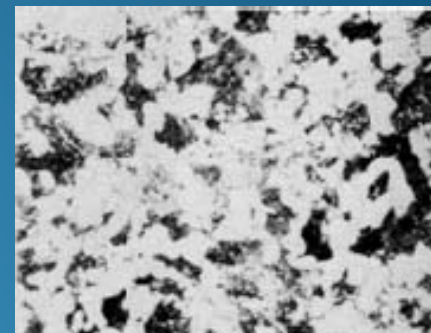
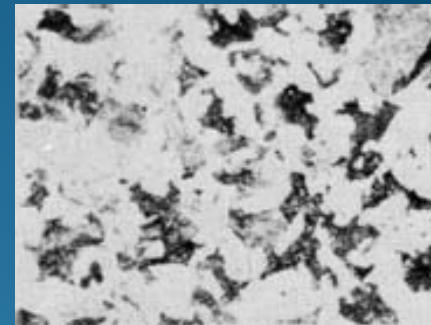
دیاگرام سرد شدن پیوسته نسبت به
دیاگرام ایزوترمال سمت **راست** و
پایین تر قرار می گیرد

بدین معنی که انجام استحاله کامل به
زمان بیشتر و دمای کمتر (**تحت**
تبرید بیشتری) نیاز دارد

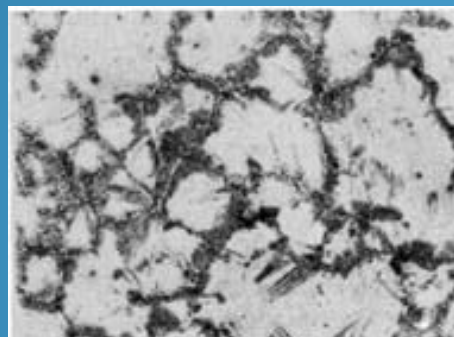
دیاگرام های سرد شدن پیوسته



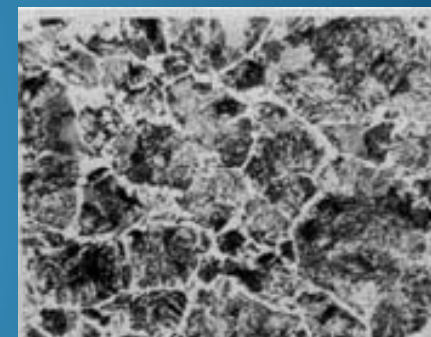
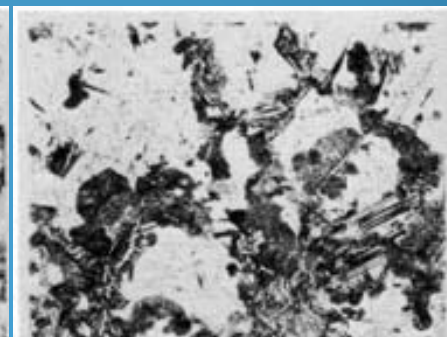
F+P



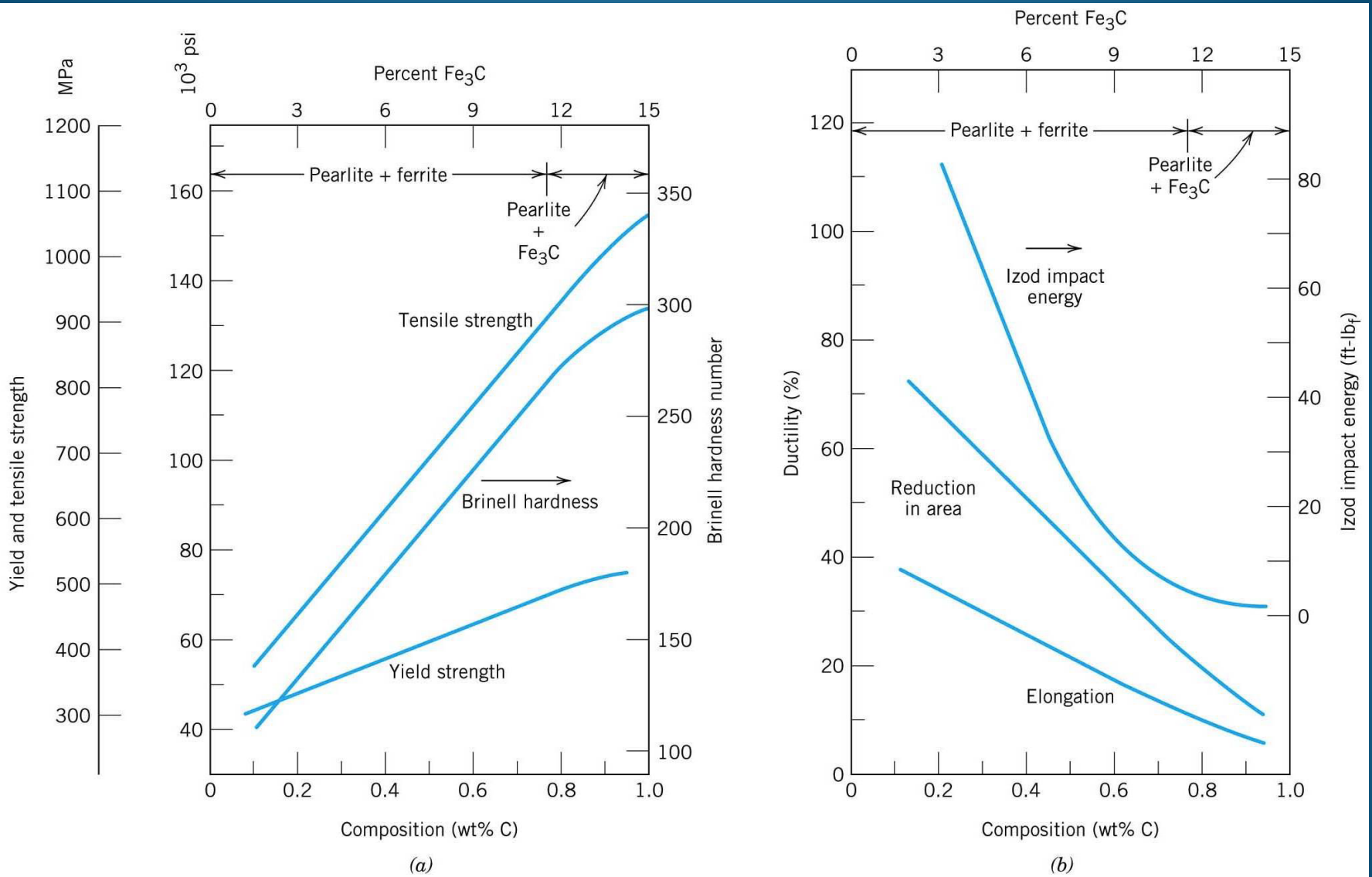
P+B+M



F+P+B+



ارتباط ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی



ارتباط ریز ساختار و خواص مکانیکی

	Martensite	مارتنزیت	■
	Tempered martensite	مارتنزیت تمپر شده	■
	Bainite	بینیت	■
	Fine pearlite	پرلیت ظریف	■
	Coarse pearlite	پرلیت خشن	■
	Spheroidite	فریت-سمانتیت کروی	■

↑ Strength (استقامت)

↓ Ductility (داکتیلیتی)

به واسطه کنترل سرعت سرد شدن می توان به ساختار مطلوب و در نتیجه آن خواص مکانیکی مورد نظر دست یافت
(عملیات حرارتی)

Spheroidite

Austenite

Rapid Quench

Martensite

Re-heat

Slow Cooling

Moderate cooling (AS)
Isothermal treatment (PCS)

Re-heat

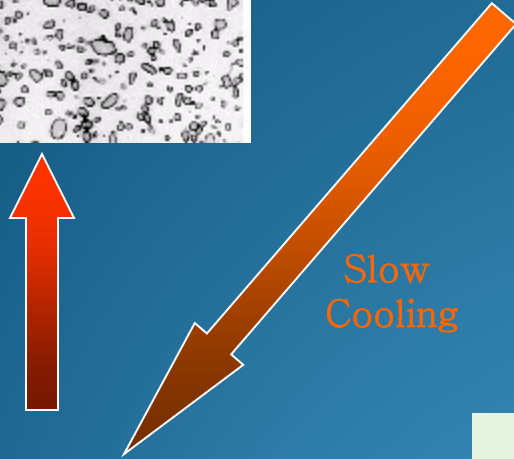
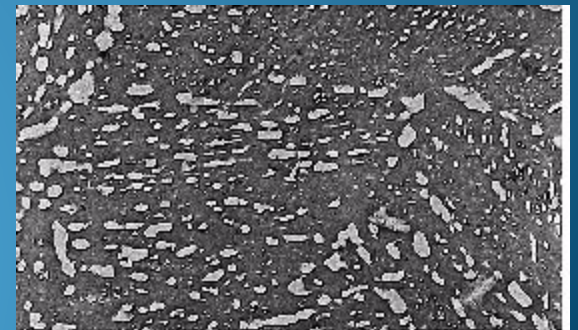
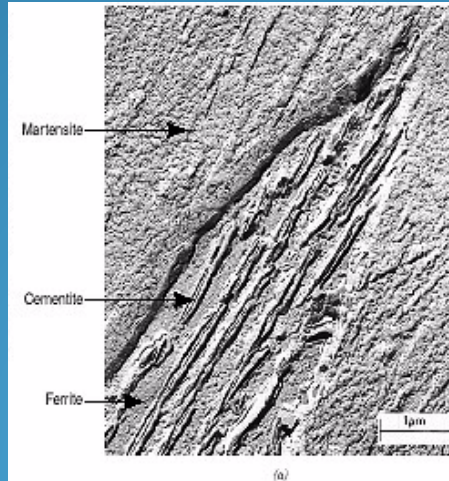
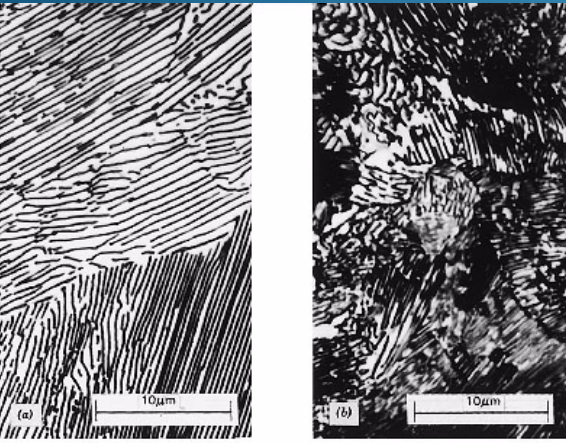
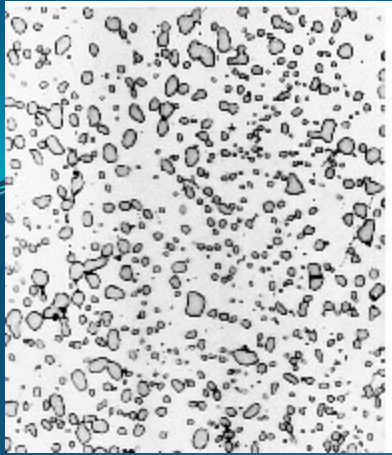
Tempered Martensite

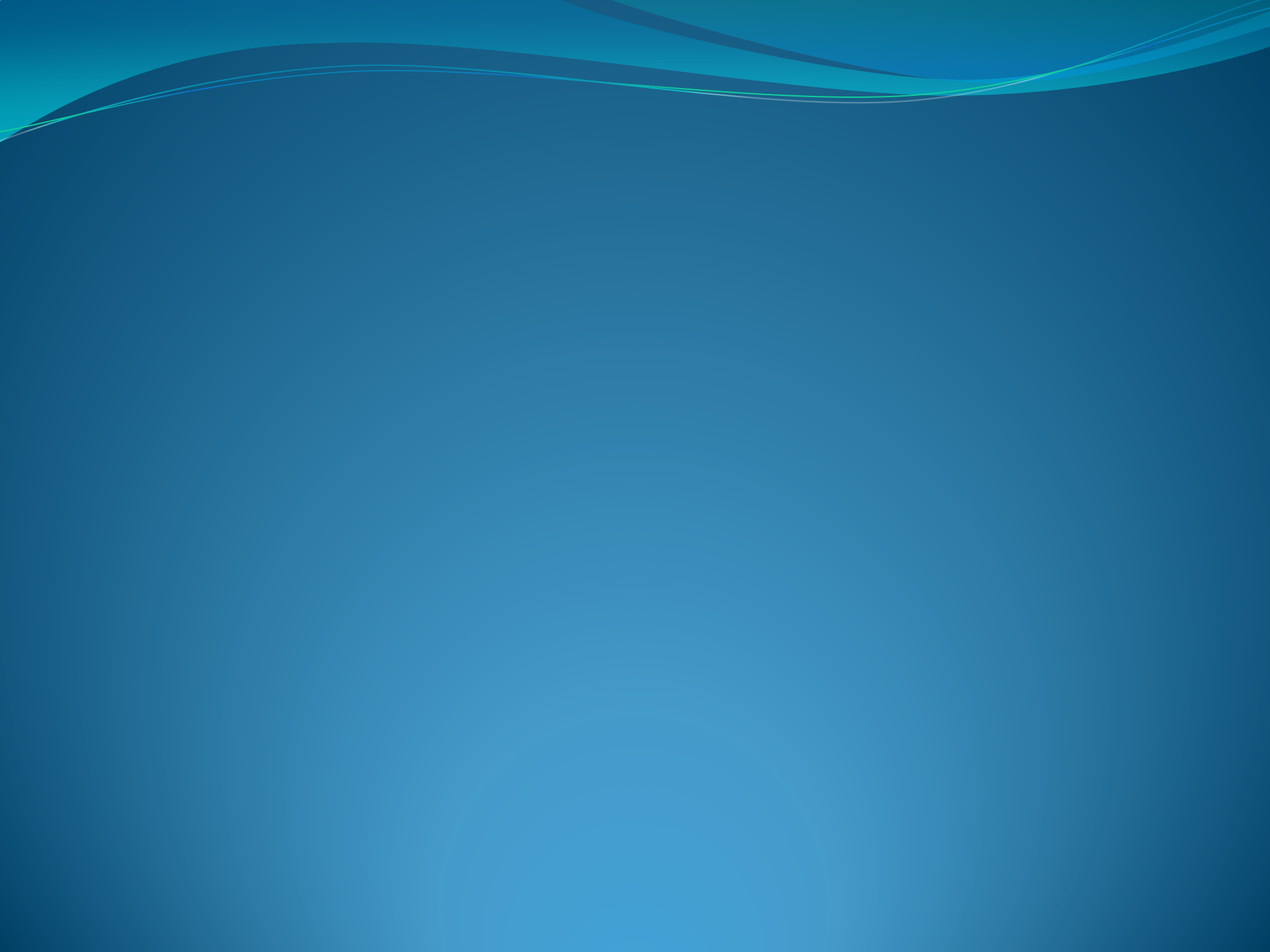
coarse

fine

Pearlite

Bainite







خواص مکانیکی فلزات



آزمون کشش:

تست (آزمون) کشش به احتمال اساسی ترین نوع تست مکانیکی است که می توان به روی مواد انجام داد. آزمون های کشش ، ساده ، به نسبت ارزان و به طور کامل استاندارد شده هستند. با اعمال کشش بر روی مواد ، به سرعت می توان دریافت که ماده چگونه در مقابل نیروها اعمالی رفتار میکند. اطلاعات حاصله از تست کشش عبارت است از:

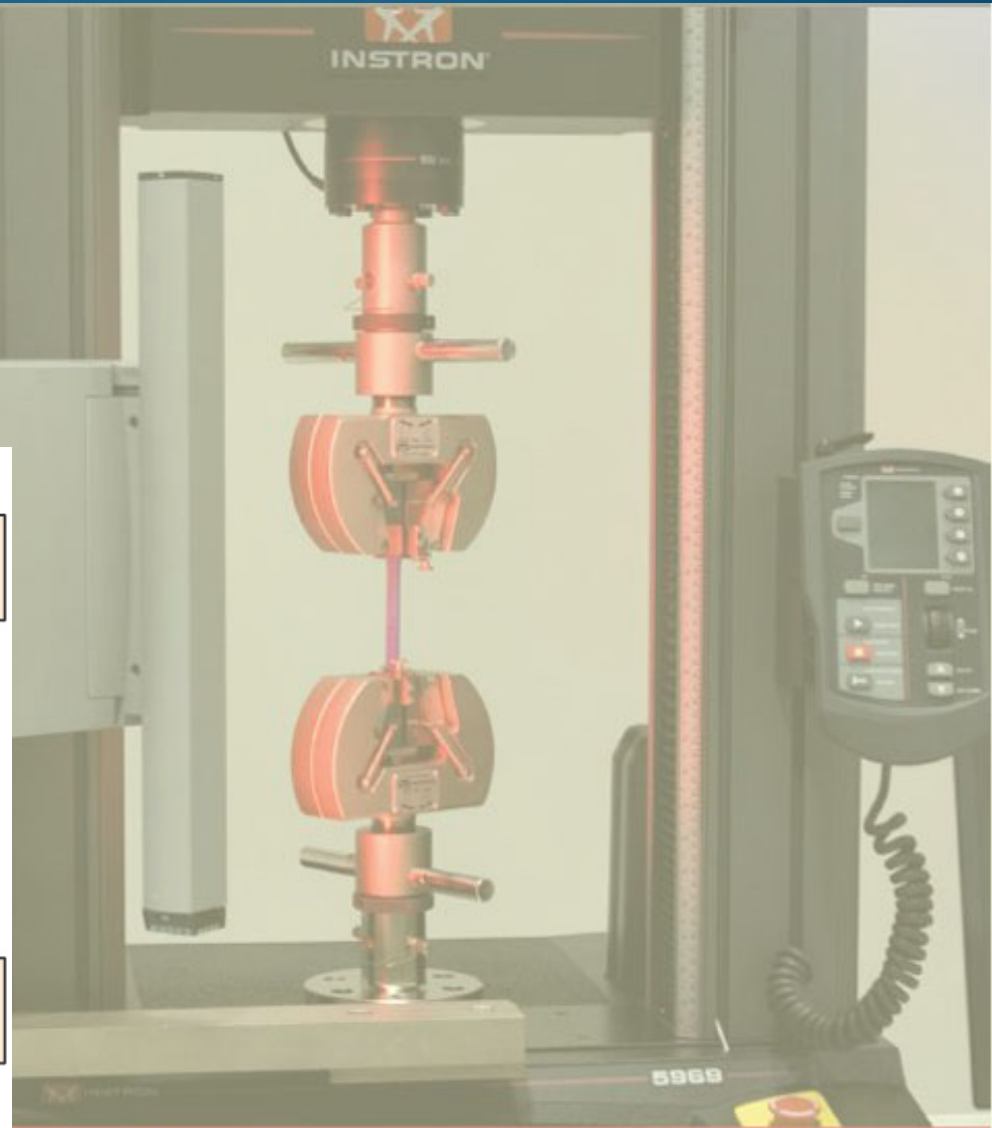
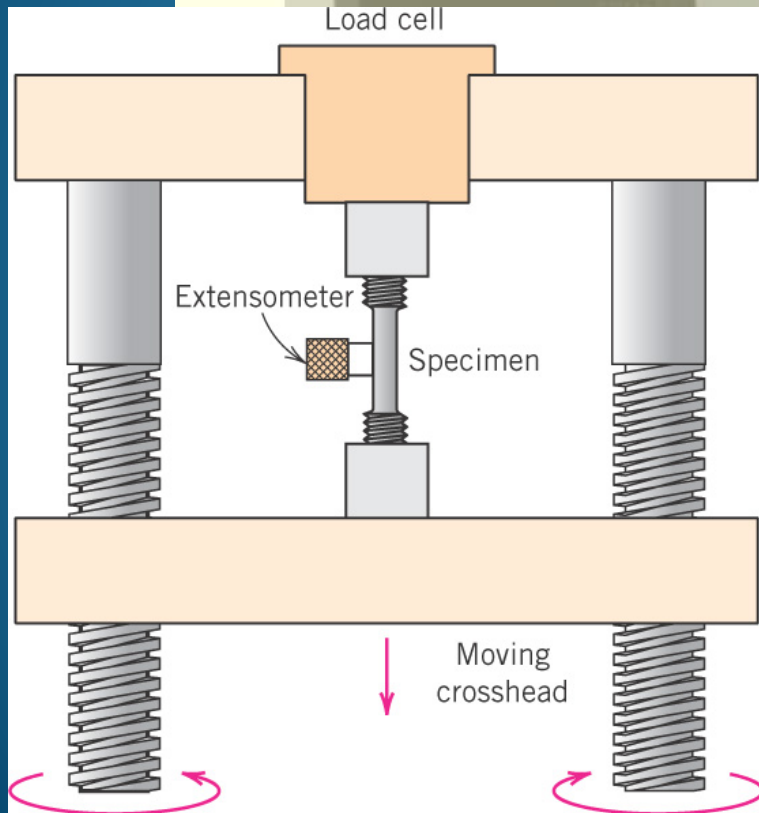
۱- استحکام تسلیم : استحکام تسلیم مقدار تنش در نقطه تسلیم است که با رسم مدول یانگ در درصد مشخصی از افسست محاسبه شده است . (افست معمول: 0.2%)

۲- استحکام کششی نهایی : بیشترین مقدار تنش در دیاگرام تنش - کرنش را استحکام کششی نهایی می گویند .

۳- مدول یانگ (مدول الاستیسیته) : این مدول شیب قسمت خطی نمودار تنش - کرنش است ، بطور معمول این مدول برای هر ماده مقدار مشخصی است ، یک عدد ثابت با مقدار شناخته شده .

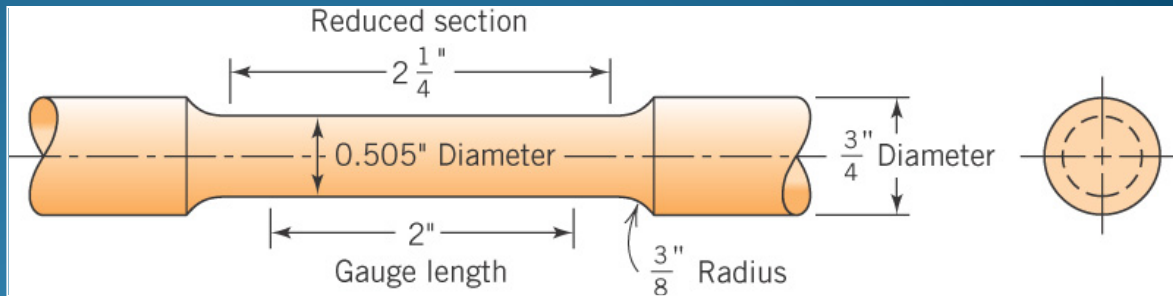
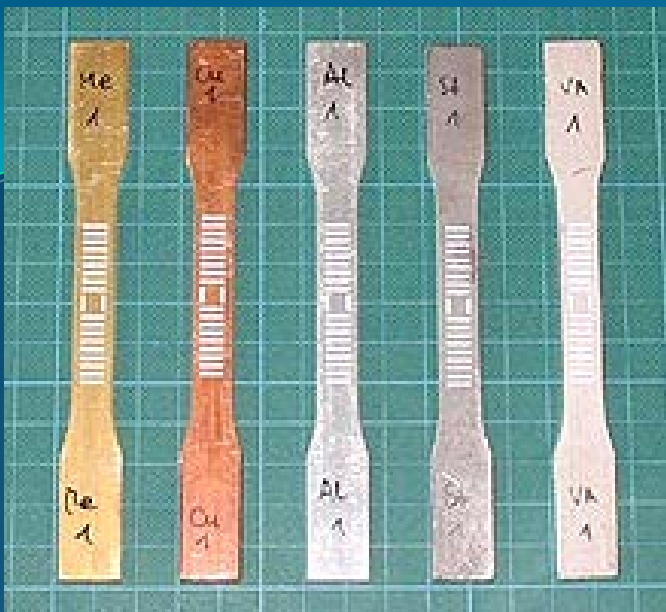
۴- درصد ازدیاد طول : تغییرات در طول سنجه تقسیم بر طول اصلی سنجه ضرب در ۱۰۰ را درصد ازدیاد طول می گویند .

آزمون کشش:



Tensile Testing

آزمون کشش:



آزمون کشش:

بار: نیروی اعمال شده به ماده در طول آزمون (F)

تنش مهندسی: نیرو یا بار اعمال شده تقسیم بر سطح مقطع اولیه ماده (F/A_0)

تنش حقیقی: نیرو یا بار اعمال شده تقسیم بر سطح مقطع ماده در هر لحظه (F/A)

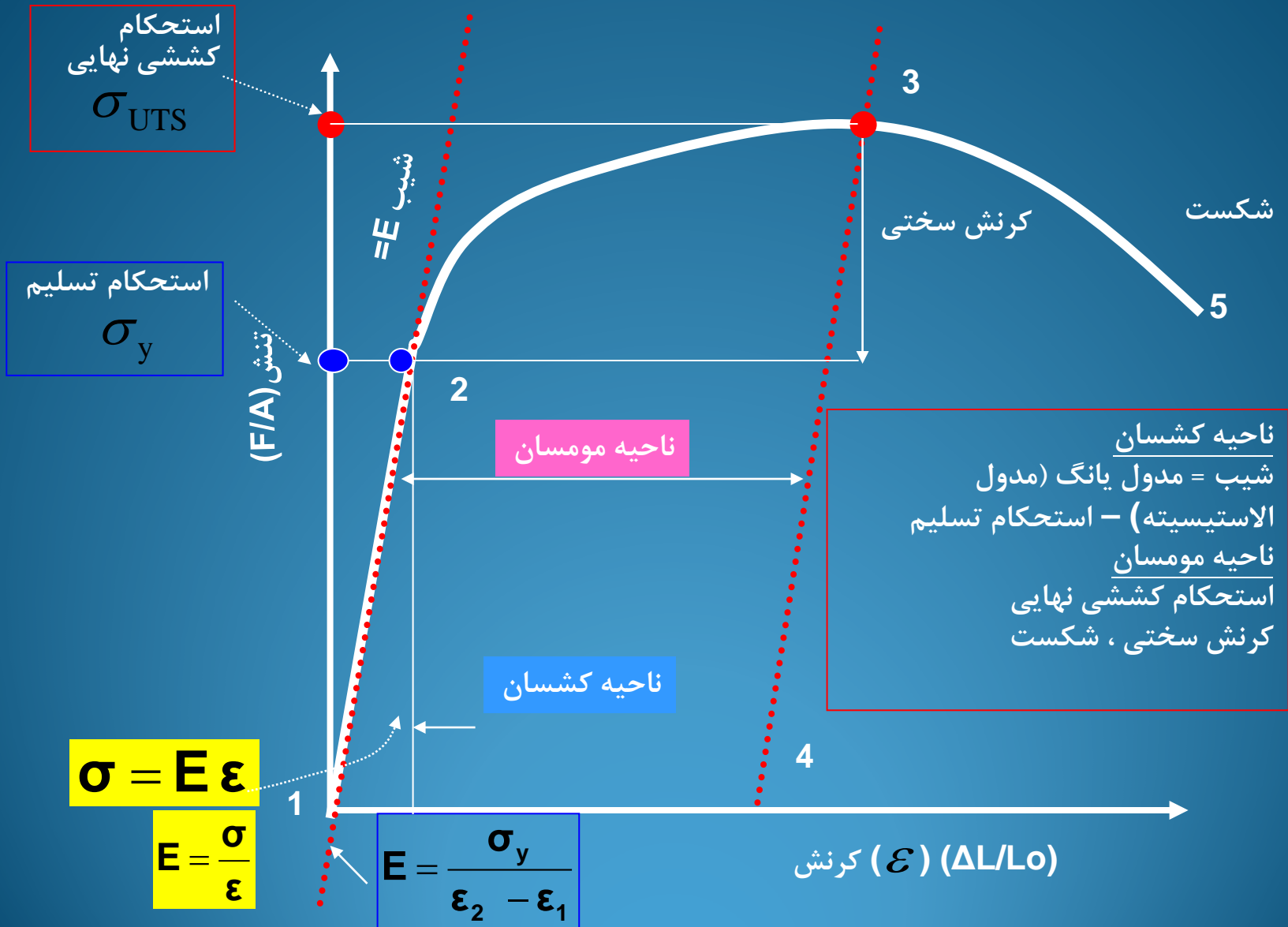
کرنش مهندسی: مقدار تغییر شکلی که ماده در هر واحد طول در آزمون کشش نشان می دهد .
$$e = (\Delta L/L_0)$$

(L_0 طول اولیه نمونه است).

کرنش حقیقی: مقدار تغییر شکلی که ماده در هر لحظه از خود نشان می دهد.
$$\epsilon = \ln (L_i/L_0)$$

(L_i طول نمونه در هر لحظه است).

دیاگرام تنش - کرنش - کرنش:



دیاگرام تنش - کرنش

✓ (نقطه ۱-۲): ناحیه الاستیک - ماده بعد از اینکه بار حذف شد به شکل اولیه خود برمیگردد (مثل لاستیک) در این ناحیه تنش بصورت خطی با کرنش متناسب است.

σ : تنش (psi)

E : مدول الاستیک (psi)

ϵ : کرنش (in/in)

$$\sigma = E \epsilon$$

یا

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

✓ نقطه ۲: استحکام تسلیم - نقطه ای که در آن تغییر شکل دائمی رخ می دهد، اگر تنش از آن نقطه بگذرد، ماده دیگر به ابعاد اولیه اش برنخواهد گشت.

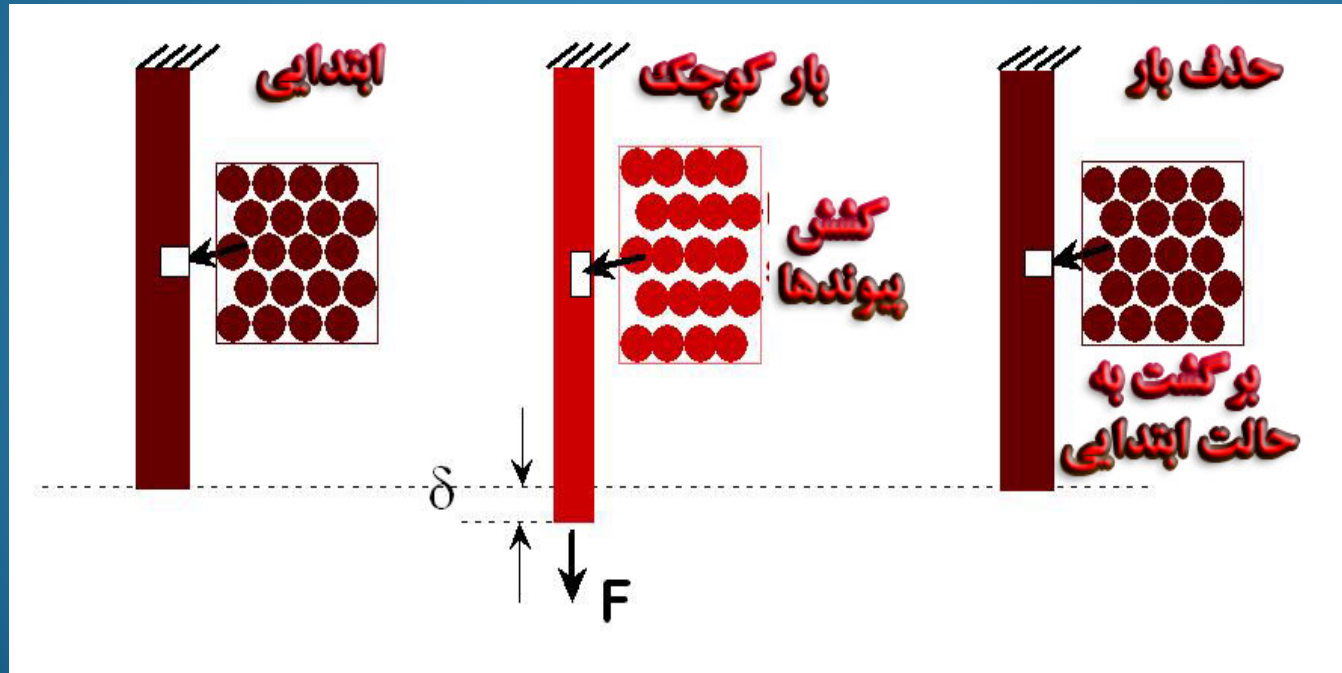
✓ نقطه ۳: استحکام کششی - بیشترین مقدار تنش در دیاگرام استحکام کششی یا استحکام کششی نهایی نامیده می شود. این نقطه بیشترین تنشی است که ماده می تواند بدون شکست تحمل کند.

✓ نقطه ۵: شکست - اگر ماده در بالای نقطه ۳ کشیده شود، با گلوپی شدن تنش کاهش پیدا می کند و تغییر شکل غیریکنواخت رخ می دهد و نهایتاً شکست در نقطه ۵ رخ می دهد.

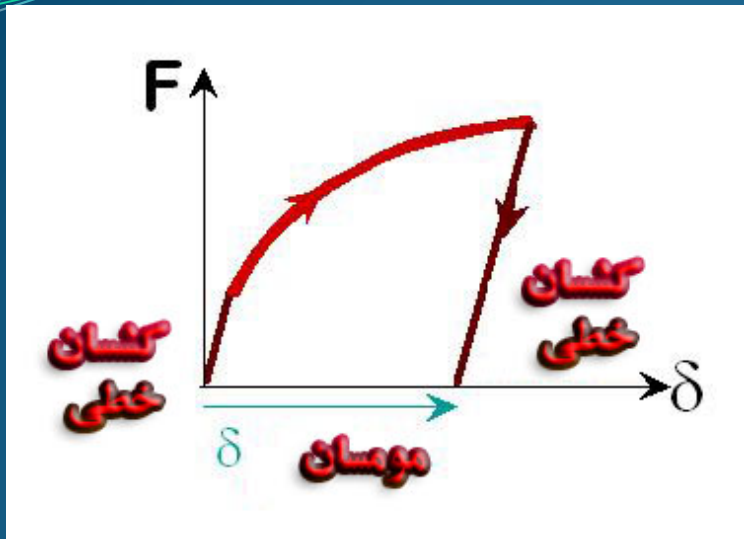
تغییر شکل کششسان (الاستیک):



کششسان به معنی قابل برگشت است. اگر نیرویی به ماده در ناحیه خطی منحنی تنش- کرنش وارد شود و سپس اعمال نیرو قطع شود، ماده به همان ابعادی که قبل از اعمال نیرو داشت، باز میگردد.



تغییر شکل مومسان (پلاستیک):



تغییر شکل مومسان به معنی دائمی است. از این نقطه به بعد در آزمون کشش، با افزایش تنش (نیرو) رفتار ماده "پلاستیک" خواهد بود: به آن معنی که اگر اعمال تنش بر روی ماده قطع شود، نمونه به ابعادی که قبل از اعمال نیرو داشت، باز نمی‌گردد. از دیدگاه اتمی، تغییر شکل مومسان مربوط به شکستن پیوندها با

همسایگان اولیه و ایجاد

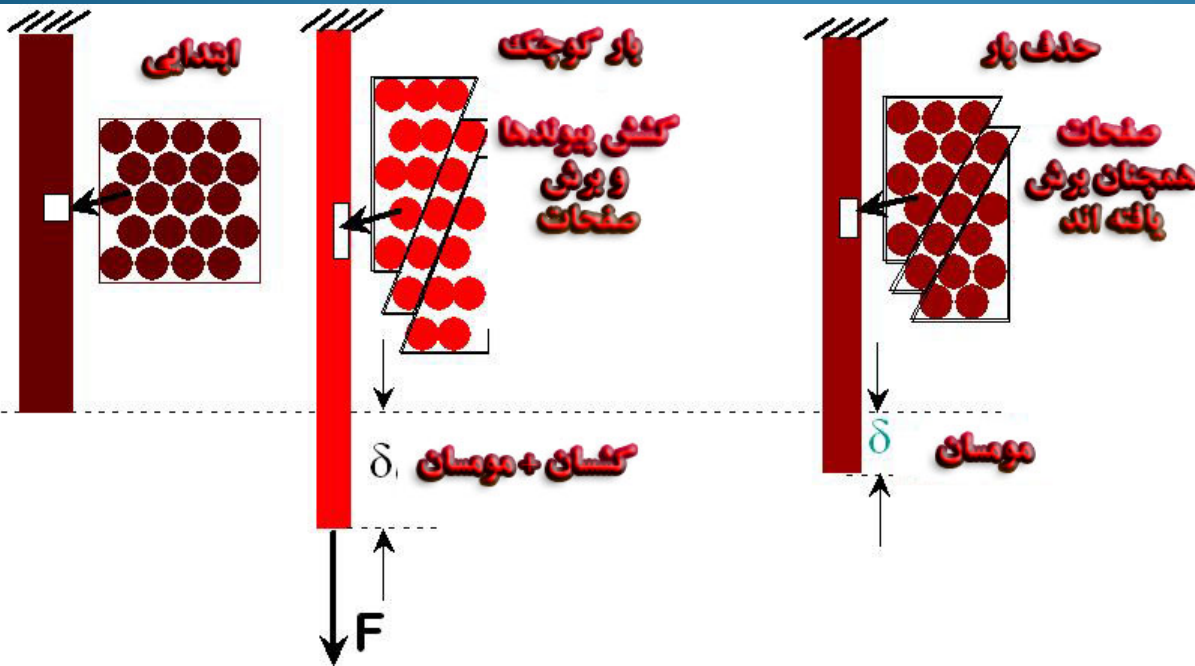
دوباره پیوند با همسایگان جدید است. بعد از حذف

تنش، تعداد زیادی از

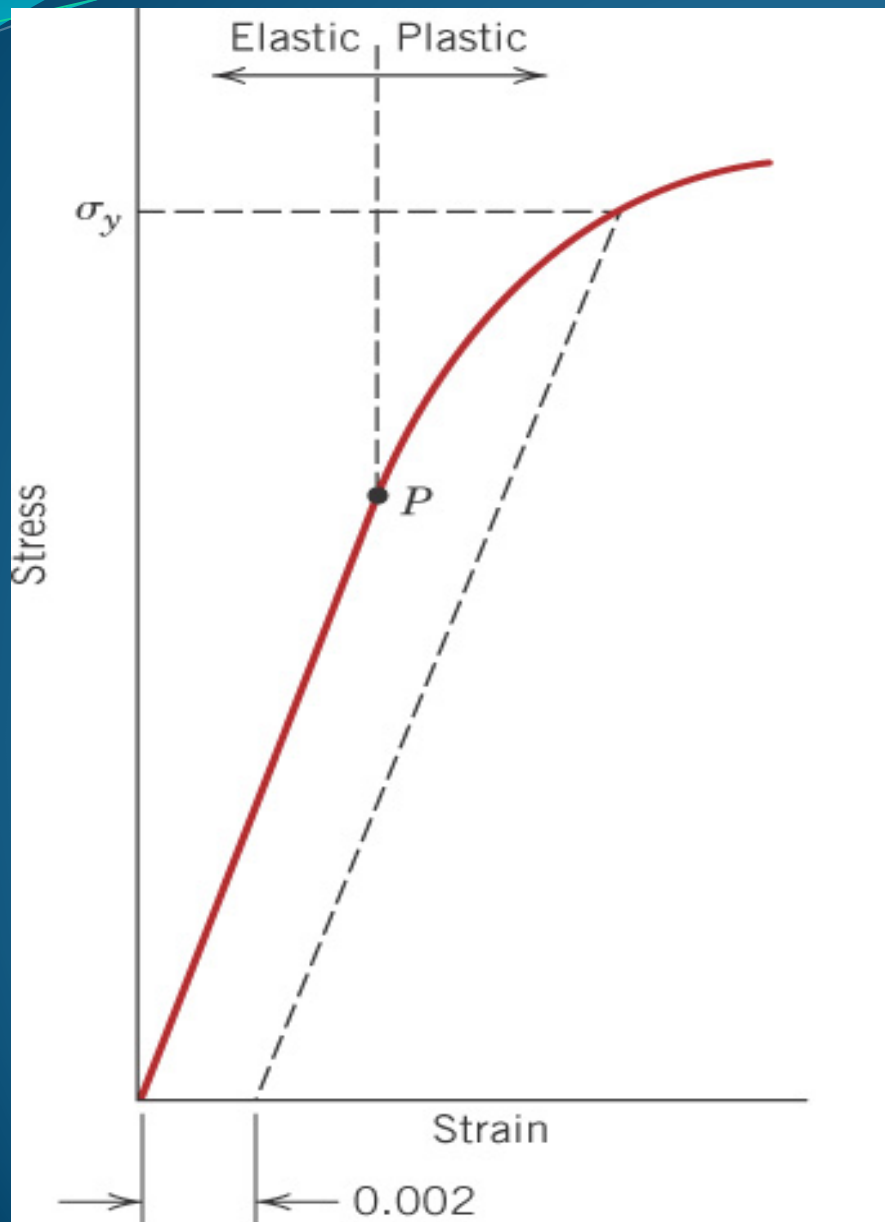
اتم‌ها که جابجا شده‌اند،

به موقعیت اولیه خود باز

نمی‌گردند.



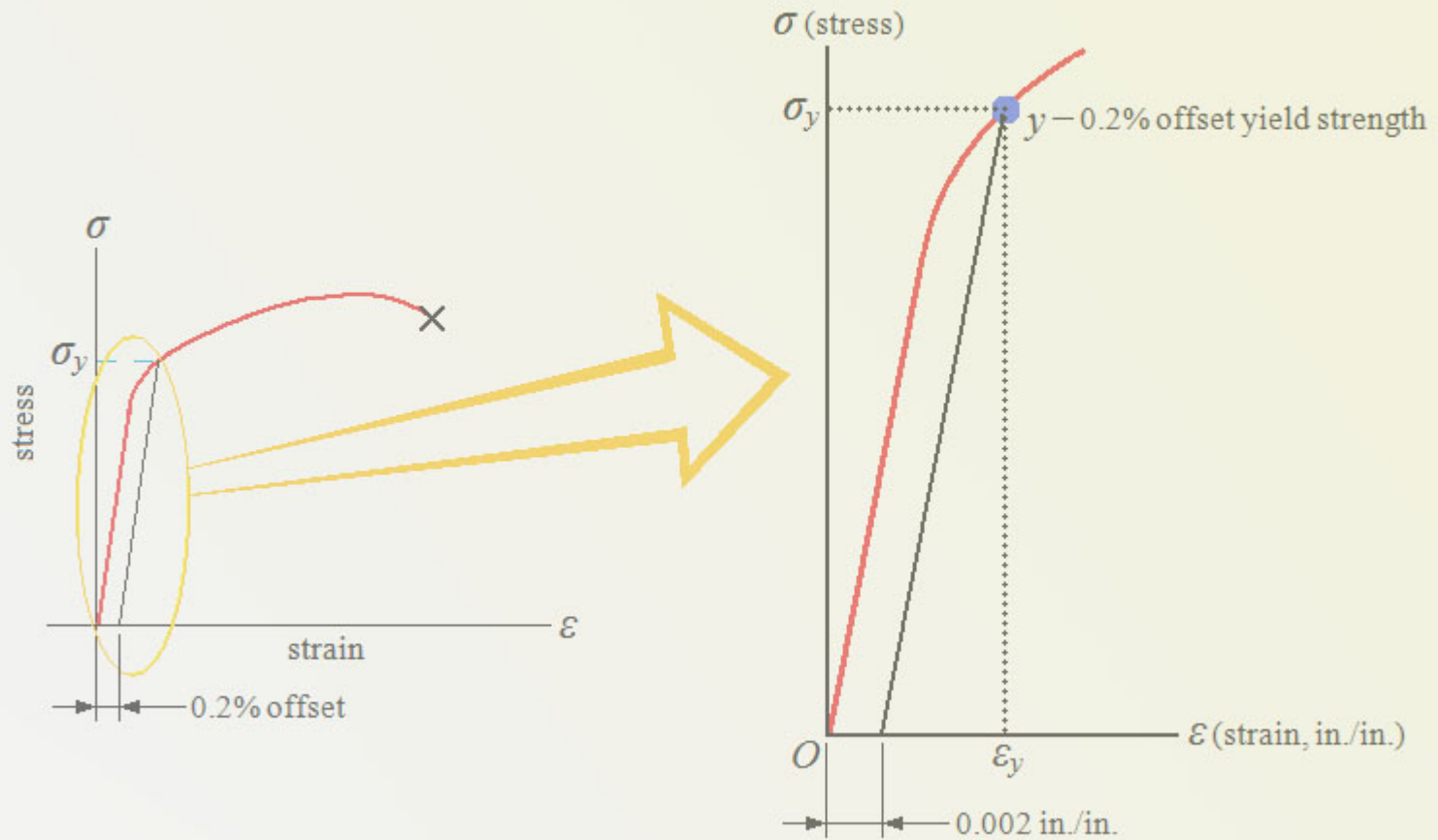
استحکام تسلیم δy :



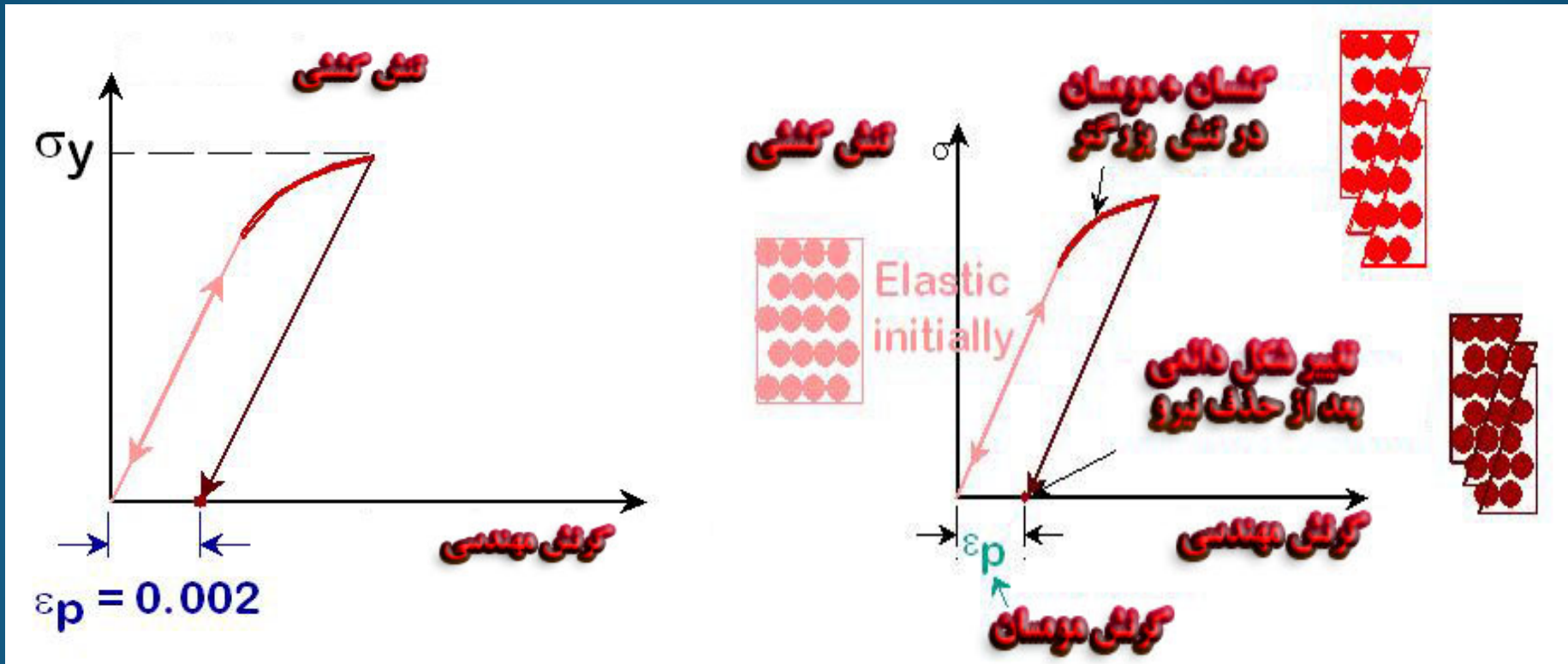
استحکام تسلیم مقاومت جسم را در مقابل تغییر شکل مومسان اندازه گیری می کند .

رفتار عادی تنش - کرنش یک فلز تغییر شکل کشسان و مومسان را نشان می دهد ، حد تناسب P و استحکام تسلیم σ_y ، چنانکه با استفاده از روش کرنش $0,002$ افسست مشخص شده است . (قابل ملاحظه است که تغییر شکل مومسان وجود دارد)

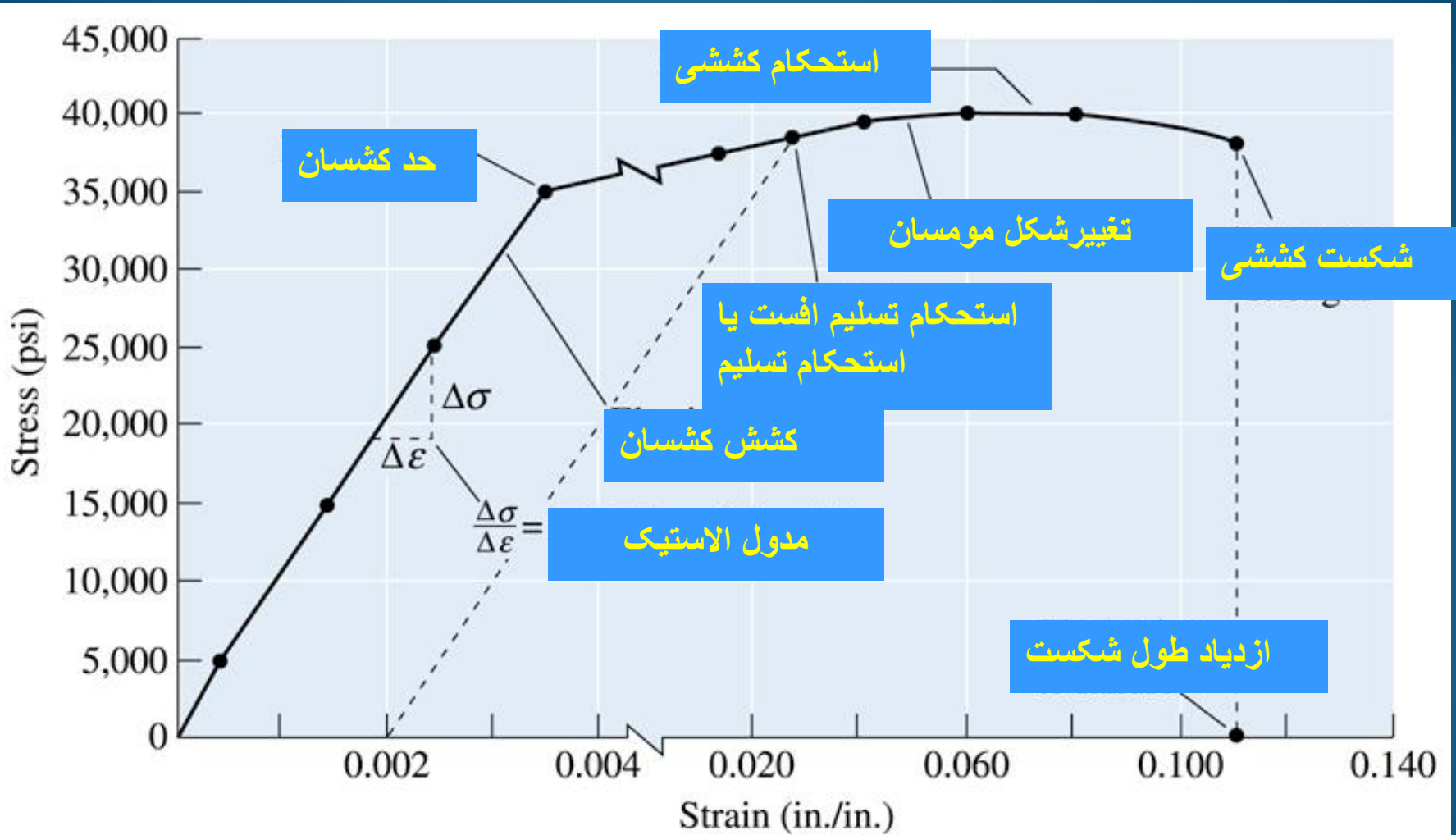
P انتقال تدریجی کشسان به مومسان است.

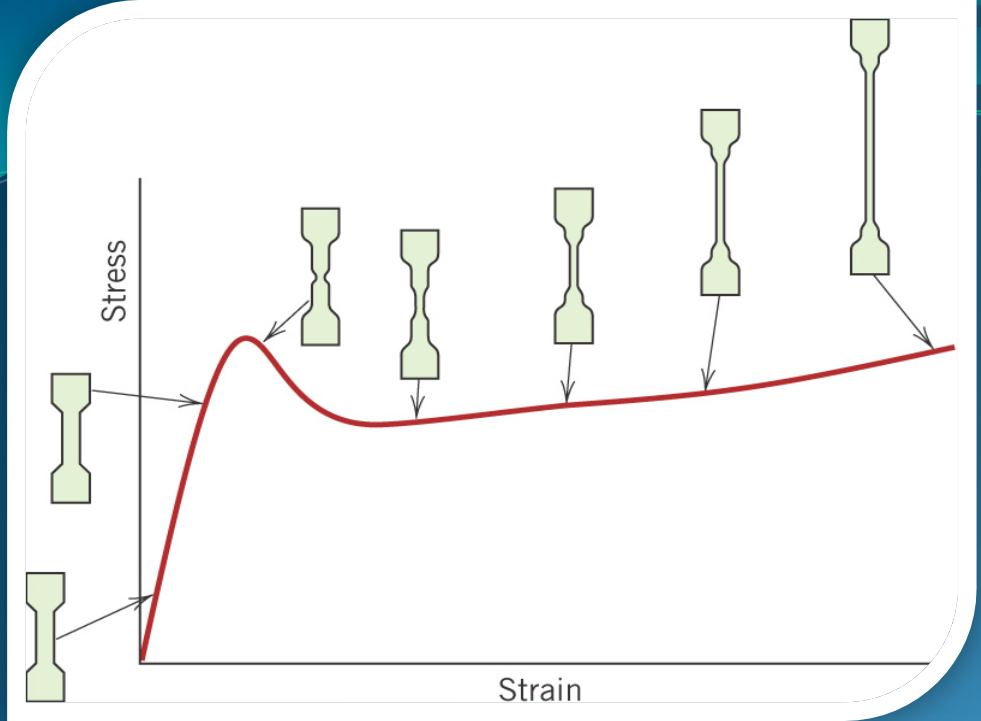


استحکام تسلیم δy :

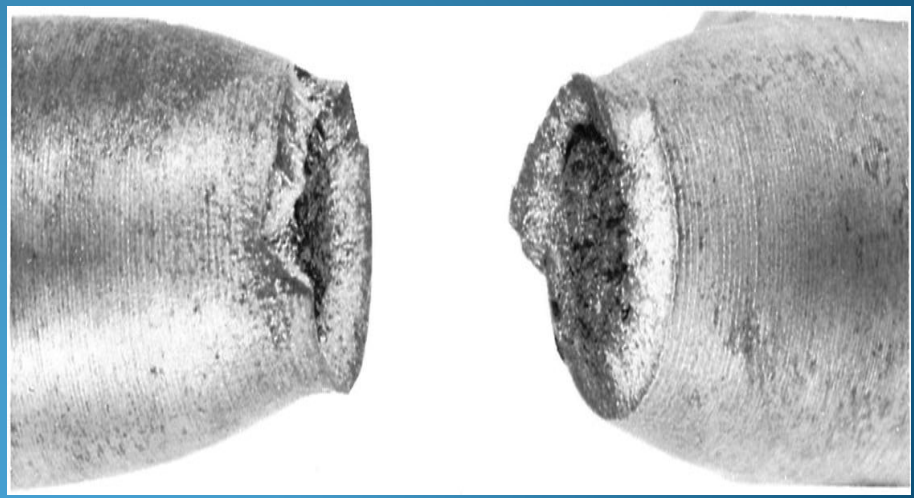
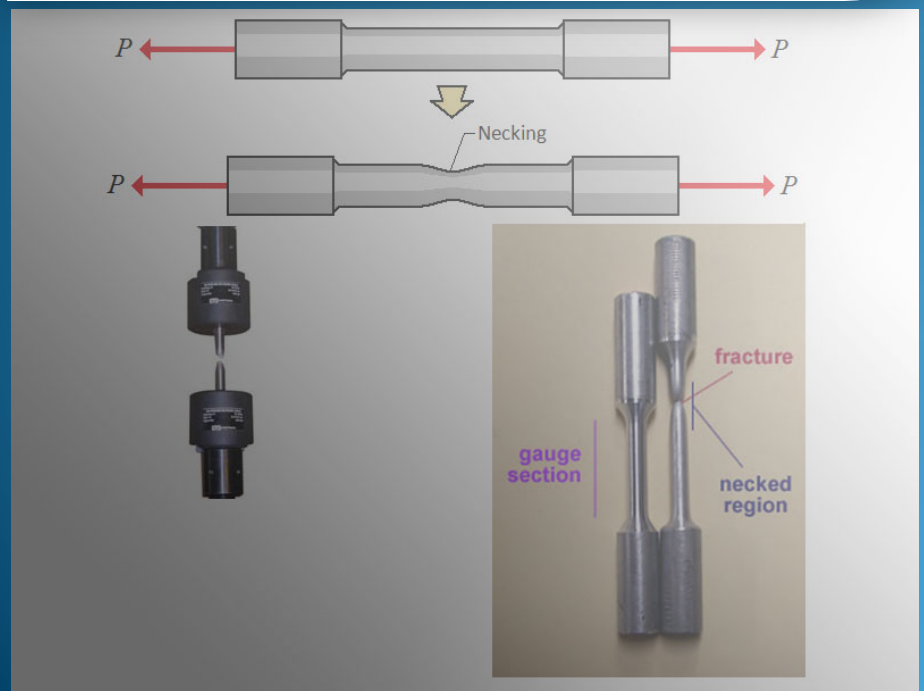


دیاگرام تنش - کرنش





تغییر شکل موضعی مواد نرم، در طول
 آزمون کشش منطقه گلویی شده را ایجاد
 می کند.
 این تصویر منطقه گلویی شده را در نمونه
 شکسته شده نشان می دهد.



دیاگرام تنش - کرنش

رفتار تنش - کرنش دیده شده برای تعدادی فولاد با پدیده نقطه تسلیم

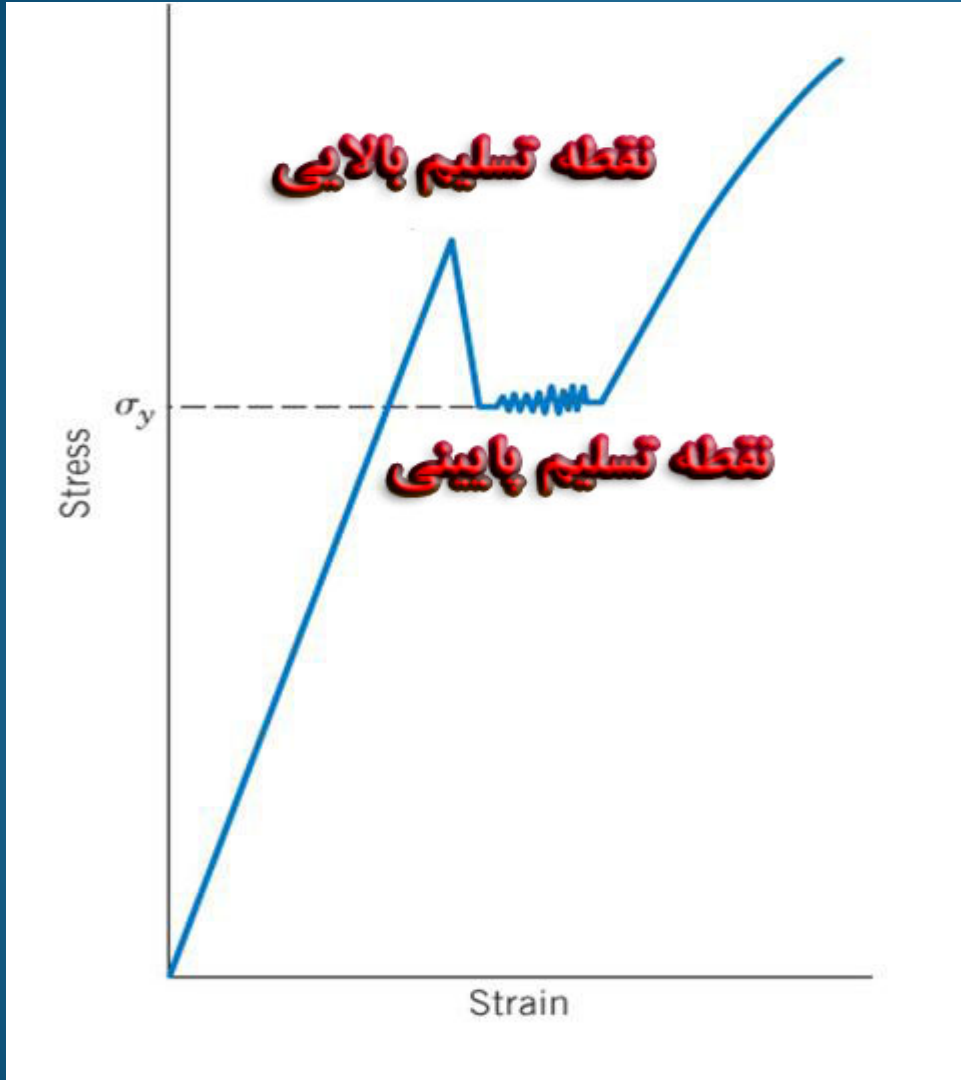


Table 7.2 Room-Temperature Mechanical Properties (in Tension) for Various Materials

Material	Yield Strength		Tensile Strength		Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)] ^a
	MPa	ksi	MPa	ksi	
<i>Metal Alloys^b</i>					
Molybdenum	565	82	655	95	35
Titanium	450	65	520	75	25
Steel (1020)	180	26	380	55	25
Nickel	138	20	480	70	40
Iron	130	19	262	38	45
Brass (70 Cu–30 Zn)	75	11	300	44	68
Copper	69	10	200	29	45
Aluminum	35	5	90	13	40
<i>Ceramic Materials^c</i>					
Zirconia (ZrO ₂) ^d	—	—	800–1500	115–215	—
Silicon nitride (Si ₃ N ₄)	—	—	250–1000	35–145	—
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	—	—	275–700	40–100	—
Silicon carbide (SiC)	—	—	100–820	15–120	—
Glass–ceramic (Pyroceram)	—	—	247	36	—
Mullite (3Al ₂ O ₃ –2SiO ₂)	—	—	185	27	—
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	—	—	110–245	16–36	—
Fused silica (SiO ₂)	—	—	110	16	—
Magnesium oxide (MgO) ^e	—	—	105	15	—
Soda–lime glass	—	—	69	10	—
<i>Polymers</i>					
Nylon 6,6	44.8–82.8	6.5–12	75.9–94.5	11.0–13.7	15–300
Polycarbonate (PC)	62.1	9.0	62.8–72.4	9.1–10.5	110–150
Poly(ethylene terephthalate) (PET)	59.3	8.6	48.3–72.4	7.0–10.5	30–300
Poly(methyl methacrylate) (PMMA)	53.8–73.1	7.8–10.6	48.3–72.4	7.0–10.5	2.0–5.5
Poly(vinyl chloride) (PVC)	40.7–44.8	5.9–6.5	40.7–51.7	5.9–7.5	40–80
Phenol–formaldehyde	—	—	34.5–62.1	5.0–9.0	1.5–2.0
Polystyrene (PS)	25.0–69.0	3.63–10.0	35.9–51.7	5.2–7.5	1.2–2.5
Polypropylene (PP)	31.0–37.2	4.5–5.4	31.0–41.4	4.5–6.0	100–600
Polyethylene—high density (HDPE)	26.2–33.1	3.8–4.8	22.1–31.0	3.2–4.5	10–1200
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	13.8–15.2	2.0–2.2	20.7–34.5	3.0–5.0	200–400
Polyethylene—low density (LDPE)	9.0–14.5	1.3–2.1	8.3–31.4	1.2–4.55	100–650

^a For polymers, percent elongation at break.

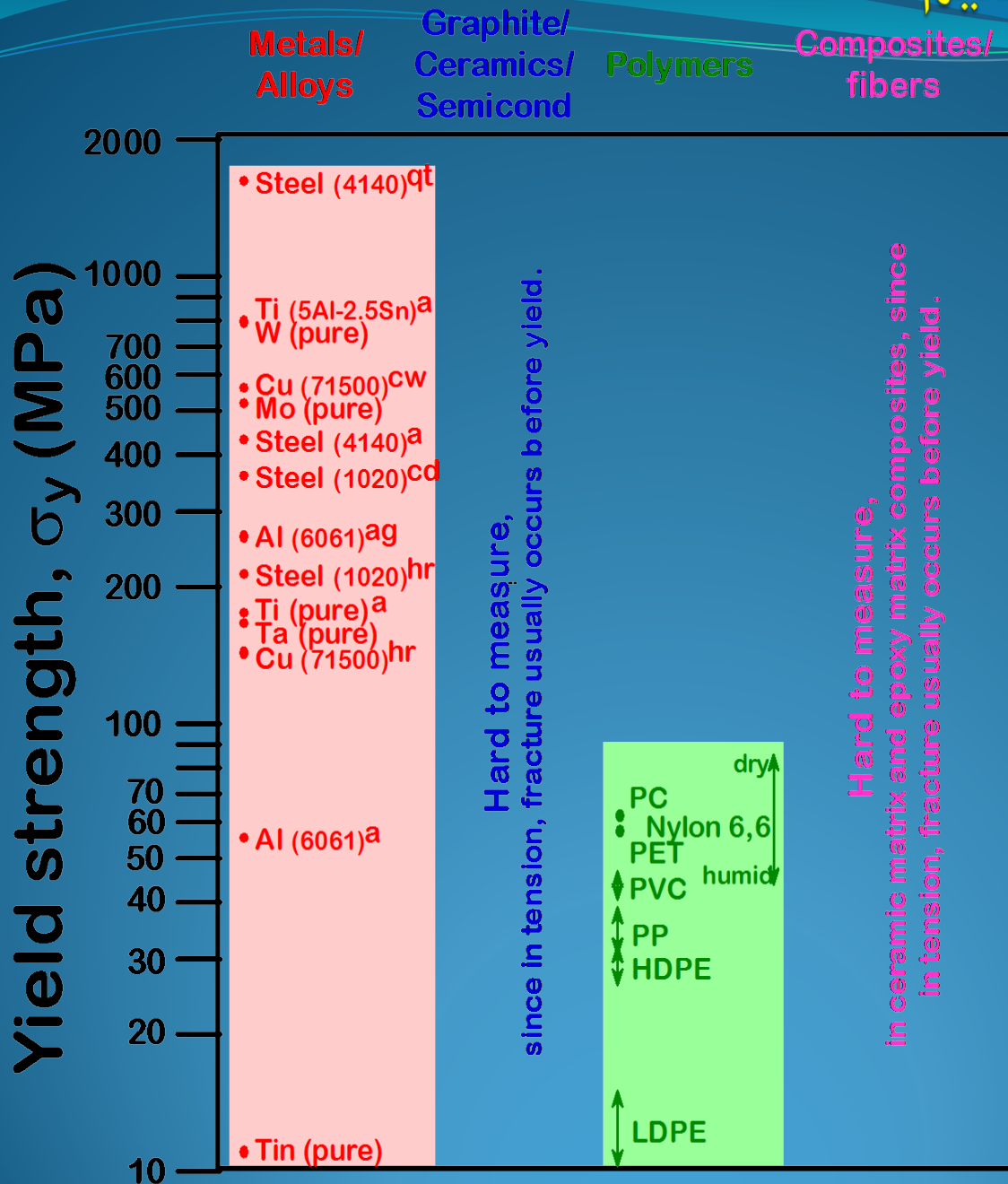
^b Property values are for metal alloys in an annealed state.

^c The tensile strength of ceramic materials is taken as flexural strength (Section 7.10).

^d Partially stabilized with 3 mol% Y₂O₃.

^e Sintered and containing approximately 5% porosity.

مقایسه استحکام تسلیم :



مقدار در دمای اتاق

= a تابکاری شده

= hr نورد گرم

= ag پیروسازی شده

= cd سرد کشیدگی

= cw کارسختی

= qt کوئنچ و تمپر شده

