

عمليات حرارتى

بارم بندی کلاس

فعالیت کلاسی

کوینزهای مستمر

پایان ترم

تعريف عمليات حرارتی

A process in which metal is heated, kept for specific time and cooled under tight controls to improve its properties (mechanical, chemical and physical), performance and durability.

Heat treating can soften metal, to improve formability. It can make parts harder, to improve strength. It can put a hard surface on relatively soft components, to increase abrasion resistance. It can create a corrosion-resistant skin, to protect parts that would otherwise corrode. And, it can toughen brittle products.

اهداف عملیات حرارتی (فلزات و آلیاژها، سرامیک):

۱- رسیدن به شرایط و خواص مناسب مکانیکی، فیزیکی، شیمیایی و مغناطیسی و ...
مخلوط پودر اکسید روی و اکسید منگنز و اکسید آهن در حضور اکسیژن و دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد مغناطیس می شود.

۲- تنش زدایی ناشی از فرایندهای تولید

۳- ریزدانه کردن (تغییرات ریزساختاری)

۴- افزایش مقاومت به سایش با ایجاد لایه سطحی سخت و افزایش مقاومت به ضربه

۵- افزایش و بهبود خواص الکتریکی

۶- بهبود خواص مکانیکی فولاد به منظور اقتصادی کردن و به جای به کار بردن فولاد گرانتتر

Heat Treating or heat treatment

Heat treated parts are essential to the operation of automobiles, aircraft, spacecraft, computers and heavy equipment of every kind. Saws, axes, cutting tools, bearings, gears, axles, fasteners, camshafts and crankshafts all depend on heat treating.



Heat Treating

Although iron and steel account for the vast majority of heat treated materials, alloys of aluminum, copper, magnesium, nickel and titanium may also be heat treated.



منابع

- ۱- کتاب عملیات حرارتی فولادها تألیف دکتر محمدعلی گل‌عذار
- ۲- هندبوک استاندارد ASM
- ۳- جزوه عملیات حرارتی، دانشگاه حکیم سبزه‌واری

√ASM Handbook™

Volume 4 Heat Treating

Prepared under the direction of the
ASM International Handbook Committee

- دیاگرام تعادلی آهن کربن
- فازها و ساختار تعادلی
- مارتنزیت و بینیت
- نمودارهای زمان - دما - دگرگونی
- روشهای عملیات حرارتی
- سختی و سختی پذیری
- روشهای سخت کاری سطحی
- عیوب عملیات حرارتی
- عملیات حرارتی چدن‌ها

فصل اول

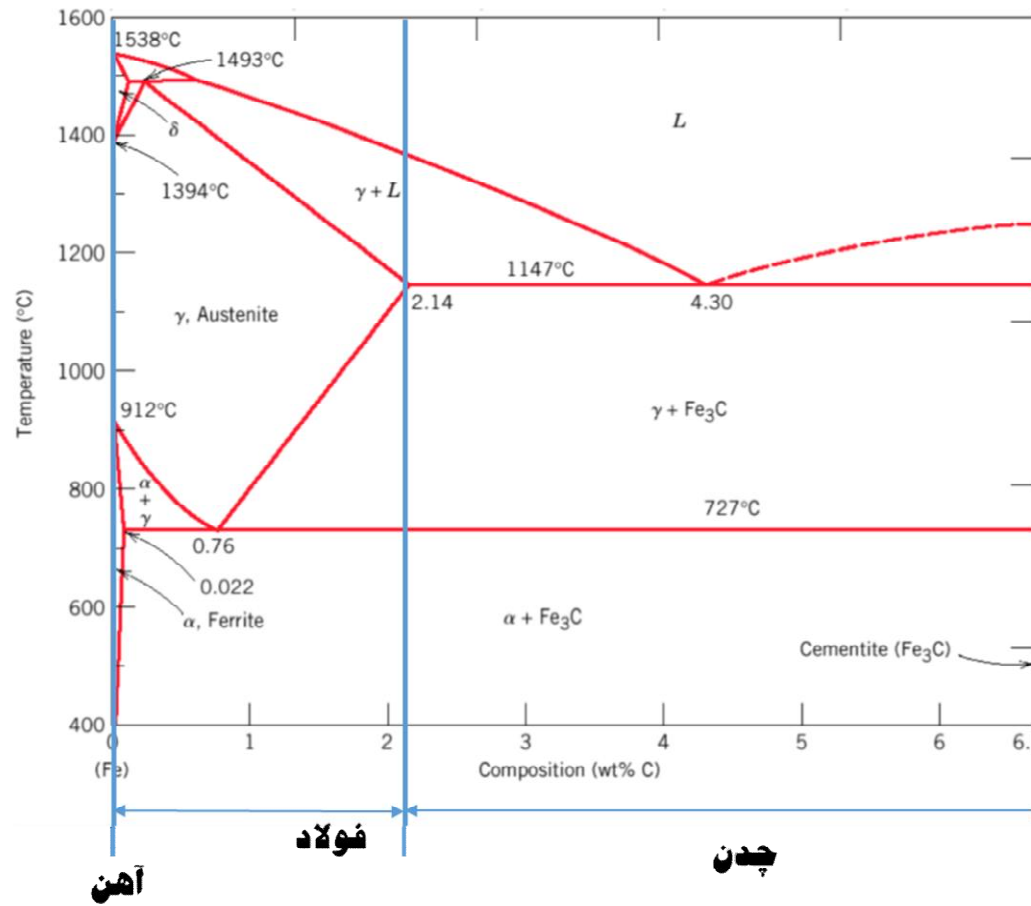
فازها و ساختارهای بلوری

در دیاگرام تعادلی آهن - کربن

تعريف آهن (Iron)، فولاد (Steel) و چدن (Cast-iron)

- **Iron:** less than 0.008 wt % C in α -ferrite at room T
- **Steels:** 0.008 - 2.14 wt % C (usually < 1 wt %)
- **Cast iron:** 2.14 - 6.7 wt % (usually < 4.5 wt %)

دمای ذوب



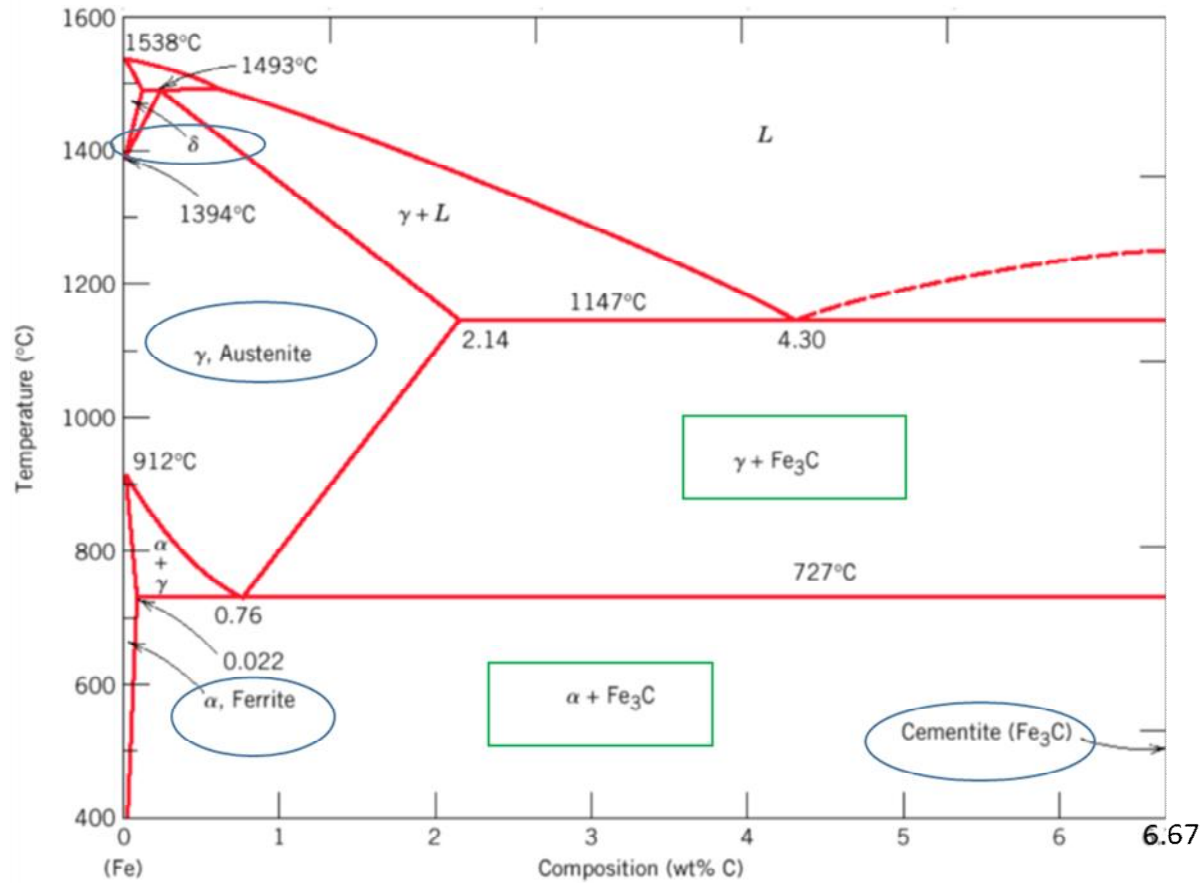
آهن (Iron)، فولاد (Steel) و چدن (Cast-iron)

- تغییر درصد کربن
- تغییر در ریزساختارها و فازها
- تغییر خواص مکانیکی (سختی، استحکام، مقاومت به سایش و ...)، شیمیایی (اکسیداسیون یا خوردگی)، مغناطیسی و فیزیکی (دمای ذوب و ...)

فولادها گروهی از آلیاژهای آهن - کربن و عناصر دیگرند که بیشترین کاربرد را در صنعت و فن‌آوری دارند. یکی از دلایل اصلی کاربرد وسیع فولادها عبارت است از خواص کاملاً متنوعی که می‌توان به کمک روشهای مختلف عملیات حرارتی در آنها به وجود آورد.

نکته قابل تاکید این است

که، کاربرد وسیع فولادها ناشی از خواص کاملاً متنوع آنهاست که به کمک تغییر درصد کربن و / یا تغییر درصد عناصر آلیاژی و / یا تغییر نوع عملیات حرارتی امکانپذیر است. گستره وسیع خواص متنوع فولادها ناشی از نوع، مقدار، اندازه و توزیع فازهای مختلف (به عنوان مثال سمنتیت یا کاربید آهن (Fe_3C)) است.



فازهای موجود

۱- جامد تک فاز

۲- جامد دو فاز

ترکیب شیمیایی فولاد

فاز

ساختار یا ریزساختار یا مرفولوژی

شبکه کریستالی

Phases in Fe–Fe₃C Phase Diagram

➤ α-ferrite - solid solution of C in BCC Fe

- Stable form of iron at room temperature.
- The maximum solubility of C is 0.022 wt%
- Transforms to FCC γ-austenite at 912 °C

➤ γ-austenite - solid solution of C in FCC Fe

- The maximum solubility of C is 2.14 wt %.
- Transforms to BCC δ-ferrite at 1395 °C
- Is not stable below the eutectic temperature (727 °C) unless cooled rapidly (Chapter 10)

the maximum stability is at 1493

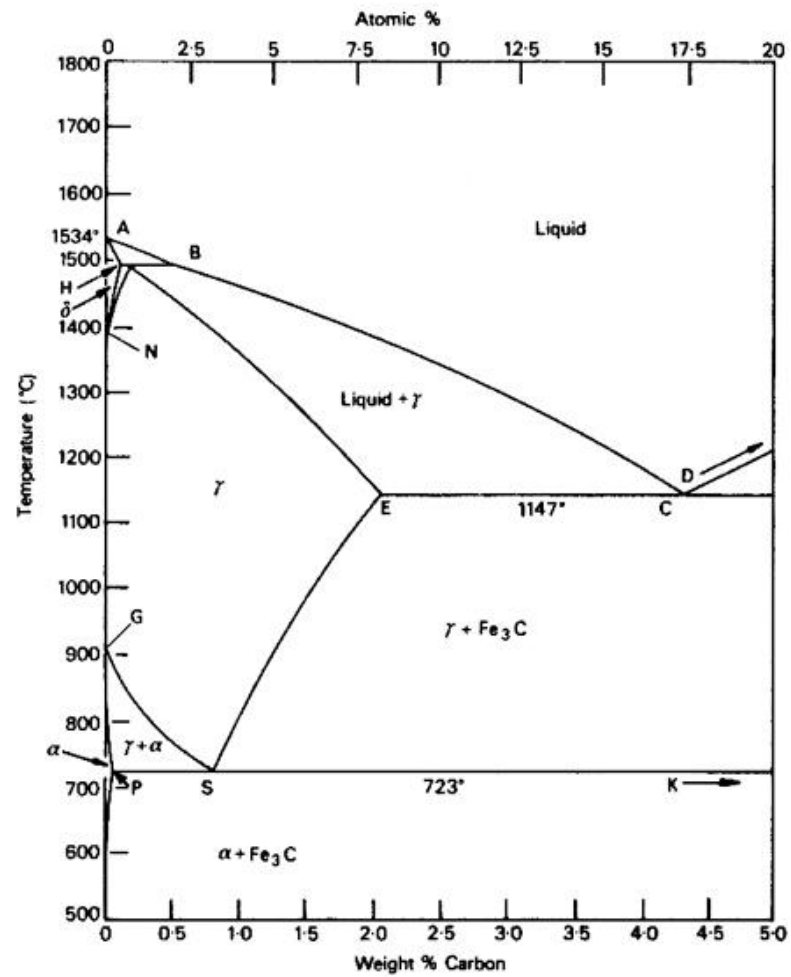
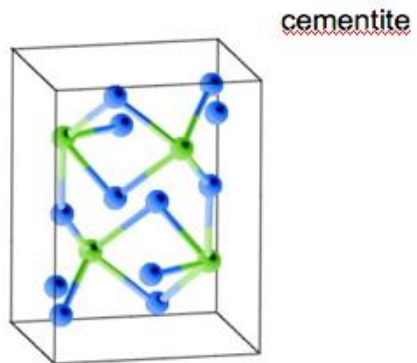
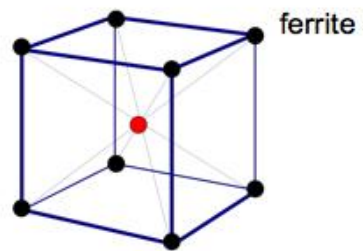
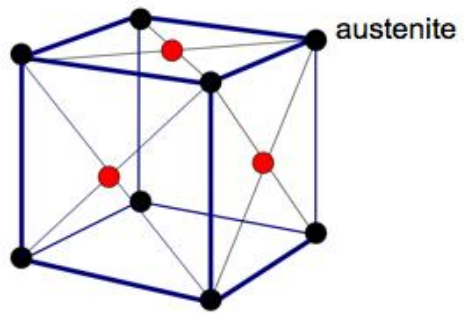
➤ δ-ferrite solid solution of C in BCC Fe

- The same structure as α-ferrite
- Stable only at high T, above 1394 °C
- Melts at 1538 °C

➤ Fe₃C (iron carbide or cementite)

- This intermetallic compound is metastable, it remains as a compound indefinitely at room T, but decomposes (very slowly, within several years) into α-Fe and C (graphite) at 650 - 700 °C

T_m = 1227 °C



ج : آهن دلتا

آخرین فازی که ممکن است در آهن خالص وجود داشته باشد، آهن دلتا با شبکه bcc بوده و از نظر بلورشناسی مشابه آهن آلفا است.
آهن دلتا فقط در دماهای نزدیک نقطه ذوب آهن تشکیل می شود

دمای ذوب سمنتیت در حدود ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد است و برخلاف آهن تغییرات آلوتروپیک^۱ ندارد ولی در دماهای پایین، به مقدار بسیار کم دارای خاصیت آهنربایی بوده اما در اثر حرارت دادن تا ۲۱۷ درجه سانتیگراد خاصیت آهنربایی خود را از دست می‌دهد. سختی سمنتیت، بسیار بالا (بیشتر از ۸۰۰ برینل که به سادگی شیشه را خراش می‌اندازد). و انعطاف پذیری آن فوق العاده کم (عملاً صفر) است. بدیهی است که خواص یاد شده ناشی از ساختار پیچیده شبکه بلوری سمنتیت است.

سمنتیت، ترکیبی ناپایدار است و تحت شرایط خاص تجزیه شده و کربن آزاد (گرافیت) تولید می‌کند. واکنش یاد شده مخصوصاً در رابطه با آلیاژهای پرکربن (چدن‌ها) از اهمیت فوق العاده زیادی برخوردار است.

پرلایت: جامد دو فازی (فریت و سمنتیت): ساختار لایه ای

لدبوریت: جامد دو فازی (آستنیت و سمنتیت): ساختار پوست پلنگی

دمای ذوب آهن

آلوتروپی (پلی مرفیسم): یک عنصر در دما و فشارهای مختلف دارای شبکه بلوری متفاوت باشد.

آهن بتا (دمای کوری: ۷۷۰ درجه سانتی گراد آهن مغناطیس به غیر مغناطیس تبدیل شود)

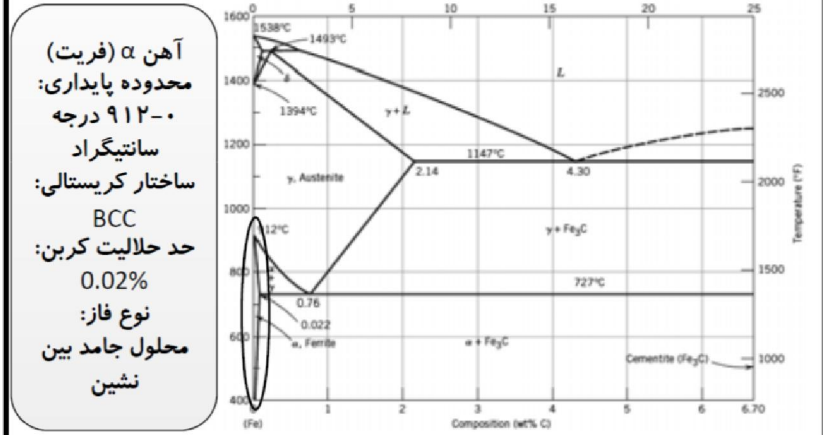
آهن اپسیلن



نمودار تعادلی آهن - کربن

فازها و غلظتهای مهم

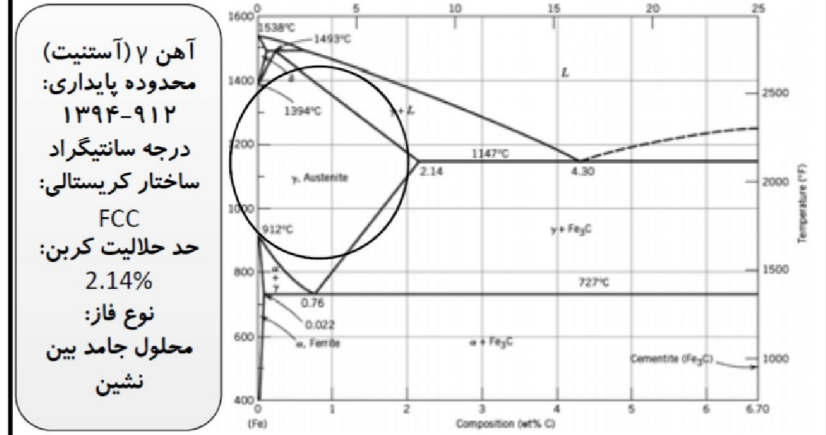
دکتر حکیم سبزواری



نمودار تعادلی آهن - کربن

فازها و غلظتهای مهم

دکتر حکیم سبزواری



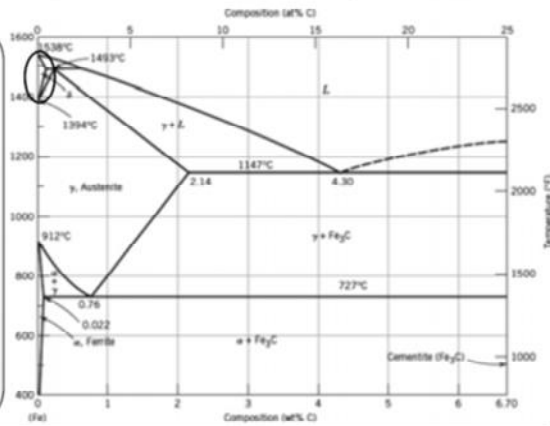


نمودار تعادلی آهن - کربن

فازها و غلظت‌های مهم

آهن δ (فریت δ):
 محدوده پایداری:
 ۱۳۹۴-۱۵۳۸
 درجه سانتیگراد
 ساختار کریستالی:
 FCC
 حد حل‌الیت کربن:
 تقریباً ۰.۱%
 نوع فاز:
 محلول جامد بین
 نشین

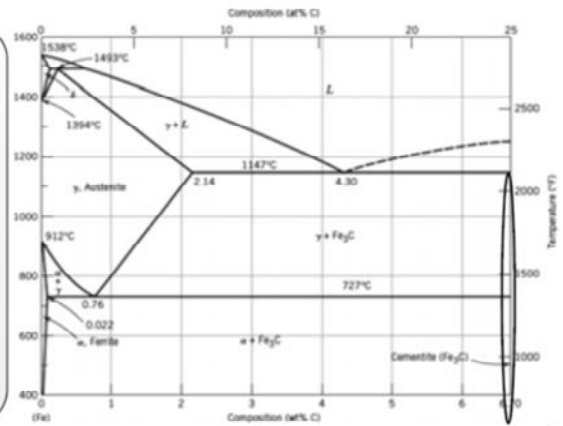
BCC

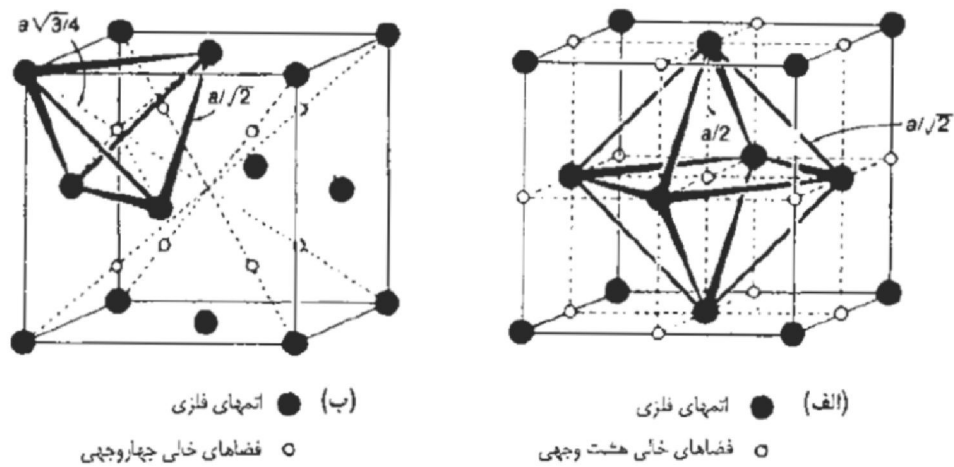


نمودار تعادلی آهن - کربن

فازها و غلظت‌های مهم

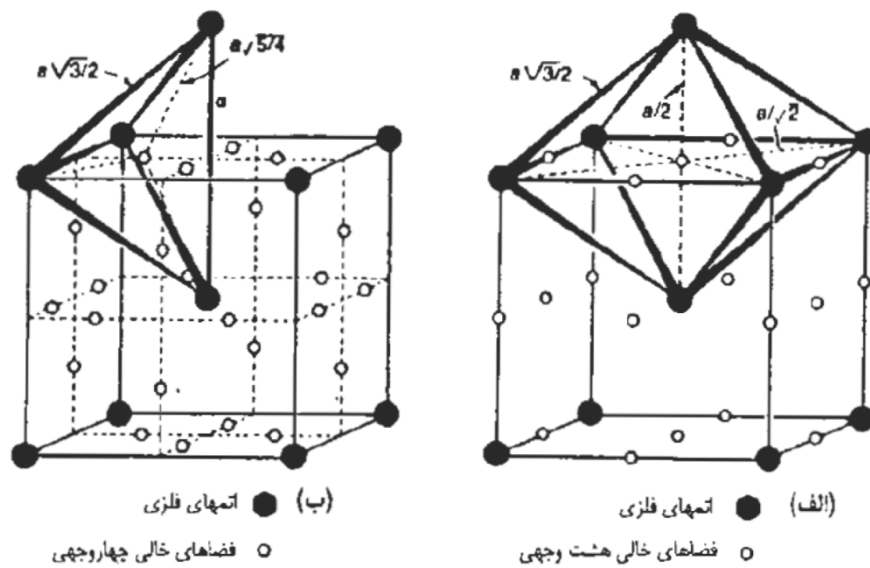
Fe_3C (سمانتیت)
 کاربرد آهن
 ساختار کریستالی:
 اورترومبیک
 غلظت کربن:
 6.7%
 نوع فاز:
 ترکیب
 استوکیومتری





شکل ۱-۶ فضاهای خالی بین‌نشینی هشت‌وجهی (الف) و چهاروجهی (ب) در شبکه FCC

اتم کربن اگر در یک فضای هشت‌وجهی قرار گیرد، دارای ۶ اتم آهن در مجاور خود و اگر در یک فضای چهاروجهی قرار گیرد، دارای ۴ اتم آهن در مجاور خود خواهد بود.



شکل ۸-۱ فضاهای خالی بین‌نشینی هشت‌وجهی (الف) و چهاروجهی (ب) در شبکه BCC [۱].

از آنجایی که فضاهاى بین‌نشینی در فریت بسیار کوچکتر از آستنیت‌اند، حد
حلالیت کربن در فریت بسیار کمتر از آستنیت است.

فولادهای کربنی

- فولادهای کم کربن: میزان درصد کربن تا ۰.۳ درصد کربن
- فولادهای متوسط کربن: از ۰.۳ تا ۰.۵ درصد کربن
- فولادهای پر کربن: از ۰.۵ تا ۱.۵ الی ۲ درصد کربن

فولادهای آلیاژی

- فولادهای کم آلیاژ: درصد مجموع عناصر آلیاژی کمتر از ۵ درصد وزنی باشد.
- فولادهای پر آلیاژ: درصد مجموع عناصر آلیاژی بیشتر از ۵ درصد وزنی باشد.

BCC

$$4r = a\sqrt{3}$$

$$a = \frac{4r}{\sqrt{3}}$$

$$a = 2.31r$$

$$a = 2.86 A$$

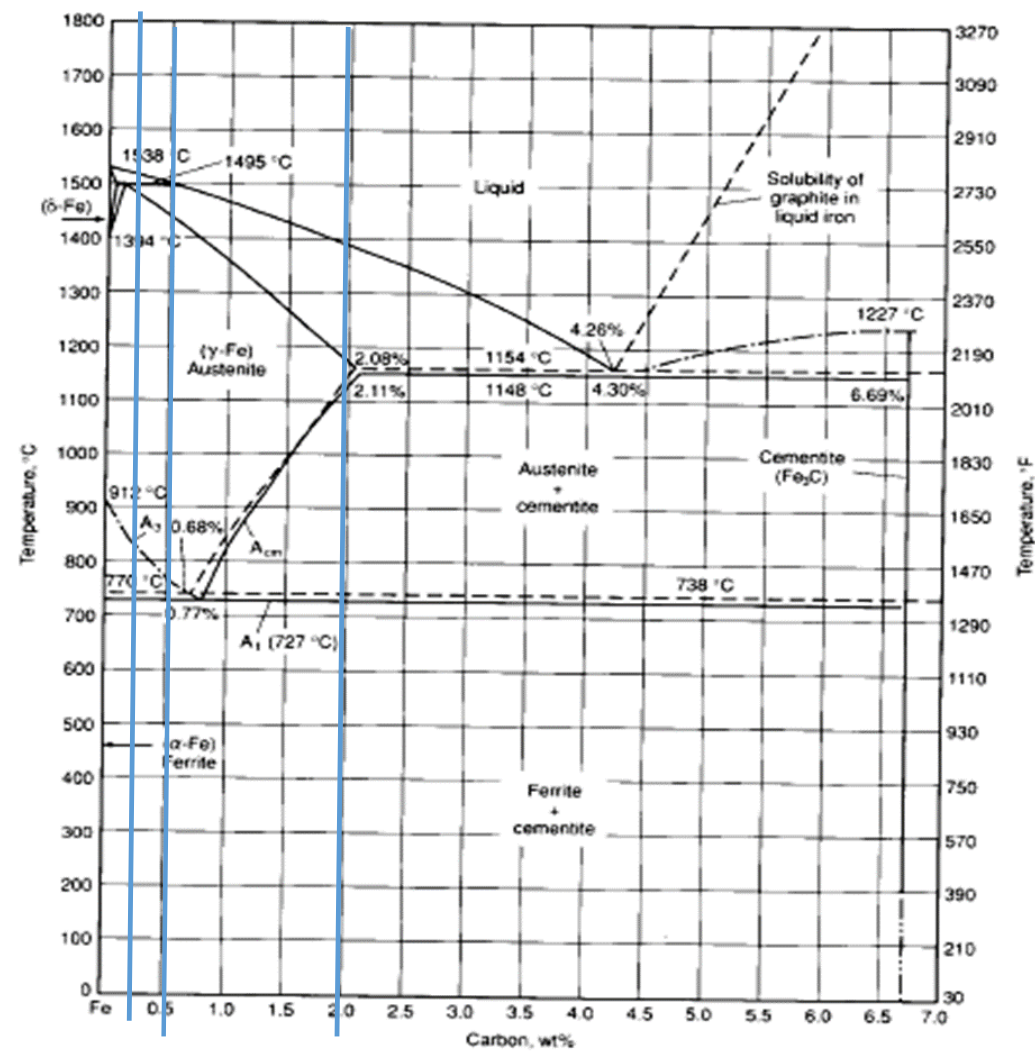
FCC

$$4r = a\sqrt{2}$$

$$a = \frac{4r}{\sqrt{2}}$$

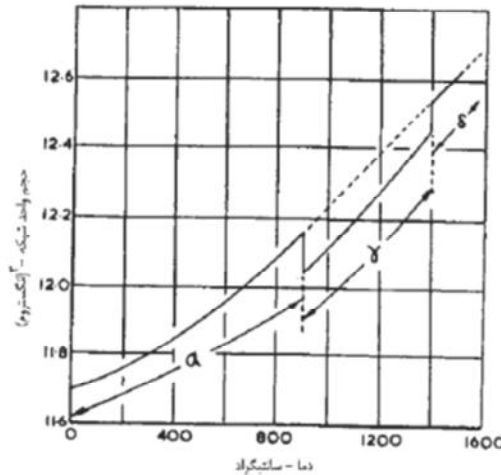
$$a = 2.84r$$

$$a = 3.56 A$$



The Fe-C equilibrium diagram up to 6.67 wt% C. Solid lines indicate Fe-Fe₃C diagram; dashed lines indicate iron-graphite diagram.

پارامتر شبکه آهن گاما برابر با $3/56$ آنگسترم ($0/356 \text{ nm}$) بوده و بنابراین بزرگتر از پارامتر شبکه آهن آلفا است. لیکن، ساختار بلوری با چگالی زیاد و وجود ۴ اتم در واحد شبکه آهن گاما باعث شده است که چگالی آن از چگالی آهن آلفا بیشتر شود. به بیان دیگر فضای خالی بین اتمها در شبکه بلوری آهن آلفا نسبت به آهن گاما بیشتر است. در حقیقت، تفاوت بین ضریب تراکم دو شبکه آلفا و گاما باعث می شود که تبدیل آهن گاما به آهن آلفا همراه با افزایش حجم باشد.



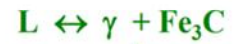
شکل ۵-۱ اثر دما بر روی حجم واحد شبکه بلوری آهن خالص [۳].

$$\Delta V_{\alpha \rightarrow \gamma} = \frac{V_{\gamma} - \frac{N_{\gamma}}{N_{\alpha}} V_{\alpha}}{V_{\alpha}}$$

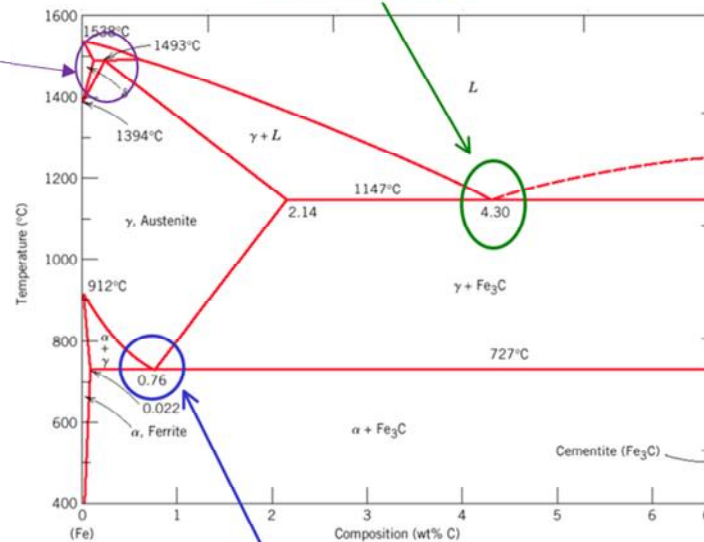
استحاله های فازي

Eutectic and eutectoid reactions in Fe-Fe₃C

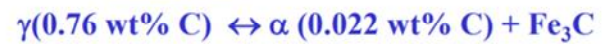
Eutectic: 4.30 wt% C, 1147 °C



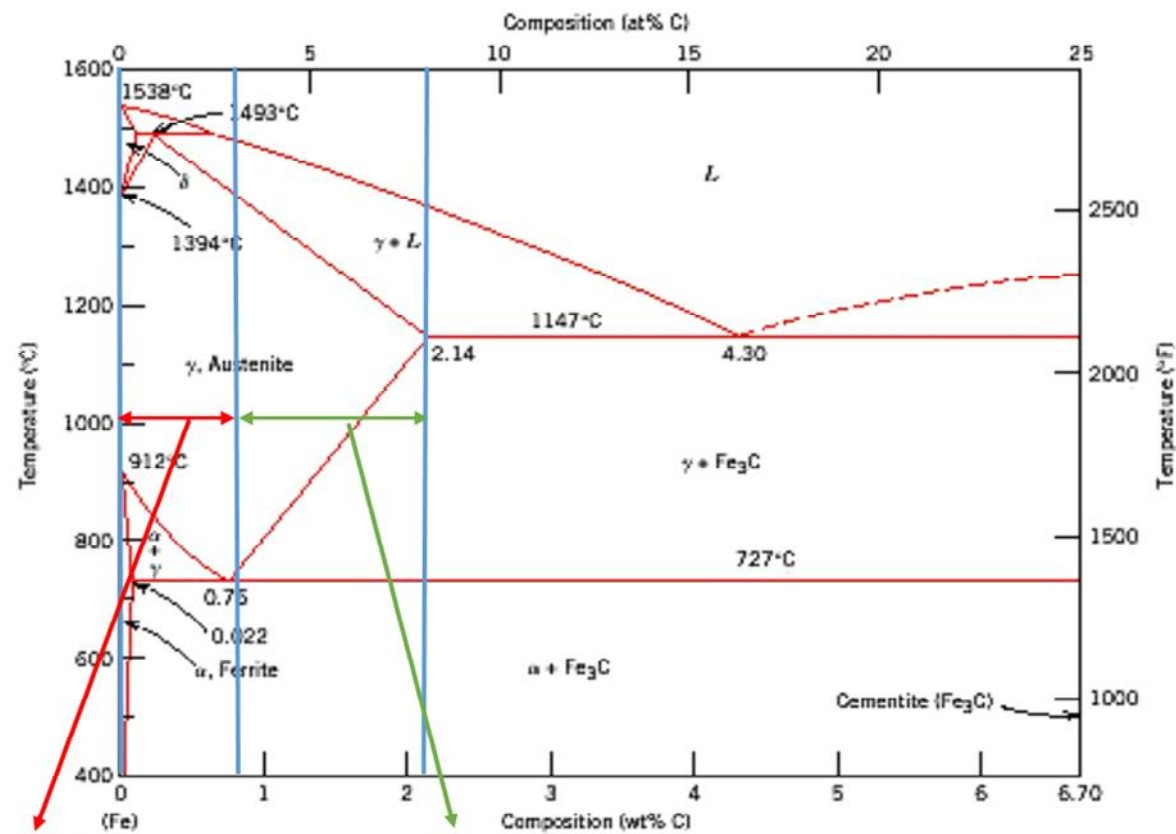
Peritectic
 $L + \delta \leftrightarrow \gamma$



Eutectoid: 0.76 wt% C, 727 °C



Eutectic and eutectoid reactions are very important in heat treatment of steels

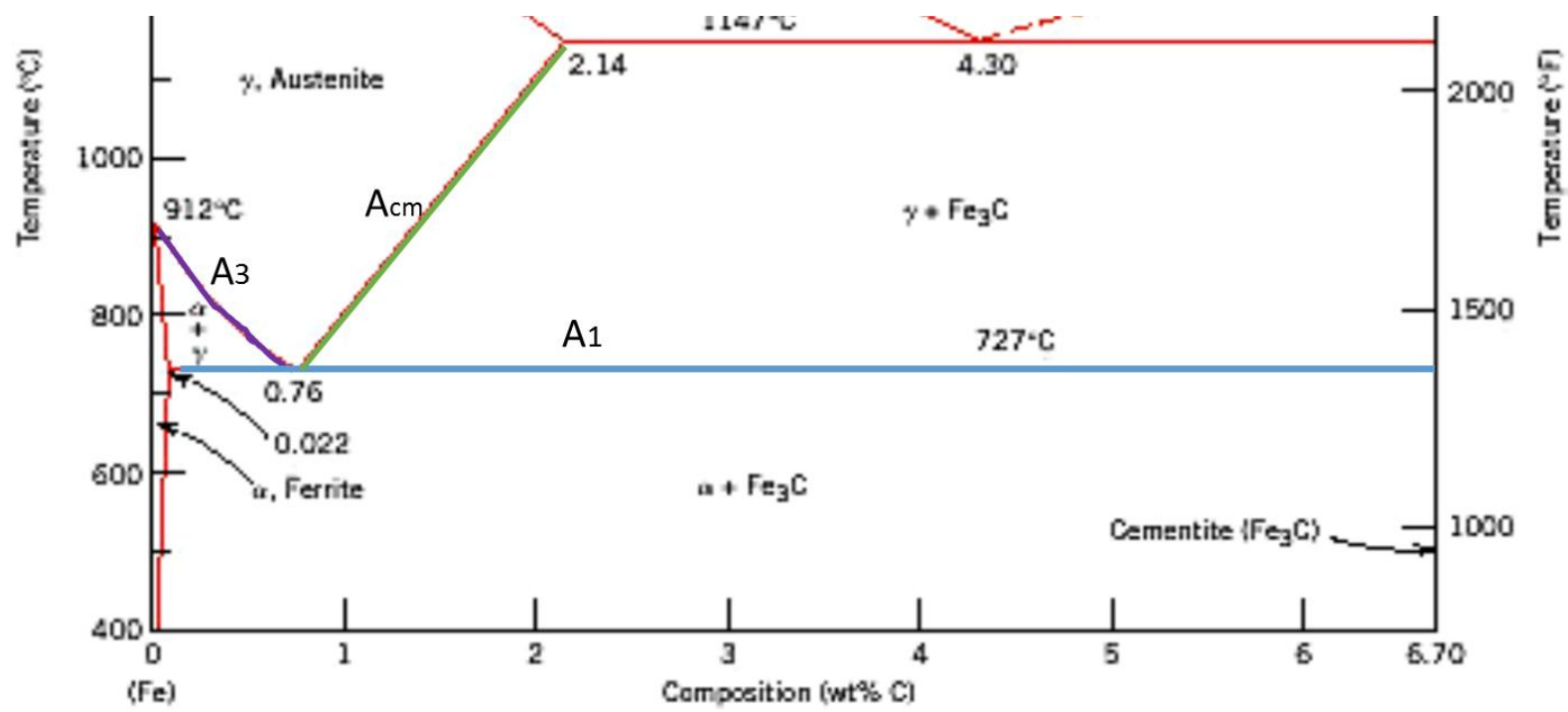


Hypo-Eutectoid Eutectoid Hyper-Eutectoid

دماهای بحرانی^۱

دماهای بحرانی که در نمودار تعادلی آهن - کربن وجود دارند و از نظر عملیات حرارتی دارای اهمیت اند عبارت‌اند از: A_1 ، مرز ناحیه دوفازی فریت - سمنتیت و یکی از نواحی دوفازی فریت - آستنیت و یا سمنتیت - آستنیت؛ A_3 ، فصل مشترک ناحیه دوفازی فریت - آستنیت و ناحیه تکفازی آستنیت؛ و A_{cm} ، که فصل مشترک بین ناحیه دوفازی سمنتیت -

آستنیت و ناحیه تکفازی آستنیت است. دماهای یاد شده تبدیل یک فاز به فاز دیگر را در شرایط تعادلی یعنی تحت شرایط گرمایش و سرمایش بسیار آهسته مشخص می‌کنند. به همین خاطر گاهی به جای حروف A_{cm} و A_3 و A_1 به ترتیب از $A_{e_{cm}}$ و A_{e_3} و A_{e_1} استفاده می‌شود. حرف e از اول کلمه تعادلی^۱ گرفته شده است.



عوامل تاثیرگذار بر جابه جایی خطوط بحرانی

۱- سرعت گرم شدن غیر تعادلی (سریع): Ac

۲- سرعت سرد شدن غیر تعادلی (سریع): Ar

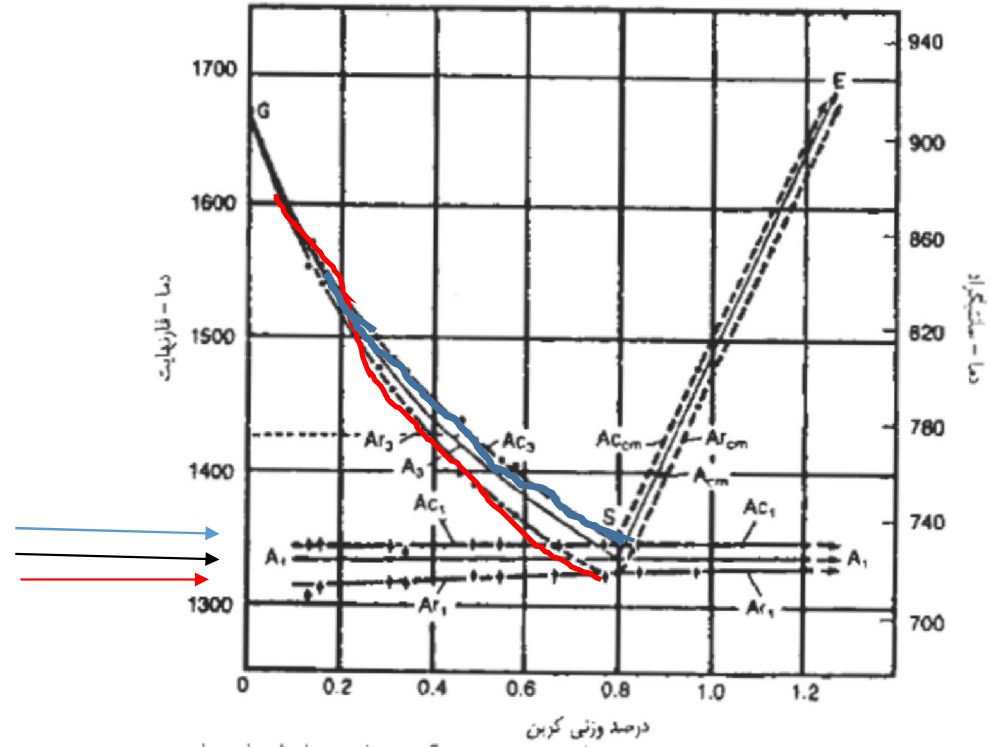
۳- حضور عناصر آلیاژی

دگرگونی‌هایی که در دماهای A_{cm} و A_3 و A_1 انجام می‌شوند تابع نفوذند (این موضوع در فصل دوم به طور کامل بحث شده است). بنابراین دماهای بحرانی تابع آهنگ گرمایش، آهنگ سرمایش و همچنین ترکیب شیمیایی فولادند. گرمایش سریع باعث می‌شود که زمان قرار گرفتن نمونه در دمای بحرانی تعادلی برای انجام نفوذ کافی نباشد و بنابراین دگرگونی در دمایی بالاتر از دمای بحرانی تعادلی انجام شود. به همین ترتیب سرمایش سریع باعث می‌شود که دگرگونی در دمایی پایینتر از دمای بحرانی تعادلی انجام شود. در نمودار تعادلی آهن - کربن، اثرات آهنگ گرمایش و آهنگ سرمایش توسط حروف قراردادی جدیدی که به ترتیب عبارت‌اند از A_c و A_r

مشخص می‌شوند. حروف قراردادی یاد شده توسط متالورژیست فرانسوی به نام اوسموند^۱ انتخاب شده و به ترتیب عبارت‌اند از حروف اول کلمات *Arret Chauffant* و *Arret Refroidissant*. بنابراین، با در نظر گرفتن اثرات آهنگ گرمایش و آهنگ سرمایش، بجز دماهای بحرانی تعادلی دو سری دیگر دماهای بحرانی در نمودار آهن - کربن وجود دارند که آنها را با علامتهای A_{cm} ، A_c ، A_3 ، A_{cm} ، A_r ، A_r و A_{r1} نشان می‌دهند. در شکل ۱-۱۰ شمایی از دماهای بحرانی تعادلی و ناتعادلی نشان داده شده است.

به طور کلی

برخی از عناصر نظیر کرم، سیلیسیم، تنگستن، مولیبدن و تیتانیوم موجب پایداری فریت و برخی دیگر نظیر نیکل و منگنز باعث پایداری آستنیت می‌شوند. از همین خاصیت استفاده شده و فولادهای فریتی و فولادهای آستنیتی تهیه می‌شود. فولادهای گروه اول حاوی مقدار ۱۱/۵ تا ۲۷ درصد کرم بوده که گاهی مقداری منگنز، سیلیسیم و یا نیکل، آلومینیم، مولیبدن و یا تیتانیوم نیز بدان اضافه می‌شود. آلیاژهای گروه دوم شامل ۱۶ تا ۲۵ درصد کرم بوده که مقداری نیز نیکل، منگنز و یا نیتروژن جهت پایدار شدن آستنیت در دمای اتاق به آنها اضافه می‌شود. شبکه بلوری فولادهای فریتی، مکعبی مرکزدار است، در حالی که شبکه بلوری فولادهای آستنیتی در دمای اتاق، مکعبی با سطح مرکزدار است.



شکل ۱-۱ دماهای بحرانی برای حالت تعادل (A)، سرمایش ناتعادلی (Ar)، و گرمایش ناتعادلی (AC). آهنگ گرمایش و سرمایش برابر $125/0$ درجه سانتیگراد در دقیقه بوده است [۱].

به طور کلی دماهای بحرانی برای یک فولاد، به کمک آزمایشهایی که بر روی آن انجام می‌گیرد تعیین می‌شوند. لیکن، فرمولهای تجربی نیز وجود دارند که اثرات عناصر آلیاژی را بر روی دماهای بحرانی مشخص می‌کنند. فرمولهای یاد شده با استفاده از اطلاعات به دست آمده از آزمونهای زیادی که بر روی فولادها با ترکیب شیمیایی مختلف انجام گرفته نوشته شده‌اند.

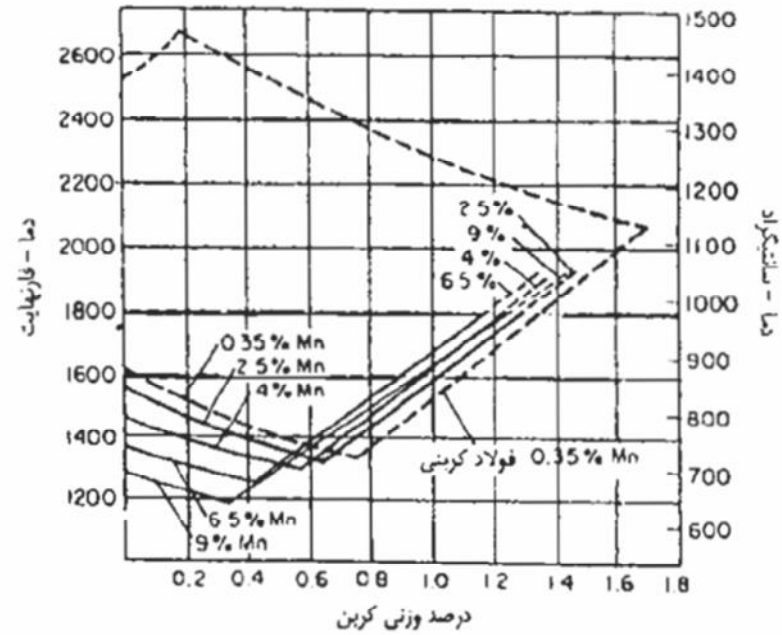
$$Ac_1 = 723 - 10.7Mn - 16.9Ni + 29.1Si + 16.9Cr + 29.0As + 6.38W$$

$$Ac_3 = 910 - 20.3C - 15.2Ni + 44.7Si + 10.4V + 31.5Mo + 13.1W$$

عناصری که پایدارکننده آستنیت‌اند دماهای بحرانی Ac_1 و Ac_3 را کاهش می‌دهند. اثرات عناصر یاد شده با علامت منفی در رابطه‌های بالا مشخص شده است. از طرف دیگر عناصری که پایدارکننده فریت یا کاربید^۱‌اند، دماهای بحرانی Ac_1 و Ac_3 را افزایش می‌دهند. اثرات این عناصر با علامت مثبت در رابطه‌های بالا مشخص شده است.

به طور کلی

برخی از عناصر نظیر کرم، سیلیسیم، تنگستن، مولیبدن و تیتانیم موجب پایداری فریت و برخی دیگر نظیر نیکل و منگنز باعث پایداری آستنیت می‌شوند. از همین خاصیت استفاده شده و فولادهای فریتی و فولادهای آستنیتی تهیه می‌شود. فولادهای گروه اول حاوی مقدار ۱۱/۵ تا ۲۷ درصد کرم بوده که گاهی مقداری منگنز، سیلیسیم و یا نیکل، آلومینیم، مولیبدن و یا تیتانیم نیز بدان اضافه می‌شود. آلیاژهای گروه دوم شامل ۱۶ تا ۲۵ درصد کرم بوده که مقداری نیز نیکل، منگنز و یا نیتروژن جهت پایدار شدن آستنیت در دمای اتاق به آنها اضافه می‌شود. شبکه بلوری فولادهای فریتی، مکعبی مرکزدار است، در حالی که شبکه بلوری فولادهای آستنیتی در دمای اتاق، مکعبی با سطوح مرکزدار است.

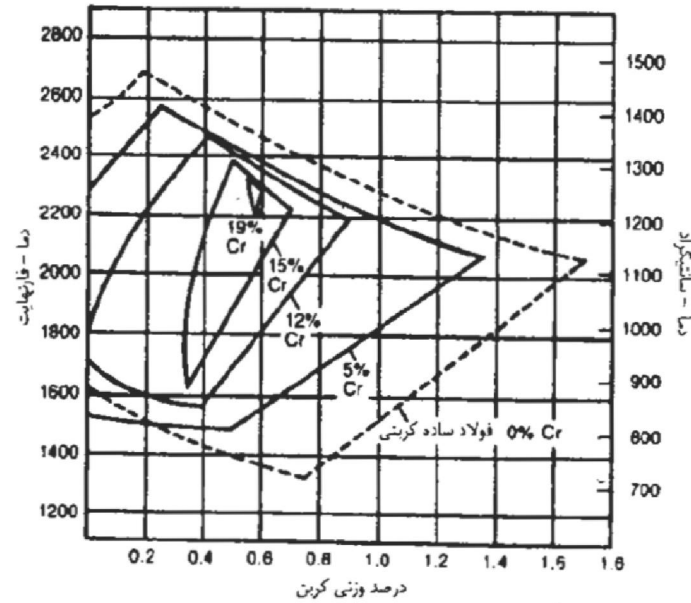


شکل ۱-۱۳ اثر منگنز بر روی وسعت ناحیه پایداری آستنیت در فولادهای کربنی

بعضی از فولادها به کمک درصد مشخصی از نیکل و یا منگنز فاز آستنیت را تا دمای اتاق می توان پایدار کرد.

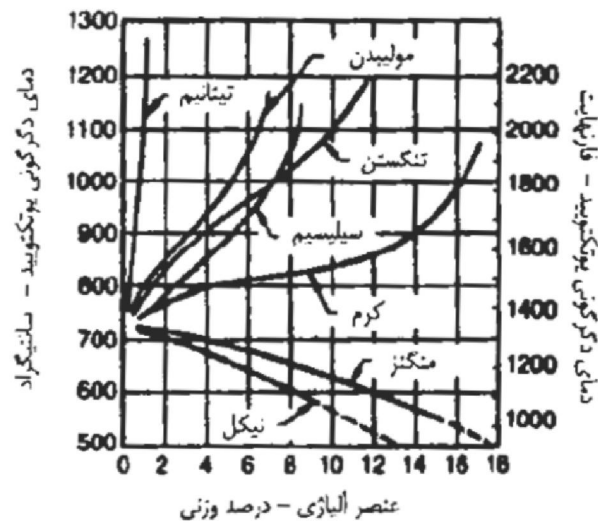
خانواده فولادهای هدفیلد

عناصر تشکیل دهنده کاربرد، نظیر تنگستن، مولیبدن، تیتانیم و کرم، دمای یوتکتوئید را افزایش داده و بنابراین ناحیه تشکیل و پایداری آستنیت را کاهش می دهند. بنابراین، این عناصر به پایدارکننده های فریت موسوم اند.



37 شکل ۱-۱۴ اثر کرم بر روی وسعت ناحیه پایداری آستنیت

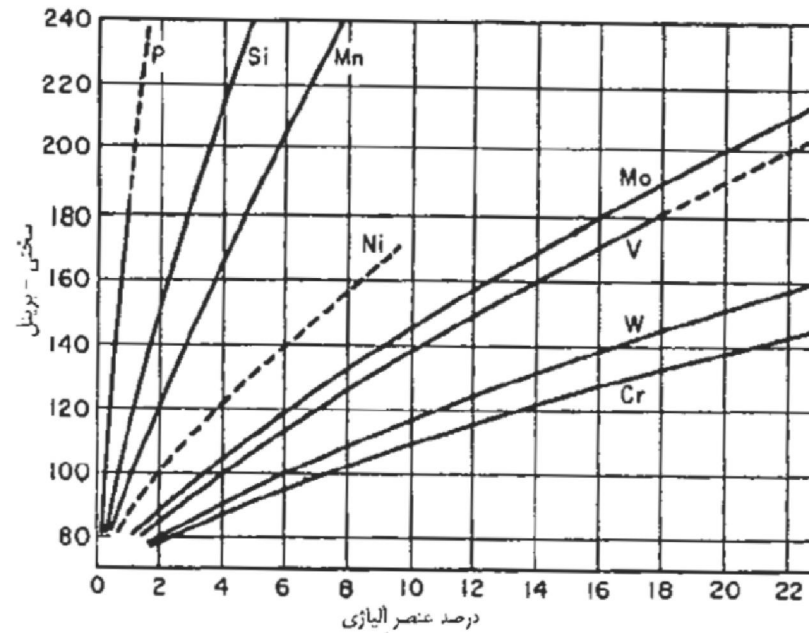
بعضی از عناصر آلیاژی، دمای یوتکتوئید را در فولادها کاهش داده و برخی آن را افزایش می دهند (شکل ۱-۱۲). منگنز و نیکل، هر دو دمای یوتکتوئید را کاهش داده و به عنوان عناصر پایدارکننده آستنیت موسوم اند.



شکل ۱-۱۲ اثر عناصر آلیاژی جانشینی بر روی دمای دگرگونی یوتکتوئید در فولاد

اثرات عناصر آلیاژی

انحلال عناصر آلیاژی در آهن آلفا با جانشین شدن اتمهای آنها به جای اتمهای آهن انجام می‌شود. از آنجایی که عناصر آلیاژی از نظر اندازه اتمی و ساختار متفاوت از آهن‌اند، موقعی که به جای اتمهای آهن قرار می‌گیرند، شبکه بلوری آهن را تحت تنش قرار داده و در نتیجه پارامتر شبکه آن را تغییر می‌دهند. هر چه تفاوت بین شعاع اتمی آهن و شعاع اتمی عنصر آلیاژی بیشتر باشد، تغییر پارامتر شبکه آهن در اثر آلیاژ شدن نیز بیشتر خواهد بود. عناصری که شعاع اتمی آنها کمتر از شعاع اتمی آهن باشد پارامتر شبکه آهن را کاهش داده و بالعکس، عناصری که شعاع اتمی آنها بیشتر از شعاع اتمی آهن باشد، پارامتر شبکه آهن را افزایش می‌دهند. طبیعی است که تغییر شکل و اندازه شبکه بلوری آهن آلفا موجب تغییر خواص مکانیکی آن خواهد شد.



شکل ۱-۱۷ اثرات احتمالی عناصر مختلف به صورت محلول در آهن خالص بر روی سختی

ترتیب افزایش اثرات عناصر آلیاژی مختلف محلول بر روی سختی فریت به صورت زیر است:
کرم، تنگستن، وانادیم، مولیبدن، نیکل، منگنز، سیلیسیم و فسفر.

از جمله مهمترین اثرات دیگر عناصر آلیاژی محلول در فریت، تأثیر آنها بر دمای تبدیل شکست ترد به نرم است. این امر استعداد فولاد در برابر شکست ترد را مشخص می‌کند. در بین شش عنصر آلیاژی (کرم، نیکل، مولیبدن، سیلیسیم، منگنز و تنگستن) که بیشترین مصرف را در فولادسازی دارند، نیکل باارزشتترین آنها شناخته شده است. این عنصر در حالی که سختی و استحکام فریت را به نحو قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد، دمای تبدیل شکست ترد به نرم را نیز کاهش خواهد داد. از سوی دیگر نیکل مقاومت به ضربه فولاد را نیز کاهش نمی‌دهد. در حالی که عناصر آلیاژی دیگر بدون کاهش مقاومت به ضربه، اثرات ضعیفی بر روی افزایش استحکام فریت داشته و یا اینکه استحکام را به نحو قابل توجهی افزایش داده ولی در عین حال مقاومت به ضربه فریت را نیز شدیداً کاهش می‌دهند (نظیر موقعی که درصد منگنز بیشتر از ۱ تا ۱/۵ درصد و یا درصد سیلیسیم بیشتر از ۰/۵ درصد باشد).

تأثیر عناصر آلیاژی

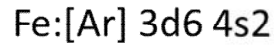
تغییر سختی و استحکام

۱- در صورتی که حل شوند مکانیزم استحکام بخشی محلول جامد را داریم.

۲- در صورتی رسوب یا کاربرد ایجاد شود (حل نشود) مکانیزم استحکام بخشی رسوب سختی را داریم.

شرط ایجاد محلول جامد

- ۱- اختلاف شعاع اتمی عنصر حل شونده و ماتریس کمتر از ۸ درصد نسبی باشد.
- ۲- شبکه بلوری یکسان داشته باشد.
- ۳- الکترونگاتیویته یکسان یا نزدیک به هم داشته باشند.
- ۴- ظرفیت الکترونی شبیه به هم داشته باشند.



فاز کاربرد در فولادهای آلیاژی

فاز کاربرد در فولادها فقط توسط فلزاتی که در جدول تناوبی عناصر در سمت چپ آهن و پایین آن (از Mn تا Hf) قرار دارند تشکیل می شود

Periodic Table of the Elements

Legend:

- Alkali Metals
- Alkaline Earth Metals
- Transition Metals
- Other Metals
- Nonmetals
- Noble Gases
- Inner Transition Metals

States:

- Gaseous State
- Liquid State
- Solid State
- Synthetically Prepared

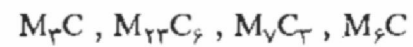
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| IA H 1.0079 | IIA Li 6.941 | III Be 9.0122 | IIIB Na 22.990 | IVB Mg 24.305 | V K 39.098 | VI Ca 40.08 | VII Sc 44.956 | VIII Ti 47.88 | IX V 50.941 | X Cr 51.996 | XI Mn 54.938 | XII Fe 55.847 | XIII Co 58.933 | XIV Ni 58.71 | XV Cu 63.546 | XVI Zn 65.38 | XVII Ga 69.72 | XVIII Ge 72.59 | XIX As 74.922 | XX Se 78.96 | XXI Br 79.904 | XXII Kr 83.80 | XXIII Rb 85.468 | XXIV Sr 87.62 | XXV Y 88.906 | XXVI Zr 91.22 | XXVII Nb 92.906 | XXVIII Mo 95.94 | XXIX Tc (98) | XXX Ru 101.07 | XXXI Rh 102.91 | XXXII Pd 106.4 | XXXIII Ag 107.87 | XXXIV Cd 112.41 | XXXV In 114.82 | XXXVI Sn 118.69 | XXXVII Sb 121.75 | XXXVIII Te 127.60 | XXXIX I 126.90 | XL Xe 131.30 | XXLI Cs 132.91 | XXLII Ba 137.33 | XXLIII La 138.91 | XXLIV Hf 178.49 | XXLV Ta 180.95 | XXLVI W 183.85 | XXLVII Re 186.21 | XXLVIII Os 190.2 | XXLVIX Ir 192.22 | XXL Pt 195.09 | XXLI Au 196.97 | XXLII Hg 200.59 | XXLIII Tl 204.37 | XXLIV Pb 207.2 | XXLV Bi 208.98 | XXLVI Po (209) | XXLVII At (210) | XXLVIII Rn (222) |
| Lanthanide Series | | 57 La 138.91 | 58 Ce 140.12 | 59 Pr 140.91 | 60 Nd 144.24 | 61 Pm (145) | 62 Sm 150.4 | 63 Eu 151.96 | 64 Gd 157.25 | 65 Tb 158.93 | 66 Dy 162.50 | 67 Ho 164.93 | 68 Er 167.26 | 69 Tm 168.93 | 70 Yb 173.04 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Actinide Series | | 89 Ac (227) | 90 Th 232.04 | 91 Pa 231.04 | 92 U 238.03 | 93 Np 237.05 | 94 Pu (244) | 95 Am (243) | 96 Cm (247) | 97 Bk (247) | 98 Cf (251) | 99 Es (254) | 100 Fm (257) | 101 Md (258) | 102 No (259) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

*Name Not Officially Assigned

نتایج حاصل از مطالعه کاربردهای مختلف نشان می‌دهد که، عناصری که در جدول تناوبی بیشتر به سمت چپ باشند
تمایل بیشتری به تشکیل کاربید داشته و کاربردهای پایدارتری را نیز تشکیل می‌دهند.

در حقیقت فقط شش نوع کاربید با فرمولهای زیر در فولادها تشکیل می‌شود.

کاربیدهای گروه I



کاربیدهای گروه II (فازهای بین‌نشینی)



در این فرمولها، M مجموع عناصر فلزی تشکیل‌دهنده کاربید است. ضرایب مشخص شده در فرمولهای بالا، نسبت بین عنصر فلزی و کربن را برای حالتی که شبکه کاربید تغییر شکل نداده باشد (تحت تنش نباشد) مشخص می‌کند.

براساس نتایج حاصل از مطالعات انجام شده، ترکیبات کاربیدی زیر می توانند در فولادها تشکیل شوند.

کاربیدهای گروه I



کاربیدهای گروه II (فازهای بین نشینی)



وانادیم، تیتانیم و کلمبیم عناصر کاربیدساز بسیار قوی بوده و عمدتاً در

فولادها به صورت کاربید یافت می‌شوند. اگر در فولاد نیتروژن به اندازه کافی وجود داشته باشد،
مقداری نیتريد^۱ کلمبیم نیز تشکیل می‌شود. آلومینیم با اکسیژن و نیتروژن فولاد ترکیب شده و به
ترتیب تشکیل اکسید آلومینیم (Al_2O_3) و نیتريد آلومینیم (AIN) می‌کند.

لیکن، کاربیدهای یاد شده نمی‌توانند به صورت آزاد در فولادها تشکیل شوند. تمامی کاربیدهای عناصر آلیاژی، حاوی مقداری آهن به صورت محلول‌اند. همچنین در صورت وجود عناصر آلیاژی کاربیدساز دیگر، این عناصر نیز در ترکیب و ساختار کاربید موجود وارد می‌شوند. به عنوان مثال، در فولاد کرم - منگنز، به جای کاربید کرم خالص (Cr_{23}C_6)، کاربید کمپلکسی از آهن، کرم و منگنز به صورت $(\text{Cr, Mn, Fe})_{23}\text{C}_6$ تشکیل خواهد شد.

کاربیدهایی که دارای فرمول شیمیایی یکسان باشند، متقابلاً در یکدیگر محلول‌اند. بنابراین، اگر به عنوان مثال، به یک فولاد به صورت هم‌زمان عناصر تیتانیم و نیوبیم اضافه شود، به جای تشکیل کاربیدهای مستقل و مجزای تیتانیم و نیوبیم، کاربید کمپلکسی از عناصر فوق تشکیل خواهد شد. به همین دلیل، تعداد و انواع کاربیدهایی که احتمال تشکیل آنها در فولادهای آلیاژی وجود دارد کمتر از آنچه قبلاً اشاره شد، است.

کاربیدهای گروه I دارای شبکه بلوری پیچیده‌اند. معمولترین کاربیدها از این نوع، سمنتیت است.

از جمله مشخصه‌های کاربیدهای

گروه II (فازهای بین‌نشینی) شبکه بلوری ساده آنهاست. شبکه بلوری این کاربیدها، همواره با کمبود کربن روبرو است.

تذکر این نکته ضروری است که کاربیدهای گروه II به سختی در آستنیت حل می‌شوند. به عبارت دیگر، در اثر حرارت دادن، حتی تا ده‌های خیلی بالا، کاربیدهای یاد شده در آستنیت حل نخواهند شد. از این رو، این کاربیدها را به راحتی می‌توان از کاربیدهای گروه I که در اثر حرارت دادن به سادگی در آستنیت حل می‌شوند، تشخیص داد. تمامی کاربیدها دارای نقطه ذوب و سختی بالایی‌اند. در این رابطه، کاربیدهای گروه II به کاربیدهای گروه I برتری دارند.

1-steel/TiC

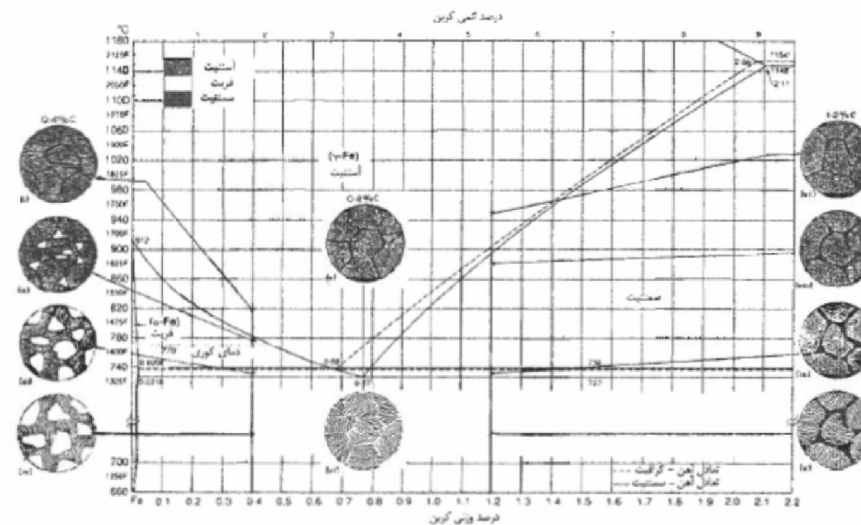
2- steel/Cr₂₃C₆

فصل دوم

فازها و ساختارهای تعادلی

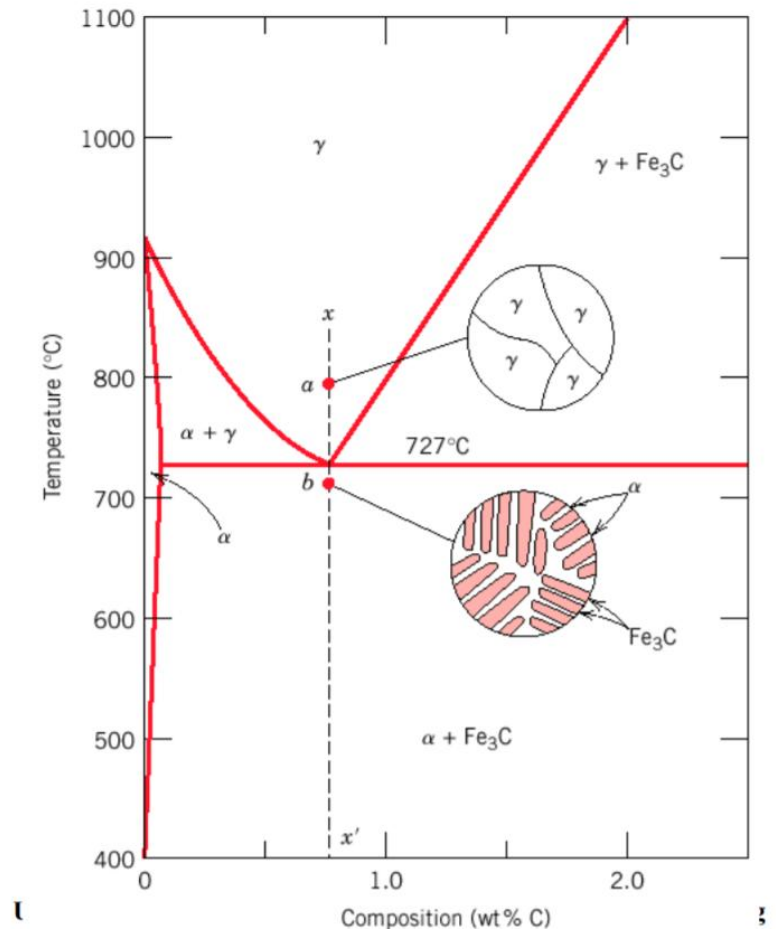
دگرگونی یونکتوییدی

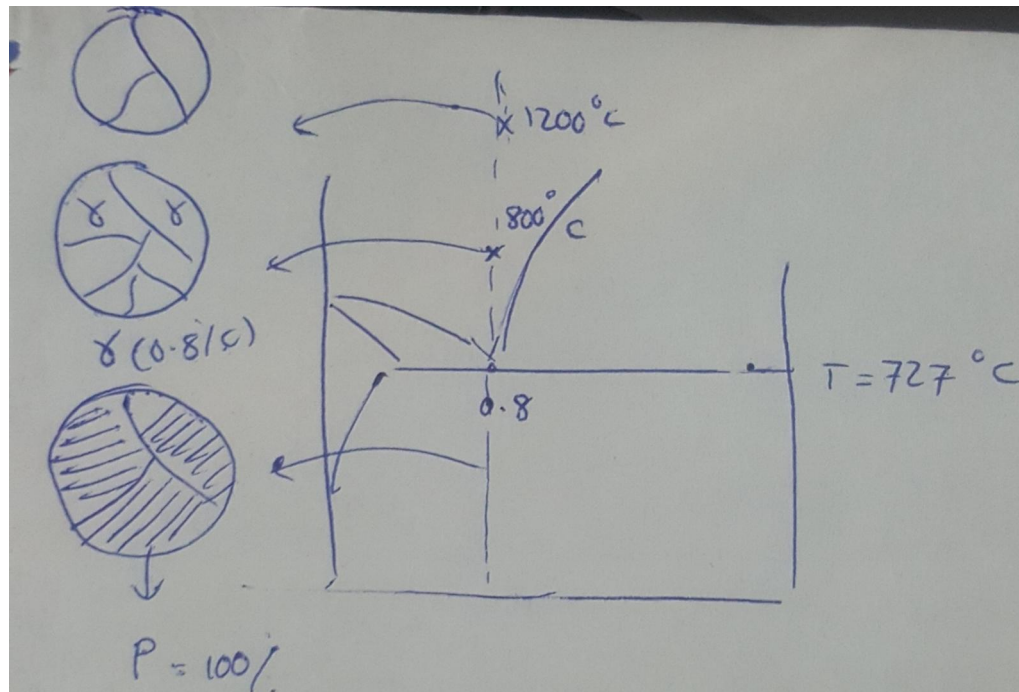
نمودار تعادلی آهن - کربن که در فصل اول معرفی شد، پایه و اساس مطالعه دگرگونی فازها در فولادها را تشکیل می‌دهد. شکل ۱-۲ قسمتی از نمودار آهن - کربن نشان داده شده در شکل ۲-۱ را با مقیاس بزرگتر نشان می‌دهد. در این شکل ناحیه مربوط به دگرگونی آستنیت و میکروساختارهای حاصل از آهسته سرد شدن آن نشان داده شده‌اند.



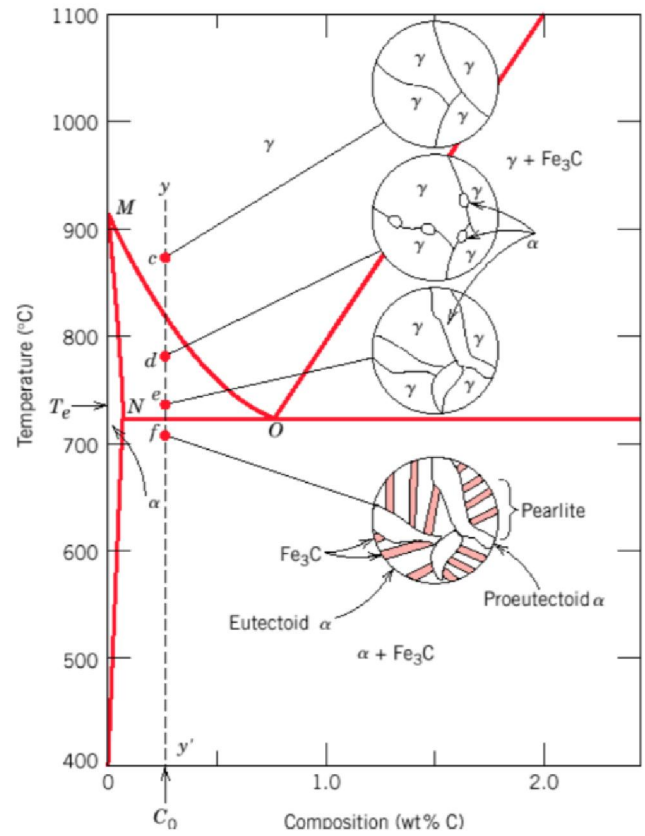
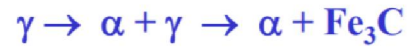
شکل ۱-۲ بخشی از نمودار تعادلی آهن - کربن که دگرگونی یونکتوییدی و تشکیل فازهای فریت پرویونکتوییدی و سمنتیت پرویونکتوییدی را مشخص می‌کند [۱ و ۲].

Microstructure of eutectoid steel (I)



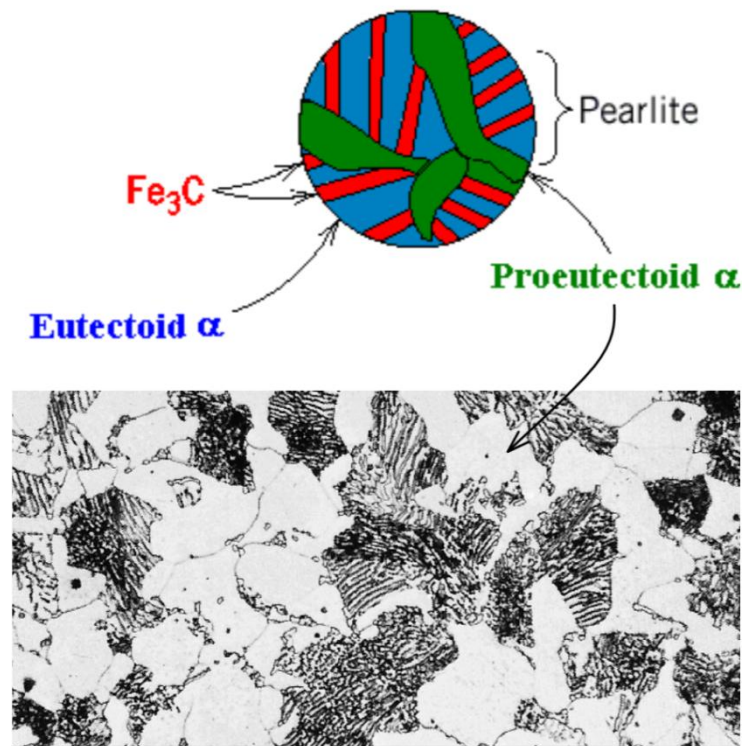


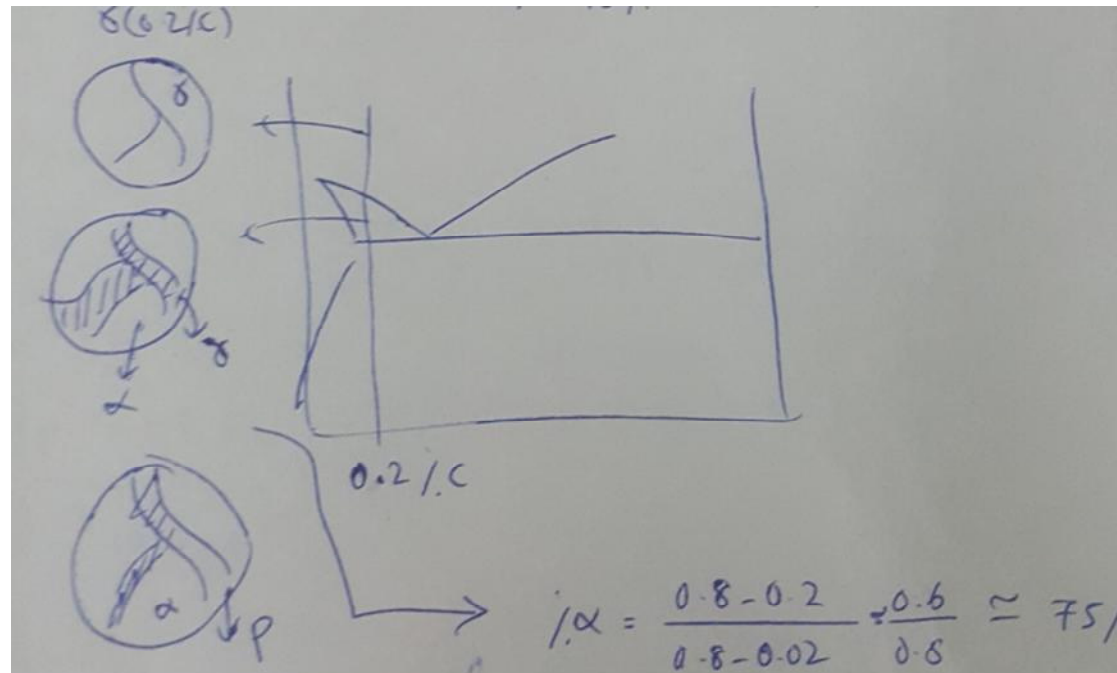
hypoeutectoid (*less than eutectoid* -Greek) alloys.



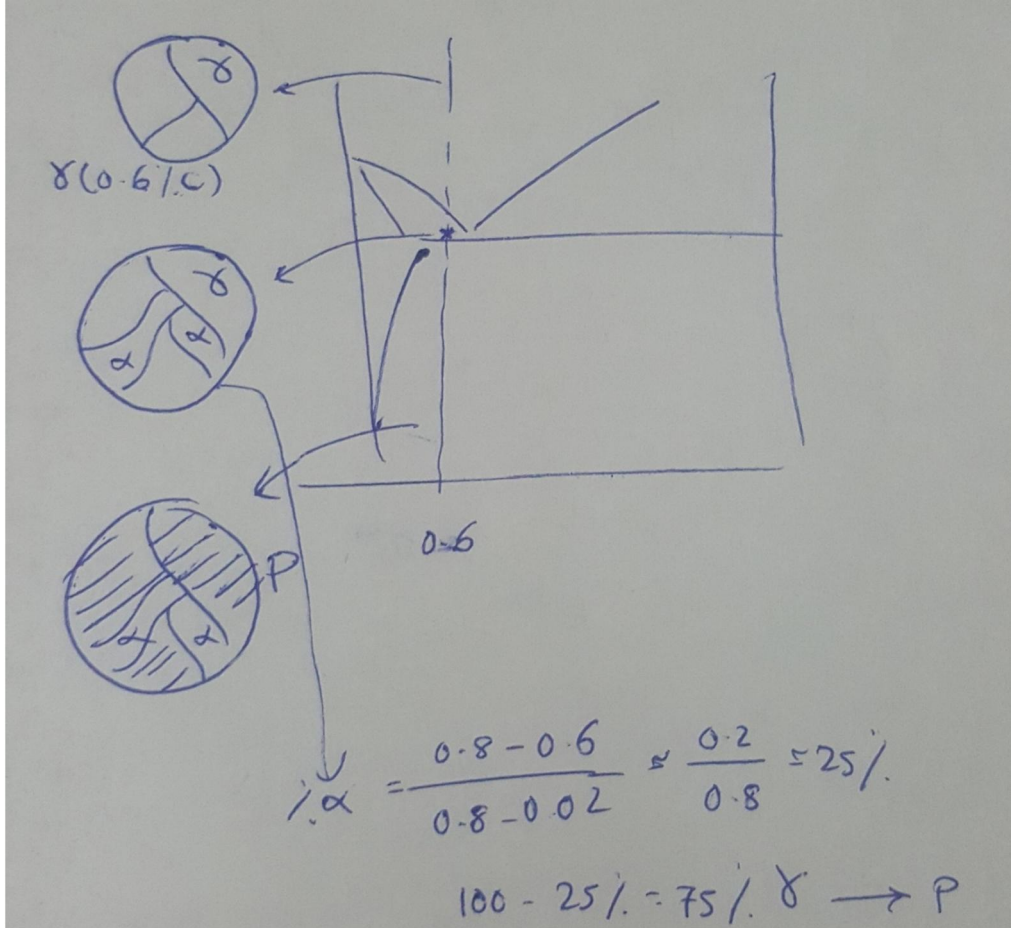
Microstructure of hypoeutectoid steel (II)

Hypoeutectoid alloys contain proeutectoid ferrite (formed above the eutectoid temperature) plus the eutectoid perlite that contain eutectoid ferrite and cementite.



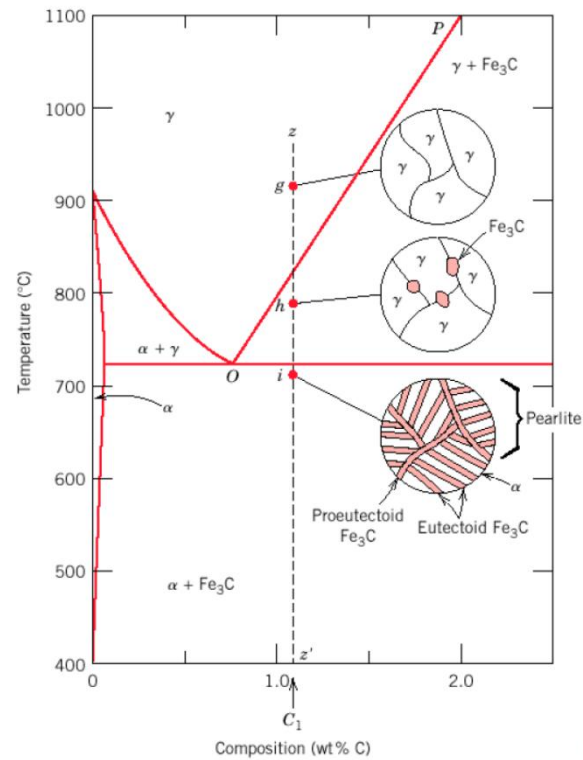


% γ or P=25%



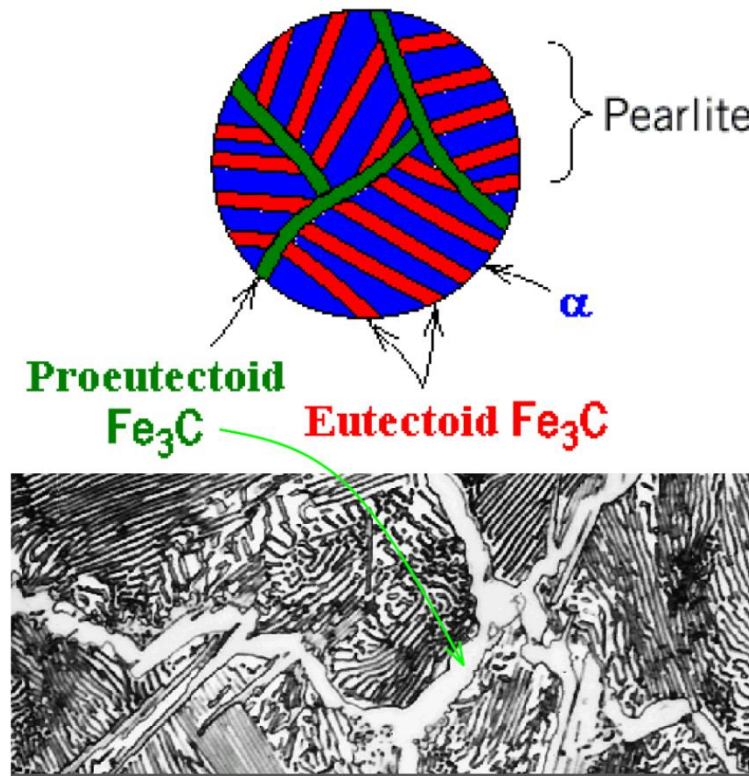
Microstructure of hypereutectoid steel (I)

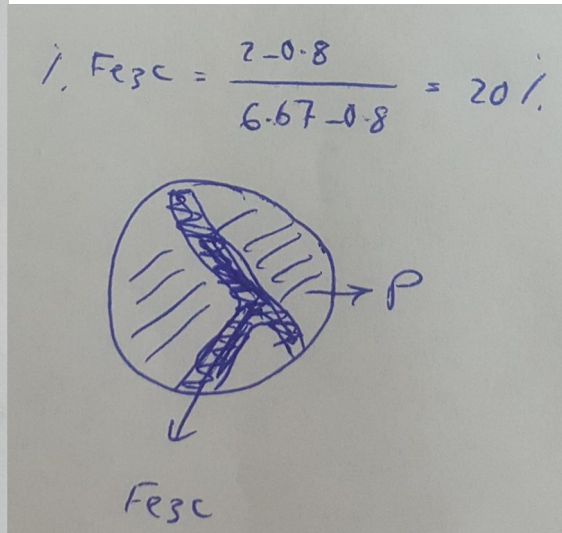
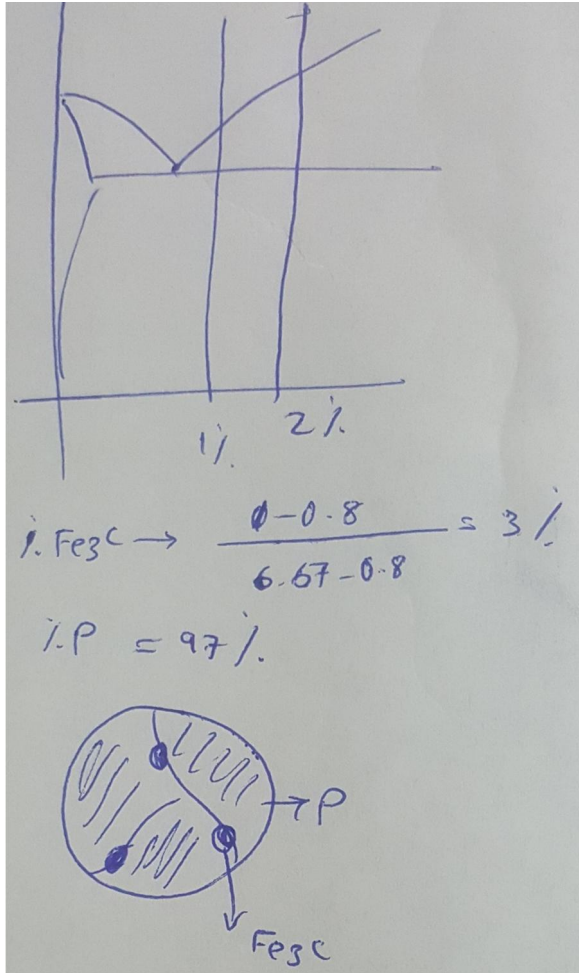
Compositions to the right of eutectoid (0.76 - 2.14 wt % C)
hypereutectoid (*more than eutectoid* -Greek) alloys.



Microstructure of hypereutectoid steel (II)

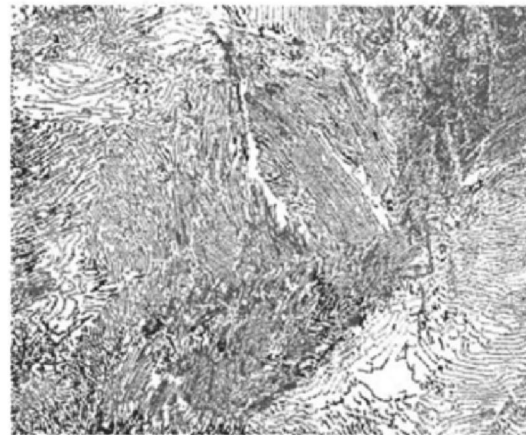
Hypereutectoid alloys contain proeutectoid cementite (formed above the eutectoid temperature) plus pearlite that contain eutectoid ferrite and cementite.





ساختار پرلیت

محصول دگرگونی یوتکتوئید در فولادها، میکروساختار منحصر به فردی موسوم به پرلیت است. پرلیت از لایه‌های متناوب فریت و سمنتیت تشکیل شده و مشابه اثر انگشت بر روی کاغذ است (شکل ۲-۱ و ۲-۲). به بیان دیگر، ساختار پرلیت توسط دسته‌هایی^۲ از لایه‌های متناوب فریت و سمنتیت با فواصل و جهات مختلف مشخص می‌شود.

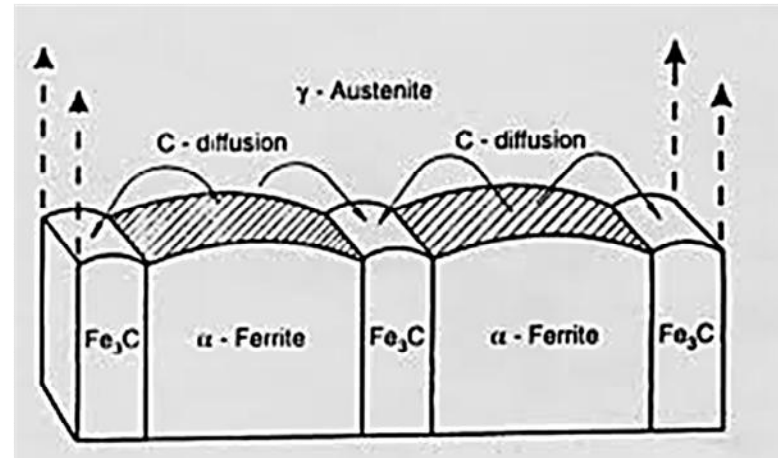
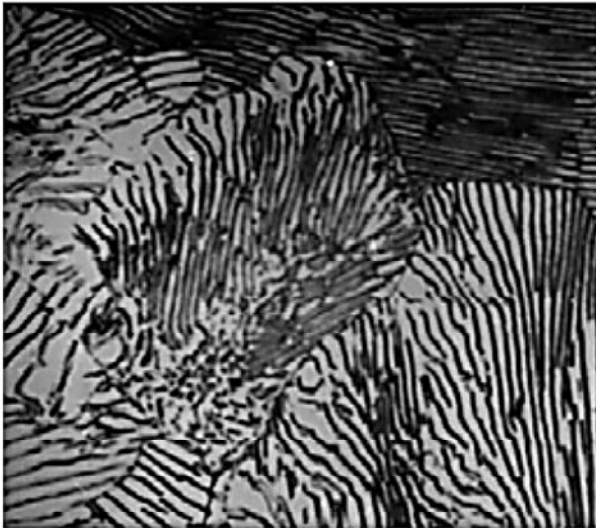


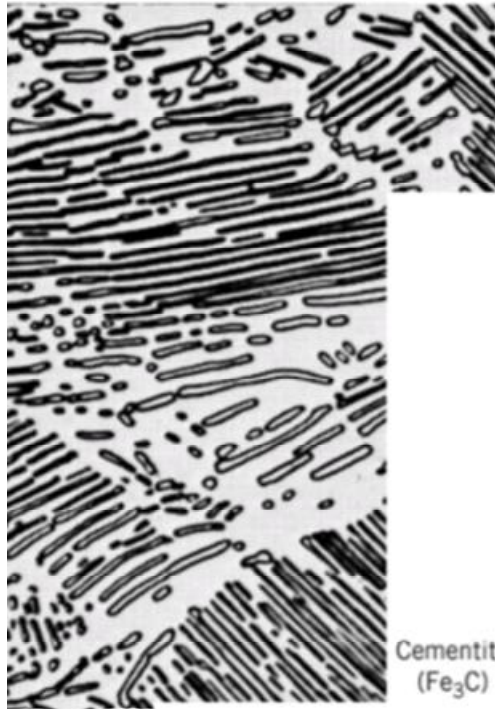
شکل ۲-۲ میکروساختار پرلیت مربوط به آلیاژ $0.75\% \text{C} / \text{Fe}$ که پس از آستنیت‌شدن در کوره سرد شده است. محلول حکاکی، پیکرال، بزرگنمایی $500 \times$ [۱].

اهرم می توان برای آلیاژ $0.77\%C-Fe$ که کاملاً به پرلیت تبدیل می شود نشان داد:
در دمای یوتکتوئید

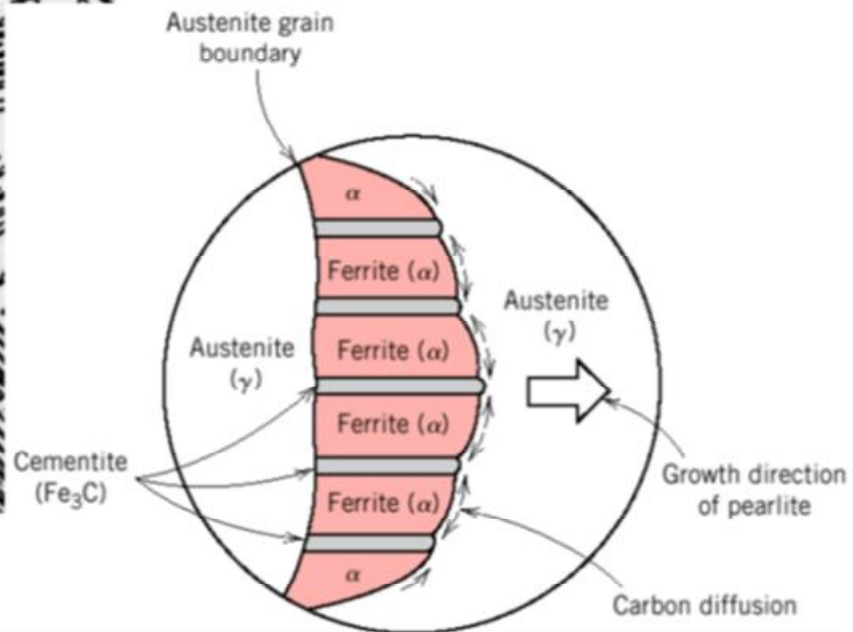
$$\text{درصد وزنی سمنتیت در پرلیت} = \frac{0.77 - 0.02}{6.67 - 0.02} \times 100 = 11.3 \quad (2-2)$$

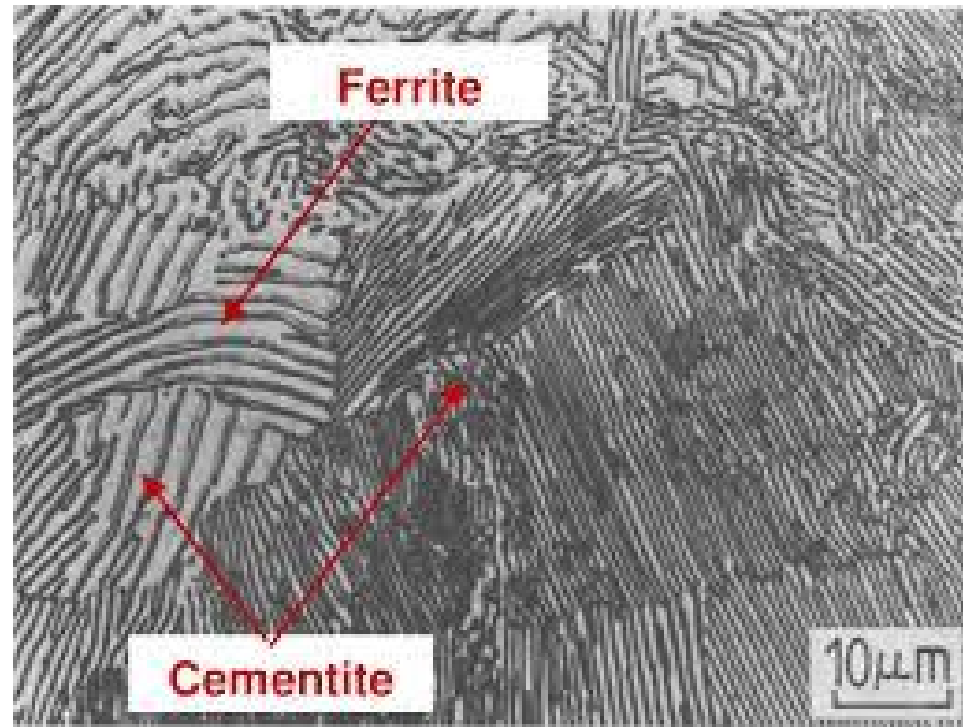
$$\text{درصد وزنی فریت در پرلیت} = \frac{6.67 - 0.77}{6.67 - 0.02} \times 100 = 88.7 \quad (3-2)$$





In the micrograph, the dark areas are Fe_3C layers, the light phase is α -ferrite





مکانیزم تشکیل پرلیت

تشکیل پرلیت از آستنیت به وسیله جوانه‌زنی و رشد انجام می‌شود.

اگر آستنیت همگن باشد (یکنواخت از

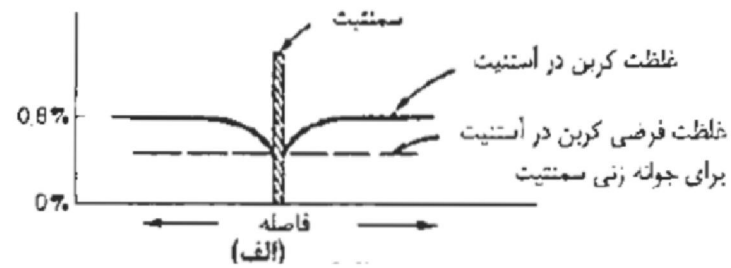
نظر ترکیب شیمیایی) جوانه‌زنی عمدتاً در مرز دانه‌ها انجام می‌شود. در صورتی که آستنیت همگن نباشد مثلاً در داخل دانه‌های آستنیت شیب غلظتی و یا ذرات کاربید آهن وجود داشته باشد، جوانه‌زنی پرلیت نه تنها در مرز دانه‌ها بلکه در داخل دانه‌ها نیز انجام می‌شود.

مکانیزم تشکیل پرلیت فقط براساس حدس و تصور است.

بر طبق پیشنهاد مهل^۱، فرض می‌شود که اولین جوانه فعال پرلایت یک لایه بسیار نازک و کوچک سمنتیت باشد که در مرز دانه آستنیت تشکیل شده و به داخل یکی از دانه‌ها رشد می‌کند. همچنان که این صفحه کوچک که در شکل ۲-۴ (الف) نشان داده شده است از ضخامت و طول رشد می‌کند، اتمهای کربن موجود در آستنیت در اطراف خود را جذب می‌نماید. در نتیجه غلظت کربن آستنیت در مجاورت لایه سمنتیت افت کرده و سرانجام یک شیب غلظتی کربن، مانند حالت نشان داده شده در شکل ۲-۵ (الف) به وجود می‌آید.



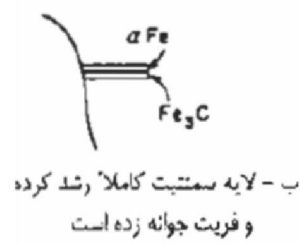
شکل ۲-۴



شکل ۲-۵

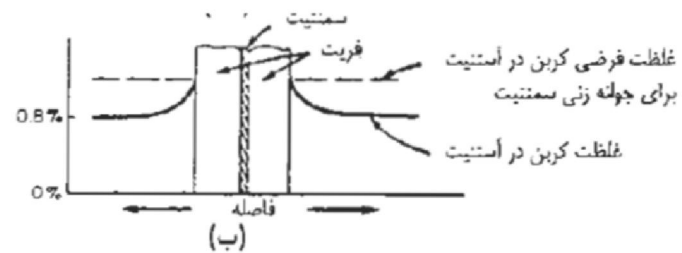
موقعی که درصد کربن در

ناحیه‌ای از آستنیت که در مجاورت سمنتیت است، به یک مقدار تقریباً ثابت و در حدود غلظت کربن در فریت (۰/۰۲ درصد) رسید جوانه‌های فریت به وجود آمده و در امتداد ورقه‌های سمنتیت رشد می‌کنند (شکل ۲-۴(ب)). از آنجایی که فریت دارای درصد بسیار کمی کربن (۰/۰۲ درصد) است، رشد لایه‌های فریت همراه با افزایش درصد کربن در فصل مشترک فریت - آستنیت است (شکل ۲-۵(ب)).



ب - لایه سمنتیت کاملاً رشد کرده و فریت جوانه زده است

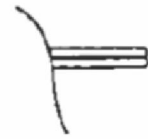
شکل ۲-۴



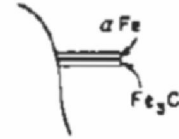
شکل ۲-۵

افزایش کربن در این محلها آنقدر ادامه می‌یابد تا اینکه

جوانه‌های جدید سمنتیت به وجود آید. رشد لایه‌های جدید سمنتیت به نوبه خود منجر به تشکیل لایه‌های جدید فریت می‌شود. با ادامه فرایند یادشده، لایه‌های متناوب مربوط به یک دسته پرلیت تشکیل خواهد شد (شکل ۲-۴).



ج - لایه فریت کاملاً رشد کرده و سمنتیت جوانه زده است



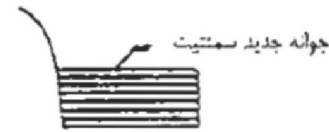
ب - لایه سمنتیت کاملاً رشد کرده و فریت جوانه زده است



الف - چولته اولیه سمنتیت

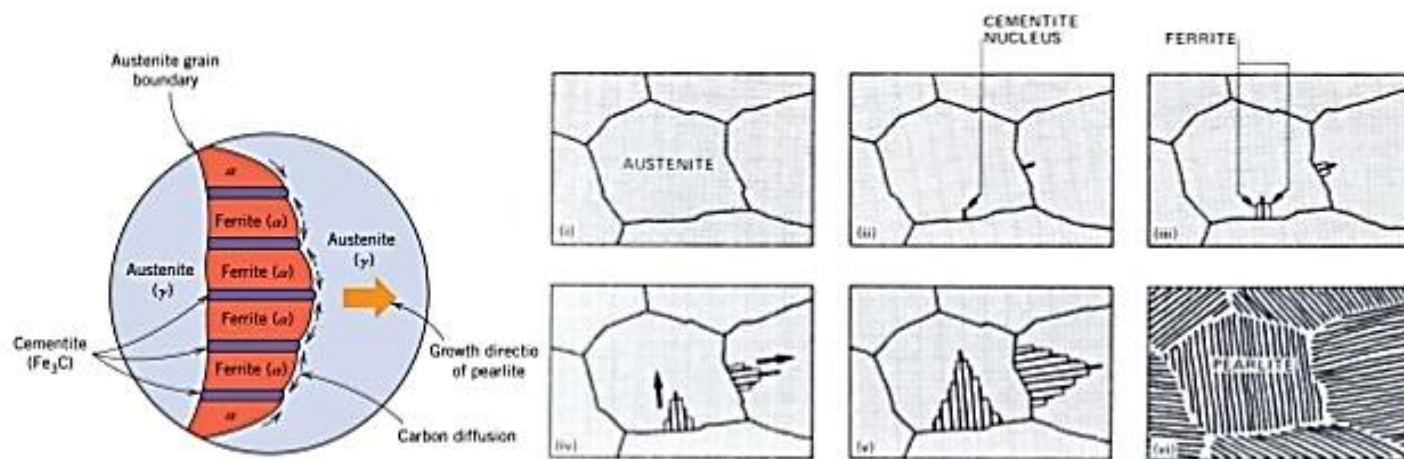


ه - دسته جدید پرلیت که به دنبال دسته اولیه پرلیت رشد کرده است



د - چولته جدید سمنتیت با جهت رشد متفاوت که در فصل مشترک اولیه دسته پرلیت و آستنیت به طور مورب چولته زده است

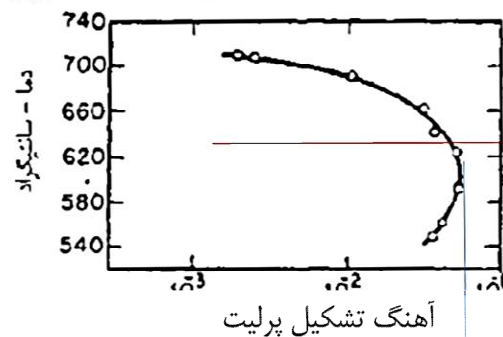
Nucleation and Growth of Pearlite



اثر دما بر دگرگونی پرلیتی

در عمل، تشکیل پرلیت به ندرت در حوالی دمای A_1 انجام می‌شود.

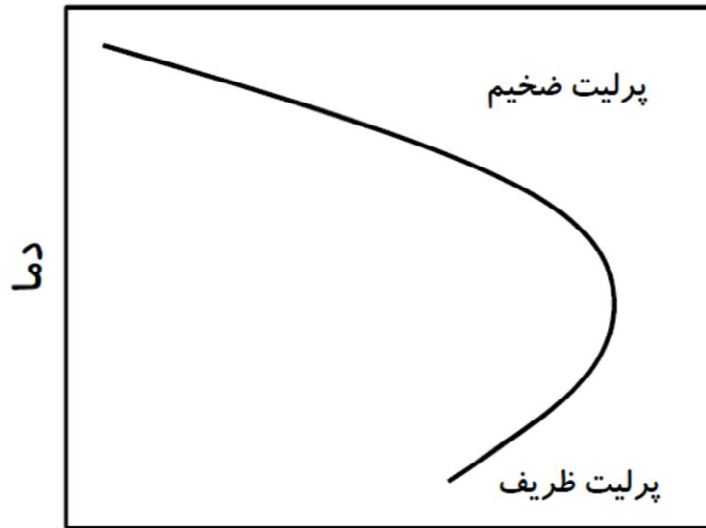
در ماهایی درست زیر دمای A_1 ، با کاهش دما آهنگ رشد پرلیت سریعاً افزایش می‌یابد و در 600°C درجه سانتیگراد به حداکثر مقدار رسیده و در دماهای پایتتر، مجدداً کاهش می‌یابد.



آهنگ جوانه زنی کم اما آهنگ رشد بالا

آهنگ جوانه زنی زیاد اما آهنگ رشد کم

ماکزیمم آهنگ تشکیل پرلیت

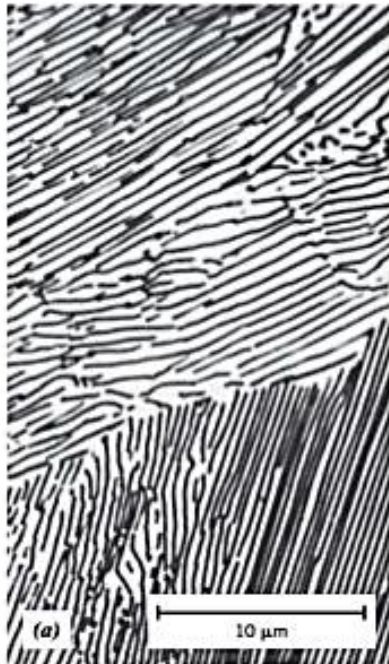


سرعت تشکیل پرلیت

آهنگ جوانه زنی کم اما آهنگ رشد بالا
طول لایه های پرلیتی بلند

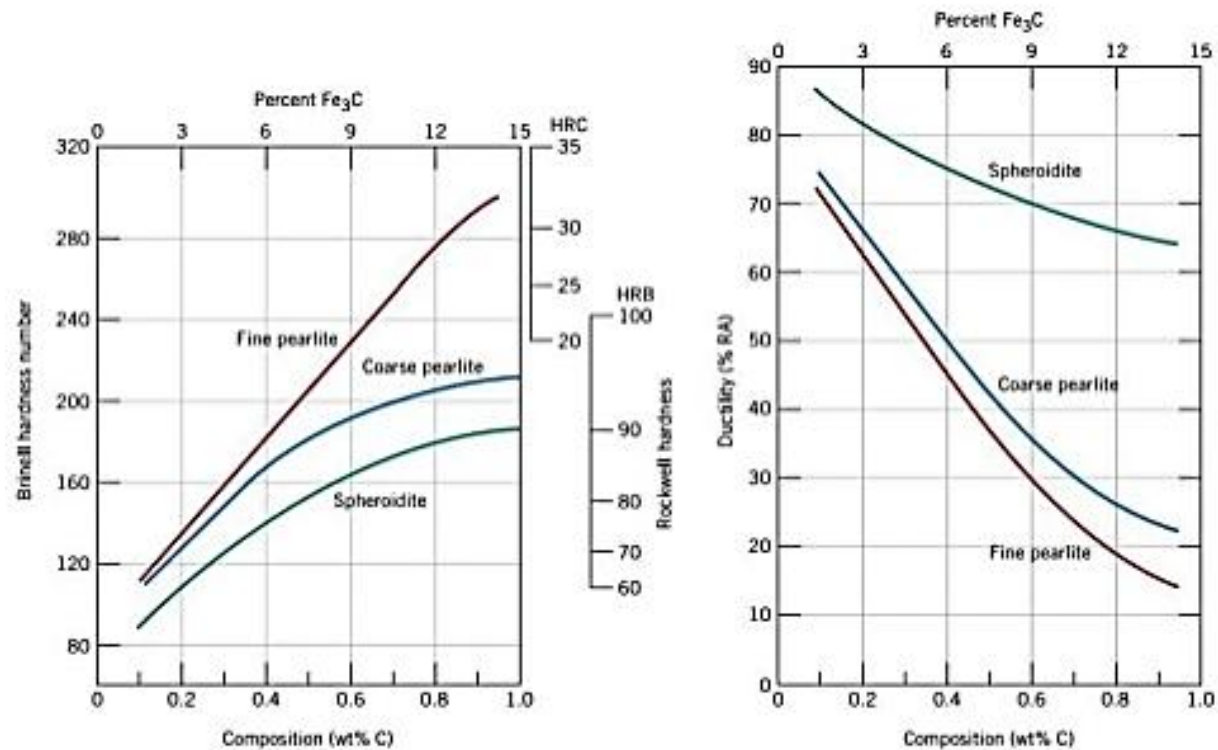
آهنگ جوانه زنی زیاد اما آهنگ رشد کم
طول لایه های پرلیتی کوتاه

Coarse and Fine Pearlite



- Thickness ratio of ferrite and cementite is 8:1, depends on temperature.
- At high T, thick layers of ferrite and Fe_3C → **Coarse Pearlite**.
 - B/c diffusion rate are very high
→ C atoms can diffuse relatively long distances → thick lamellae
- At low T, thin layers of ferrite and Fe_3C → **Fine Pearlite**.
 - B/c C diffusion rate dec

Mechanical Behavior of Pearlite



مقدار تشکیل پرلیت در یک دمای ثابت

در یک دمای ثابت، مقدار آستنیت تبدیل شده به پرلیت را می توان با استفاده از رابطه مهل^۱ و جانسون^۲ به صورت زیر مشخص کرد.

$$f(t) = 1 - \exp\left[\frac{-NG^3 t^4}{3}\right] \quad (6-2)$$

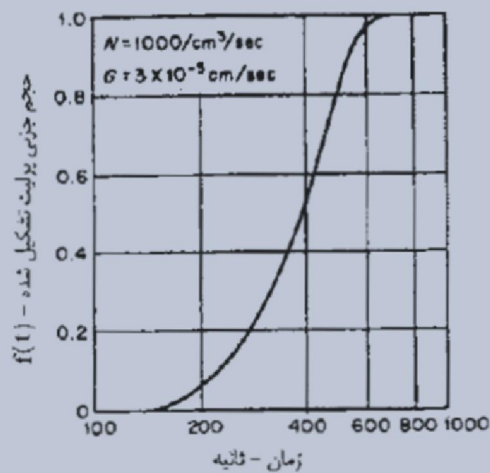
$$G: \frac{cm}{s}$$

$$N: \frac{No}{s.cm^3}$$

در این رابطه فرض شده است که آهنگ جوانه زنی (N) در هر دما ثابت باشد، تشکیل جوانه های پرلیت به صورت اتفاقی باشد و کره های پرلیت در حال رشد همچنان به صورت کروی باقی بمانند. در این رابطه: $f(t)$ ، حجم جزئی پرلیت تشکیل شده در یک زمان مشخص t و در یک دمای ثابت T است. N و G ، به ترتیب آهنگ جوانه زنی و آهنگ رشد کره های پرلیت به داخل آستنیت در دمای دگرگونی (T) است که از شکل ۲-۹ به دست می آیند.

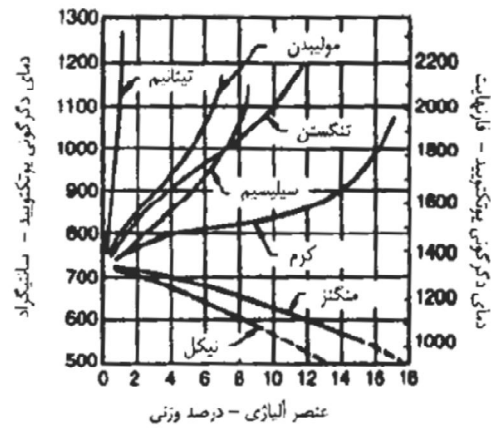
در یک دمای ثابت، $f(t)$

برحسب تابعی از زمان به صورت یک منحنی S شکل در می آید (شکل ۲-۱۰).



شکل ۲-۱۰ حجم چیزی پرلیت تشکیل شده برحسب زمان، منحنی فوق با استفاده از رابطه (۲-۶) رسم شده است [۹].

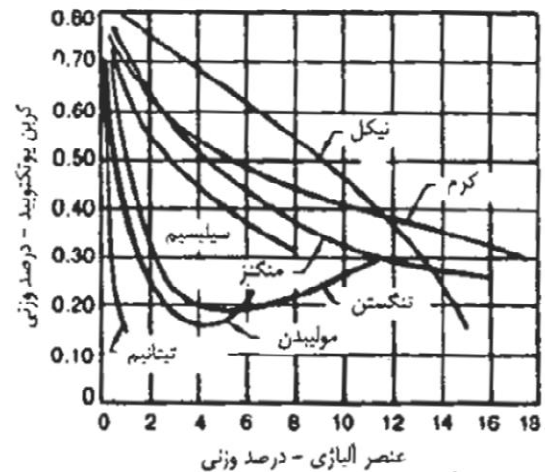
دمای نقطه یوتکتوئید بعضی از عناصر آلیاژی، دمای یوتکتوئید را در فولادها کاهش داده و برخی آن را افزایش می دهند (شکل ۱-۱۲). منگنز و نیکل، هر دو دمای یوتکتوئید را کاهش داده و به عنوان عناصر پایدارکننده آستنیت موسوم اند.



شکل ۱-۱۲ اثر عناصر آلیاژی جانشینی بر روی دمای دگرگونی یوتکتوئید در فولاد

میزان کربن نقطه یوتکتوئید

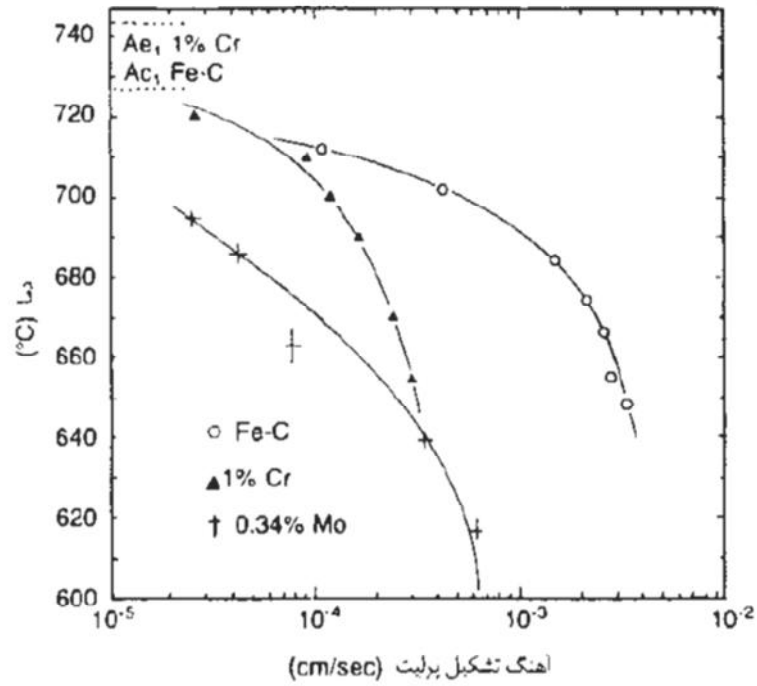
همان گونه که در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است، تمام عناصر آلیاژی که به صورت جانشینی در فولادها وارد می‌شوند نظیر نیکل، کرم، سیلیسیم، منگنز، تنگستن، مولیبدن و تیتانیم، درصد کربن نقطه یوتکتوئید را کاهش می‌دهند. در این رابطه، تیتانیم، تنگستن و مولیبدن بیشترین اثر را داشته، در حالی که نیکل و کرم، کمترین اثر را دارند.



شکل ۱-۱۱ اثر عناصر آلیاژی جانشینی بر روی درصد کربن نقطه یوتکتوئید فولاد

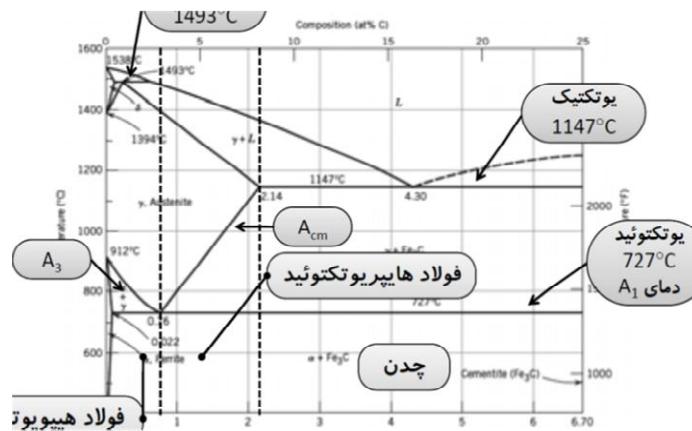
تأثير عناصر آلياژی بر سرعت تشکیل پرليت

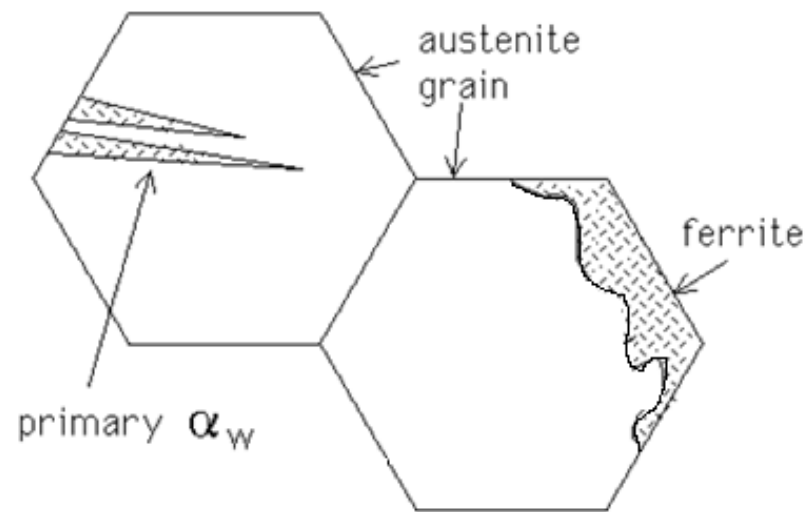
همه عناصر آلياژی آهنگ رشد پرليت را کاهش می دهند.



فاز پرویوتکتوئید

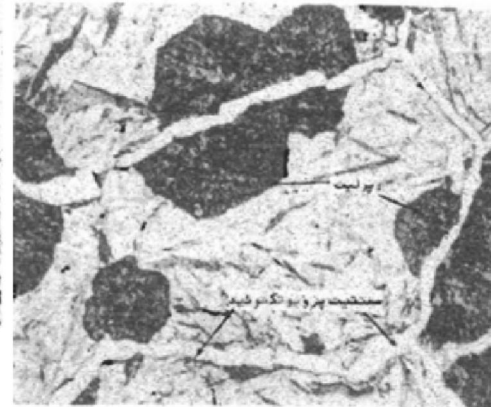
بر اساس سرد شدن در منقطه دو فازي
شکل آن به صورت مدور اگر تعادلي سرد شود
شکل آن سوزنی اگر سریع سرد شود: ویدمنشتین مثل فریت ویدمن





تشکیل فازهای پرویوتکتوئید

فازهای پرویوتکتوئید در فولادها به دو طریق ظاهر می‌شوند. نوع اول که در شکل‌های ۲-۱۳ و ۲-۱۴ نشان داده شده‌اند، شامل دانه‌های فریت و یا سمنتیت است که در امتداد مرز دانه‌های آستنیت جوانه زده و رشد می‌کند. شکل دانه‌های فریت و سمنتیت یاد شده تابع موانعی که در سر راه رشد آنها وجود دارد بوده و بنابراین شکل واقعی خود را ندارند، این بلورها به دگرریختهای^۱ مرز دانه‌ای موسوم‌اند.



نوع دوم از فازهای پرویوتکتوئید شامل دانه‌های سوزنی و یا صفحه‌ای شکل بوده که از مرز دانه‌های استنیت اولیه شروع شده و به داخل دانه‌ها رشد کرده‌اند. شکل ۲-۱۵ فریت پرویوتکتوئید از نوع دوم را نشان می‌دهد. دانه‌های صفحه‌ای و یا سوزنی شکل از این نوع به صفحات یا ساختار ویدمن اشتاتن^۲ موسوم است. کلمه ویدمن اشتاتن از نام دانشمند فرانسوی که برای اولین بار به این ساختار پی برد گرفته شده است. امروزه ویدمن اشتاتن را در رابطه با توضیح و تفسیر هر دانه طویل یا صفحه‌ای شکلی که در امتداد صفحات خاص بلوری دانه اولیه تشکیل شده باشد به کار می‌برند.



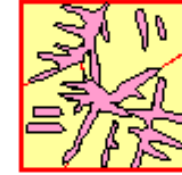
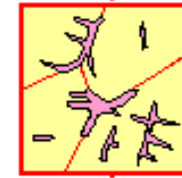
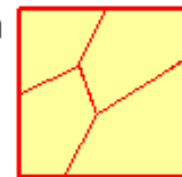
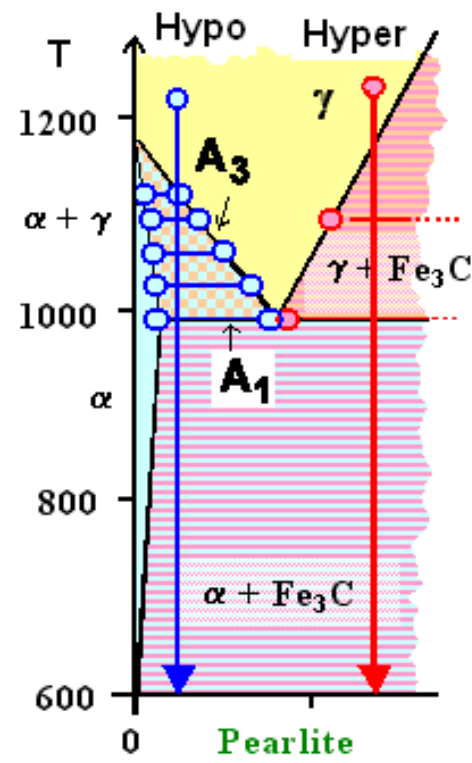
شکل ۲-۱۵ تصویر میکروسکوپی فریت پرویوتکتوئید در قالب صفحات ویدمن اشتاتن در فولاد ۰/۴C، Fe%۰/۴C. محلول حکاکی نایتال، بزرگنمایی $\times 200$ [۱].



Widmannstätten Ferrite



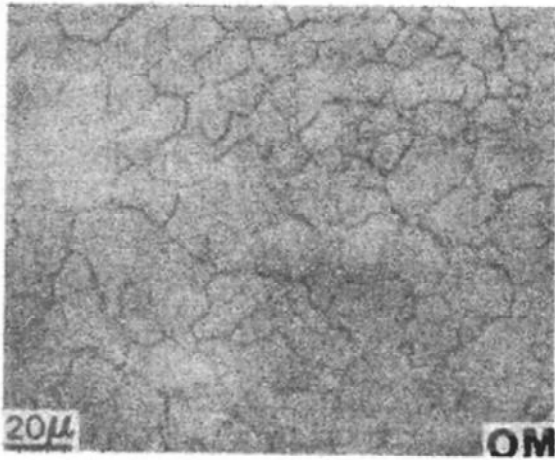
Widmannstätten Cementite



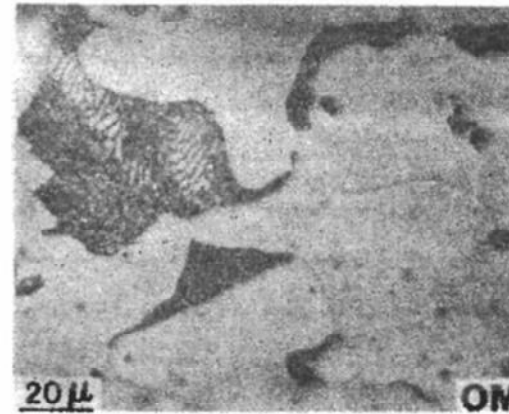


Widmanstätten ferrite

مقایسه خواص مکانیکی و ساختار

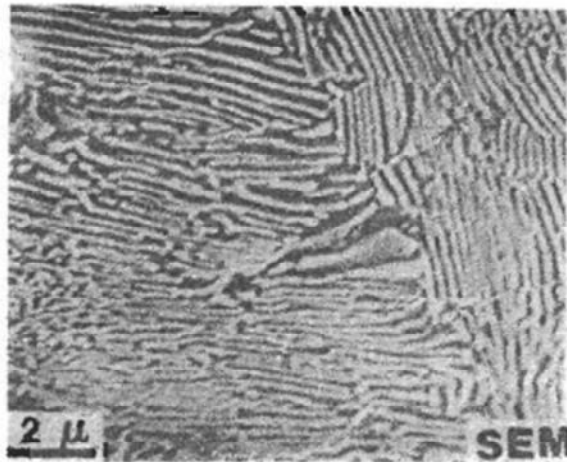


الف - آهن خالص، فریت
استحکام تسلیم MPa: ۱۰۳ (۱۵۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) انعطاف پذیری ۶۳ درصد

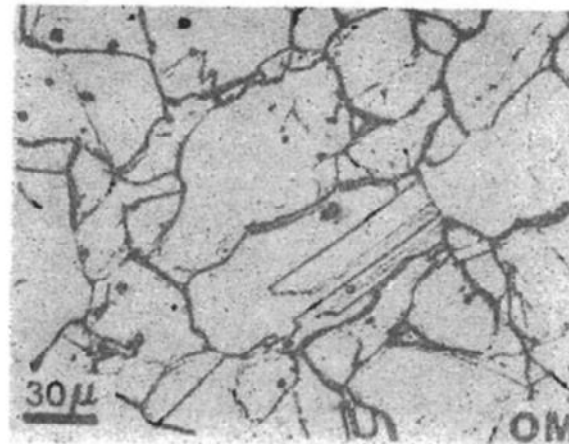


ب - فولاد با ۰/۲ درصد کربن آهسته سرد شده، فریت و کمی برلیت
استحکام تسلیم MPa: ۲۲۰ (۳۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) انعطاف پذیری، ۳۵ درصد

مقایسه خواص مکانیکی و ساختار

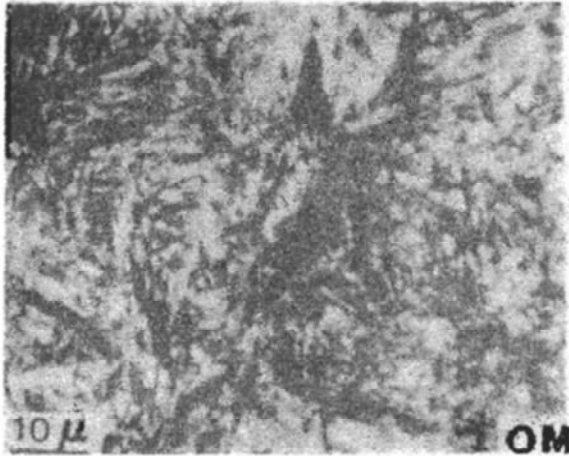


ج - فولاد با ۰/۸ درصد کربن آهسته سرد شده، پرلیت
استحکام تسلیم ۴۴۸ MPa (۶۵۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) انعطاف پذیری ۱۴ درصد

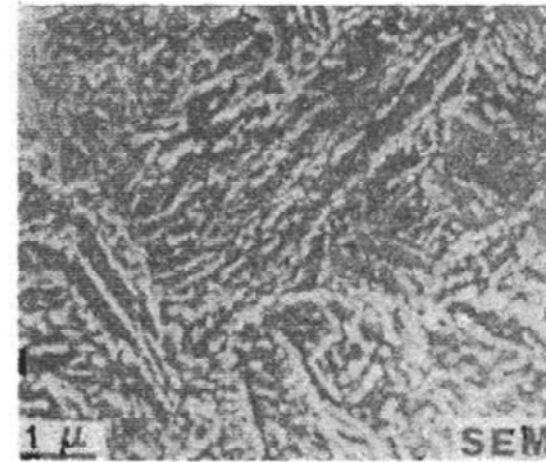


د - فولاد با ۰/۸ درصد کربن، دانه‌های استنیت
بالاتر از ۷۲۳ درجه سانتیگراد

مقایسه خواص مکانیکی و ساختار



۵ - فولاد با ۰/۸ درصد کربن، سرد شده در آب، مارتنزیت
استحکام تسلیم MPa ۲۰۷۰ (۳۰۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) انعطاف پذیری در حدود ۱ درصد



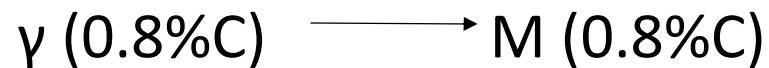
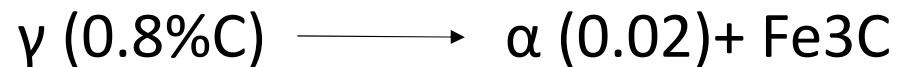
و - فولاد با ۰/۸ درصد کربن، سرد شده در آب و سپس حرارت داده شده در ۵۰۰ درجه سانتیگراد
به مدت یک ساعت، مارتنزیت بازپخت شده
استحکام تسلیم MPa ۹۶۶ (۱۴۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) انعطاف پذیری ۷ درصد

فصل سوم

مارتنزیت و بینیت

مارتنزیت

فازی است که حاصل **سریع سرد شدن (غیرتعادلی)** از منطقه **آستنیت** حاصل می شود پس چون غیرتعادلی است در نمودار تعادلی آهن-کربن یافت نمی شود.

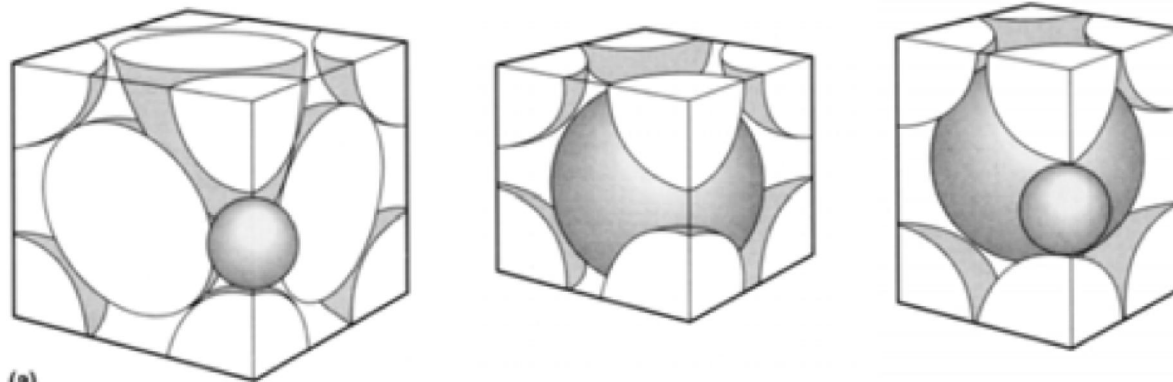
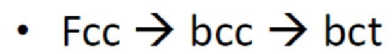


MARTENSITIC TRANSFORMATIONS

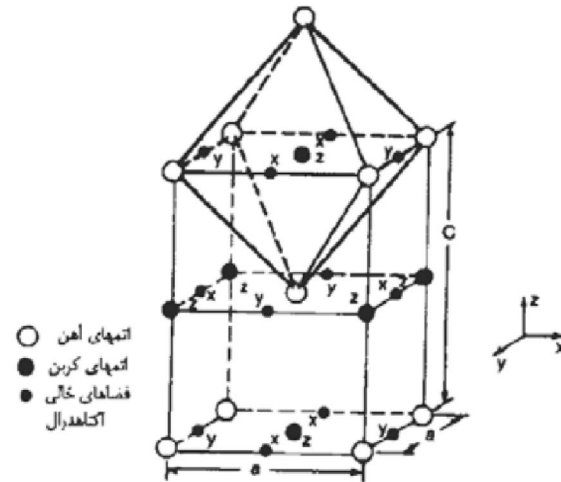
- Martensitic transformations are (usually) first order, diffusionless, shear (displacive) solid state structural changes.
- The atoms move in an organized manner relative to their neighbours and therefore they are known as a military transformations in contrast to diffusional civilian transformations.



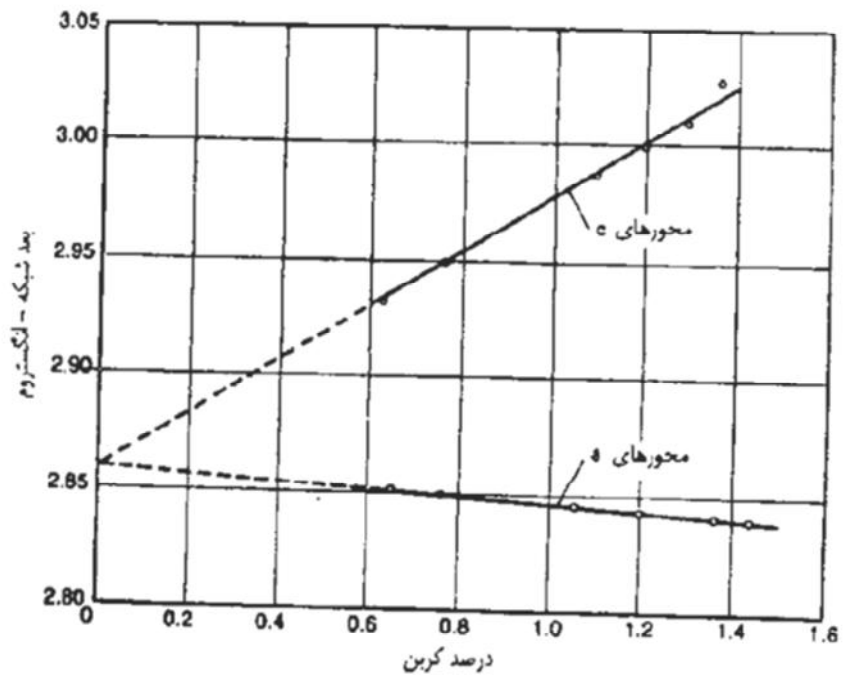
- سرد کردن سریع (غیرتعادلی) آستنیت \leftarrow مارتنزیت
- استحاله مارتنزیتی یک استحاله غیرنفوذی است



با تشکیل مارتنزیت، کربن محلول در شبکه^۲ bcc به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. با افزایش درصد کربن محلول در شبکه، جاهای خالی بیشتری از شبکه توسط کربن اشغال می‌شود، در نتیجه شبکه بلوری از bcc به سمت bct^۳ میل می‌کند که در آن پارامتر c شبکه بزرگتر از دو پارامتر دیگر a است (شکل ۱-۳). نسبت $\frac{c}{a}$ که به تراگونالیت^۳ شبکه موسوم است با افزایش درصد کربن آلیاژ افزایش می‌یابد (شکل ۲-۳).



شکل ۱-۳ شبکه بلوری مکعب مستطیل (bct) مارتنزیت در آلیاژهای آهن-کربن. اتمهای کربن در یک سری از فضاهای هشت‌وجهی بر روی محور Z محبوس شده، در حالی که فضاهای هشت‌وجهی محورهای X و Y اشغال نشده‌اند [۱].



شکل ۲-۳ اثر درصد کربن در فولاد کربنی ساده بر روی اندازه پارامترهای a و c مارتنزیت



فازهای غیر تعادلی در فولاد

مارتنزیت

- استحاله مارتنزیتی باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک خواهد شد.
- تنشهای وارده میتواند از تبدیل کامل آستنیت به مارتنزیت جلوگیری کند.

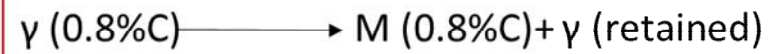
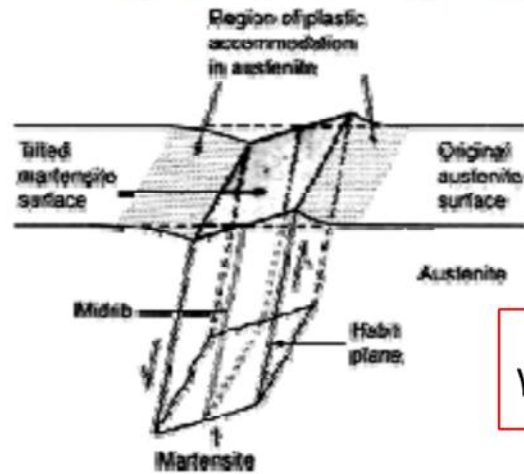
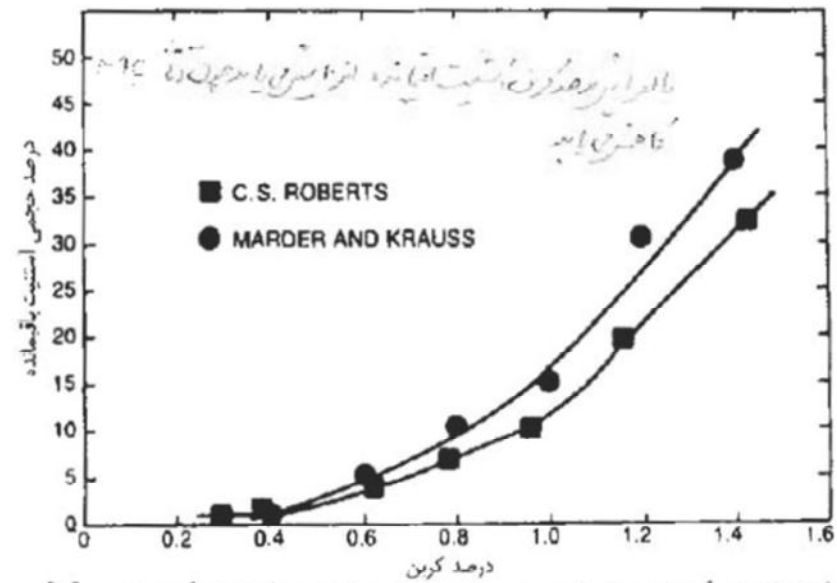


Fig. 3 Diagram of martensite crystal, showing shear and surface tilting. Source: Ref 3

مقدار آستنیت باقیمانده که به کمک پرآش پرتوی ایکس^۲ اندازه گیری شده است، می تواند در دمای اتاق به ۳۰ تا ۴۰ درصد در فولادهای آهن - کربن شامل ۱/۴ تا ۱/۴ درصد کربن برسد.



شکل ۳-۷ آستنیت باقیمانده برحسب درصد کربن فولاد در آلیاژهای آهن - کربن [۱].

همچنین شکل ۳-۳ نشان می‌دهد که تشکیل مارتنزیت، همواره همراه با مقدار قابل ملاحظه‌ای تغییر شکل مومسان در فاز آستنیت مادر است. تنش یا نیروی عکس‌العمل حاصل از تغییر شکل مومسان آستنیت بر روی پلور مارتنزیت، رشد پلور مارتنزیتی را محدود کرده و ادامه دگرگونی (تشکیل مارتنزیت) فقط با ایجاد بلورهای جدید مارتنزیتی امکانپذیر است. اگر فاز آستنیت نتواند تغییر شکلهای مومسان حاصل از برشهای مارتنزیت را تحمل کند، در فصل

مشترکهای مارتنزیت - آستنیت مادر جدایش یا ترک خوردگی ایجاد می‌شود.

- ترکیب شیمیایی مارتنزیت همان ترکیب آستنیت اولیه است

- به دلیل غیر تعادلی بودن، مارتنزیت یک فاز ناپایدار است
 - کربن فوق اشباع

- افزایش انرژی داخلی حاصل از تغییر شکل پلاستیک
 - آستنیت باقی مانده



- مارتنزیت به دو شکل لایه ای و بشقابی قابل مشاهده است.
- درصد کربن آلیاژ تعیین کننده نوع مارتنزیت مشاهده شده است.

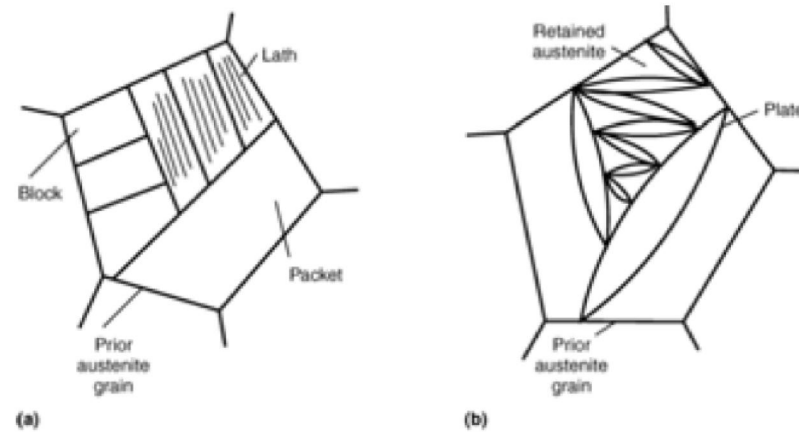


Fig. 5 Martensites. (a) Lath. (b) Plate. Source: Ref 5

مارتنزیت لایه ای (سوزنی) : تا ۰/۶ درصد کربن

مارتنزیت بشقابی (صفحه ای): از ۱ درصد کربن به بالا

مارتنزیت مختلط: بین ۰.۶ تا ۱ درصد کربن



دانشگاه گیلان

فازهای غیر تعادلی در فولاد

مارتنزیت

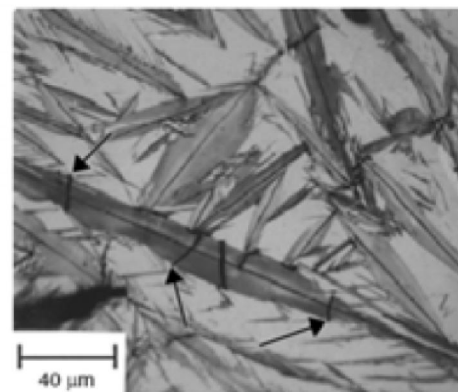
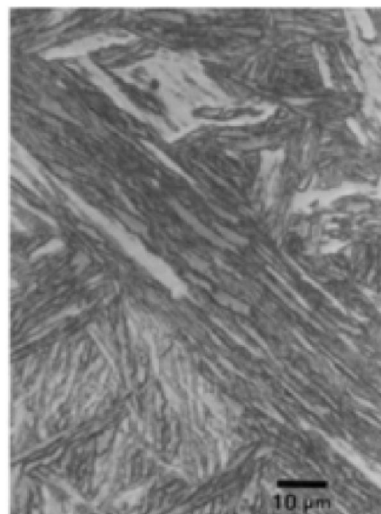
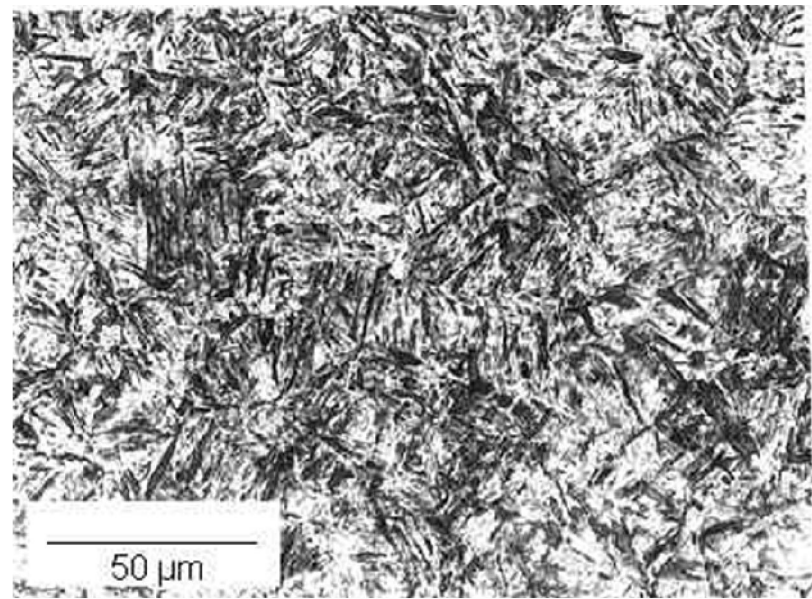
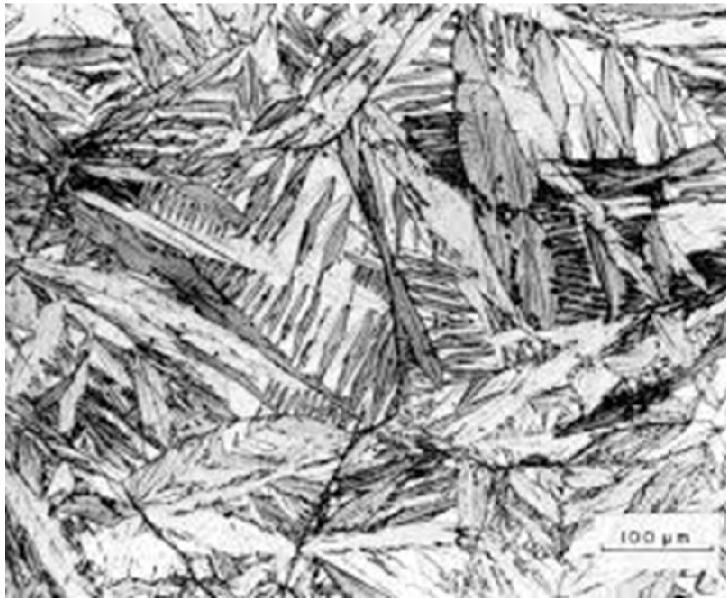


Fig. 6 Plate martensite formed in an Fe-1.86C alloy.



نیروی محرکه تشکیل مارتنزیت (M_s)

مشخص است که در هر دما، مقدار مشخصی مارتنزیت تشکیل می‌شود و ادامه تشکیل مارتنزیت مستلزم تحت تبرید بیشتر است.

دمایی که در یک آلیاژ، دگرگونی آستنیت به مارتنزیت شروع می‌شود را دمای شروع تشکیل مارتنزیت نامیده و آن را با M_s نشان می‌دهند. در حقیقت، M_s منعکس کننده مقدار نیروی محرکه ترمودینامیکی لازم برای شروع دگرگونی برشی آستنیت به مارتنزیت است.

۱- Martensite start

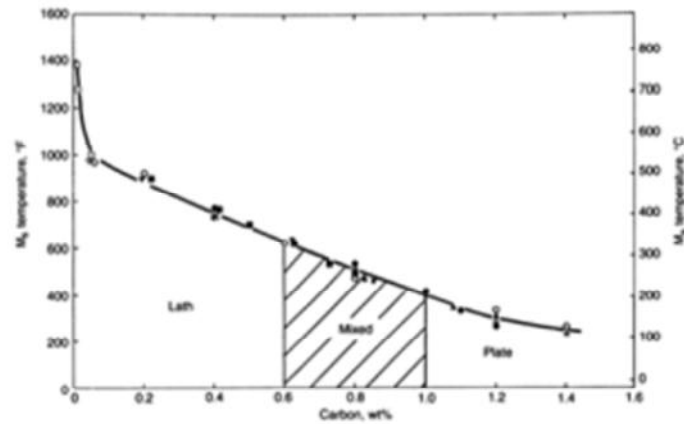


دانشگاه گیلان

فازهای غیرتعادلی در فولاد

سینتیک تشکیل مارتنزیت

- دمایی که در آن استحاله آستنیت به مارتنزیت شروع میشود را M_s مینامند.
- به دلیل افزایش استحکام برشی آستنیت با افزایش درصد کربن دمای M_s کاهش میابد.



در حقیقت، کربن موجود به صورت محلول جامد،

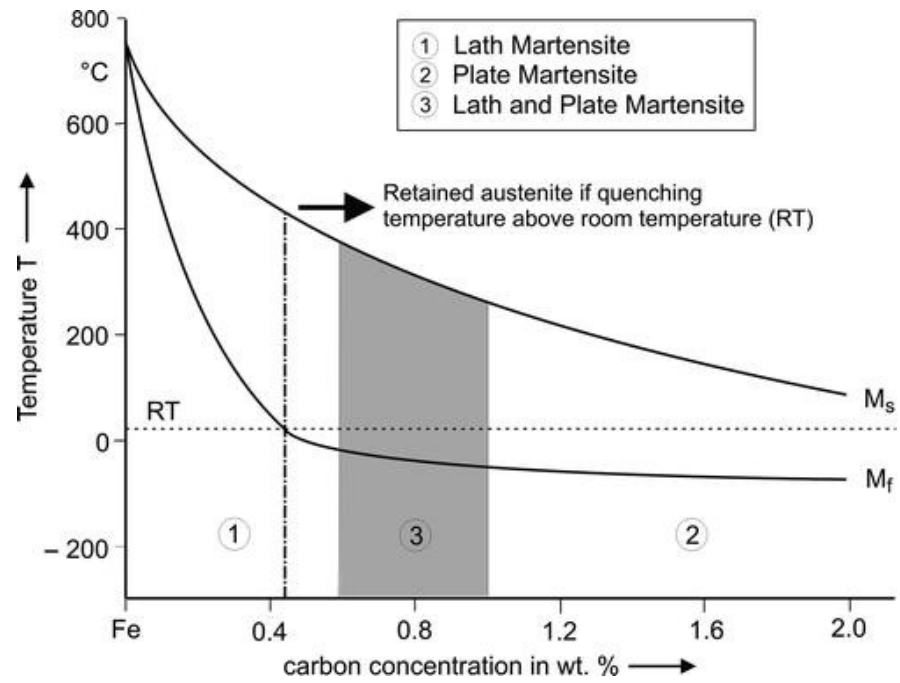
استحکام یا مقاومت برشی آستنیت را افزایش داده و بنابراین با افزایش کربن نیروی محرکه بیشتری جهت شروع لغزش برای تشکیل مارتنزیت لازم است. این نیروی محرکه بیشتر، با سرد کردن فولاد تا دمایی پایینتر و یا به عبارت دیگر تحت تبرید بیشتر (M_s کمتر) به دست می آید.

دمای پایان تشکیل مارتنزیت (M_f) یا دمایی که دگرگونی آستنیت به مارتنزیت در یک آلیاژ داده شده خاتمه می یابد نیز تابعی از درصد کربن آلیاژ است.

دمای M_f آلیاژهایی که بیشتر از ۰/۳ درصد کربن دارند، زیر

دمای اتاق است. بنابراین در دمای اتاق و مخصوصاً در رابطه با فولادهای پرکربن، همواره مقدار

قابل ملاحظه‌ای آستنیت تبدیل نشده همراه مارتنزیت وجود دارد.



عوامل موثر بر دمای شروع تشکیل مارتنزیت

۱- درصد کربن

۲- عناصر آلیاژی

عناصر آلیاژی بر روی دمای M_s فولادها نیز اثر می‌گذارند.

به طور کلی تمامی عناصر آلیاژی بجز کبالت، دمای M_s را کاهش می‌دهند.

جدول ۱-۳ لیست فرمولهایی که می‌توان با استفاده از آنها دمای M_s یک فولاد را با توجه به ترکیب شیمیایی آن مشخص کرد [۱].

| شماره | تاریخ | رابطه |
|-------|-------|---|
| ۱ | ۱۹۴۴ | $M_s(^{\circ}\text{F}) = 930 - 570\text{C} - 60\text{Mn} - 50\text{Cr} - 30\text{Ni} - 20\text{Si} - 20\text{Mo} - 20\text{W}$ |
| ۲ | ۱۹۴۴ | $M_s(^{\circ}\text{F}) = 925 \times (1 - 0/620\text{C})(1 - 0/033\text{Si})(1 - 0/045\text{Ni})$ $(1 - 0/070\text{Cr})(1 - 0/029\text{Mo})(1 - 0/018\text{W})(1 + 0/120\text{Co})$ |
| ۳ | ۱۹۴۶ | $M_s(^{\circ}\text{F}) = 930 - 600\text{C} - 60\text{Mn} - 50\text{Cr} - 3\text{Ni} - 20\text{Si} - 20\text{Mo} - 20\text{W}$ |
| ۴ | ۱۹۴۶ | $M_s(^{\circ}\text{F}) = 1000 - 650\text{C} - 70\text{Mn} - 70\text{Cr} - 35\text{Mn} - 50\text{Mo}$ |
| ۵ | ۱۹۴۶ | $M_s(^{\circ}\text{F}) = 930 - 540\text{C} - 60\text{Mn} - 40\text{Cr} - 30\text{Ni} - 20\text{Si} - 20\text{Mo}$ |
| ۶ | ۱۹۵۶ | $M_s(^{\circ}\text{C}) = 561 - 474\text{C} - 33\text{Mn} - 17\text{Cr} - 17\text{Ni} - 21\text{Mo}$ |
| ۷ | ۱۹۶۵ | $M_s(^{\circ}\text{C}) = 539 - 423\text{C} - 30/4\text{Mn} - 12/1\text{Cr} - 17/7\text{Ni} - 7/5\text{Mo}$ |

دگرگونی پرلیتی که مستلزم نفوذ است در دماهایی نسبتاً بالا انجام می‌شود

دگرگونی مارتنزیتی^۱ که در دماهایی به مراتب پایینتر از دمای

تشکیل پرلیت انجام می‌شود و بنابراین نفوذ در آن نقشی ندارد

با توجه به

این نکته که دگرگونی مارتنزیتی بدون نفوذ یا جابه‌جایی انفرادی اتمها بوده و بنابراین نیاز به فعالیت حرارتی ندارد، گفته می‌شود که این دگرگونی از نوع برشی^۱ است و به کمک جابه‌جایی گروهی اتمها انجام می‌شود.

از جمله مشخصه‌های دیگر دگرگونی مارتنزیتی خصوصیات شبکه

بلوری و میکروساختار ریز و سوزنی شکل آن است. تشکیل مارتنزیت، مستلزم سریع سرد کردن و بنابراین متوقف کردن دگرگونی نفوذی است. البته شرایط دقیق سرد کردن که در یک فولاد مشخص منجر به تشکیل مارتنزیت می‌شود بستگی به درصد کربن، عناصر آلیاژی و اندازه

دانه‌های آستنیت دارد.

با داشتن M_s یک فولاد، مقدار مارتنزیت تشکیل شده در دگرگونی اترمال که فقط تابعی از میزان تحت تبرید در زیر دمای M_s است را می‌توان مشخص کرد. برای توضیح سینتیک دگرگونی اترمال تشکیل مارتنزیت، دو رابطه به صورت زیر ارائه شده‌اند:

$$f = 1 - 6.96 \times 10^{-15} (455 - \Delta T)^{5/3}$$

$$f = 1 - \exp [-(1/10 \times 10^{-2} \Delta T)]$$

که در اینجا؛ f تابع حجمی مارتنزیت و ΔT مقدار تحت تبرید در زیر دمای M_s است.

رابطه

اول برای فولادهای کربنی ساده با ۱/۱ درصد کربن و رابطه دوم برای آلیاژهای آهن-کربن شامل ۰/۳۷ تا ۱/۱ درصد کربن ارائه شده است.

ترکهای مویی تمایل دارند که در بزرگترین تیغه‌های

مارتنزیت تشکیل شوند. بنابراین در فولادهای ریزدانه، از آنجایی که تیغه‌های مارتنزیت ظریفتر هستند، امکان تشکیل ترکهای مویی کاهش می‌یابد. همچنین در فولادهای کم‌کربن (مارتنزیت لایه‌ای شکل) از آنجایی که اندازه واحدهای منفرد مارتنزیت کاهش می‌یابد، امکان برخورد آنها با یکدیگر و در نتیجه ایجاد ترکهای مویی حذف می‌شود.

مارتنزیت بشقابی در فولادهای

پرکربن نسبتاً شکننده و حساس نسبت به ترکهای مویی است. در آلیاژهای آهن - نیکل، مارتنزیت از انعطاف پذیری بیشتری برخوردار است، از این رو تلاقی و برخورد واحدهای منفرد مارتنزیتی با یکدیگر منجر به شکسته شدن آنها و یا ایجاد ترکهای مویی در آنها نخواهد شد.

تفاوت مارتنزیت سوزنی و بشقابی

۱- درصد کربن

۲- مرفولوژی

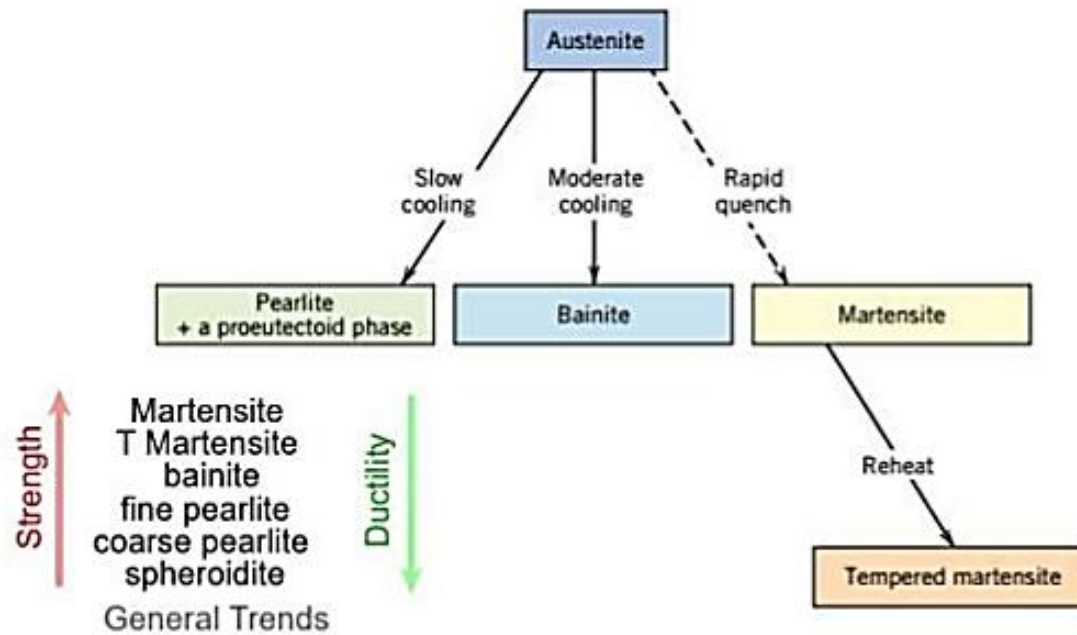
۳- درصد استنیت باقی مانده

۴- استحکام و سختی

۵- احتمال ترک مویی

۶- دمای تشکیل (نیروی محرکه)

Possible Transformations in Steel





دانشگاه حکیم بنوری

استحاله بینیتی

بینیت

- بینیت یک ریزساختار نیمه پایدار (metastable) است که شامل مخلوطی از فازهای فریت و سمانتیت است، اما برخلاف پرلایت این فازها به طور لایه ای در کنار هم قرار نگرفته اند.

بینیت و دگرگونی بینیتی

بینیت در فولادها در گستره دمایی بین پایینترین دمای تشکیل پرلیت (P_T) و بالاترین دمای تشکیل مارتنزیت (M_s) تشکیل می‌شود.

از جمله مشخصه‌های عمده دگرگونی بینیتی که مطالعه آن را مشکل نموده طبیعت دوگانه آن است. بدین صورت که دگرگونی بینیتی از بعضی جنبه‌ها شبیه به دگرگونی پرلیتی و از برخی جنبه‌ها مشابه دگرگونی مارتنزیتی است.

همانند پرلیت، محصول دگرگونی بینیتی که بینیت نام دارد یک فاز نیست بلکه مخلوطی از دو فاز فریت و سمنتیت است. بنابراین، دگرگونی بینیتی نیاز به تغییر ترکیب شیمیایی دارد و در نتیجه برای انجام آن نفوذ کربن لازم است. از این رو دگرگونی بینیتی از دگرگونی مارتنزیتی کاملاً متمایز می‌شود.



T (Pearlite)

Upper Bainite



Lower Bainite



Ms



استحاله بینیتی

بینیت بالایی

- در دماهای زیر دمای تشکیل پرلیت ایجاد میشود.
- شامل صفحات فریتی و ذرات سمانتیت در مرز فریت - آستنیت است.

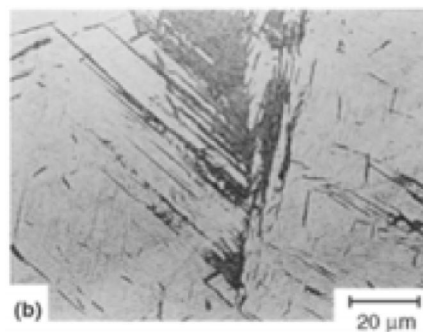
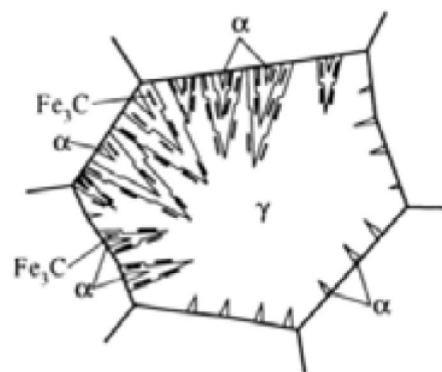
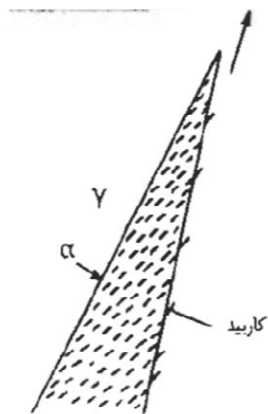


Fig. 33 Schematic of mechanism in the formation of upper bainite. Source: Ref 11



شکل ۳-۱۸ شمایی از رشد
بینیت پایینی و ارتباط محور طولی
صفحات فریت با رسوبات کاربید

استحاله بینیتی

بینیت پایینی

- در دماهای نزدیک به دمای Ms ایجاد میشود.
- شامل فریت سوزنی شکل و ذرات سمانتیت در داخل فریت است.



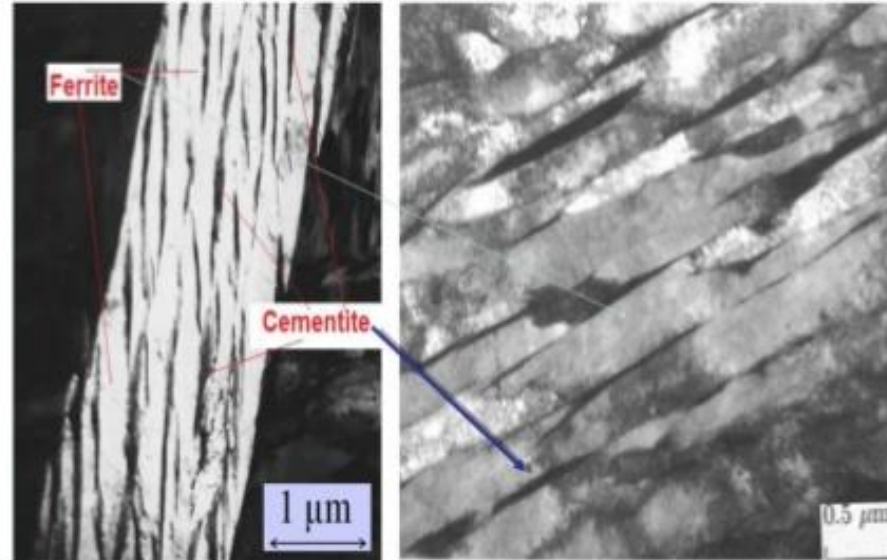

Fig. 17 Lower bainite formed at 345 °C (650 °F) in 4360 steel. 8000×. Source: Ref 16

عملیات حرارتی / دانشگاه حکیم سبزواری / دکتر جبار

همانند بینیت بالایی، در اینجا نیز اولین مرحله تشکیل بینیت پایینی عبارت از به وجود آمدن صفحات فریت از استنیت است. از آنجایی که نفوذ کربن در گستره دمایی تشکیل بینیت پایینی بسیار کم است، صفحات فریت یاد شده بسیار نازک‌اند.

Upper Bainite

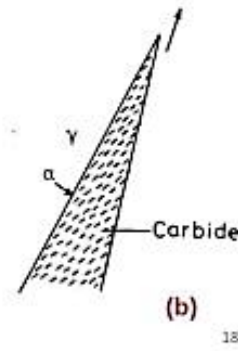
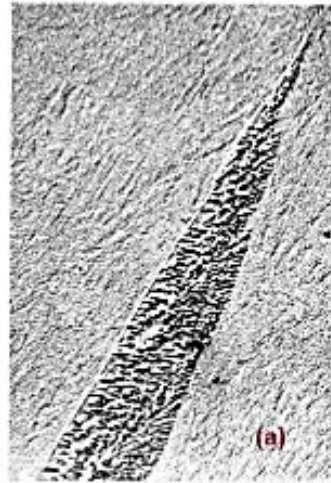
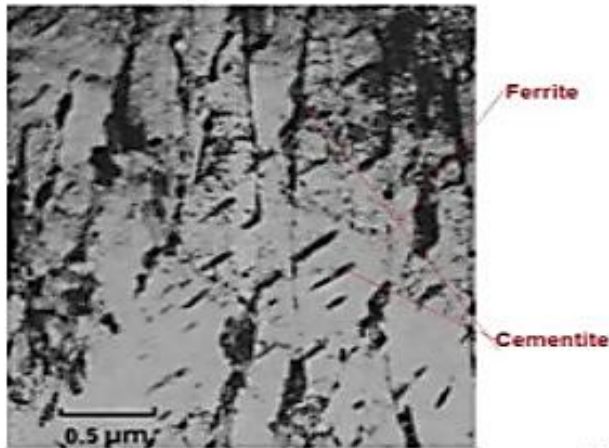
- Tiny platelets of carbides oriented with ferrite needles



Lower Bainite

- Ferrite needles become thinner → carbide platelets become smaller, oriented at an angle of about 60°

(a) Lower bainite in 0.69wt % C low alloy steel, (b) possible growth mechanism, α/γ interface advances as carbides precipitates at interface thereby removing the excess in front of α



شباهت مارتنزیت و بینیت

- ۱- غیر تعادلی سرد شدن
- ۲- غیر پایدار بودن فازها
- ۳- مرفولوژی

تفاوت مارتنزیت و بینیت

- ۱- مکانیزم تشکیل
- ۲- دمای تشکیل
- ۳- سرعت سردشدن

شباهت پرلیت و بینیت

- ۱- نفوذی بودن
- ۲- دو فازی بودن (شامل فریت و سمنتیت)

تفاوت پرلیت و بینیت

- ۱- مرفولوژی
- ۲- نوع مکانیزم تشکیل (جوانه زنی)
- ۳- دمای تشکیل

فصل ۴

نمودارهای زمان - دما - دگرگونی

نمودار تعادلی آهن - کربن پایه و اساس روشهای مختلف عملیات حرارتی است.

لیکن، این نمودار فقط شرایط تعادل بین آهن و کربن را در دماهای مختلف نشان می دهد، در حالی که در اکثر روشهای عملیات حرارتی فولادها، دگرگونیها در شرایط کاملاً ناتعادلی انجام می شوند. به بیان دیگر، پارامتر زمان یکی از مهمترین پارامترهای مؤثر است. اثرات زمان بر روی ساختار و خواص نهایی فولادها توسط نمودارهای زمان - دما - دگرگونی که به نمودارهای TTT¹ موسوم اند، مشخص می شود. به این ترتیب، به کمک نمودارهای یاد شده می توان اثرات هر دو پارامتر زمان و دما را بر روی پیشرفت دگرگونی در فولادها به سادگی بررسی کرد.

TTT Diagram

- TTT diagram is a more practical diagram.
- It shows what structures can be expected after various rates of cooling.
- It graphically describes the cooling rate required for the transformation of austenite to pearlite, bainite or martensite.
- TTT diagram also gives the temperature at which such transformations take place.

Temperature

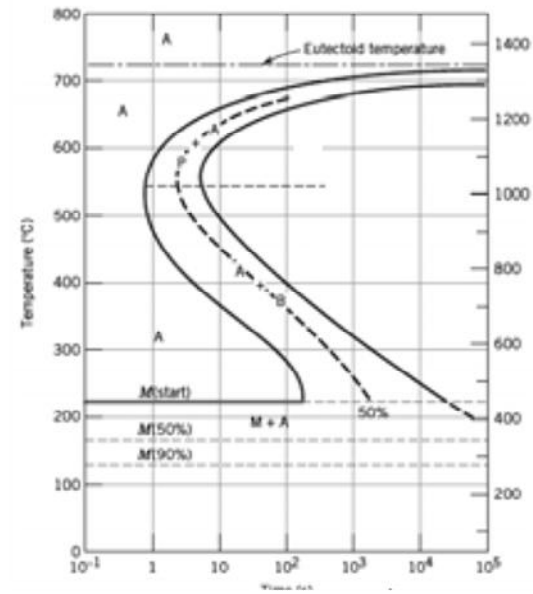
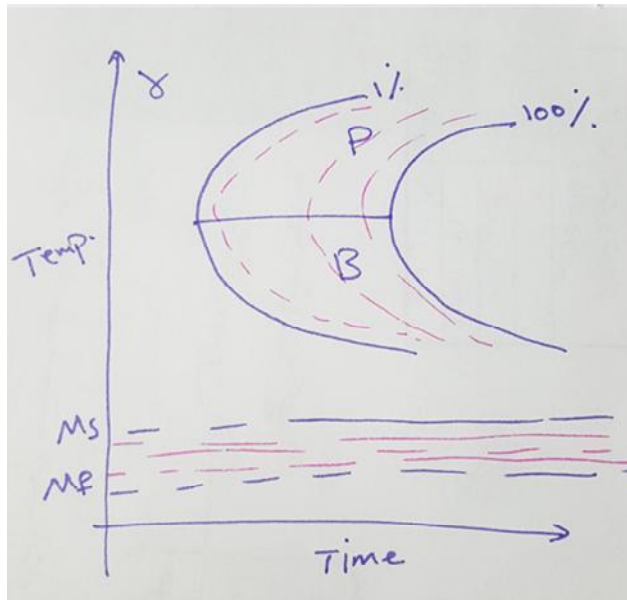


Transformation

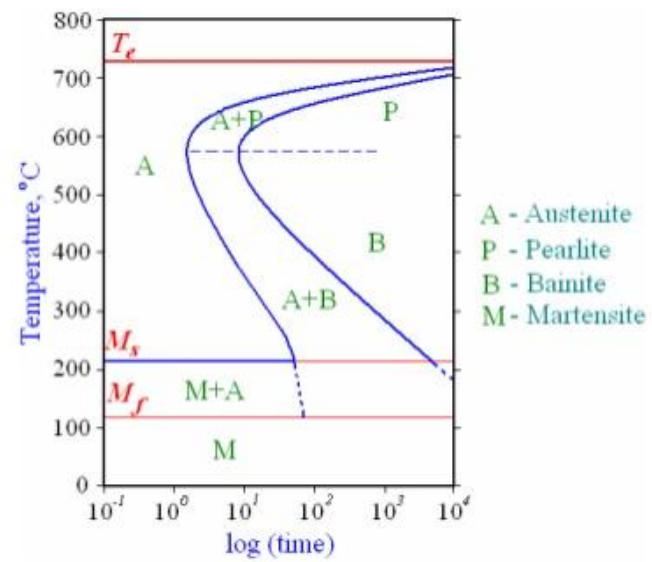
Time

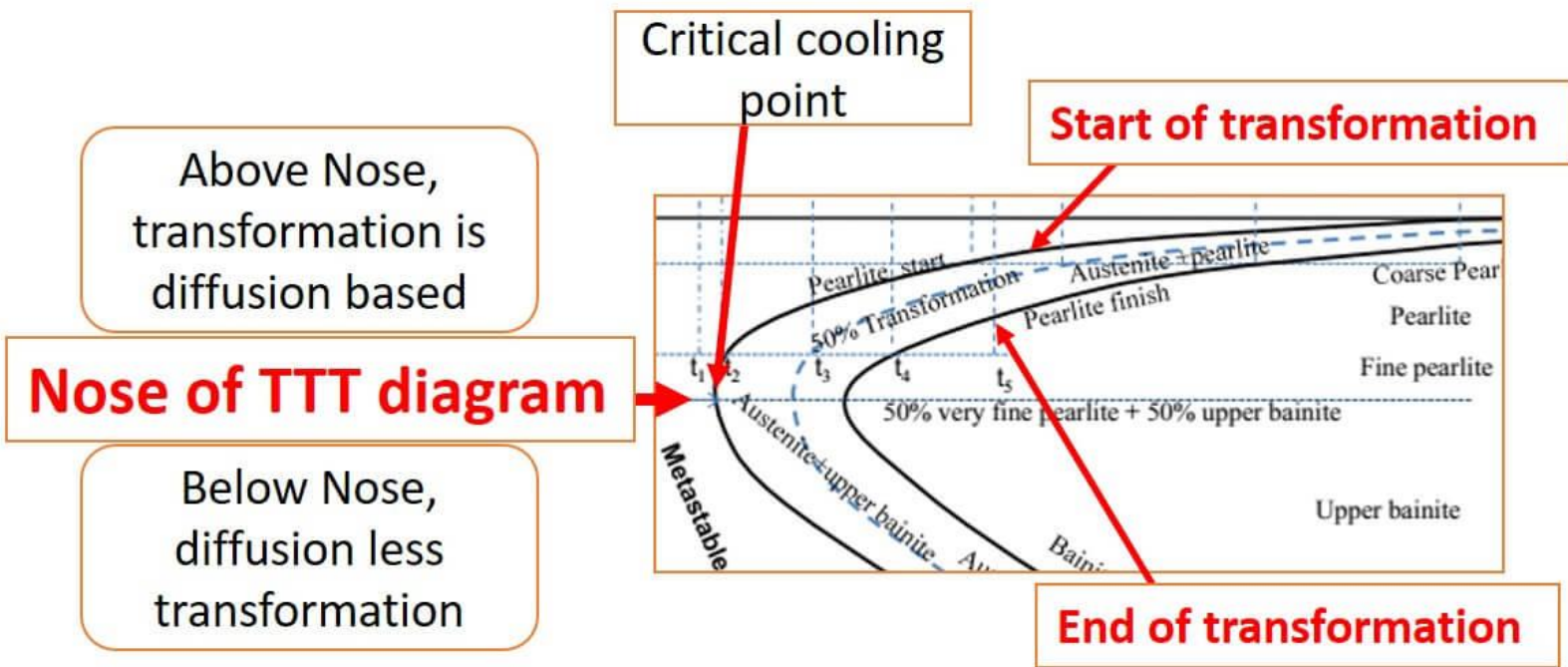
هر فولاد یک نمودار TTT منحصر به فرد دارد.

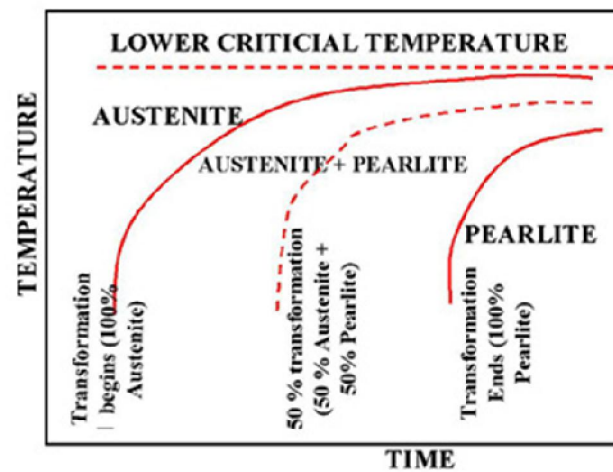
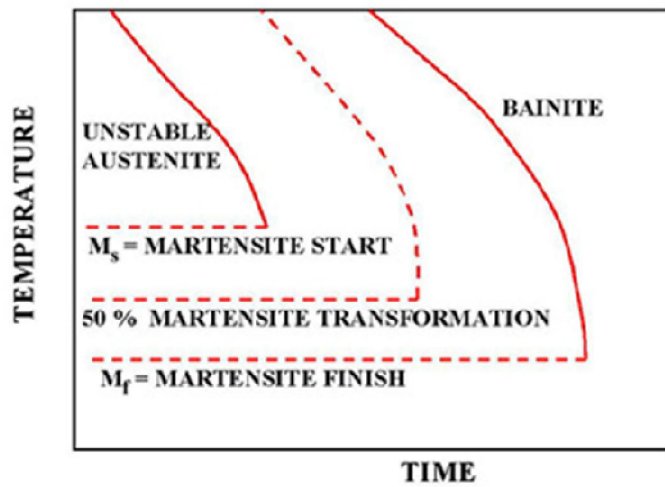
• مثال: فولاد یوتکتوئیدی



Complete TTT (isothermal transformation) diagram for eutectoid steel.

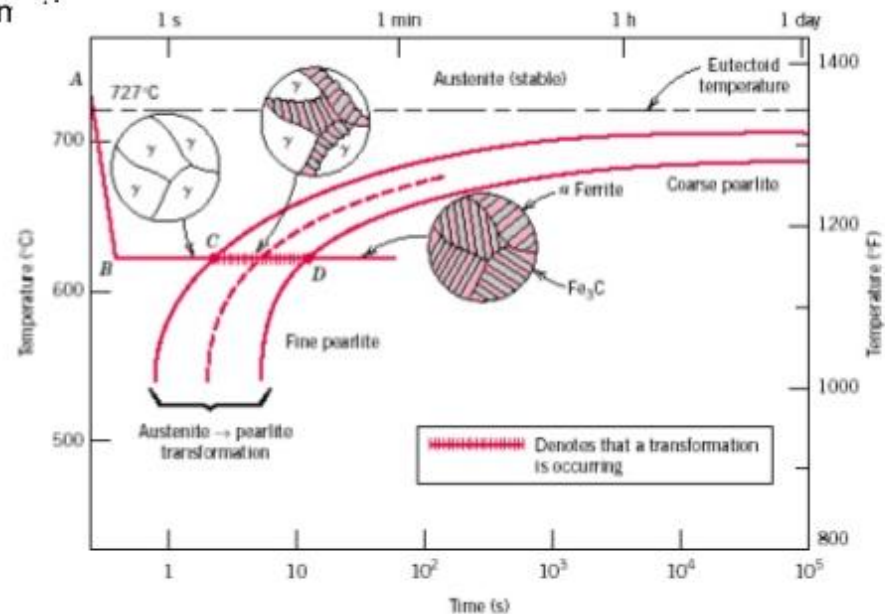


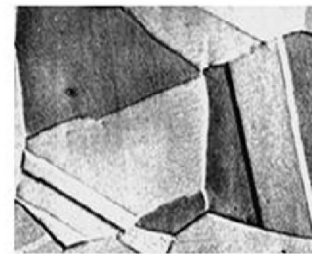
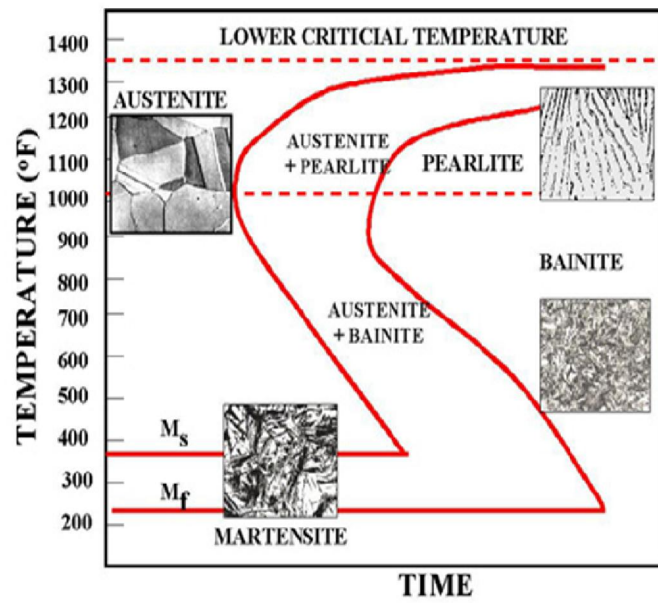




TTT Diagrams for Eutectoid Steel

- We can plot the time for start and completion of transformation of austenite to pearlite at different temperatures or for any other amount of transform





Austenite



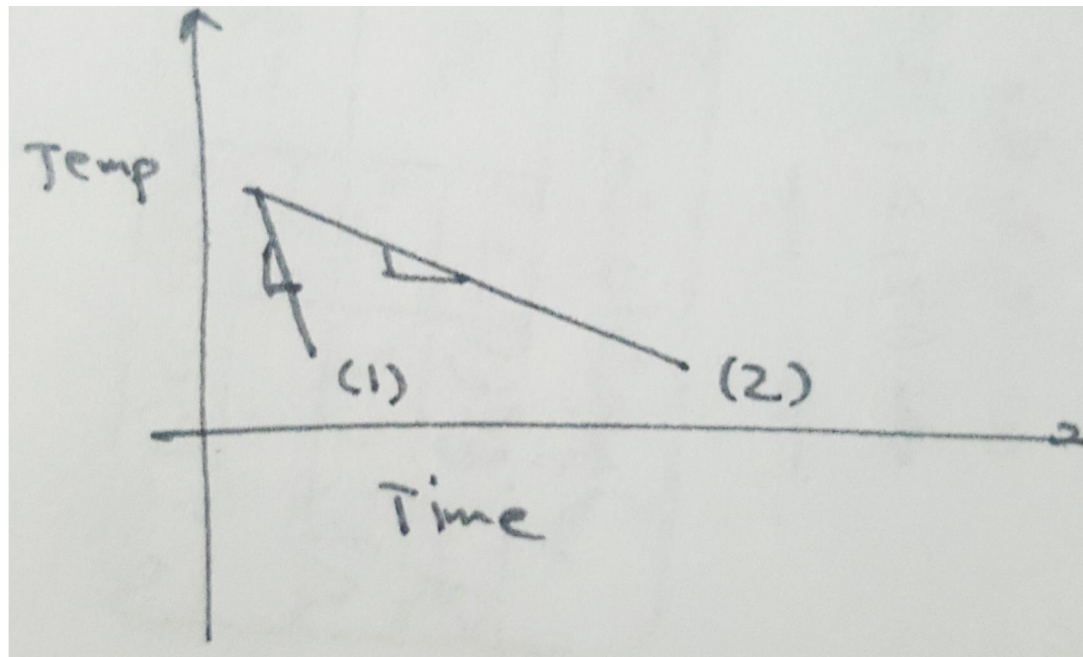
Pearlite

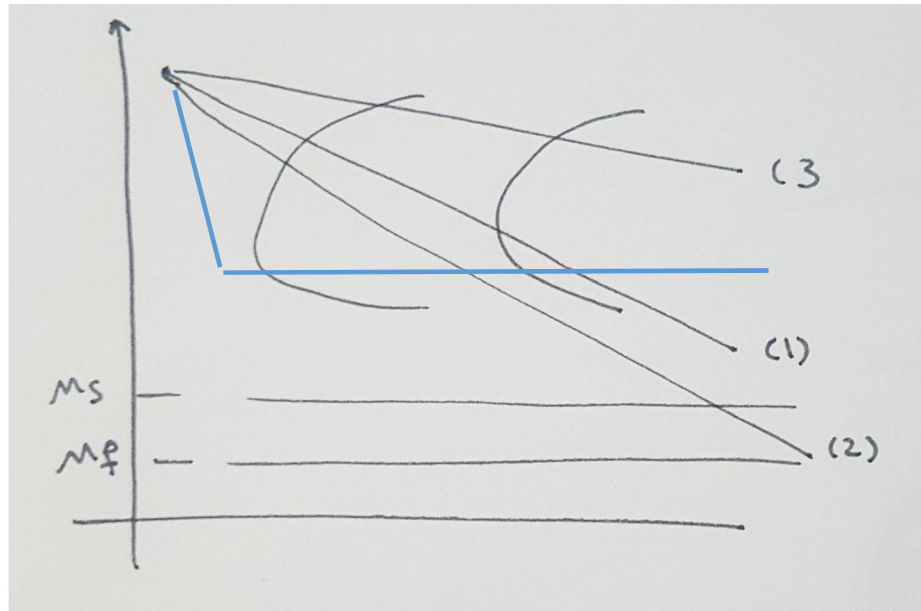


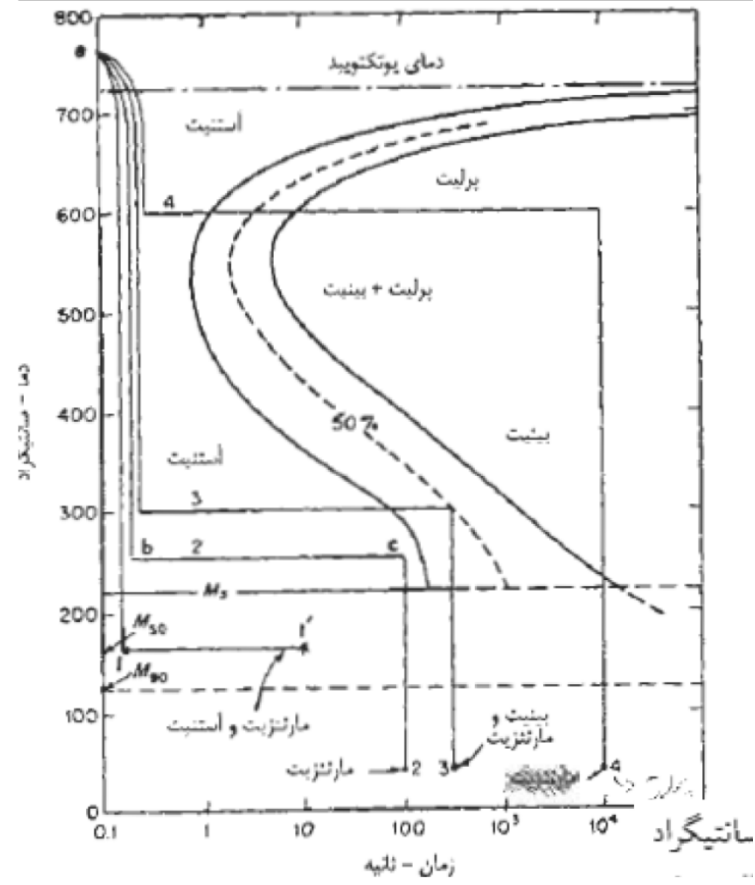
Martensite

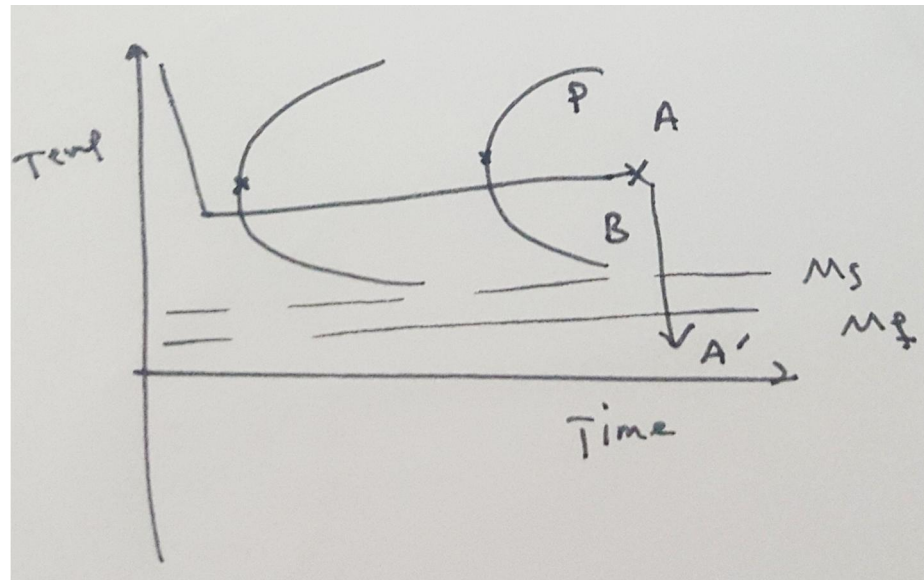


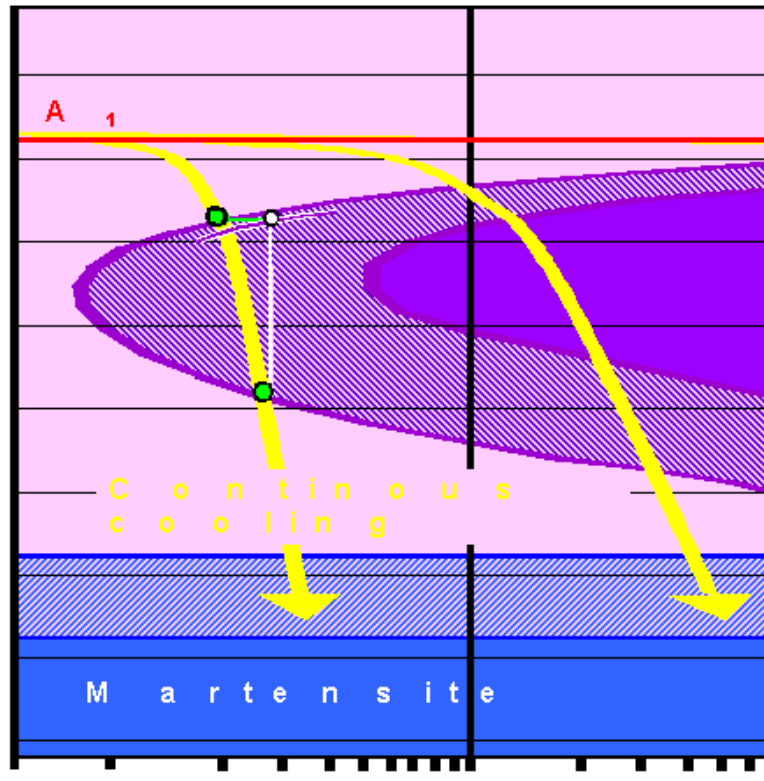
Bainite

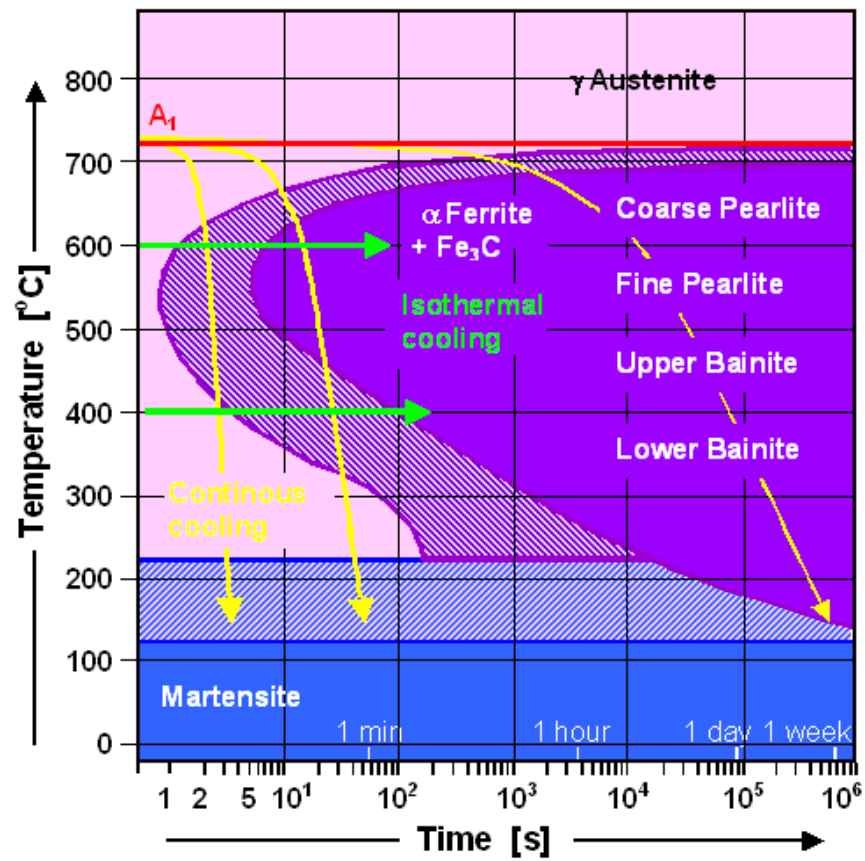




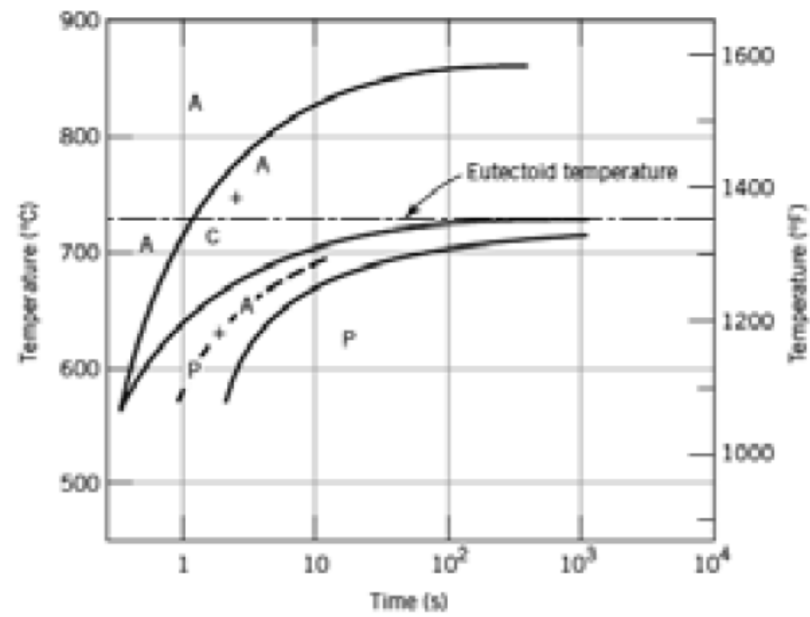


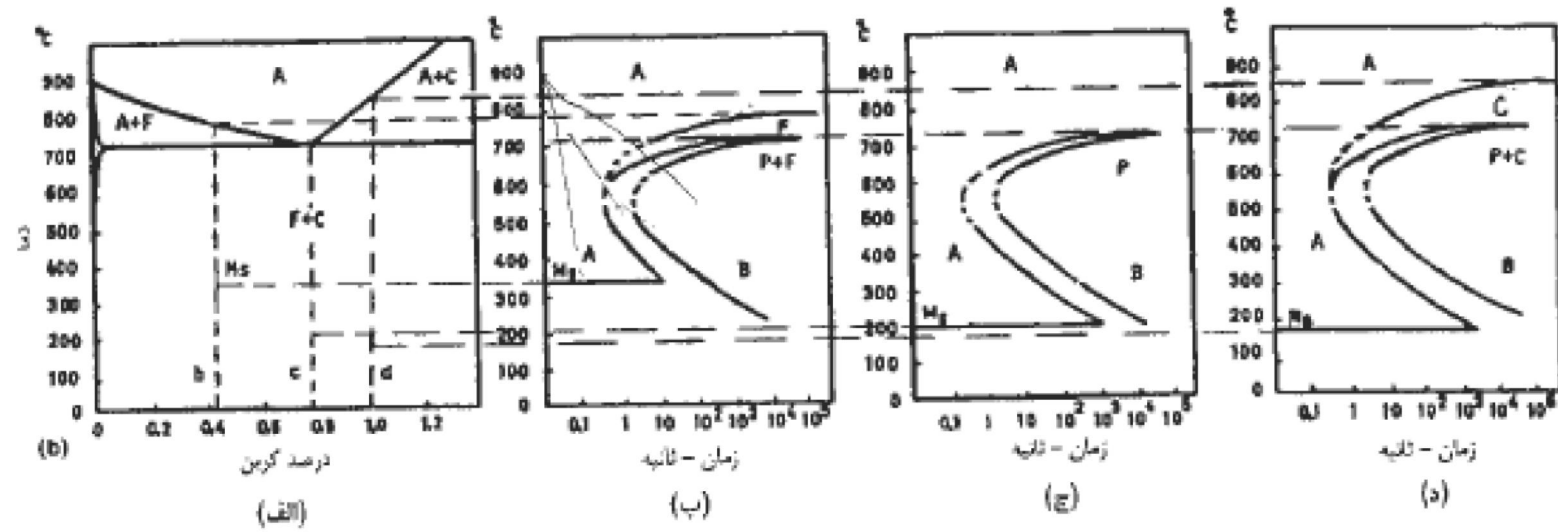






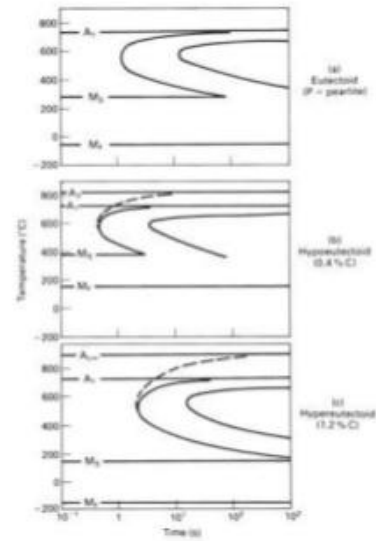
مثال: فولاد هایپر یوتکتوئید





شکل ۴-۷ ارتباط بین نمودار تعادلی آهن - کربن (الف) و نمودارهای دگرگونی همدمما برای فولادهای کربنی ساده هیپوئکتوئید (ب)، یوکتوئید (ج) و هایپروکتوئید (د)،
 [رسم مجدد با استفاده از مراجع ۶ و ۹]

Fig. 11.8. TTT diagrams for (a) eutectoid, (b) hypoeutectoid and (c) hypereutectoid steels. (b) and (c) show (dashed lines) the C-curves for the formation of primary α and Fe_3C respectively. Note that, as the carbon content increases, both M_s and M_f decrease.



با افزایش درصد کربن تا ۰.۸ درصد

۱- دمای Ms , Mf کمتر می شود.

۲- شکل نمودار در قسمت پرلایت متفاوت می شود و از قسمت فاز فریت اولیه کاهش می یابد.

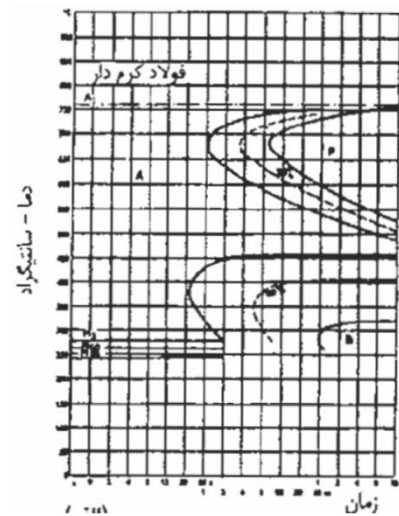
۳- دماغه نمودار به سمت راست شیفت پیدا می کند.

با حضور عناصر آلیاژی

- ۱- دمای Ms , Mf کمتر می شود.
- ۲- دماغه نمودار به سمت راست شیفت پیدا می کند (به جز کبالت).
- ۳- ممکن است تغییرات دیگری با توجه به درصد و نوع عنصر آلیاژی ایجاد شود.

نمودارهای TTT مربوط به فولادهای آلیاژی

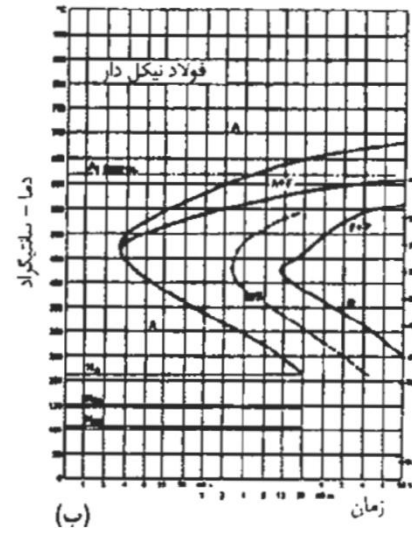
اضافه شدن عناصر آلیاژی مختلف به فولادها اثرات کاملاً متفاوتی بر روی نمودارهای دگرگونی آنها دارد. به عنوان مثال اضافه شدن بیشتر از تقریباً ۳ درصد کرم به فولاد باعث می شود که نواحی تشکیل پرلیت و بینیت کاملاً از یکدیگر جدا شوند (شکل ۴-۸ الف).



در حالی که نیکل

شکل کلی نمودار دگرگونی فولاد را تغییر نداده و تنها آن را به سمت راست جابه‌جا می‌کند

(شکل ۴-۸ (ب)).



اثر مولیبدن بدین صورت است که دماغه مربوط به تشکیل پیرلیت را به مراتب بیشتر از دماغه مربوط به تشکیل بینیت به سمت راست جابه‌جا می‌کند (شکل

۴-۸ ج)

