

# عمليات حرارتى

بارم بندی کلاس

فعالیت کلاسی

کوئیزهای مستمر

پایان ترم

## تعريف عمليات حرارية

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.

## **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

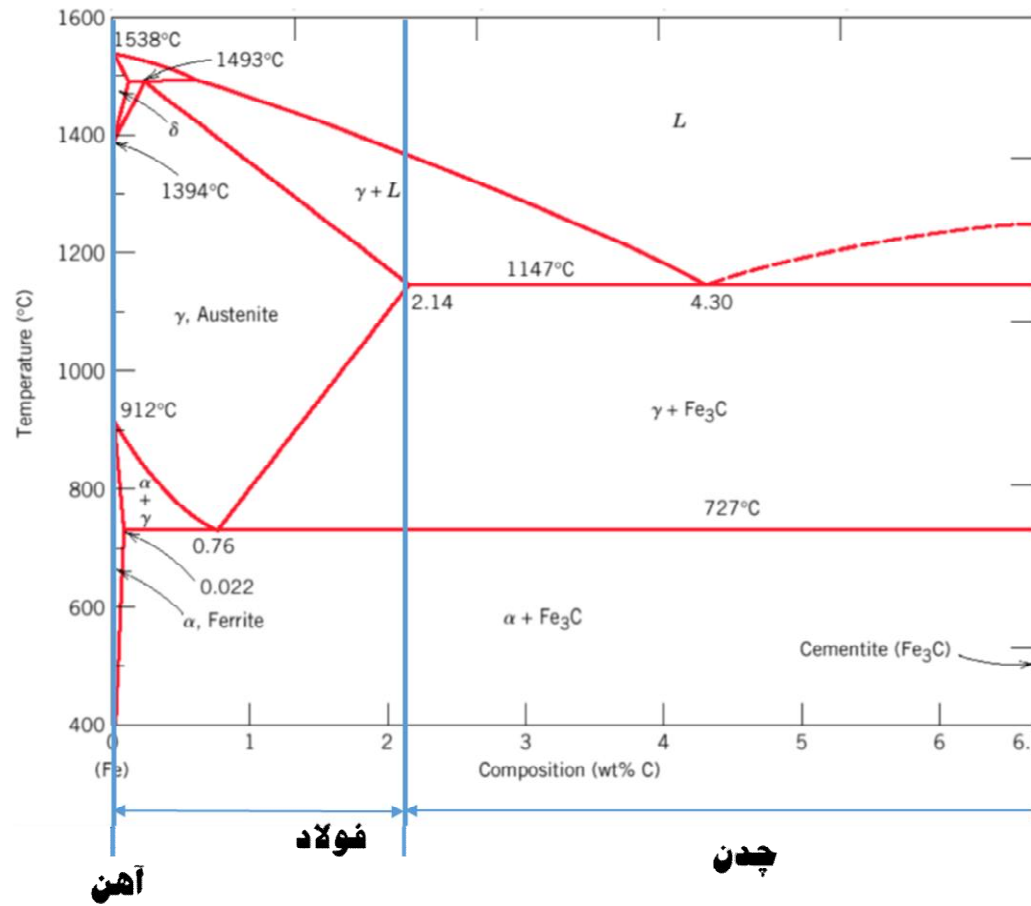
فازها و ساختارهای بلوری

**در دیاگرام تعادلی آهن - کربن**

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

- **Iron:** less than 0.008 wt % C in  $\alpha$ -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



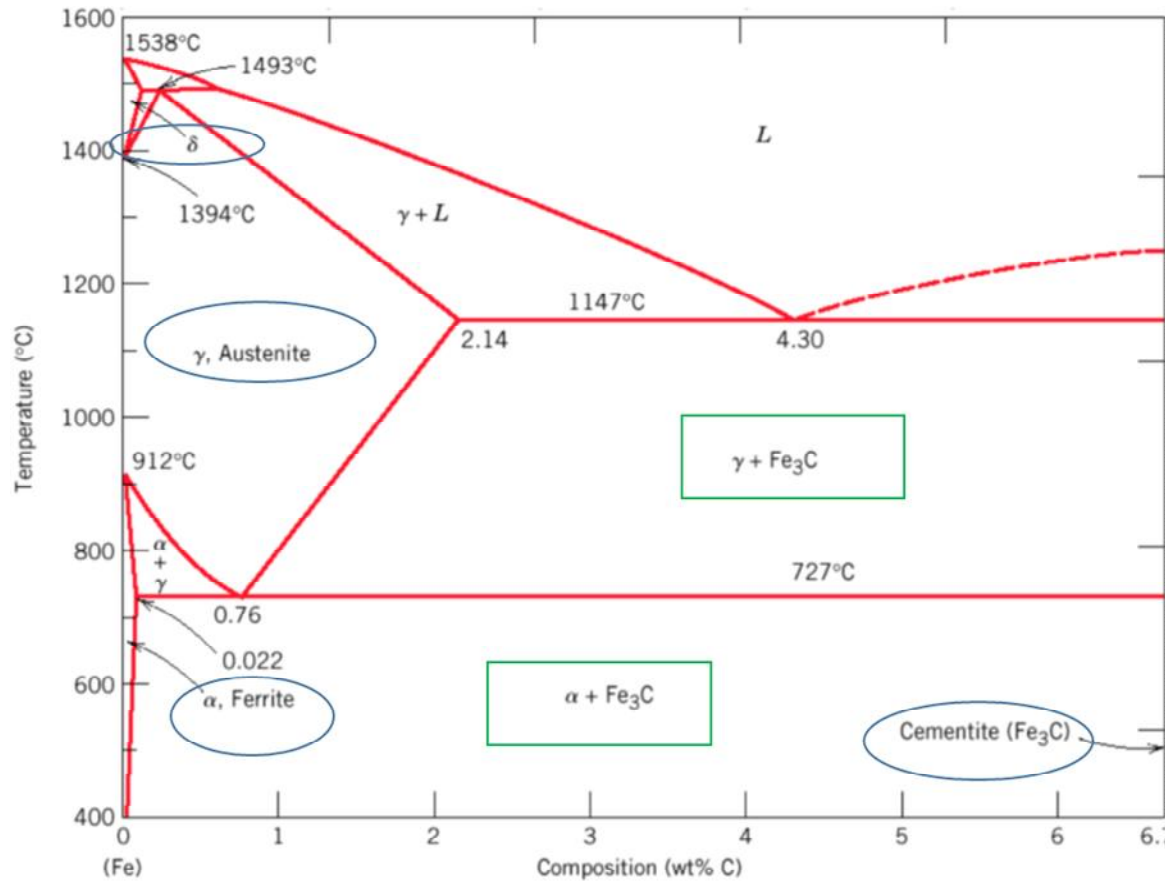
## آهن (Iron)، فولاد (Steel) و چدن (Cast-iron)

- 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–Fe<sub>3</sub>C 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

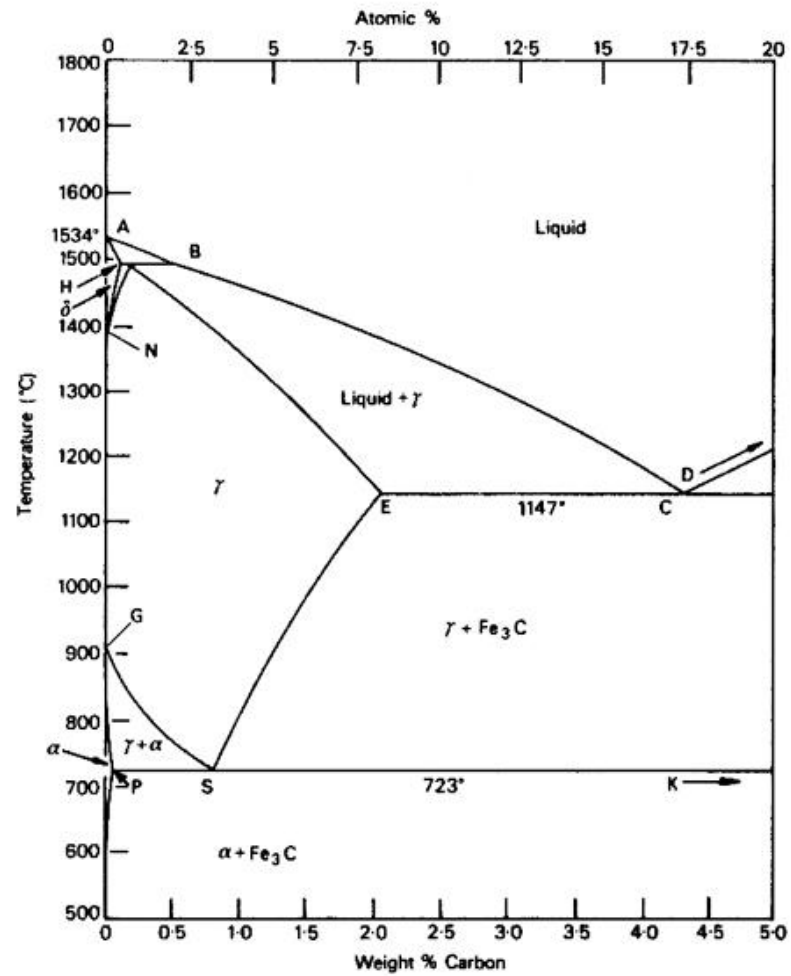
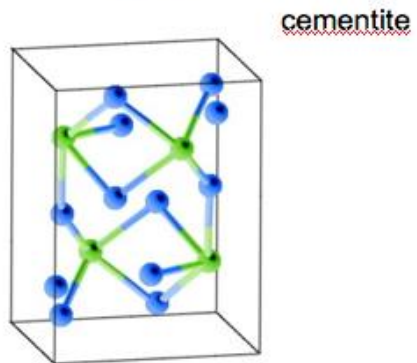
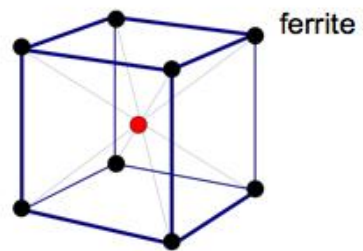
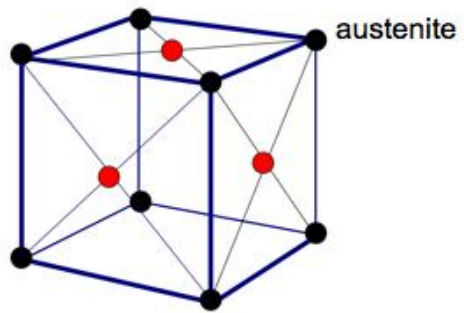
- The same structure as α-ferrite
- Stable only at high T, above 1394 °C
- Melts at 1538 °C

### ➤ Fe<sub>3</sub>C (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<sub>m</sub>= 1227 °C



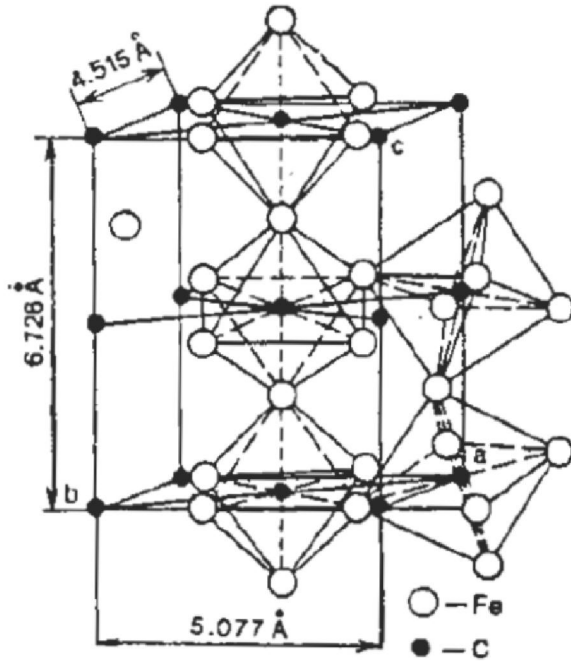


## ج : آهن دلتا

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

### کاربید آهن (سمنتیت)

این فاز ترکیبی با نسبت ثابت و مشخص یک اتم کربن و سه اتم آهن است که دارای ۶/۶۷ درصد کربن بوده و به صورت  $Fe_3C$  نشان داده می‌شود. ساختار بلوری سمنتیت بسیار پیچیده است



شکل ۹-۱ شبکه بلوری سمنتیت

هم چنانکه از این شکل

مشخص است، سمنتیت دارای

دارای شبکه بلوری مکعب مستطیل است.

واحد شبکه سمنتیت دارای ۱۲ اتم

آهن و ۴ اتم کربن است.

دمای ذوب سمنتیت در حدود ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد است و برخلاف آهن تغییرات آلوتروپیک<sup>۱</sup> 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

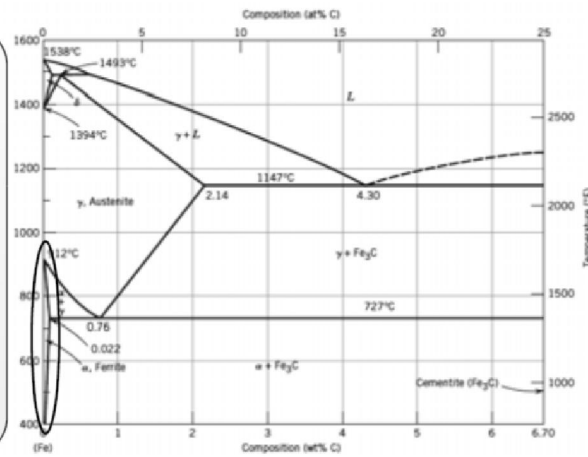


## نمودار تعادلی آهن - کربن

فازها و غلظتهای مهم

دکتر حکیم سبزواری

آهن  $\alpha$  (فریت):  
 محدوده پایداری:  
 ۰-۹۱۲ درجه  
 ساختار کریستالی:  
 BCC  
 حد حلالیت کربن:  
 0.02%  
 نوع فاز:  
 محلول جامد بین  
 نشین



7

عملیات حرارتی / دانشگاه حکیم سبزواری / دکتر جبار

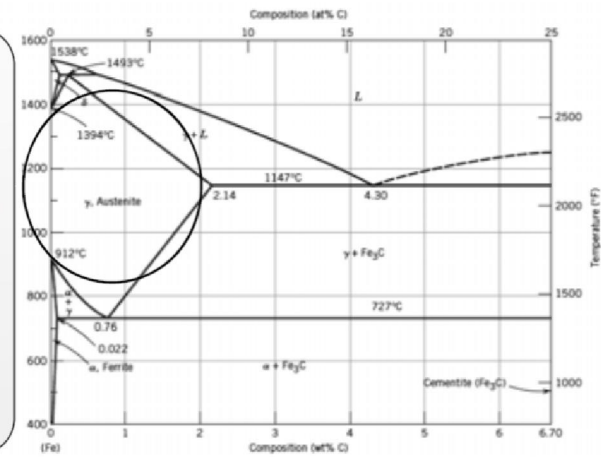


## نمودار تعادلی آهن - کربن

فازها و غلظتهای مهم

دکتر حکیم سبزواری

آهن  $\gamma$  (آستنیت):  
 محدوده پایداری:  
 ۹۱۲-۱۳۹۴ درجه  
 ساختار کریستالی:  
 FCC  
 حد حلالیت کربن:  
 2.14%  
 نوع فاز:  
 محلول جامد بین  
 نشین



8

عملیات حرارتی / دانشگاه حکیم سبزواری / دکتر جبار

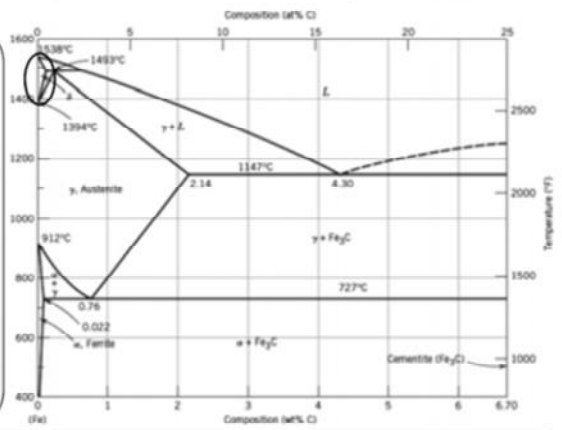


## نمودار تعادلی آهن - کربن

فازها و غلظت‌های مهم

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

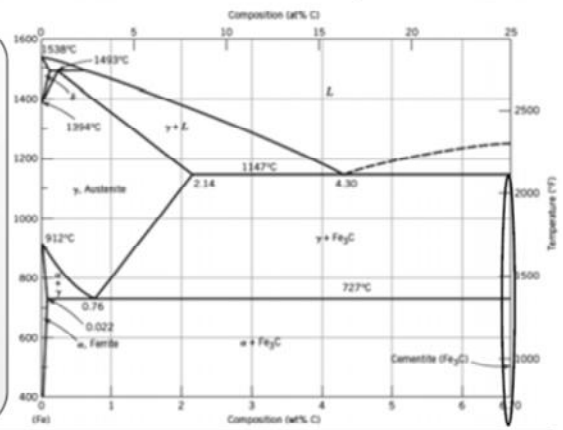
BCC



## نمودار تعادلی آهن - کربن

فازها و غلظت‌های مهم

$Fe_3C$  (سمانتیت)  
 کاربرد آهن  
 ساختار کریستالی:  
 اورترومبیک  
 غلظت کربن:  
 ۶.۷%  
 نوع فاز:  
 ترکیب  
 استوکیومتری





**چرا حد حلالیت کربن در آهن گاما بیشتر از آهن آلفا است؟**

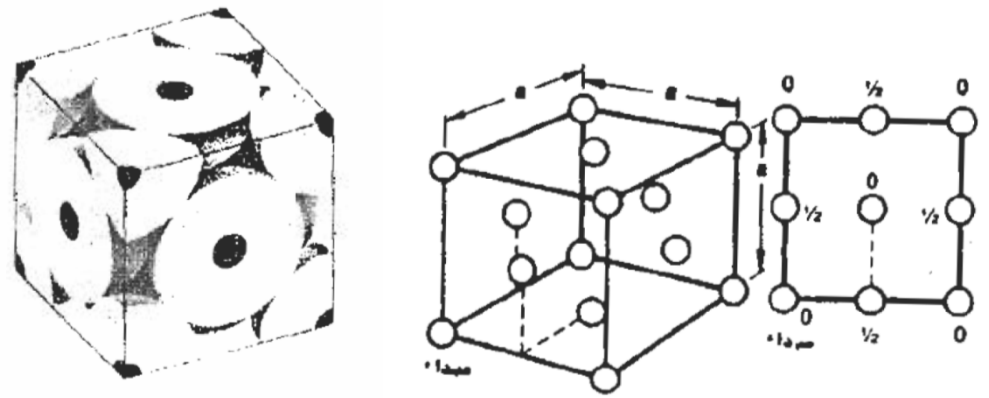
**در صورتی که ضریب فشردگی شبکه FCC در حد ۷۴ درصد و در شبکه BCC ۶۸ درصد است**

## ب : آهن گاما

دارای شبکه بلوری مکعب با سطوح مرکزدار (fcc)

جمعاً ۴ اتم در واحد شبکه آهن گاما وجود دارد که دارای مختصات زیراند،  $(0, 0, 0)$  و

$(\frac{a}{2}, \frac{a}{2}, 0)$  و  $(\frac{a}{2}, 0, \frac{a}{2})$  و این معادل با یک اتم در هر گوشه و یک اتم در مرکز هر صفحه جانبی است. هر اتم بر روی صفحه جانبی، بین دو واحد شبکه و هر اتم در گوشه‌ها، بین ۸ واحد شبکه مشترک است. بنابراین از ۶ اتم موجود در صفحات جانبی فقط ۳ اتم و از ۸ اتم موجود در گوشه‌ها، فقط یک اتم به هر واحد شبکه تعلق دارد که جمعاً ۴ اتم در هر واحد شبکه وجود خواهد داشت.



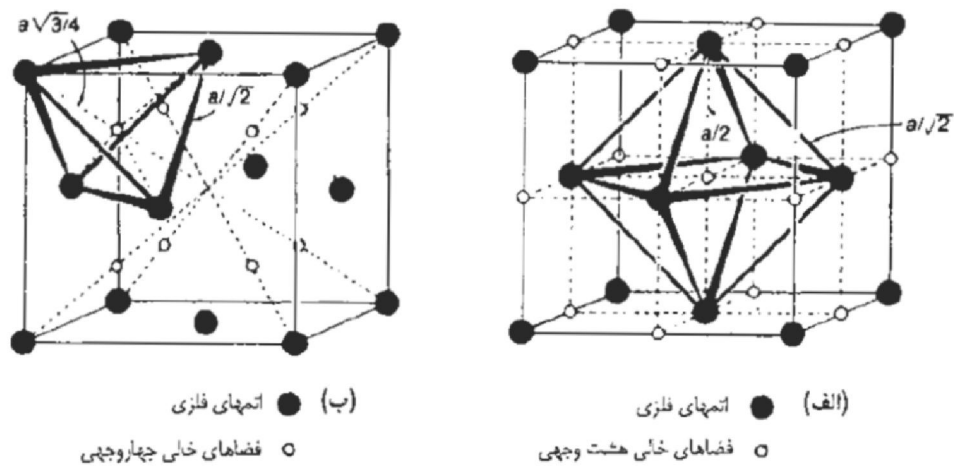
شکل ۴-۱ شبکه بلوری و آرایش اتمهای مکعب با سطوح مرکزدار (FCC)

## الف : آستنیت

حداکثر حلالیت کربن در آستنیت، در ۱۱۴۸ درجه سانتیگراد است که به ۲/۱۲ درصد می‌رسد.

## کربن در کجای شبکه آستنیت قرار می‌گیرد؟

در شبکه بلوری FCC دو نوع فضای خالی بین‌نشینی وجود دارد که می‌توانند محل‌های مناسبی برای قرار گرفتن اتم‌های کربن باشند.



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.

کربن در شبکه آستنیت، در فضای اکتاهدرال قرار می گیرد یا تتراهدرال؟

۱- کربن در فضایی با اتم همسایگی بیشتر قرار می گیرد.

۲- کربن در فضای بزرگتر قرار می گیرد.

اندازه‌های این دو نوع فضای خالی، به طور قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر متفاوت است. در آستنیت، با فرض اینکه اتمهای آهن کروی بوده و در تماس با یکدیگر باشند یک فضای هشت

وجهی قادر است اتمی به شعاع  $0.52$  انگسترم ( $0.1052 \text{ nm}$ ) را در خود جای دهد. در حالی که یک فضای چهاروجهی می‌تواند اتمی به شعاع  $0.28$  انگسترم ( $0.1028 \text{ nm}$ ) را در خود بپذیرد.

با توجه به اینکه شعاع اتمی کربن برابر با  $0.7$  انگسترم ( $0.107 \text{ nm}$ ) است، فضاهای هشت وجهی راحت‌تر از فضاهای چهاروجهی می‌توانند اتمهای کربن را در خود جای دهند. البته لازم به تذکر است که حتی برای نشست اتمهای کربن در فضاهای هشت وجهی نیز نیاز به انبساط شبکه‌ای است.

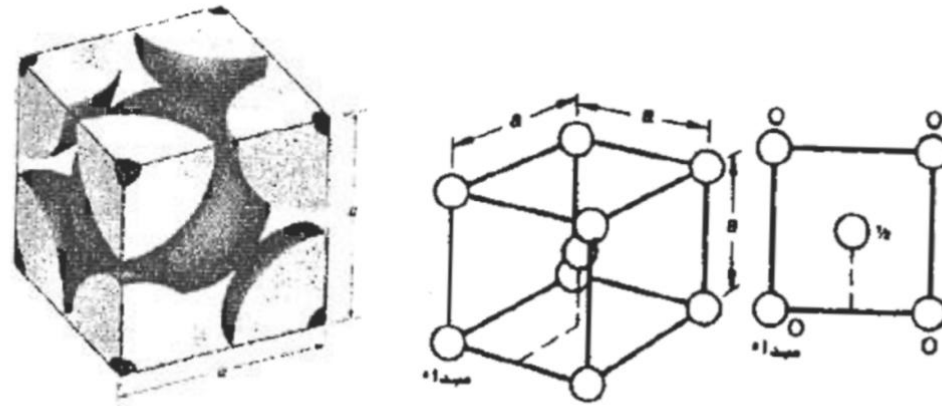
## ساختارهای بلوری و خواص آهن خالص

آهن عنصری چندشکلی<sup>۱</sup> است. بدین معنی که در فشار یک اتمسفر با افزایش دما، شبکه بلوری آن تغییر می‌کند.

### الف : آهن آلفا

آهن آلفا یا آهن فریتی جزء سیستم مکعبی بوده و شبکه بلوری آن مکعب مرکزدار (bcc)<sup>۲</sup> است در هر واحد شبکه، دو اتم وجود دارد که عبارت‌اند از اتم مرکزی با مختصات  $(\frac{a}{2}, \frac{a}{2}, \frac{a}{2})$  و اتمهای موجود در رئوس، با مختصات  $(0, 0, 0)$ . اتم اخیر که در نقطه شروع واحد شبکه است. پارامتر شبکه آهن آلفا در دمای اتاق  $286$  نانگسترم ( $0.286 \text{ nm}$ ) است.

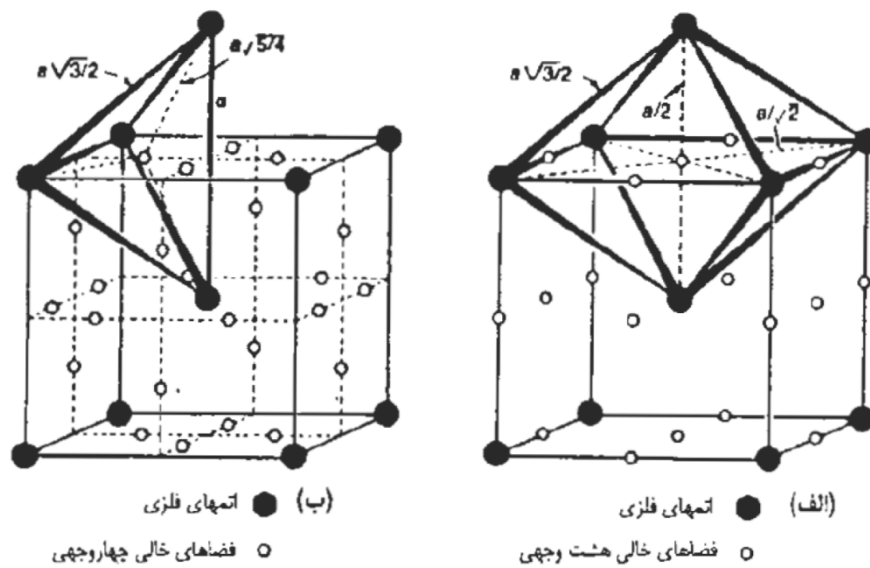




شکل ۳-۱ شبکه بلوری و آرایش اتمهای مکعب مرکزدار (bcc)

اتم مرکزی دارای ۸ اتم همسایه با نزدیکترین فاصله از آن است.

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



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.

در فریت یک فضای هشت وجهی می‌تواند

اتمی به شعاع  $0.19$  انگسترم ( $0.19 \text{ nm}$ ) و یک فضای چهاروجهی می‌تواند اتمی به شعاع  
 $0.35$  انگسترم ( $0.35 \text{ nm}$ ) را در خود جای دهد.

**شعاع اتم کربن:  $0.7$  انگستروم است**

مشخص

شده است که در فریت اتمهای کربن ترجیح می دهند که در فضاهای هشت وجهی<sup>۱</sup> قرار گیرند و بنابراین انبساط زیادی در شبکه، در جهت محورهای  $\langle 100 \rangle$  به وجود می آورند.

از آنجایی که

در فریت تعداد محدودی از اتمهای کربن می توانند در شبکه باقی بمانند (حل شوند)، شبکه بلوری اساساً به صورت مکعبی شکل باقی خواهد ماند.

اگر اتمهای بسیار زیادی از کربن که در

آستنیت موجودند، در اثر سریع سرد کردن در فضاهای هشت وجهی محبوس شوند در اثر انبساط و اعوجاج شدیدی که در جهت محورهای  $\langle 100 \rangle$  به وجود می آید شبکه بلوری مکعبی فریت به صورت مکعب مستطیل<sup>۱</sup> در می آید.

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

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

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

$$a = 2.31r$$

$$a = 2.86 A$$

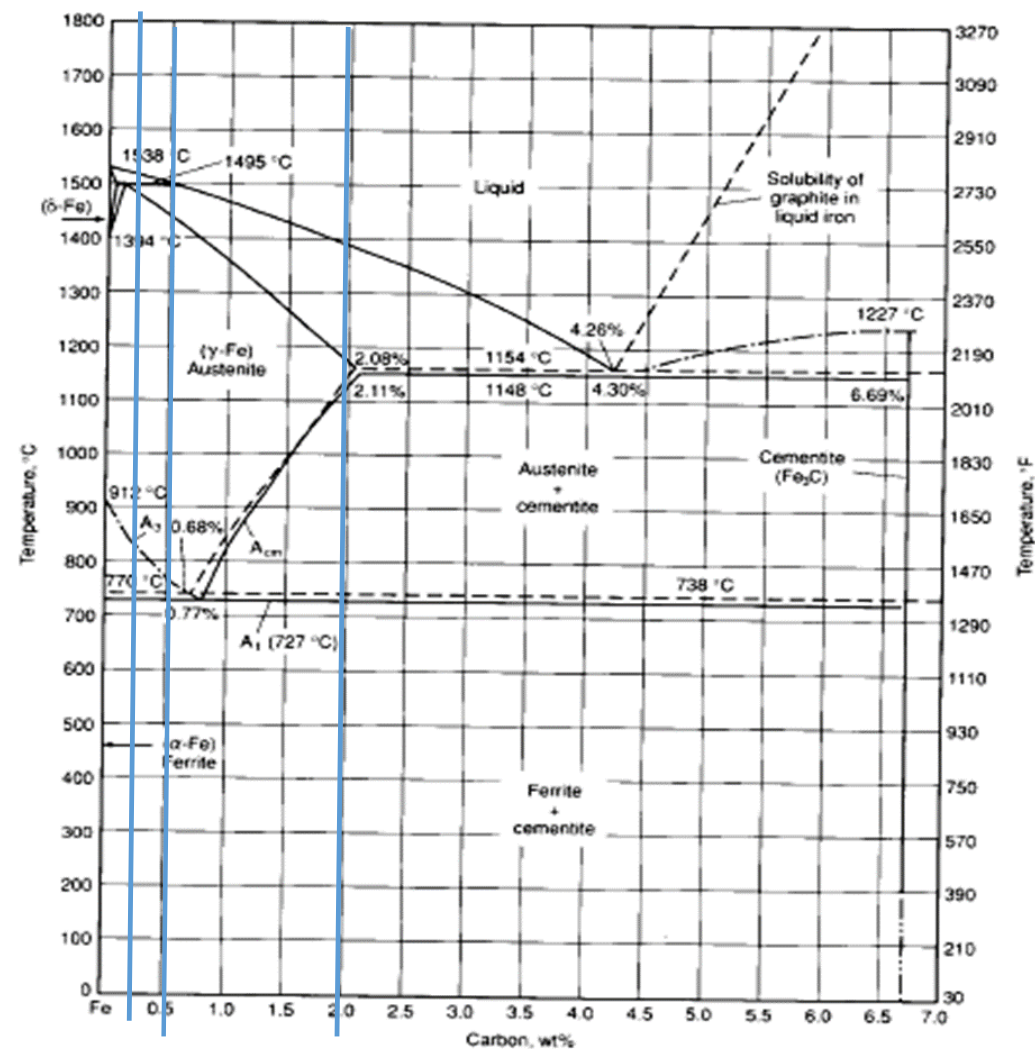
FCC

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

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

$$a = 2.84r$$

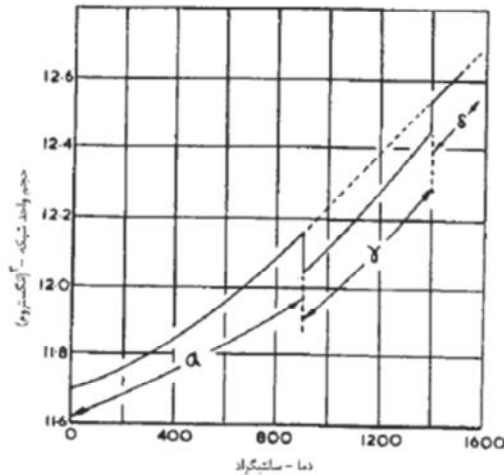
$$a = 3.56 A$$



The Fe-C equilibrium diagram up to 6.67 wt% C. Solid lines indicate Fe-Fe<sub>3</sub>C 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.



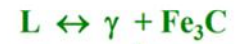
شکل ۵-۱ اثر دما بر روی حجم واحد شبکه بلوری آهن خالص [۳].

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

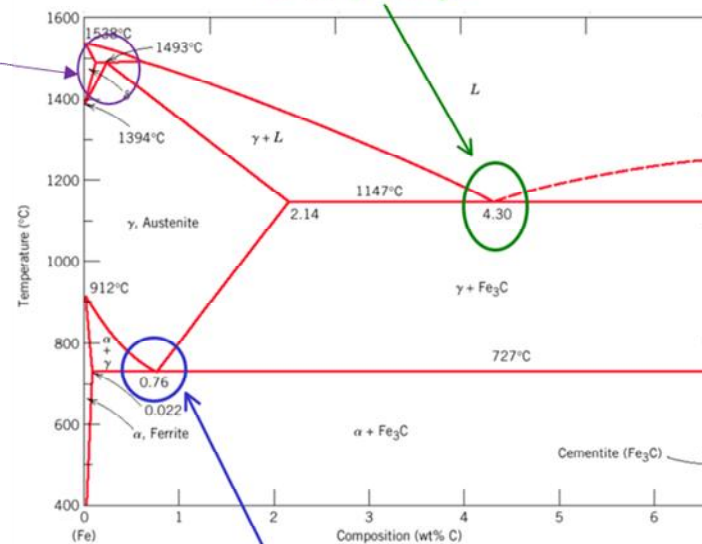
## استحاله های فازی

### Eutectic and eutectoid reactions in Fe-Fe<sub>3</sub>C

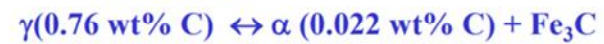
**Eutectic:** 4.30 wt% C, 1147 °C



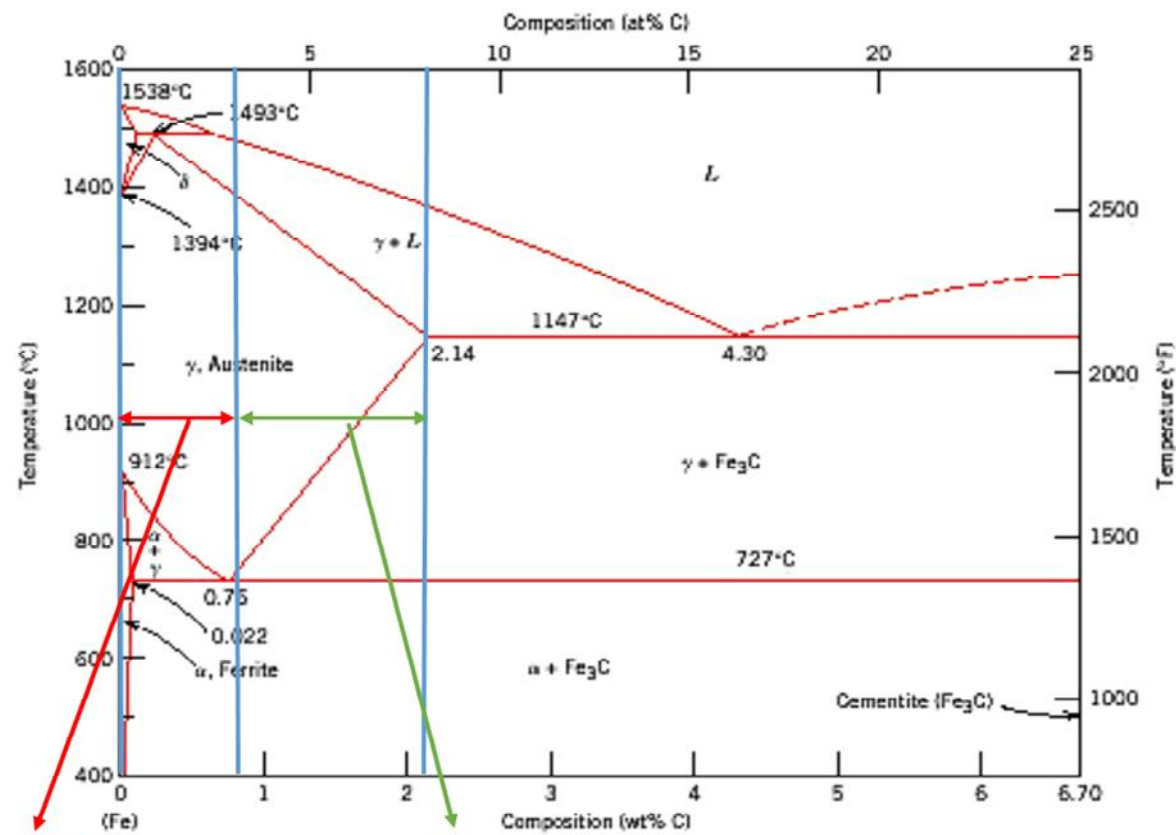
Peritectic  
 $L + \delta \leftrightarrow \gamma$



**Eutectoid:** 0.76 wt% C, 727 °C



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

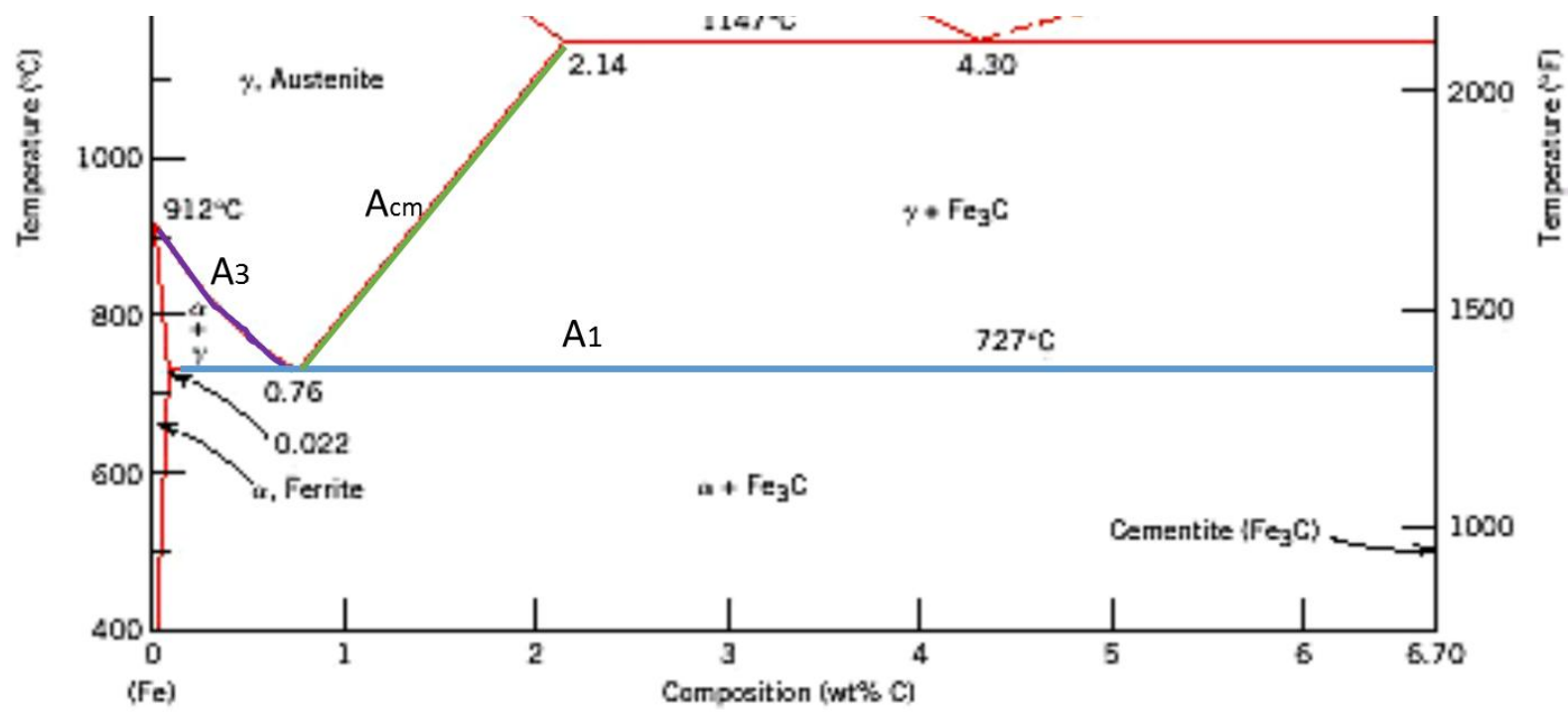


Hypo-Eutectoid    Eutectoid    Hyper-Eutectoid

## دماهای بحرانی<sup>۱</sup>

دماهای بحرانی که در نمودار تعادلی آهن - کربن وجود دارند و از نظر عملیات حرارتی دارای اهمیت‌اند 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<sup>۱</sup> گرفته شده است.



## عوامل تاثیرگذار بر جابه جایی خطوط بحرانی

۱- سرعت گرم شدن غیر تعادلی (سریع):  $Ac$

۲- سرعت سردشدن غیر تعادلی (سریع):  $Ar$

۳- حضور عناصر آلیاژی

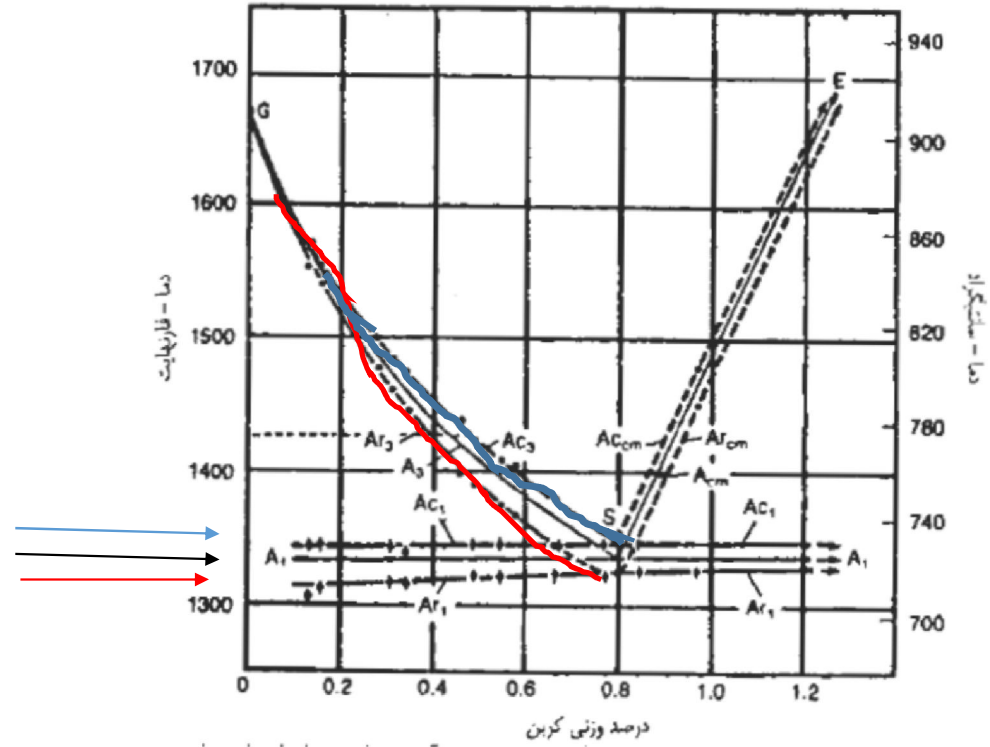
دگرگونی‌هایی که در دماهای  $A_{cm}$  و  $A_3$  و  $A_1$  انجام می‌شوند تابع نفوذند (این موضوع در فصل دوم به طور کامل بحث شده است). بنابراین دماهای بحرانی تابع آهنک گرمایش، آهنک سرمایش و همچنین ترکیب شیمیایی فولادند. گرمایش سریع باعث می‌شود که زمان قرار گرفتن نمونه در دمای بحرانی تعادلی برای انجام نفوذ 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 آهنک گرمایش و آهنک 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<sup>۱</sup> انتخاب شده و به ترتیب عبارت‌اند از حروف اول کلمات *Arret Chauffant* و *Arret Refroidissant*. بنابراین، با در نظر گرفتن اثرات آهنک گرمایش و آهنک 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  $A_{cm}$  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  $0.125$  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.

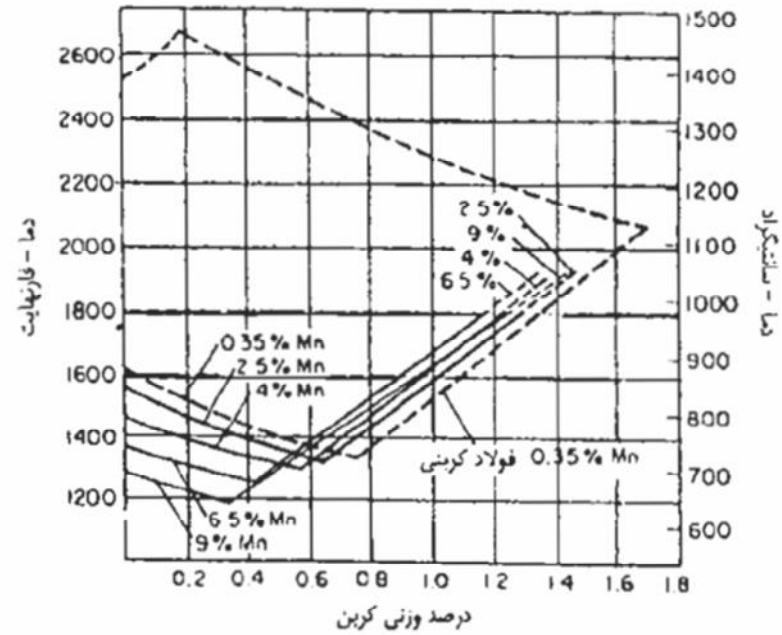
$$Ac_1 = 723 - 10.7\text{Mn} - 16.9\text{Ni} + 29.1\text{Si} + 16.9\text{Cr} + 29.0\text{As} + 6.38\text{W}$$

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

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<sup>۱</sup>‌اند، 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.

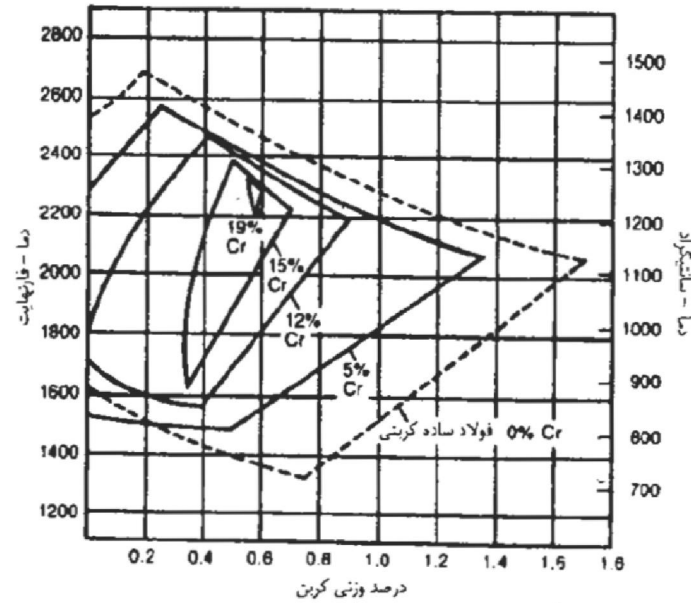


شکل ۱-۱۳ اثر منگنز بر روی وسعت ناحیه پایداری آستنیت در فولادهای کربنی

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

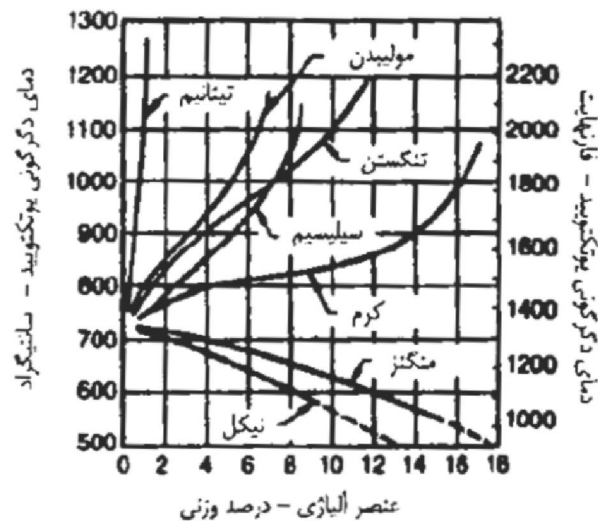
### خانواده فولادهای هدفیلد

عناصر تشکیل دهنده کاربید، 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

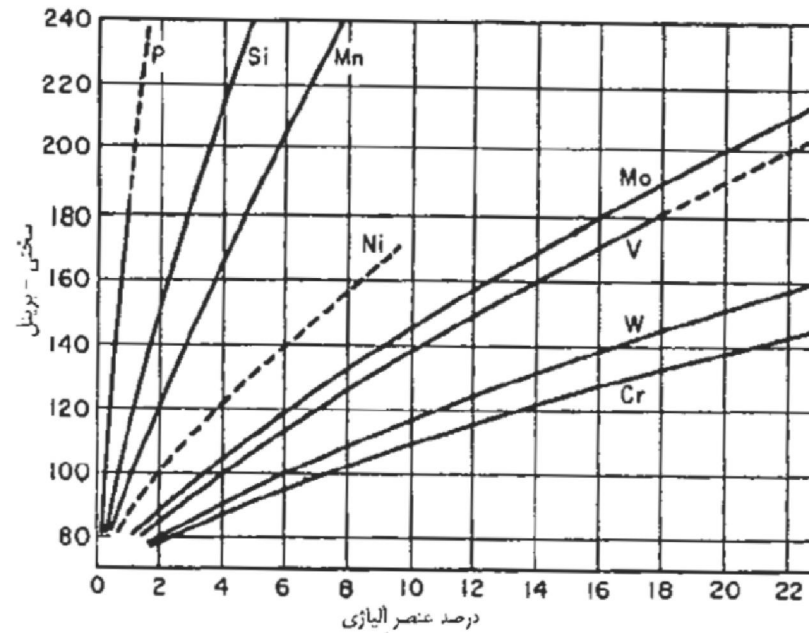
بعضی از عناصر آلیاژی، دمای یوتکتوئید را در فولادها کاهش داده و برخی آن را افزایش می دهند (شکل ۱-۱۲). منگنز و نیکل، هر دو دمای یوتکتوئید را کاهش داده و به عنوان عناصر پایدارکننده آستنیت موسوم اند.



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

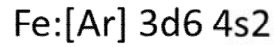
### تغییر سختی و استحکام

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 کاربید در فولادهای آلیاژی

فاز کاربید 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 (Red)
- Alkaline Earth Metals (Orange)
- Transition Metals (Yellow)
- Other Metals (Light Green)
- Nonmetals (Green)
- Noble Gases (Blue)
- Inner Transition Metals (Light Blue)

**Physical States:**

- Gas (Light Blue)
- Liquid (Yellow)
- Solid (Green)
- Synthetically Prepared (Dark Green)

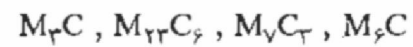
IA 1 H 1.0079	IIA 4 Be 9.0122	III B 21 Sc 44.956	IV B 22 Ti 47.88	V B 23 V 50.941	VI B 24 Cr 51.996	VII B 25 Mn 54.938	VIII B 26 Fe 55.847	VIII B 27 Co 58.933	VIII B 28 Ni 58.71	IB 29 Cu 63.546	IIB 30 Zn 65.38	IIIA 13 Al 26.982	IVA 14 Si 28.086	VA 15 P 30.974	VIA 16 S 32.06	VIIA 17 Cl 35.453	VIIIA 18 Ar 39.948	VIIIA 10 Ne 20.179	VIIIA 19 K 39.098	VIIIA 20 Ca 40.08	VIIIA 37 Rb 85.468	VIIIA 38 Sr 87.62	VIIIA 55 Cs 132.91	VIIIA 56 Ba 137.33	VIIIA 71 Lu 174.97	VIIIA 72 Hf 178.49	VIIIA 73 Ta 180.95	VIIIA 74 W 183.85	VIIIA 75 Re 186.21	VIIIA 76 Os 190.2	VIIIA 77 Ir 192.22	VIIIA 78 Pt 195.09	VIIIA 79 Au 196.97	VIIIA 80 Hg 200.59	VIIIA 81 Tl 204.37	VIIIA 82 Pb 207.2	VIIIA 83 Bi 208.98	VIIIA 84 Po (209)	VIIIA 85 At (210)	VIIIA 86 Rn (222)	VIIIA 112 He 4.0026	VIIIA 118 Xe 131.30	VIIIA 119 Fr (223)	VIIIA 120 Ra 226.03	VIIIA 121 Lr (260)	VIIIA 122 La 138.91	VIIIA 123 Ce 140.12	VIIIA 124 Pr 140.91	VIIIA 125 Nd 144.24	VIIIA 126 Pm (145)	VIIIA 127 Sm 150.4	VIIIA 128 Eu 151.96	VIIIA 129 Gd 157.25	VIIIA 130 Tb 158.93	VIIIA 131 Dy 162.50	VIIIA 132 Ho 164.93	VIIIA 133 Er 167.26	VIIIA 134 Tm 168.93	VIIIA 135 Yb 173.04	VIIIA 136 Ac (227)	VIIIA 137 Th 232.04	VIIIA 138 Pa 231.04	VIIIA 139 U 238.03	VIIIA 140 Np 237.05	VIIIA 141 Pu (244)	VIIIA 142 Am (243)	VIIIA 143 Cm (247)	VIIIA 144 Bk (247)	VIIIA 145 Cf (251)	VIIIA 146 Es (254)	VIIIA 147 Fm (257)	VIIIA 148 Md (258)	VIIIA 149 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<sup>۱</sup> 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  $(Cr, Mn, Fe)_{23}C_6$  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

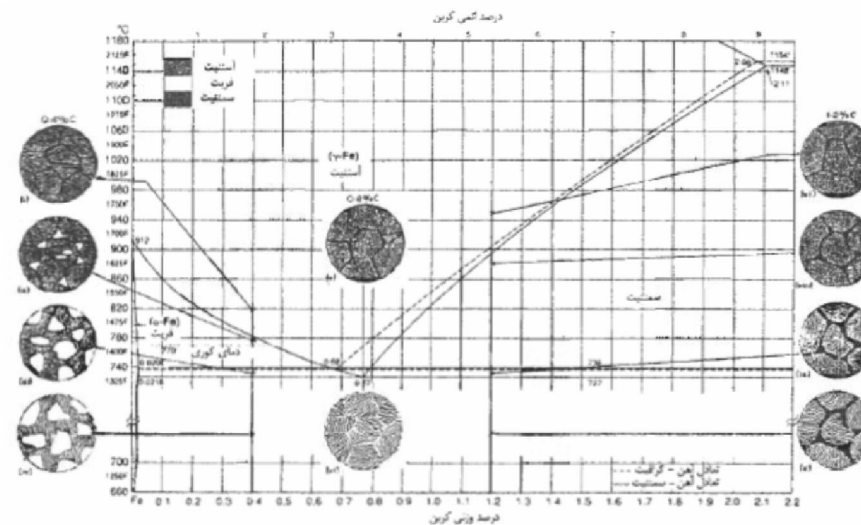
2- steel/Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>

# فصل دوم

فازها و ساختارهای تعادلی

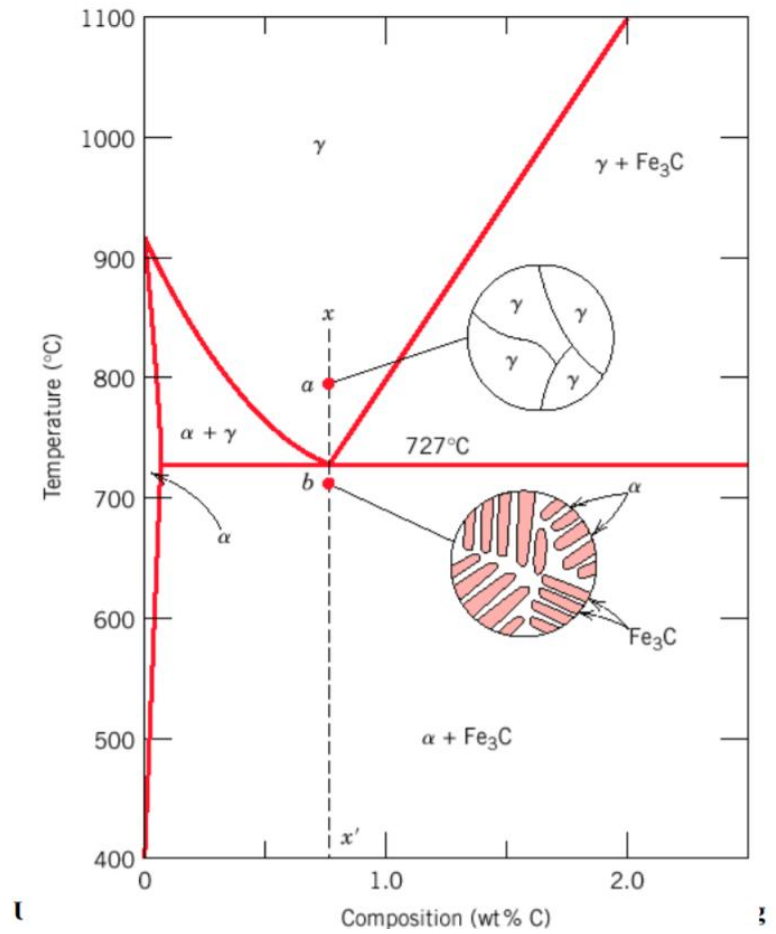
## دگرگونی یونکتوییدی

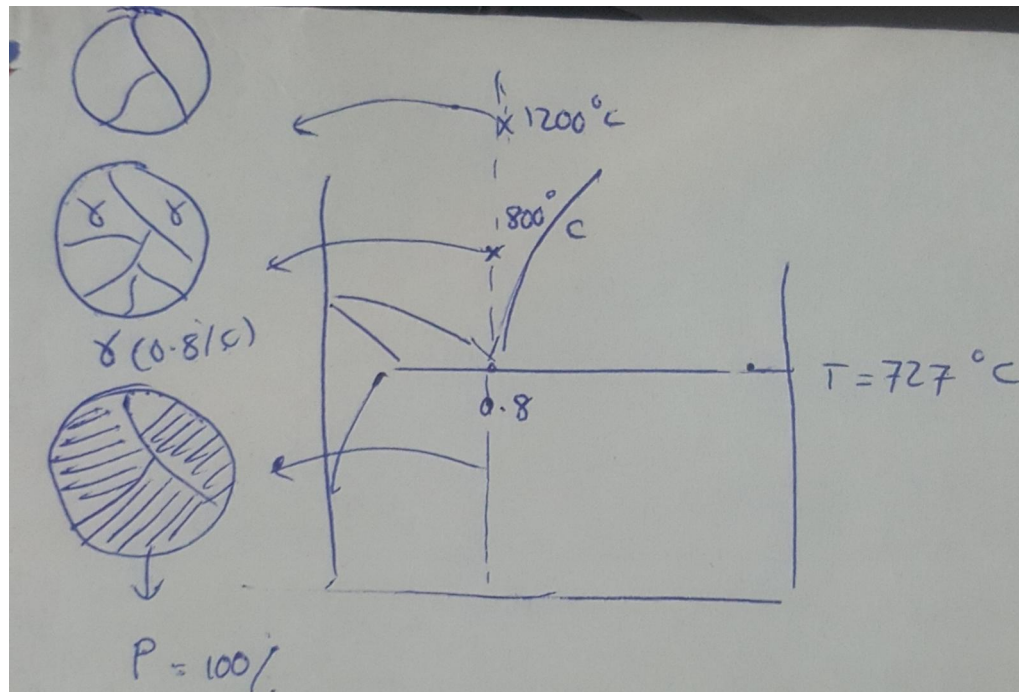
نمودار تعادلی آهن - کربن که در فصل اول معرفی شد، پایه و اساس مطالعه دگرگونی فازها در فولادها را تشکیل می‌دهد. شکل ۱-۲ قسمتی از نمودار آهن - کربن نشان داده شده در شکل ۲-۱ را با مقیاس بزرگتر نشان می‌دهد. در این شکل ناحیه مربوط به دگرگونی آستنیت و میکروساختارهای حاصل از آهسته سرد شدن آن نشان داده شده‌اند.



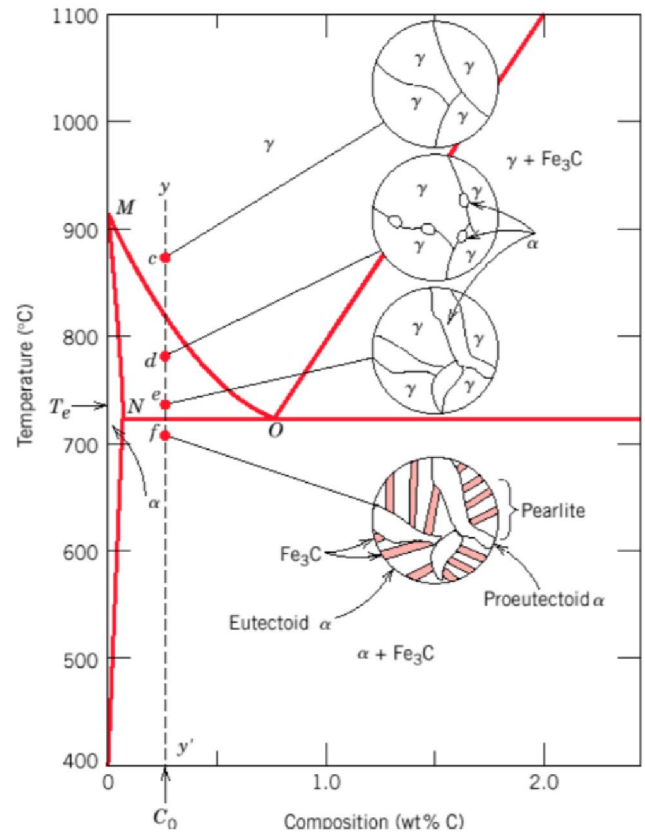
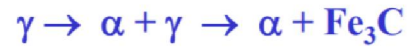
شکل ۱-۲ بخشی از نمودار تعادلی آهن - کربن که دگرگونی یونکتوییدی و تشکیل فازهای فریت پرویونکتوییدی و سمنتیت پرویونکتوییدی را مشخص می‌کند [۱ و ۲].

## Microstructure of eutectoid steel (I)





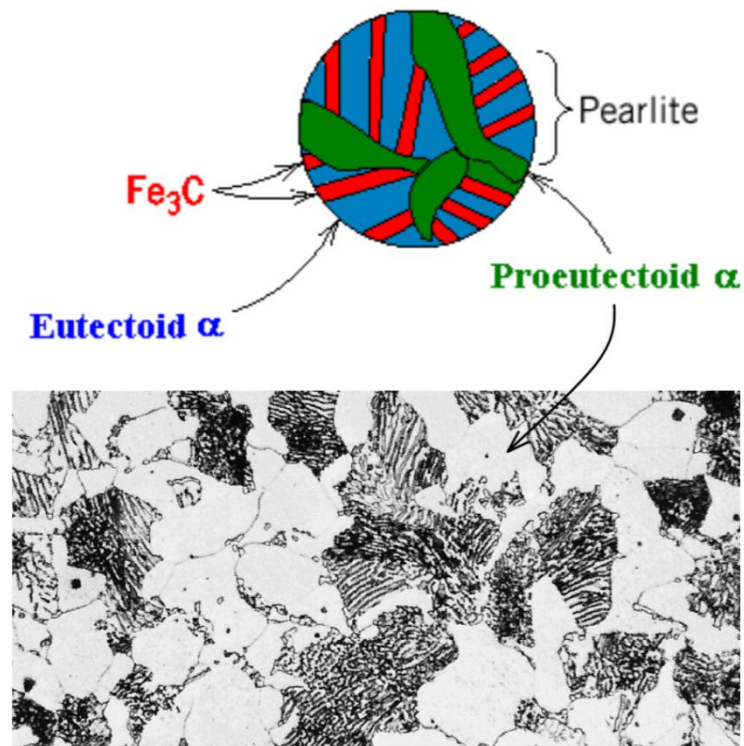
**hypoeutectoid** (*less than eutectoid* -Greek) alloys.

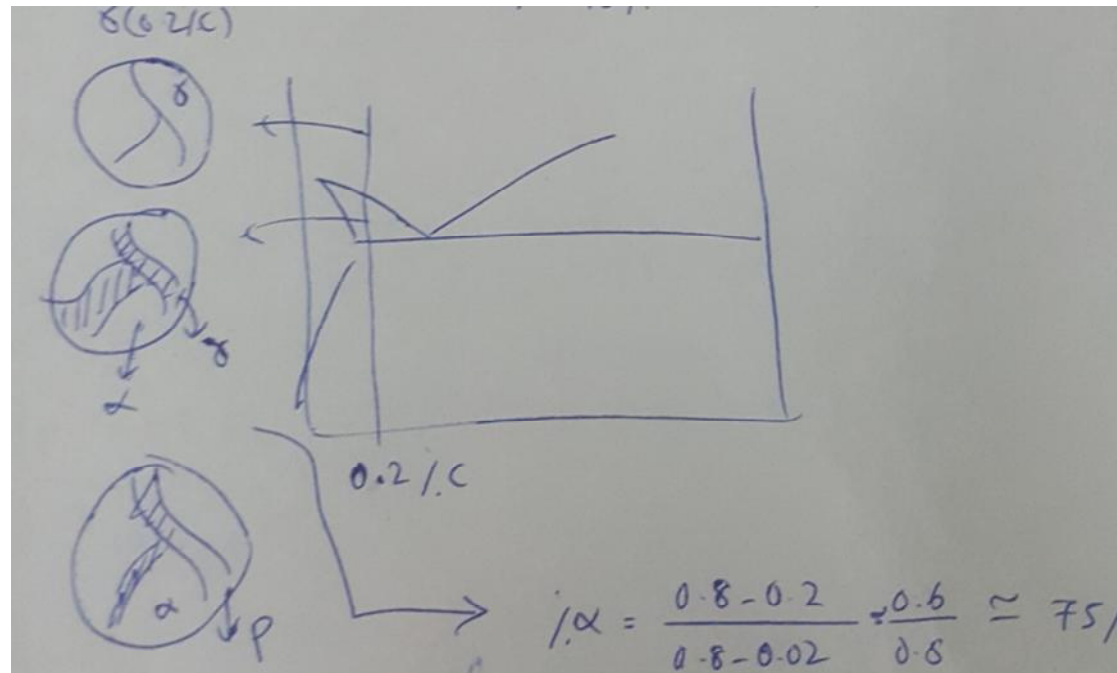




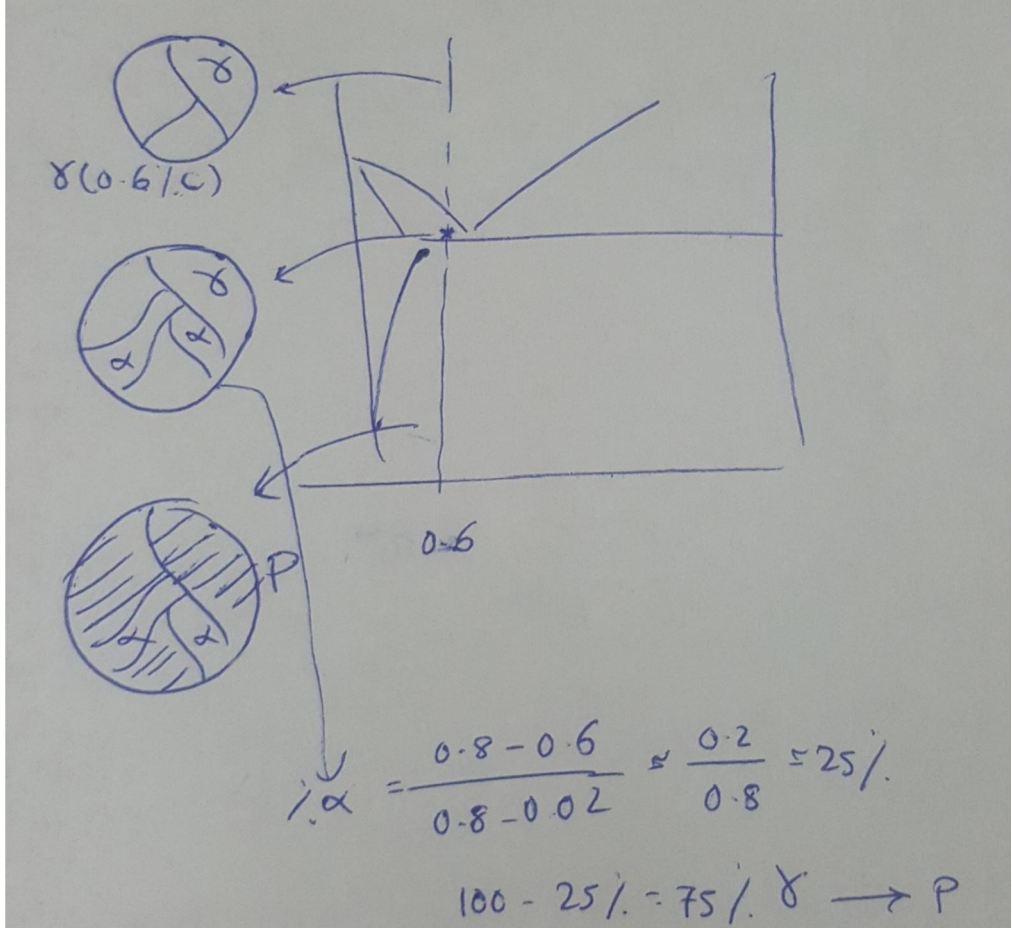
### Microstructure of hypoeutectoid steel (II)

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



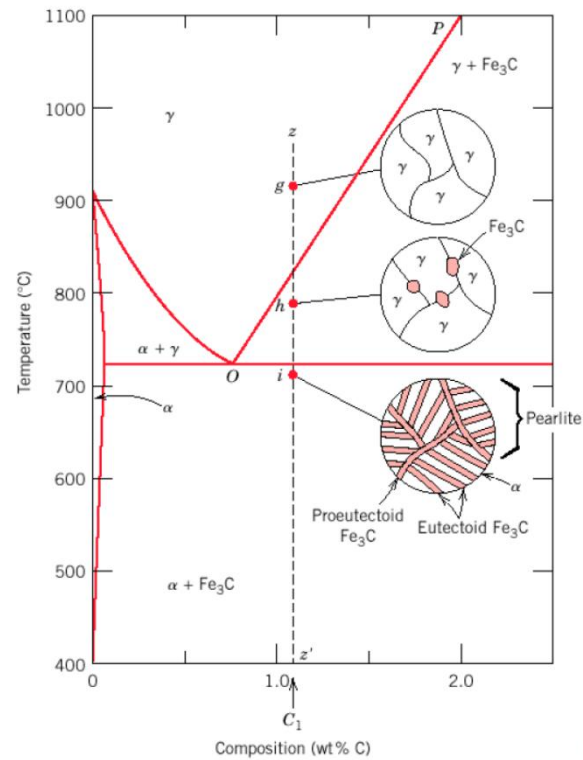


% $\gamma$  or P=25%



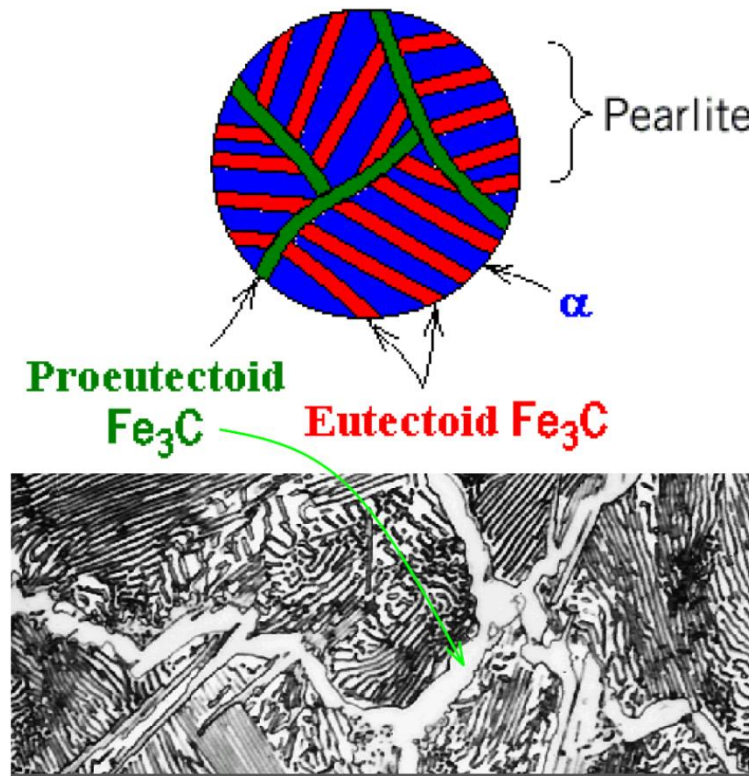
## Microstructure of hypereutectoid steel (I)

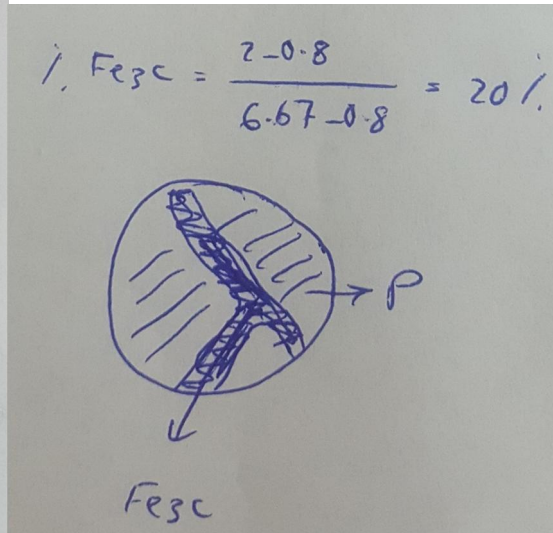
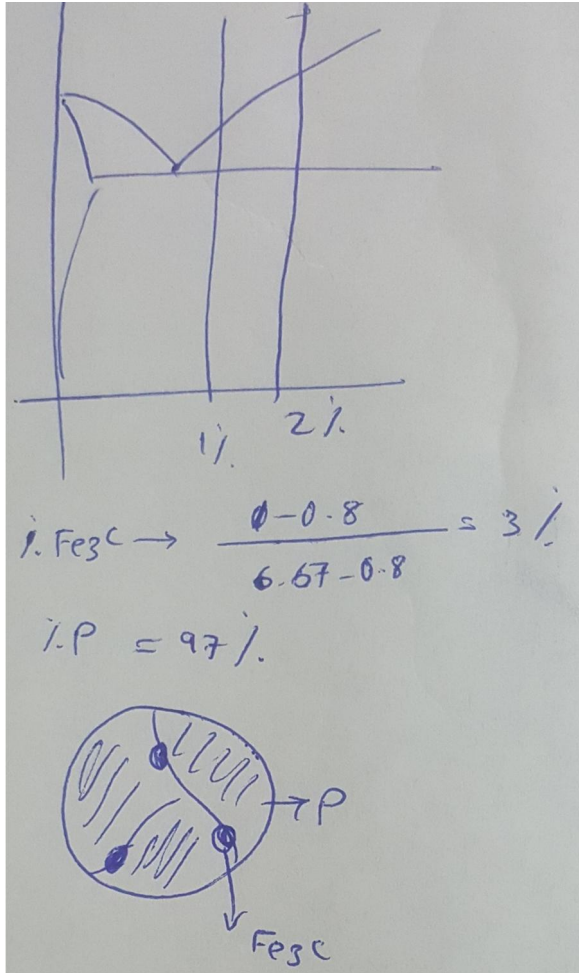
Compositions to the right of eutectoid (0.76 - 2.14 wt % C)  
**hypereutectoid** (*more than eutectoid* -Greek) alloys.



### Microstructure of hypereutectoid steel (II)

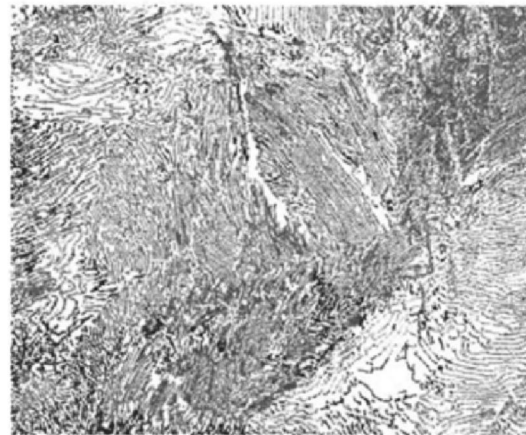
Hypereutectoid alloys contain proeutectoid cementite (formed above the eutectoid temperature) plus pearlite that contain eutectoid ferrite and cementite.





## 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<sup>۲</sup> از لایه‌های متناوب فریت و سمنتیت با فواصل و جهات مختلف مشخص می‌شود.

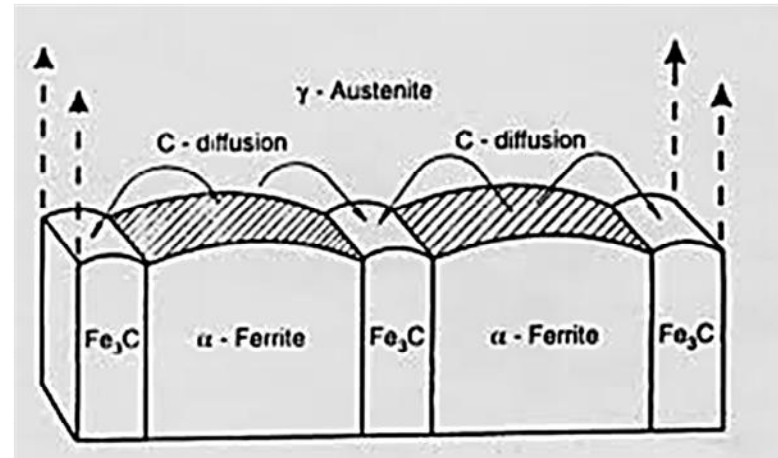


شکل ۲-۲ میکروساختار پرلیت مربوط به آلیاژ  $0.75\% \text{C} / \text{Fe}$  که پس از آستنیت‌شدن در کوره سرد شده است. محلول حکاکی، پیکرال، بزرگنمایی  $500 \times$  [۱].

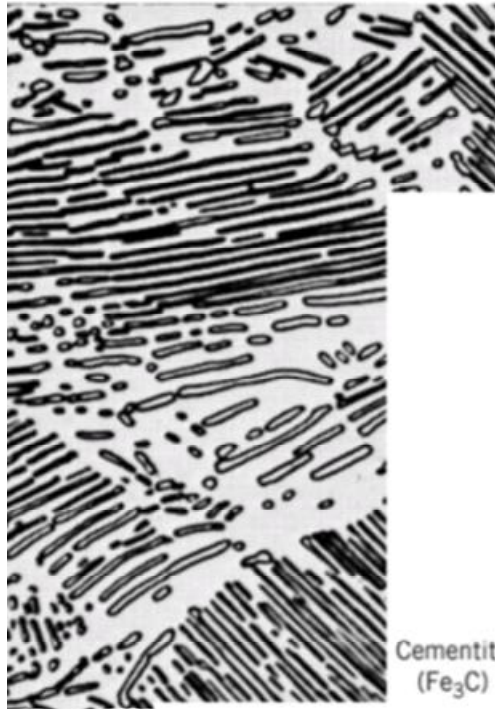
اهرم می توان برای آلیاژ  $0.77\%C-Fe$  که کاملاً به پرلیت تبدیل می شود نشان داد:  
در دمای یوتکتوئید

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

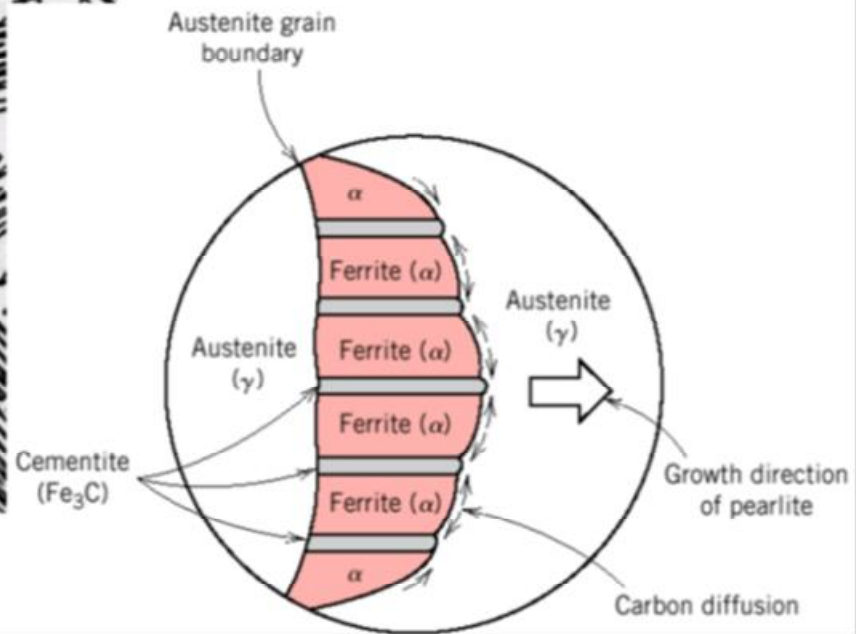
$$\text{درصد وزنی فریت در پرلیت} = \frac{6.67 - 0.77}{6.67 - 0.02} \times 100 = 88.7 \quad (3-2)$$

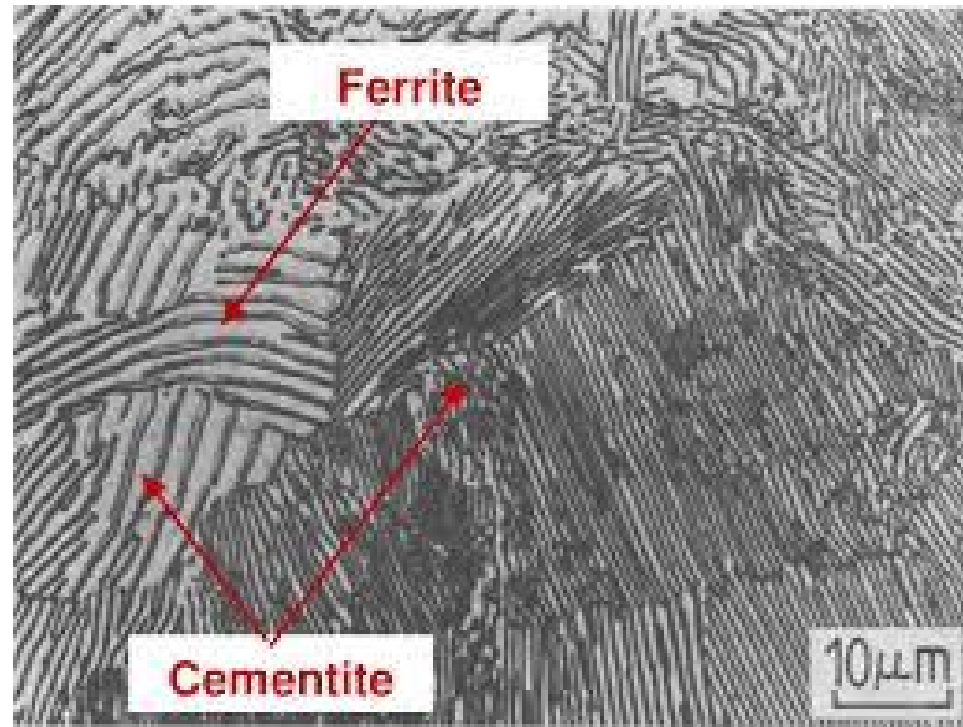




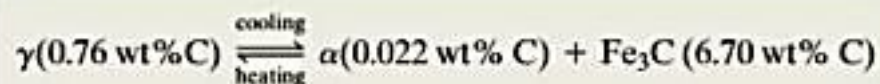


In the micrograph, the dark areas are  $\text{Fe}_3\text{C}$  layers, the light phase is  $\alpha$ -ferrite

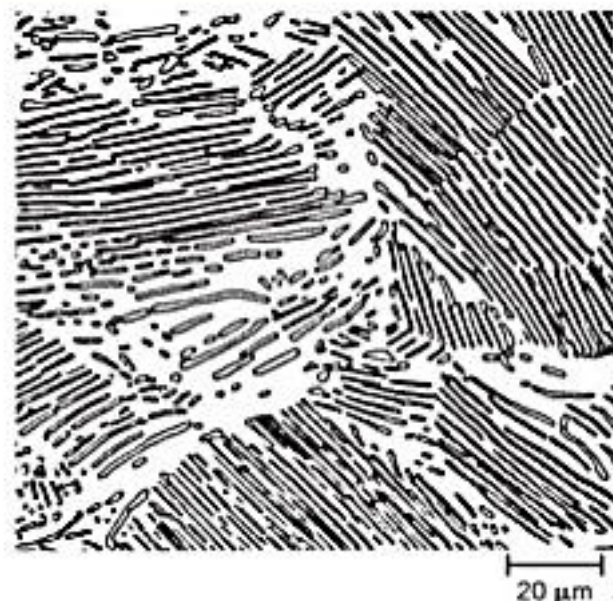




# Introduction



- Diffusion-dependent  $\rightarrow$  Eutectoid mixture  $\rightarrow$  0.76% C @ 727°C on very slow cooling
- Very fine **platelike** or **lamellar** mixture of ferrite and cementite.
- **White ferritic background/matrix** contains **thin plates of cementite** (dark).
- Properties:
  - Tensile strength = 120,000 psi
  - Elongation = 20% in 2 in
  - Hardness = Rockwell C 20, Rockwell B 95-100, or BHN 250-300



# مکانیزم تشکیل پرلیت

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

اگر آستنیت همگن باشد (یکنواخت از

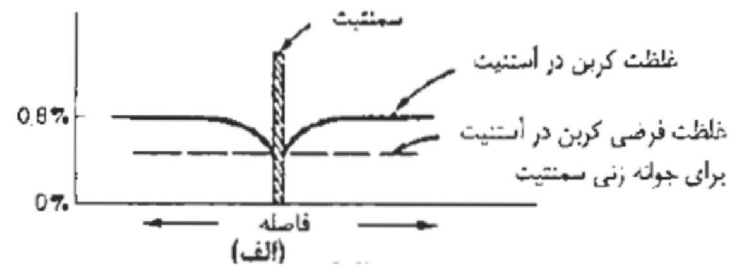
نظر ترکیب شیمیایی) جوانه‌زنی عمدتاً در مرز دانه‌ها انجام می‌شود. در صورتی که آستنیت همگن نباشد مثلاً در داخل دانه‌های آستنیت شیب غلظتی و یا ذرات کاربید آهن وجود داشته باشد، جوانه‌زنی پرلیت نه تنها در مرز دانه‌ها بلکه در داخل دانه‌ها نیز انجام می‌شود.

مکانیزم تشکیل پرلیت فقط براساس حدس و تصور است.

بر طبق پیشنهاد مهل<sup>۱</sup>، 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.



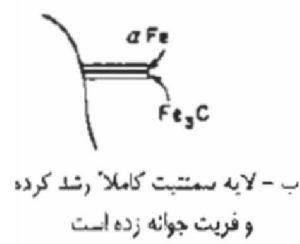
شکل ۲-۴



شکل ۲-۵

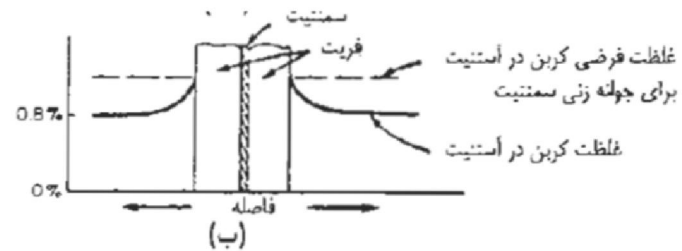
### موقعی که درصد کربن در

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

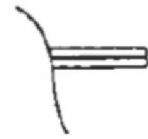
شکل ۲-۴



شکل ۲-۵

افزایش کربن در این محلها آنقدر ادامه می‌یابد تا اینکه

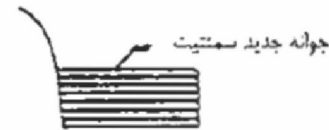
جوانه‌های جدید سمنتیت به وجود آید. رشد لایه‌های جدید سمنتیت به نوبه خود منجر به تشکیل لایه‌های جدید فریت می‌شود. با ادامه فرایند یادشده، لایه‌های متناوب مربوط به یک دسته پرلیت تشکیل خواهد شد (شکل ۲-۴).



الف - چ - لایه فریت کاملاً رشد کرده و سمنتیت جوانه زده است

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

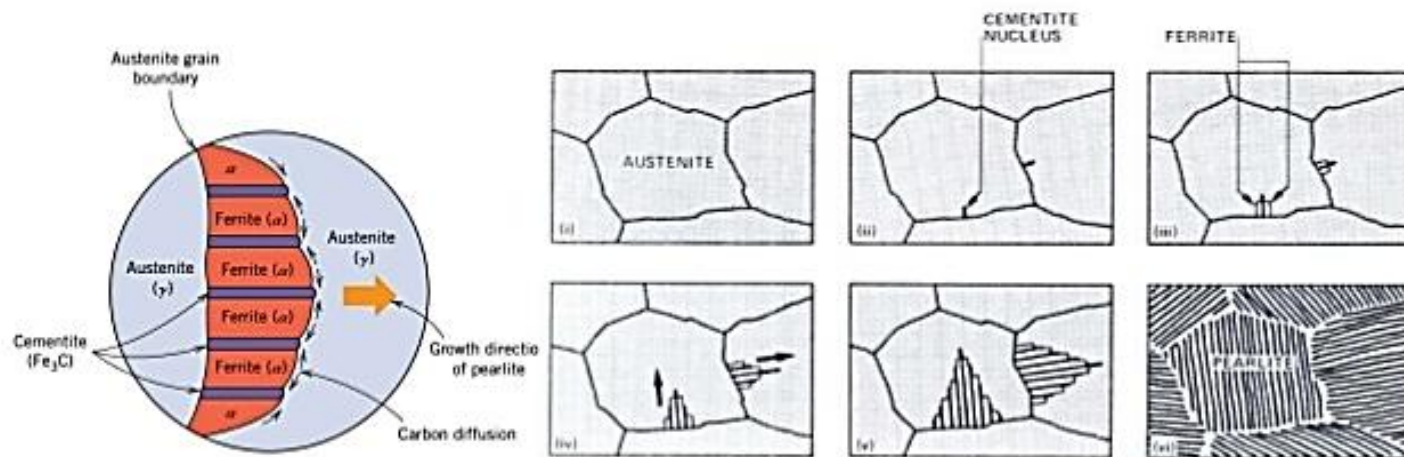
ج - جوانه اولیه سمنتیت



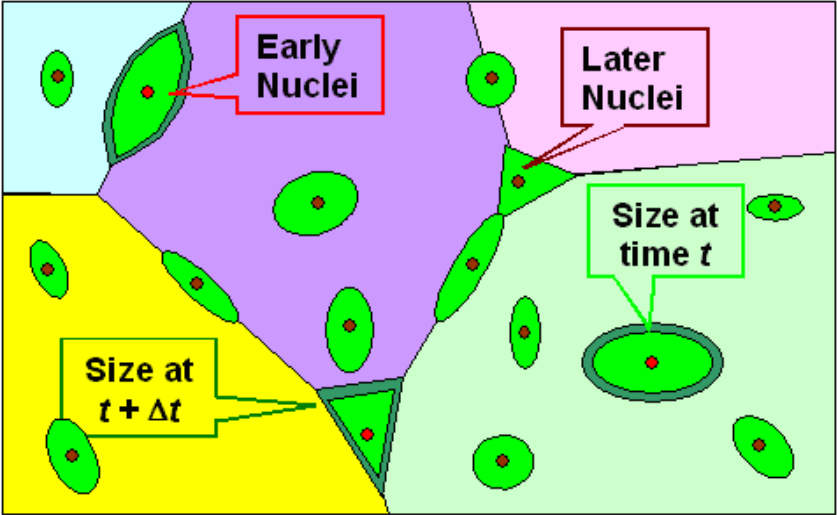
د - دسته جدید پرلیت که به دنبال دسته اولیه پرلیت رشد کرده است

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

# Nucleation and Growth of Pearlite



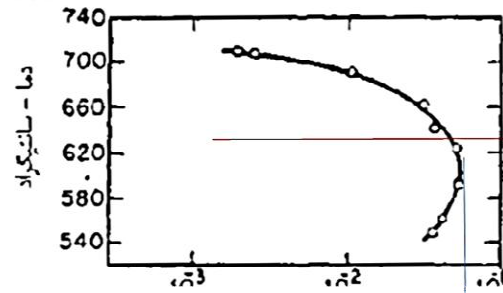




### اثر دما بر دگرگونی پرلیتی

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

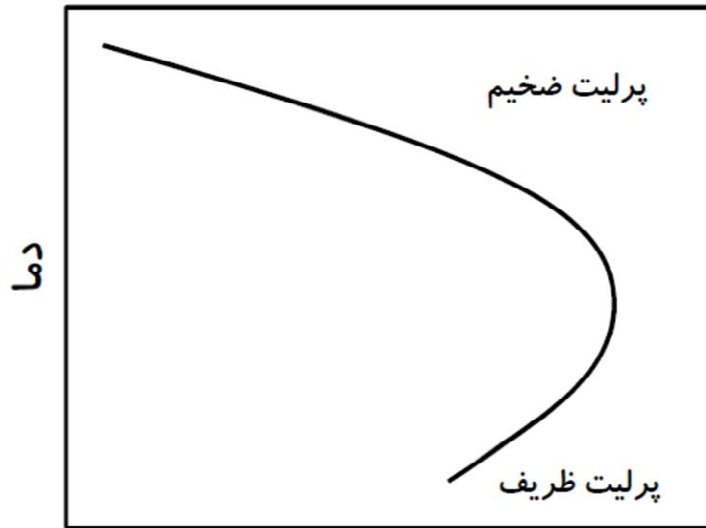
در ماهایی درست زیر دمای  $A_1$ ، با کاهش دما آهنگ رشد پرلیت سریعاً افزایش می‌یابد و در  $600^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد به حداکثر مقدار رسیده و در دماهای پایتتر، مجدداً کاهش می‌یابد.



آهنگ جوانه زنی کم اما آهنگ رشد بالا

آهنگ جوانه زنی زیاد اما آهنگ رشد کم

ماکزیمم آهنگ تشکیل پرلیت

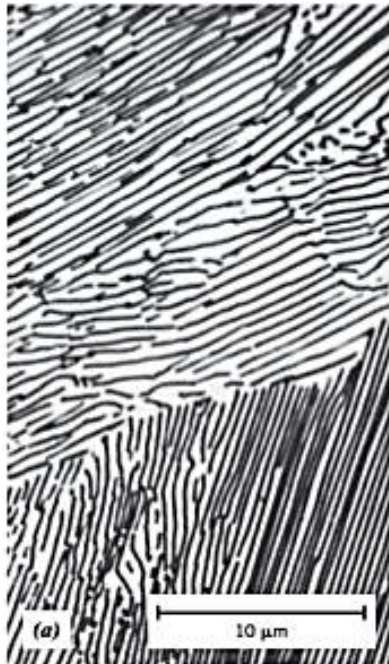


سرعت تشکیل پرلیت

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

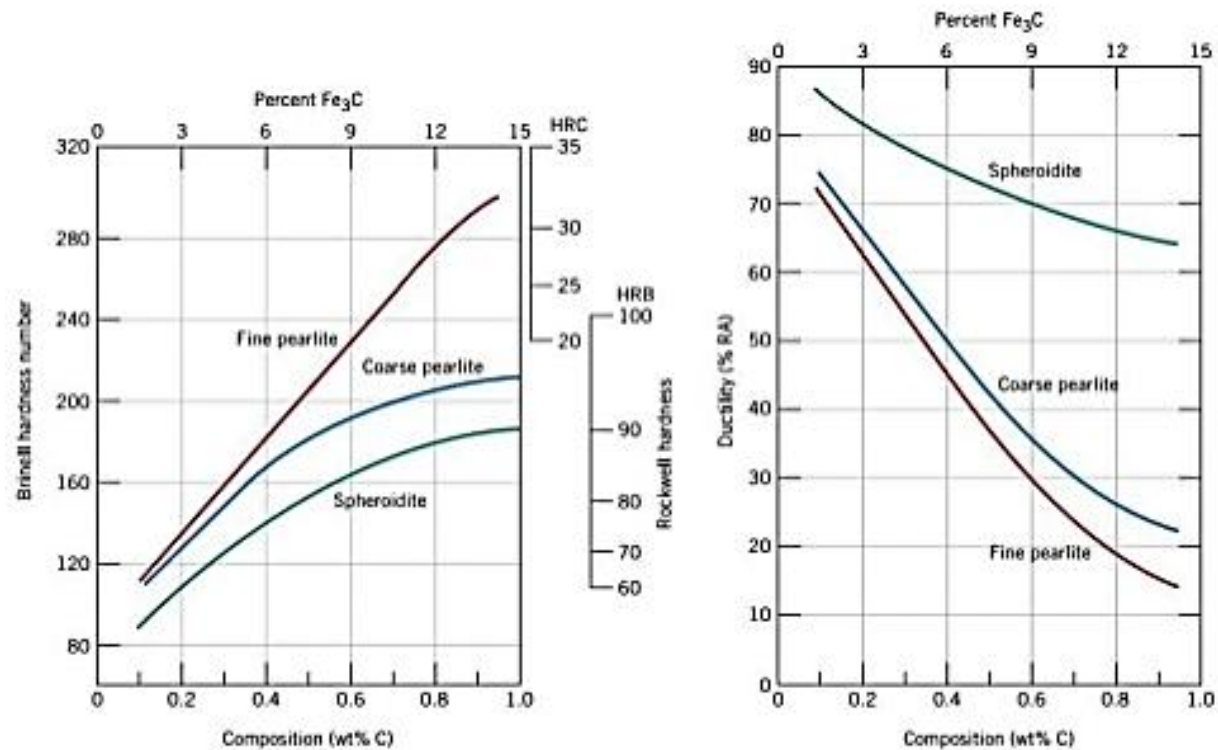
آهنگ جوانه زنی زیاد اما آهنگ رشد کم  
طول لایه های پرلیتی کوتاه

## Coarse and Fine Pearlite



- Thickness ratio of ferrite and cementite is 8:1, depends on temperature.
- At high T, thick layers of ferrite and  $\text{Fe}_3\text{C}$  → **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  $\text{Fe}_3\text{C}$  → **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<sup>۱</sup> و جانسون<sup>۲</sup> به صورت زیر مشخص کرد.

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

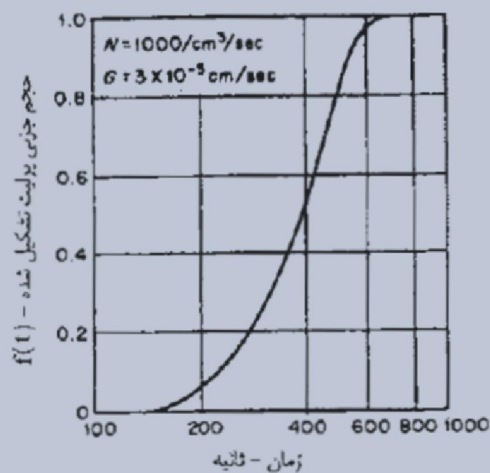
$$G: \frac{cm}{s}$$

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

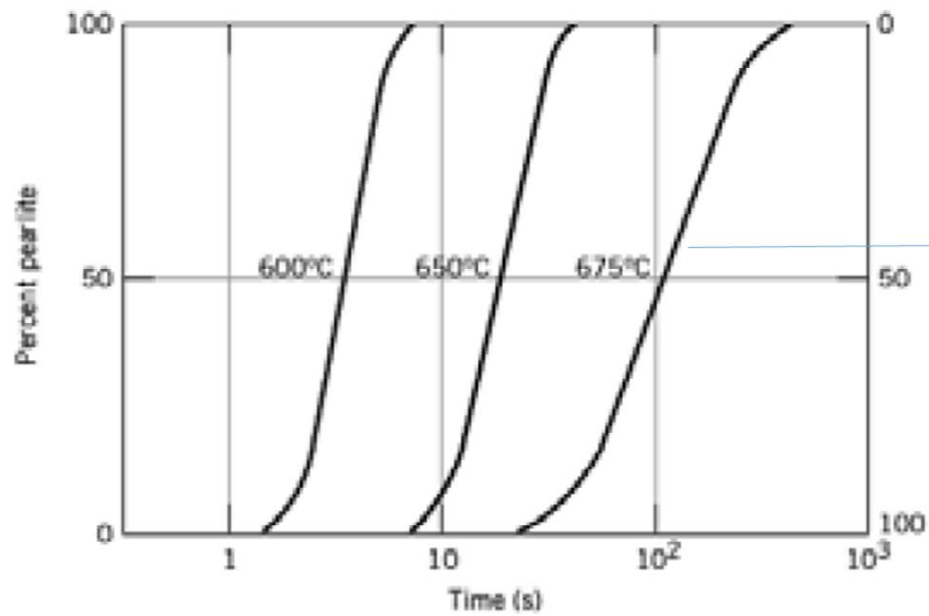
در این رابطه فرض شده است که آهنگ جوانه زنی ( $N$ ) در هر دما ثابت باشد، تشکیل جوانه های پرلیت به صورت اتفاقی باشد و کره های پرلیت در حال رشد همچنان به صورت کروی باقی بمانند. در این رابطه:  $f(t)$ ، حجم جزئی پرلیت تشکیل شده در یک زمان مشخص  $t$  و در یک دمای ثابت  $T$  است.  $N$  و  $G$ ، به ترتیب آهنگ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



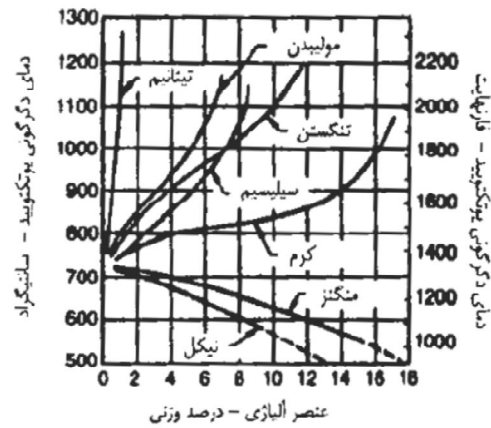
شکل ۲-۱۰ حجم چیزی پرلیت تشکیل شده برحسب زمان، منحنی فوق با استفاده از رابطه (۲-۶) رسم شده است [۹].



اگر دما بالاتر از ۶۰۰ درجه سانتی گراد باشد.  
هرچه دما بیشتر شود با توجه به نمودارهای قبلی سرعت تشکیل پرلیت کم می شود یعنی زمان زیاد می شود.



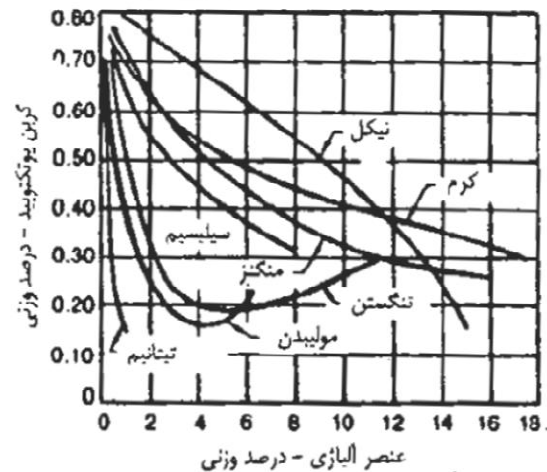
**دمای نقطه یوتکتوئید** بعضی از عناصر آلیاژی، دمای یوتکتوئید را در فولادها کاهش داده و برخی آن را افزایش می دهند (شکل ۱-۱۲). منگنز و نیکل، هر دو دمای یوتکتوئید را کاهش داده و به عنوان عناصر پایدارکننده آستنیت موسوم اند.



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

## میزان کربن نقطه یوتکتوئید

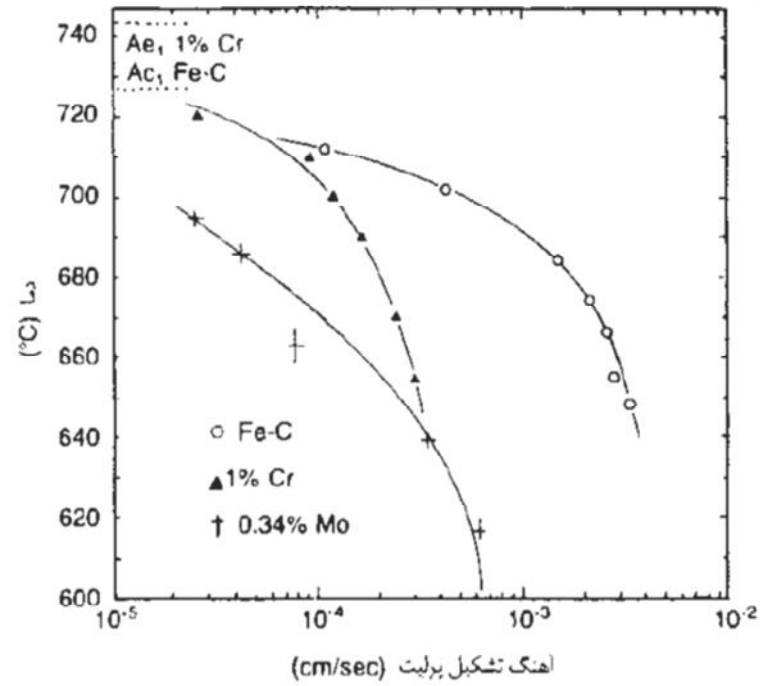
همان گونه که در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است، تمام عناصر آلیاژی که به صورت جانشینی در فولادها وارد می‌شوند نظیر نیکل، کرم، سیلیسیم، منگنز، تنگستن، مولیبدن و تیتانیم، درصد کربن نقطه یوتکتوئید را کاهش می‌دهند. در این رابطه، تیتانیم، تنگستن و مولیبدن بیشترین اثر را داشته، در حالی که نیکل و کرم، کمترین اثر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



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

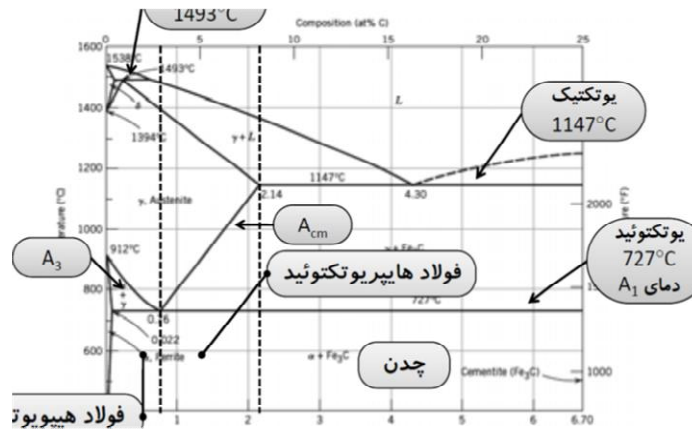
## تأثير عناصر آلياژی بر سرعت تشکیل پرليت

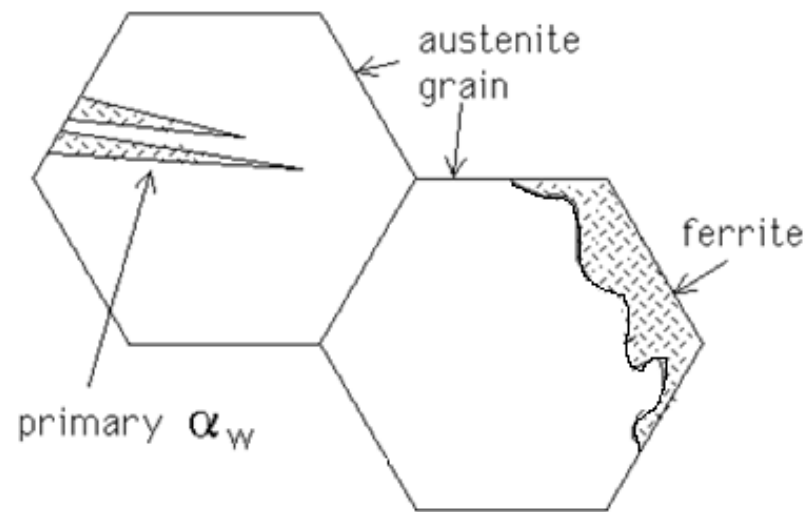
همه عناصر آلياژی آهنگ رشد پرليت را کاهش می دهند.



## فاز پرویوتکتوئید

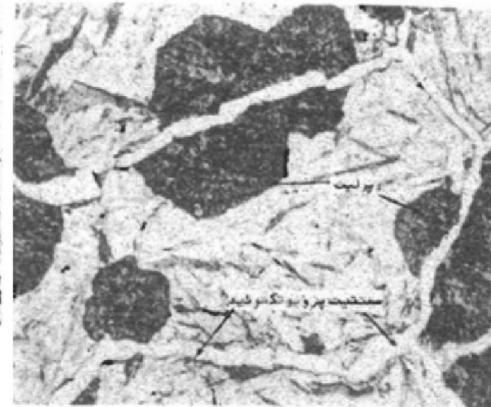
بر اساس سرد شدن در منقطه دو فازي  
شکل آن به صورت مدور اگر تعادلی سرد شود  
شکل آن سوزنی اگر سریع سرد شود: ویدمنشتین مثل فریت ویدمن





## 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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> 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.

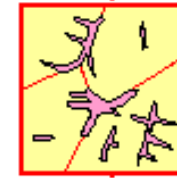
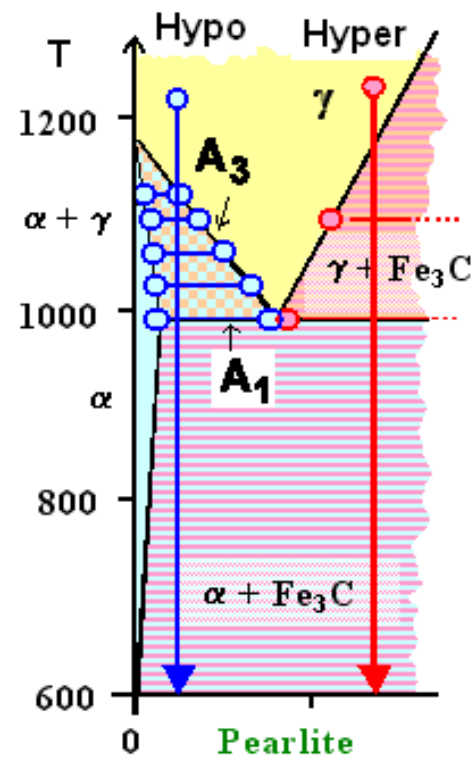
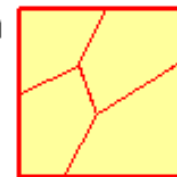


شکل ۲-۱۵ تصویر میکروسکوپی فریت پرویوتکتوئید در قالب صفحات ویدمن اشتاتن در فولاد ۰.۴٪C، Fe. محلول حکاکی نایتال، بزرگنمایی  $\times 200$  [۱].



Widmannstätten Ferrite

Widmannstätten Cementite

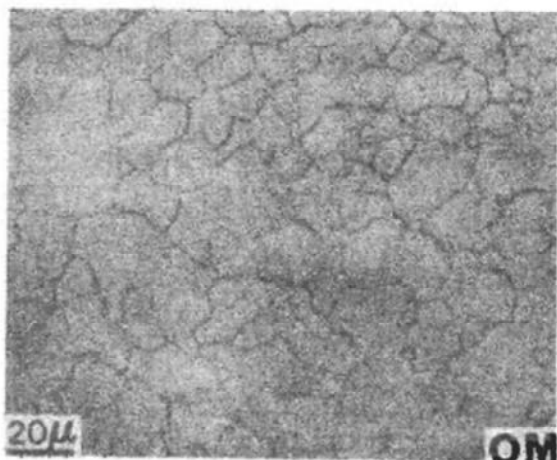




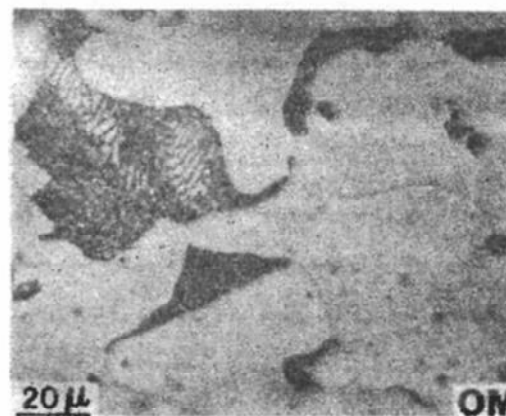


Widmanstätten ferrite

## مقایسه خواص مکانیکی و ساختار

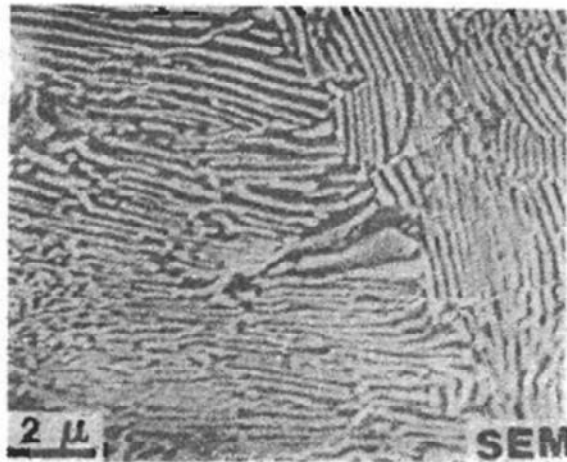


الف - آهن خالص، فریت  
استحکام تسلیم MPa: ۱۰۳ (۱۵۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) انعطاف پذیری ۶۳ درصد

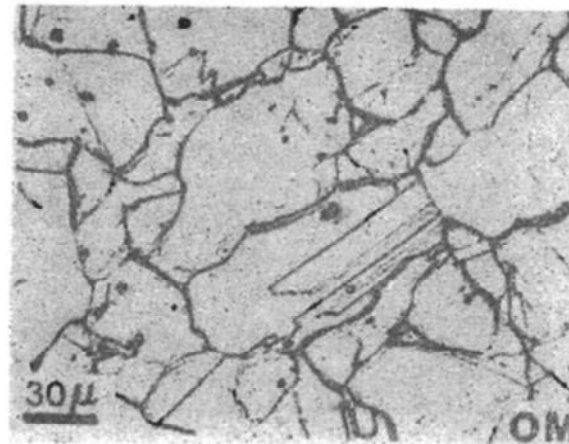


ب - فولاد با ۰/۲ درصد کربن آهسته سرد شده، فریت و کمی برلیت  
استحکام تسلیم MPa: ۲۲۰ (۳۳۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) انعطاف پذیری، ۳۵ درصد

## مقایسه خواص مکانیکی و ساختار

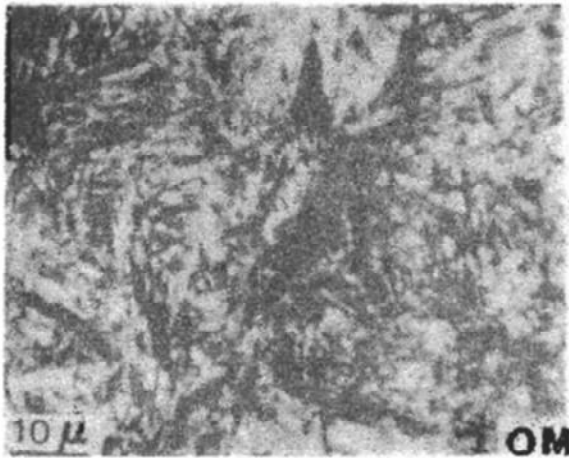


ج - فولاد با ۰/۸ درصد کربن آهسته سرد شده، پرلیت  
استحکام تسلیم ۴۴۸ MPa (۶۵۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) انعطاف پذیری ۱۴ درصد

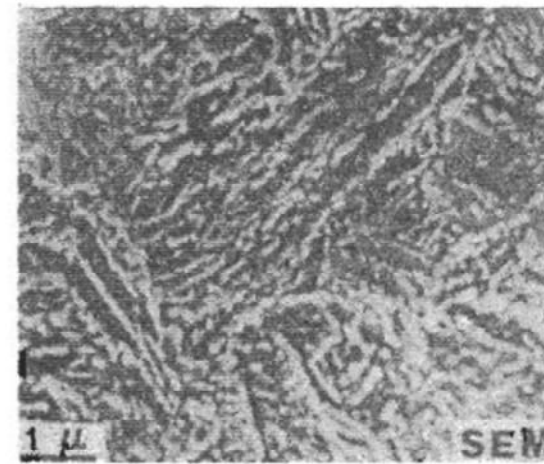


د - فولاد با ۰/۸ درصد کربن، دانه‌های استنیت  
بالتر از ۷۲۳ درجه سانتیگراد

## 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



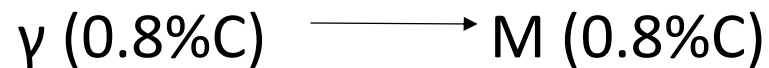
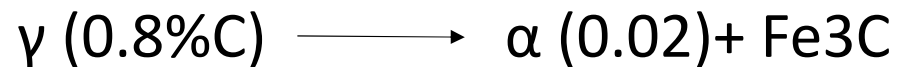
و - فولاد با ۰/۸ درصد کربن، سرد شده در آب و سپس حرارت داده شده در ۵۰۰ درجه سانتیگراد  
به مدت یک ساعت، مارتنزیت بازپخت شده  
استحکام تسلیم MPa ۹۶۶ (۱۴۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) انعطاف پذیری ۷ درصد

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.



## مارتنزیت و دگرگونی مارتنزیتی

واژه مارتنزیت که برای مدت‌ها فقط به ساختار سخت حاصل از سریع سرد کردن فولادهای کربنی اطلاق می‌شد برای قدردانی از دانشمند معروف متالورژ آلمانی به نام مارتنز<sup>۴</sup> است.

دگرگونی مارتنزیتی، همچنین در سیستم‌های آلیاژی فلزات غیرآهنی نظیر Au-Cd ، Cu-Al و در اکسیدها نظیر  $\text{SiO}_2$  و  $\text{ZrO}_2$  وجود دارد.

بنابراین، مارتنزیت فازی است که توسط یک دگرگونی مارتنزیتی یا جابه‌جایی گروهی اتمها حاصل می‌شود، گرچه ممکن است فاز یاد شده ترکیب شیمیایی، ساختار بلوری و خواص کاملاً متفاوتی از مارتنزیت در فولادها داشته باشد.

# 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.



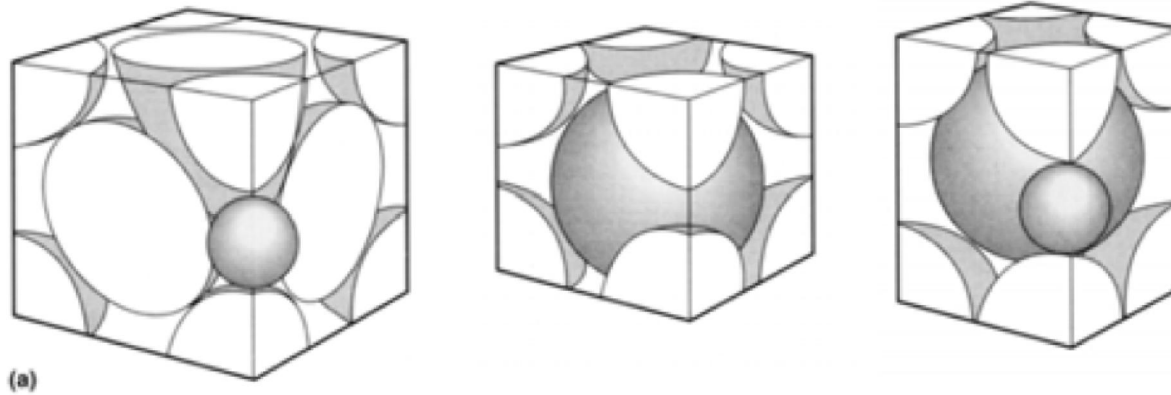


- Why study martensitic transformations?!
- They occur in many different metal, ceramic & polymer systems, and are generally important to understand.
- Steels represent the classical example (and a rare case of a mechanically hard martensite). Also, there are remarkable devices that exploit the *shape memory effect* (a consequence of martensitic transformation) such as stents that open up once at body temperature. The martensites in this case are generally soft, mechanically speaking.

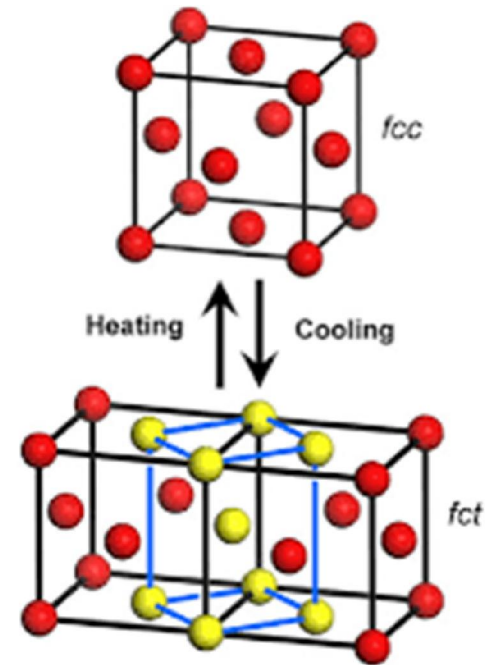
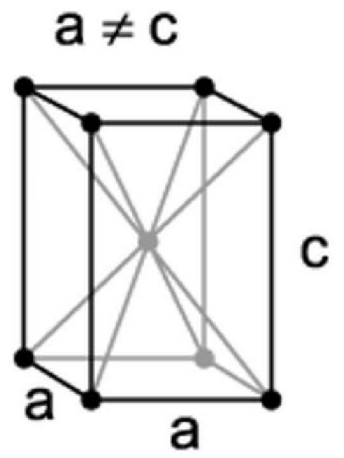


Medical Stents

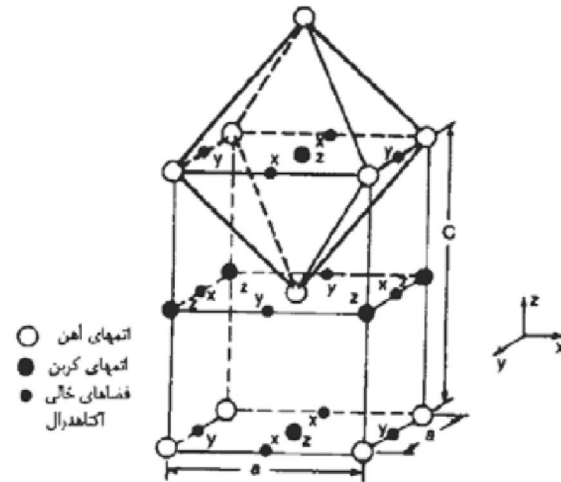
- سرد کردن سریع (غیرتعادلی) آستنیت  $\leftarrow$  مارتنزیت
- استحاله مارتنزیتی یک استحاله غیرنفوذی است
- $Fcc \rightarrow bcc \rightarrow bct$



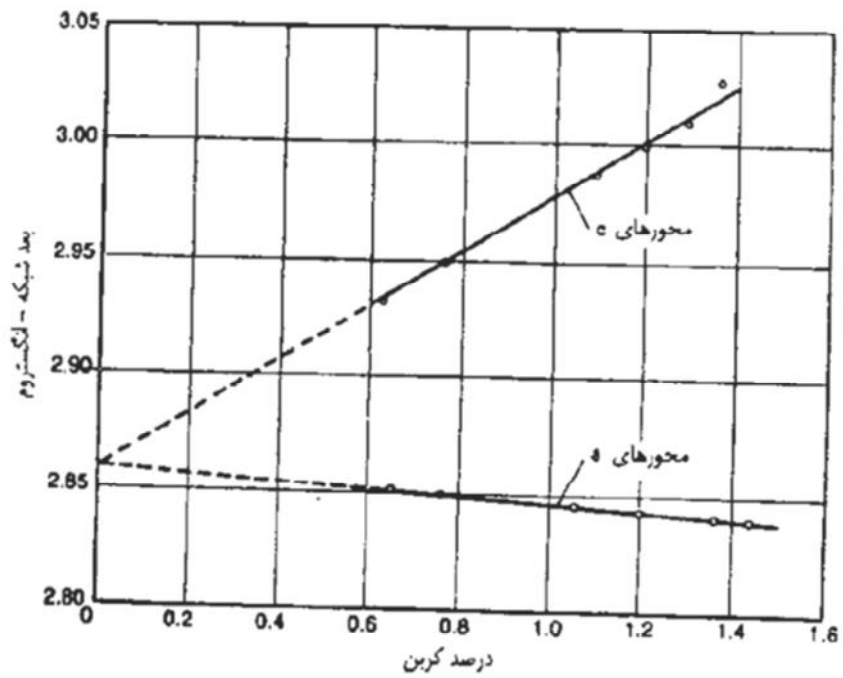
Bain model



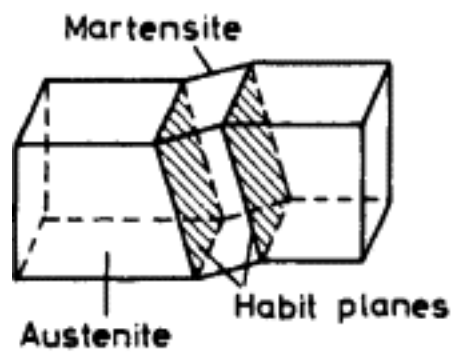
با تشکیل مارتنزیت، کربن محلول در شبکه<sup>۲</sup> bcc به مقدار زیادی افزایش می‌یابد. با افزایش درصد کربن محلول در شبکه، جاهای خالی بیشتری از شبکه توسط کربن اشغال می‌شود، در نتیجه شبکه بلوری از bcc به سمت bct<sup>۲</sup> میل می‌کند که در آن پارامتر c شبکه بزرگتر از دو پارامتر دیگر a است (شکل ۱-۳). نسبت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



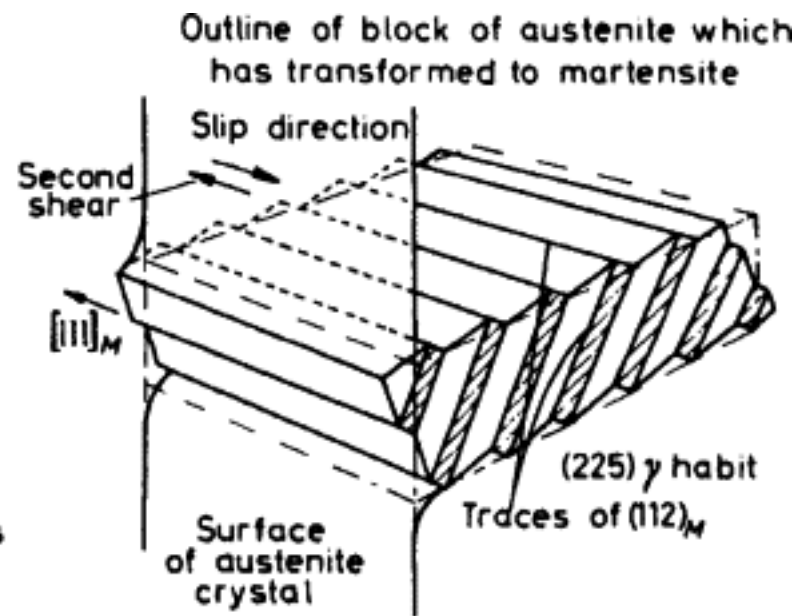
شکل ۱-۳ شبکه بلوری مکعب مستطیل (bct) مارتنزیت در آلیاژهای آهن-کربن. اتمهای کربن در یک سری از فضاهای هشت‌وجهی بر روی محور Z محبوس شده، در حالی که فضاهای هشت‌وجهی محورهای X و Y اشغال نشده‌اند [۱].



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



(a)



(b)



# 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.

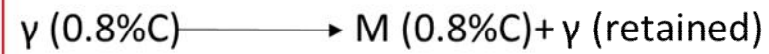
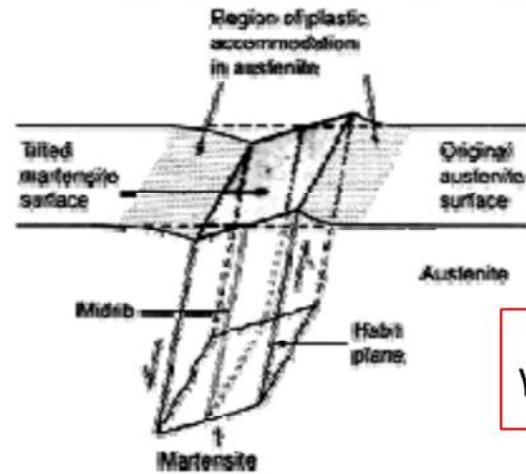
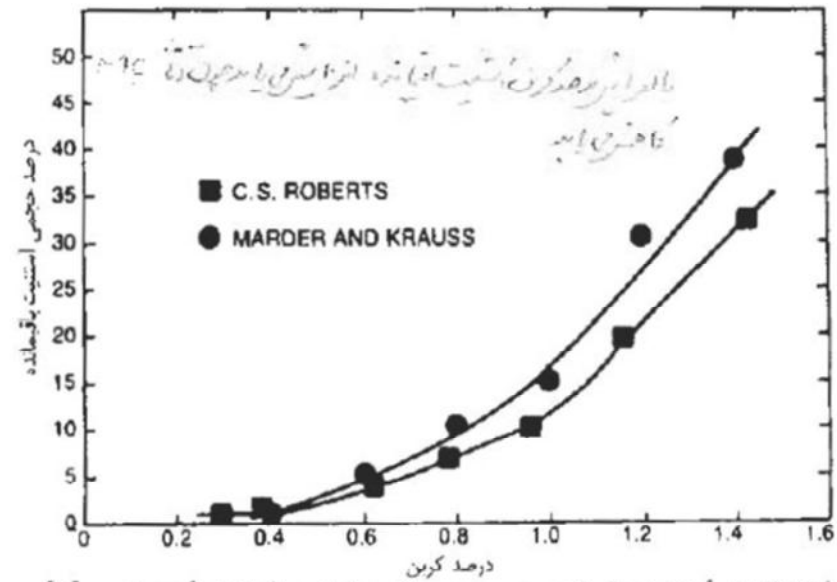


Fig. 3 Diagram of martensite crystal, showing shear and surface tilting. Source: Ref 3

مقدار آستنیت باقیمانده که به کمک پرآش پرتوی ایکس<sup>۲</sup> 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].



در دمای اتاق، حتی در فولادهایی که دارای ۰/۳ تا ۰/۴ درصد کربن  
اشند مقدار بسیار کمی آستنیت باقی می ماند. برای هر درصد کربن و دمای داده شده، عناصر  
لیاژی که باعث پایداری آستنیت می شوند مقدار آستنیت باقیمانده را افزایش می دهند.

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



## فازهای غیر تعادلی در فولاد

### مارتنزیت

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

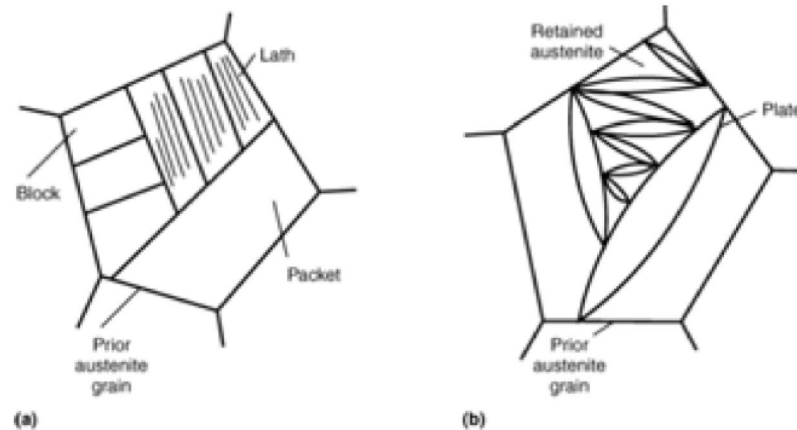


Fig. 5 Martensites. (a) Lath. (b) Plate. Source: Ref 5

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

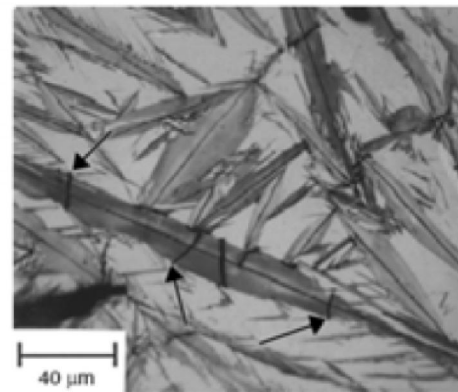
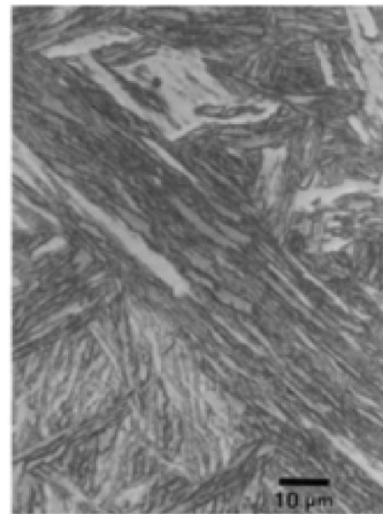
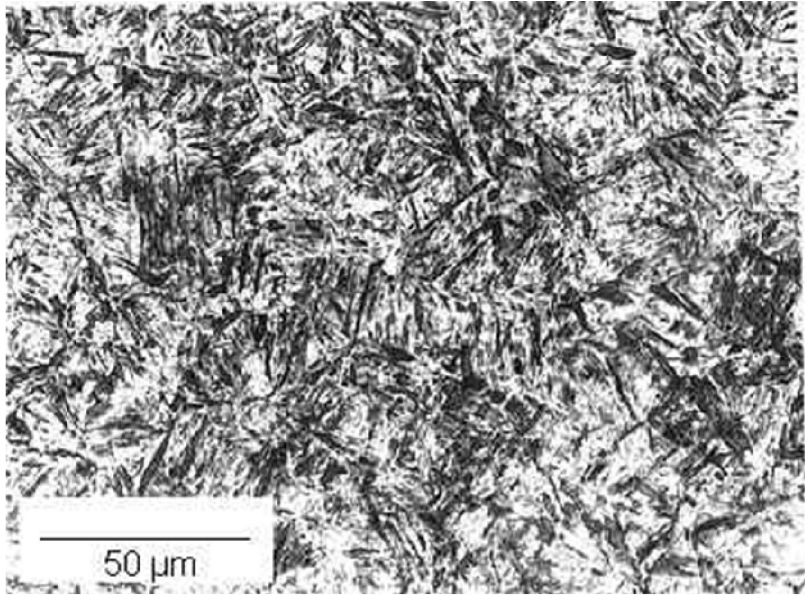
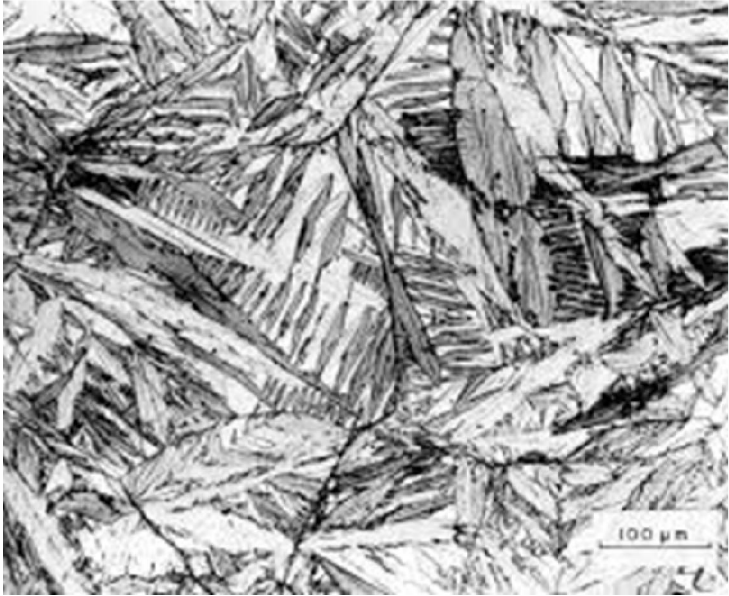
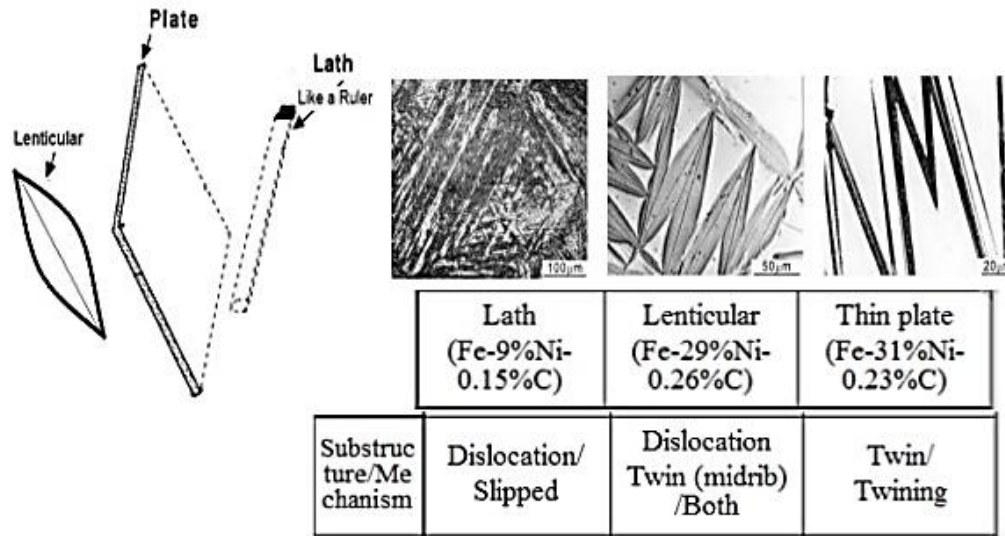


Fig. 6 Plate martensite formed in an Fe-1.86C alloy.



## Morphology and crystallography of $\alpha'$ (bcc or bct) Martensite in ferrous alloys

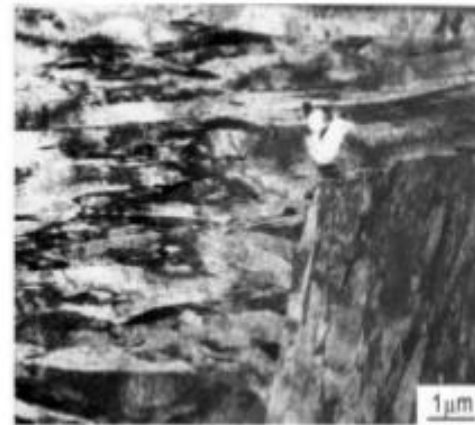




# Lath Martensite



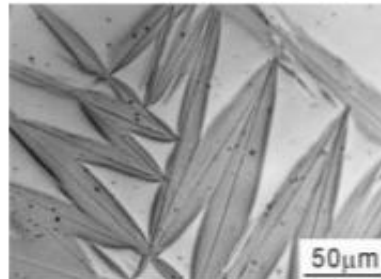
Optical micrograph



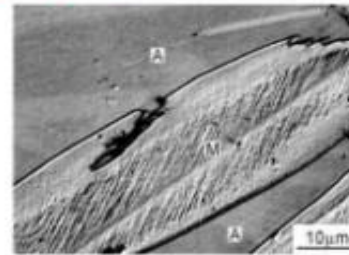
TEM micrograph

(Fe-0.2C)

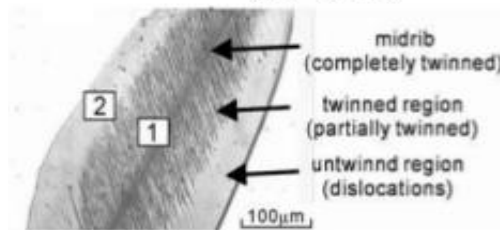
## Lenticular Martensite (Optical micrograph)



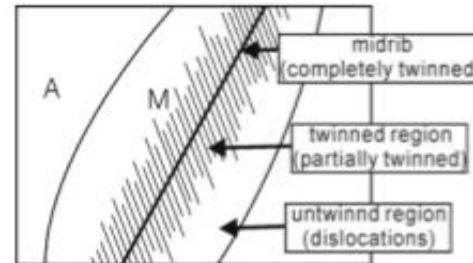
Fe-29%Ni-0.26%C  
( $M_s=203\text{K}$ )



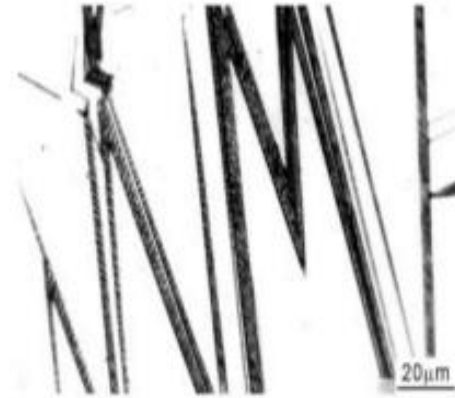
Optical micrograph



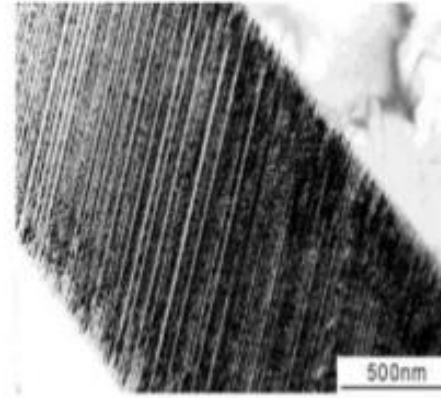
Fe-31%Ni-0.28%C  
( $M_s=192\text{K}$ )



## Thin plate Martensite



Optical micrograph  
(Fe-31Ni-0.23C)



TEM micrograph  
(Fe-30Ni-0.42C)

## 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

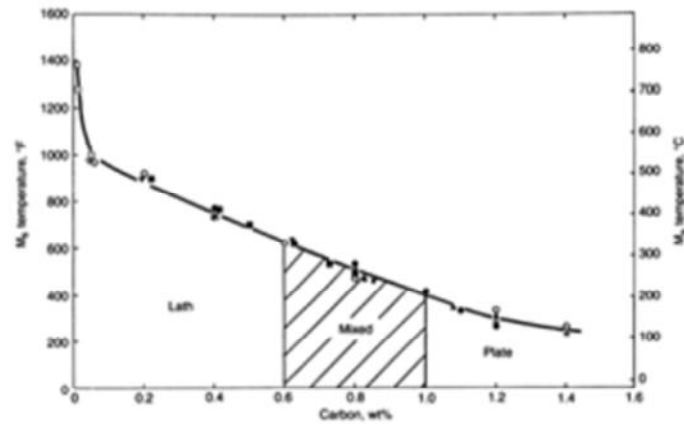


دانشگاه گیلان

## 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  $M_s$  کاهش میابد.

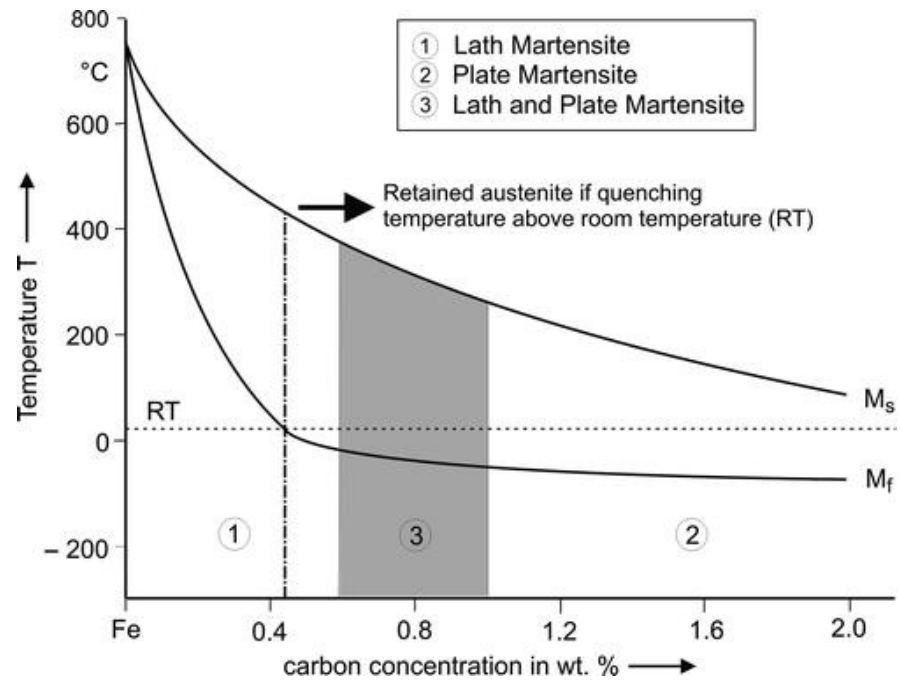


در حقیقت، کربن موجود به صورت محلول جامد،

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.

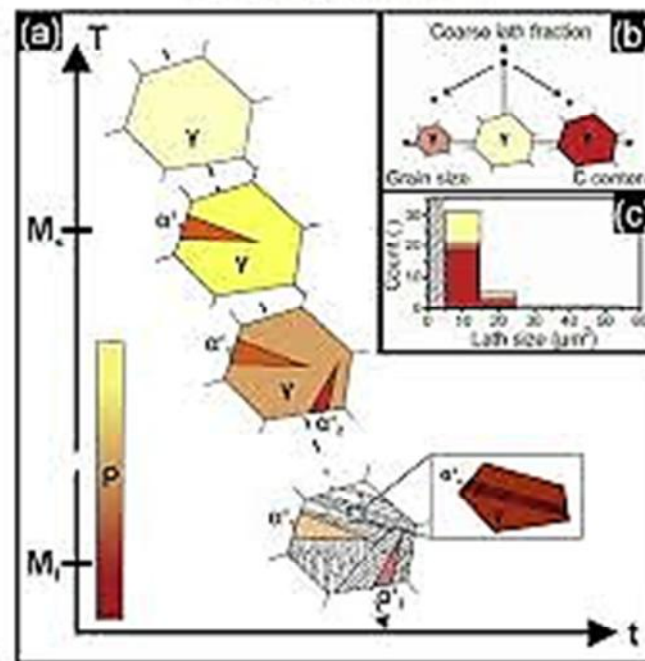
دمای پایان تشکیل مارتنزیت ( $M_f$ ) یا دمایی که دگرگونی آستنیت به مارتنزیت در یک آلیاژ داده شده خاتمه می یابد نیز تابعی از درصد کربن آلیاژ است.

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.



## Diffusion less transformation

A. Mandil et al. / Acta Metallurgica 61 (2013) 881–887





## 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].

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

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

دگرگونی مارتنزیتی<sup>۱</sup> 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<sup>۱</sup> 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:

$$f = 1 - 6.96 \times 10^{-15} (455 - \Delta T)^{5/32}$$

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

که در اینجا؛  $f$  تابع حجمی مارتنزیت و  $\Delta T$  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

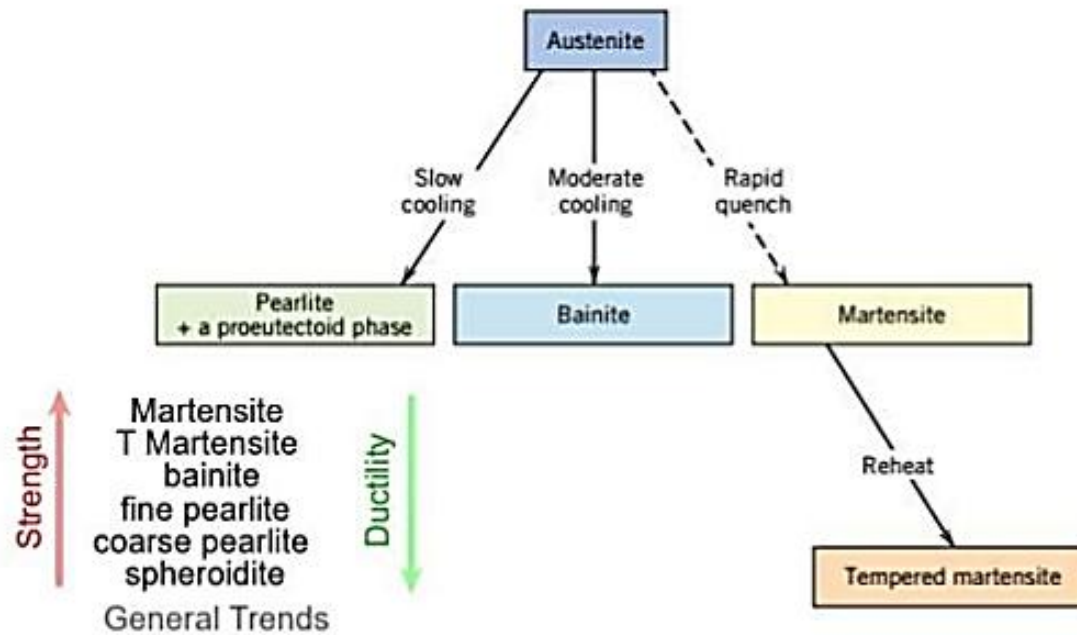
۳- درصد استنیت باقی مانده

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<sub>T</sub>) و بالاترین دمای تشکیل مارتنزیت (M<sub>s</sub>) 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.

علی رغم تشابه‌های پرلیت و بینیت و همچنین دگرگونیهای آنها مکانیزم تشکیل این دو ساختار از یکدیگر متفاوت است. برخلاف پرلیت، محصول حاصل از دگرگونی بینیتی شامل لایه‌های متناوب فریت و سمنتیت نیست. همچنین، قبلاً دیدیم که پرلیت در تمام جهات با آهنگ یکسان رشد کرده و سرانجام به شکل کروی درمی‌آید، در حالی که بینیت به صورت صفحه‌ای (که از جمله مشخصه‌های ویژه دگرگونی مارتنزیتی است) رشد می‌کند. در نمونه‌های متالوگرافی شده، بینیت به صورت سوزنی شکل (مشابه مارتنزیت) ظاهر می‌شود. همچنین، تشکیل صفحات بینیت همراه با اعوجاج سطحی است. بنابراین، احتمال زیاد می‌رود که تشکیل صفحات بینیتی، شامل برش شبکه‌ای باشد.

بر اساس میکروساختارها، دو شکل عمده بینیت وجود دارد، یکی بینیت بالای<sup>۱</sup> یا بینیت پرشکل<sup>۲</sup> که در گستره دمایی درست زیر دمای تشکیل پرلیت به وجود می‌آید و دیگری بینیت

پایینی<sup>۳</sup> یا بینیت سوزنی شکل<sup>۴</sup> که در دماهایی نزدیک دمای  $M_s$  تشکیل 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.

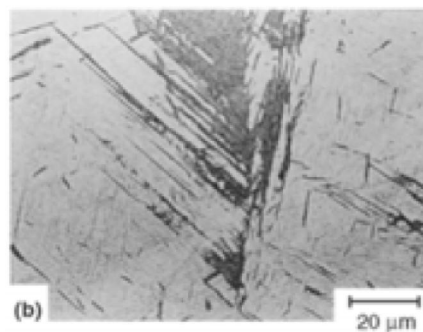
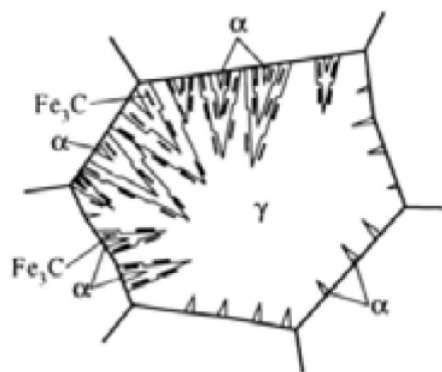
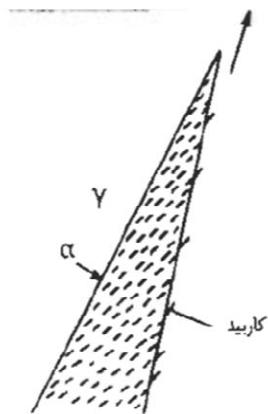


Fig. 33 Schematic of mechanism in the formation of upper bainite. Source: Ref 11



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.

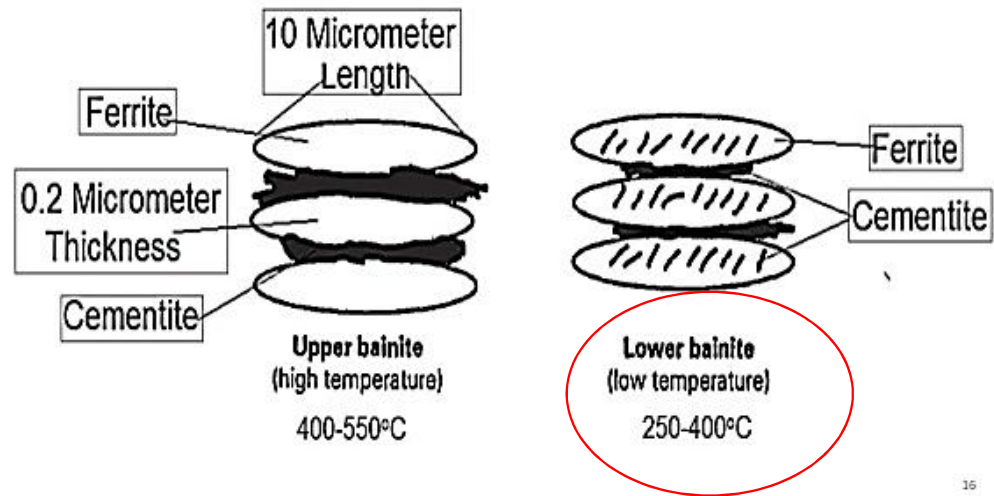



Fig. 17 Lower bainite formed at 345 °C (650 °F) in 4360 steel. 8000×. Source: Ref 16

عملیات حرارتی / دانشگاه حکیم سبزواری / دکتر جبار

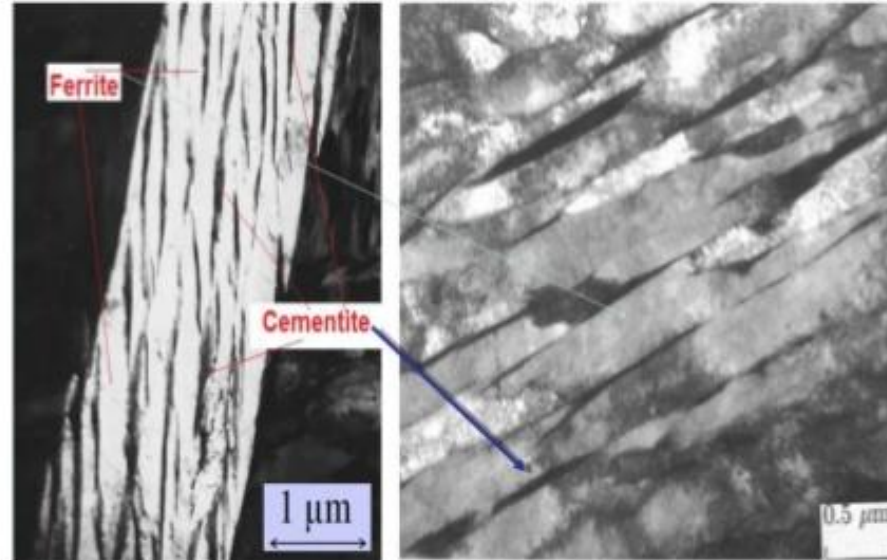
همانند بینیت بالایی، در اینجا نیز اولین مرحله تشکیل بینیت پایینی عبارت از به وجود آمدن صفحات فریت از استنتیت است. از آنجایی که نفوذ کربن در گستره دمایی تشکیل بینیت پایینی بسیار کم است، صفحات فریت یاد شده بسیار نازک‌اند.

## Upper and Lower Bainite



## Upper Bainite

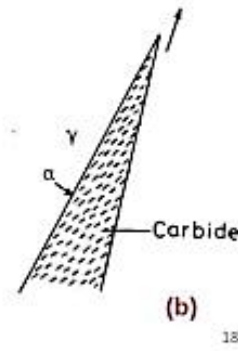
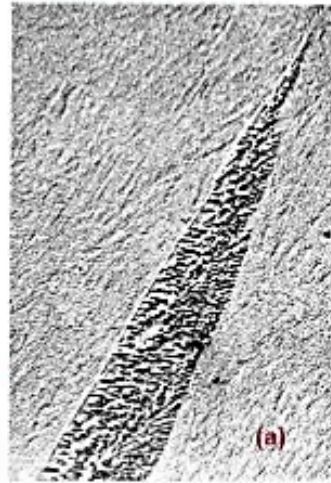
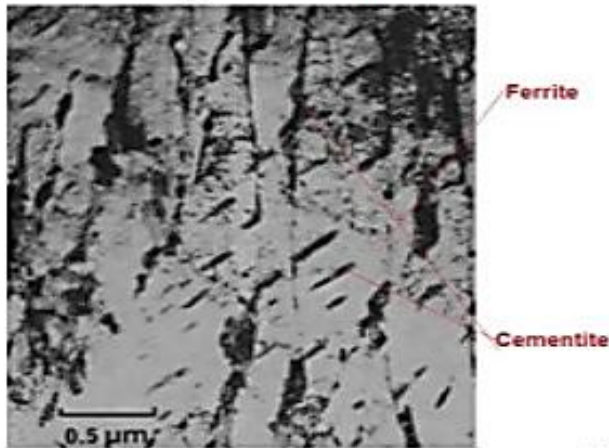
- Tiny platelets of carbides oriented with ferrite needles



# Lower Bainite

- Ferrite needles become thinner → carbide platelets become smaller, oriented at an angle of about  $60^\circ$

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





- Named after E. C. Bain
- Ferrite ( $\alpha$ ) + Cementite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )  $\rightarrow$  diffusional transformation
- **Needles or plates**  $\rightarrow$  depends on T
- Microstructure  $\rightarrow$  very fine  $\rightarrow$  e<sup>-</sup> microscopy
- At upper T  $\rightarrow$  resembles pearlite  $\rightarrow$  **Upper or feathery bainite**
- At low T  $\rightarrow$  black needle like structure resembling martensite  $\rightarrow$  **lower or acicular bainite**

### 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 می‌دهد، در حالی که در اکثر روشهای عملیات حرارتی فولادها، دگرگونیها در شرایط کاملاً ناتعادلی انجام می‌شوند. 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  $TTT$ <sup>1</sup> موسوم‌اند، مشخص می‌شود. به این ترتیب، به کمک نمودارهای یاد شده می‌توان 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

برحسب اینکه دگرگونی آمستنییت به ساختار یا فاز جدید در دمای ثابت (همدما) و یا در اثر سرد شدن پیوسته (در دماهای مختلف) انجام شود، نمودارهای TTT<sup>۱</sup> که استفاده می‌شوند باید به ترتیب از نوع نمودارهای دگرگونی همدما (IT)<sup>۲</sup> و دگرگونی در سرد شدن پیوسته (CT)<sup>۳</sup> باشند. نمودارهای دگرگونی در اثر سرد شدن پیوسته را به CCT<sup>۴</sup> نیز نشان می‌دهند.

۱- Time-Temperature-Transformation Diagrams

۲- Isothermal Transformation

۳- Continuous Transformation

۴- Continuous Cooling Transformation Diagrams

**1. Time-temperature transformation (TTT) diagrams**

**2. Continuous cooling transformation (CCT) diagrams**

## رسم نمودار TTT برای دگرگونی همدمما (IT)

• رسم نمودار شامل مراحل زیر است:

- آستنیت‌ها کردن تعداد زیادی نمونه از آلیاژ مورد نظر

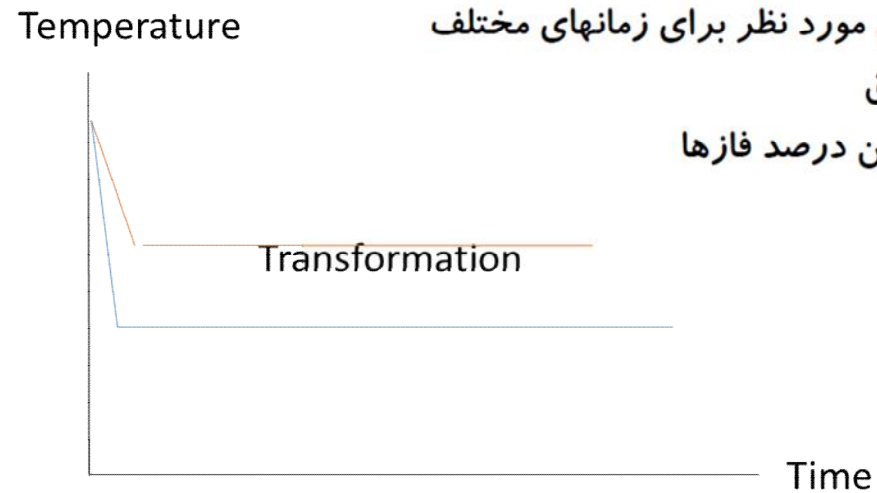
- سرد کردن سریع نمونه‌ها تا دمای مورد نظر

- نگهداری نمونه‌ها در دمای مورد نظر برای زمانهای مختلف

- کوئنچ نمونه‌ها تا دمای اتاق

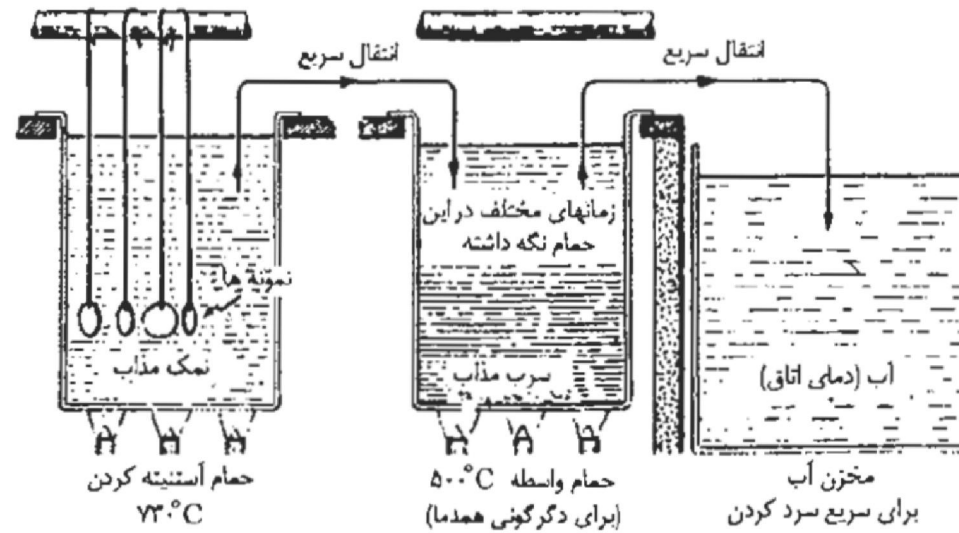
- متالوگرافی نمونه‌ها و تعیین درصد فازها

- رسم نمودار TTT





وقتی که آستنیت به پایان رسید یک سری از نمونه‌ها به دمایی ثابت بین  $A_1$  و  $M_s$  رسانده می‌شوند. نمونه‌ها در دمای ثابت برای مدت زمانهای متفاوت نگهداری شده و سپس تا دمای اتاق سریع سرد می‌شوند.



شکل ۴-۱ مراحل مختلف عملیات برای رسم نمودار TTT

## نمودارهای دگرگونی ممدما (IT)

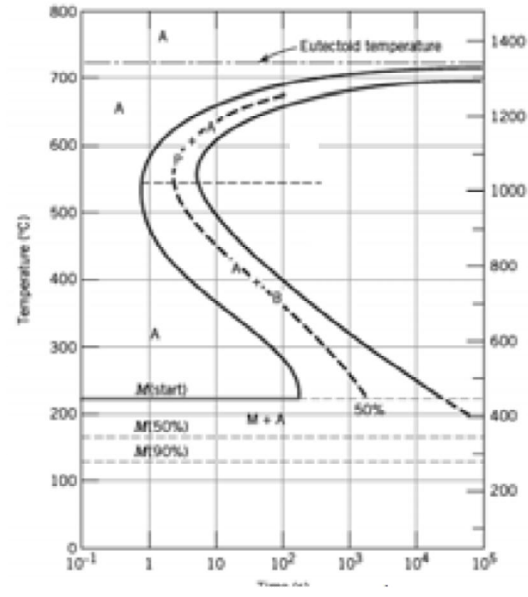
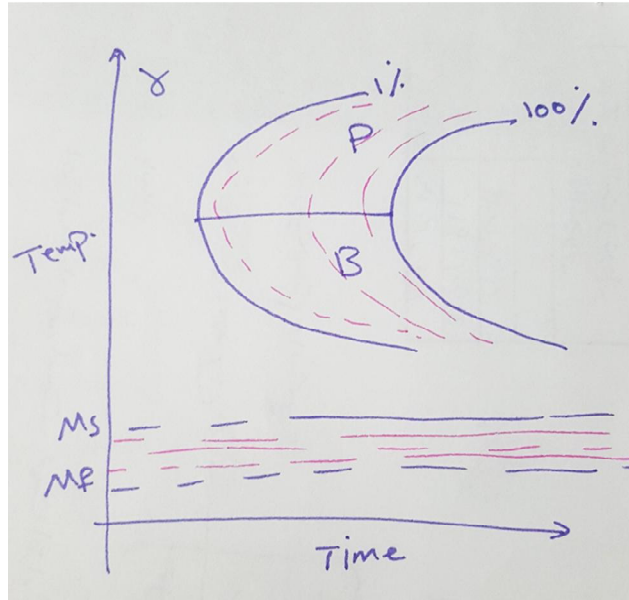
به طور کلی رسم این نمودارها با مطالعه میکروساختار، اندازه‌گیری سختی و یا

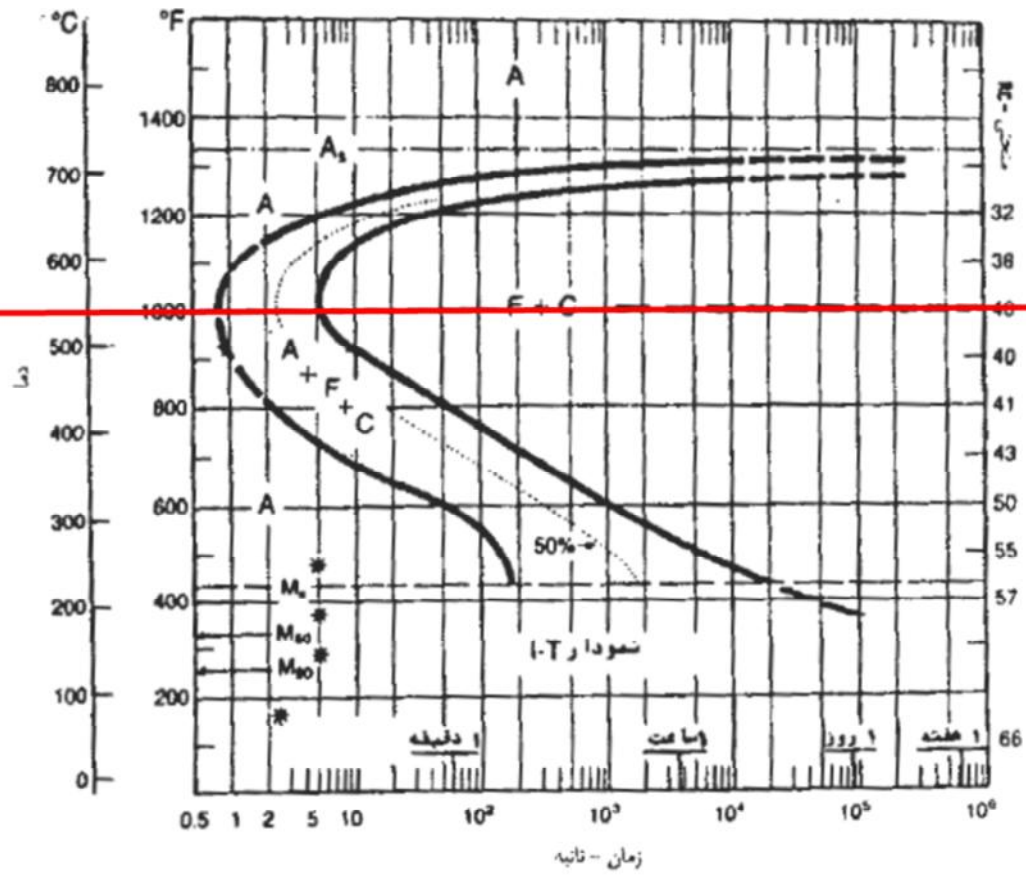
اندازه‌گیری تغییر طول (روش دیلاتومتری<sup>۱</sup>) یک سری نمونه متالوگرافی استاندارد که پس از آستنیت‌کردن کامل به مدت زمانهای متفاوت در دماهای مختلف و بالاتر از دمای شروع تشکیل مارتنزیت (Ms)<sup>۲</sup> نگهداری شده و سپس تا دمای اتاق سریع سرد شده باشند امکانپذیر است.

برای رسم کامل یک نمودار IT و برای یک فولاد مشخص، بیشتر از صد نمونه لازم است. روش کار بدین منوال است که نمونه‌های متالوگرافی را در ناحیه تکفازی آستنیت برای مدت زمان کافی (معمولاً یک ساعت) حرارت داده تا اینکه ساختار یکنواخت آستنیتی به دست آید. زمان و دمای آستنیت‌کردن، اندازه دانه‌های آستنیت و میزان انحلال کاربیدها را در آستنیت مشخص می‌کند. از آنجایی که هر دو پارامتر یاد شده دگرگونی آستنیت را تحت تأثیر قرار می‌دهند، لازم است که دما و زمان آستنیت‌کردن که برای رسم نمودار مورد استفاده قرار گرفته است، ذکر شود.

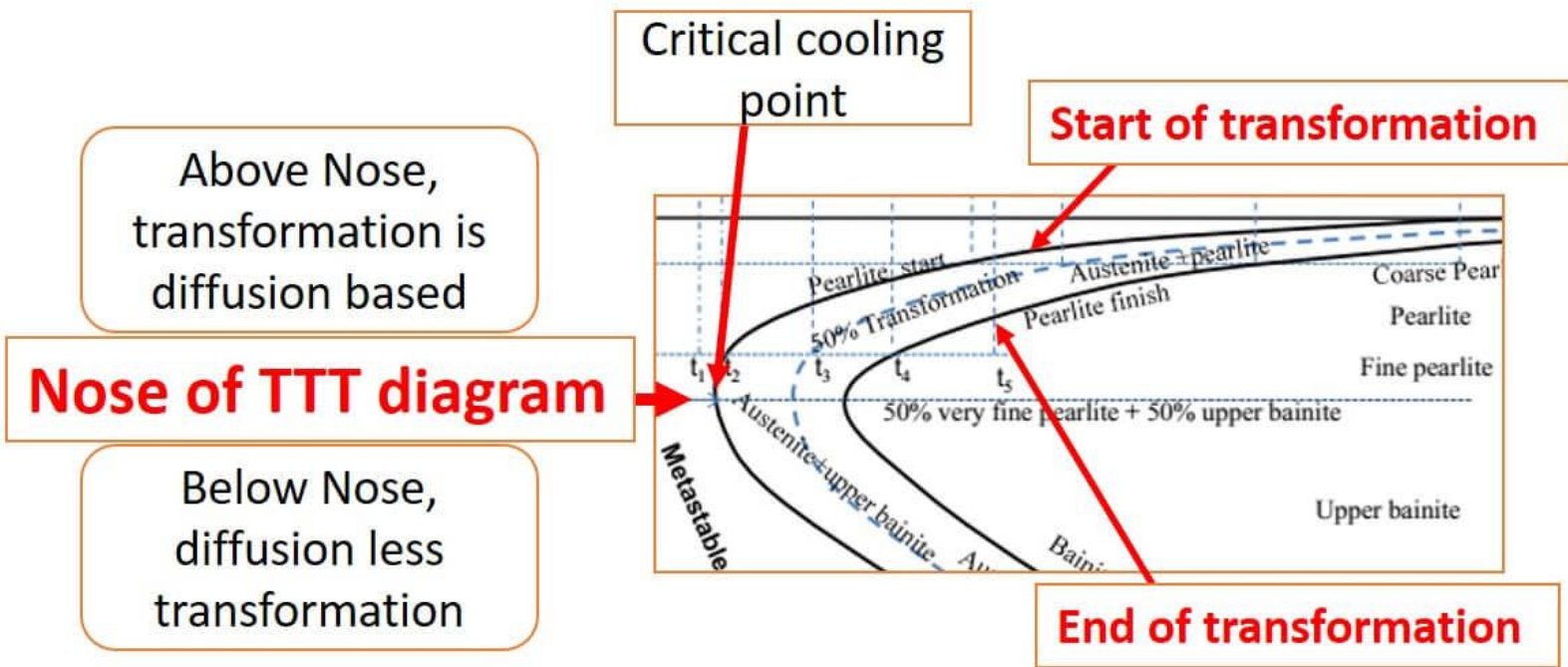
هر فولاد یک نمودار TTT منحصر به فرد دارد.

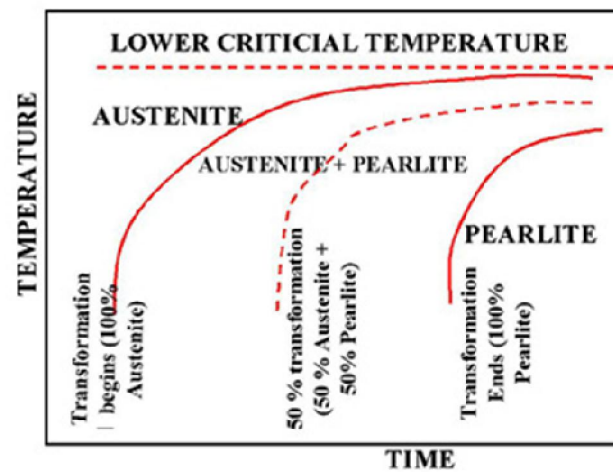
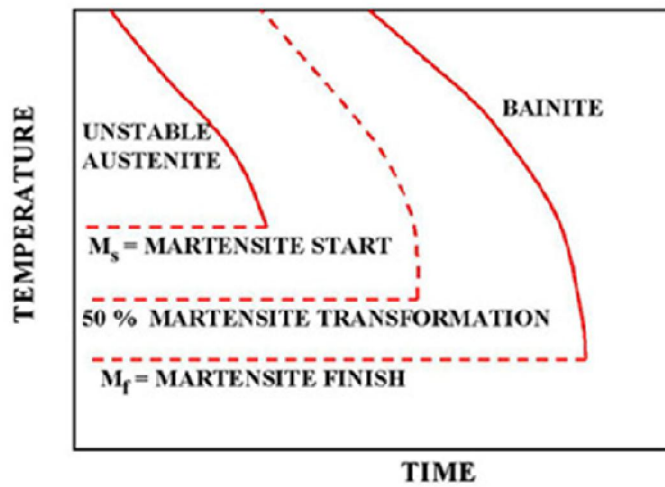
• مثال: فولاد یوتکتوئیدی





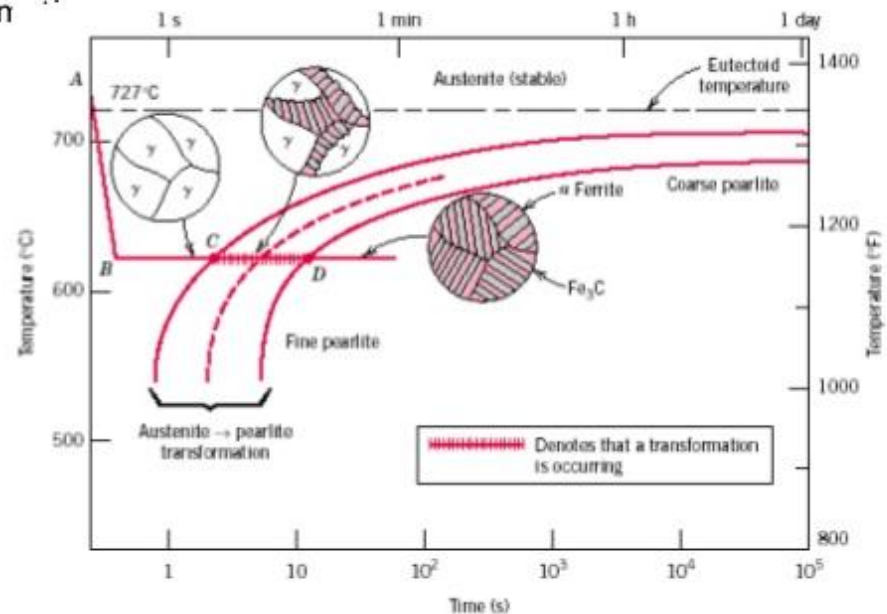
3





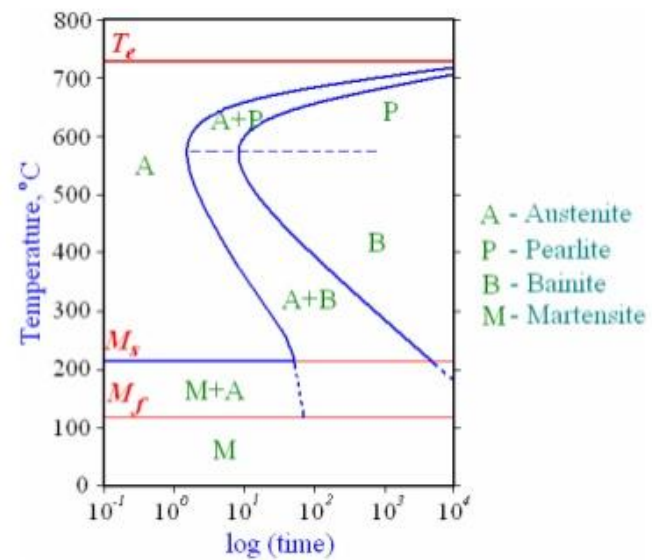
# TTT Diagrams for Eutectoid Steel

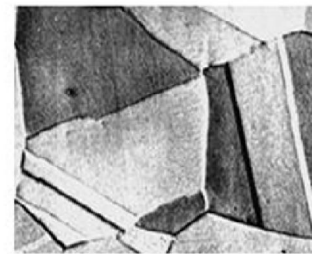
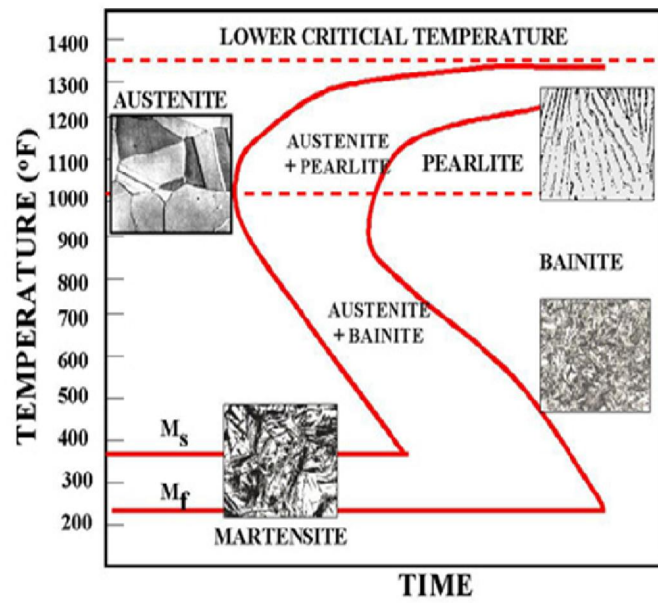
- We can plot the time for start and completion of transformation of austenite to pearlite at different temperatures or for any other amount of transform





Complete TTT (isothermal transformation) diagram for eutectoid steel.





Austenite



Pearlite



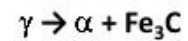
Martensite



Bainite

## Transformations of austenite to Pearlite

Transformations of austenite :



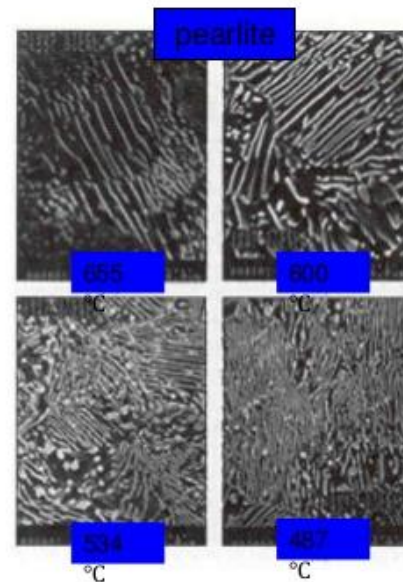
1) At slightly lower T below 727 °C :  $\Delta T \ll$

- Coarse pearlite  
: nucleation rate is very low.  
: diffusion rate is very high.

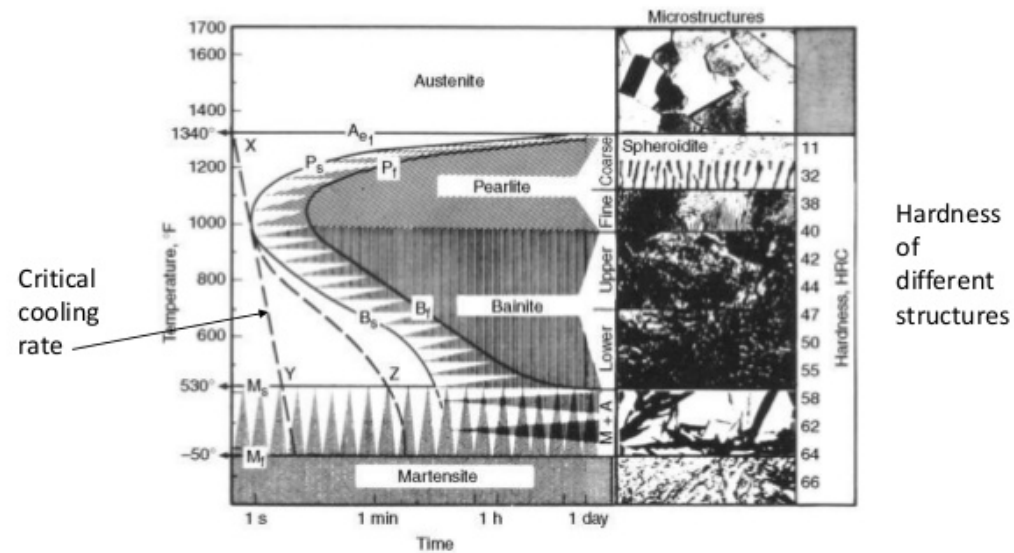
2) As the T (trans. temp.) decreases to 500 °C

- Fine pearlite  
: nucleation rate increases.  
: diffusion rate decreases.

Strength :  $\sigma$  (MPa) =  $139 + 46.4 S^{-1}$   
S : inter-lamellar spacing

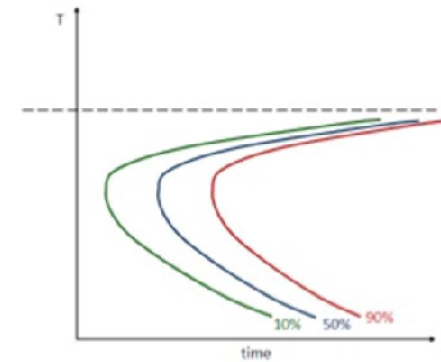
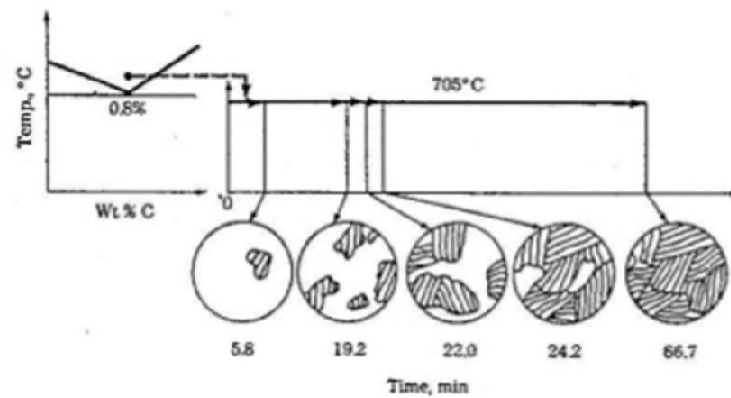


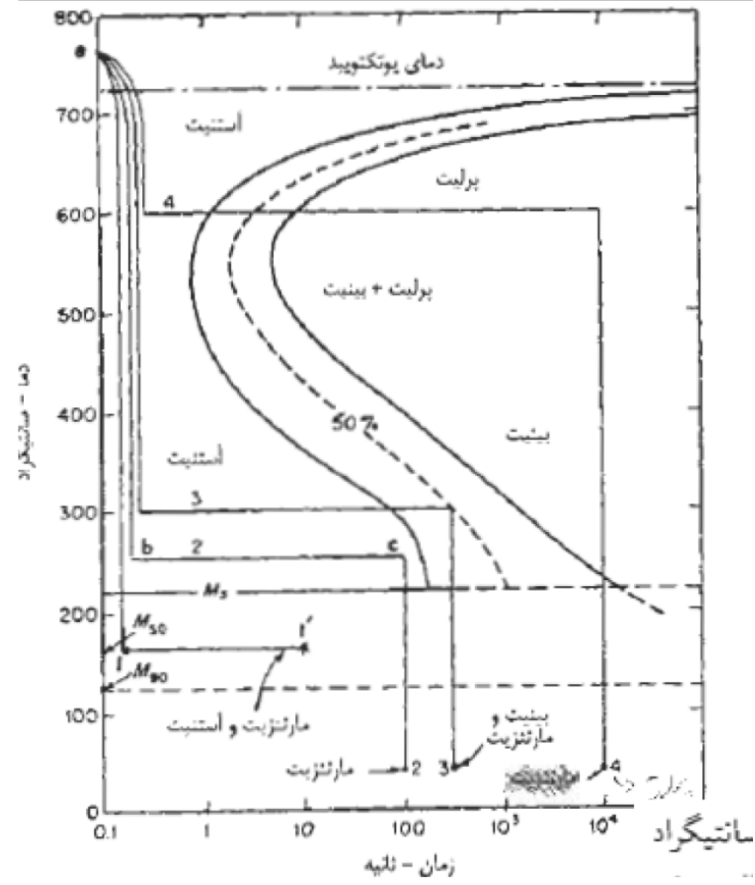
## Critical Cooling Rate and Hardness of Different Micro-Structures

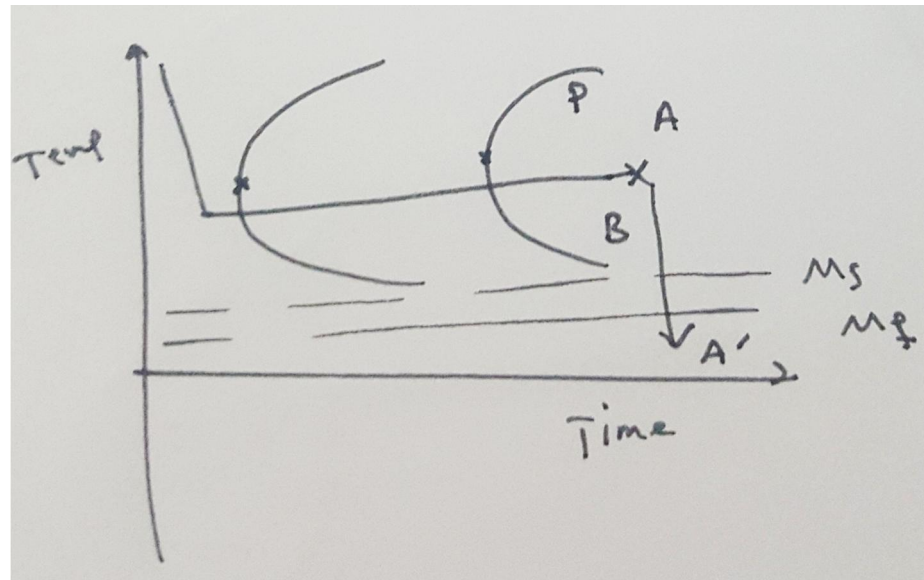


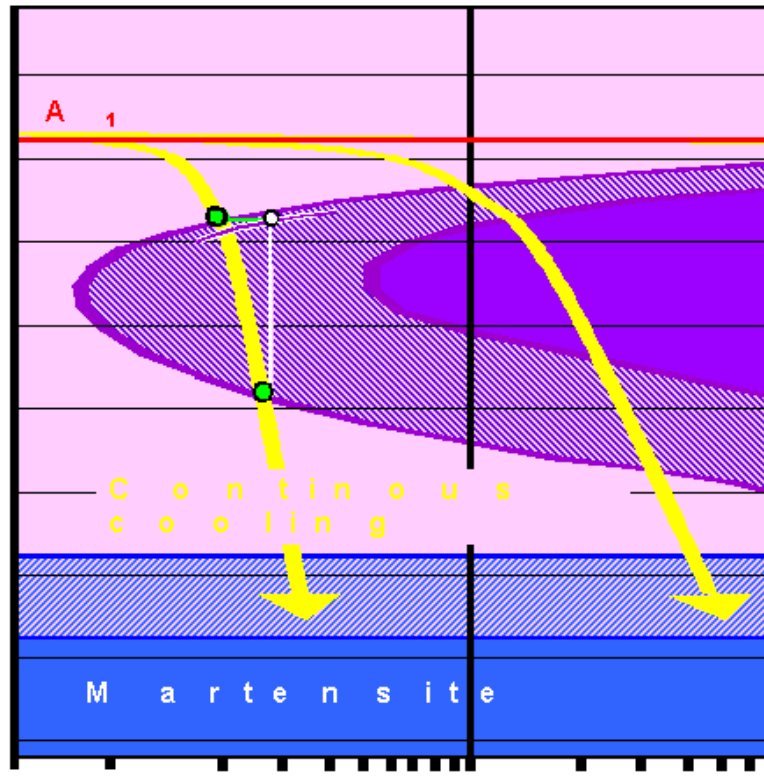
## Isothermal transformation of eutectoid steel below Eutectoid Temperature

- Determine the amount of pearlite formed after holding at  $705^{\circ}\text{C}$  for different times







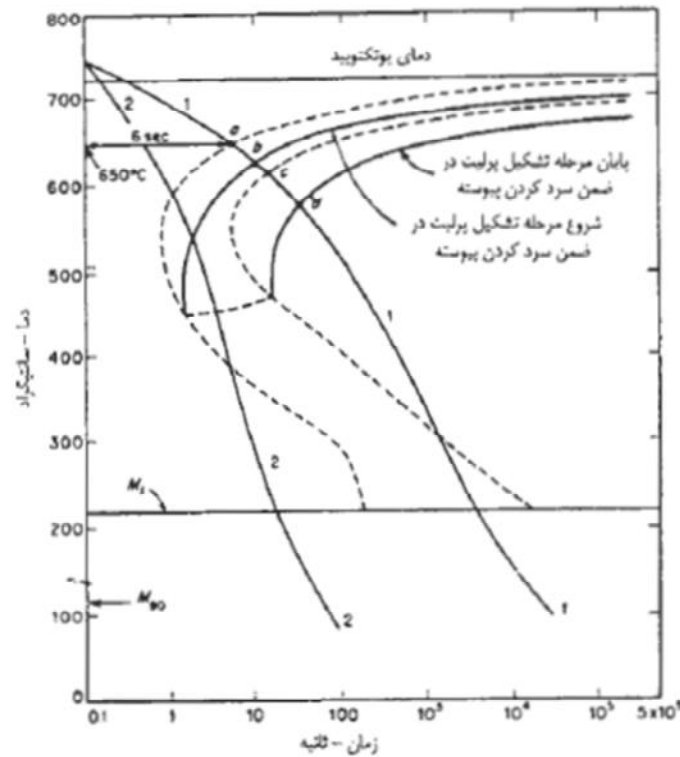


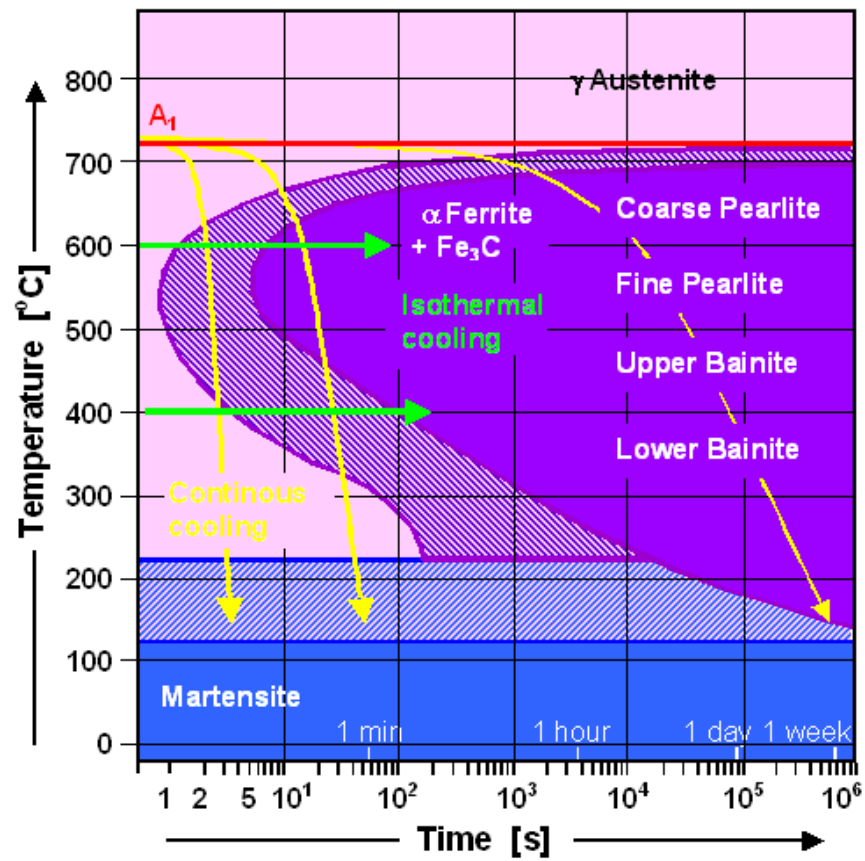


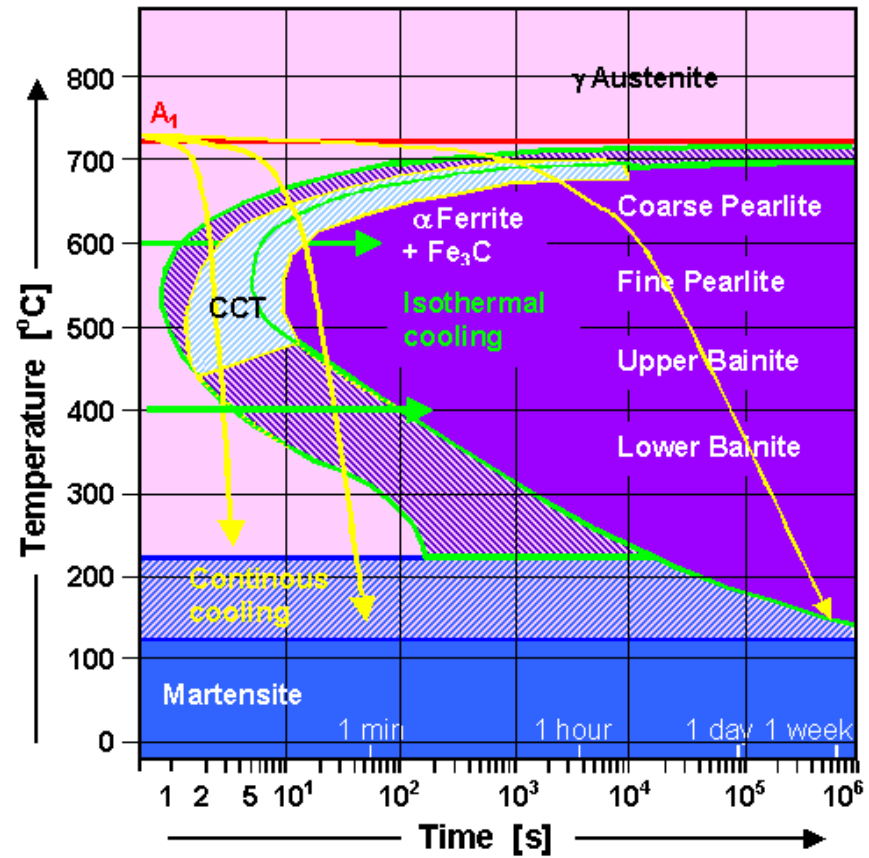
## تفاوت بین نمودارهای IT و CT

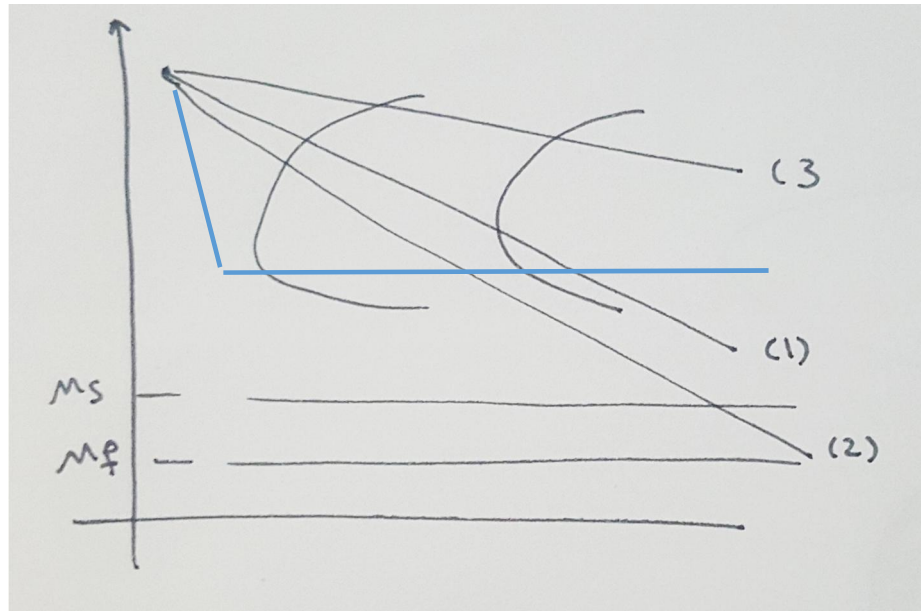
نمودار IT (خط منقطع) و نمودار CT (خط ممتد) مربوط به فولاد ۱۰۸۰

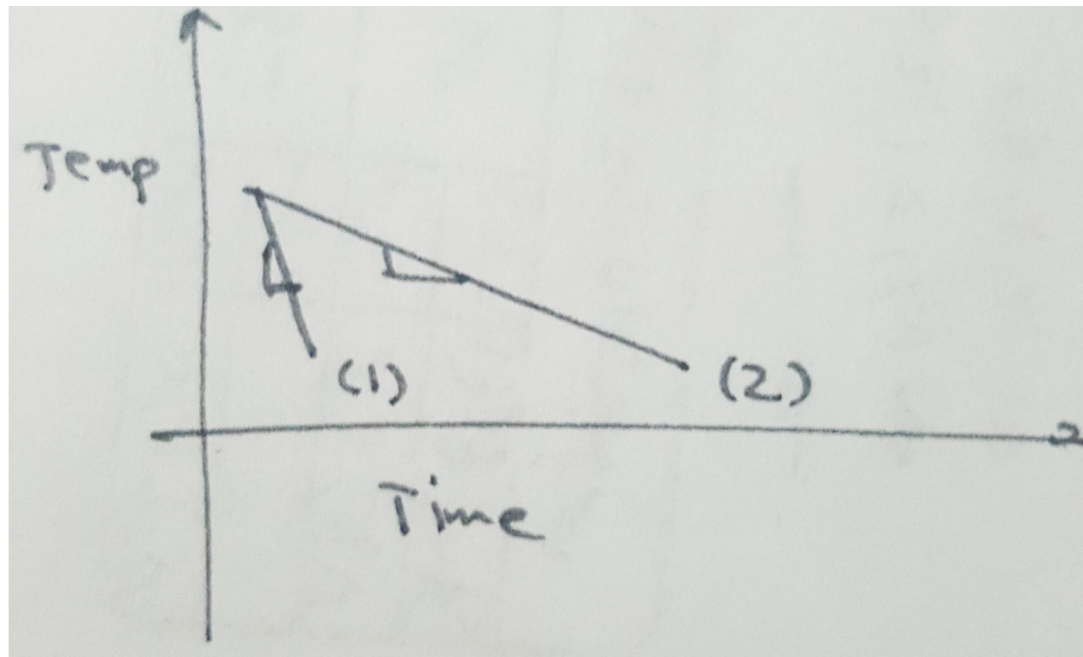
- بیشتر فرایندهای عملیات حرارتی شامل سرد کردن پیوسته هستند.
- در این شرایط شروع استحاله پرلیتی به تاخیر می افتد. لذا منحنی TTT در مقایسه با حالت همدمای به سمت راست و پایین جابجا میشود.





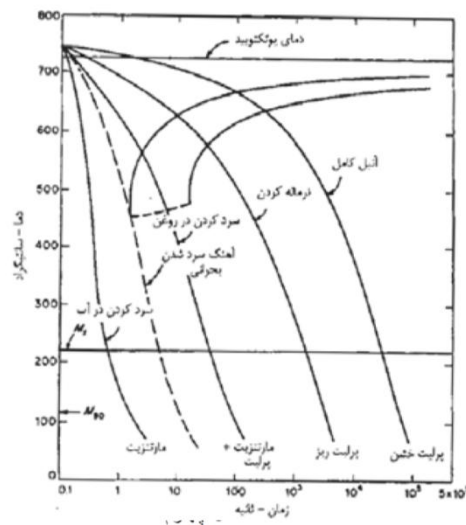




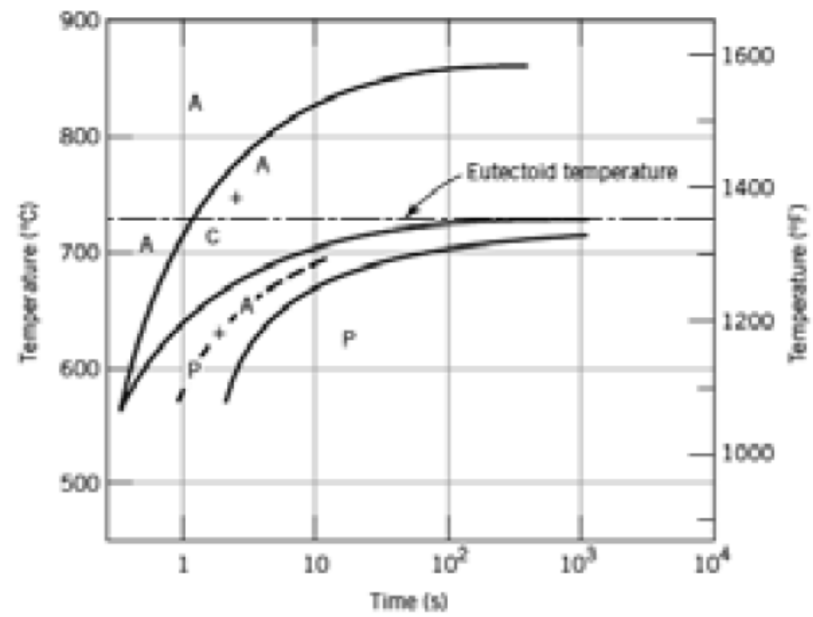


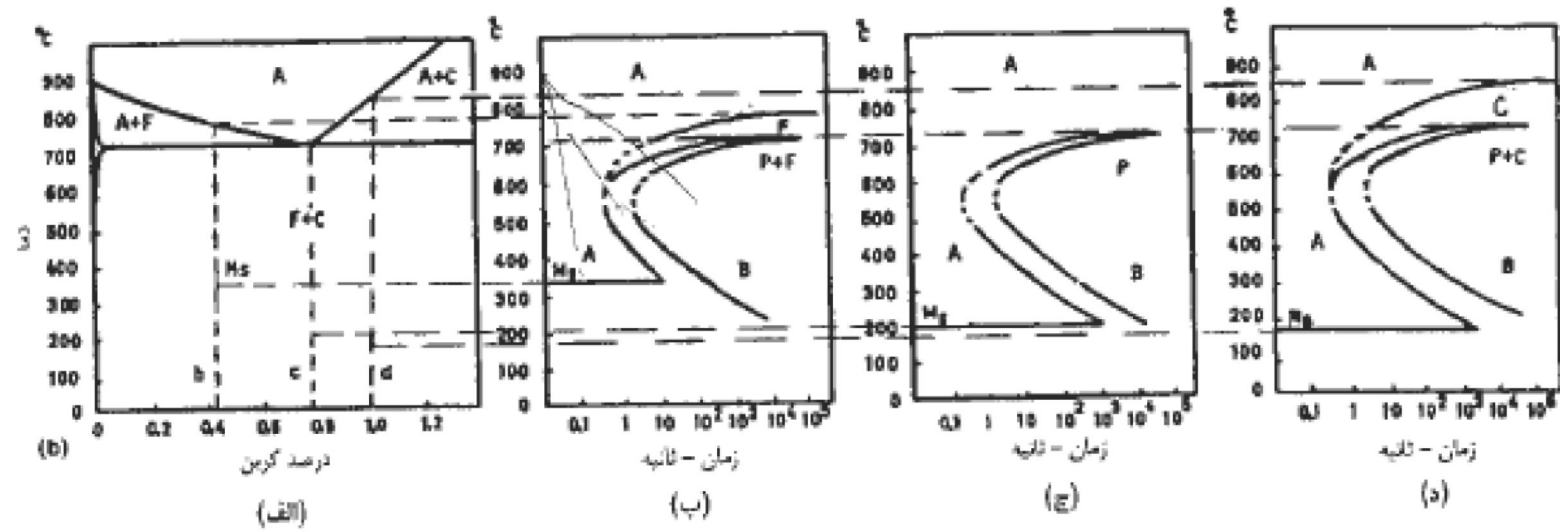
### اصول استفاده از نمودارهای دگرگونی غیرهمدم (سرد شدن پیوسته)

نمودار CT مربوط به فولاد کربنی ساده یوتکتویدی همراه با تعدادی منحنی سرد شدن در شکل ۴-۶ رسم شده است. منحنیهای مزبور که چگونگی تشکیل میکروساختارهای مختلف در ضمن سرد شدن با آهنگهای متفاوت را به طور کیفی نشان می دهند، عبارت اند از:



## مثال: فولاد هایپر یوتکتوئید

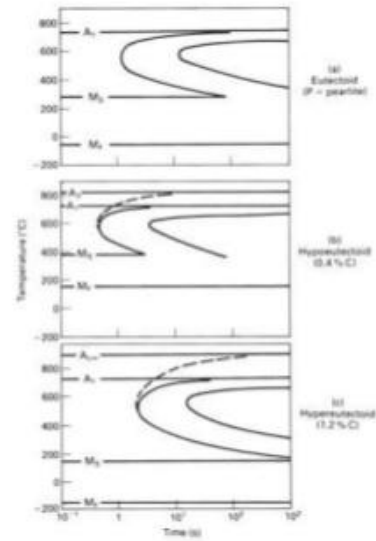




شکل ۴-۷ ارتباط بین نمودار تعادلی آهن - کربن (الف) و نمودارهای دگرگونی همدمما برای فولادهای کربنی ساده هیپووتکتوئید (ب)، یوتکتوئید (ج) و هایپروکتوئید (د)، (رسم مجدد با استفاده از مراجع ۶ و ۹)



**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  $\alpha$  and  $\text{Fe}_3\text{C}$  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.

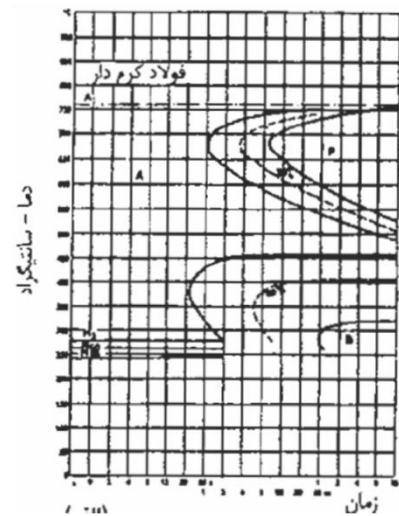
۳- دماغه نمودار به سمت راست شیفت پیدا می کند.

## 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

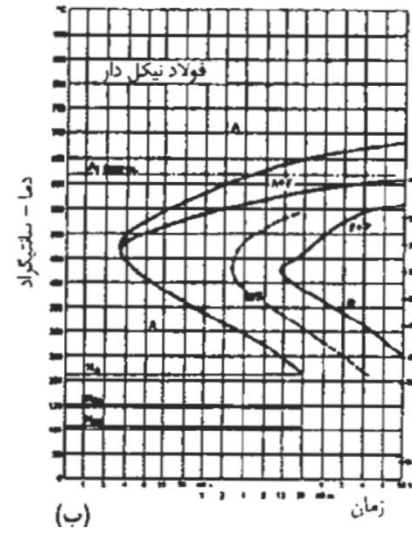
اضافه شدن عناصر آلیاژی مختلف به فولادها اثرات کاملاً متفاوتی بر روی نمودارهای دگرگونی آنها دارد. به عنوان مثال اضافه شدن بیشتر از تقریباً ۳ درصد کرم به فولاد باعث می شود که نواحی تشکیل پرلیت و بینیت کاملاً از یکدیگر جدا شوند (شکل ۴-۸ الف).



در حالی که نیکل

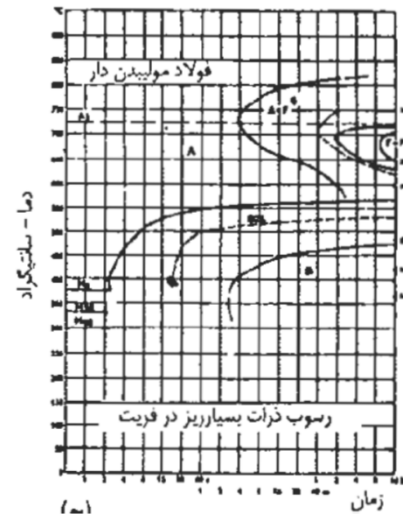
شکل کلی نمودار دگرگونی فولاد را تغییر نداده و تنها آن را به سمت راست جابه‌جا می‌کند

(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

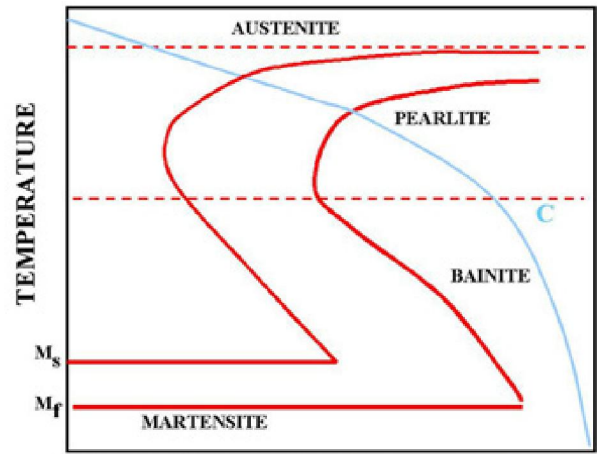
۴-۸ ج)



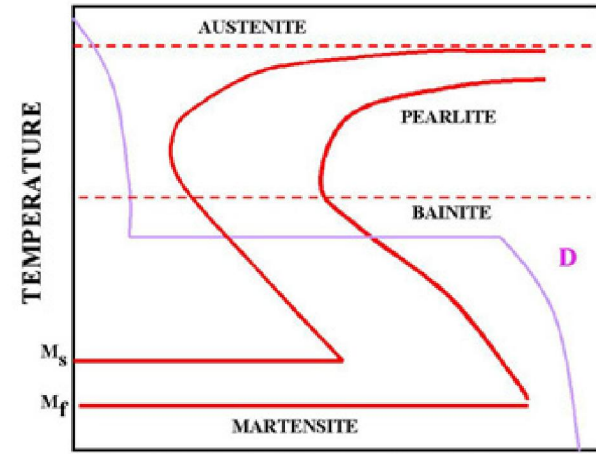


## عوامل موثر بر شکل دیاگرام TTT

- با افزایش درصد کربن Ms کاهش میابد همچنین منحنی به سمت راست حرکت میکند چون زمان بیشتری برای خروج کربن از شبکه آستنیت نیاز است.
- با افزایش اندازه دانه آستنیت دمای Ms افزایش میابد چون با کاهش مرز دانه ها مقاومت در برابر مارتنزیتی شدن کمتر میشود. همچنین منحنی به سمت راست جابجا میشود چون با کاهش مرزهای دانه مکانهای مناسب برای جوانه زنی پرلایت کاهش میابد.

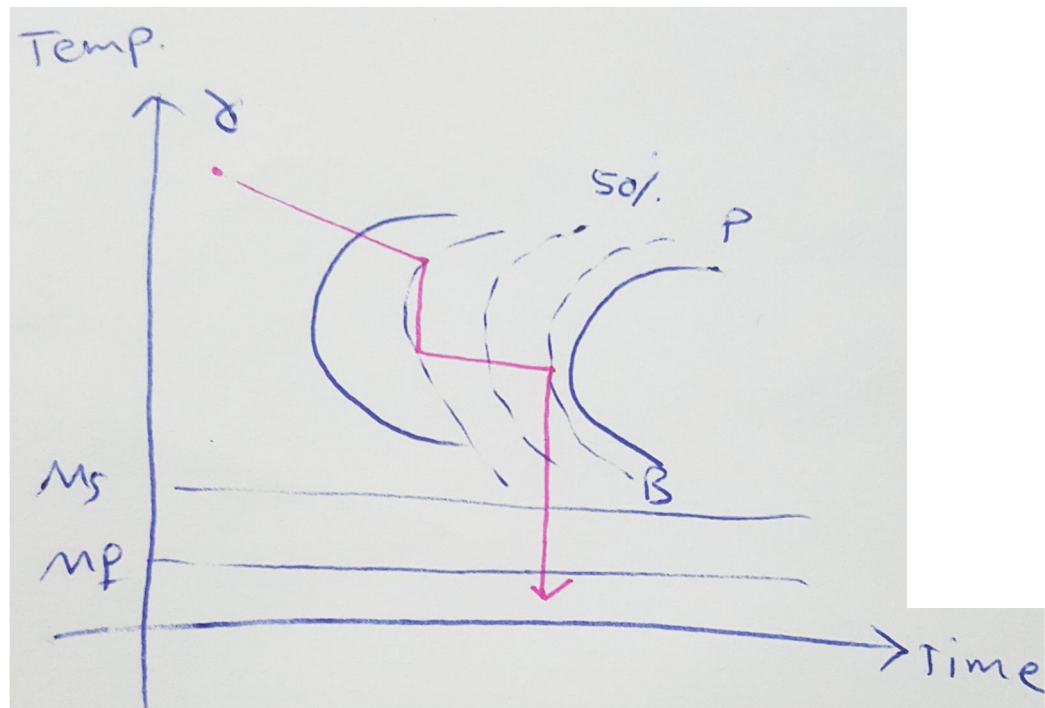


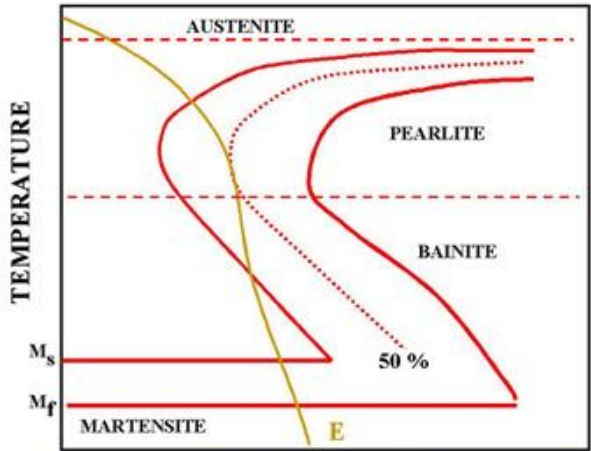
PRODUCT OF COOLING CURVE (C) : PEARLITE



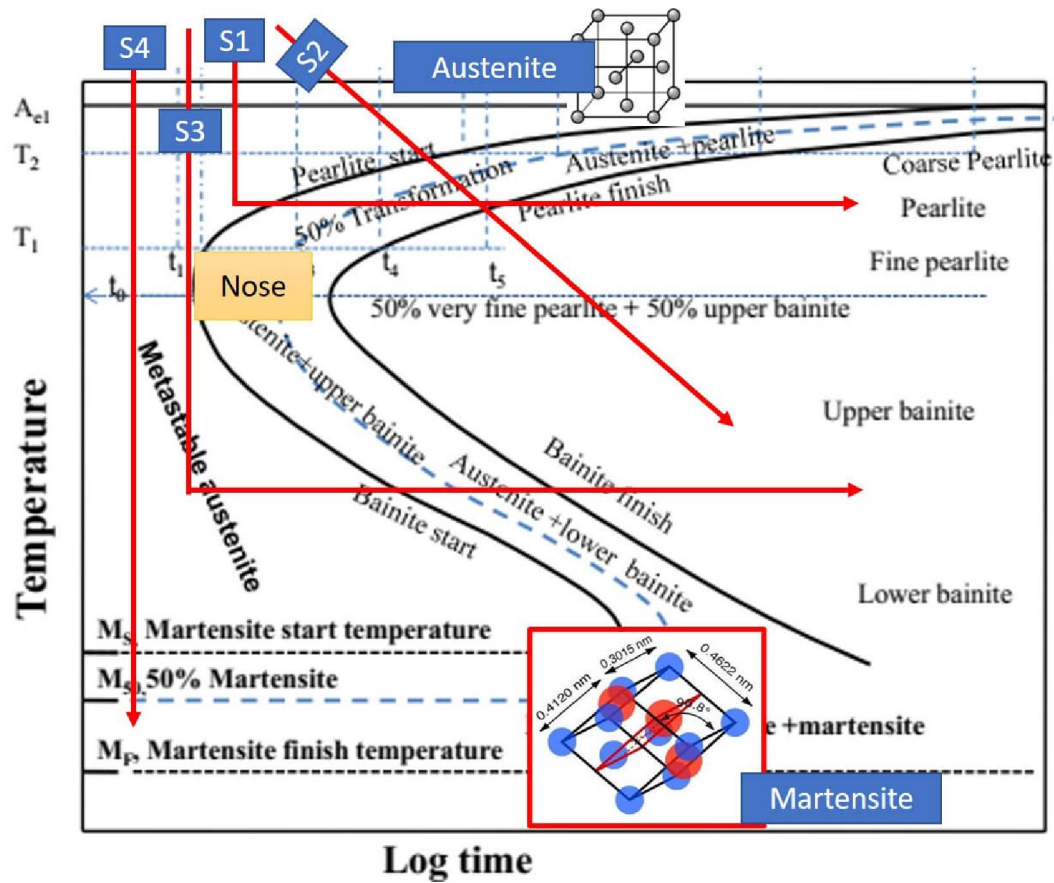
PRODUCT OF COOLING CURVE (D) : BAINITE







PRODUCT OF COOLING CURVE (E) : 50 % PEARLITE, 50 % MARTENSITE



## فصل ۵

عملیات حرارتی برای تشکیل ساختارهای تعادلی

از جمله خواص مورد نظر در این عملیات عبارت‌اند از: بهبود انعطاف پذیری، کاهش تنشهای داخلی و باقیمانده از عملیات قبلی، بهبود قابلیت ماشینکاری و ایجاد یکنواختی در میکروساختار.

- تمام این فرایندها شامل دو مرحله آستنیت‌زدن و سرد کردن آهسته هستند.

- ساختار نهایی در تمام این فرایندها شامل فریت و سمانتیت است.

زمان گرم کردن: وابسته به ضخامت قطعه است: به ازای هر یک اینچ ضخامت یک ساعت

## انواع عملیات حرارتی

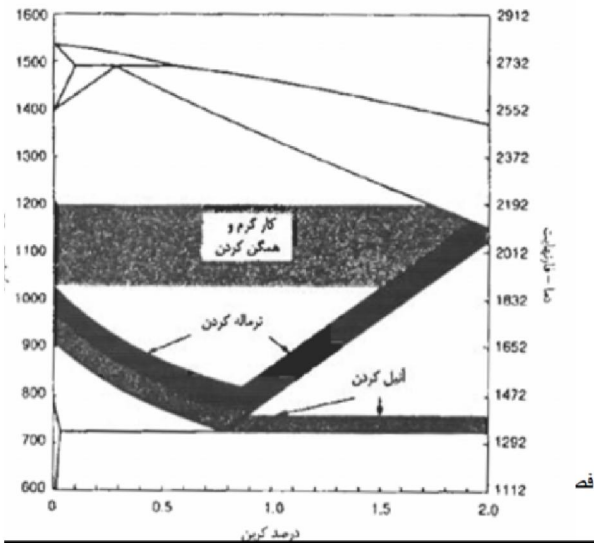
- ۱- آنیل کردن
- الف- آنیل کامل
- ب- آنیل همدمما
- ج- آنیل نفوذی: همگن کردن
- د- آنیل نیمه بحرانی: تنش زدایی
- ه- آنیل بین بحرانی
- ۲- نرمال کردن
- ۳- کروی کردن

## آنیل کامل<sup>۱</sup> Full annealing

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

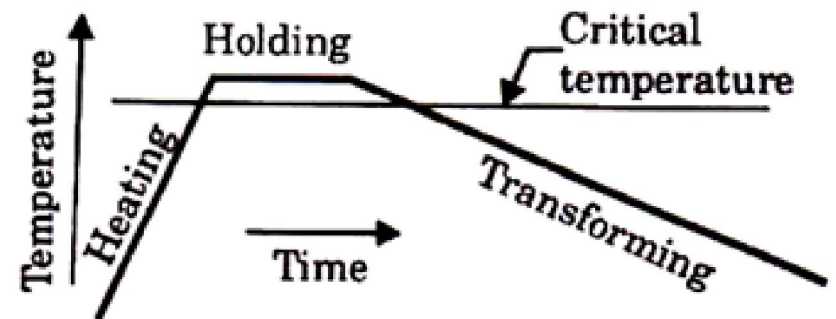
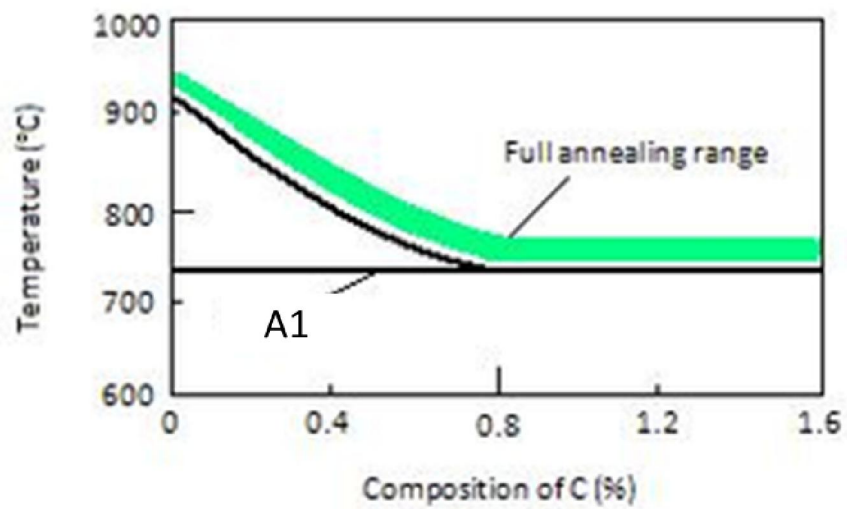
حدود  $50$  درجه سانتیگراد بالای خط  $A_1$  است.

واژه آنیل بدون پسوند استفاده شود، منظور همان آنیل کامل است.



فص

7



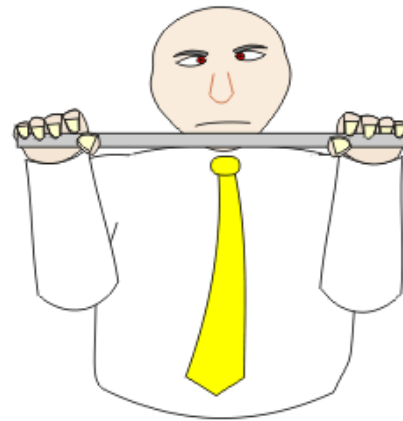
*Fig. 5.17. Full annealing.*



ANNEALED METALS



HARDENED METALS



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

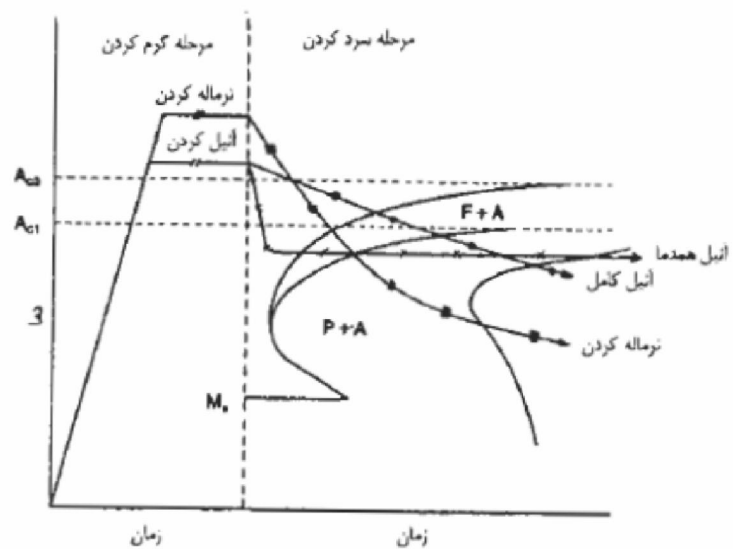
عناصر آلیاژی در فولادها تغییر می‌کند. بنابراین، به طور کلی در عملیات آنیل کامل، فولادهای هیپووتکتوئید را در ناحیه تکفازی آستنیت و فولادهای هایپروکتوئید را در ناحیه دوفازی آستنیت - سمنتیت حرارت می‌دهند.

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

بنابراین در عملیات آنیل کامل، هدف از آستنیت کردن

فولادهای هایپروکتوئید در ناحیه دوفازی آستنیت - سمنتیت، عبارت از شکستن شبکه پیوسته کاربید یاد شده و تبدیل آن به ذرات ریز و کروی شکل مجزا از یکدیگر است. نیروی

به علت سرد شدن آهسته، فریت تشکیل شده دارای دانه‌های درشت و هم محور بوده و پرلایت دارای فاصله بین لایه‌ای نسبتاً زیاد (پرلایت خشن یا درشت) است. از جمله مشخصه‌های مکانیکی این میکروساختار عبارت از کاهش سختی و استحکام و افزایش انعطاف پذیری است.



## نرماله کردن<sup>۳</sup> Normalizing

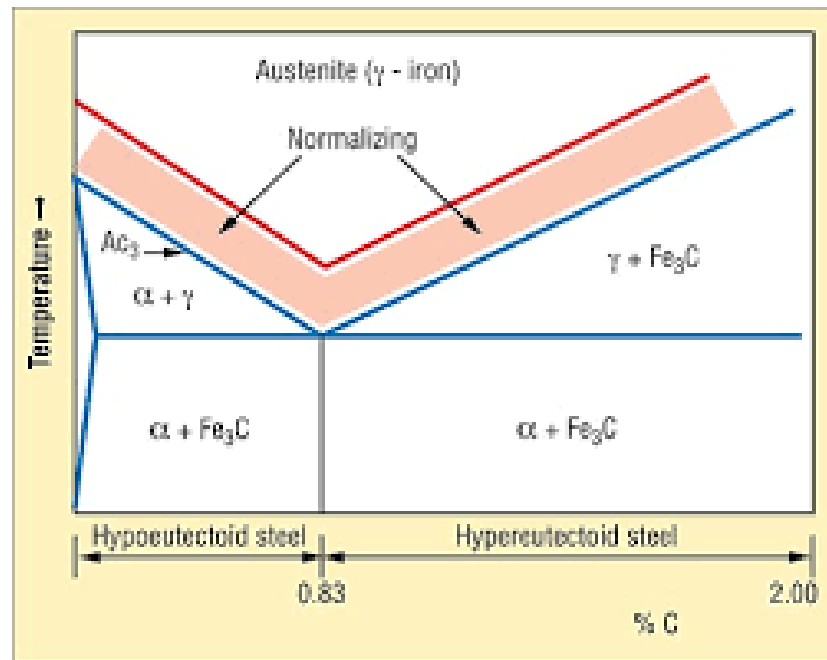
نرماله کردن یکی دیگر از انواع روشهای عملیات حرارتی است که میکروساختار حاصل همانند آنیل کردن شامل پرلیت، مخلوطی از پرلیت و فریت و یا مخلوطی از پرلیت و سمیتیت (بستگی به ترکیب شیمیایی فولاد) است.

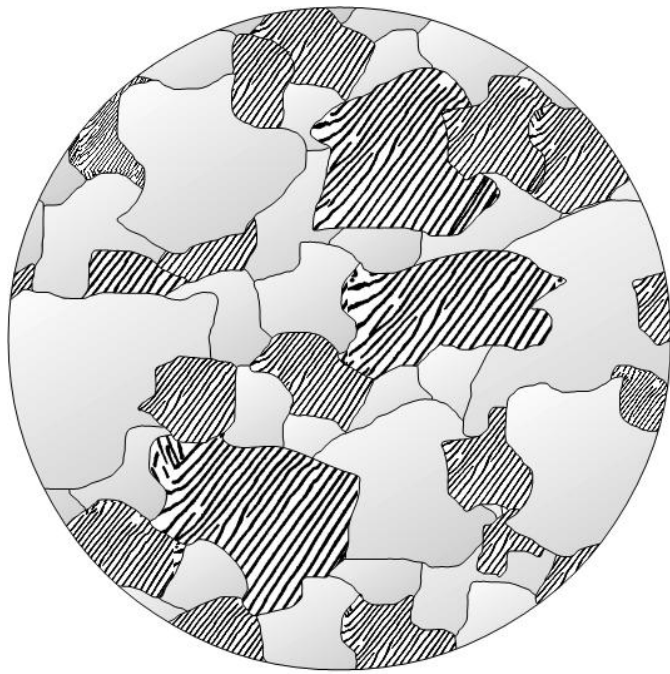
در نرماله کردن، دمای آستنیته کردن برای فولادهای هیپریوتکتوئید کمی بالاتر از گستره دمایی مربوط به آنیل کردن است در حالی که برای فولادهای هایپریوتکتوئید از گستره دمایی حدود ۵۰ درجه سانتیگراد بالای  $A_{cm}$  استفاده می شود

برخلاف آنیل کامل که فولاد در کوره

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

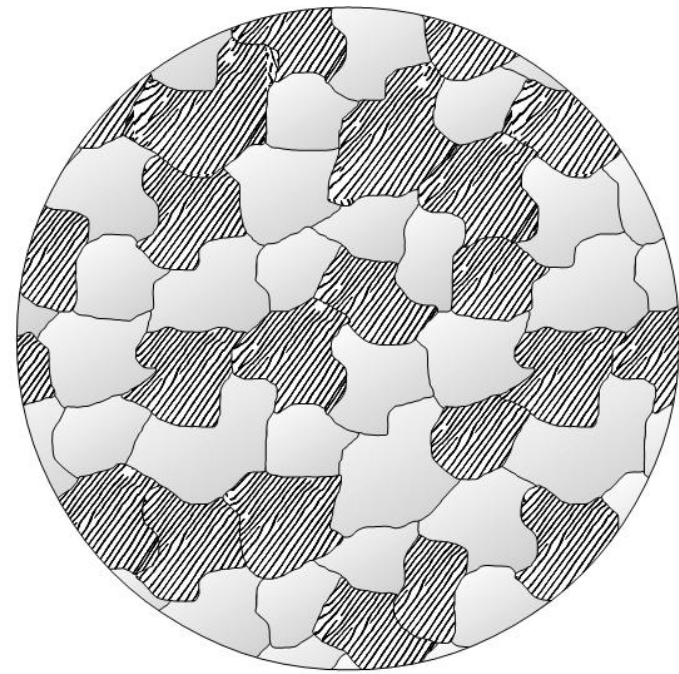
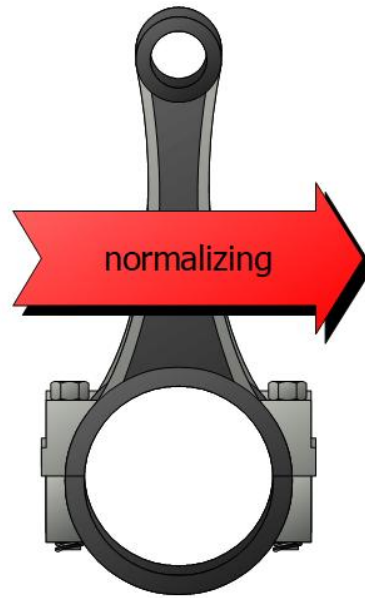
**سرعت سرد شدن: ۰.۱-۱ سانتی گراد بر ثانیه**



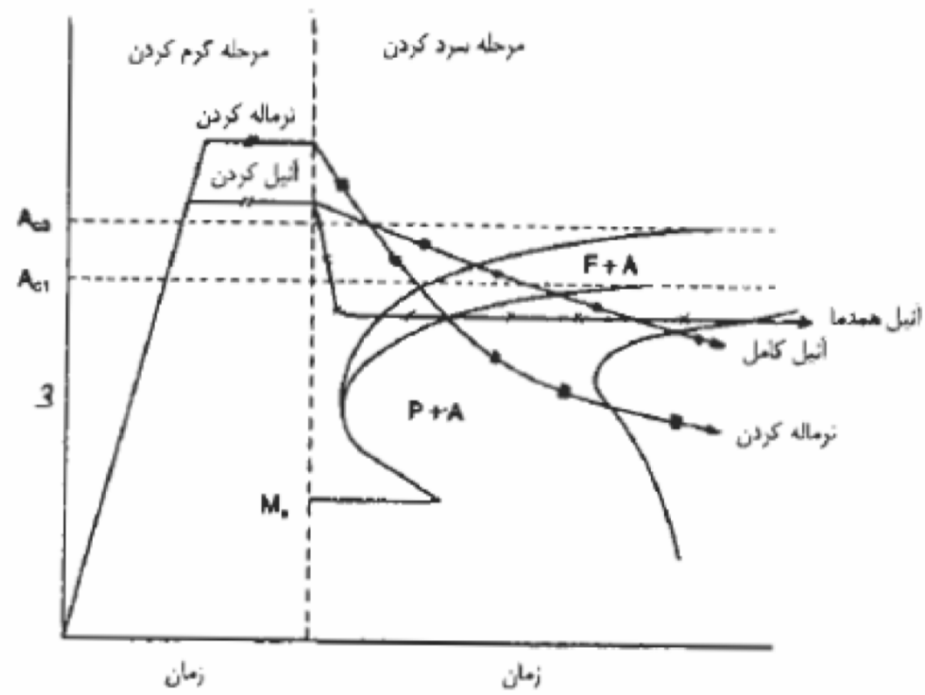


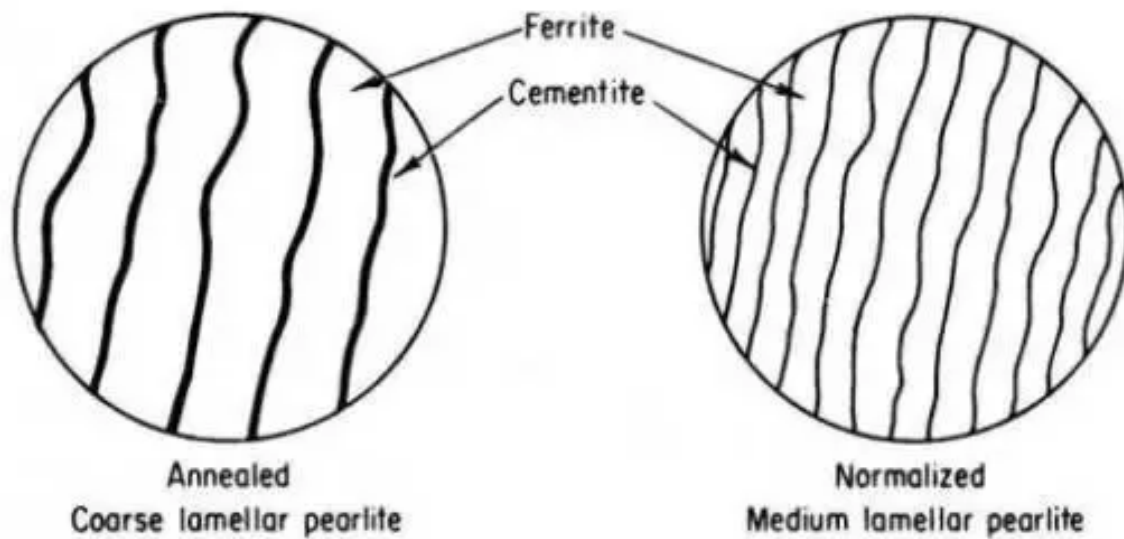
heterogeneous microstructure

casted connecting rod



homogenous microstructure





Annealed  
Coarse lamellar pearlite

Normalized  
Medium lamellar pearlite

**Difference in pearlitic structure due to annealing and normalizing**



از آنجایی که در نرماله کردن فولادهای هیپوپرکتوئید گستره دمایی آستنیتزدن بالاتر از گستره دمایی مربوط به آنیل است، ساختار آستنیت و همچنین توزیع عناصر آلیاژی از یکناختی بیشتری برخوردار خواهد بود.

یکی دیگر از اهداف مهم نرماله کردن عبارت است از ریز کردن دانههای درشتی که اغلب به هنگام کارگرم در دمای بالا و یا در ضمن ریخته‌گری و انجماد به وجود آمده‌اند.

برای نرماله کردن فولادهای هایپروکتوئید از گستره دمایی بین خط  $A_{cm}$  و حدود  $50^\circ$  درجه سانتیگراد بالای آن استفاده می‌شود (شکل ۵-۱). انتخاب این گستره دمایی به منظور ریز کردن دانههای آستنیت، انحلال کاربیدهای راسب شده و همچنین شکسته شدن شبکه پیوسته کاربیدی که احتمالاً در ضمن عملیات قبلی در مرز دانه‌ها به وجود آمده‌اند، است.

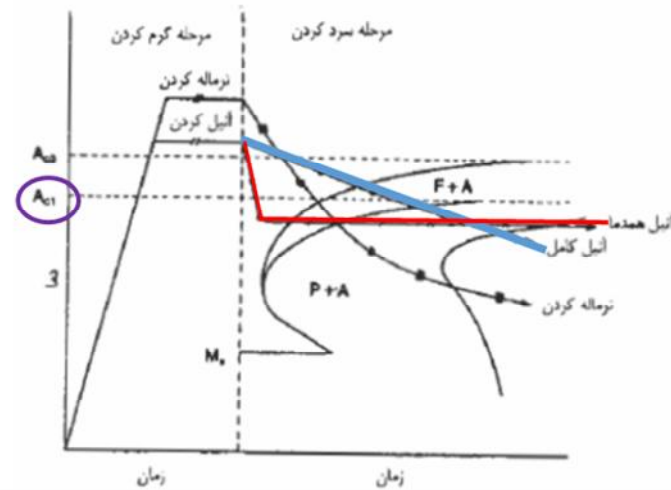
با توجه به اینکه در نرماله کردن فریت و سمنتیت و فاصله بین لایه‌ای پرلیت هر دو کاهش می‌یابند. بنابراین، در مقایسه با خواص حاصل از فرایند آنیل، استحکام و سختی افزایش یافته و انعطاف پذیری تا حدودی کاهش می‌یابد.

**Table 4.7.1** The variation in the properties of the annealed and normalized components [7]

Annealed	Normalised
<ul style="list-style-type: none"><li>• Less hardness, tensile strength and toughness.</li><li>• Pearlite is coarse and usually gets resolved by the optical microscope.</li><li>• Internal stresses are least.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Slightly more hardness, tensile strength and toughness.</li><li>• Pearlite is fine and usually appears unresolved with optical microscope.</li><li>• Internal stresses are slightly more.</li></ul>

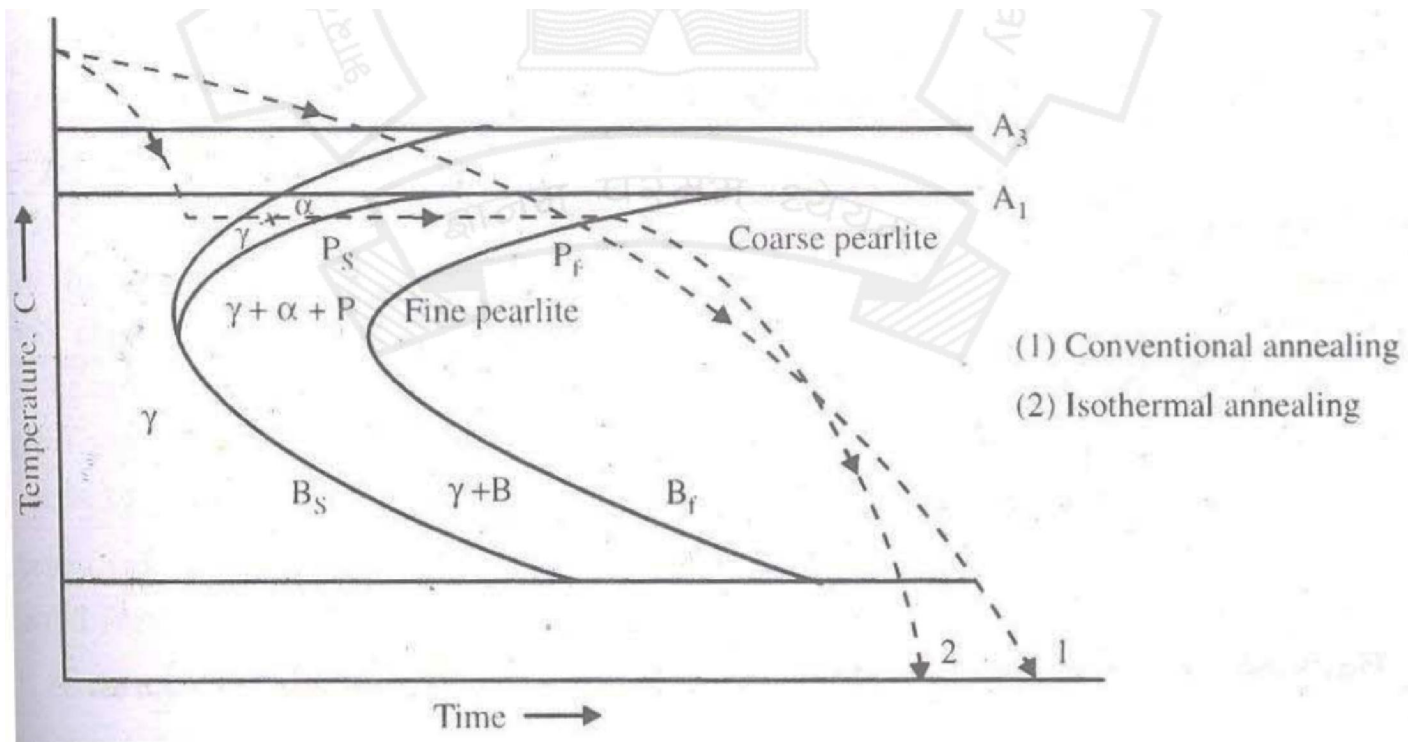
## آنیل همدمما

این عملیات، شامل حرارت دادن فولاد در دو دمای مختلف است، ابتدا عملیات آستنیتیزه کردن که در همان گستره دمایی مربوط به آنیل کامل انجام می‌شود و سپس سرد کردن سریع تا دمایی دگرگونی (زیر خط  $A_1$ ) و نگه داشتن برای مدت زمان کافی جهت انجام دگرگونی. پس از پایان دگرگونی، فولاد را با هر آهنگ سرد شدن دلخواهی می‌توان سرد کرد.



زمان لازم برای آنیل همدمما در مقایسه با آنیل کامل به مراتب کمتر است، در حالی

که سختی نهایی کمی بیشتر خواهد بود. همانند آنیل کامل، میکروساختار حاصل از آنیل همدمما در فولادهای همپو یو تکتوئید، یو تکتوئید و هایپریو تکتوئید به ترتیب عبارت از فریت - پرنیت، پرنیت و پرنیت - سمنتیت است. ولی پرنیت حاصل نسبتاً ظریفتر و درصد فریت و سمنتیت پرویو تکتوئید تا حدودی کمتر است.



## همگن سازی / Homogenising / آنیل نفوذی

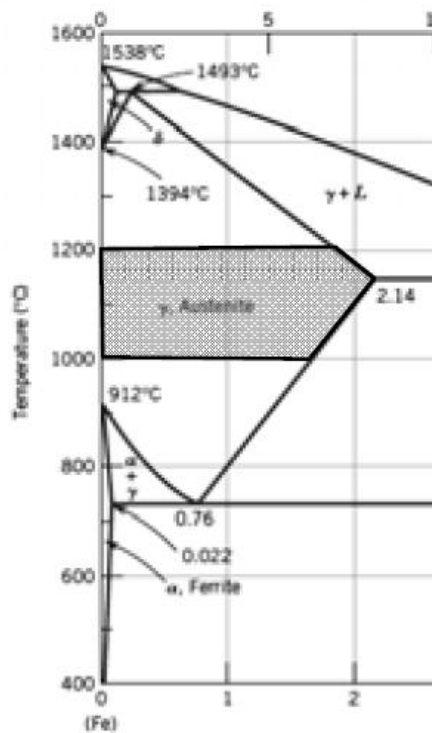
• هدف: یکنواخت کردن ساختارهای حاصل از ریخته گری

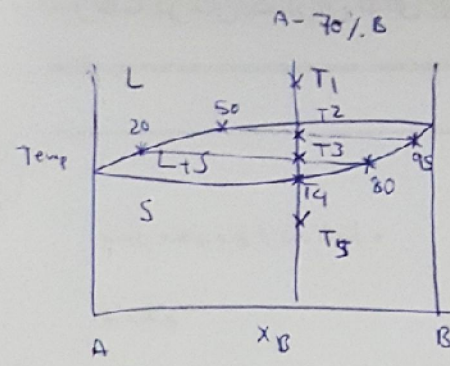
• سیکل حرارتی

- آستنیت کردن در دمای ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰

درجه سانتیگراد

- سرد کردن در هوا





$$T_1 : 100\% L \rightarrow A-70\% B$$

$$T_2 : L, S_1 \rightarrow A-95\% B$$

$$\downarrow$$

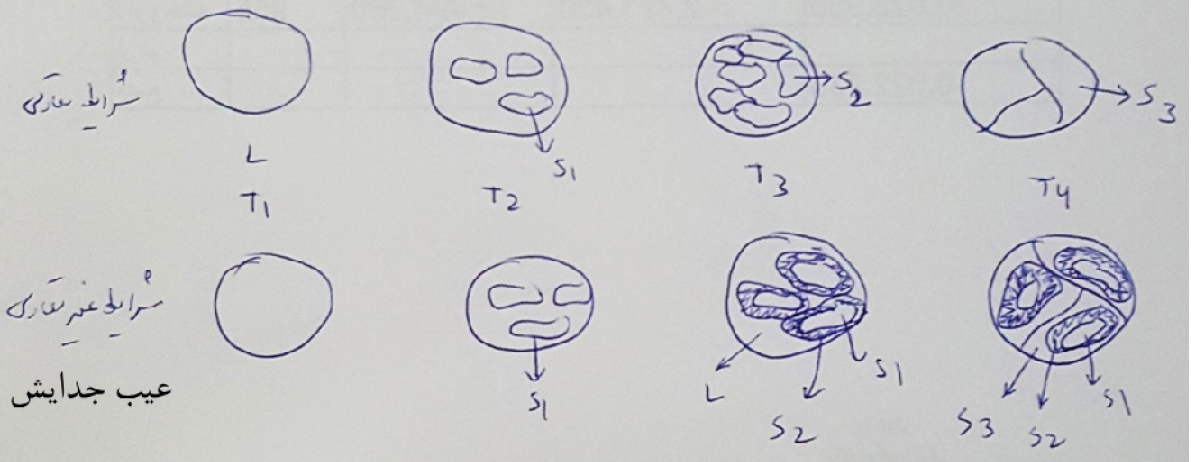
$$A-50\% B$$

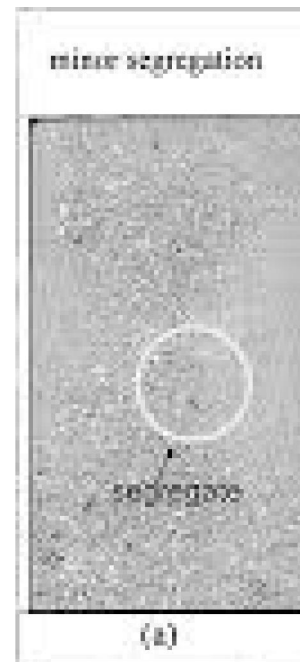
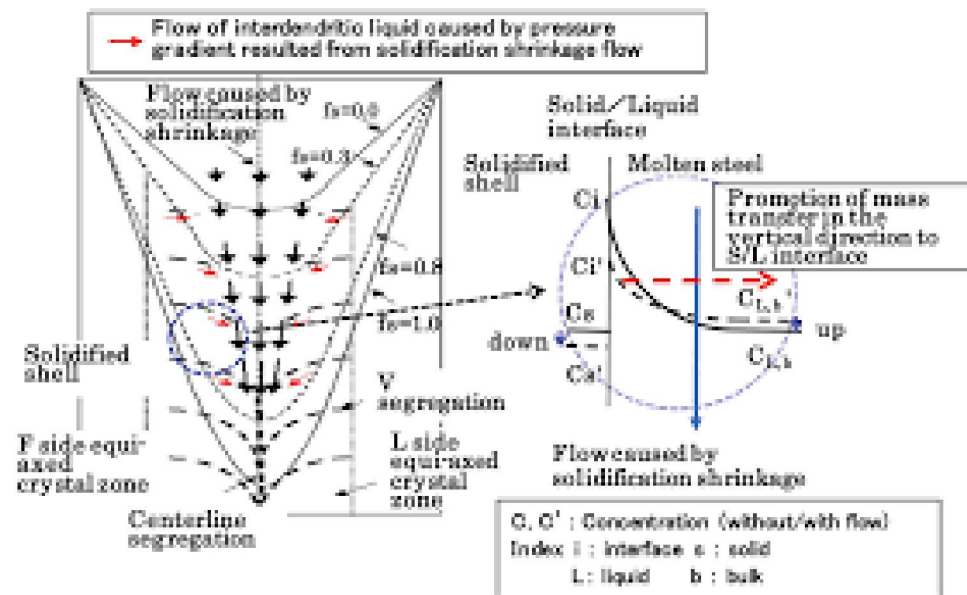
$$T_3 : L, S_2 \rightarrow A-80\% B$$

$$\downarrow$$

$$A-20\% B$$

$$T_4, T_5 \rightarrow S_3 : A-70\% B$$







# آنیل نیمه بحرانی

## تنش گیری<sup>۱</sup>

## Stress relieving

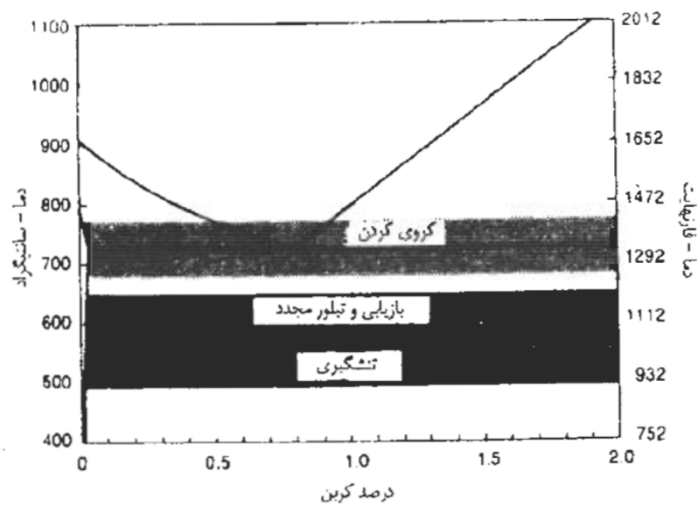
برخی از فرایندهای عملیات حرارتی و یا مکانیکی در قطعات ایجاد تنشهای داخلی می‌کنند که می‌تواند مخرب بوده و بر عملکرد این قطعات تأثیر نامطلوب گذارد. تنشهای داخلی حاصل، ممکن است منجر به تاب برداشتن، ترک خوردن و یا انهدام قطعات در تنشهایی به مراتب کمتر از سطح تنش طراحی شده برای آنها شود. از جمله منابع تنشهای داخلی عبارت‌اند از:

۱- نایکنواخت سرد شدن نقاط مختلف قطعه در ضمن کاهش دما از ناحیه آستنیت.

۲- ماشینکاری و کار سرد

۳- جوشکاری

برای حذف یا کاهش تنشهای باقیمانده از عملیات قبلی، قطعات مورد نظر را برای زمان مشخص در دمایی زیر دمای بحرانی  $Ac_1$  حرارت می‌دهند. زمان حرارت دهی بستگی به ابعاد قطعه و دمای تنشگیری دارد. هرچه دمای تنشگیری بالاتر انتخاب شود، زمان لازم برای انجام کامل عملیات کمتر است. به منظور جلوگیری از ایجاد تنشهای حرارتی جدید و همچنین احتمال شکستن قطعه در ضمن عملیات حرارتی تنش گیری، معمولاً حرارت دادن به و یا سرد کردن از دمای تنشگیری باید خیلی آهسته انجام شود. این موضوع به ویژه در رابطه با قطعات حجیم و تجهیزات بزرگ جوشکاری شده صادق است.

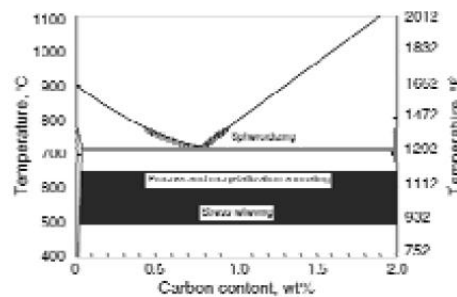


### تنش گیری / Stress Relief Heat Treating

• هدف: حذف تنشهای باقیمانده از عملیات قبلی

• سیکل حرارتی

- حرارت دادن در بازه دمایی ۵۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد به مدت کافی
- سرد کردن آهسته



- رفع تنشها با استفاده از مکانیزم بازیابی Recovery انجام میشود.
- تغییر عمده ای در خواص مکانیکی ایجاد نمیشود.

Stress relieving

تشن گیری<sup>۱</sup>

برخی از فرایندهای عملیات حرارتی و یا مکانیکی در قطعات ایجاد تنشهای داخلی می‌کنند که می‌تواند مخرب بوده و بر عملکرد این قطعات تأثیر نامطلوب گذارد. تنشهای داخلی حاصل، ممکن است منجر به تاب برداشتن، ترک خوردن و یا انهدام قطعات در تنشهایی به مراتب کمتر از سطح تنش طراحی شده برای آنها شود. از جمله منابع تنشهای داخلی عبارت‌اند از:

۱- نایکنواخت سرد شدن نقاط مختلف قطعه در ضمن کاهش دما از ناحیه آستنیت.

۲- ماشینکاری و کار سرد

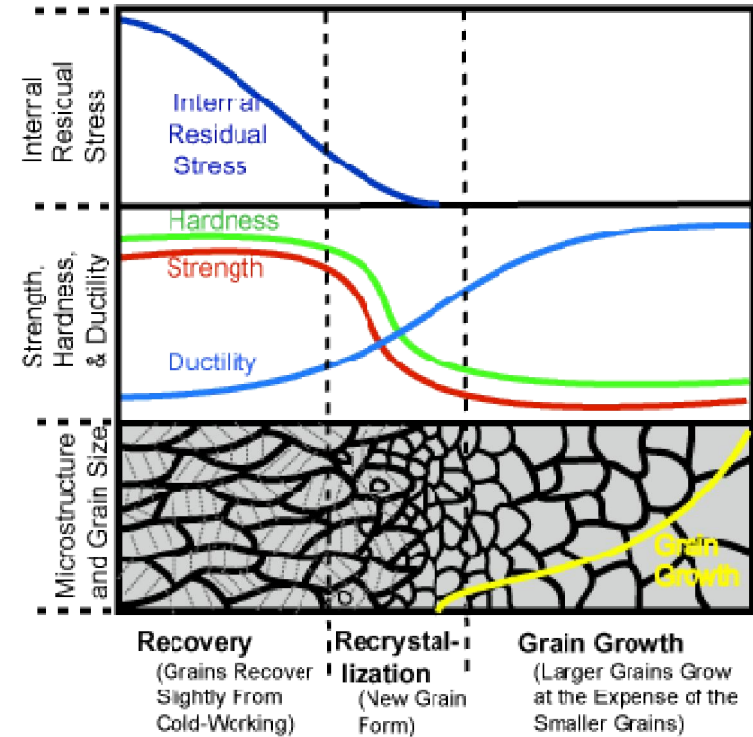
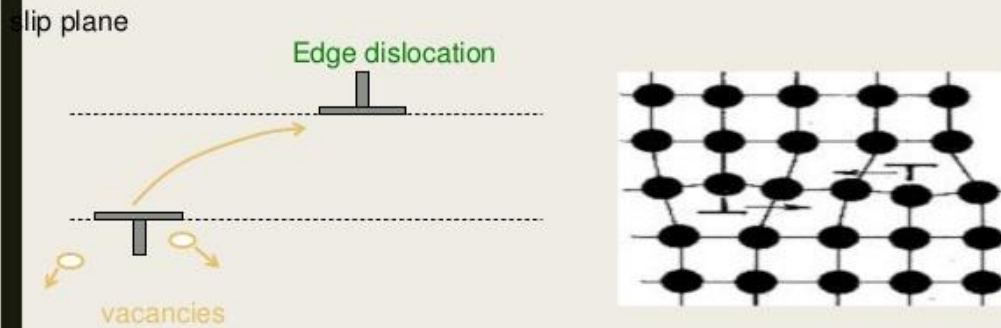
۳- جوشکاری

انجام کار سرد بر روی فولادها (تقریباً تمامی فلزات و آلیاژها) باعث افزایش استحکام و سختی و کاهش انعطاف پذیری و یا شکل پذیری آنها می شود. این پدیده که به کار سختی<sup>۳</sup> موسوم است ناشی از افزایش پیوسته معایب بلوری در اثر ادامه انجام کار سرد است. در اثر کار سرد انرژی داخلی فلز افزایش یافته و بنابراین از نظر ترمودینامیکی ناپایدار خواهد شد. حرارت دادن چنین قطعه‌ای باعث از بین رفتن معایب بلوری موجود و بازیابی میکروساختار و خواص فیزیکی و مکانیکی اولیه می شود. این پدیده در کتابهای متالورژی تحت عنوان بازیابی و تبلور مجدد بررسی و مطالعه شده که در ادامه به طور مختصر شرح داده می شود.

# Recovery

- Heating** → increased diffusion
- enhanced dislocation motion
  - decrease in dislocation density by annihilation, formation of low-energy dislocation configurations
- **relieves internal strain energy**

Some of the mechanisms of dislocation annihilation:



## تبلور مجدد

از جمله اثرات کار سرد عبارت از تغییر شکل دانه‌ها در جهت اعمال نیرو و ایجاد تنشهای داخلی است. در عملیات حرارتی تبلور مجدد دانه‌های جدید هم محور و عاری از تنش در فلز کار سرد شده به وجود می‌آید.

در حقیقت، تبلور مجدد ادامه عملیات حرارتی بازیابی است و

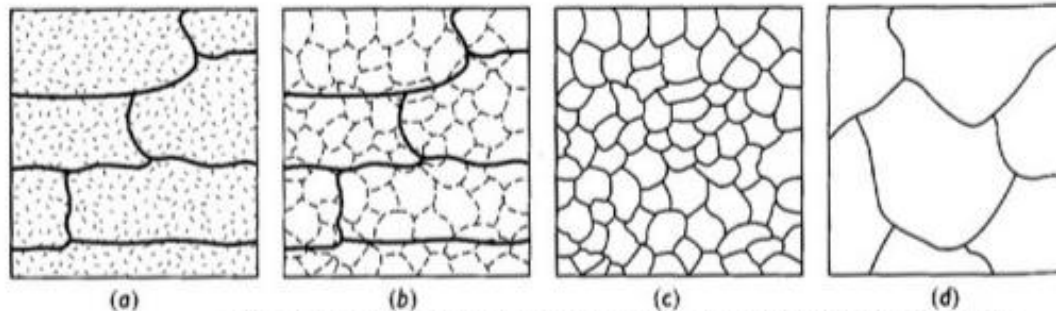
دانه‌های جدید عاری از تنش می‌توانند از دانه‌های فرعی حاصل از عملیات بازیابی به وجود آیند. اساساً فرایند تبلور مجدد شامل جوانه‌زنی و رشد بوده که نیروی محرکه برای این عملیات،

is a heat treatment designed to eliminate the effects of cold working. The properties of a metal may revert back to the precold-worked states by through **recovery**, **recrystallization** and **grain growth**.

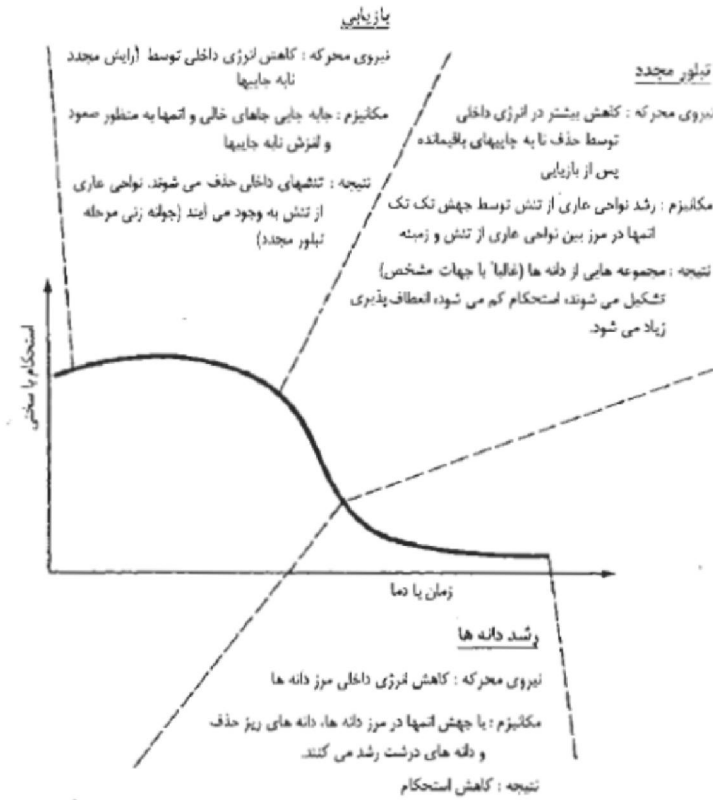
**Recovery:** the relief of some of the internal strain energy of a previously cold-worked material.

**Recrystallization:** the formation of a new set of strain-free grains within a previously cold-worked material.

**Grain Growth:** the increase in average grain size of a polycrystalline material. **An elevated temperature heat treatment (annealing) is needed for these 3-processes.**



**The effect of annealing temperature on the microstructure of cold-worked metals: (a) cold worked, (b) after recovery, (c) after recrystallization, and (d) after grain growth.**



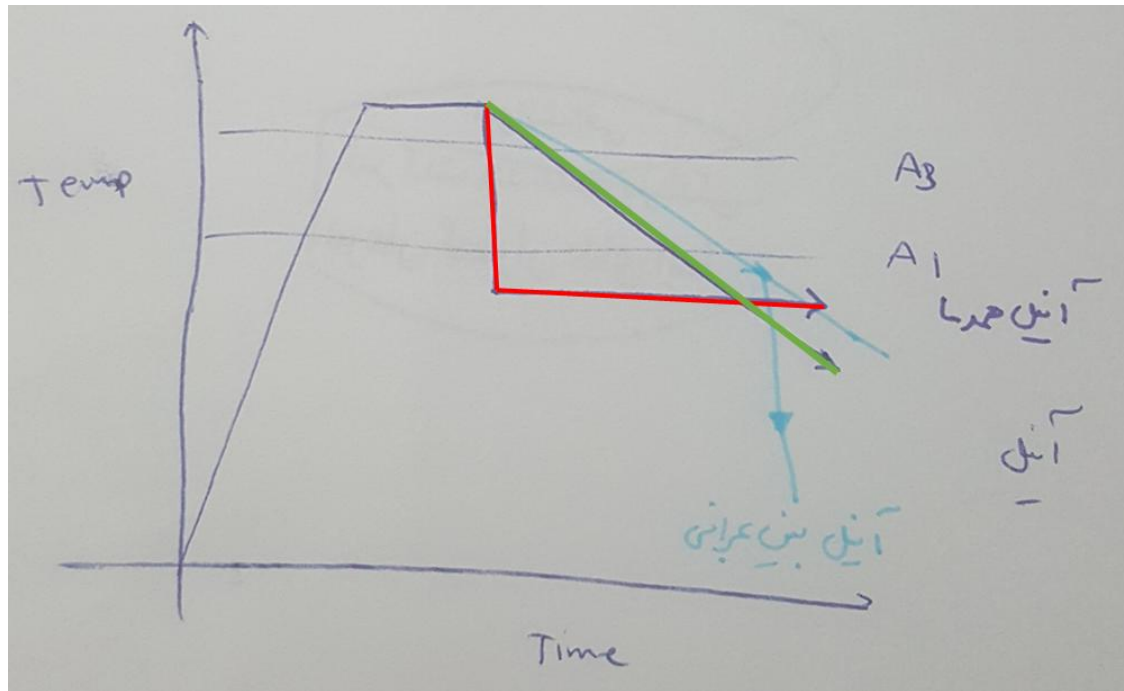
شکل ۵-۱۳ خلاصه‌ای از نیروی محرکه، مکانیزم و نتایج حاصل از پاز یابی، تیلور مجدد و رشد دانه‌ها [۵].



## آنیل بین بحرانی

آنیل بین بحرانی تقریباً عکس آنیل همدم است و در آن در منطقه دو فازی آهسته تر از حالت تعادلی (در کوره با فضای اتمسفری آرگون) سرد میشود تا فریت اولیه بیشتری تولید شود.

این عملیات حرارتی بیشتر برای فولادهای آلیاژی برای ایجاد یک زمینه فریتی بیشتر با انعطاف پذیری بالا می باشد که سختی آن نیز از طریق ایجاد کاربیدهای آلیاژی فراهم می گردد.



## Spheroidizing / کرووی کردن

• هدف: بهبود حداکثری شکل پذیری سرد در فولادها

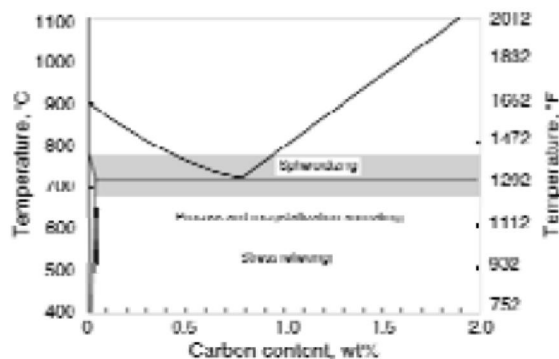
• سیکل حرارتی

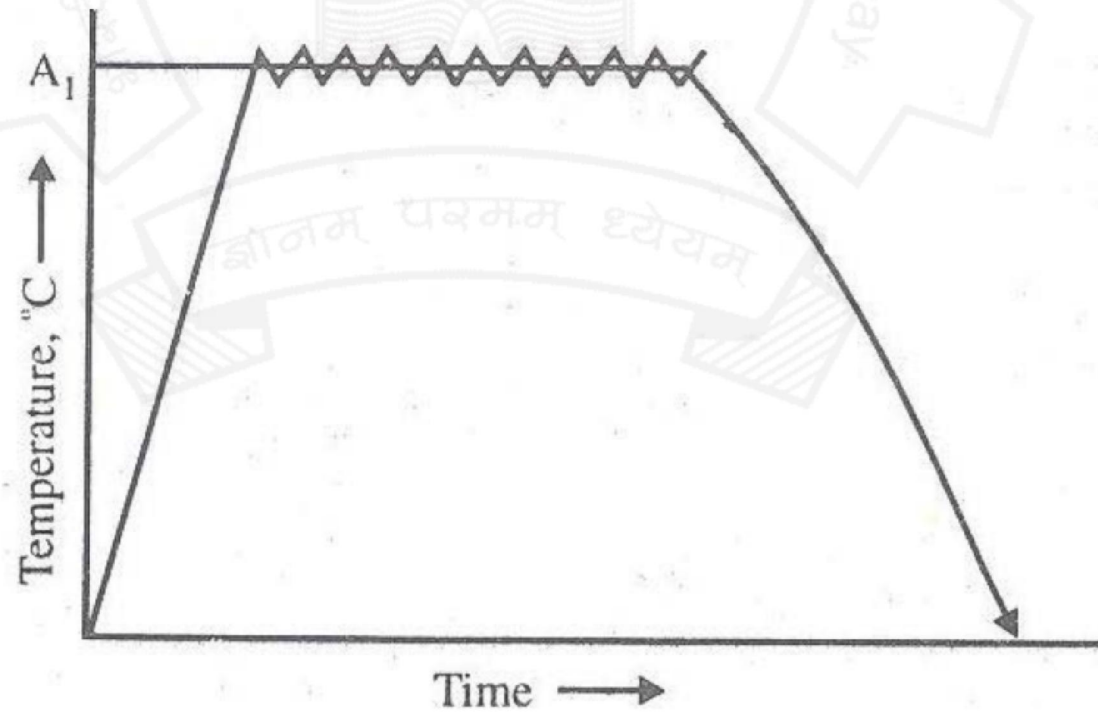
– حرارت دادن در منطقه A1

– نگهداری به مدت لازم جهت

کرووی شدن لایه های سمانتیت

– سرد کردن

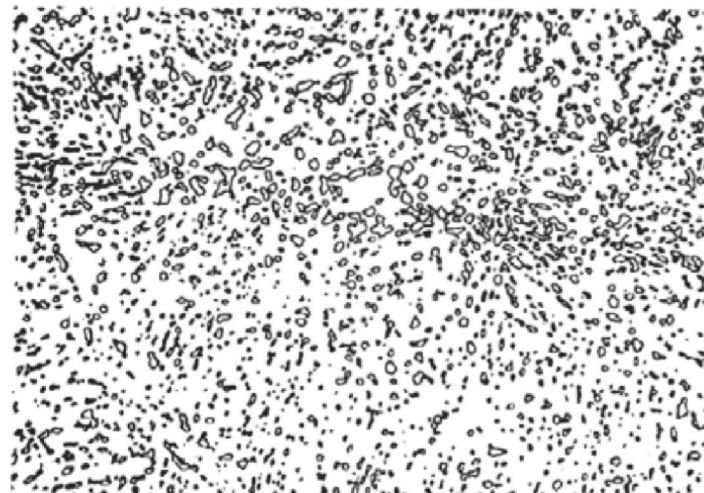




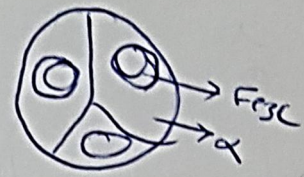
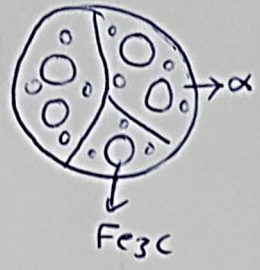
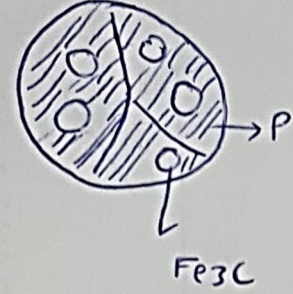
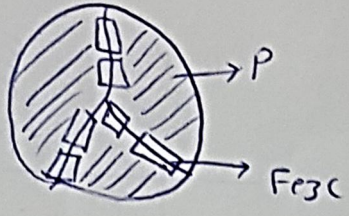
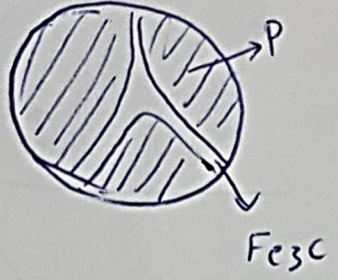
**Figure 4.7.4** A typical heat treatment cycle to produce spheroidised structure [7].

## کروی کردن<sup>۵</sup> Spheroidizing

انعطاف پذیرترین و نرمترین شرایط در هر فولاد مربوط به میکروساختاری شامل سمنتیت کروی توزیع شده به طور یکنواخت در زمینه فریتی می‌شود.



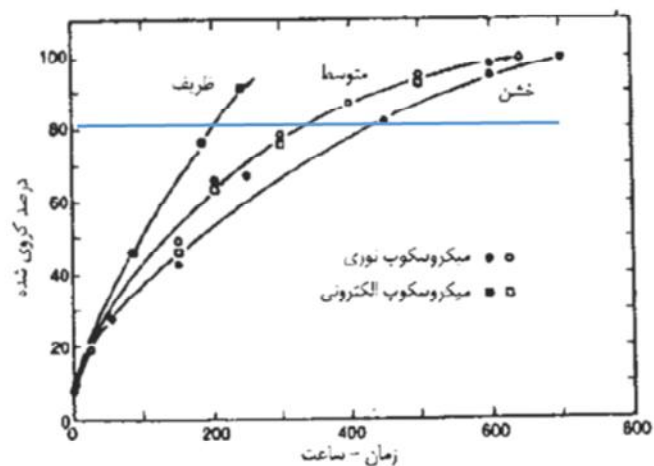
شکل ۵-۵ میکروساختار سمنتیت کروی در فولاد Fe-۰/۶۶C-۱Mn که با حرارت دادن مارتنزیت به مدت ۲۴ ساعت در ۷۰۴ درجه سانتیگراد (درجه فارنهایت) به دست آمده است. محلول حکاکی، پیکرال، بزرگنمایی  $\times 1000$  [۱].



انعطاف پذیری بسیار خوب فولادهای کم کربن و کربن متوسط با سمیت کروی از این نظر اهمیت دارد که این فولادها اغلب توسط کار سرد شکل می گیرند. از طرف دیگر از آنجایی که ساخت قطعات از جنس فولادهای پر کربن اغلب نیاز به ماشین کاری زیاد دارند، سختی کم میکروساختار سمیت کروی این فولادها اهمیت قابل ملاحظه ای دارد.

سمیت کروی پایدارترین میکروساختار موجود در فولادهاست که با حرارت دادن فولاد در مدت زمان مناسب در گستره دمایی نشان داده شده در شکل ۵-۶ به دست می آید. از آنجایی که کروی کردن سمیت مستلزم نفوذ است، دما و زمان عملیات باید طوری انتخاب شوند که نفوذ به بهترین وجه انجام گرفته و در نتیجه در کوتاهترین مدت بیشترین درصد سمیت کروی شود.

آهنگ کروی شدن سمنتیت، بستگی به میکروساختار اولیه فولاد و همچنین نحوه عملیات حرارتی کروی کردن دارد. از نظر میکروساختاری، پرلیت بیشترین زمان را برای کروی شدن نیاز دارد و در بین میکروساختارهای مختلف پرلیتی زمان لازم برای کروی شدن به ترتیب از پرلیت خشن به پرلیت متوسط و سپس پرلیت ظریف کاهش می‌یابد.



شکل ۵-۷ پیشرفت عملیات کروی شدن سمنتیت مربوط به پرلیت ظریف، متوسط و خشن در فولاد  $0.7\% \text{Si} - 0.7\% \text{C} - 98\% \text{Fe}$  در  $700^\circ \text{C}$  سانتیگراد ( $1292^\circ \text{F}$  درجه فارنهایت) [۱].



## در حقیقت لایه‌های

سمنتیت ابتدا در تمام شکسته شده و به ذرات ریز سمنتیت تبدیل می‌شوند و سپس در ادامه عملیات ذرات ریز به شکل کروی درمی‌آیند. از این رو هر چه لایه‌های سمنتیت درشت‌تر باشند زمان کروی شدن هم بیشتر است.

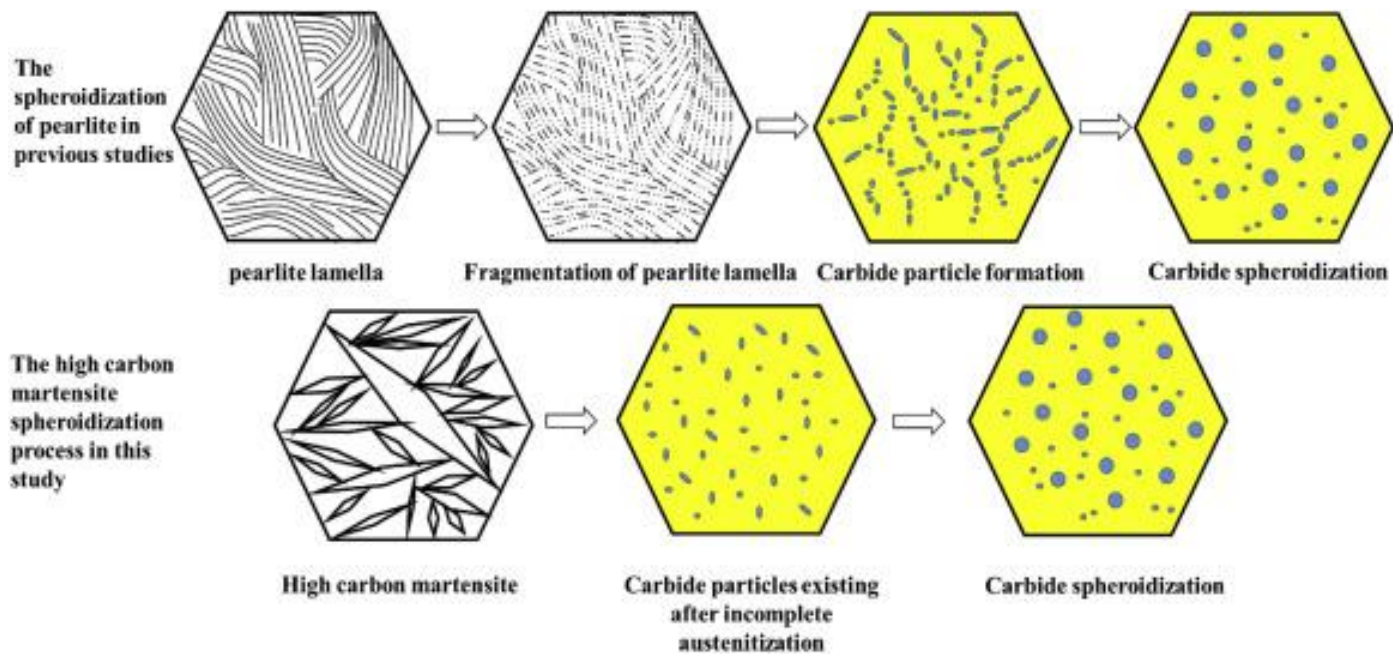
اگر کاربری‌های اولیه به شکل ذرات ریز و مجزا از یکدیگر (بینیت) باشند، کروی

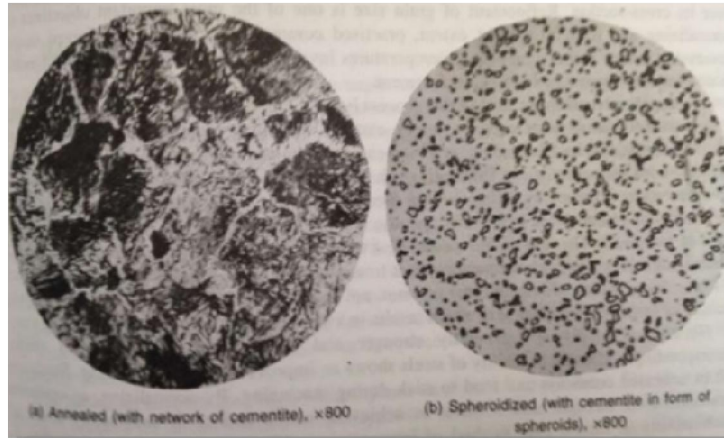
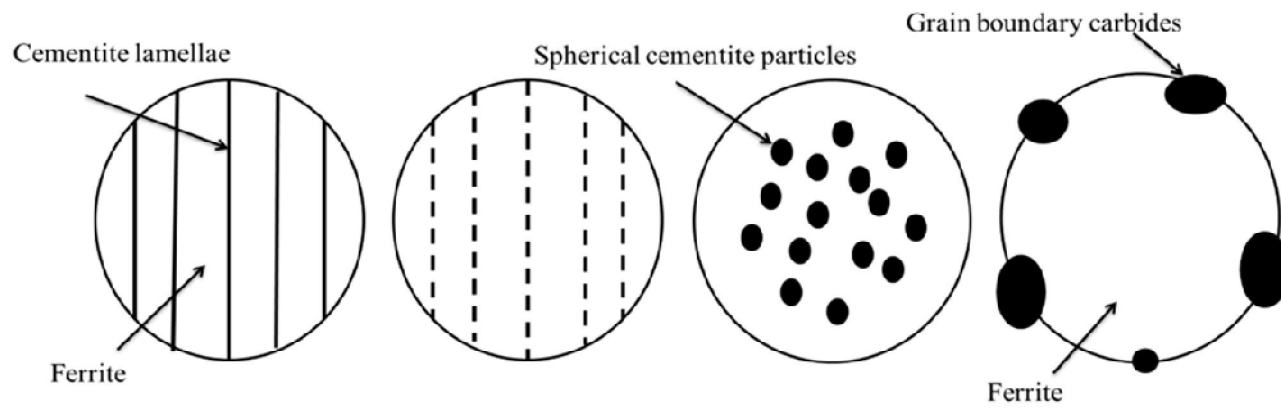
شدن بسیار سریعتر خواهد بود. اگر ساختار اولیه مارتنزیت باشد، کروی شدن حتی سریعتر

خواهد شد. در حقیقت در ساختارهای مارتنزیتی نیازی به شکسته شدن صفحات سمنتیتی و سپس کروی شدن نیست، بلکه کروی شدن بدین صورت است که کربن فوق اشباع در ضمن خروج از شبکه آهن و تشکیل سمنتیت به شکل کروی رسوب می‌کند.

در اینجا تذکر این نکته ضروری است که پس از پایان سیکل عملیات حرارتی کرووی کردن، آهنگ سرد شدن تا دمای اتاق اثری بر روی درصد سمیتیت کرووی و یا ساختار زمینه ندارد. لیکن، ترجیح داده می‌شود که قطعات در کوره و یا در هوا سرد شوند.

از آنجایی که عملیات کرووی شدن مستلزم تجزیه و انحلال جزئی سمیتیت لایه‌ای و سپس راسب شدن آن بر روی کره‌های سمیتیت است، نفوذ کربن در فاز فریت نقش مهمی را در این رابطه بازی می‌کند. بدین صورت که، هر چه آهنگ نفوذ کربن زیادتر شود، کرووی شدن نیز سریعتر می‌شود. به طور کلی، عناصر آلیاژی آهنگ نفوذ کربن در فاز فریت را کاهش می‌دهند و بنابراین عملیات کرووی شدن را به تعویق می‌اندازند. از آنجایی که رشد کاربیدهای آلیاژی مستلزم نفوذ عناصر آلیاژی کاربیدساز است و نفوذ این عناصر در مقایسه با کربن بسیار آهسته‌تر است، بنابراین وجود عناصر آلیاژی کاربیدساز کرووی شدن را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.





## فصل ۶

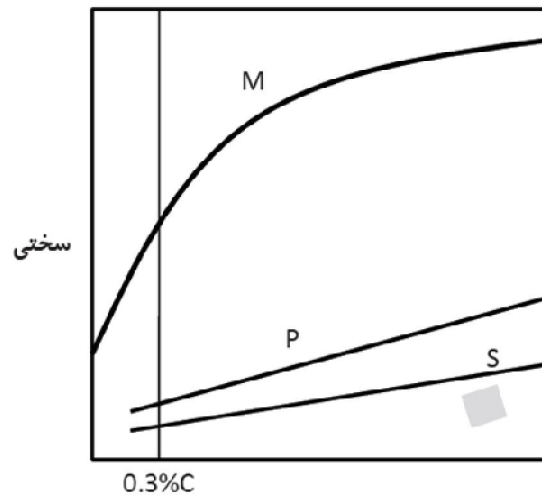
سختی و سختی پذیری

بیه منظور بهبود خواص مکانیکی، تقریباً در تمامی موارد، فرایند سخت کردن (تشکیل مارتنزیت) همراه با بازیخت<sup>۱</sup> است

عملیات حرارتی جهت تشکیل مارتنزیت معمولاً بر روی فولادهایی انجام می شود که حداقل ۰/۳ درصد کربن داشته باشند. از آنجایی که سختی مارتنزیت حاصل از سریع سرد کردن فولادهای کربنی ساده با کمتر از ۰/۳ درصد کربن نسبتاً پایین است اصطلاحاً گفته می شود که این فولادها آب نمی گیرند. در رابطه با شکل ۶-۱ تذکر این نکته ضروری است که در مقیاس راکول سی<sup>۲</sup>، سختی کمتر از ۲۰ راکول سی فاقد اعتبار است و در این شکل تنها جهت مقایسه آمده است.

### عوامل موثر بر سختی مارتنزیت

- مارتنزیت سخت ترین فاز ممکن در فولادهای ساده کربنی است.
- سختی مارتنزیت وابسته به عوامل مختلفی است از جمله:



علاوه بر کرین، ساختار فرعی<sup>۱</sup> مارتنزیت نیز در افزایش استحکام نقش مهمی را بازی می‌کند. همچنان که در فصل سوم بحث شد، دگرگونی مارتنزیتی از این نظر منحصر به فرد است که انجام آن همراه با به وجود آمدن چگالی بالایی از معایب خطی نظیر ناب‌جاییها و / یا دوقلوهای ریز و ظریف در میکروساختار فولاد است.

بنابراین، استحکام مارتنزیت عمدتاً ناشی از دو پارامتر است: یکی کرین موجود در شبکه بلوری که به صورت محلول جامد فوق اشباع باشد و دیگری ساختار فرعی که در حقیقت همان چگالی بالایی از ناب‌جاییها و دوقلوهاست.



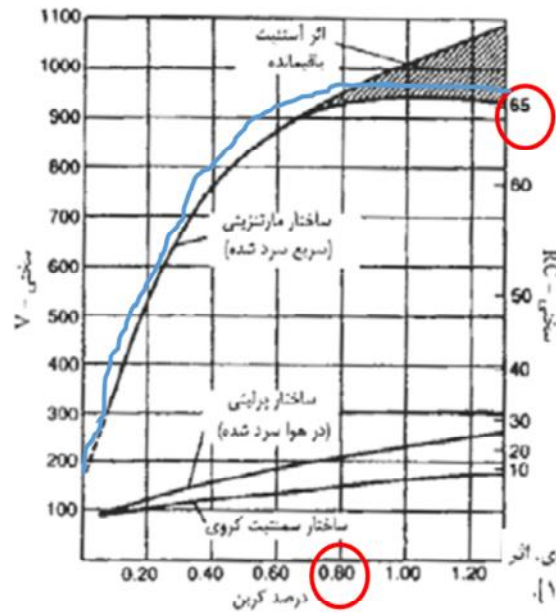
## عوامل موثر بر تغییرات سختی فاز مارتنزیت

- ۱- درصد کربن
- ۲- محیط سرد شدن
- ۳- پدیده پیر شدن
- ۴- اندازه دانه فاز آستنیت
- ۵- درصد مارتنزیت تشکیل شده

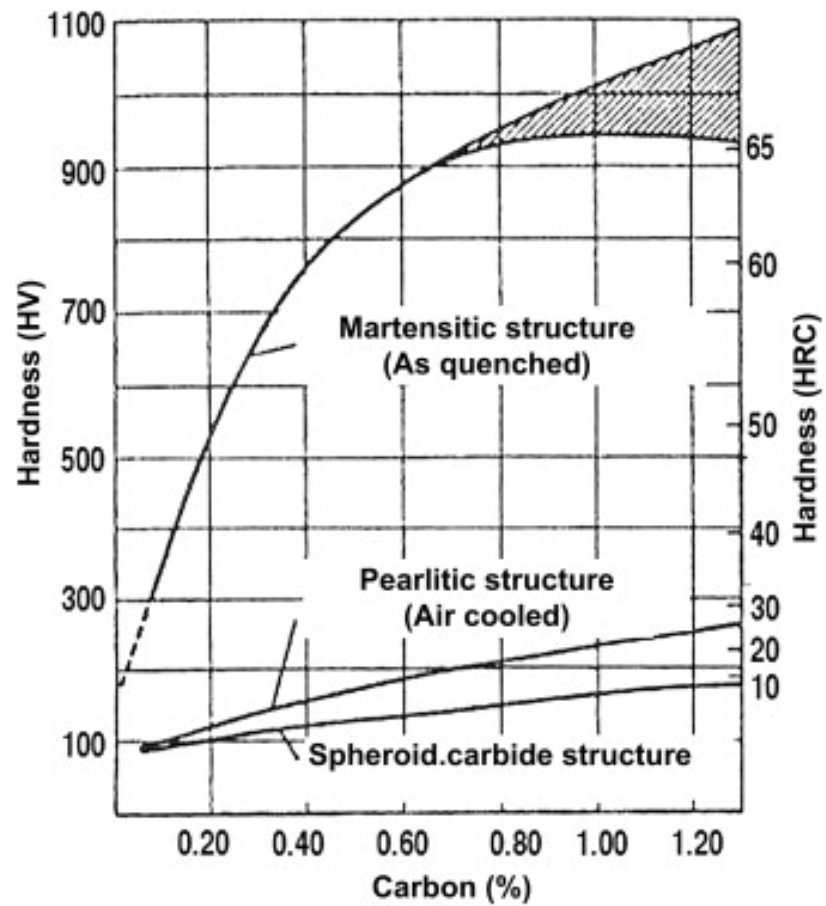
## سختی و درصد کربن

از جمله مهمترین اهداف تشکیل مارتنزیت در فولادها عبارت از سختی زیاد، استحکام بالا و مقاومت در برابر خستگی و سایش است. حداکثر سختی در یک فولاد کربنی ساده مربوط به میکروساختار صد درصد مارتنزیتی می‌شود. شکل ۶-۱ نشان می‌دهد که برای هر درصد کربن، سختی ساختار مارتنزیتی به مراتب بیشتر از سختی ساختارهای فریت - پرلیت و یا سمیتیت

کروی - فریت است.



شکل ۶-۱ اثر کربن بر روی سختی فولاد با ساختارهای مارتنزیتی، پرلیتی و سمیتیت کروی. اثر استیت باقیمانده بر روی سختی مارتنزیت توسط ناحیه هائوسور زه مشخص شده است [۱].



بیه منظور بهبود خواص مکانیکی، تقریباً در تمامی موارد، فرایند سخت کردن (تشکیل مارتنزیت) همراه با بازیخت<sup>۱</sup> است

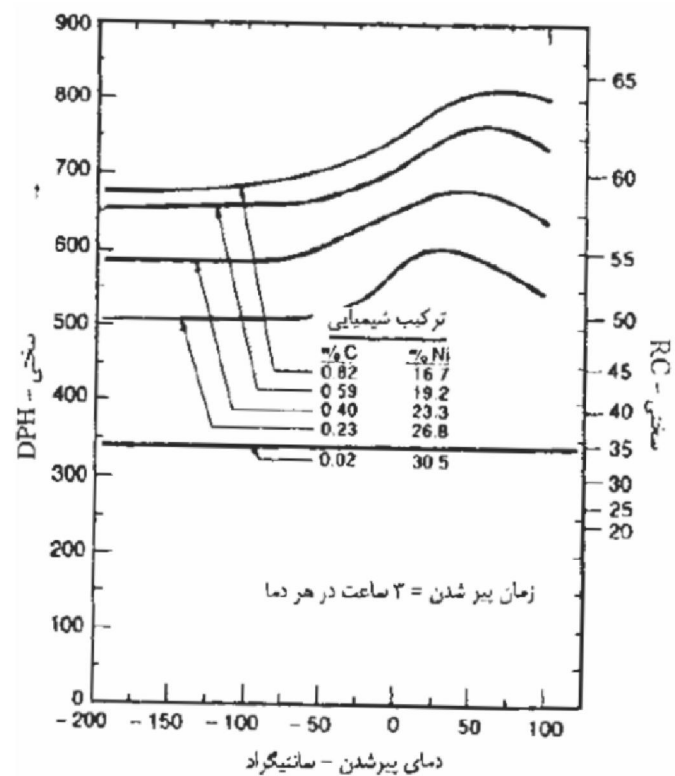
عملیات حرارتی جهت تشکیل مارتنزیت معمولاً بر روی فولادهایی انجام می شود که حداقل ۰/۳ درصد کربن داشته باشند. از آنجایی که سختی مارتنزیت حاصل از سریع سرد کردن فولادهای کربنی ساده با کمتر از ۰/۳ درصد کربن نسبتاً پایین است اصطلاحاً گفته می شود که این فولادها آب نمی گیرند. در رابطه با شکل ۶-۱ تذکر این نکته ضروری است که در مقیاس راکول سی<sup>۲</sup>، سختی کمتر از ۲۰ راکول سی فاقد اعتبار است و در این شکل تنها جهت مقایسه آمده است.

در شکل

۶-۱ ناحیه هاشور زده شده اثر آستنیت باقیمانده را بر روی سختی مارتنزیت مشخص می‌کند. از آنجایی که با افزایش درصد کربن دمای  $M_f$  کاهش می‌یابد (شکل ۳-۶) میزان آستنیت باقیمانده در دمای اتاق نیز با افزایش درصد کربن افزایش می‌یابد.

از جمله پارامترهای دیگر که بر روی سختی مارتنزیت اثر می‌گذارد پدید آمدن  $\alpha'$  یا گذشت زمان است. شکل ۳-۶ نشان می‌دهد که پیرشدن مارتنزیت در دمای اتاق باعث افزایش سختی فولادهای Fe-Ni-C می‌شود.

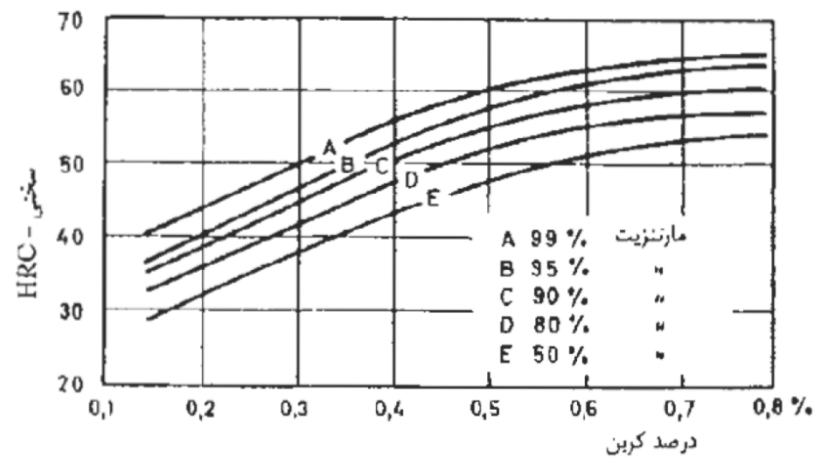
بنابراین اگر توجهی به فاصله زمانی بین سریع سرد شدن قطعه و اندازه‌گیری سختی نشود تغییرات پراکنده‌ای در نتایج حاصل دیده خواهد شد.



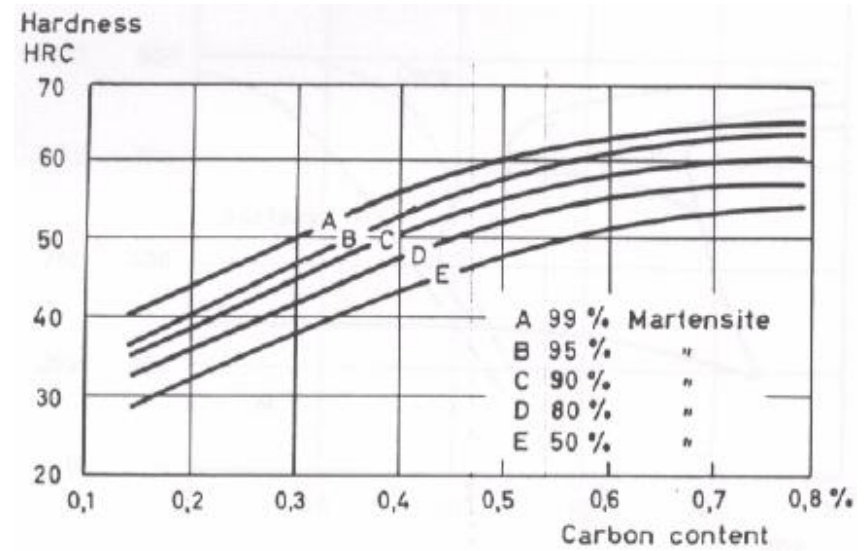
شکل ۳-۶ سختی مارتنزیت در آلیاژ Fe-Ni-C، تمام سختیها در ۱۹۵- درجه سانتیگراد (۳۲۰- درجه فارنهایت) و پس از ۳ ساعت پیر شدن مارتنزیت در دمای نشان داده شده بر روی محور افقی اندازه گیری شده‌اند [۱].

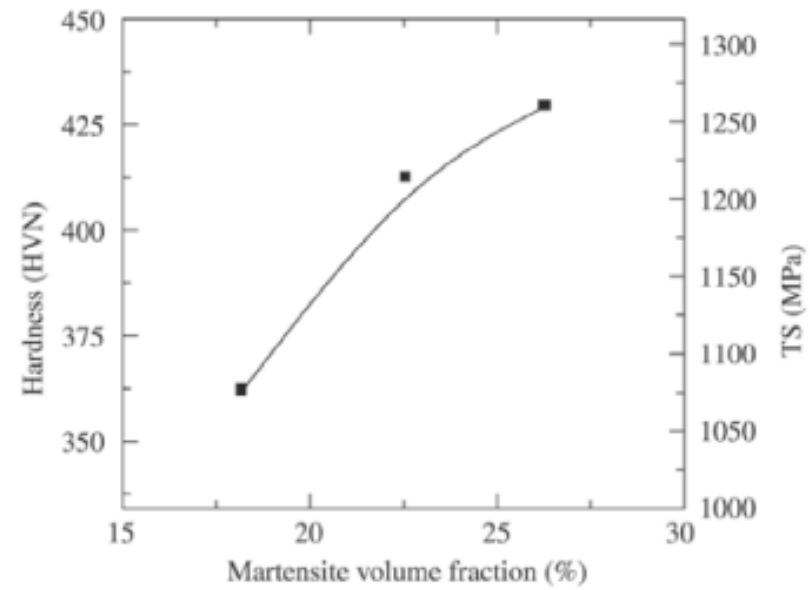
اندازه دانه‌های آستنیت اولیه، پارامتر دیگری است که بر روی سختی مارتنزیت اثر می‌گذارد. از آنجایی که مرز دانه‌های آستنیت می‌تواند به عنوان یکی از موانع مؤثر در برابر پیشرفت و رشد صفحات مارتنزیتی عمل کند، هر چه دانه‌های آستنیت اولیه ریزتر باشد، چگالی صفحات مارتنزیتی در واحد حجم بیشتر بوده و بنابراین سختی مارتنزیت نیز افزایش می‌یابد.





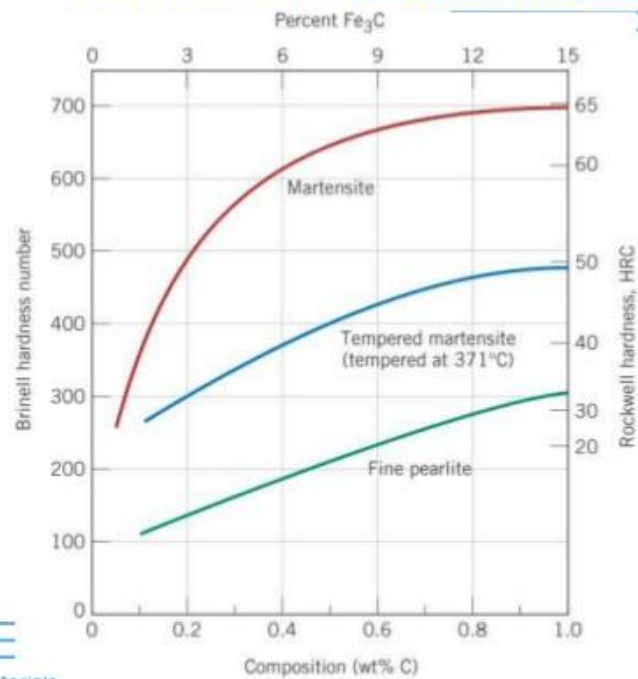
شکل ۶-۶ ارتباط بین سختی، درصد کربن و درصد مارتنزیت [۶].





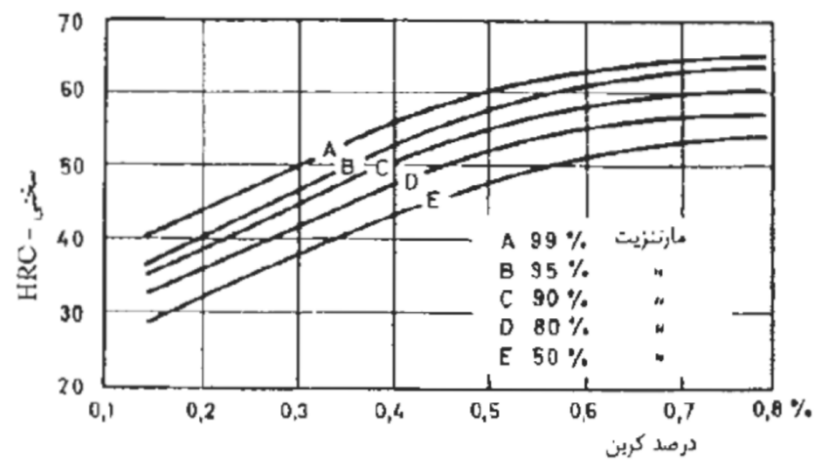
**Figure 6.** Evolution of hardness and ultimate tensile strength with the martensite volume fraction.

## Hardness as a function of carbon concentration for steels



## سختی پذیری

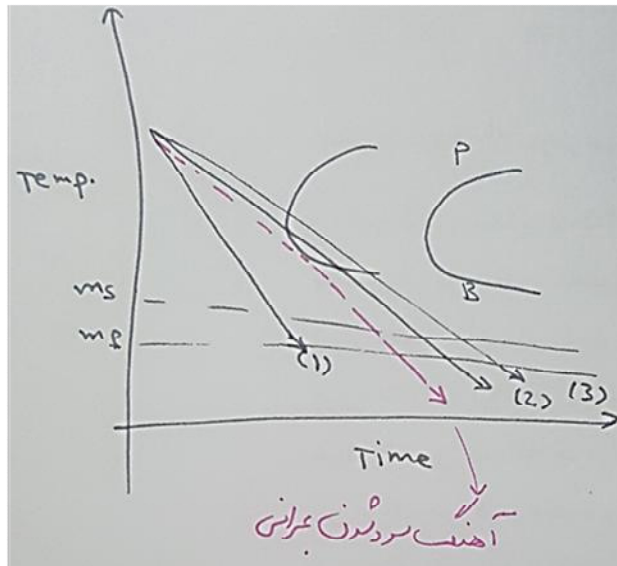
در صورتی که آهنک سرد شدن یک فولاد از ناحیه آستنیت بیشتر از آهنک سرد شدن بحرانی<sup>۱</sup> (حداقل آهنک سرد شدنی که از تشکیل پرلیت و بینیت جلوگیری شود) باشد، سختی حاصل عمدتاً بستگی به درصد کربن فولاد دارد. اگر آهنک سرد شدن کمتر از آهنک سرد شدن بحرانی باشد، درصد مارتنزیت حاصل کاهش یافته و بنابراین سختی فولاد نیز کاهش می یابد. در اینجا منظور از کربن فولاد، مقدار کربنی است که در آستنیت به صورت محلول جامد باشد. به بیان دیگر، آن مقدار کربنی که پس از آستنیت شدن فولاد به صورت کاربید باقی می ماند، در دگرگونی تشکیل مارتنزیت شرکت نداشته و بنابراین اثری بر روی سختی مارتنزیت ندارد. ارتباط بین سختی، درصد کربن و درصد مارتنزیت در شکل ۶-۶ نشان داده شده است.

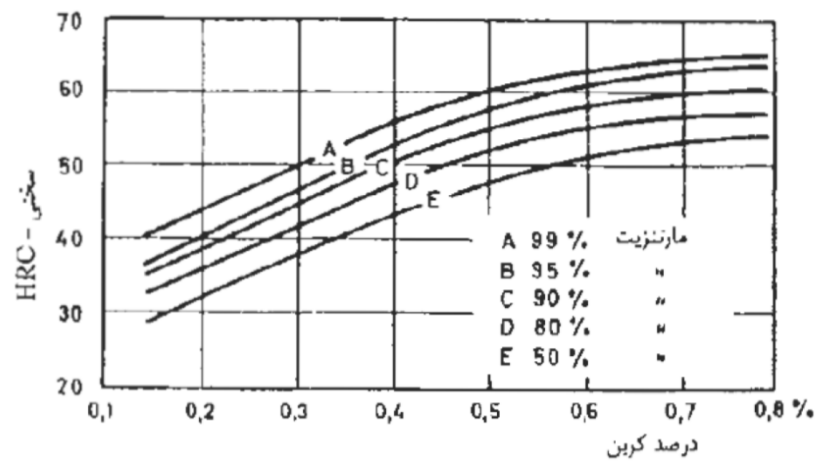


شکل ۶-۶ ارتباط بین سختی، درصد کربن و درصد مارتنزیت [۶].

# سختی پذیری

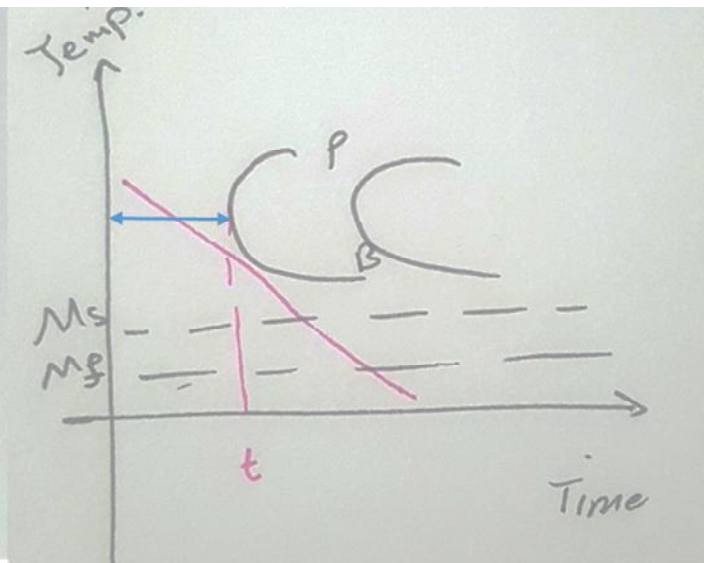
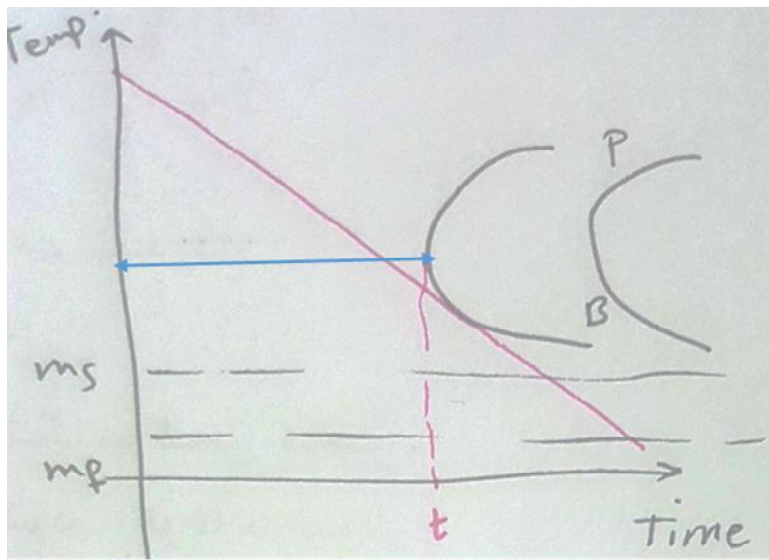
در صورتی که آهنک سرد شدن یک فولاد از ناحیه آستنیت بیشتر از آهنک سرد شدن بحرانی<sup>۱</sup> (حداقل آهنک سرد شدنی که از تشکیل پرلیت و بینیت جلوگیری شود) باشد، سختی حاصل عمدتاً بستگی به درصد کربن فولاد دارد. اگر آهنک سرد شدن کمتر از آهنک سرد شدن بحرانی باشد، درصد مارتنزیت حاصل کاهش یافته و بنابراین سختی فولاد نیز کاهش می یابد.

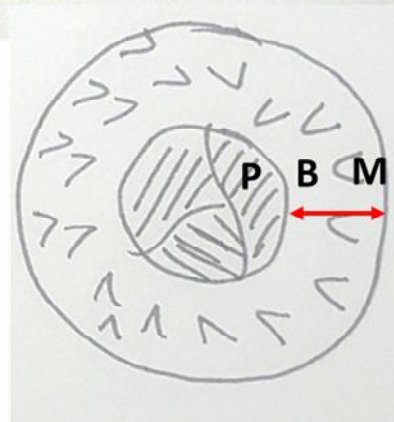
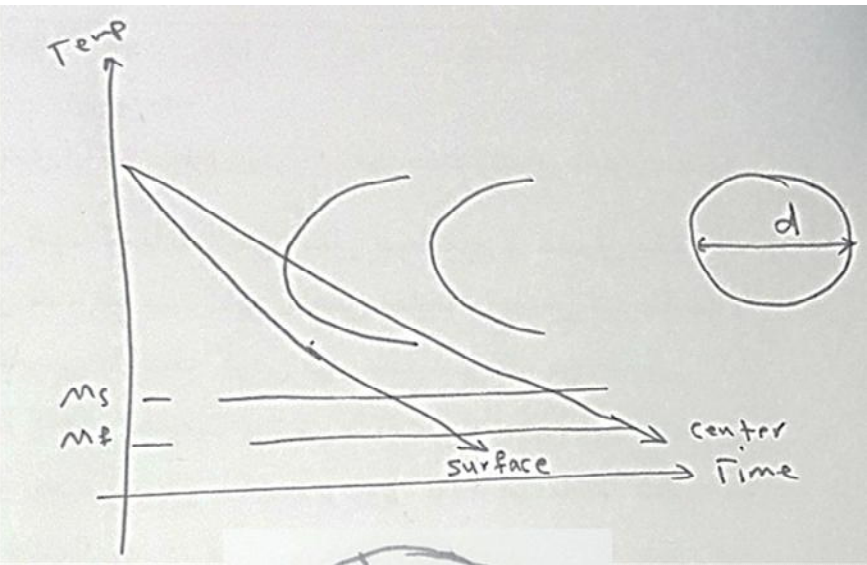
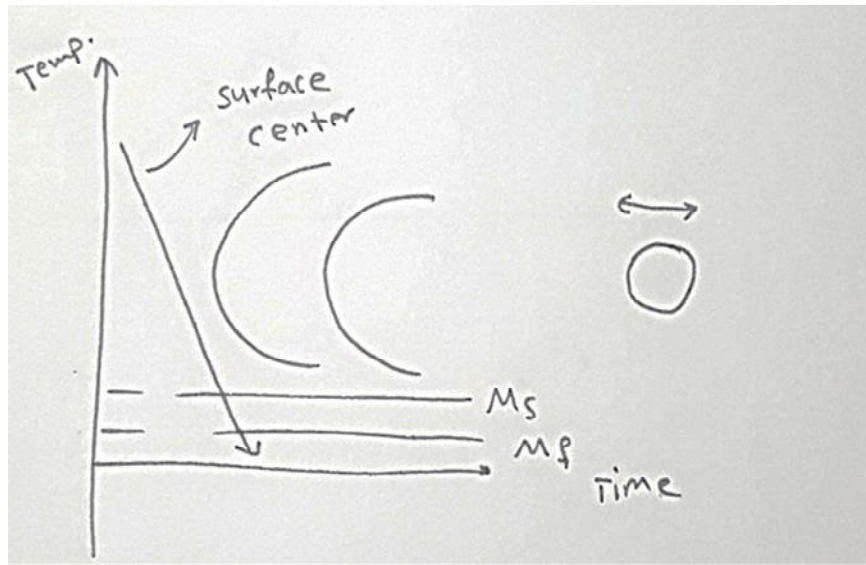




شکل ۶-۶ ارتباط بین سختی، درصد کربن و درصد مارتنزیت [۶].





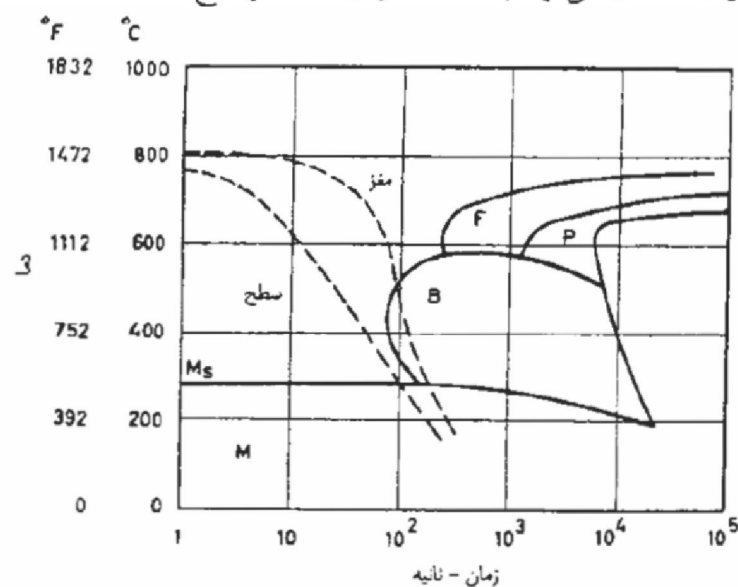


سختی پذیری عبارت از توانایی یا قابلیت تشکیل مارتنزیت (و سخت شدن فولاد) در اثر سریع سرد شدن از ناحیه آستنیت است. سختی پذیری توسط ضخامت پوسته سخت شده مشخص می شود. ضخامت پوسته سخت شده عبارت از فاصله سطح تا محلی در داخل نمونه که دارای ۵۰ درصد مارتنزیت باشد است. ۵۰ درصد بقیه ساختار را معمولاً بینیت در نظر می گیرند. بنابراین هر چه سختی پذیری یک فولاد بیشتر باشد ضخامت پوسته سخت شده و یا به عبارت دیگر ضخامت پوسته‌ای که در اثر سریع سرد شدن بیشتر از ۵۰ درصد ساختار آن مارتنزیت شود بیشتر خواهد بود.

### • سختی پذیری

- قابلیت تشکیل مارتنزیت در اثر سریع سرد شدن از ناحیه آستنیت.
- سختی پذیری توسط ضخامت پوسته سخت شده مشخص میشود.
- پوسته سخت شده عبارت است از فاصله ای از سطح تا محلی در داخل نمونه که دارای ۵۰٪ مارتنزیت باشد.
- سختی پذیری بیشتر ← ضخامت پوسته سخت شده بیشتر

سختی از سطح به طرف مرکز کاهش می‌یابد. دلیل اینکه چرا سطح یک فولاد سریع سرد شده سخت‌تر از مرکز آن است را می‌توان به کمک نمودار CCT توضیح داد.



شکل ۹-۶ شمایی از منحنیهای سرد شدن برای سطح و مغز نمونه‌ای به قطر ۹۵ میلی‌متر که پس از استتیت شدن، در روغن سریع سرد شده باشد. سطح کاملاً مارتنزیت شده، در حالی که مغز نمونه حاوی مقداری بینیت بالایی است [۶].

توزیع سختی در نمونه

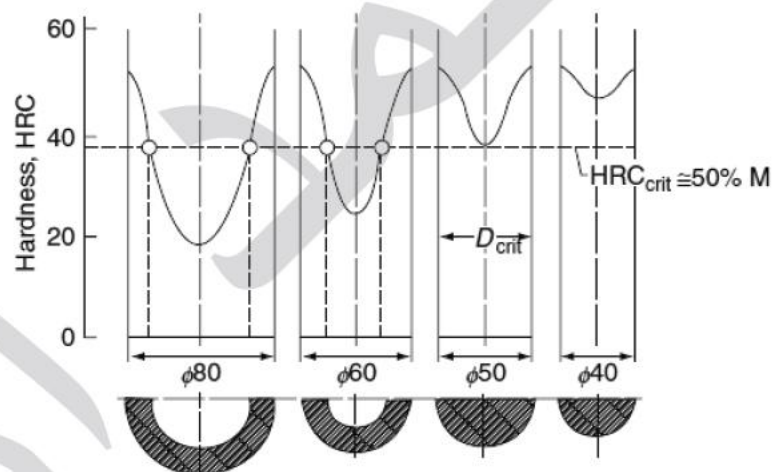
۱- ابعاد یا ضخامت قطعه

۲- محیط سرد شدن یا اهنگ سرد شدن

۳- عناصر آلیاژی

## توزیع سختی در یک قطعه

- حداکثر سختی در هر نمونه مربوط به سطح نمونه است.
- با افزایش ضخامت به دلیل کاهش آهنگ سرد شدن سختی در تمام نقاط کاهش میابد.



### ۳-۴-۶ آهنگ سرد شدن و پارامترهای مؤثر بر آن

بدون توجه به ابعاد و ترکیب شیمیایی، افزایش آهنگ سرد شدن باعث افزایش ضخامت لایه سخت شده می‌شود

آهنگ سرد شدن یک فولاد تحت تأثیر دو پارامتر مهم تغییر می‌کند: یکی انتقال حرارت از داخل به سطح نمونه فولادی و دیگری انتقال حرارت از سطح قطعه توسط محیط سردکننده.

از آنجایی که عملاً امکان کنترل خواص حرارتی در فولادها بسیار کم است مهمترین روش، کنترل آهنگ سرد شدن یک قطعه با انتخاب صحیح محیط سردکننده مناسب انجام می‌شود.



### شدت سردکنندگی محیط

تأثیر یک محیط سردکننده را توسط پارامتر انتقال حرارت معادل<sup>۲</sup> که مشخص کننده شدت یا قدرت سردکنندگی محیط است و توسط حرف "H" نشان داده می‌شود معین می‌کنند. مقدار H را می‌توان از معادله زیر به دست آورد:

$$H = \frac{F}{K}$$

که در این معادله F پارامتر انتقال حرارت<sup>۳</sup> با واحد  $\text{Btu/in.sec.}^\circ\text{F}$  و K هدایت حرارتی<sup>۴</sup> فولاد با واحد  $\text{Btu/in.sec.}^\circ\text{F}$  است. در عمل برای مشخص کردن شدت سردکنندگی محیطهای مختلف و همچنین مقایسه و بررسی اثرات آنها، شدت سردکنندگی آب را تحت شرایط مشخص و ثابتی برابر یک فرض کرده و شدت سردکنندگی محیطهای دیگر را نسبت به آن می‌سنجند.

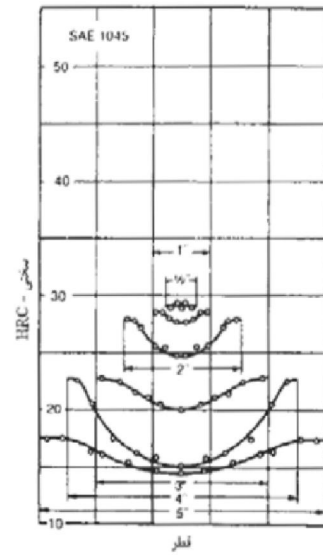
به طور کلی با افزایش مقدار "H" شدت سردکنندگی محیط نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۶-۲ اثر تلاطم بر روی شدت سردکنندگی (H) برای چند محیط مختلف [۱].

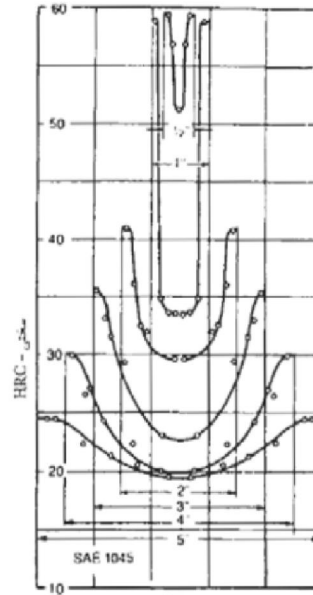
نوع محیط				شرایط محیط
آب نمک	آب	روغن	هوا	
۲	۰/۹-۱	۰/۲۵-۰/۳	۰/۰۲	هیچگونه حرکت نسبی بین قطعه و محیط وجود نداشته باشد
۲-۲/۲	۱-۱/۱	۰/۳-۰/۳۵	-	حرکت نسبی آرام بین قطعه و محیط وجود داشته باشد
-	۱/۲-۱/۳	۰/۳۵-۰/۴	-	حرکت نسبی متوسط بین قطعه و محیط وجود داشته باشد
-	۱/۴-۱/۵	۰/۴-۰/۵	-	تلاطم خوب در محیط
-	۱/۶-۲	۰/۵-۰/۸	۰/۰۵	تلاطم زیاد
۵	۴	۰/۸-۱/۱	-	تلاطم بسیار زیاد

پارامترهای دیگری که بر روی توزیع سختی در یک نمونه فولادی اثر دارد و از شکل‌های ۶-۷ و ۶-۸ نیز مشخص است، شدت سردکنندگی محیط است. از آنجایی که روغن نسبت به آب، محیط سردکننده ملایمتری است، آهنگ سرد شدن میله‌های مختلف در روغن به مراتب کمتر از آهنگ سرد شدن میله‌های مشابه در آب است. بنابراین، سختی نقاط مختلف نمونه‌هایی که در روغن سریع سرد می‌شوند، همواره کمتر از سختی نقاط مشابه در نمونه‌های مشابهی است که در آب سریع سرد شده باشند.

## توزیع سختی در یک قطعه



شکل ۸-۶ توزیع سختی در میله‌هایی با قطرهای متفاوت و از جنس فولاد SAE ۱۰۴۵ که در روغن سریع سرد شده باشند [۱]



شکل ۷-۶ توزیع سختی در میله‌هایی با قطرهای متفاوت و از جنس فولاد SAE ۱۰۴۵ که در آب سریع سرد شده باشند [۱]

تغییرات سختی از سطح به مرکز برای یک سری میله‌های فولادی به قطرهای مختلف و از جنس فولاد کربنی ساده SAE ۱۰۴۵ (با ترکیب شیمیایی  $0.17\% \text{Si}$  و  $0.14\% \text{S}$  و  $0.22\% \text{P}$  و  $0.6\% \text{Mn}$  و  $0.4\% \text{C}$ ) که به ترتیب در آب و روغن سریع سرد شده باشند نشان داده شده است.

از جمله پارامترهای دیگر که بر روی توزیع سختی در قطعات فولادی مؤثر است، عناصر آلیاژی و مقدار کمی آنها در فولادهاست.

نقش عناصر آلیاژی به تأخیر انداختن نفوذ و در نتیجه افزایش مدت زمان لازم برای تجزیه آستنیت به مخلوط فریت و سمنتیت و بنابراین فراهم کردن امکان تشکیل مارتنزیت در آهنگهای سرد شدن کمتر است. در واقع حضور این عناصر نمودار TTT را به سمت راست جابه‌جا می‌کند.

به طور کلی با حضور عناصر آلیاژی چون سختی پذیری بالا می‌رود امکان توزیع سختی کمتری دارد.

## عوامل موثر بر سختی پذیری

• به طور کلی هر عاملی که تشکیل پرلایت را به تعویق بیندازد باعث افزایش سختی پذیری خواهد شد.

- اندازه دانه آستنیت (افزایش)، سختی پذیری (افزایش)، سختی (کاهش)
- درصد کربن (افزایش)، سختی پذیری (افزایش)، سختی (افزایش)
- عناصر آلیاژی به شرط انحلال کامل در آستنیت (افزایش)، سختی پذیری (افزایش)، سختی (افزایش)
- آخالها و ذرات ناخالصی (افزایش)، سختی پذیری (کاهش)
- ناهمگن بودن ساختار آستنیت (افزایش)، سختی پذیری (کاهش)

### ۱- اندازه دانه‌های آستنیت

اثر اندازه دانه‌ها بر روی سختی پذیری با توجه به جوانه زنی ناهمگن پرلیت از مرز دانه‌های آستنیت توضیح داده می‌شود. در حالی که آهنگ رشد پرلیت مستقل از اندازه دانه‌های آستنیت است، تعداد جوانه‌هایی که در واحد زمان (ثانیه) تشکیل می‌شود مستقیماً با محل‌های مناسب برای تشکیل آنها (مرز دانه‌ها) متناسب است. از آنجایی که با ریز شدن دانه‌ها کل سطوح مربوط به مرز دانه‌ها افزایش می‌یابد، در یک فولاد با دانه‌های ریز تشکیل پرلیت به مراتب سریعتر از یک فولاد با دانه‌های درشت است. در نتیجه سختی پذیری فولاد با دانه‌های ریز کمتر از سختی‌پذیری فولاد با دانه‌های درشت خواهد بود. لیکن، استفاده از فولاد با دانه‌های درشت به منظور افزایش سختی‌پذیری عملاً کاربرد صنعتی ندارد، زیرا افزایش سختی‌پذیری از این روش با تغییرات ناخواسته و زیان آور در خواص فولاد نظیر افزایش تردی و کاهش انعطاف پذیری همراه است. از جمله معایب دیگر که بیشتر در فولادهای دانه درشت به وجود می‌آید عبارت است از: ترکهای ناشی از سریع سرد کردن<sup>۱</sup> یا ترکهای ناشی از شوکهای حرارتی<sup>۲</sup> که در اثر تنشهای حاصل از عملیات حرارتی به وجود می‌آیند.

## ۲- درصد کربن

سختی پذیری یک فولاد شدیداً تحت تأثیر درصد کربن آن تغییر می‌کند. بدین صورت که اگر کربن به صورت محلول در آستنیت باشد، افزایش آن باعث افزایش سختی پذیری می‌شود. دلیل این امر را می‌توان در این حقیقت جستجو کرد که با افزایش درصد کربن تشکیل پرلیت و فاز پرویوتکتوئید مشکلتر شده و در نتیجه نمودار CCT به سمت راست جابه‌جا می‌شود.



### ۳- عناصر آلیاژی

مشخص شده است که عناصری که میل ترکیبی آنها با کربن بیشتر از تمایل آنها به حل شدن در فریت باشد در صورتی بیشترین اثر را بر روی سختی پذیری دارند که قبل از سریع سرد شدن فولاد، در آستنیت کاملاً حل شده باشند. یک عنصر کاربیدساز که در آستنیت حل نشده باشد به صورت ذرات کاربید در ساختار ظاهر می شود و مانع از رشد دانه های آستنیت شده و در نتیجه سختی پذیری را کاهش خواهد داد. کاربیدهای حل نشده، درصد کربن و عناصر آلیاژی محلول در آستنیت را نیز کاهش می دهند.

#### ۴- آخال - ناخالصیهای نافلزی<sup>۱</sup>

آخال یا ناخالصیهای نافلزی به صورت ذرات بسیار ریز در میکروساختار فولاد توزیع شده و از رشد دانه‌های آستنیت جلوگیری می‌کنند. علاوه بر آن، این ذرات به عنوان محل‌های تشکیل پرلیت عمل می‌کنند و بنابراین جوانه‌زنی پرلیت از آستنیت را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند. به این ترتیب، آخال سختی پذیری را کاهش خواهند داد.

آزمونهای تعیین سختی پذیری

۱- آزمون گراسمن

۲- آزمون جامینی

## ۱- آزمون گراسمن

در یک ترکیب شیمیایی ثابت، کره هایی با قطرهای متفاوت از کوچک تا بزرگ تحت عملیات آب دادن قرار می گرفت سپس مقطع زنی و ریزساختار یا سختی در امتداد قطر انجام می شد. لذا هر کره ای که تا مرکز سخت می شد بعنوان سختی پذیری (ضخامت) یا قطر ایده ال در محیط آب معرفی می شد. در این آزمون تعداد نمونه های زیادی برای هر درصد کربن مورد نیاز بود.

قطر ایده ال: قطری که تماما ساختار مارتنزیتی دارد.  
محیط ایده ال: محیطی که H بی نهایت دارد پس با هر قطری تماما ساختار مارتنزیتی می شود.

## تست جامینی Jominy Test

متداول ترین روشی است که برای تعیین سختی پذیری در فولاد استفاده می شود. در این

تست، میزان عمقی از نمونه فولادی که در اثر سرمایش سریع با پاشش آب از دمای

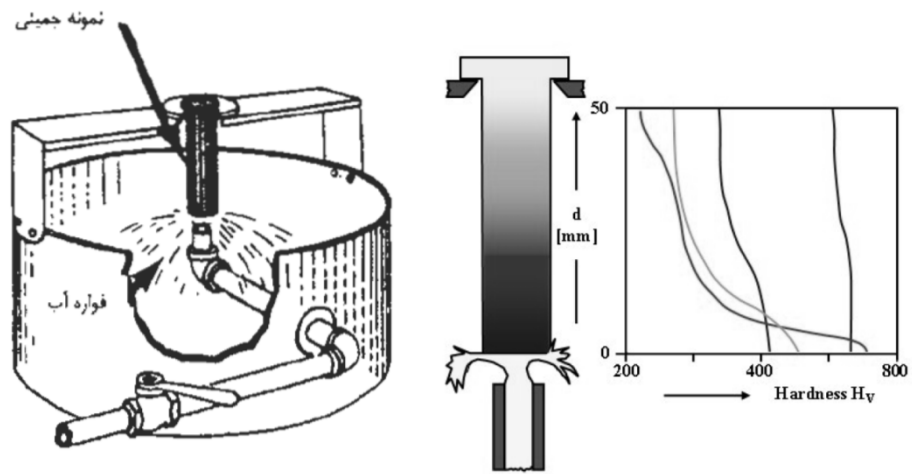
آستنیته کردن سخت می شود، اندازه گیری می شود.

## آزمایش جامینی<sup>۱</sup> برای تعیین سختی پذیری

برای این منظور از یک نمونه استوانه‌ای به قطر ۲۵ میلیمتر (۱ اینچ) و طول ۱۰۰ میلیمتر (۴ اینچ) و مطابق شکل ۶-۲۳ استفاده می‌شود. از آنجایی که ساختار اولیه فولاد اثر قابل توجهی بر روی سختی پذیری آن دارد بهتر است نمونه‌ها قبل از آزمایش نرماله شوند.

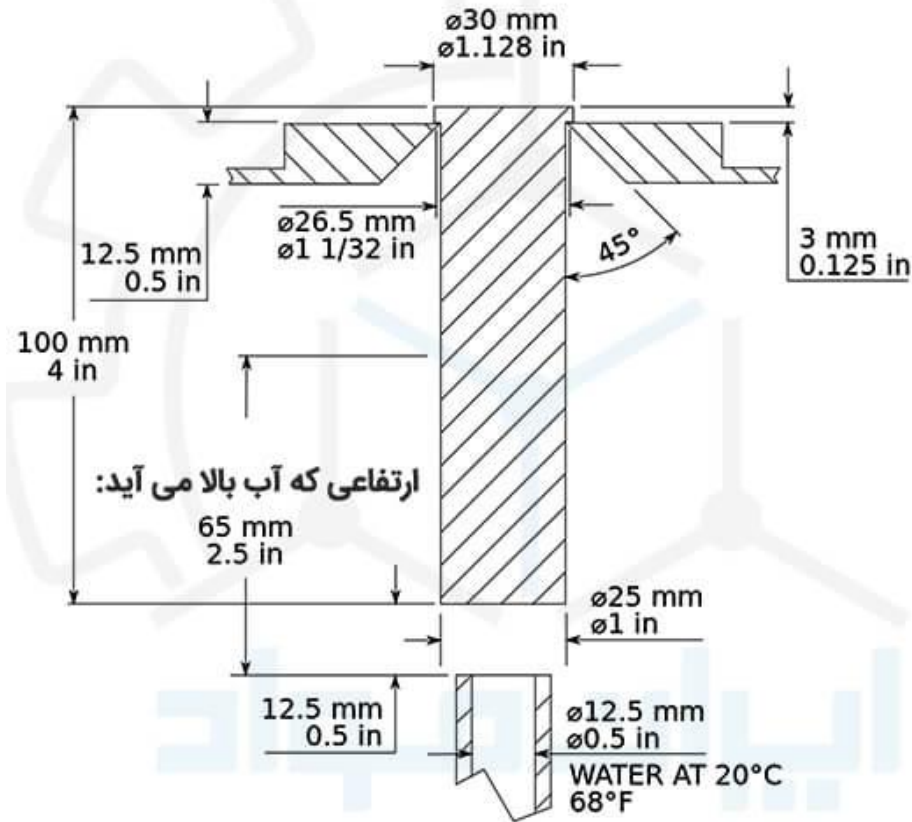
در این روش نمونه مورد نظر را تا دمای سخت کردن فولاد حرارت داده و

به مدت تقریباً ۲۰ دقیقه در آن دما نگه می‌دارند. پس از آن به کمک یک فواره آب با فشار و دبی مشخص، نمونه را از یک انتها توسط آب ۲۵ درجه سانتیگراد سرد می‌کنند. فاصله فواره از انتهای نمونه در حدود ۱۲/۵ میلیمتر (۰/۵ اینچ) است (شکل‌های ۶-۲۳ و ۶-۲۴). تحت این شرایط، آهنگ سرد شدن نقاط مختلف نمونه از انتهای سریع سرد شده (آب پاشیده شده) به سمت دیگر کاهش می‌یابد.



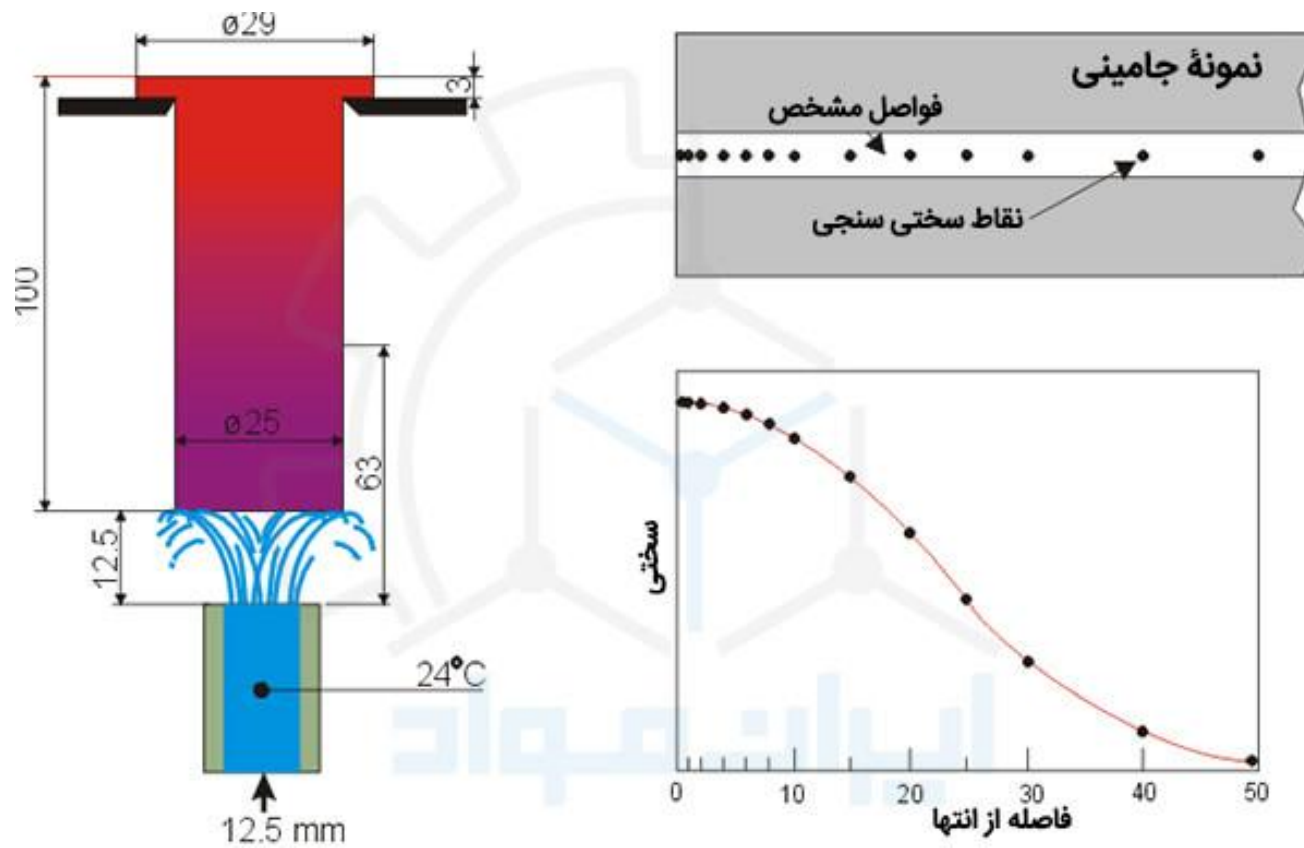
شکل ۶-۲۴ شمایی از نمونه جامینی در دستگاه جامینی در حال سرد شدن

## ابعاد استاندارد نمونه تست جامینی

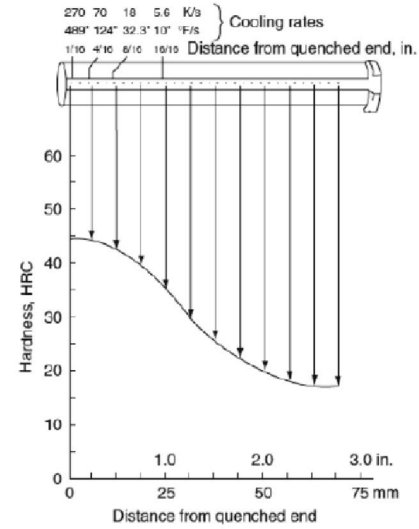
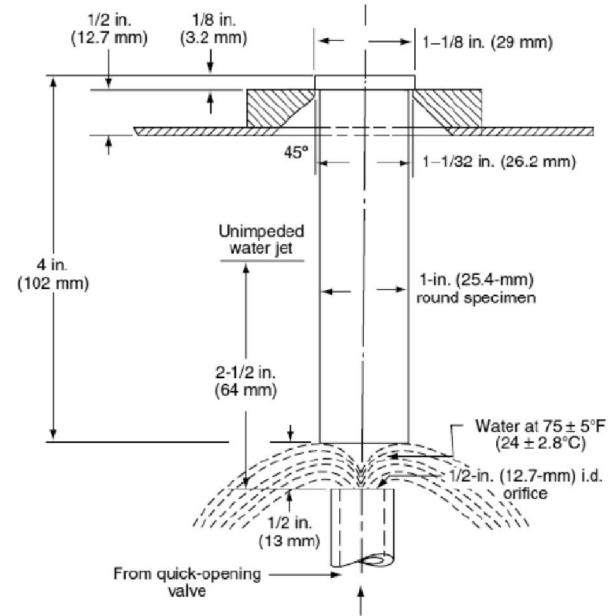








• آزمایش جامینی



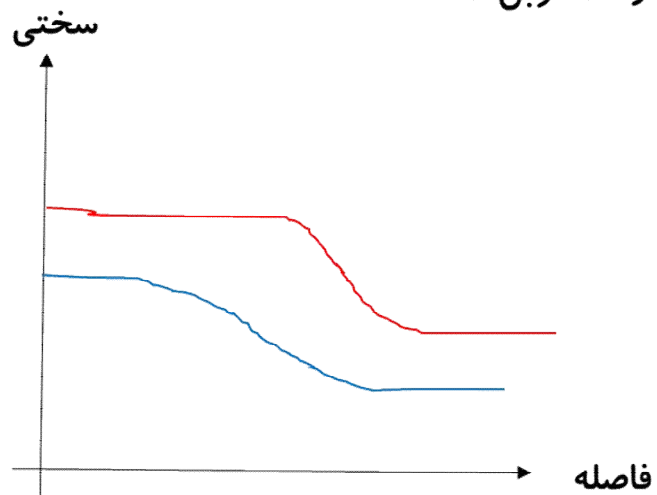
## کاربرد نتایج حاصل از آزمایش جامینی

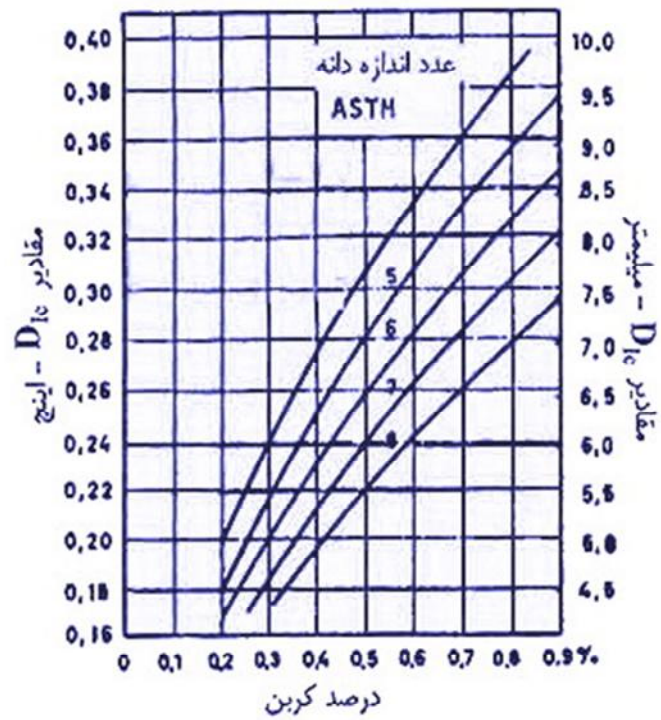
یکی از کاربردهای مهم نمودار جامینی عبارت از مقایسهٔ سختی پذیری فولادهای تهیه شده از ذوبهای مختلفی است که برای تولید یک نوع فولاد با مارگ مشخص استفاده می‌شوند. بنابراین، ملاحظه می‌شود که آزمایش جامینی می‌تواند به عنوان معیاری برای کنترل کیفی به کار رود.

همچنین از منحنیهای جامینی می‌توان برای پیش‌بینی و تخمین توزیع سختی در قطعات فولادی با ابعاد مختلف هنگامی که در محیطهای متفاوت سریع سرد شوند استفاده کرد.

مثال

یک فولاد با درصد کربن ۰.۲ و ۰.۴ وجود دارد. تست جامینی برای هر دو انجام شده است و نتایج را مشاهده کنید. مشخص کنید کدام نمودار برای نمونه با درصد کربن ۰.۲ است.





شبهه سازی آزمایش جامینی و پیش بینی سختی بوسیله نرم افزار فلوئنت

نکته عملی در حین مارتنزیت کردن

تلاطم قطعه در محیط باید صورت گیرد چون در صورت ساکن بودن یک لایه بخار آب روی سطح ایجاد می شود که میزان انتقال حرارت را به شدت کم می کند.

# فصل هفتم

Tempering بازپخت



به علت تنشهای داخلی ایجاد شده در ضمن سریع سرد شدن، تقریباً تمامی قطعات سخت شده نسبتاً ترد و شکننده‌اند. از این رو، به ندرت فولادها پس از سریع سرد شدن و در شرایط سخت (مارتنزیت) شده استفاده می‌شوند، مگر در موارد استثنایی نظیر هنگامی که به سختی فوق‌العاده زیادی نیاز باشد و یا در رابطه با فولادهای کم‌کربن. معمولاً فولاد پس از سرد شدن و قبل از استفاده باید بازپخت شود.

بازپخت عبارت است از حرارت دادن فولاد سخت شده تا دمایی زیر

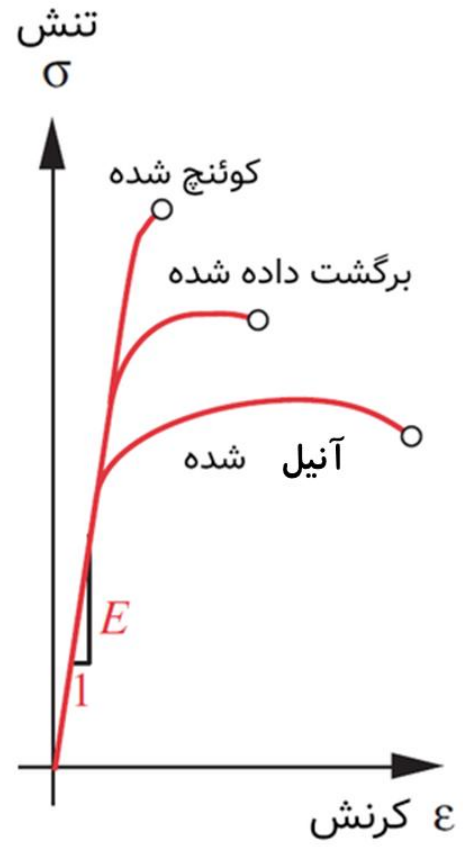
دمای  $Ae_1$ ، نگه داشتن برای مدت زمان مشخص و سپس سرد کردن آهسته تا دمای اتاق. دما و زمان حرارت دادن به ترکیب شیمیایی فولاد، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر بستگی دارد. در اثر بازپخت تنشهای داخلی کاهش یافته و یا حذف می‌شوند و بنابراین استحکام ضربه‌ای افزایش می‌یابد (شکنندگی کم می‌شود). در عوض سختی و استحکام قطعه سخت شده تا حدودی کاهش خواهد یافت.

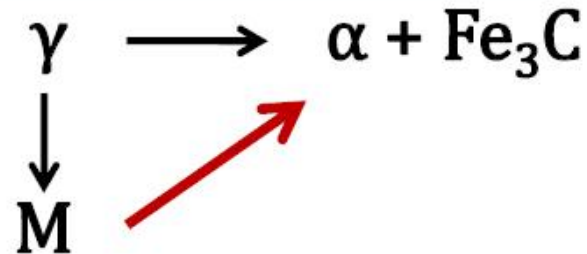
## تغییرات خواص مکانیکی

مارتنزیت که میکروساختار مورد نظر در عملیات سرد کردن سریع فولادهاست، کاملاً سخت و در عین حال بسیار ترد و شکننده است. برخی از پارامترها که منجر به ترد و شکننده شدن مارتنزیت می‌شوند عبارت‌اند از: خارج شدن شبکه بلوری فولاد از شکل طبیعی خود در اثر محبوس شدن کربن اضافی در فضاهای هشت‌وجهی (به شکل ۶-۴ مراجعه شود)، رسوب اتمهای ناخالصی در مرز دانه‌های آستنیت اولیه، تشکیل کاربید در ضمن سرد شدن و بالاخره تنشهای حاصل از سریع سرد شدن.

هدف اصلی از عملیات حرارتی بازپخت کاهش تردی و

شکنندگی و یا به بیان دیگر افزایش چقرمگی و مقاومت فولاد در برابر ضربه است.





- ساختار مارتنزیتی به دلایل زیر یک ساختار ناپایدار است:
  - کربن فوق اشباع
  - افزایش انرژی ناشی از مرز مشترک صفحات مارتنزیتی
  - افزایش انرژی داخلی حاصل از تغییر شکل پلاستیک
  - آستنیت باقی مانده
- هریک از عوامل فوق نیرو محرکه ای برای تغییر ریزساختار در حین بازپخت است.

بررسیهای سیستماتیک که به کمک پراش پرتوی ایکس<sup>۱</sup> بر روی میکروساختار فولادهای سریع سرد و بازپخت شده انجام شده است، سه مرحله کاملاً مشخص و مجزا از یکدیگر را در رابطه با تغییر میکروساختار مارتنزیت در ضمن بازپخت نشان می دهد. این سه مرحله عبارت اند از:

مارتنزیت پرکربن می دهد مارتنزیت کم کربن و  
کاربیدهای انتقالی

**مرحله اول:** تشکیل کاربیدهای انتقالی نظیر کاربید اپسیلین<sup>ε</sup> (ε) و یا کاربید اتا<sup>η</sup> (η) و در نتیجه کاهش درصد کربن زمینه مارتنزیتی تا حدود ۰/۲۵ درصد.

**مرحله دوم:** تبدیل آستنیت باقیمانده به فریت و سمنتیت.

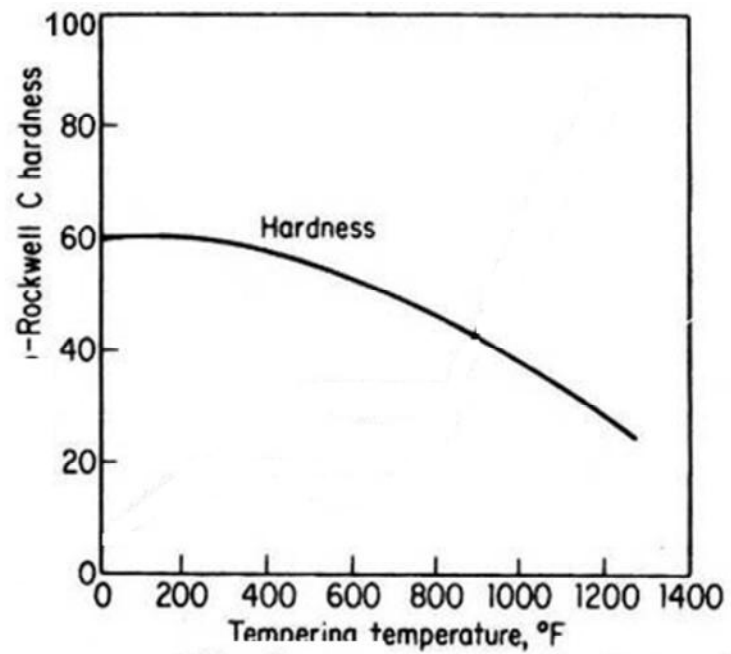
**مرحله سوم:** جایگزین شدن کاربیدهای انتقالی و مارتنزیت کم کربن توسط فریت و سمنتیت.

بستگی به زمان بازپخت، ممکن است گستره‌های دمایی مراحل فوق در بعضی از قسمت‌ها بر روی یکدیگر قرار بگیرند ولی به طور کلی گستره‌های دمایی ۱۰۰-۲۵۰ درجه سانتیگراد (۲۱۲-۴۸۲ درجه فارنهایت)، ۲۰۰-۳۰۰ درجه سانتیگراد (۳۹۲-۵۷۲ درجه فارنهایت) و ۲۵۰-۳۵۰ درجه سانتیگراد (۴۸۲-۶۶۲ درجه فارنهایت) به ترتیب برای مراحل اول، دوم و سوم شروع مرحله سوم گزارش شده است.

درصد کربن در هر دو نوع کاربید اپسیلین (با فرمول  $Fe_7C$ ) و اتا (با فرمول  $Fe_9C$ ) از درصد کربن سمنتیت (با فرمول  $Fe_3C$ ) که در دماهای بالاتر تشکیل می‌شود به مراتب بیشتر است.

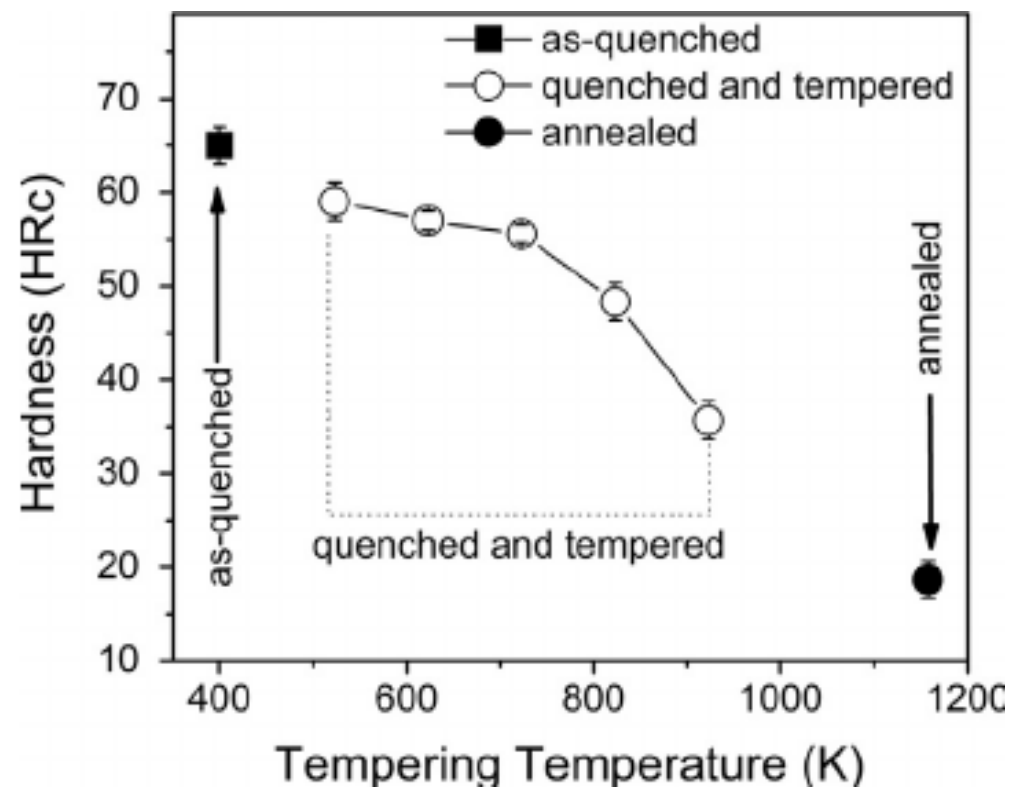
کاربیدهای انتقالی به صورت ذرات بسیار ریز در ساختار مارتنزیت و در تمامی نقاط آن نظیر داخل صفحات مارتنزیتی و در فصل مشترکهای آنها تشکیل می‌شود.

مرحله سوم بازپخت شامل تشکیل مخلوط فریت و سمنتیت براساس نمودار تعادلی آهن - کربن است. شواهدی در دست است که قبل از تشکیل سمنتیت (مخصوصاً در فولادهای پرکربن) کاربید کای<sup>۱</sup> با شبکه بلوری منوکلینیک<sup>۲</sup> و فرمول  $Fe_3C_7$  به وجود می آید. گرچه بین سمنتیت و کاربید کای تفاوتی وجود دارد، لیکن شبکه‌های بلوری و موقعیت اتمها در دو نوع کاربید آنقدر به یکدیگر شبیه‌اند که تشخیص آنها از یکدیگر به کمک پرتوی ایکس و یا روشهای مشابه به سادگی امکانپذیر نیست.



Hardness of steel after tempering  
steel after tempering 1 hour)



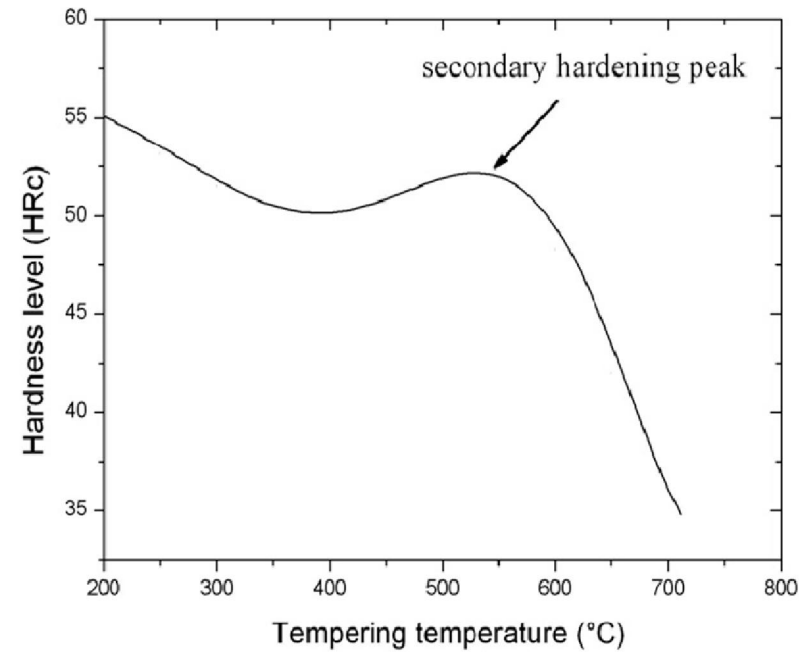
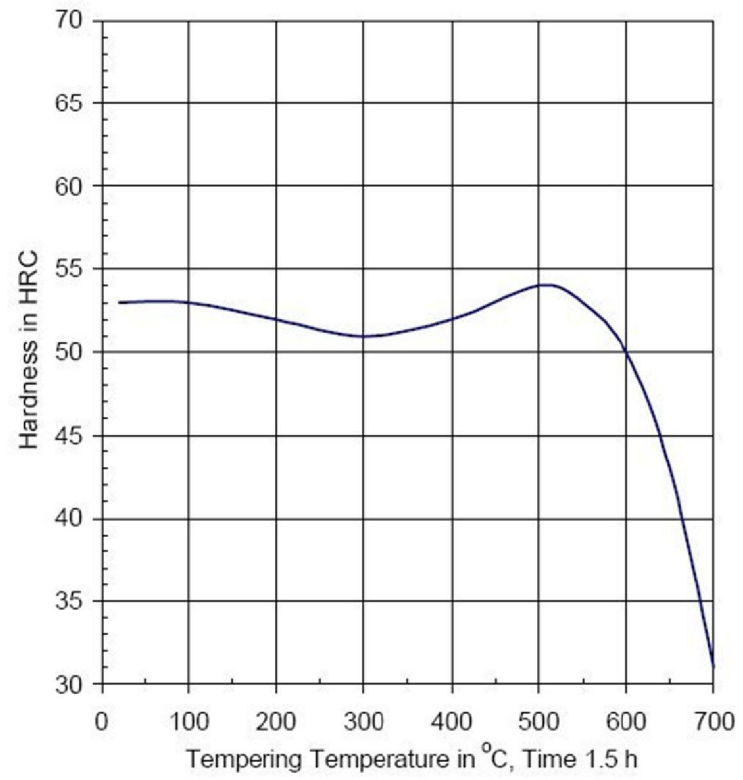


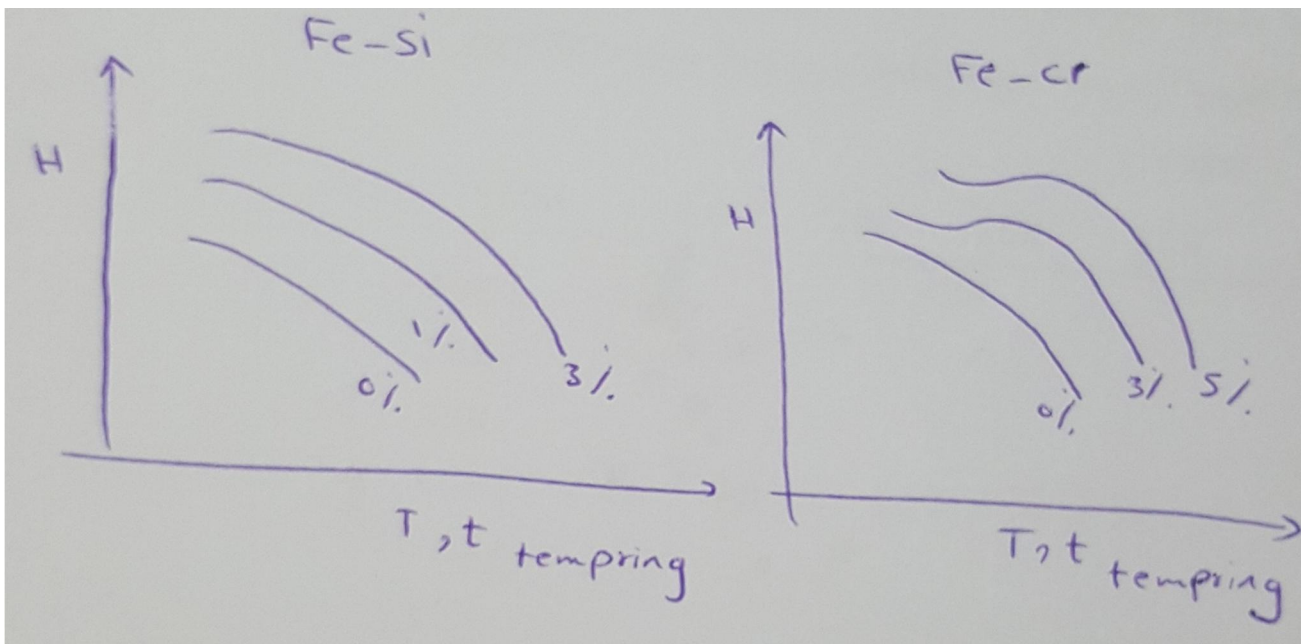
در اینجا تذکر این نکته ضروری است که بجز موارد اشاره

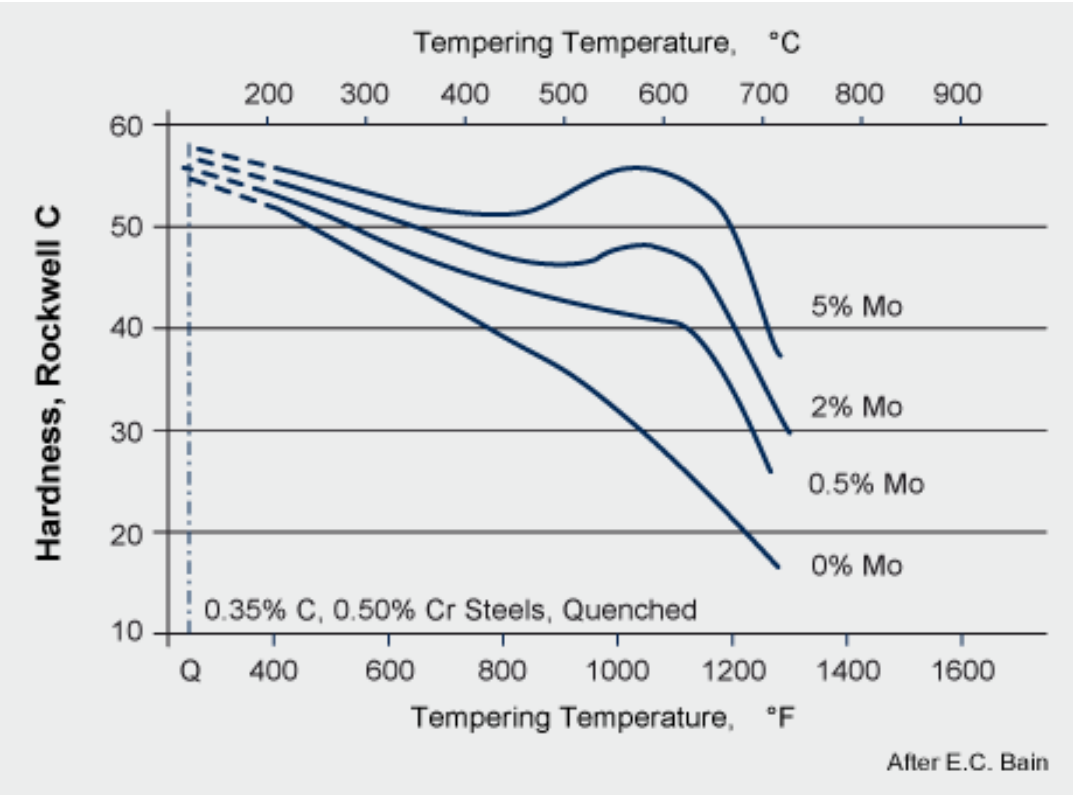
شده در مراحل سه گانه فوق تغییرات ساختاری دیگری نیز در ضمن بازپخت فولادهای سریع سرد شده گزارش شده است. از آن جمله تشکیل کاربیدهای آلیاژی و ایجاد سختی ثانویه است، که می توان آن را مرحله چهارم بازپخت نامید.

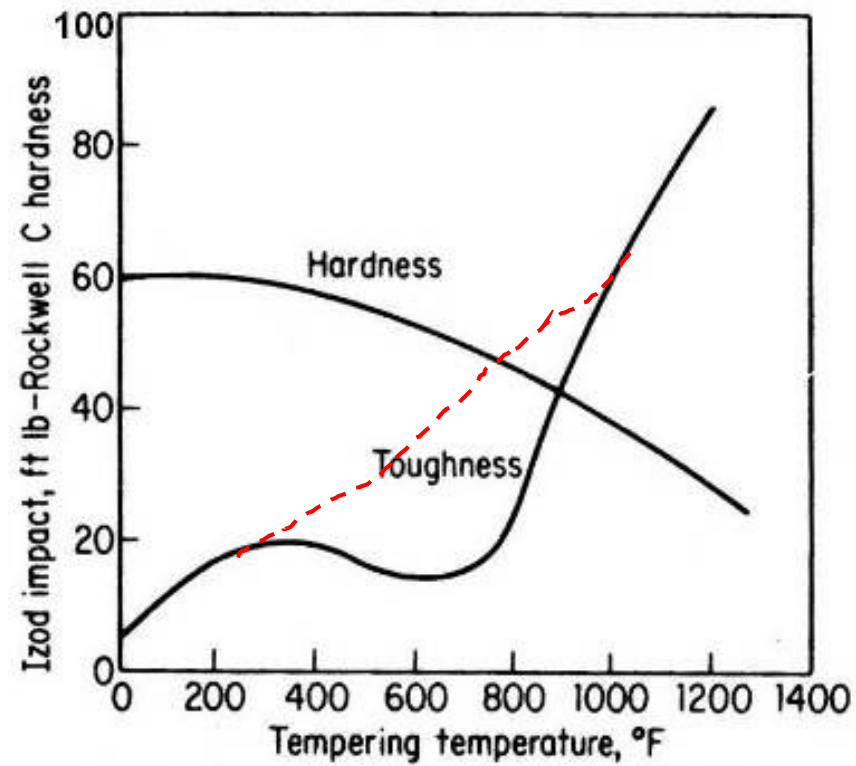
اگر فولادهای الیازی با ساختار مارتنزیتی که دارای عناصر الیازی کاربیدساز نظیر وانادیم، مولیبدن، تنگستن، کرم و یا تیتانیم به صورت محلول باشند، در گستره دمایی تشکیل کاربیدهای الیازی (۵۰۰-۶۵۰ درجه سانتیگراد) بازپخت شوند، کاهش سختی در آنها نسبت به فولاد کربنی ساده به تعویق افتاده و یا حتی سختی آنها افزایش می یابد. به تعویق افتادن کاهش سختی و یا افزایش سختی در فولادهای الیازی یاد شده که به سختی ثانویه موسوم است مستقیماً ناشی از

تشکیل کاربیدهای الیازی در گستره دمایی یاد شده است.





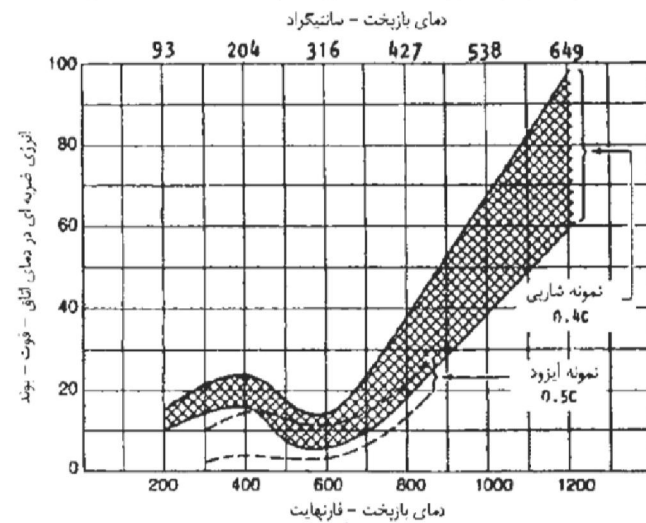




Hardness and toughness of steel after tempering  
(4140 steel after tempering 1 hour)

از آنجایی که

در عملیات بازپخت هر دمایی در گستره دمای اتاق تا دمای  $Ac_1$  را می توان استفاده کرد، بنابراین میکروساختار و در نتیجه خواص مکانیکی کاملاً متنوعی از مارتنزیت تا سمنتیت کروی در زمینه فریت را می توان به دست آورد. عملاً دما و زمان بازپخت با توجه به خواص مکانیکی یعنی میزان سختی، استحکام و چقرمگی که در عمل لازم است انتخاب می شود.



16

شکل ۸-۱۱ اثر دمای بازپخت بر روی انرژی ضربه‌ای فولادهای کم‌الیاز با کربن متوسط



• تردی مارتنزیت بازپخت شده Tempered Martensite Embrittlement

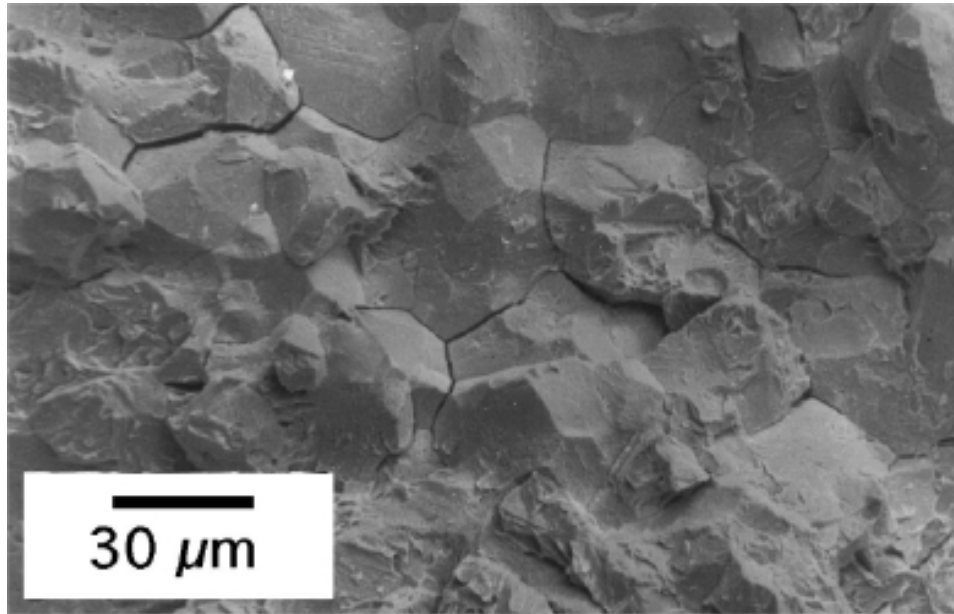
- تردی ۳۵۰ درجه سانتیگراد
- در فولادهای کربنی ساده و کم آلیاژ دیده میشود اگر در بازه دمایی ۲۶۰-۳۵۰ درجه سانتیگراد بازپخت شوند.
- تجزیه آستنیت باقیمانده به فریت و سمانتیت، تجمع رسوبات فسفر
- برای حذف تردی کافی است باز پخت در دمایی بالاتر از ۳۵۰ انجام شود.
- حرارت دهی مجدد در بازه دمایی ۲۶۰-۳۵۰ موجب تردی مجدد نخواهد شد. (تردی برگشت ناپذیر)

## Irreversible Temper Embrittlement

Tempering at temperatures around promotes the segregation of impurity elements such as phosphorous to the prior austenite grain boundaries, leading to intergranular failure along these boundaries. The irreversibility arises because the impurity atmospheres at the grain boundaries can be evaporated by increasing the tempering temperature. Quenching from the higher temperature avoids the re-segregation of impurities during cooling, thus eliminating embrittlement.

## Tempered Martensite Embrittlement

- ❑ Occurs after tempering between 260 to 370°C(500-700°F) and is also referred to as 350°C embrittlement or 500°F embrittlement.
- ❑ Also called as 'irreversible embrittlement' and 'one-step embrittlement' because it does not occur again on tempering in this region.
- ❑ There are two important structural features in TME.
  - segregation of minor elements, mostly P to prior austenite grain boundaries.
  - decomposition of retained austenite into carbide upon tempering
  
- ❑ P weakens the adhesion at the austenite grain boundaries.
- ❑ The subsequent formation of cementite at the original austenite grain boundaries, may increase the segregation of impurity atoms as they are rejected from the growing cementite particles.
- ❑ Thus, cracking of cementite initiates inter-granular fracture.



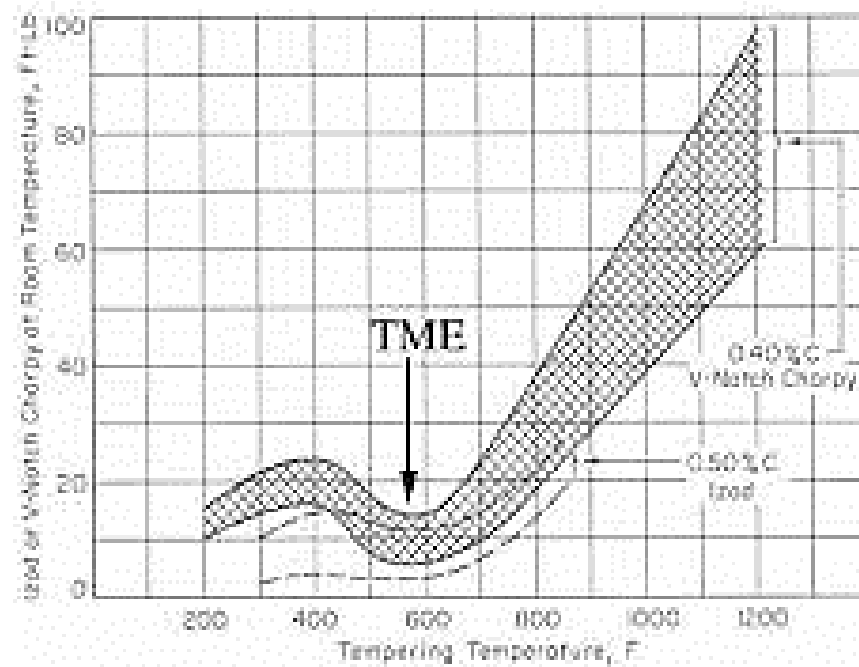


Figure 10.4 Notched impact energy versus tempering temperature for steels of 0.4 and 0.5 %C [10.2].

### • تردی بازپختی Temper Embrittlement (TE)

- در فولادهای آلیاژی با وارد شدن فولاد سخت شده در گستره دمایی ۳۷۵ - ۵۷۵ درجه سانتیگراد مشاهده میشود.
- تجمع ناخالصیهایی مانند فسفر، قلع، آرسنیک و آنتیموان در مرز دانه ها
- برای حذف تردی باید بازپخت در دماهای بالای ۵۷۵ درجه سانتیگراد انجام شده و قطعه به سرعت سرد شود.
- حرارت دهی مجدد در گستره دمایی ۳۷۵-۵۷۵ موجب تردی مجدد خواهد شد. (تردی برگشت پذیر)

## Temper Embrittlement

- Occurs when alloy steels are tempered in the range of 450°C to 600°C
- Also called reversible embrittlement, as de-embrittlement may occur on heating to about 575°C after holding only a few minutes in atmosphere.
- It decreases toughness and increases ductile brittle transition temperature.
- Small amounts (~100ppm or less) of Pb, P, Sn and As have been shown to cause TE.
- Plain carbon steels are not considered to be susceptible to TE, provided the Mn content is below 0.5%.
- Mo in 0.5% or in less added to steel to minimize TE.

Both of the impurity-controlled embrittlement phenomena can be minimised by adding about 0.5 wt% molybdenum to the steel. The Mo associates with phosphorus atoms in the lattice thereby reducing mobility and hence the extent to which they segregate to boundaries. Larger concentrations of molybdenum are not useful because precipitation occurs.



دمای مناسب برای بازپخت فولادهای کربنی ساده و کم آلیاژ را می توان با توجه به ترکیب شیمیایی آنها و سختی نهایی مورد نظر به طور تقریب مشخص کرد. این روش بر اساس فرمول ارائه شده توسط گرون<sup>۲</sup> و جف<sup>۳</sup> است که فرض می کند فولاد پس از سریع سرد شدن عمدتاً ساختار مارتنزیتی داشته باشد. فرمول ارائه شده به صورت زیر است:

$$T = 30(H_c - H_a)$$

در این فرمول:

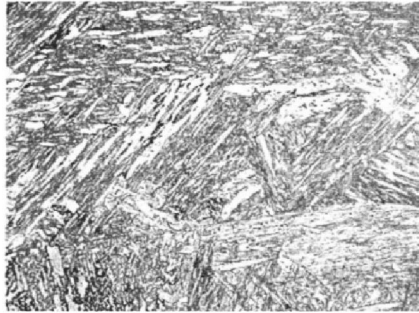
T: دمای بازپخت برحسب فارنهایت

H<sub>c</sub>: سختی محاسبه شده از ترکیب شیمیایی

H<sub>a</sub>: سختی مورد نظر پس از بازپخت است.

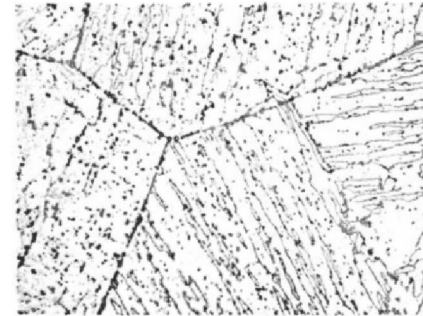
اگر دمای بازپخت به سانتیگراد تبدیل شود فرمول فوق به صورت زیر درمی آید.

$$T = \frac{16.67(H_c - H_a) - 17.8}{1.8}$$



شکل ۸-۷ میکروساختار مارتنزیت لایه‌ای در آلیاژ  $Fe-1\%C$  بعد از بازپخت به مدت ۱۵ دقیقه در  $400^\circ C$  سانتیگراد (درجه فارنهایت). میکروساختار نوری. محلول حکاکی نایتال. بزرگنمایی  $\times 500$  [۱].

در گستره تشخیص میکروسکوپ نوری تغییرات حاصل در ظاهر ساختار این فولاد هنگامی که پس از مارتنزیت شدن به مدت ۱۵ دقیقه در دمای  $400^\circ C$  سانتیگراد بازپخت شده باشد، بسیار جزیی است



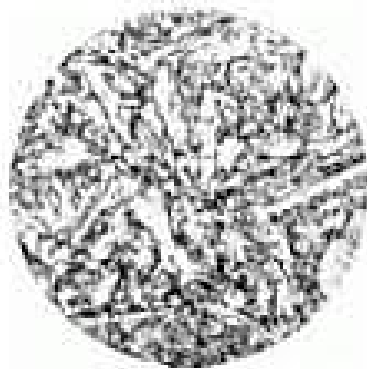
شکل ۸-۸ میکروساختار مارتنزیت لایه‌ای در آلیاژ  $Fe-1\%C$  بعد از بازپخت به مدت ۲ ساعت در  $700^\circ C$  سانتیگراد ( $1292^\circ F$  درجه فارنهایت) میکروساختار نوری. محلول حکاکی نایتال. بزرگنمایی  $\times 1000$  [۱].

تغییرات بسیار برجسته و مشخصتر در میکروساختار نمونه‌هایی که به مدت ۲ ساعت در  $700^\circ C$  سانتیگراد بازپخت شده‌اند ملاحظه می‌شود

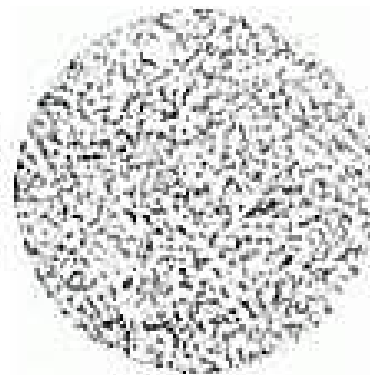
شکل ۸-۸ نشان می‌دهد که حتی پس از بازپخت نسبتاً زیاد، شکل اولیه پسته‌های مارتنزیت و واحدهای منفرد موازی در آنها هنوز به طور کامل مشخص است.



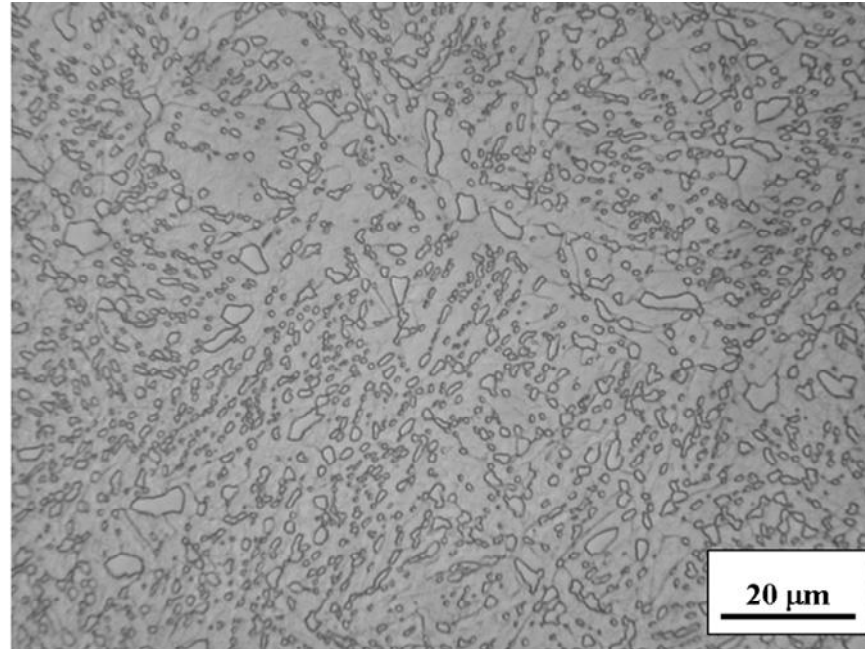
**Martensite**



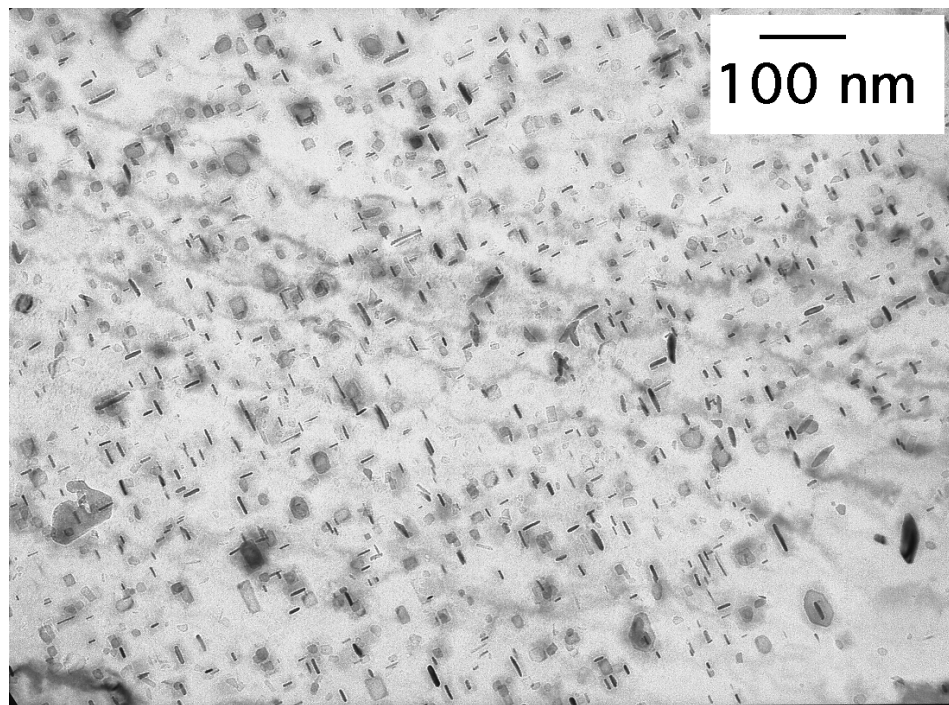
**Tempered Martensite**



**Heavily Tempered**



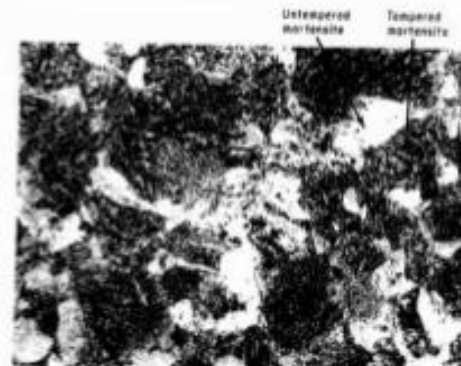
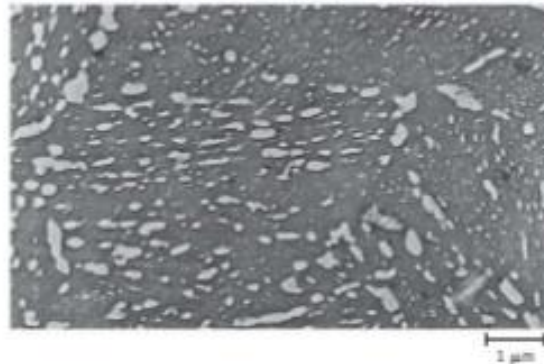
Fe-0.98C-1.46Si-1.89Mn-0.26Mo-1.26Cr-0.09V wt% tempered at 730oC for 21 days (photograph courtesy of Carlos Garcia Mateo). The optical micrograph shows some very large spheroidised cementite particles. The ferrite has completely recrystallised into equiaxed grains.



# Tempered Martensite

- Martensite → **very hard + brittle + internal stresses** → cannot be used in most applications
- Ductility + toughness + stress relieving → **Tempering**
- Temp between **250°C and 450°C** → Tempered Martensite
- Microstructure → extremely fine-grained, well dispersed cementite grains in ferrite matrix

martensite (BCT, single phase) → tempered martensite ( $\alpha$  + Fe<sub>3</sub>C phases)



## فصل هشتم

سایر روشهای عملیات حرارتی

### روشهای سرد کردن کنترل شده

روش سرد کردن که به منظور سخت کردن یک فولاد استفاده می‌شود به نوع فولاد، شکل قطعه، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر پس از عملیات حرارتی بستگی دارد. به طور کلی سه روش سرد کردن برای سخت کردن فولادها وجود دارد که عبارت‌اند از

(۱) سریع سرد کردن مستقیم،

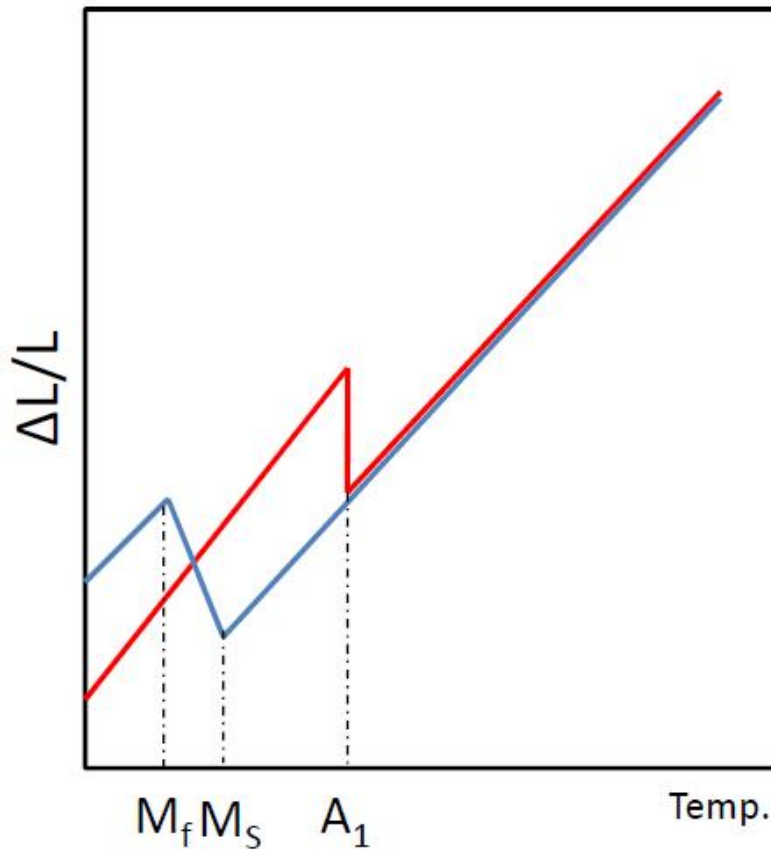
(۲) مارتمپرینگ<sup>۱</sup>

(۳) آستمپرینگ<sup>۲</sup>

همان‌گونه که در بخشهای پیش به طور مفصل بحث شد، در روش اول که مستلزم سریع سرد شدن فولاد از دمای آستنیت به دمای زیر  $M_f$  است (شکل ۹-۱۲)، سطح و مرکز قطعه با آهنگهای متفاوت سرد شده و بنابراین تشکیل مارتنزیت به طور همزمان در نواحی فوق انجام نمی‌شود.

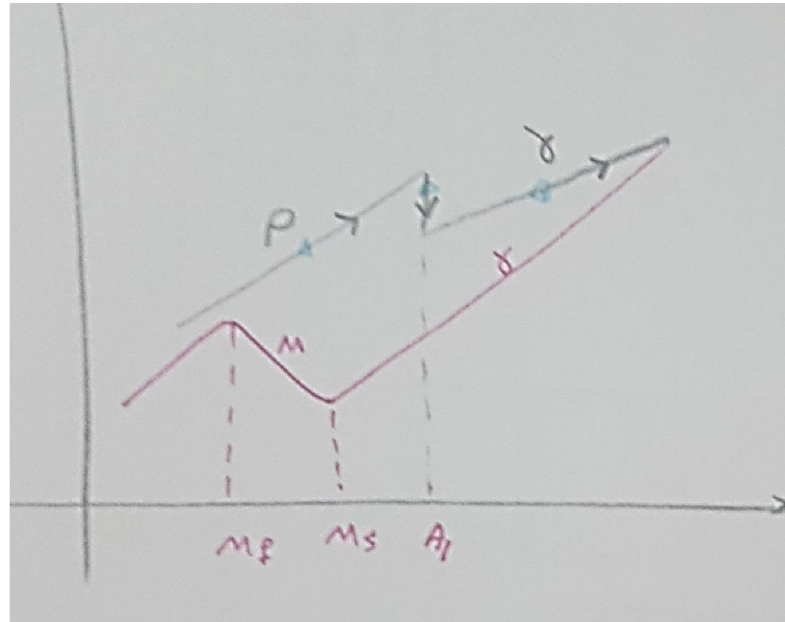


- انبساط و انقباض حین گرم کردن و سرد کردن (کوئنچ) میتواند منجر به ایجاد ترک، تنشهای باقیمانده، اعوجاج و یا تغییر شکل در قطعه شود.
- ضخامت قطعه، سرعت گرم کردن و سرد کردن، ترکیب شیمیایی و سختی پذیری از جمله عوامل موثر هستند.



- انبساط یا انقباض حرارتی
- انبساط یا انقباض استحاله ای

- یکی از راههای کاهش تنشهای ناشی از انبساط در قطعات، پیش گرم کردن قطعه است.

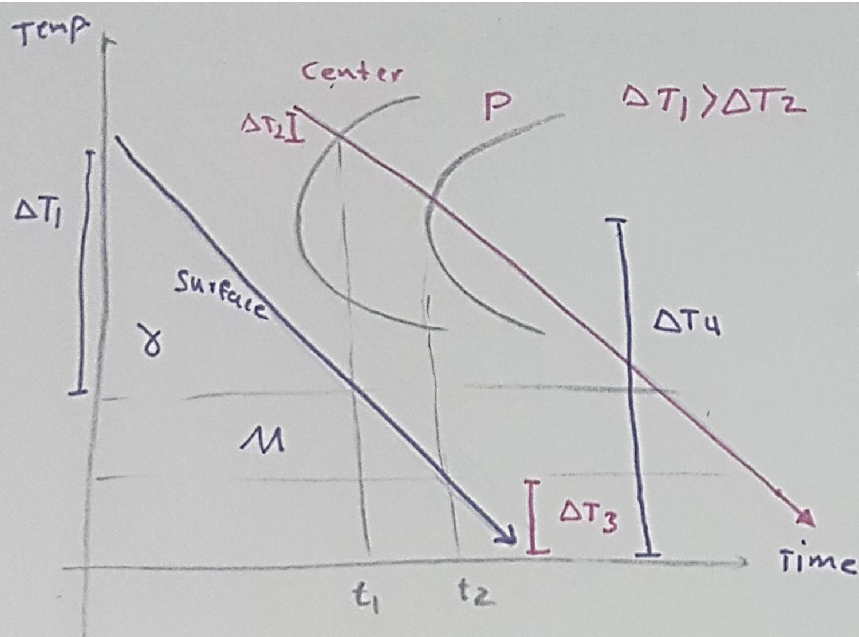


$\begin{cases} P \rightarrow \delta \\ \delta \rightarrow P \end{cases}$

انتقال  
 انبساط

$\delta \rightarrow M$

انبساط



$t < t_1$

Surface  $\rightarrow \gamma$   
Center  $\rightarrow \delta$

انقباض بیشتر  
" کمتر "

$t_1 < t < t_2$

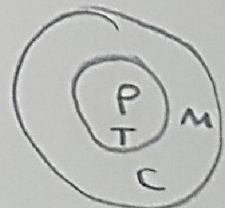
Surface  $\rightarrow M$   
Center  $\rightarrow P$

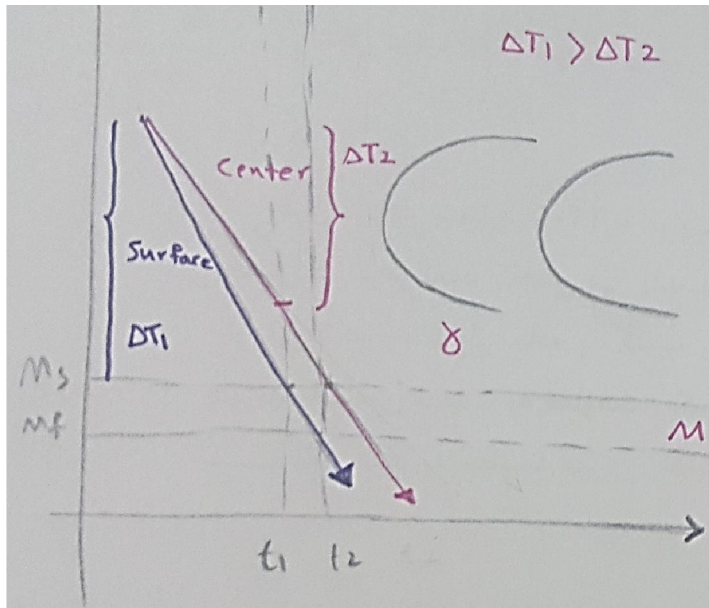
نسباً بیشتر  
" کمتر "

$t > t_2$

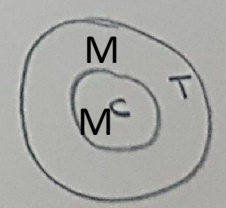
Surface  $\rightarrow M$   
Center  $\rightarrow P$

انبساط کمتر  
انقباض بیشتر

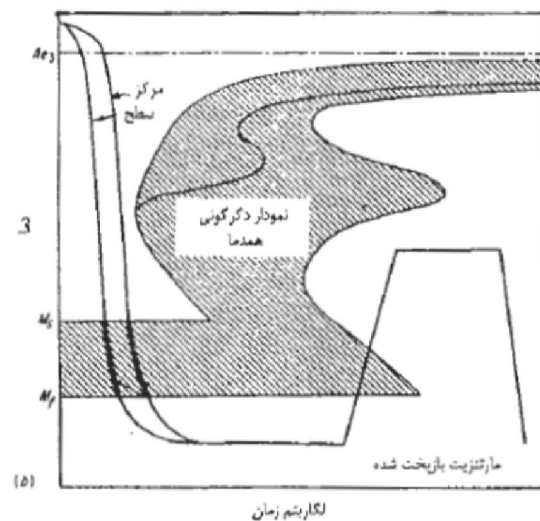




- $t < t_1$     surface  $\rightarrow \delta$  :    انقباض شديد  
                  center  $\rightarrow \delta$  :    انقباض كثر
- $t_1 < t < t_2$     surface  $\rightarrow M$  :    ابيضاض  
                  center  $\rightarrow \delta$  :    انقباض
- $t > t_2$     surface  $\rightarrow M$  :    انقباض  
                  center  $\rightarrow M$  :    ابيضاض



این پدیده منجر به ایجاد تنشهای داخلی در قطعه شده و نهایتاً می‌تواند قطعه را شکسته و یا تغییر شکل دهد. تحت شرایط خاص، می‌توان از روشهای دوم و سوم به جای روش اول استفاده کرد و در نتیجه از اثرات زیان‌آور تنشهای داخلی جلوگیری نمود.



شکل ۹-۱۲ شمایی از عملیات حرارتی سریع سرد کردن یک مرحله‌ای (سریع سرد کردن مستقیم) منطبق بر نمودار TTT فولاد با کربن متوسط [رسم مجدد با استفاده از مرجع ۱].

### **الف : مارتمپرینگ**

عملیات حرارتی مارتمپرینگ یا سریع سرد کردن ناپیوسته<sup>۱</sup> که آن را مارکوئنچینگ<sup>۲</sup> نیز می‌نامند شامل مراحل زیر است:

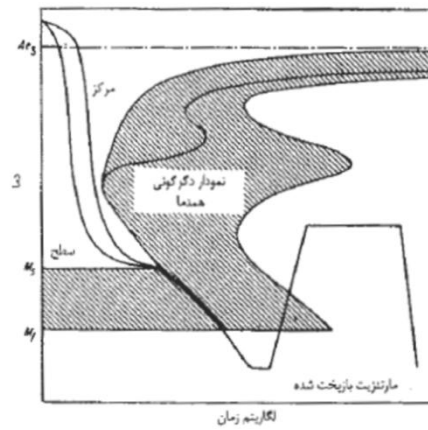
۱- آستیتیه کردن فولاد

۲- سریع سرد کردن فولاد در روغن داغ و یا نمک مذاب تا دمایی درست بالاتر (و یا درست پایینتر) از دمای شروع تشکیل مارتنزیت ( $M_s$ ). سریع سرد کردن در این مرحله باید به نحوی انجام گیرد که از تجزیه آستینیت در دماهای بالا جلوگیری شود.

۳- نگه داشتن در محیط یاد شده تا اینکه دمای قطعه در تمام قسمتهای آن یکنواخت شود. زمان نگهداری در این دما بستگی به موقعیت نمودار TTT و ضخامت قطعه دارد. این زمان معمولاً بین ۲ تا ۴ دقیقه برای هر ۱۰ میلیمتر ضخامت است. زمان کمتر برای حالتی است که فولاد در دماهای پایین آستینته شود، در حالی که زمان بیشتر برای مواردی است که فولاد در دماهای بالا آستینته شده باشد.

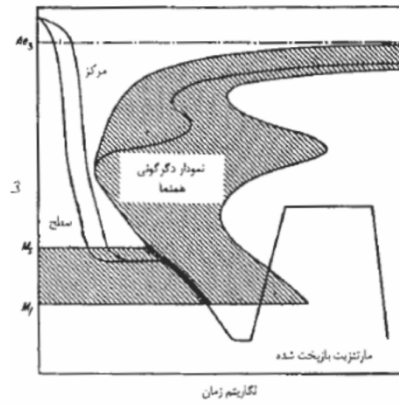
۴- سرد کردن با آهنگی متوسط (معمولاً در هوا) به نحوی که سطح و مرکز تقریباً همزمان سرد شده و به مارتنزیت تبدیل شوند.

۵- بازپخت دادن قطعه به منظور افزایش چقرمگی.



5 شکل ۹-۱۳ شمایی از عملیات حرارتی مارتمپرینگ همراه با نمودار TTT برای یک فولاد با کریین متوسط





شکل ۹-۱۴ شمایی از عملیات حرارتی مار تمپرینگ اصلاح شده همراه با نمودار TTT برای یک فولاد با کربن متوسط [رسم مجدد با استفاده از مرجع ۱].

روش دوم (شکل ۹-۱۴) اصطلاحاً به مار تمپرینگ اصلاح شده<sup>۳</sup> موسوم است.

همان گونه که از شکل‌های ۹-۱۳ و ۹-۱۴ مشخص است، در مرحله اول سرد شدن سطح و مرکز نمونه با دو آهنگ متفاوت سرد می‌شوند، در حالی که در ضمن دگرگونی آستنیت به مارتنزیت تمام قسمت‌های قطعه تقریباً به طور همزمان سرد شده و بنابراین دگرگونی در سطح و مرکز همزمان انجام می‌شوند. از این رو احتمال ترک برداشتن، اعوجاج و ایجاد تنش در قطعه به حداقل ممکن کاهش می‌یابد.

جدول ۹-۳ خواص مکانیکی فولاد ۱۰۹۵ که به روش مارتمپرینگ و سریع سرد کردن یک مرحله‌ای (مستقیم) سخت شده باشند [۱۳].

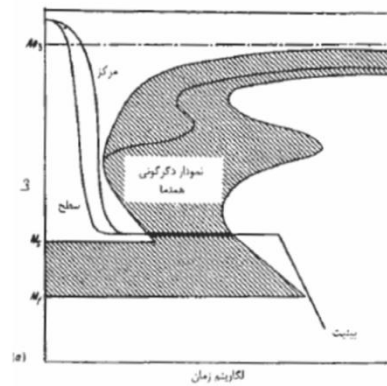
ازدیاد طول درصد	مقاومت به ضربه fb-lb	سختی HRC	نوع عملیات حرارتی
۰	۱۲	۵۳	سرد کردن در آب و بازپخت
۰	۲۸	۵۳	مارتمپر و بازپخت

### **ب : آستمپرینگ**

آستمپرینگ از جمله روشهای دیگر عملیات حرارتی است که به منظور کاهش تنشهای حاصل در ضمن سخت کردن فولادهای کربنی ساده (پرکربن) جانشین سریع سرد کردن مستقیم می شود. آستمپرینگ شامل مراحل زیر است:

- ۱- آستنیته کردن فولاد
- ۲- سریع سرد کردن در حمام نمک مذاب یا روغن داغ تا دمایی بلافاصله قبل از دمای شروع تشکیل مارتنزیت ( $M_s$ ).
- ۳- نگه داشتن در این دما به نحوی که دگرگونی آستنیت به بینیت به طور کامل انجام گیرد. زمان نگهداری در این دما با توجه به موقعیت نمودار IT مشخص می شود.
- ۴- سرد کردن در هوا تا دمای اتاق

همان گونه که از شکل ۹-۱۶ مشخص است در این روش نیز سطح و مرکز نمونه در مرحله اول سریع سرد شدن (قبل از  $M_s$ ) با آهنگهای متفاوت سرد می‌شوند. اما از آنجایی که قبل از شروع دگرگونی آستنیت به بینیت دماهای نقاط مختلف قطعه یکسان خواهند شد، دگرگونی در نقاط مختلف تقریباً همزمان انجام شده و بنابراین تنشهای داخلی به حداقل ممکن کاهش می‌یابند.



شکل ۹-۱۶ شمایی از عملیات حرارتی آستمپرینگ فولاد با گرین متوسط همراه با نمودار TTT [۱].

هدف از به کارگیری آستمپرینگ به جای سریع سرد کردن و بازپخت عبارت است از: (۱) افزایش استحکام ضربه (چقرمگی) و انعطاف پذیری برای یک سختی مشخص و ثابت، (۲) حذف و یا کاهش احتمال ترک برداشتن، تغییر شکل دادن و یا ایجاد تنشهای داخلی در ضمن عملیات حرارتی. برای عملیات حرارتی مقاطع نازک فولادهای کربنی ساده تحت شرایطی که سختی در حدود ۵۰ راکول سی کافی بوده و استحکام ضربه و انعطاف پذیری بسیار خوبی مورد نیاز باشد، آستمپرینگ بهترین روش عملیات حرارتی است.

جدول ۹-۵ مقایسه خواص مکانیکی فولاد ۱۰۹۵ که به روشهای آستمپرینگ و سریع سرد کردن یک مرحله‌ای (مستقیم) عملیات حرارتی شده باشد [۱۳].

نوع عملیات حرارتی	سختی HRC	مقاومت به ضربه ft-lb	ازدیاد طول در ۱ اینچ (%)
آستمپر شده	۵۲	۴۵	۱۱
سرد شده در آب و بازپخت شده	۵۳	۱۲	۰

همانند روش مارتمپرینگ در اینجا نیز فولادهایی مناسب برای آستمپرینگ اند که از سختی پذیری نسبتاً خوبی برخوردار باشند. به نحوی که در ضمن سرد شدن در حمام نمک مذاب و یا روغن داغ در دماهای بالا پرلیت تشکیل نشود.

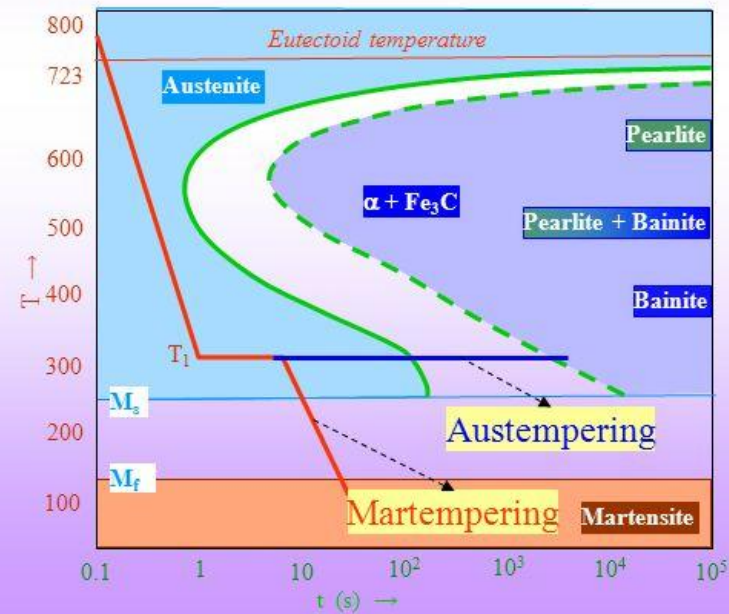
در رابطه با آستمپرکردن فولادهای

کربنی ساده (کم کربن) که از سختی پذیری نسبتاً کمی برخوردار بوده و بنابراین زمان لازم برای شروع دگرگونی در حوالی دماغه منحنی IT نسبتاً کم است، باید توجه داشت که فقط مقاطع نسبتاً نازک (در حدود حداکثر ۵ میلیمتر) را می توان با استفاده از این روش عملیات حرارتی کرد.

در حالی که مقاطع نسبتاً ضخیم از فولادهای آلیاژی که سختی پذیری نسبتاً خوبی داشته باشند را می توان آستمپر نمود. لیکن، اگر سختی پذیری بسیار زیاد باشد، زمان لازم برای دگرگونی آستنیت به بینیت نیز زیاد می شود که در این صورت عملاً آستمپر کردن فولاد روش بسیار طولانی بوده و لذا اقتصادی نیست.

## MARTEMPERING & AUSTEMPERING

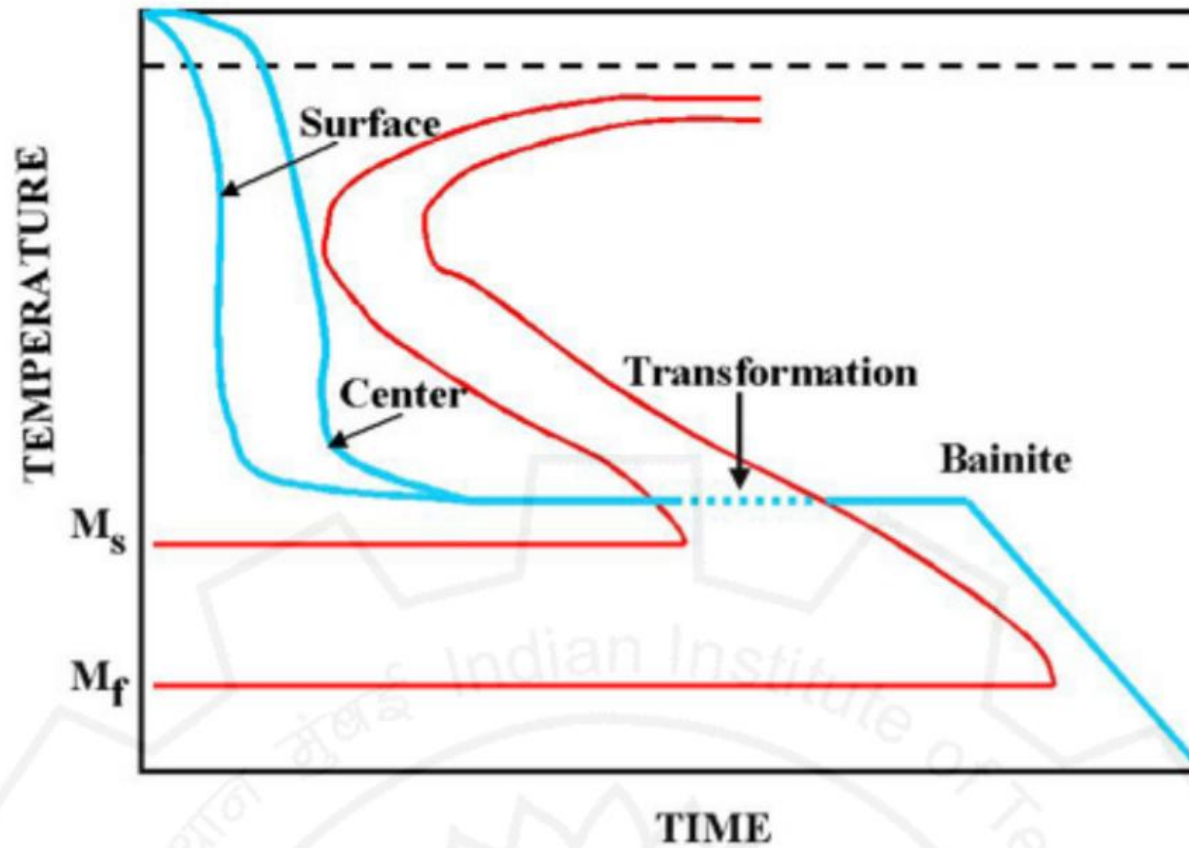
- These processes have been developed to avoid residual stresses generated during quenching.
- In both these processes Austenized steel is quenched above  $M_s$  (say to a temperature  $T_1$ ) for homogenization of temperature across the sample.
- In **Martempering** the steel is then quenched and the entire sample transforms simultaneously to martensite. This is followed by tempering.
- In **Austempering** instead of quenching the sample, it is held at  $T_1$  for it to transform to bainite.



e) Differentiate between Martempering And Austempering

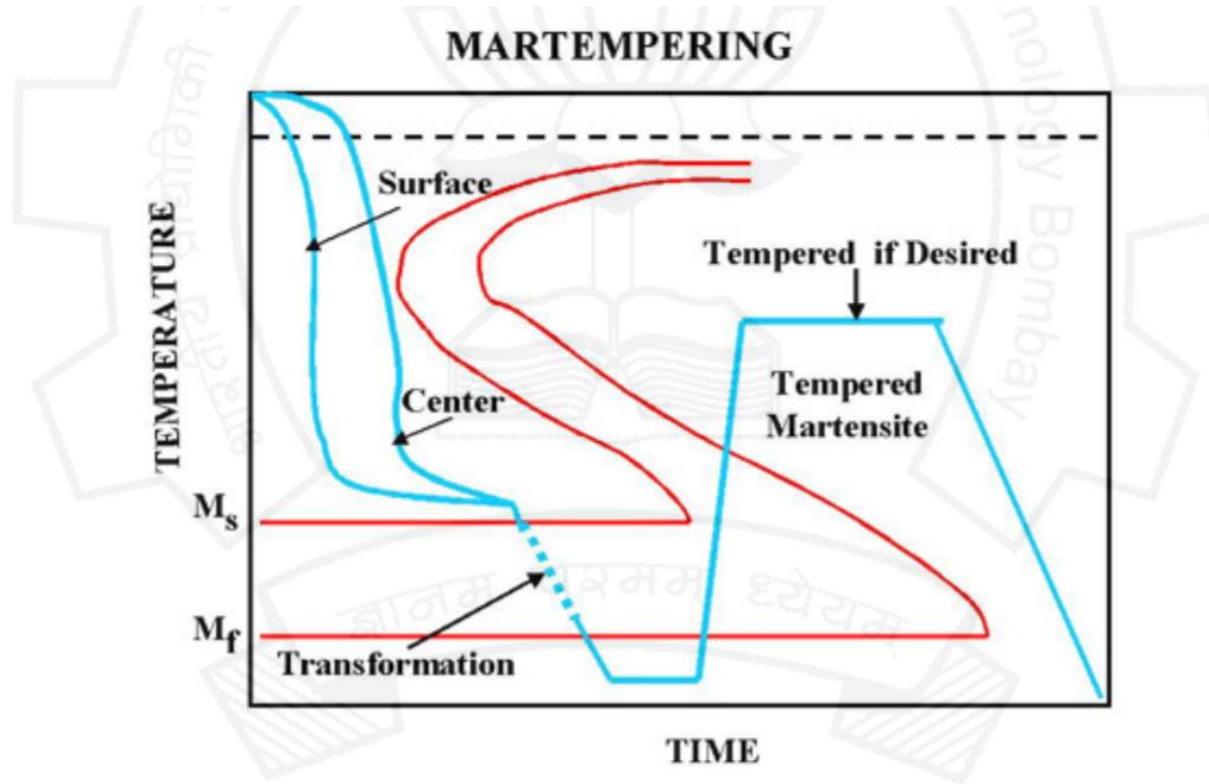
Martempering	Austempering
<ul style="list-style-type: none"><li>• Martempering is a hardening treatment.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Austempering is not a hardening treatment.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Martempering gives martensite product.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Austempering gives bainite product.</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• More distortion and quenching cracks.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Less distortion and quenching cracks.</li></ul>





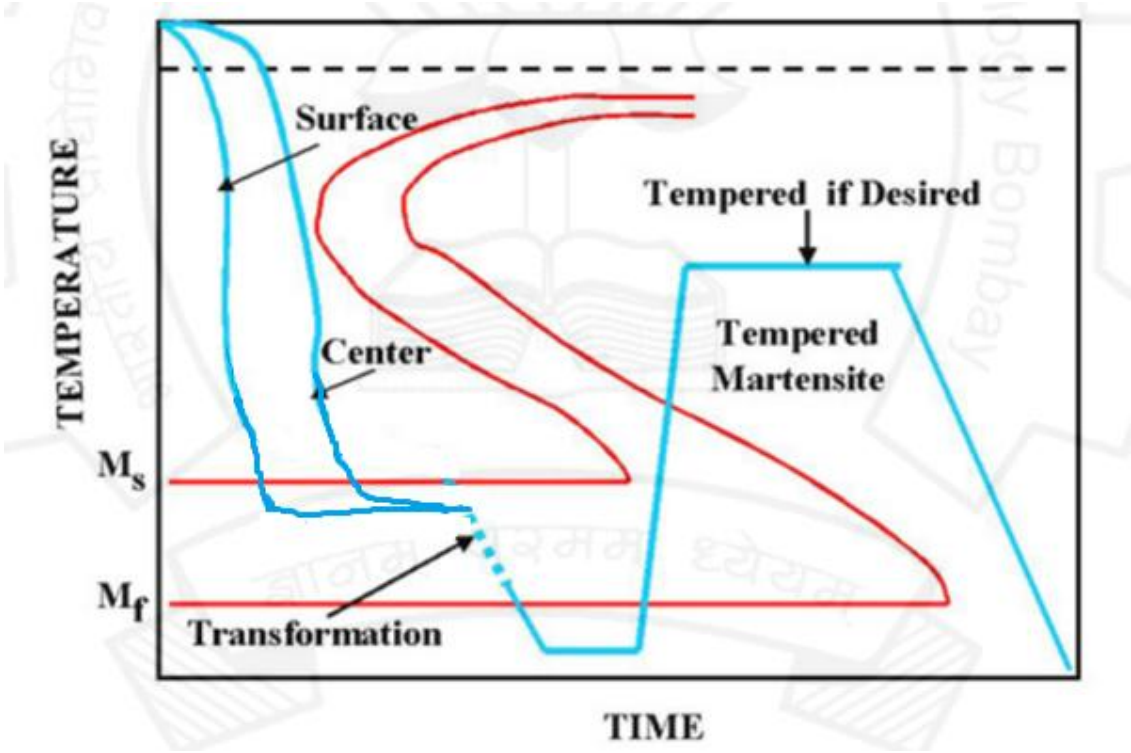
**Figure 4.7.8** Heat treatment cycle for austempering [4].

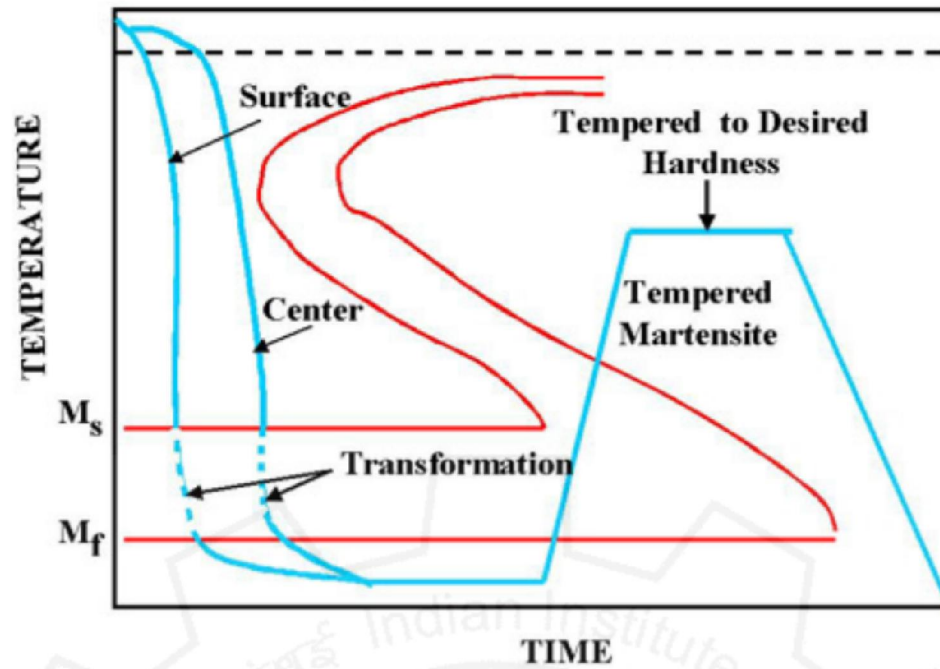
Martempering is also known as stepped quenching or interrupted quenching



**Figure 4.7.7** Heat treatment cycle for martempering [4]

*Modified Martempering*

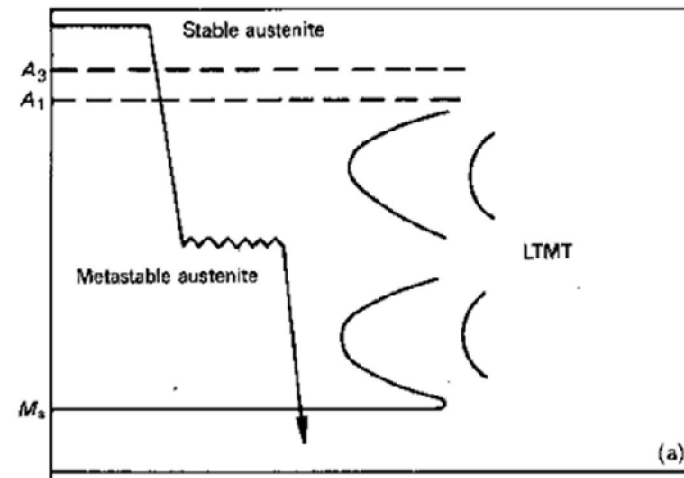
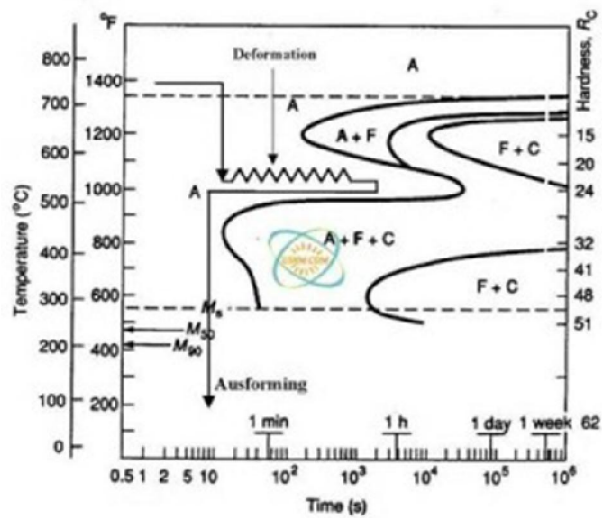




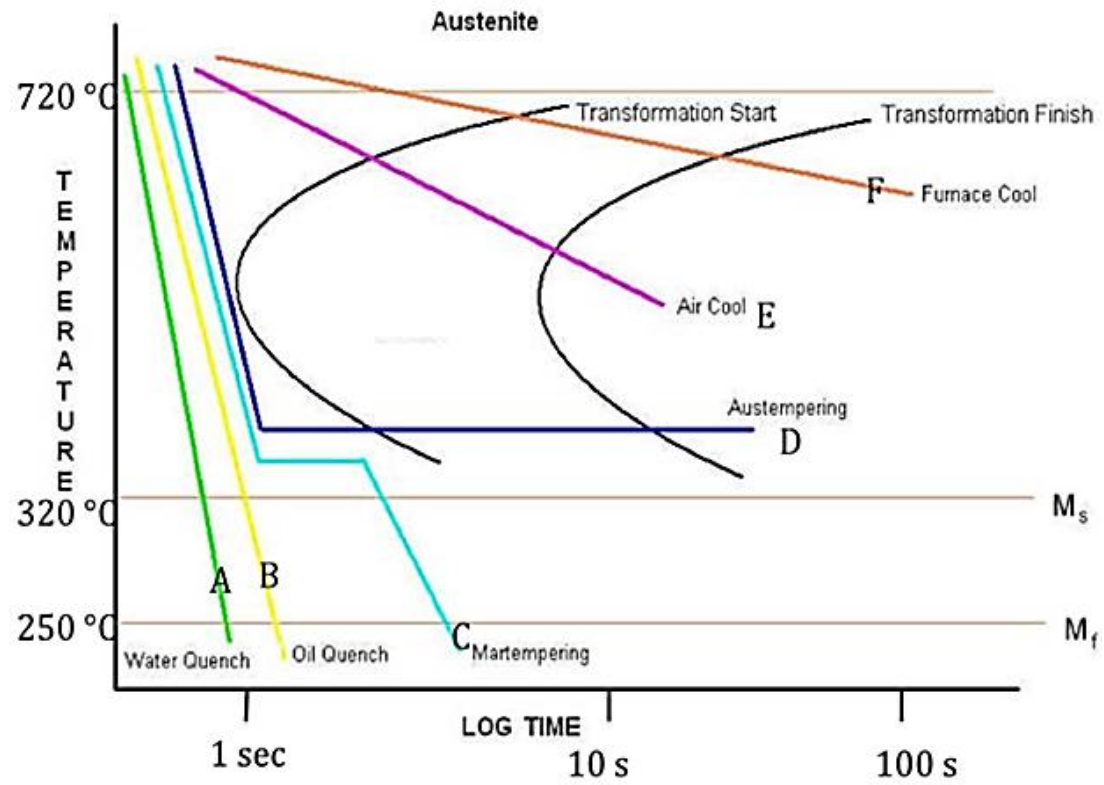
**Figure 4.7.6** Heat treatment cycle for conventional hardening process [4].

## آسفورمینگ

آسفورمینگ، نام ویژه ای است که برای عملیات حرارتی-مکانیکی که در آن آستنیت در حد فاصل دماهای A1 و Ms در نمودار TTT تغییر شکل مکانیکی داده می شود. نوع خاصی از این عملیات، شامل استفاده از فولادهای پرآلیاژ با ساختار اولیه آستنیت شبه پایدار است. این نوع فولادها به فولادهایی که تغییر شکل مکانیکی مومسان، تحریک کننده دگرگونی در آنها است TRIP موسوم اند. این نوع نامگذاری به خاطر این است که این فولادها در اثر کرنش، به مارتنزیت تبدیل می شوند؛ از طرف دیگر مارتنزیت ایجادشده در اثر کرنش در برابر گلویی شدن مقاومت کرده و در نتیجه ترکیبی از استحکام بسیار بالا و انعطاف پذیری را موجب می شوند.



(a)



سخت کردن سطحی

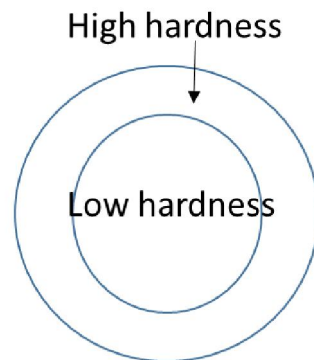


# سخت کردن سطحی

مقدمه

## • هدف

- افزایش سختی و مقاومت به سایش در سطح
- حفظ چقرمگی و مقاومت به ضربه در عمق



## • روشها

- سخت کاری سطحی با تغییر در ترکیب شیمیایی سطح (روشهای نفوذی)
- سخت کاری سطحی بدون تغییر در ترکیب شیمیایی سطح (روشهای موضعی)

- روشهای نفوذی شامل:

- کربوره کردن (سمانتاسیون)
- نیتریده کردن
- کربونیتریده کردن
- بوردهی کردن

- روشهای موضعی شامل:

- روش القایی
- روش شعله ای

- عملیات سخت کاری سطحی آخرین مرحله در فرایند تولید یک قطعه است.

## کربوره کردن / Carburizing

- مکانیزم کلی عبارت است از
  - ایجاد عنصر نفوذ کننده (کربن) به صورت اتمی
  - ایجاد شرایط مناسب برای جذب کربن توسط سطح قطعه
  - انتشار عنصر نفوذ کننده تا عمق مورد نظر در قطعه
- آلیاژهای مناسب برای این فرایند فولادهای کم کربن هستند. ( $C < 0.3\%$ )
- عمق نفوذ کربن بر حسب فاصله از سطح:
$$C(x) = C_s + (C_0 - C_s) \operatorname{erf} [x / \sqrt{4Dt}]$$
$$D = 0.12 \exp [-32000/RT] \text{ cm}^2/\text{sec}$$

## کربوره کردن / Carburizing

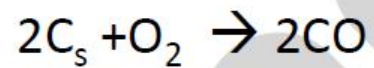
- کربوره کردن در سه محیط مختلف قابل انجام است
  - محیط جامد: ذغال + کربنات باریم / کلسیم / سدیم
  - محیط مایع: نمک های مذاب
  - محیط گازی: گازهای قابل اشتعال مانند متان

## کربوره کردن جامد

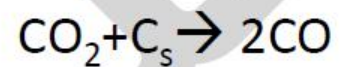
- قطعات به همراه پودر ذغال و کربنات ها در داخل یک جعبه فولادی قرار داده میشوند.
- جعبه به گونه ای بسته میشود که هیچ تبادل هوایی با بیرون نداشته باشد.
- جعبه در دامنه دمایی ۸۷۵ تا ۹۲۵ درجه سانتیگراد حرارت داده میشود.
- زمان نگهداری بستگی به شرایط قطعه دارد. (۶ تا ۱۴ ساعت)
- سرد کردن در هوا

## کربوره کردن جامد

• واکنشهای شیمیایی



• کربنات ها نرخ کربن دهی را افزایش میدهند



- سرد کردن معمولا در آب انجام نمیشود زیرا:
  - دمای عملیات بالاست ← ایجاد تنشهای زیاد
  - زمان زیاد ← دانه های درشت ← ایجاد ترک
  - امکان ایجاد آستنیت باقیمانده در سطح
- برای پیشگیری از معایب فوق میتوان بعد از سرد شدن قطعه در هوا آن را مجددا در دمای پایین تری آستنیته و کوئنچ نمود.

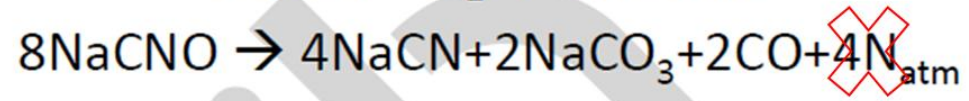
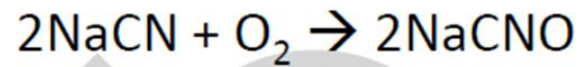
## کربوره کردن مایع

- در محیط نمک مذاب سیانید (مثلا سیانید سدیم NaCN) انجام میشود.
- دما ۸۷۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد
- زمان حداکثر ۱ ساعت
- امکان کوئنچ مستقیم وجود دارد



## کربوره کردن مایع

• واکنشهای شیمیایی



## کربوره کردن گازی

- محیط گازی شامل متان، اتان یا پروپان
- دما ۹۰۰ درجه سانتیگراد
- زمان ۳ تا ۴ ساعت
- کوئچ امکان پذیر است

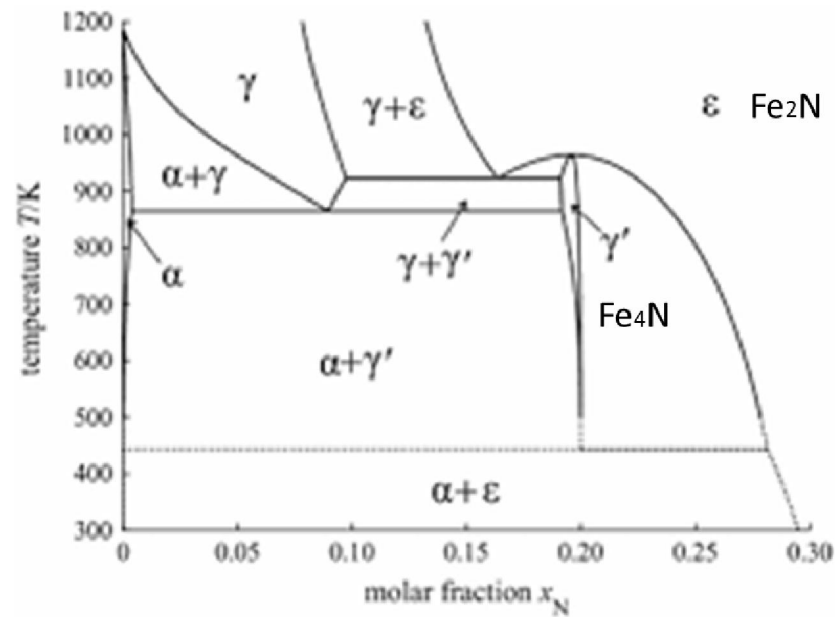


- هرچند در این روش قدرت کربن دهی کم است ولی از نظر اقتصادی به صرفه ترین روش است.



## نیتریده کردن

• در این فرایند نیتروژن اتمی به لایه های سطحی فولاد نفوذ داده میشود.



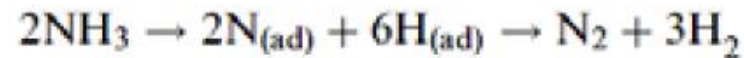
## نیتريده كردن

- اگر فولاد ساده كربني نيتروژن دهی شود به دليل سرعت بالای نفوذ نيتروژن فازهای  $Fe_4N$  و  $Fe_2N$  در داخل قطعه تشكيل شده لذا سختی سطح چندان افزایش نمیابد.
- عناصر آلیاژی مانند  $Al$ ،  $Cr$ ،  $Mo$ ،  $V$  و  $Ti$  با تشكيل کاربيد از نفوذ نيتروژن به عمق قطعه جلوگیری میکند. این کاربيدها سخت و مقاوم به سایش هستند.
- این روش برای سخت کاری سطحی فولادهای آلیاژی مناسب است.

## نیتريده کردن

- نیتريده کردن گازی:

- دمای فرایند ۵۰۰ تا ۵۹۰ درجه سانتیگراد
- محیط گازی با تجزیه آمونیاک فراهم میشود



- زمان فرایند حداقل ۸ تا ۱۰ ساعت است.

## نیتريده کردن

- نیتريده کردن مایع:

- دمای فرایند ۵۰۰ تا ۵۹۰ درجه سانتیگراد
- محیط نیتريده نمک های سیانوری مانند NaCN، KCN، NaCNO هستند
- زمان فرایند ۱ ساعت

## کربونیتريده کردن / Carbonitriding

- محیط گازی شامل گازهای هیدروکربن و آمونیاک
- دمای فرایند ۸۰۰ تا ۸۷۵ درجه سانتیگراد
- کنترل دما و غلظت آمونیاک تعیین کننده درصد کربن و نیتروژن جذب شده در فولاد است.
- افزایش دما منجر به کاهش انحلال نیتروژن و افزایش انحلال کربن میشود.

## نیتروکربوره کردن / Nitrocarburizing

- اگر فرایند کربونیتتریده کردن در دمای ۵۰۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد ( دامنه پایداری فریت) انجام شود این فرایند را نیتروکربوره کردن می نامند.
- این فرایند در دو محیط گازی و مایع امکانپذیر است.



## بور دهی

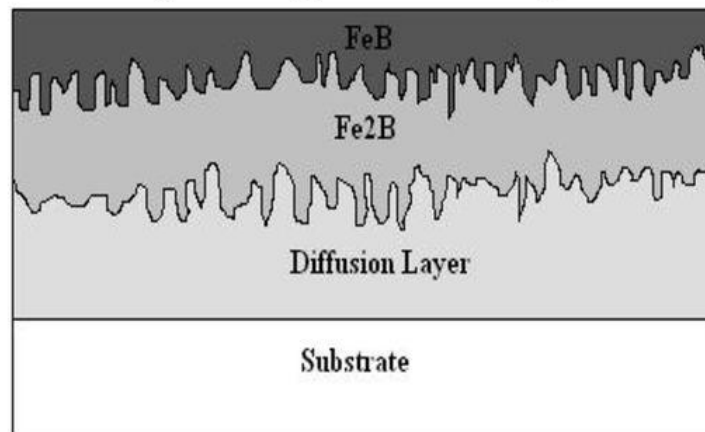
*Borizing is a thermal chemical surface treatment for ferrous metals resulting in a very hard and wear-resistant iron boride surface.*

### **Characteristics of the borizing treatment:**

- *Diffusion thickness: 10-300  $\mu\text{m}$*
- *Applicable up to temperature of 500°C*
- *Surface hardness: 1600-2000 Micro Vickers*

## Boriding

Boronizing, also known as boriding, is a case hardening diffusion process where boron atoms are diffused into the surface of a metal component. This forms hard, metal-boride compound layers under the surface of a component. Boronized parts have two-five-times longer wear life compared to other heat treatments, such as hardening, carburizing, nitriding, nitrocarburizing or induction hardening.



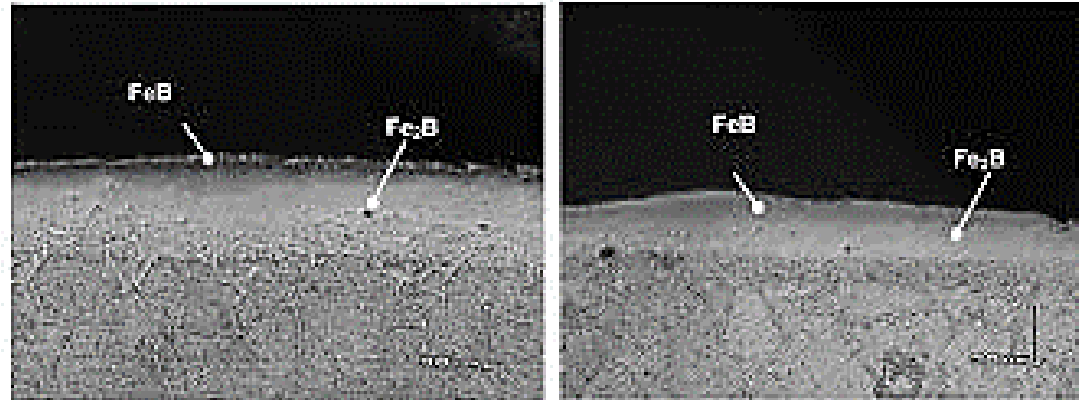
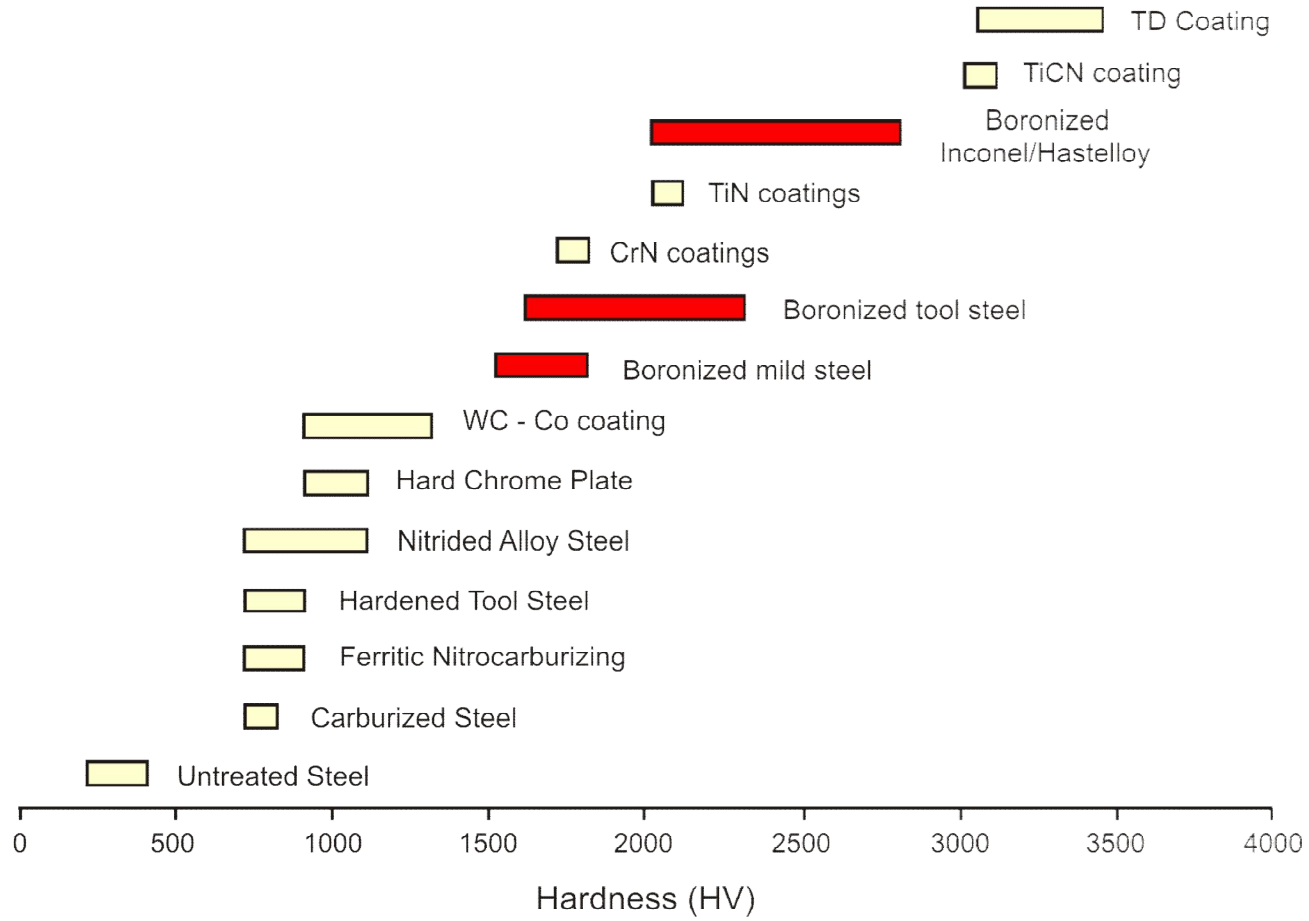
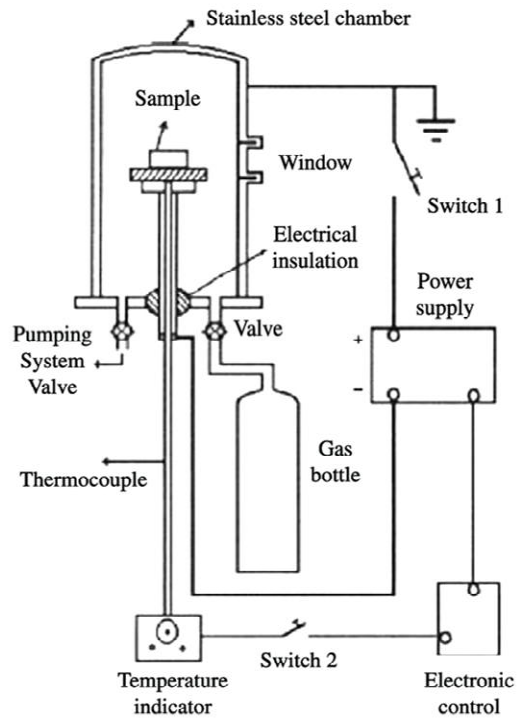


Figure 1 – Borided AISI steels 304 at 1223 K during 6 hours

### Comparison of Surface Hardness



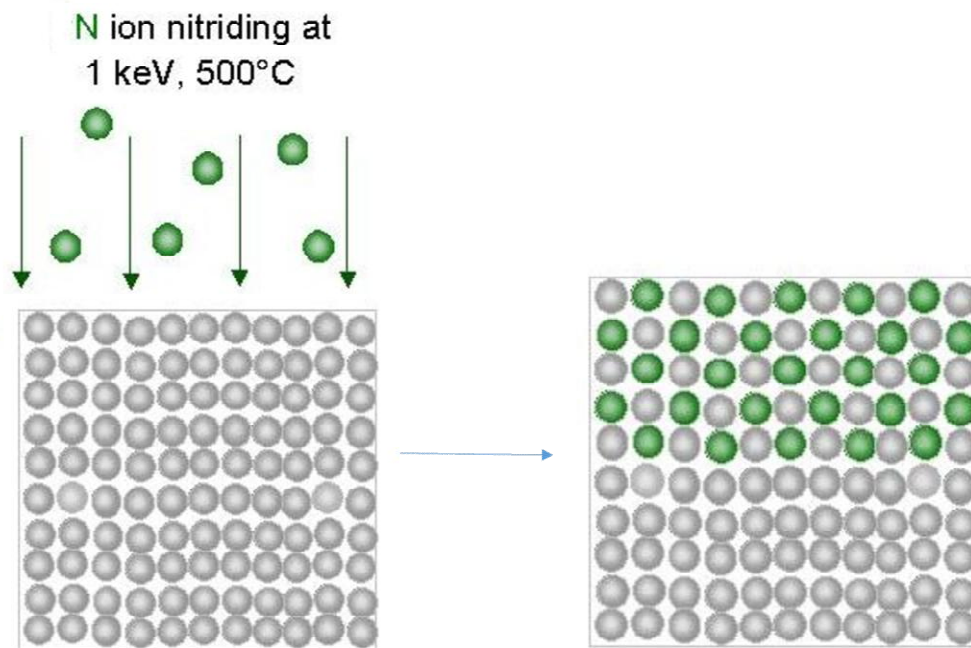
## استفاده از پلاسما در عملیات های سطحی



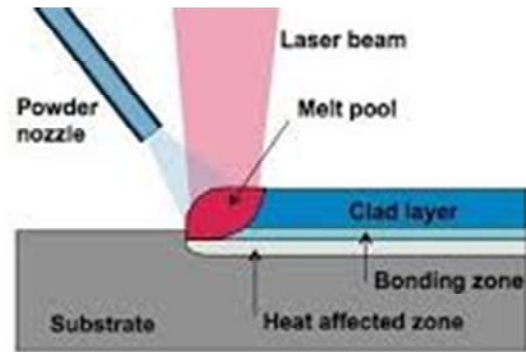
کربن دهی، نیتروژن دهی و بوردهی پلاسمایی



## نیتروژن دهی از طریق کاشت یونی



## آلیاژسازی سطحی توسط لیزر -تیتانیوم دهی



**LASER SURFACE ALLOYING**

- این فرایندها بر روی فولادهای با کربن متوسط (  $0.3 < \%C < 0.5$  ) یا فولادهای کم آلیاژ انجام میشود.

- مزایا:

- امکان سختکاری قطعات بزرگ
- جلوگیری از تغییرات ابعادی

- روشهای اصلی

- سخت کردن شعله ای
- سخت کردن القایی



## سخت کاری شعله ای

- در این روش از شعله اکسیژن و یک گاز قابل احتراق مانند استیلن / پروپان / متان استفاده میشود.
- با تمرکز شعله روی سطح، یک لایه از سطح آستنیت شده و با کوئنچ بعدی (آب) سطح مورد نظر سخت خواهد شد.
- محدودیت اصلی این روش امکان اکسید شدن یا دیکربوره شدن سطح است.

## سخت کاری القایی

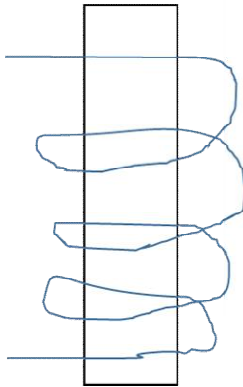
- در این روش از جریان الکتریکی به جای شعله استفاده میشود.
- در این روش عمق نفوذ جریان القایی (ضخامت پوسته آستنیت شده) از رابطه زیر محاسبه میشود

$$X = 5030 \sqrt{\Omega / \mu F}$$

$\Omega$  مقاومت الکتریکی

$\mu$  نفوذپذیری مغناطیسی

F فرکانس جریان



در بسیاری از کاربردهای صنعتی نیاز به قطعاتی است که دارای سطحی سخت بوده و در عین حال از چقرمگی یا مقاومت به ضربه خوبی نیز برخوردار باشند. از جمله مواردی که می‌توان در این رابطه به عنوان مثال به آنها اشاره کرد عبارت‌اند از: میل‌لنگ، میل بادامک، چرخ دنده و قطعات مشابه. این قطعات باید سطحی بسیار سخت و مقاوم در برابر سایش داشته و همچنین بسیار چقرمه و مقاوم در برابر ضربه‌های وارده در حین کار باشند.

بسیاری از قطعات فولادی را می‌توان به نحوی عملیات حرارتی کرد که در پایان دارای مجموعه‌ی خواص بالا باشند، یعنی در حالی که از مقاومت به سایش خوبی برخوردارند، دارای استحکام دینامیکی خوبی نیز باشند. این نوع عملیات حرارتی که اصطلاحاً به سخت کردن سطحی<sup>۱</sup> موسوم‌اند، آخرین عملیاتی‌اند که باید در مرحله‌ی پایانی ساخت قطعه و پس از انجام تمام مراحل مربوط به شکل‌دهی نظیر ماشینکاری و غیره انجام شود.

چدن ها و عملیات حرارتی



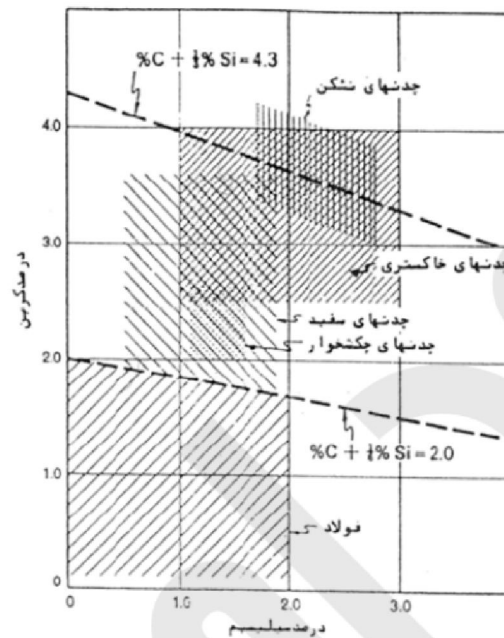
دانشگاه حکیم سبزواری

## عملیات حرارتی چدن‌ها

### دیاگرام تعادلی آهن گرافیت

- از نظر سینتیکی تشکیل سمانتیت بسیار راحت تر از تشکیل گرافیت است
- از نظر ترمودینامیکی گرافیت پایدار تر از سمانتیت است
- گرافیت را خواهیم داشت. (تحت تبرید کم - سرعت سرد شدن آهسته)
- Si پایدار کننده گرافیت است

چدن‌ها را بر اساس نوع فاز غنی از کربن و شکل آن دسته بندی میکنند.



انواع چدن	
White iron	سفید
Gray iron	خاکستری
Malleable iron	چکش خوار
Ductile iron	نشکن
Compacted graphite iron	گرافیت فشرده

## طبقه بندی چدن ها

**چدن سفید:** از آنجا که در این چدن ها، شکست در امتداد صفحات کاربید آهن رخ می دهد، سطح مقطع شکست کریستالی آنها سفید است.

**چدن خاکستری:** در این چدن ها، شکست در امتداد صفحات گرافیت رخ می دهد، به همین دلیل سطح مقطع شکست کریستالی آنها خاکستری است.

بر اساس شکل گرافیت: گرافیت لایه ای، گرافیت کروی، گرافیت فشرده، گرافیت برفکی

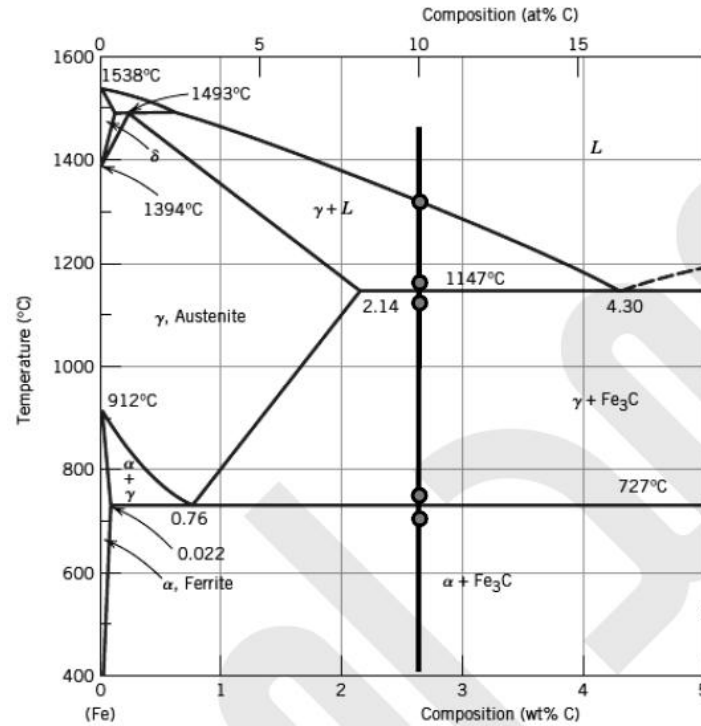
بر اساس ماتریس: فریتی، پرلیتی، آستنیتی، مارتنزیتی، بینیتی (آستمپر شده)



دانشگاه حکیم بسزازی

## عملیات حرارتی چدن‌ها

انجماد ترکیب هیپووتکتیک - سرعت زیاد



T1) L+γ

T2) L(4.3%)+γ(2.1%)

T3) Fe<sub>3</sub>C(6.67%)+γ(2.1%)

T4) Fe<sub>3</sub>C(6.67%)+γ(0.76%)

T5) Fe<sub>3</sub>C(6.67%)+α(0.02%)



• چدن سفید پرلیتی

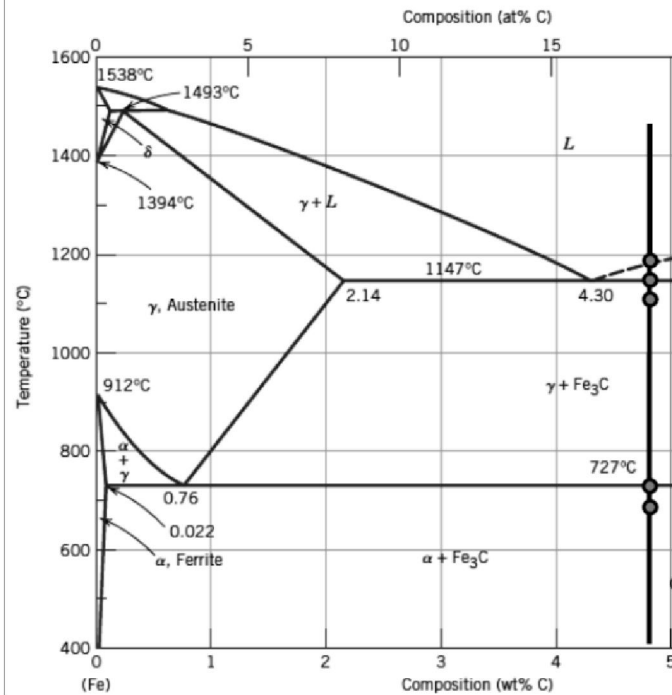




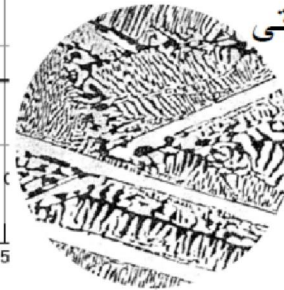
دانشگاه حکیم نسرواری

# عملیات حرارتی چدن‌ها

## انجماد ترکیب های پریوتکتیک - سرعت زیاد

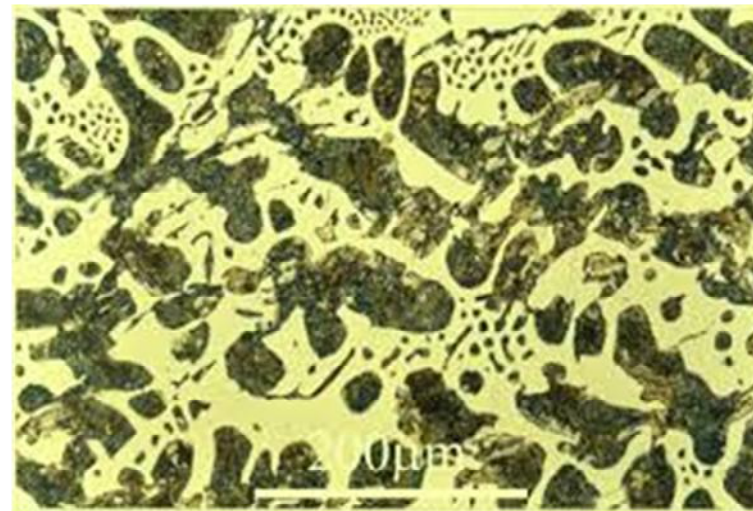
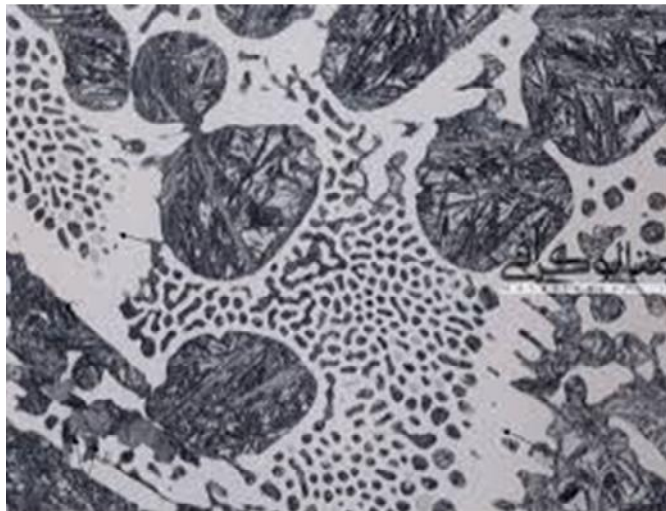


- T1)  $L + Fe_3C$
- T2)  $L(4.3\%) + Fe_3C(6.67\%)$
- T3)  $Fe_3C(6.67\%) + \gamma(2.1\%)$
- T4)  $Fe_3C(6.67\%) + \gamma(0.76\%)$
- T5)  $Fe_3C(6.67\%) + \alpha(0.02\%)$

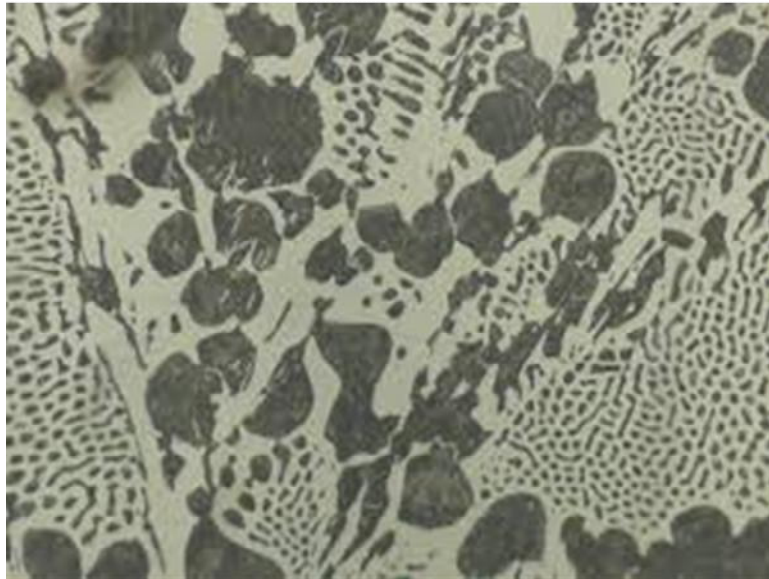


• چدن سفید پرلیتی

چدن های سفید یکی از پر مصرف ترین آلیاژهای خانواده چدن می باشد. زیرا دارای خواصی مثل استحکام فشاری بسیار زیاد، مقاومت سایشی عالی و سختی بالایی هستند و از این دسته از چدن ها عمدتاً در ساخت قطعات مقاوم در مقابل سایش در درجه حرارت های بالا در برخی از صنایع کاربرد دارند.

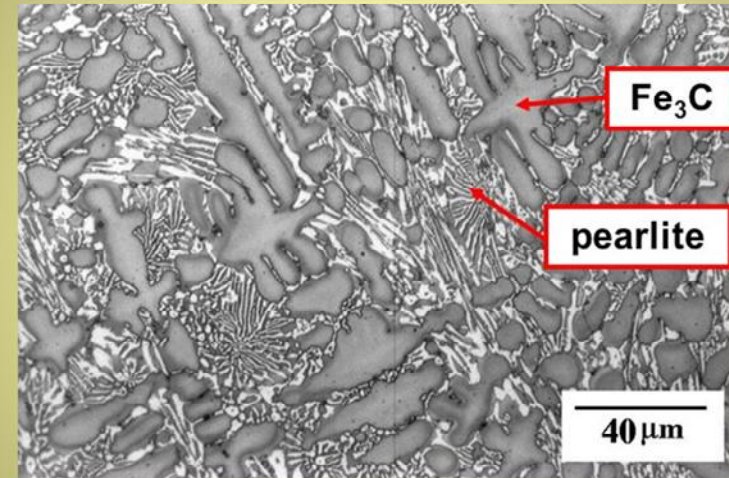


چدن سفید آلیاژی



چدن سفید

## Microstructure of white cast iron



# 1. WHITE CAST IRON

## APPLICATION:

It can be used as liners of cement mixers, ball mills, drawing dies and extrusion nozzles.



**NOZZLE**



**BALL MILLS**



**CEMENT MIXERS**

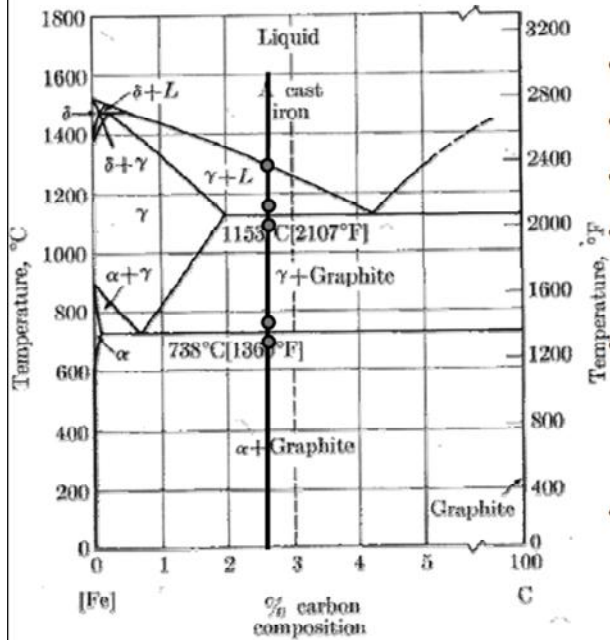
<b>Material</b>	<b>Brinell Hardness Number - HB</b>
<b>Lead</b>	<b>5.0</b>
<b>Pure Aluminium</b>	<b>15</b>
<b>Copper</b>	<b>35</b>
<b>Soft brass</b>	<b>60</b>
<b>Hardened Aluminium</b>	<b>75</b>
<b>Mild steel</b>	<b>130</b>
<b>Annealed chissel steel</b>	<b>235</b>
<b>White cast iron</b>	<b>415</b>
<b>Nitrided surface</b>	<b>750</b>
<b>Glass</b>	<b>1550</b>
<b>Rhenium diboride</b>	<b>4600</b>



دانشگاه گیلان

## عملیات حرارتی چدن‌ها

### انجماد ترکیب هیپووتکتیک - سرعت کم



- T1) L+γ
- T2) L(4.26%)+γ(2.08%)
- T3) G(100%)+γ(2.08%)
- T4) G(100%)+γ(0.68%)
- T5) G + α
- چدن خاکستری فریتی
- T5) G + α + Fe<sub>3</sub>C
- چدن خاکستری پرلیتی



چدن خاکستری فریتی



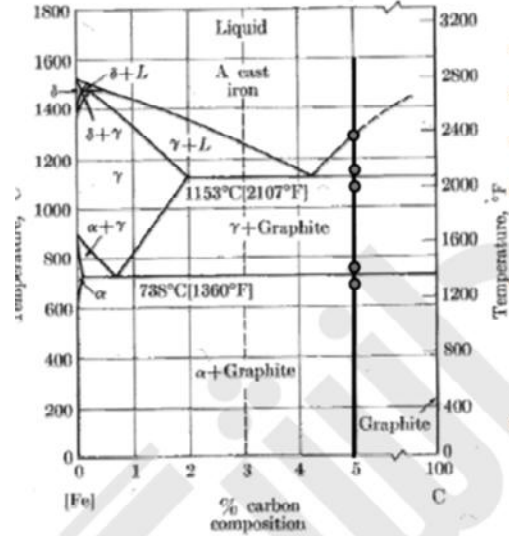
چدن خاکستری پرلیتی



دانشگاه گیلان

## عملیات حرارتی چدن‌ها

### انجماد ترکیب های پیروکتیک - سرعت کم



- T1) L+G
- T2) L(4.26%)+G(Kish)
- T3) G(100%)+ $\gamma$ (2.08%)
- T4) G(100%)+ $\gamma$ (0.68%)
- T5) G +  $\alpha$
- چدن خاکستری فریتی
- T5) G +  $\alpha$  + Fe<sub>3</sub>C
- چدن خاکستری پرلینی



چدن خاکستری فریتی



چدن خاکستری پرلینی

کاربرد چدن خاکستری.





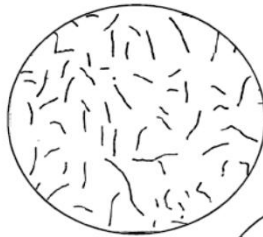


چدن خاکستری

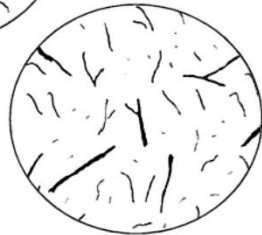
این نوع چدن استحکام کششی و مقاومت به شوک کمتری نسبت به فولاد دارد اما از نظر استحکام فشاری با فولاد کربنی کم و میان کربن قابل مقایسه است

## چدن خاکستری

- درصد عناصر آلیاژی و سرعت سرد شدن تعیین کننده شکل گرافیت و ساختار زمینه در این چدن‌هاست.
- به طور کلی افزایش درصد کربن یا سیلیسیم و کاهش سرعت سرد شدن منجر به تشکیل گرافیت‌های بیشتر و ضخیم‌تر میشود.



- Type A: ترکیب هیپو یوتکتیک در شرایط انجماد معمولی



- Type C: ترکیب هایپریوتکتیک در شرایط انجماد معمولی (گرافیت کیش)



Type A  
Uniform distribution,  
random orientation



Type B  
Flake grouping,  
random orientation



Type C  
Superimposed flake size,  
random orientation



Type D  
Interdiffusive segregation,  
random orientation



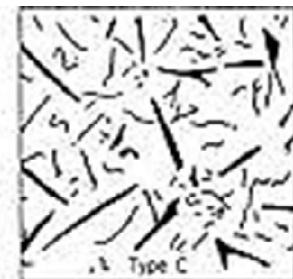
Type E  
Interdiffusive segregation,  
preferred orientation



Type A



Type B



Type C

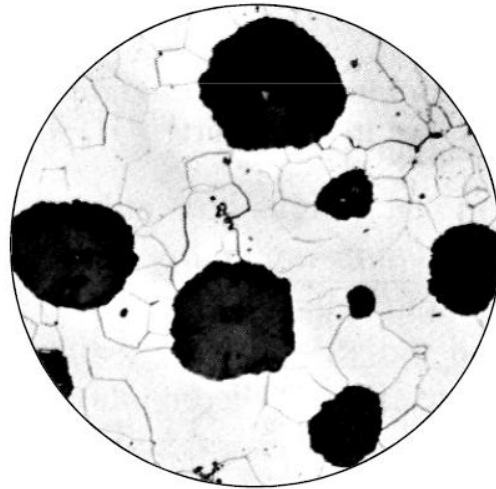


Type D



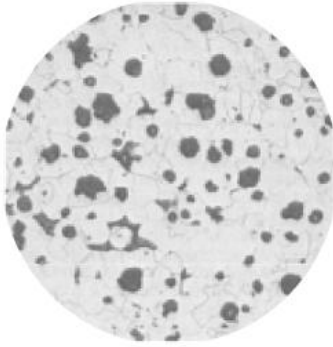
Type E

- از نظر ترکیب شیمیایی مشابه چدن خاکستری است.
- با اضافه کردن مقادیر کم از عناصری مانند Li، K، Na، Mg، Cr و... در حین ریخته گری شکل گرافیت کروی خواهد شد.

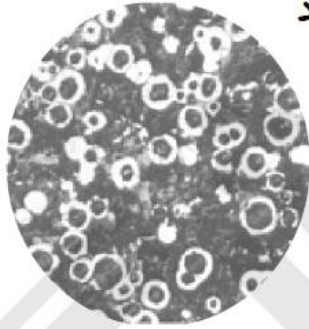


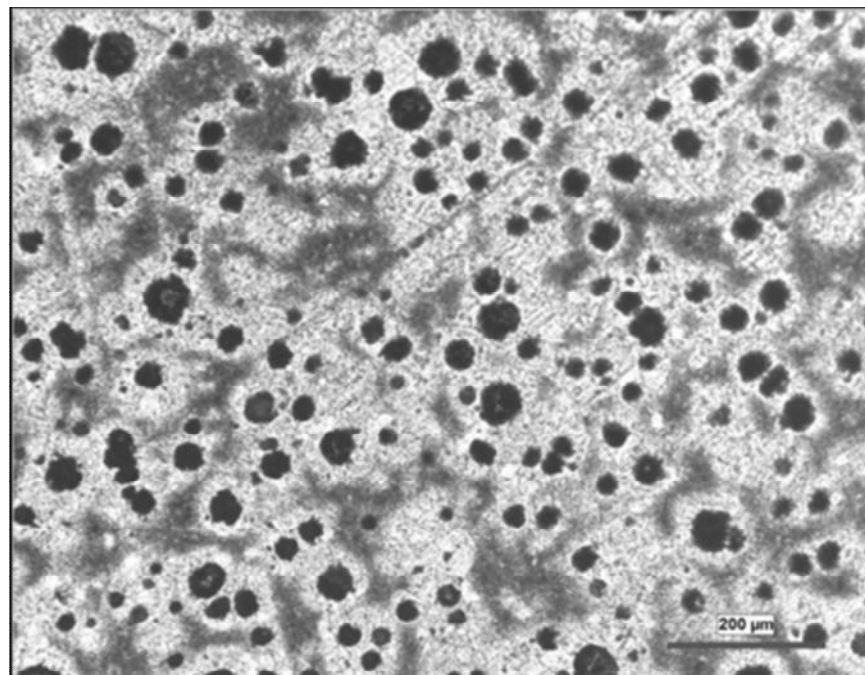
- استحکام و انعطاف پذیری

- چدن نشکن فریتی، سرعت سرد شدن آهسته



- چدن نشکن پرلیتی (چشم گاوی)، سرعت سرد شدن زیاد





### چدن داکتیل

از مزایای چدن داکتیل می‌توان به راحتی ریخته‌گری و ماشینکاری، نسبت استحکام به وزن فوق‌العاده بالای آن اشاره کرد. همچنین هزینه ریخته‌گری چدن داکتیل از فولاد بسیار کمتر است.

## چدن چکشخوار

- از عملیات حرارتی چدن سفید به دست می آید.
  - تهیه چدن سفید ۱۰۰٪ ( بدون گرافیت لایه ای )
  - عملیات حرارتی برای تجزیه سمانتیت



- خواصی مشابه چدن نشکن دارد.

چدن برفکی



یک زانوی لوله‌کشی ساخته شده از چدن مالیبیل

چدن مالیبیل (چکش خوار) کرومی نبوده و به شکل برفکی می‌باشد.



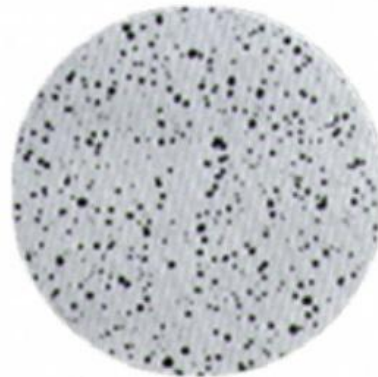
## انیل چدنها

- انواع آنیل در چدنها:
  - آنیل دمای بالا (۹۰۰-۹۵۰ درجه سانتیگراد)
  - تهیه چدن چکشخوار از چدن سفید

- هدف: کاهش سختی و استحکام، افزایش انعطاف پذیری
  - حرارت دادن قطعه در دمای بالاتر از  $A_1$
  - سرد کردن در کوره
- ساختار نهایی شامل فریت و گرافیت خواهد بود.



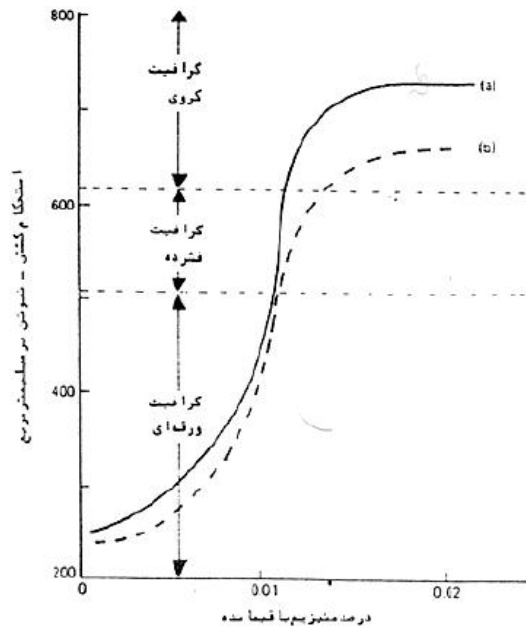
**Malleable Iron**



**Ductile Iron**

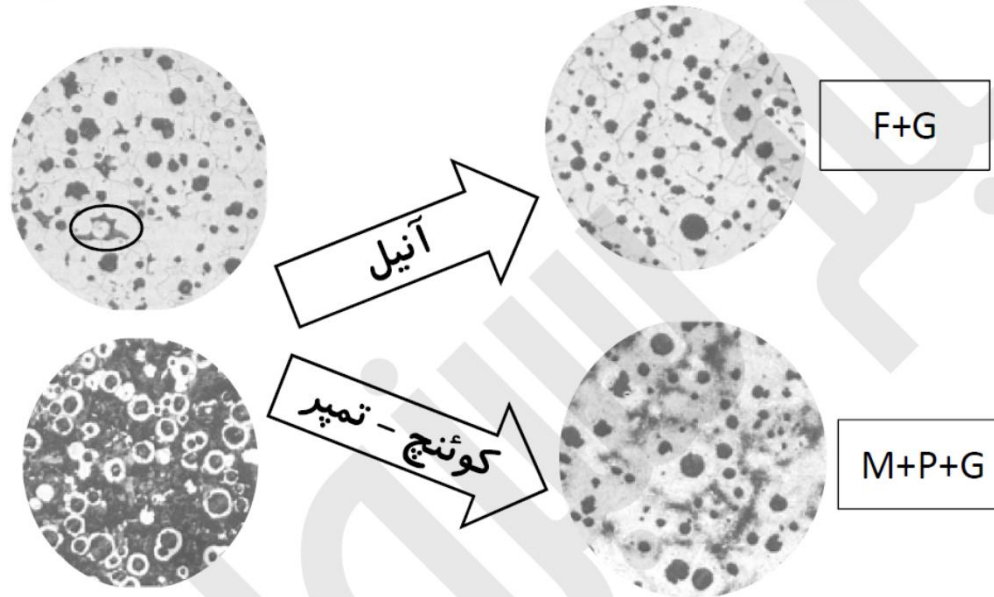
## چدن با گرافیت فشرده

- خواص این چدن‌ها حد واسط چدن خاکستری و نشکن است.
- برای تهیه چدن گرافیت فشرده مقادیر مشخصی منیزیم و تیتانیوم به مذاب اضافه میکنند.



## دیگر فرایندهای حرارتی در چدن‌ها

- نرماله کردن:
  - حرارت دادن قطعه در دمای بالاتر از  $A_1$
  - سرد کردن در هوا
- هدف: ایجاد زمینه پرلیتی، افزایش نسبی سختی و استحکام
  
- سخت کردن:
  - حرارت دادن قطعه ۸۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد بالاتر از  $A_1$
  - کوئنچ در روغن
- هدف: ایجاد زمینه مارتنزیتی، افزایش سختی و استحکام



## تفاوت عملیات حرارتی چدن‌ها و فولادها

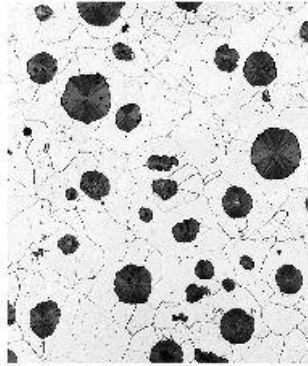
• تفاوت عملیات حرارتی چدن‌ها و فولادها در موارد زیر است:

- در چدن‌ها درصد کربن و سیلیسیم (کربن معادل) تعیین کننده دمای آستنینه کردن است.
- به دلیل عناصر آلیاژی زیاد، چدن‌ها اغلب در روغن یا هوا کوئنچ میشوند.
- چون قطعات اغلب از نظر هندسی پیچیده هستند، زمان آستنینه کردن طولانیتر است.
- چون قطعات اغلب از نظر هندسی پیچیده هستند، تنشهای باقیمانده بیشتری در حین عملیات حرارتی چدن‌ها ایجاد میشود.
- اکسید شدن چدن‌ها در حین عملیات حرارتی بسیار شدیدتر است.

## Microstructures of Cast Iron



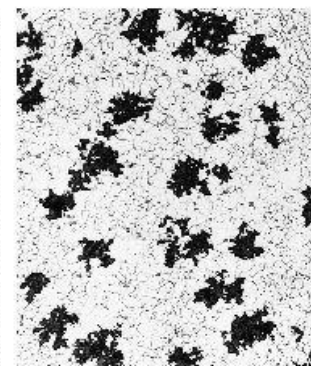
**Gray iron**  
 $\alpha$  Fe and  
graphite flakes



**Nodular iron**  
 $\alpha$  Fe and  
graphite spheres

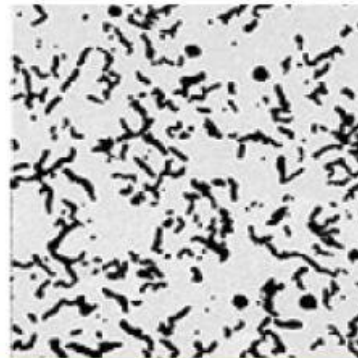


**White iron**  
cementite and  
pearlite



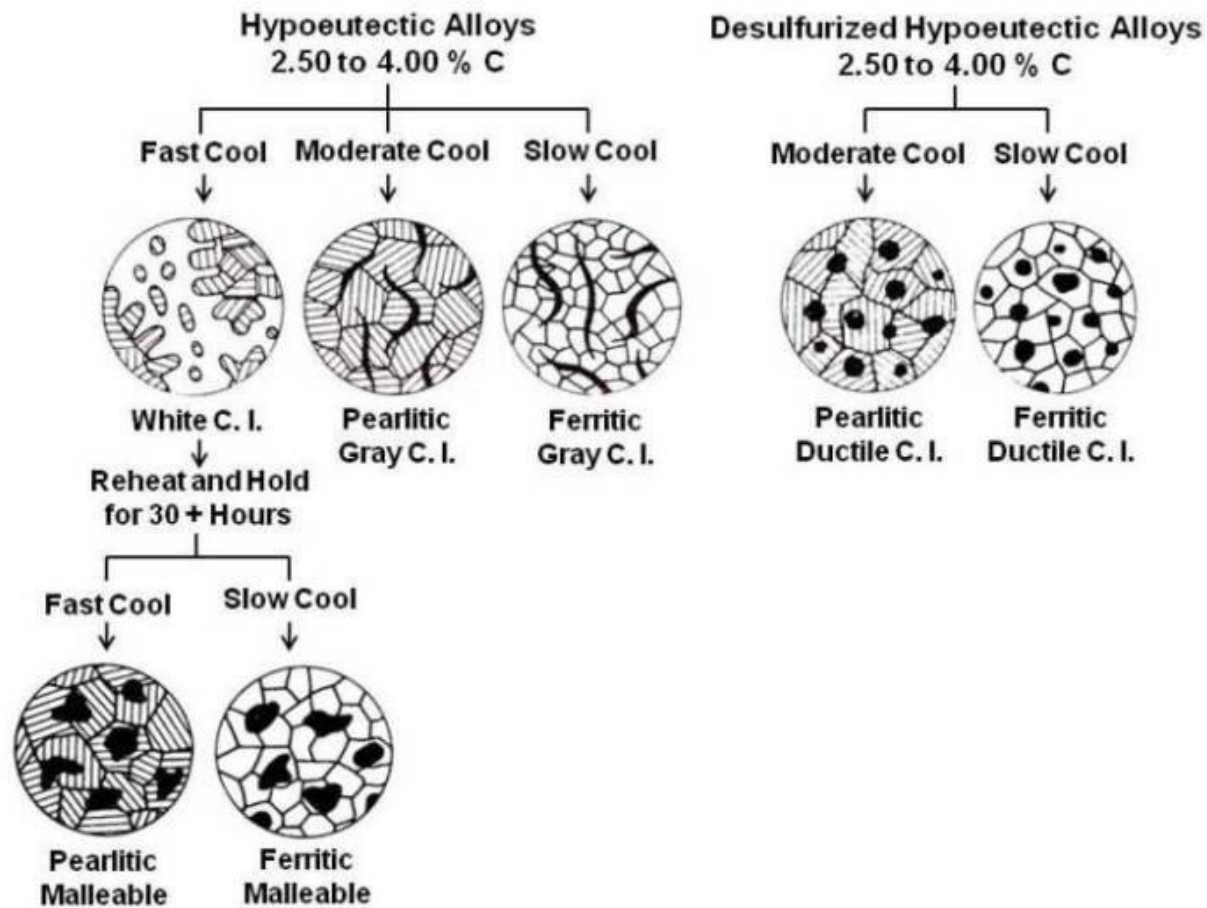
**Malleable iron**  
 $\alpha$  Fe and  
tempered  
graphite flakes

low melting  
point, castable,  
cheap; however,  
can be brittle.



**Compacted  
Graphite  
Iron**





**Summary of Cast Iron Microstructure**

1. White Cast Iron



2. Malleable Cast Iron



3. Gray Cast Iron

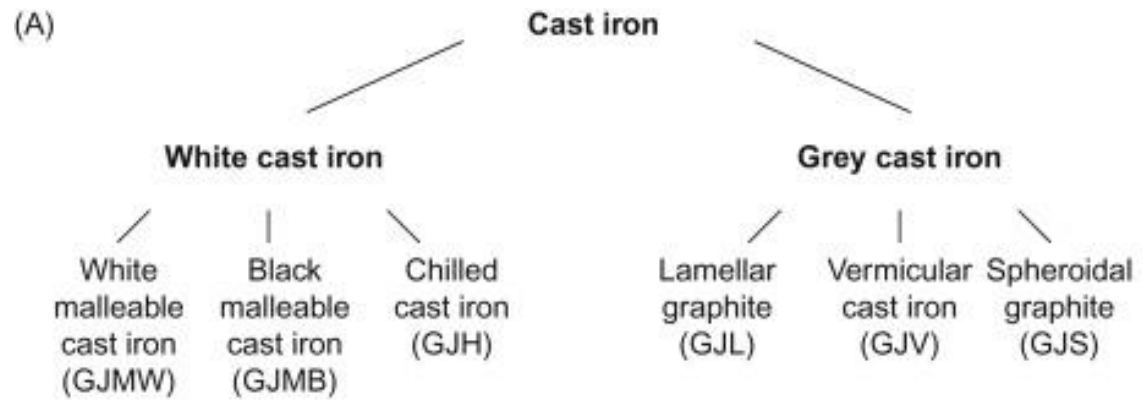


4. Chilled Cast Iron



## Classification of cast iron

	Type of cast iron	Graphite	Ductility	
•	White	No	No	Fast cooling rates
•	Gray	Flake	No	Slow cooling rates
•	Malleable	Anneal: flake to nodule	Yes	white iron + annealing heat treatment
•	Nodular	Nodular	Yes	additions made so that nodules of graphite form instead of flakes



(B)

