

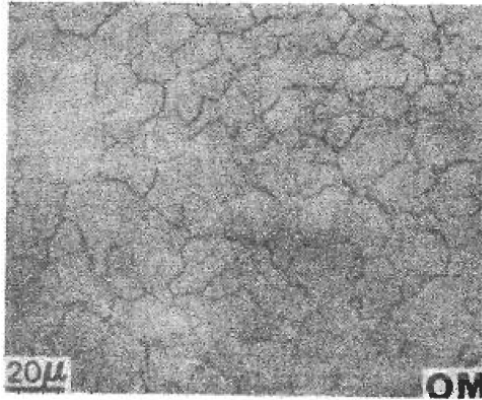
# فصل اول

## فازها و ساختارهای بلوری

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

اثر درصد کربن و عملیات حرارتی مختلف بر روی میکروساختار، استحکام تسلیم و انعطاف پذیری فولادهای کربنی ساده

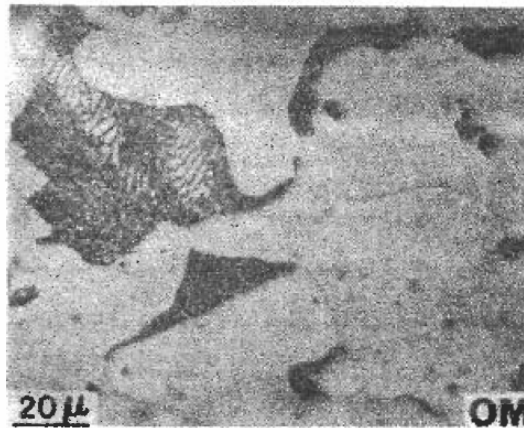
در  
شکل ۱-۱



الف - آهن خالص ، فریت  
 استحکام تسلیم MPa: ۱۰۳ (۱۵۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) انعطاف پذیری ۶۲ درصد

فصل اول

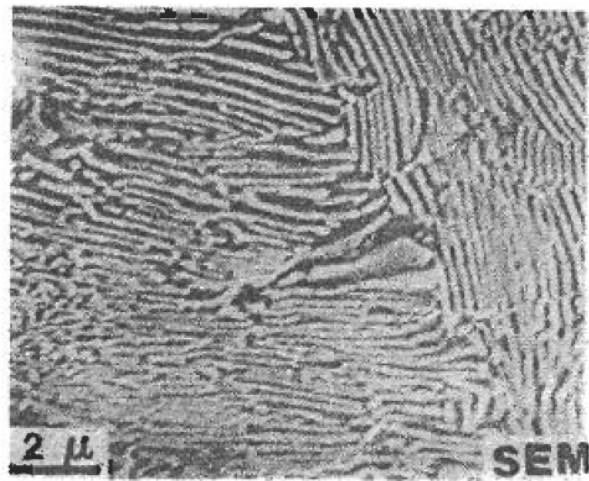
3



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

فصل اول

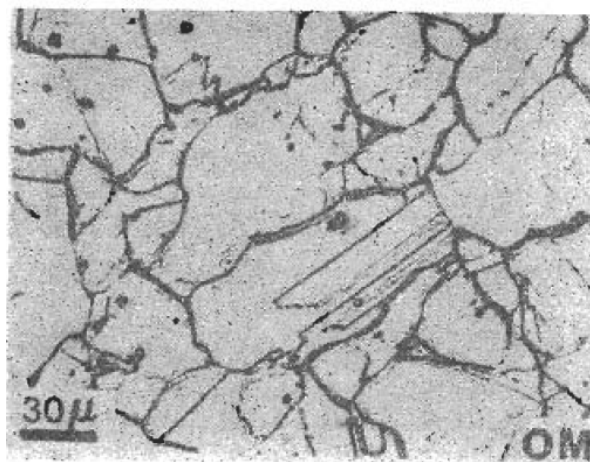
4



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

فصل اول

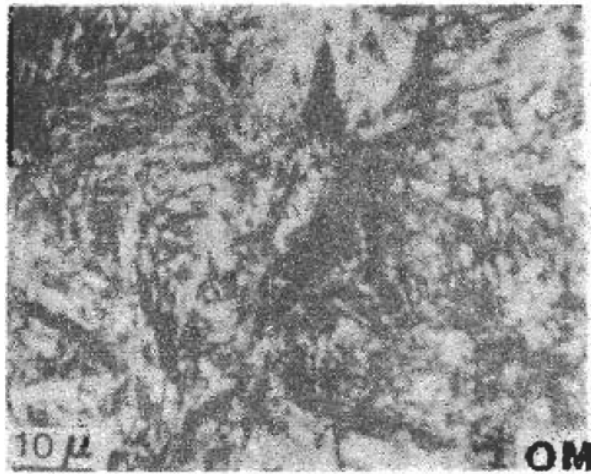
5



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

فصل اول

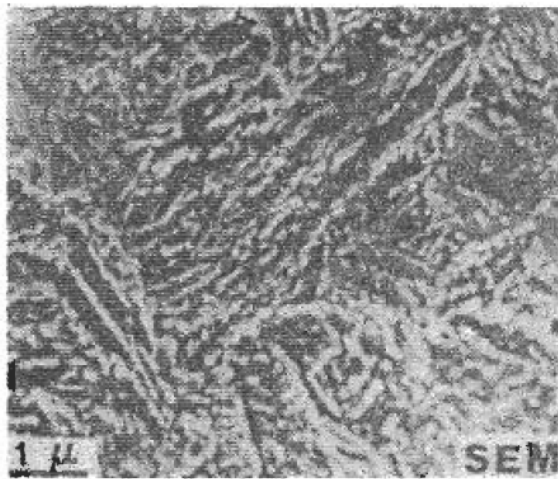
6



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

فصل اول

7



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 باز پخت شده  
 استحکام تسلیم ۹۶۶ MPa (۱۴۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع) انعطاف پذیری ۷ درصد

فصل اول

8

نکته قابل تاکید این است

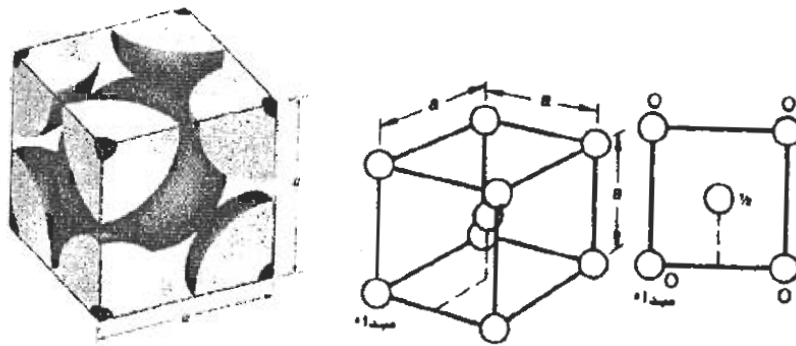
که، کاربرد وسیع فولادها ناشی از خواص کاملاً متنوع آنهاست که به کمک تغییر درصد کربن و / یا تغییر درصد عناصر آلیاژی و / یا تغییر نوع عملیات حرارتی امکانپذیر است. گستره وسیع خواص متنوع فولادها ناشی از نوع، مقدار، اندازه و توزیع فازهای مختلف (به عنوان مثال سمیتیت یا کاربید آهن (Fe<sub>3</sub>C)) است.

### 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 ۲/۸۶ نانگستریم (۰/۲۸۶ nm) است.



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

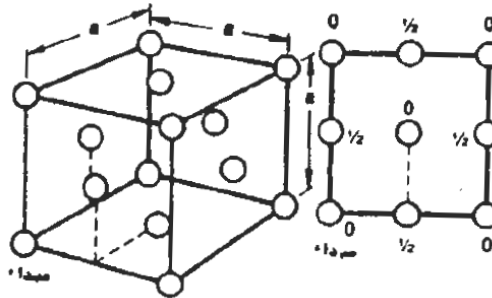
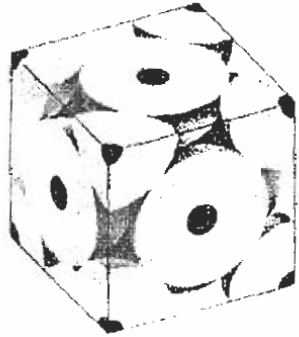
اتم مرکزی دارای ۸ اتم همسایه با نزدیکترین فاصله از آن است.

### ب: آهن گاما

دارای شبکه بلوری مکعب با سطوح مرکزدار (fcc)

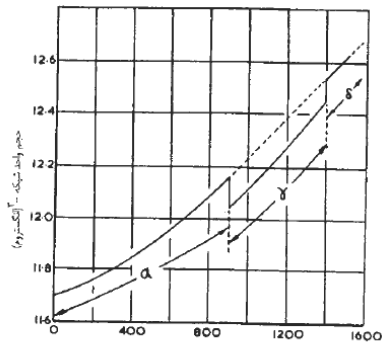
جمعاً ۴ اتم در واحد شبکه آهن گاما وجود دارد که دارای مختصات زیراند،  $(0, 0, 0)$  و

$(\frac{a}{4}, \frac{a}{4}, \frac{a}{4})$  و  $(\frac{a}{4}, \frac{a}{4}, 0)$  و  $(\frac{a}{4}, 0, \frac{a}{4})$ ، 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 ۱-۴ شبکه بلوری و آرایش اتمهای مکعب با سطوح مرکزدار (fcc)

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

### ج : آهن دلتا

آخرین فاز 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 می‌شود

### اثر کربن

اضافه کردن کربن به آهن اثرات بسیار مهمی بر روی فازهای یاد شده و همچنین دماهای تعادلی آنها دارد. از جمله مشخصه‌های بارز نمودار تعادلی آهن - کربن، عبارت از تفاوت توانایی آهنهای bcc و fcc در انحلال کربن است. کربن در فضای خالی بین اتمهای آهن در شبکه‌های بلوری bcc و fcc (به صورت بین‌نشینی) جای گرفته و به ترتیب محلولهای جامد بین‌نشینی فریت و آستنیت را به وجود می‌آورد.

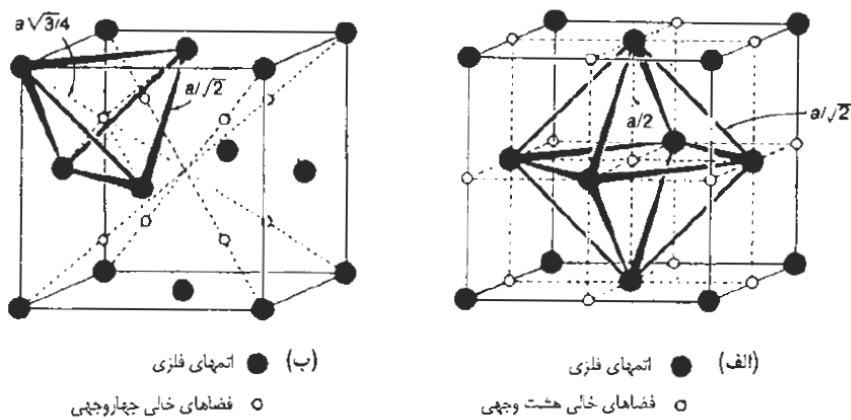


## الف : آستنیت

آستنیت عبارت از محلول جامد بین نشینی کربن در آهن با شبکه بلوری مکعبی با وجوه مرکزدار (fcc) است. کربن با وارد شدن در شبکه بلوری آهن آستنیتی، ناحیه تشکیل و پایداری آستنیت را در فولادها گسترش می دهد.

حداکثر حلالیت کربن در آستنیت، در  $1148$  درجه سانتیگراد است که به  $2/11$  درصد می رسد.

در شبکه بلوری fcc دو نوع فضای خالی بین نشینی وجود دارد که می توانند محل های مناسبی برای قرار گرفتن اتم های کربن باشند.



شکل ۱-۶ فضاهای خالی بین نشینی هشت وجهی (الف) و چهار وجهی (ب) در شبکه fcc

اتم کربن اگر در یک فضای هشت وجهی قرار گیرد، دارای ۶ اتم آهن در مجاور خود و اگر در یک فضای چهار وجهی قرار گیرد، دارای ۴ اتم آهن در مجاور خود خواهد بود.

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

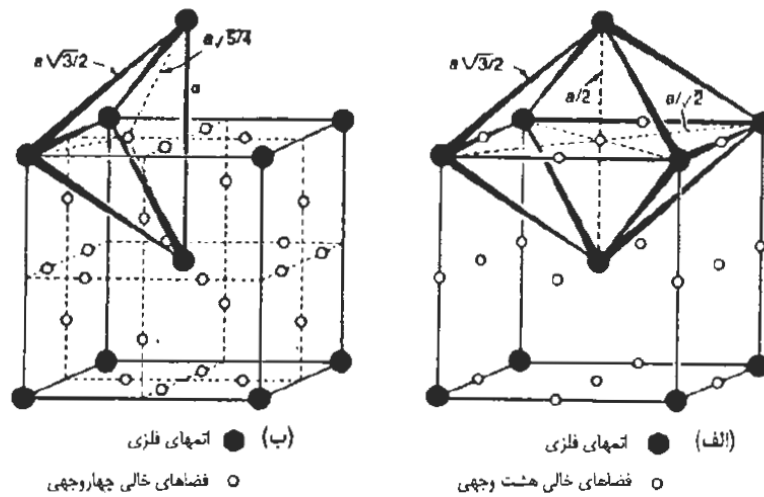
با توجه به اینکه شعاع اتمی کربن برابر با  $0.7$  انگسترم ( $0.7 \text{ nm}$ ) است، فضاهای هشت وجهی راحت‌تر از فضاهای چهاروجهی می‌توانند اتمهای کربن را در خود جای دهند. البته لازم به تذکر است که حتی برای نشست اتمهای کربن در فضاهای هشت وجهی نیز نیاز به انبساط شبکه‌ای است.

### ب : فریت

محللول جامد بین‌نشینی کربن در آهن با شبکه بلوری مکعب مرکزدار (bcc)، به فریت موسوم است. حلالیت کربن در آهن فریتی (bcc) به مراتب کمتر از حلالیت آن در آهن آستنیتی (fcc) است. به طوری که حد حلالیت کربن در فریت حداکثر  $0.02$  درصد در  $727$  درجه سانتیگراد است که با کاهش دما به طور پیوسته کاهش یافته و در دمای اتاق به مقدار ناچیزی خواهد رسید.

مشابه با آهن با شبکه fcc، در آهن با شبکه bcc نیز دو نوع فضای بین‌نشینی، یکی هشت‌وجهی و دیگری چهاروجهی وجود دارد که ممکن است اتمهای کربن را در خود جای

دهند



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

از آنجایی که فضاهای 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 ۰/۱۹ انگسترم (۰/۱۹ nm) و یک فضای چهاروجهی می‌تواند اتمی به شعاع ۰/۳۵ انگسترم (۰/۳۵ nm) را در خود جای دهد. لازم به اشاره است که فضاهای هشت وجهی در فریت متقارن نیستند (شکل ۸-۱) و بنابراین هنگامی که یک اتم کربن در فضاهای یاد شده

قرار گیرد، فقط اتمهای با فاصله  $\frac{a}{4}$  را شدیداً جابه‌جا می‌کند و نه اتمها با فاصله  $\frac{a}{\sqrt{2}}$  را

### مشخص

شده است که در فریت اتمهای کربن ترجیح می دهند که در فضاهای هشت وجهی 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.

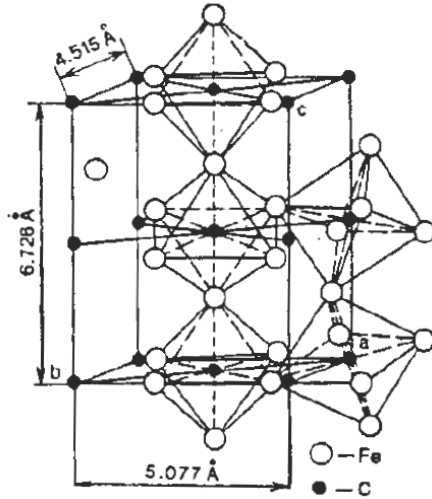
اگر اتمهای بسیار زیادی از کربن که در آستنیت موجودند، در اثر سریع سرد کردن در فضاهای هشت وجهی محبوس شوند در اثر انبساط و اعوجاج شدیدی که در جهت محورهای  $\langle 100 \rangle$  به وجود می آید شبکه بلوری مکعبی فریت به صورت مکعب مستطیل<sup>۱</sup> در می آید.

### 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 می شوند. از همین خاصیت استفاده شده و فولادهای فریتی و فولادهای آستنیتی تهیه می شود. فولادهای گروه اول حاوی مقدار  $11/5$  تا  $27$  درصد کرم بوده که گاهی مقداری منگنز، سیلیسیم و یا نیکل، آلومینیم، مولیبدن و یا تیتانیم نیز بدان اضافه می شود. آلیاژهای گروه دوم شامل  $16$  تا  $25$  درصد کرم بوده که مقداری نیز نیکل، منگنز و یا نیتروژن جهت پایدار شدن آستنیت در دمای اتاق به آنها اضافه می شود. شبکه بلوری فولادهای فریتی، مکعبی مرکزدار است، در حالی که شبکه بلوری فولادهای آستنیتی در دمای اتاق، مکعبی با سطح مرکزدار است.

### 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

فصل اول

25

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.

فصل اول

26

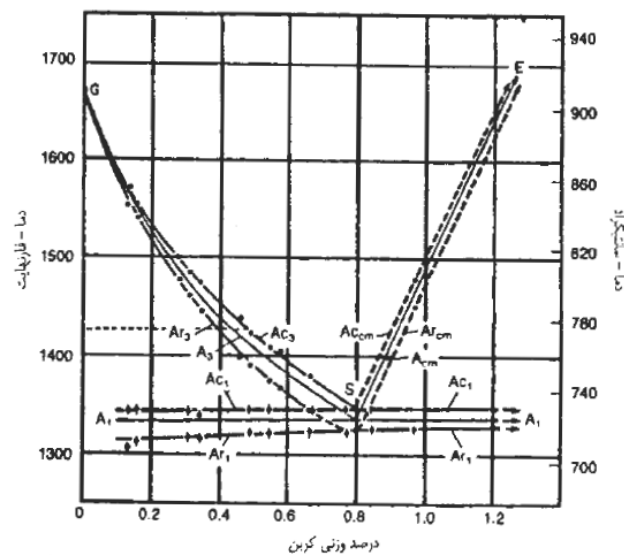
## دماهای بحرانی<sup>۱</sup>

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

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

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

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 آهنگ گرمایش و آهنگ سرمایش، بجز دماهای بحرانی تعادلی دو سری دیگر دماهای بحرانی در نمودار آهن - کربن وجود دارند که آنها را با علامتهای  $A_{cm}$ ،  $A_C$ ،  $A_3$ ،  $A_{cm}$ ،  $A_T$ ،  $A_3$  و  $A_T$  نشان می‌دهند. در شکل ۱-۱۰ شمایی از دماهای بحرانی تعادلی و ناتعادلی نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ دماهای بحرانی برای حالت تعادل (A)، سرمایش ناتعادلی (Ar)، و گرمایش ناتعادلی (Ac). آهنگ گرمایش و سرمایش برابر ۱۲۵/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 شده‌اند.

$$Ac_1 = 723 - 10/\%Mn - 16/9Ni + 29/1Si + 16/9Cr + 290As + 6/38W$$

$$Ac_3 = 910 - 203/C - 15/2Ni + 44/7Si + 104V + 31/5Mo + 13/1W$$

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

## توزیع و اثرات عناصر آلیاژی در فولادها

باید در نظر داشت که فولادها معمولاً

دارای عناصر آلیاژی و ناخالصیهایی اند که باید اثرات آنها را بر ساختار و خواص فازهای فریت، آستنیت و سمنتیت در نظر گرفت. مشارکت عناصر آلیاژی و ناخالصیها در ساختار و خواص فولادها معمولاً با قرار گرفتن آنها به جای اتمهای آهن (اگر اندازه اتمی آنها تقریباً برابر اندازه اتمی آهن باشد) و یا نشستن در فضاهای خالی بین نشینی (اگر اندازه اتمی آنها بسیار کوچکتر از اندازه اتمی آهن باشد) امکانپذیر است. در بعضی مواقع، اگر مقادیر عناصر آلیاژی بیشتر از حد حلالیت باشند، فازهایی بجز فازهای بحث شده در بالا به وجود می آیند. به عنوان مثال، در اثر اضافه کردن مقدار بسیار کمی کرم به آلیاژ آهن - کربن فاز  $M_{\gamma}C$  (M نشان دهنده مجموعه ای از کرم و آهن است) با ساختار بلوری سمنتیت به وجود آمده که تا ۸۹۰ درجه سانتیگراد پایدار است. با افزایش بیشتر کرم ابتدا  $M_{\gamma}C$  و سپس  $M_{\beta}C$  به وجود می آید.

از بررسی و مطالعه این جدول می توان نتیجه گرفت که نیکل نسبت به آهن تمایل کمتری به تشکیل کاربید داشته و عمدتاً در فریت حل می شود. سیلیسیم تا حدودی با اکسیژن ترکیب شده و تشکیل ناخالصی نافلزی می کند و در غیر این صورت، در فریت حل می شود. بدون توجه به درصد کربن فولاد، درصد زیادی از منگنز در فریت حل می شود. توانایی منگنز به تشکیل کاربید در حد بسیار کمی بیشتر از آهن است و منگیزی که تشکیل کاربید می کند، معمولاً به شکل  $(Fe, Mn)_3C$  وارد ساختار سمنتیت می شود.

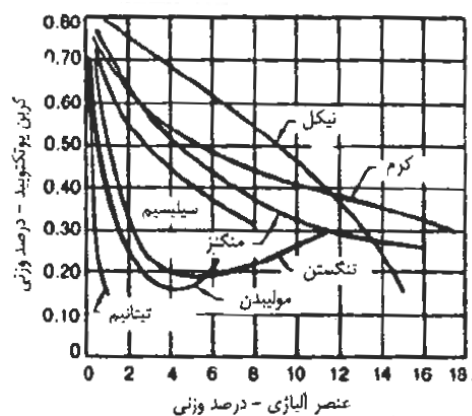
کرم بین فازهای فریت و کاربید توزیع می شود. توزیع کرم بستگی به درصد کربن و عناصر کاربیدساز دیگر در فولاد دارد. در صورتی که کربن به اندازه کافی در فولاد وجود داشته باشد و عناصر کاربیدساز بسیار قوی نظیر تیتانیم و کلمبیم وجود نداشته باشند، تنگستن و مولیبدن با کربن فولاد ترکیب شده، تشکیل کاربید می دهند.



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

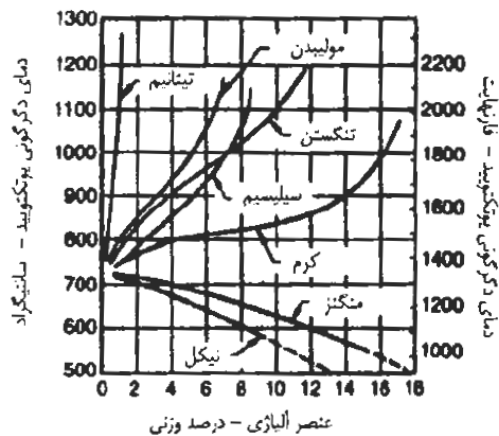
فولادها به صورت کاربید یافت می‌شوند. اگر در فولاد نیتروژن به اندازه کافی وجود داشته باشد، مقداری نیتريد کلمبیم نیز تشکیل می‌شود. آلومینیم با اکسیژن و نیتروژن فولاد ترکیب شده و به ترتیب تشکیل اکسید آلومینیم ( $Al_2O_3$ ) و نیتريد آلومینیم (AIN) می‌کند.

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 یوکتوئید را کاهش می‌دهند. در این رابطه، تیتانیم، تنگستن و مولیبدن بیشترین اثر را داشته، در حالی که نیکل و کرم، کمترین اثر را دارند.



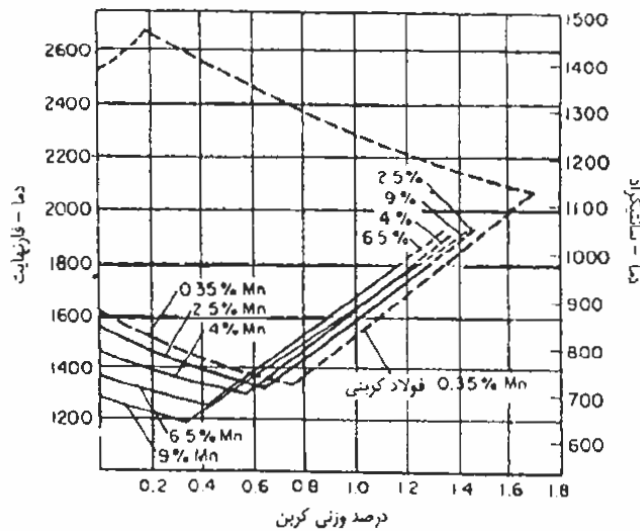
شکل ۱-۱۱ اثر عناصر آلیاژی جانشینی بر روی درصد کربن نقطه یوکتوئید فولاد

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



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

35

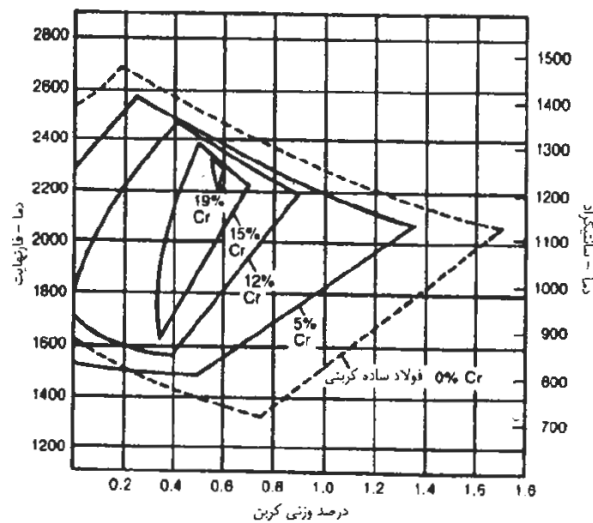


شکل ۱-۱۳ اثر منگنز بر روی وسعت ناحیه پایداری آستنیت در فولادهای کربنی

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

عناصر تشکیل دهنده کاربید، نظیر تنگستن، مولیبدن، تیتانیوم 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.



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

### 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

IA																	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
H																	B	C	N	O	F	He
Li	Be															Al	Si	P	S	Cl	Ar	
Na	Mg	III B	IV B	V B	VIB	VII B	VIII B	IB	IIB	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr					
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe					
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn					
Fr	Ra	Lr															(209)	(210)	(222)			
		Lanthanide Series										Actinide Series										
		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70							
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb							
		138.91	140.12	140.91	144.24	(145)	150.4	151.96	157.25	158.93	162.50	164.93	167.26	168.93	173.04							
		89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102							
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No							
		(227)	232.04	231.04	238.03	237.05	(244)	(243)	(247)	(247)	(251)	(254)	(257)	(258)	(259)							

نتایج حاصل از مطالعه کاربیدهای مختلف نشان می‌دهد که، عناصری که در جدول تناوبی بیشتر به سمت چپ باشند

تمایل بیشتری به تشکیل کاربید داشته و کاربیدهای پایدارتری را نیز تشکیل می‌دهند.

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

#### کاربیدهای گروه I



#### کاربیدهای گروه II (فازهای بین‌نشینی)

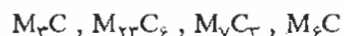


لیکن، کاربیدهای یاد شده نمی‌توانند به صورت آزاد در فولادها تشکیل شوند. تمامی کاربیدهای عناصر آلیاژی، حاوی مقداری آهن به صورت محلول‌اند. همچنین در صورت وجود عناصر آلیاژی کاربیدساز دیگر، این عناصر نیز در ترکیب و ساختار کاربید موجود وارد می‌شوند. به عنوان مثال، در فولاد کرم - منگنز، به جای کاربید کرم خالص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

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

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.

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

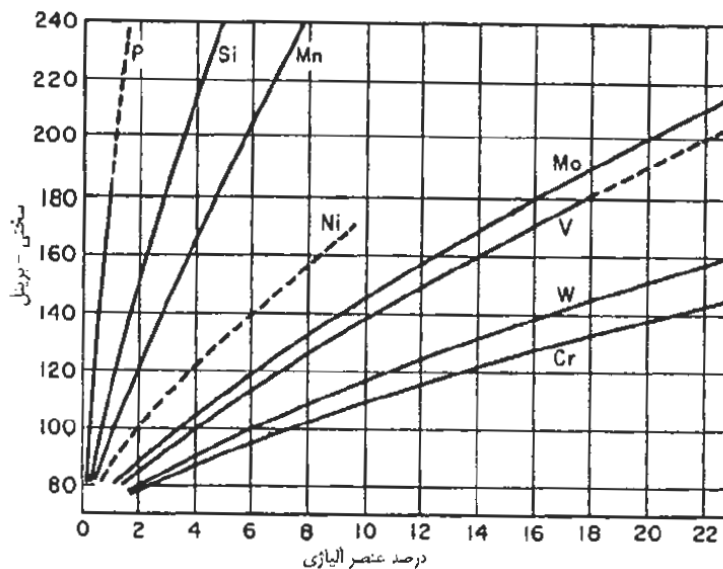
از جمله مشخصه‌های کاربیدهای

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 دماهای 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.

## اثرات عناصر آلیاژی بر روی فریت

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 با ارزشترین 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).