

صلى الله عليه وسلم

بسمه تعالی



دانشگاه شهید بهشتی
پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور
دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی

درس مقطع کارشناسی

عملیات حرارتی

Heat treatments

دکتر محمود سمیع زاده

m_sameezadeh@sbu.ac.ir

عنوان درس: عملیات حرارتی	۲ واحد	پیش نیاز (هم نیاز): متالورژی فیزیکی ۲
<p>هدف:</p> <p>(۱) آشنایی با انواع، کاربرد و فرایندهای عملیات حرارتی در تولید قطعات فلزی،</p> <p>(۲) مهارت در کاربرد صنعتی منحنی‌های سرد شدن هم‌دما و پیوسته</p> <p>(۳) مهارت اولیه در طراحی چرخه‌های عملیات حرارتی برای بهبود خواص قطعات فلزی</p>		
<p>رئوس مطالب:</p> <p>آنیل کردن، نرماله کردن، آبدهی، بازگشت، سخت کردن، تنش زدایی، همگن کردن، دگرگونی‌های پرلیتی، بینیتی و مارتنزیتی، کاربرد نمودارهای CCT و TTT در تغییر خواص فیزیکی - مکانیکی قطعات، محیط‌های آبدهی، سخت کاری سطحی، سختی پذیری، روش‌های گوناگون سخت کاری سطح (شعله‌ای، القایی و نفوذی) مانند کربن دهی، نیتروژن دهی، بازگشت، عیوب عملیات حرارتی</p>		



عنوان درس به فارسی: عملیات حرارتی			
عنوان درس به انگلیسی: Heat Treatment			
نوع درس: اختیاری	نوع واحد: نظری	تعداد واحد: ۲	تعداد ساعت: ۳۲
درس یا دروس پیش نیاز		متالورژی فیزیکی مواد ۲	
آموزش تکمیلی <input type="checkbox"/> سمینار <input type="checkbox"/> آزمایشگاه <input type="checkbox"/> کلاس تمرین <input type="checkbox"/>			
اهداف کلی درس: مطالعه اصول علمی عملیات حرارتی و سخت کاری بر روی مواد و فلزات به منظور استحکام بخشی و بهبود خواص سطحی آنها			
سر فصل درس: <ul style="list-style-type: none"> - مروری بر استحاله های پرلیتی، بینیتی و مارتنزیتی، نمودارهای TTT و CCT و نحوه رسم این نمودارها و کاربرد آنها - فرایندهای مختلف عملیات حرارتی شامل: آنیل کردن (ایزوترمال و کامل)، نرماله کردن، همگن کردن - تنش گیری، سختی و سختی پذیری و نقش عوامل مختلف بر روی خاصیت سختی پذیری فولادها - تمپر کردن، سختی ثانویه، ترد شدن فولاد استنیت و نقش آن در عملیات حرارتی - عملیات حرارتی ویژه نظیر آستمپرینگ، مارتمپرینگ، مارتمپرینگ اصلاح شده، آسفورمینگ، سخت کردن سطحی فولادها نظیر کربوره کردن، نیتریده کردن، کربونیتریده کردن - سخت کردن شعله ای و سخت کردن القایی، روش های جدید سخت کردن سطحی نظیر پوشش های دیفوزیونی، پرتوهای یونیو محیط های گرم کننده (اتمسفر کوره ها)، محیط های سردکننده - دماهای استنیت کردن، زمان استنیت کردن - معایب عملیات حرارتی، نحوه جلوگیری و برطرف کردن آنها - مثال هایی از عملیات حرارتی قطعات صنعتی و بررسی معایب احتمالی 			
			
روش ارزیابی: ارزشیابی مستمر <input type="checkbox"/> میان ترم <input type="checkbox"/> آزمون نهایی <input type="checkbox"/> آزمون نوشتاری <input type="checkbox"/> عملکردی <input type="checkbox"/> (سایر موارد مشخص نشده به اختیار استاد می باشد)			
فهرست منابع پیشنهادی: <ol style="list-style-type: none"> 1- "Heat treatment and Process Principles", G. Krauss, ASM International, 1990. 2- "Heat treatment of Ferrous Alloys", Brooks, McGraw-Hill. 3- "Heat treatment Guide", ASM, 1996. 			

Useful References:

- مبانی و کاربردهای عملیات حرارتی فولادها و چدن ها، دکتر محمدعلی گل‌عذار، ویرایش سوم، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۶.
- Steels: Heat Treatment and Processing Principles, George Krauss, ASM International, 1990.
- Steel Heat Treatment Handbook, Metallurgy and Technologies, George E. Totten, 2nd edition, CRC Press, 2007.
- ASM Handbook Volume 4: Heat Treating, ASM International Handbook Committee, 10th edition, 1991.
- Heat Treater's Guide, Practices and Procedures for Irons and Steels, Harry Chandler, ASM International, 1995.
- Other related References

بخش عمده مطالب و محتوای این ارائه، برگرفته از
کتاب مبانی و کاربردهای عملیات حرارتی فولادها و چدن ها
نوشته دکتر محمد علی گل‌عذار، می باشد.

پیش از ظهور متالورژی به عنوان یک علم، بسیاری از عملیات مربوط به سخت کردن فولادها، افزایش قابلیت شکل پذیری آنها و یا عملیات مشابه دیگر، در پرده‌ای از ابهام و اسرار، نهفته بود. به بیان دیگر، تبدیل یک قطعه آهن نرم و انعطاف پذیر به یک ابزار و یا اسلحه فلزی مقاوم، سخت و برنده مانند شمشیر، خنجر و یا چاقو، اساس و راز صنعتگران به حساب می آمد و هیچ نوع علم و دانشی برای روشن کردن چگونگی این تغییر حالت‌ها وجود نداشت. برای نمونه، مدت‌ها تصور می شد که کیفیت بسیار بالای فولادهای ساخته شده توسط صنعتگران شفیلد^۱ در انگلستان، ناشی از خواص سحرآمیز آب این شهر است. در همین رابطه، گفته شده است که زمانی یک تاجر از ایالت یورک در انگلستان، مقدار بسیار زیادی از آب شهر شفیلد را به قیمت گزافی به ژاپن صادر می کرد.

در گزارش‌ها آمده است که در زمان‌های بسیار قدیم، صنعتگران دمشق برای سخت کردن شمشیرهای فولادی، نخست آنها را حرارت می دادند، به طور کامل داغ می کردند و سپس در شکم برده‌های اسیر شده فرو می بردند، به شدت حرکت می دادند و می چرخاندند. از جمله عوامل اثرگذار در سخت شدن فولاد در این روش وحشتناک عملیات حرارتی می تواند جذب نیتروژن خون باشد. در یادداشت‌های مربوط به تاریخچه عملیات حرارتی آمده است که جیمز باوی^۲، سازنده اصلی چاقوی باوی^۳ در دوران غرب وحشی، به منظور سخت کردن چاقوهای خود، آنها را پس از حرارت دادن و سرخ شدن، نه مرتبه پشت سرهم در روغن پلنگ فرو می برده است.

در قرن نوزدهم میلادی، با پیشرفت سریع علم، عملیات حرارتی نیز به جرگه علوم پیوست. جهش اولیه و ناگهانی که در این زمینه به وقوع پیوست، ناشی از مطالعه‌های انجام‌شده توسط میکروسکوپ نوری بود. در این زمان با تغییرهایی که در میکروسکوپ نوری داده شد، "روش متالوگرافی" برای دیدن و مطالعه ساختار فلزها و آلیاژها ارایه شد. این روش که شامل پولیش و حکاکی با محلول شیمیایی مناسب و دیدن ساختار سطح نمونه توسط میکروسکوپ نوری است، هنوز هم یکی از مهم‌ترین ابزارهای دانشمندان متالورژی برای مطالعه و تعیین ریزساختار فلزها و آلیاژها محسوب می‌شود.

پیشرفت‌های زیاد نظریه‌های عملیات حرارتی پس از دهه ۱۹۲۰ میلادی، مدیون دستگاه تجزیه‌کننده با پرتوی ایکس^۱ است. به کمک این دستگاه مطالعه‌های عمیق در رابطه با طبیعت، سازوکار و سینتیک دگرگونی‌های حالت جامد انجام شد. در مدت دو یا سه دهه، اطلاعات بسیار و جامعی در رابطه با قوانین اثرهای حرارتی روی ریزساختار و خواص فلزها و آلیاژها به دست آمد. در اواخر دهه ۱۹۵۰ میلادی، میکروسکوپ‌های الکترونی از نوع عبوری^۲ برای مطالعه تغییرهای ریزساختار درونی در اثر عملیات حرارتی و سپس روش‌های جدید به منظور تجزیه در مقیاس میکروسکوپی^۳ مانند استفاده از میکروسکوپ‌های اوژه^۴ به طور گسترده‌ای به کار گرفته شدند.

در مرحله جدید مطالعه‌ها، اثرها و نقش عیب‌های شبکه‌های بلوری در فلزها روی چگونگی تغییرهای ریزساختار درونی در اثر عملیات حرارتی مختلف بررسی شد. اهمیت این موضوع با توجه به این نکته مشخص می‌شود که در بسیاری از موارد، عیب‌های بلوری، اثرهای بسیار شدید و حتی در برخی موارد، اثرهای تعیین‌کننده‌ای روی سازوکار تغییرهای ساختار و در نتیجه، تغییرهای خواص در ضمن عملیات حرارتی دارند.

۱-X-ray analyser

۲-Transmission electron microscopy

۳-Microanalysis

۴-Auger electron microscopy

فهرست مطالب (بر اساس کتاب دکتر گل‌عذار)

- ۱- فازها و ساختارهای بلوری
- ۲- فازها و ساختارهای تعادلی
- ۳- مارتنزیت و بینیت
- ۴- نمودارهای زمان - دما - دگرگونی
- ۵- عملیات حرارتی برای تشکیل ساختارهای تعادلی
- ۶- سختی و سختی پذیری
- ۷- آستنیت در فولادها
- ۸- بازگشت
- ۹- سخت کردن سطحی

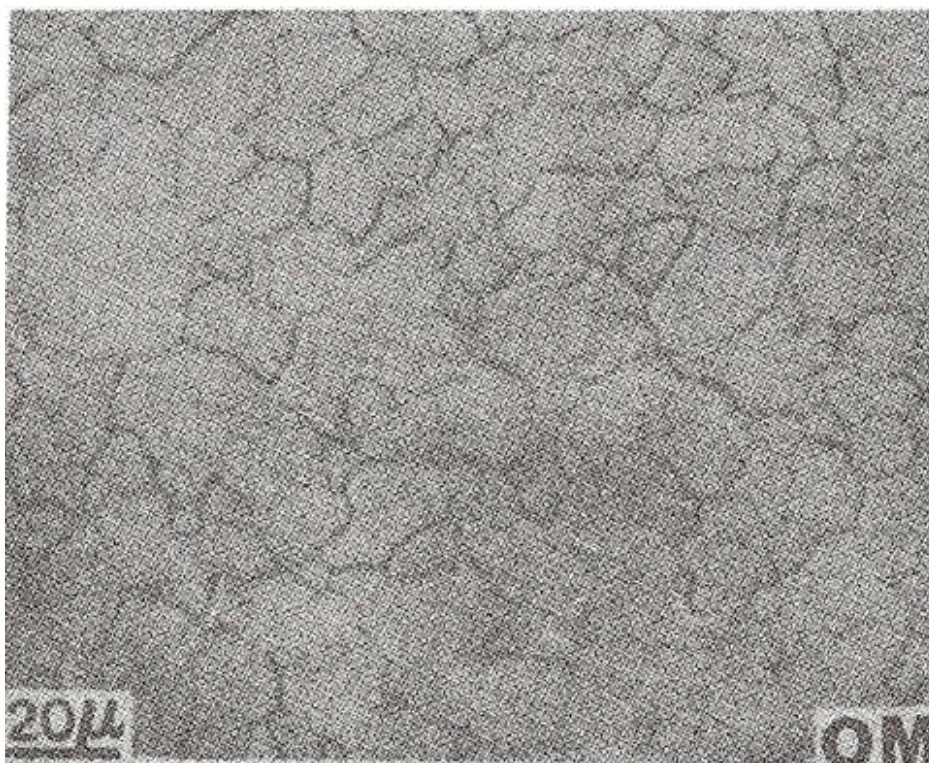
♦

♦

فصل اول - فازها و ساختارهای بلوری

کاربرد گسترده فولادها ناشی از خواص بطور کامل متنوع آنها می‌باشد که به کمک تغییر درصد کربن و یا تغییر درصد عناصر آلیاژی و یا تغییر نوع عملیات حرارتی امکان‌پذیر است.

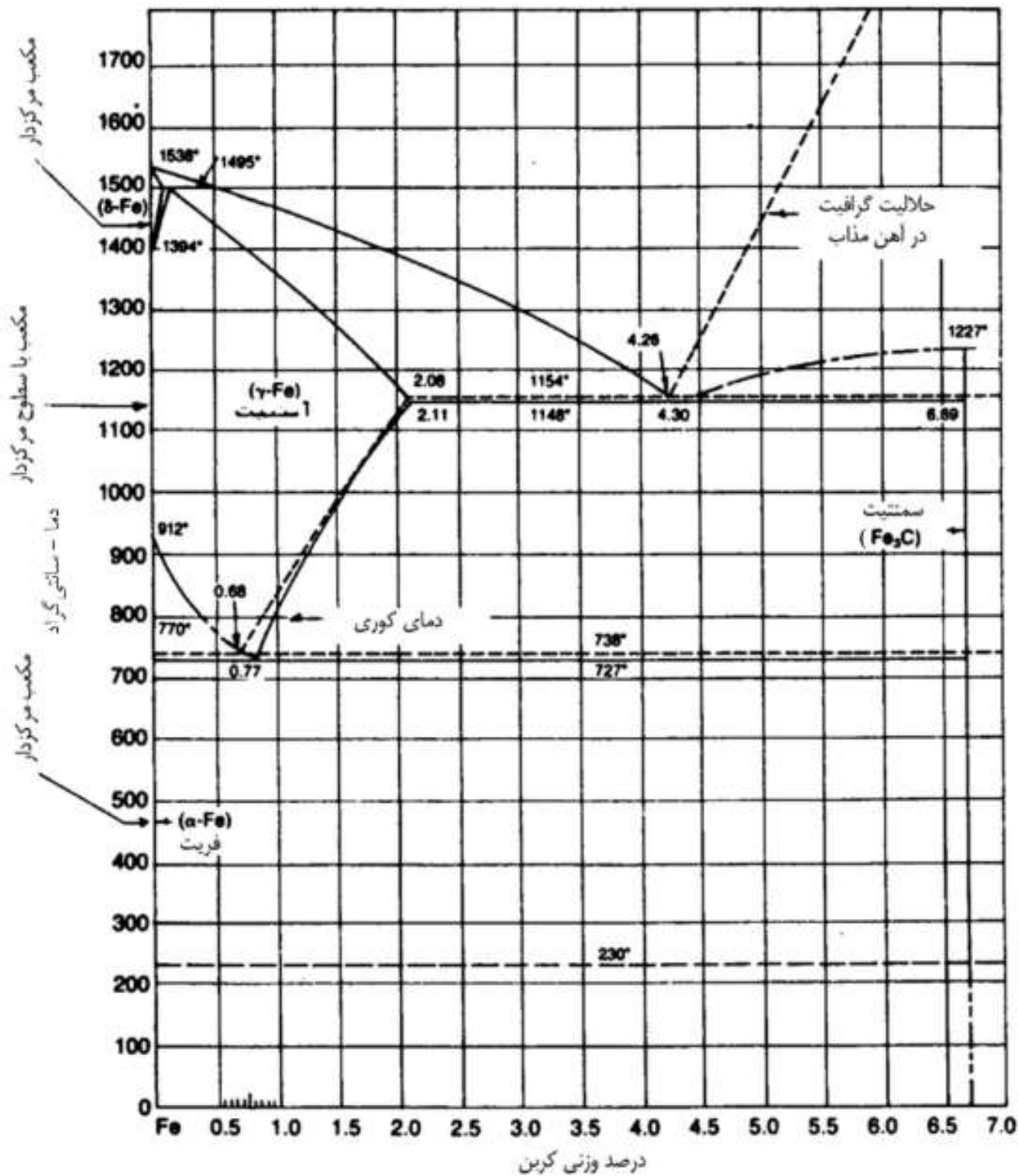
گستره وسیع خواص متنوع فولادها ناشی از نوع، مقدار، اندازه و توزیع فازهای مختلف می‌باشد.



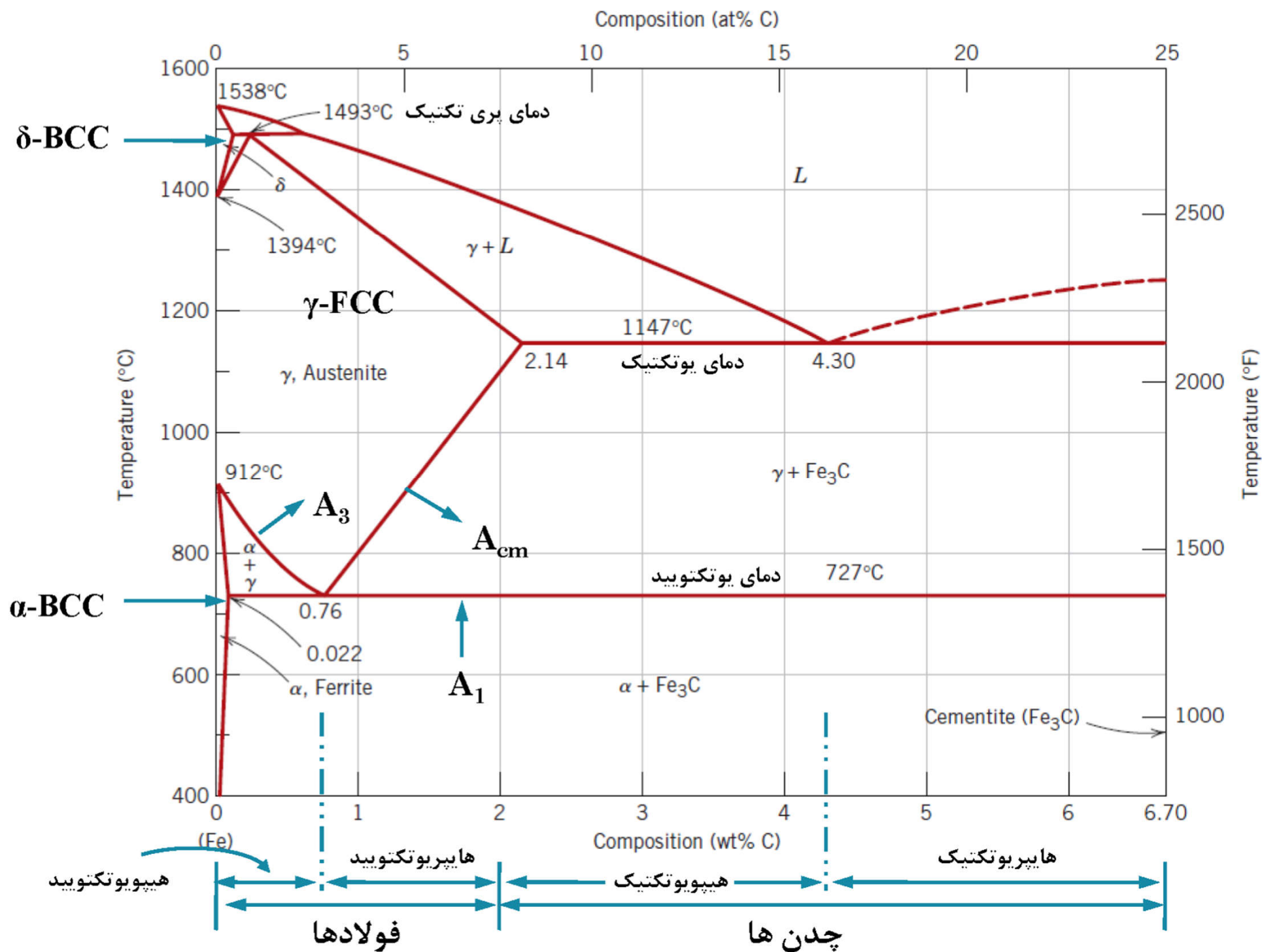
الف - آهن خالص، فریت

استحکام تسلیم ۱۰۳ MPa (۱۵۰۰۰ psi) و انعطاف‌پذیری ۶۲ درصد

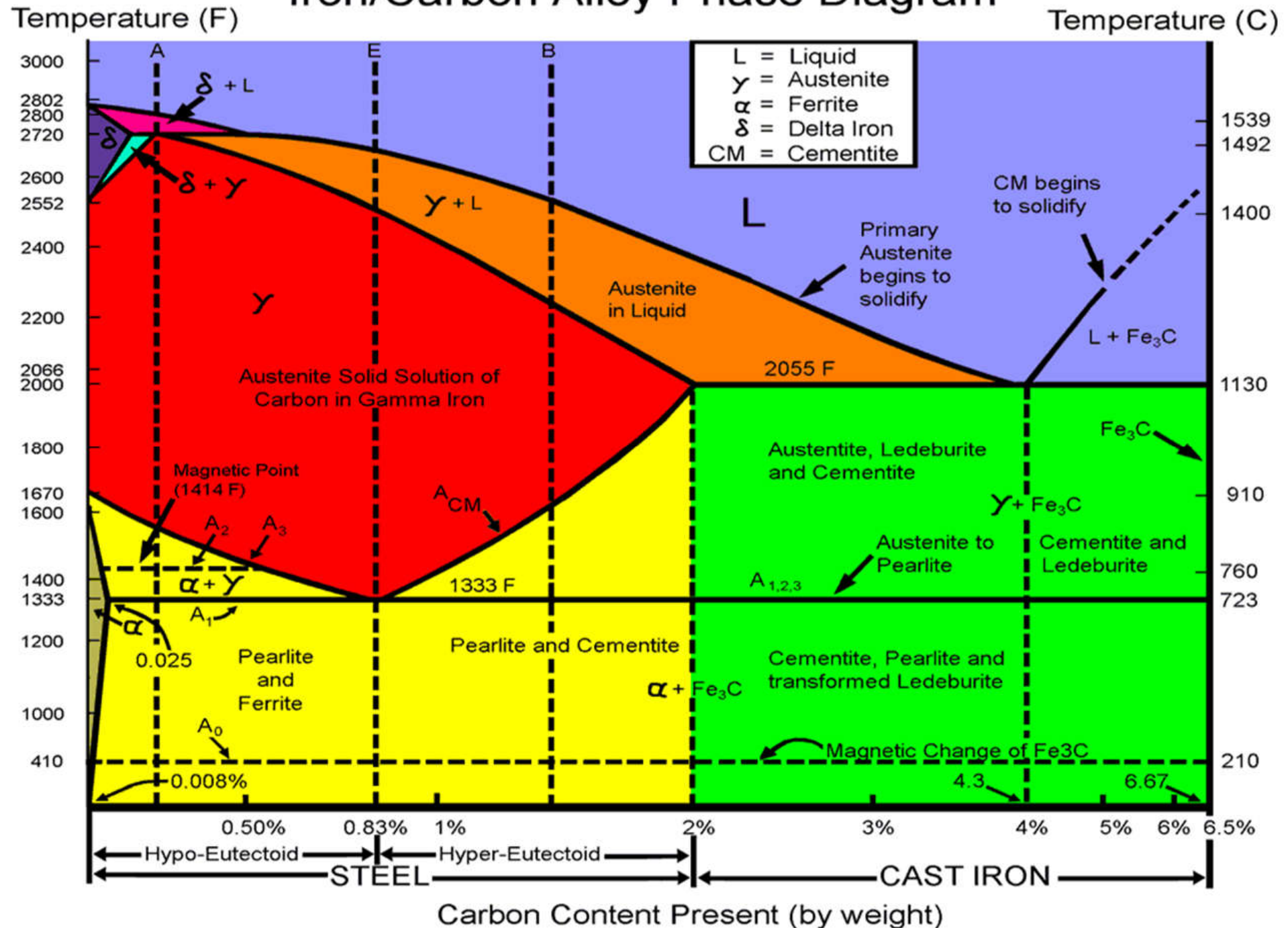
فصل اول - فازها و ساختارهای بلوری نمودار تعادلی آهن-کربن

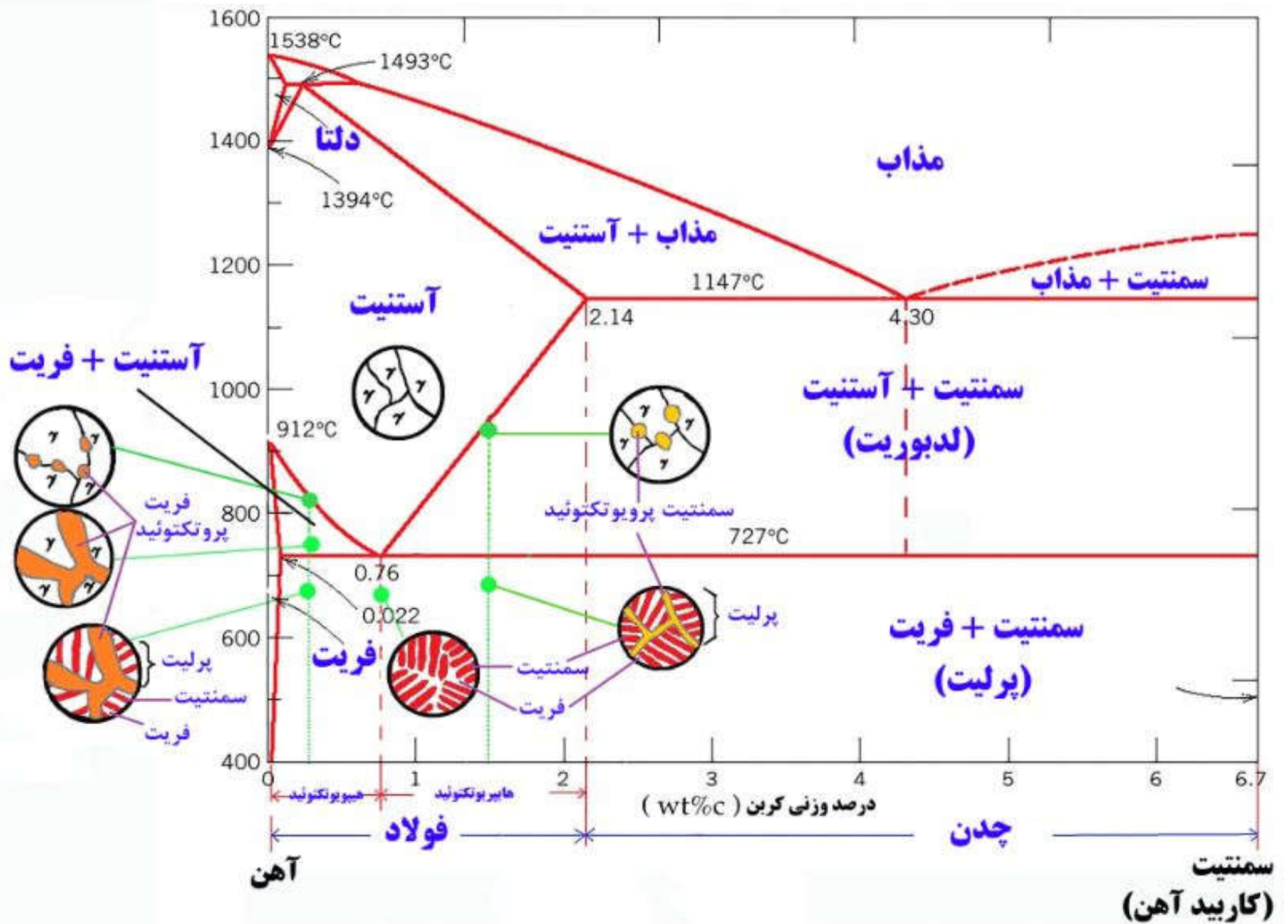


خطوط ممتد نمودار آهن - سمنتیت
خطوط منقطع نمودار آهن - گرافیت



Iron/Carbon Alloy Phase Diagram





❑ فولادها (Steels) آلیاژهای آهن-کربن و عناصر دیگرند، که دارای کم‌تر از دو درصد کربن هستند.

❑ آلیاژهایی که بیش از دو درصد کربن داشته باشند، به چدن (Cast Iron) موسوم‌اند.

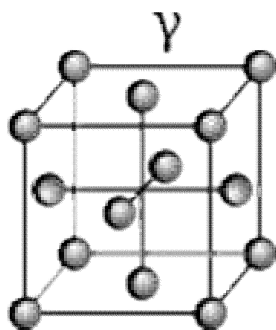
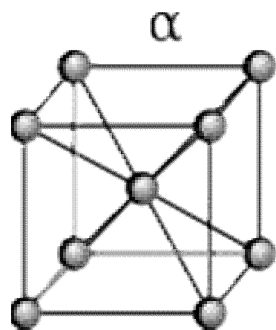
❑ گرافیت (G) حالتی از کربن می‌باشد که بسیار پایدارتر از سمنتیت (Fe_3C) است. در صورتی که به سمنتیت فرصت داده شود، سرانجام به گرافیت تجزیه خواهد شد.

❑ در نمودار تعادلی آهن-کربن، کربن برحسب درصد وزنی است. برای تبدیل درصد وزنی به درصد اتمی می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\text{درصد اتمی کربن} = \frac{(\text{وزن اتمی کربن}) / (\text{درصد وزنی کربن})}{(\text{وزن اتمی آهن}) / (\text{درصد وزنی آهن}) + (\text{وزن اتمی کربن}) / (\text{درصد وزنی کربن})}$$

❑ نمودار تعادلی آهن-کربن فقط در فشار یک اتمسفر صادق است. در فشارهای بیش‌تر، فصل مشترک‌های بین نواحی مختلف فازی تغییر مکان می‌دهند و فازهای جدیدی نیز بوجود می‌آیند.

ساختارهای بلوری و خواص آهن خالص

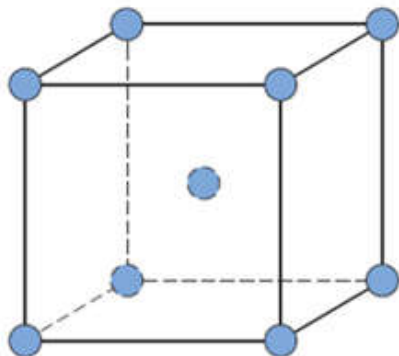
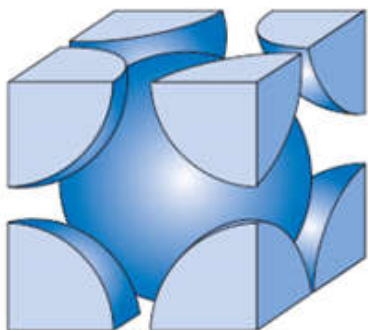


آهن عنصری چندشکلی (Polymorphism) است، بدین معنی که در فشار یک اتمسفر با افزایش دما، شبکه بلوری آن تغییر می‌کند. (آلفا، گاما، دلتا)

* آهن آلفا

آهن آلفا یا آهن فریتی در نمودار تعادلی آهن-کربن از صفر مطلق تا ۹۱۲ درجه سانتی‌گراد پایدار است و شبکه بلوری آن مکعب مرکزدار (bcc) است. تمام اضلاع آن مساوی (به طول a) هستند. در هر واحد شبکه دو اتم وجود دارد که عبارتند از: اتم مرکزی با مختصات $(\frac{a}{2}, \frac{a}{2}, \frac{a}{2})$ و اتم‌های موجود در گوشه‌ها با مختصات $(0,0,0)$.

پارامتر شبکه آهن آلفا در دمای اتاق، $\frac{2}{86}$ آنگسترم است. قطرهای اصلی واحد شبکه bcc در جهتهای $\langle 111 \rangle$ هستند. اتم مرکزی دارای هشت اتم همسایه با نزدیک‌ترین فاصله از آن است. فاصله مراکز اتم‌های یادشده از مرکز اتم مرکزی برابر با نصف قطر اصلی یا $\frac{\sqrt{3}}{2}a$ است.



* آهن گاما

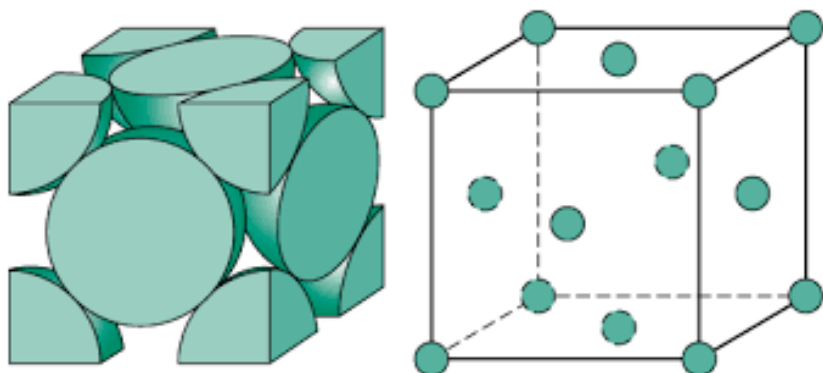
آهن گاما یا آهن آستنیتی در نمودار تعادلی آهن-کربن از دما ۹۱۲ تا ۱۳۹۴ درجه سانتی‌گراد پایدار است و شبکه بلوری آن مکعب با سطوح مرکزدار (fcc) است.

در مجموع چهار اتم در واحد شبکه آهن گاما وجود دارند که دارای مختصات $(0,0,0)$ ، $(0, \frac{a}{2}, \frac{a}{2})$ ، $(\frac{a}{2}, 0, \frac{a}{2})$ و $(\frac{a}{2}, \frac{a}{2}, 0)$ هستند.

پارامتر شبکه آهن گاما برابر با $\frac{3}{56}$ آنگسترم و بزرگ‌تر از پارامتر شبکه آهن آلفا است، اما ساختار بلوری با چگالی زیاد و وجود چهار اتم در واحد شبکه آهن گاما باعث شده است که چگالی آن از چگالی آهن آلفا بیش‌تر شود. در حقیقت تفاوت بین ضریب تراکم بین دو شبکه باعث می‌شود که تبدیل آهن گاما به آهن آلفا همراه با افزایش حجم باشد.

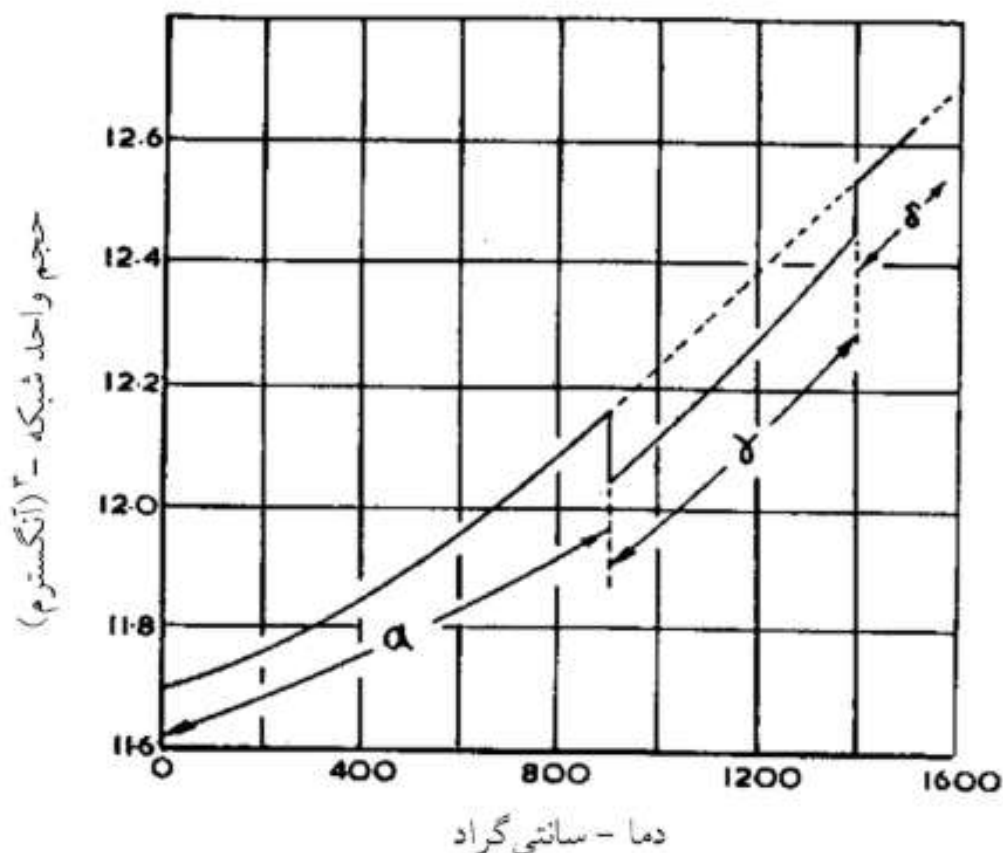
در شبکه بلوری fcc جهت‌ها با چگالی زیاد، منطبق بر قطرهای صفحه‌های جانبی یا جهت‌های $\langle 110 \rangle$ هستند. در اینجا ۱۲ اتم در همسایگی یکدیگر به‌صورتی قرار دارند که فاصله مرکز اتم‌های همسایه از

یکدیگر برابر با $\frac{\sqrt{2}}{2}a$ است.



* آهن دلتا

آخرین فازی که ممکن است، در آهن خالص وجود داشته باشد، آهن دلتا با شبکه bcc می باشد و از نظر بلورشناسی مشابه آهن آلفا است. هم چنان که شکل ۱-۵ نشان می دهد، افزایش حجم ناشی از تبدیل آهن گاما به آهن دلتا، درست برابر با افزایش حجم ناشی از تبدیل آهن گاما به آهن آلفاست. آهن دلتا فقط در دماهای نزدیک نقطه ذوب آهن تشکیل می شود (شکل ۱-۲).



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

نکته دیگری که در رابطه با آهن خالص باید به آن اشاره شود، خاصیت آهن ربایی آن است. آهن تا 770° درجه سانتی گراد خاصیت آهن ربایی دارد و در بیشتر از این دما خاصیت آهن ربایی خود را از دست می دهد. این دما به دمای کوری^۱ موسوم است (شکل ۱-۲). آهن با شبکه بلوری bcc که خاصیت آهن ربایی ندارد (دماهای 770° – 912° درجه سانتی گراد)، به آهن بتا (β) معروف است. بنابراین به صورت خلاصه، آهن آلفا خاصیت آهن ربایی دارد، در حالی که آهن های بتا و گاما خاصیت آهن ربایی ندارند.

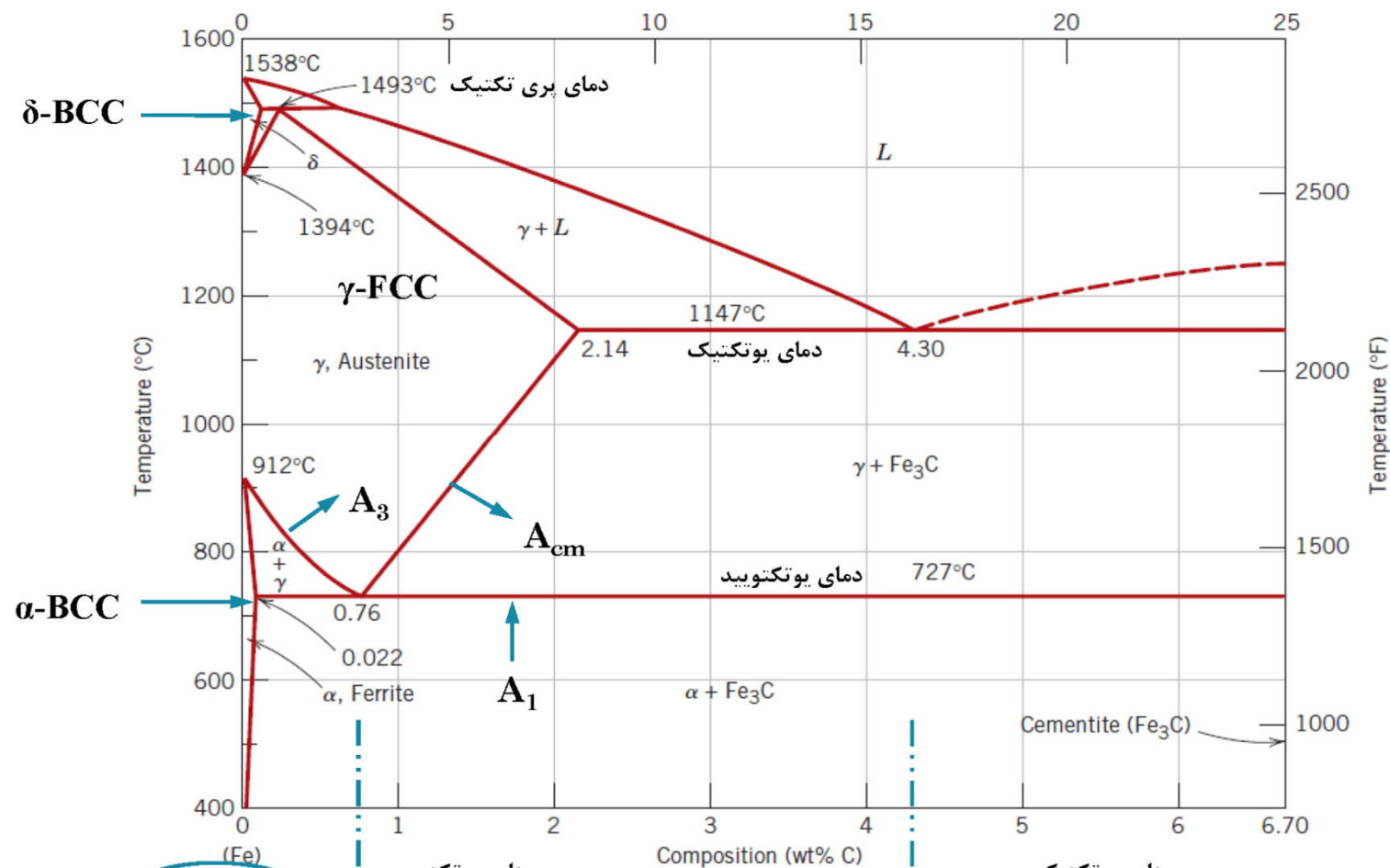
1 Curie Temperature

Allotropes of iron

WIKIPEDIA

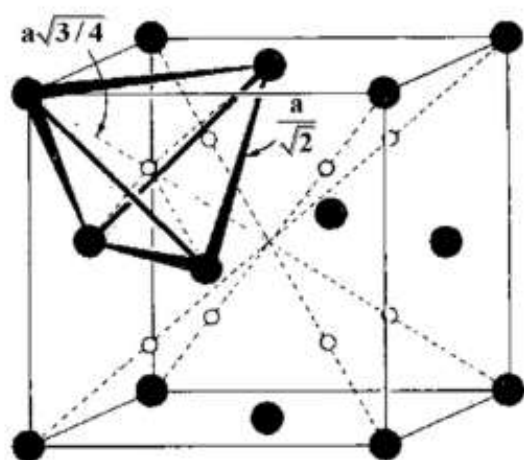
At [atmospheric pressure](#), three [allotropic](#) forms of [iron](#) exist, depending on temperature: [alpha iron \(\$\alpha\$ -Fe, ferrite\)](#), [gamma iron \(\$\gamma\$ -Fe, austenite\)](#), and [delta iron \(\$\delta\$ -Fe\)](#). At very high pressure, a fourth form exists, [epsilon iron \(\$\epsilon\$ -Fe, hexaferrum\)](#).

اضافه کردن کربن به آهن اثرهای بسیار مهمی روی فازهای یادشده و همچنین دماهای تعادلی آنها دارد. از جمله ویژگی‌های بارز نمودار تعادلی آهن - کربن، تفاوت توانایی آهن‌های bcc و fcc در انحلال کربن است. کربن در فضاهای خالی بین اتم‌های آهن در شبکه‌های بلوری bcc و fcc (به صورت بین‌نشینی) قرار می‌گیرد و به ترتیب، محلول‌های جامد بین‌نشینی فریت و آستنیت را به وجود می‌آورد. از جمله ویژگی‌های دیگر نمودار تعادلی آهن - کربن، وجود کاربید آهن یا سمیتیت (Fe_3C) است. سمیتیت زمانی به وجود می‌آید که کربن فولاد، بیشتر از حد حلالیت کربن در فریت یا آستنیت باشد. در



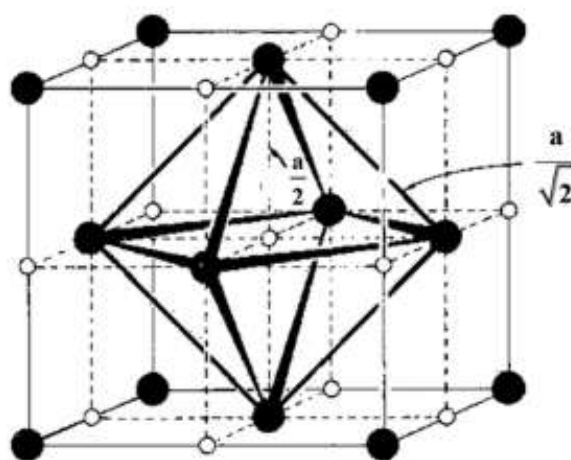
آستنیت محلول جامد بین‌نشینی کربن در آهن با شبکه بلوری fcc است. کربن با وارد شدن به شبکه بلوری آستنیتی، ناحیه تشکیل و پایداری آستنیت را افزایش می‌دهد. بیش‌ترین حد حلالیت کربن در آستنیت، در دمای ۱۱۴۸ درجه سانتی‌گراد است که به ۲/۱۱ درصد وزنی می‌رسد.

در شبکه بلوری fcc دو نوع فضای خالی بین‌نشینی وجود دارد، این فضاها به هشت‌وجهی (Octahedral) و چهاروجهی (Tetrahedral) موسوم‌اند. در آستنیت با فرض اینکه اتم‌های آهن، کروی و در تماس با یکدیگر باشند، یک فضای هشت‌وجهی قادر است اتمی به شعاع ۰/۵۲ انگسترم (با ۶ اتم آهن مجاور) و یک فضای چهاروجهی اتمی به شعاع ۰/۲۸ انگسترم (با ۴ اتم آهن مجاور) را در خود جای دهد.



(ب) ● اتم‌های فلزی

○ فضاهای خالی چهاروجهی



(الف) ● اتم‌های فلزی

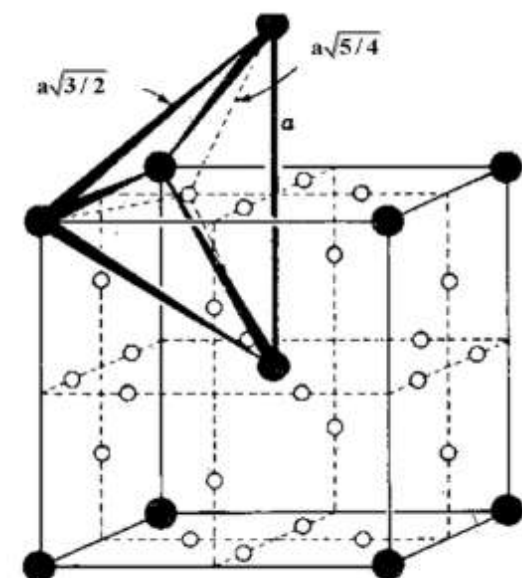
○ فضاهای خالی هشت‌وجهی

با توجه به اینکه شعاع اتمی کربن ۰/۷ انگسترم (۰/۰۷ nm) می‌باشد، در فضاها هشت وجهی راحت‌تر قرار می‌گیرد هر چند که باز هم نیاز به انبساط شبکه‌ای می‌باشد.

*فریت

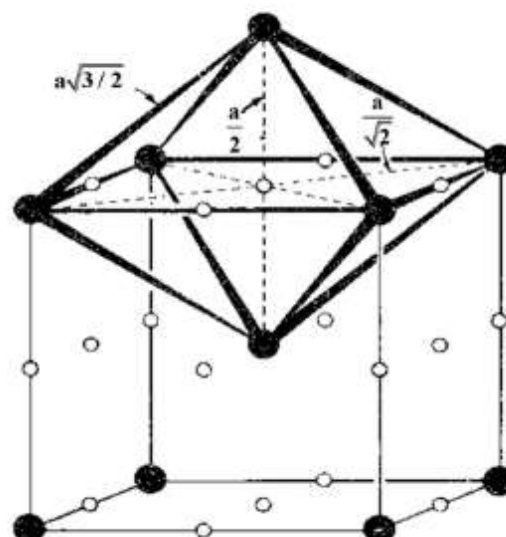
محلول جامد بین‌نشینی کربن در آهن با شبکه بلوری bcc به فریت موسوم است. حد حلالیت کربن در فریت حداکثر ۰/۰۲ درصد وزنی در ۷۲۷ درجه سانتی‌گراد است که با کاهش دما بطور پیوسته کاهش می‌یابد.

در آهن با شبکه bcc نیز دو نوع فضای بین‌نشین هشت‌وجهی (Octahedral) و چهاروجهی (Tetrahedral) وجود دارند. در فریت یک فضای هشت‌وجهی می‌تواند اتمی به شعاع ۰/۱۹ آنگسترم و یک فضای چهاروجهی اتمی به شعاع ۰/۳۵ آنگسترم را در خود جای دهد.



(ب) ● اتم‌های فلزی

○ فضاهای خالی چهاروجهی



(الف) ● اتم‌های فلزی

○ فضاهای خالی هشت‌وجهی

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

فضاهای هشت وجهی در فریت متقارن نیستند (شکل ۱-۸) و بنابراین هنگامی که یک اتم کربن در این فضا قرار گیرد، فقط اتم‌های با فاصله $\frac{a}{4}$ را به شدت جابه‌جا می‌کند و نه اتم‌ها با فاصله $\frac{a}{\sqrt{2}}$ را. مشخص شده است که در فریت، اتم‌های کربن ترجیح می‌دهند، در فضاهای هشت وجهی قرار گیرند و بنابراین، انبساط زیادی در شبکه، در جهت محوره‌های $\langle 100 \rangle$ به وجود می‌آورند. از آنجایی که در فریت، تعداد محدودی از اتم‌های کربن می‌توانند در شبکه باقی بمانند (حل شوند)، شبکه بلوری 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 محوره‌های $\langle 100 \rangle$ به وجود می‌آید، شبکه بلوری مکعبی فریت به شکل مکعب مستطیل^۱ درمی‌آید. این شبکه بلوری، از جمله ویژگی‌های فازی موسوم به مارتنزیت^۲ است که شرایط تشکیل و خواص آن، در فصل‌های بعدی بحث خواهند شد.

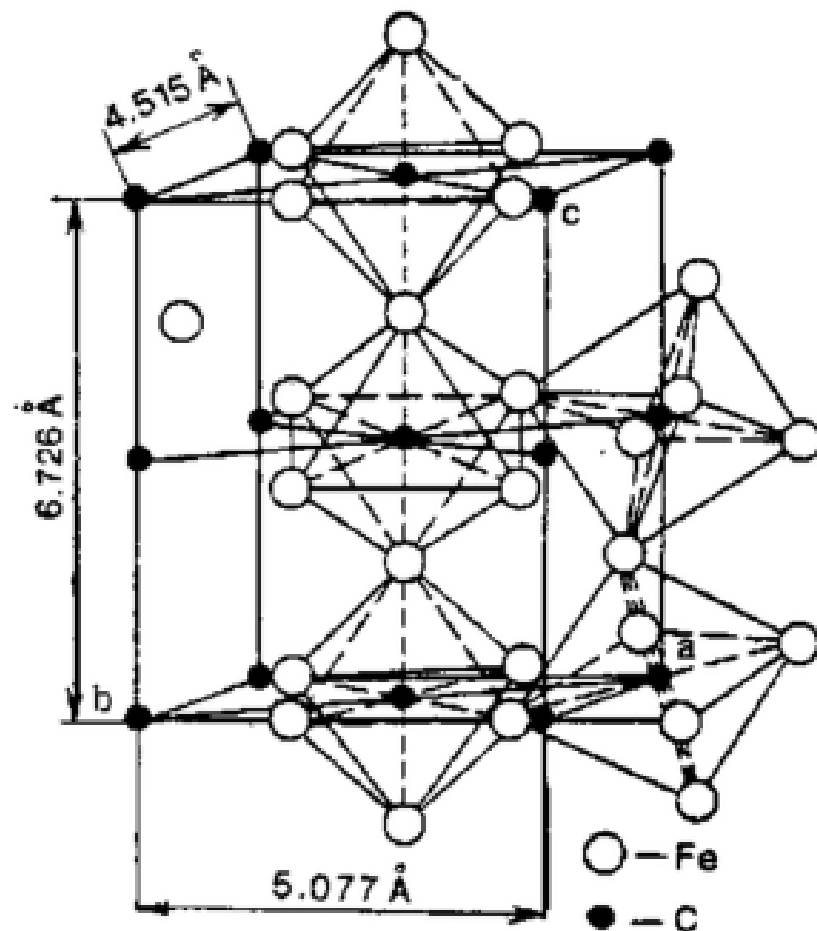
در رابطه با انحلال بین‌نشینی کربن در فضاهای خالی هشت وجهی و چهار وجهی، توجه به این نکته لازم است که از یک طرف، اتم‌های کربن فضاهای خالی با قطر بزرگ‌تر را ترجیح می‌دهند و از طرف دیگر تمایل دارند، در فضاهای خاصی قرار گیرند که تعداد اتم‌های همسایه بیشتری را داشته باشند.

*فریت دلتا

فریت دلتا، محلول جامد بین‌نشینی کربن در آهن دلتاست، از آنجایی که دمای معمولی برای شروع عملیات حرارتی فولادها، در ناحیه آستنیت قرار دارد و فریت دلتا نیز با کاهش دما به آستنیت تبدیل می‌شود، فریت دلتا فقط از نظر علمی مورد توجه قرار می‌گیرد و از نظر عملیات حرارتی، کاربرد صنعتی چندانی ندارد. اما از آنجایی که فریت دلتا، نخستین فازی است که در ضمن انجماد و جوش‌کاری فولادها تشکیل می‌شود، شیب‌های غلظتی ناشی از عناصر آلیاژی و یا ناخالصی‌ها و همچنین جدایش^۱ بین‌دندریتی^۲ در ضمن تشکیل این فاز به وجود می‌آیند، بنابراین از نظر انجماد و فولادسازی، این فاز اهمیت دارد.

کاربید آهن (سمنتیت Fe_3C)

این فاز ترکیبی با نسبت ثابت و مشخص یک اتم کربن و سه اتم آهن می‌باشد، به طوری که ۶/۶۷ درصد [وزنی] کربن دارد. Fe_3C دارای شبکه بلوری مکعب مستطیل (Orthorhombic) با پارامترهای شبکه $a=0.452 \text{ nm}$ ، $b=0.509 \text{ nm}$ و $c=0.674 \text{ nm}$ می‌باشد. واحد شبکه بلوری سمنتیت دارای ۱۲ اتم آهن و ۴ اتم کربن است.



دمای ذوب سمنتیت حدود ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد است. سمنتیت در دماهای پایین به مقدار بسیار کم دارای خاصیت آهن‌ربایی است، که در اثر حرارت دادن تا دمای ۲۱۷ درجه سانتی‌گراد خاصیت آهن‌ربایی خود را از دست می‌دهد.

سختی سمنتیت بسیار زیاد است (بیش از ۸۰۰ برینل) و انعطاف‌پذیری آن بسیار کم می‌باشد. سمنتیت ترکیبی ناپایدار است و در شرایط خاص تجزیه می‌شود و کربن آزاد (گرافیت) تولید می‌کند.

شکل ۱-۹ شبکه بلوری سمنتیت [۴].

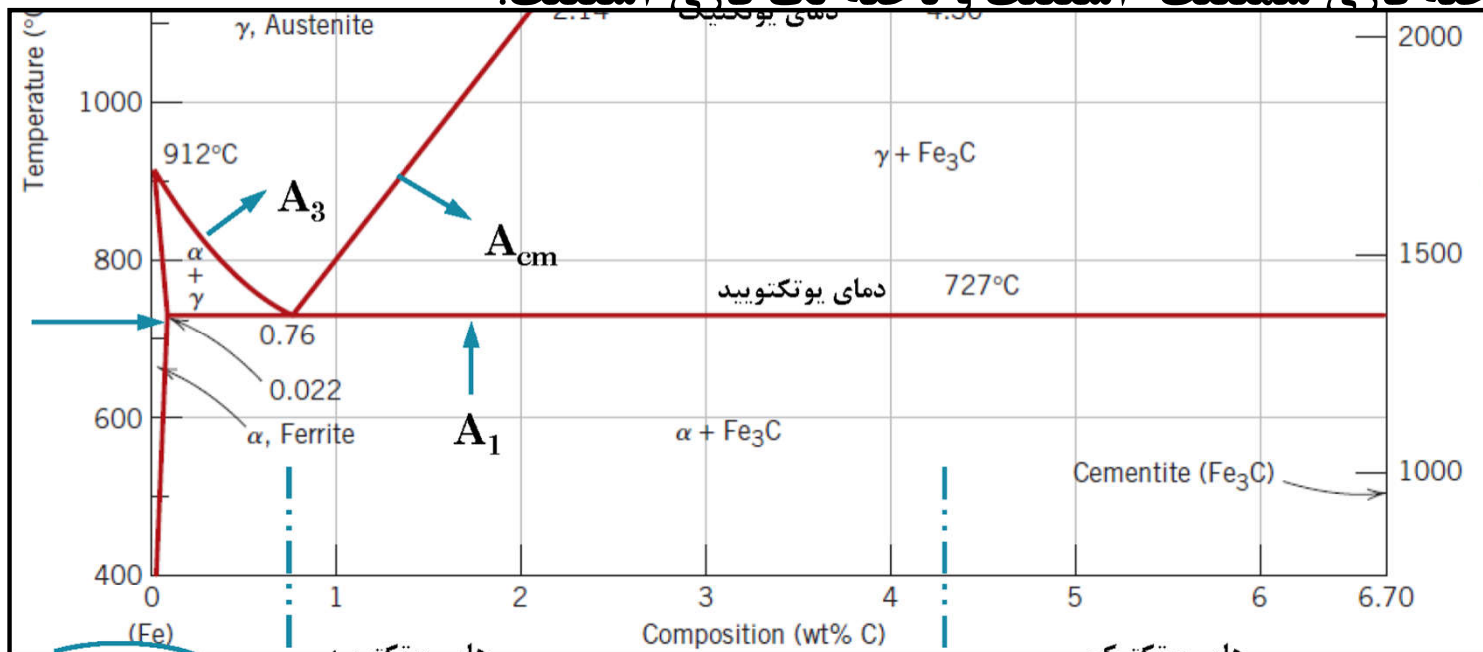
دماهای بحرانی Critical Temperatures

- ❑ فصل مشترک بین نواحی فازی مختلف در دیاگرام آهن - کربن، مشخص کننده دماهای تعادلی دگرگونی ها (دماهای بحرانی) است.
- ❑ در دماهای دگرگونی، نرخ انتقال حرارت و یا حجم نمونه در اثر گرمایش یا سرمایش تغییر می کند.
- ❑ در گرم کردن هنگامی که فریت و سمنتیت توسط ساختار بلوری متراکم فاز آستنیت جایگزین می شوند، گرما جذب می گردد و انقباض در نمونه بوجود می آید.
- ❑ جذب و یا آزاد شدن گرما در ضمن تبدیل یک فاز به فاز دیگر باعث می شود که شیب منحنی های تغییر دما بر حسب زمان تغییر کند.

A_1 : مرز ناحیه دو فازی فریت-سمنتیت و یکی از نواحی فریت-آستنیت و یا سمنتیت-آستنیت.

A_3 : فصل مشترک ناحیه دو فازی فریت-آستنیت و ناحیه تک فازی آستنیت.

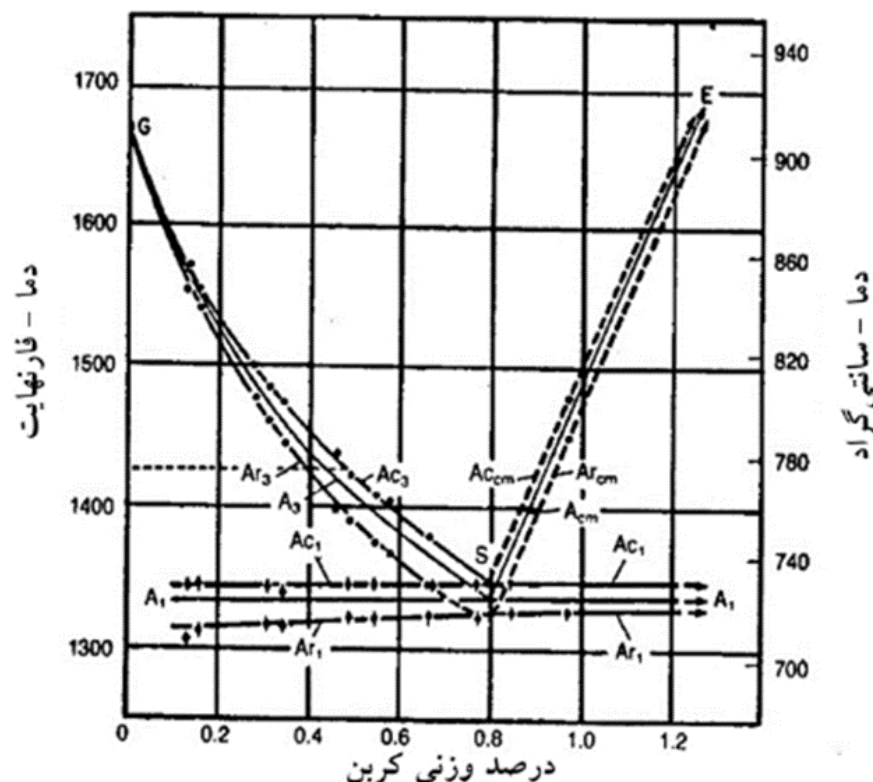
A_{cm} : فصل مشترک بین دو ناحیه فازی سمنتیت-آستنیت و ناحیه تک فازی آستنیت.



این دماها مربوط به شرایط تعادلی (گرمایش و سرمایش بسیار آهسته) هستند.
(Equilibrium)

دماهای بحرانی

- ❖ دگرگونی‌هایی که در این دماها انجام می‌شوند، تابع نفوذند. بنابراین دماهای بحرانی تابع نرخ گرمایش، نرخ سرمایش و همچنین ترکیب شیمیایی فولادند.
- ❖ گرمایش سریع باعث می‌شود که زمان قرارگرفتن نمونه در دمای بحرانی تعادلی برای انجام نفوذ کافی نباشد، و بنابراین دگرگونی در دمایی بالاتر از دمای بحرانی تعادلی انجام شود. سرمایش سریع باعث می‌شود که دگرگونی در دمایی پایین‌تر از دمای بحرانی تعادلی انجام شود.
- ❖ اثرهای نرخ گرمایش (Chauffant) و سرمایش (Refroidissant) غیر تعادلی (سریع)، به ترتیب توسط حروف Ar و Ac مشخص می‌شوند.



- ❖ عناصری که پایدارکننده آستنیت هستند، دماهای بحرانی Ac_1 و Ac_3 را کاهش می‌دهند.
- ❖ عناصری که پایدار کننده فریت یا کاربید (Carbide) هستند، دماهای بحرانی Ac_1 و Ac_3 را افزایش می‌دهند.

شکل ۱-۱۰ دماهای بحرانی برای حالت تعادل (A)، سرمایش ناتعادلی (Ar) و گرمایش ناتعادلی (Ac). نرخ گرمایش و سرمایش تعادلی، $125^\circ\text{C}/\text{min}$ درجه سانتی‌گراد در دقیقه بوده است [۱].

Periodic Table of the Elements

1 IA <div>1 H Hydrogen 1.008 1</div>																	18 VIIIA <div>2 He Helium 4.0026 2</div>	
3 <div>3 Li Lithium 6.94 2-1</div>	4 <div>4 Be Beryllium 9.0122 2-2</div>																	10 <div>10 Ne Neon 20.180 2-8</div>
11 <div>11 Na Sodium 22.98976928 2-8-1</div>	12 <div>12 Mg Magnesium 24.305 2-8-2</div>																	18 <div>18 Ar Argon 39.948 2-8-8</div>
19 <div>19 K Potassium 39.0983 2-8-9-1</div>	20 <div>20 Ca Calcium 40.078 2-8-9-2</div>	21 <div>21 Sc Scandium 44.955908 2-8-9-2</div>	22 <div>22 Ti Titanium 47.867 2-8-10-2</div>	23 <div>23 V Vanadium 50.9415 2-8-11-2</div>	24 <div>24 Cr Chromium 51.9961 2-8-13-1</div>	25 <div>25 Mn Manganese 54.938044 2-8-13-2</div>	26 <div>26 Fe Iron 55.845 2-8-14-2</div>	27 <div>27 Co Cobalt 58.933 2-8-15-2</div>	28 <div>28 Ni Nickel 58.693 2-8-16-2</div>	29 <div>29 Cu Copper 63.546 2-8-18-1</div>	30 <div>30 Zn Zinc 65.38 2-8-18-2</div>	31 <div>31 Ga Gallium 69.723 2-8-18-3</div>	32 <div>32 Ge Germanium 72.630 2-8-18-4</div>	33 <div>33 As Arsenic 74.922 2-8-18-5</div>	34 <div>34 Se Selenium 78.971 2-8-18-6</div>	35 <div>35 Br Bromine 79.904 2-8-18-7</div>	36 <div>36 Kr Krypton 83.798 2-8-18-8</div>	
37 <div>37 Rb Rubidium 85.4678 2-8-18-6-1</div>	38 <div>38 Sr Strontium 87.62 2-8-18-6-2</div>	39 <div>39 Y Yttrium 88.90584 2-8-18-9-2</div>	40 <div>40 Zr Zirconium 91.224 2-8-18-10-2</div>	41 <div>41 Nb Niobium 92.90637 2-8-18-12-1</div>	42 <div>42 Mo Molybdenum 95.95 2-8-18-13-1</div>	43 <div>43 Tc Technetium (98) 2-8-18-13-2</div>	44 <div>44 Ru Ruthenium 101.07 2-8-18-15-1</div>	45 <div>45 Rh Rhodium 102.91 2-8-18-16-1</div>	46 <div>46 Pd Palladium 106.42 2-8-18-18</div>	47 <div>47 Ag Silver 107.87 2-8-18-18-1</div>	48 <div>48 Cd Cadmium 112.41 2-8-18-18-2</div>	49 <div>49 In Indium 114.82 2-8-18-18-3</div>	50 <div>50 Sn Tin 118.71 2-8-18-18-4</div>	51 <div>51 Sb Antimony 121.76 2-8-18-18-5</div>	52 <div>52 Te Tellurium 127.60 2-8-18-18-6</div>	53 <div>53 I Iodine 126.90 2-8-18-18-7</div>	54 <div>54 Xe Xenon 131.29 2-8-18-18-8</div>	
55 <div>55 Cs Caesium 132.90545196 2-8-18-18-6-1</div>	56 <div>56 Ba Barium 137.327 2-8-18-18-6-2</div>	57-71 Lanthanides		72 <div>72 Hf Hafnium 178.49 2-8-18-32-10-2</div>	73 <div>73 Ta Tantalum 180.94788 2-8-18-32-11-2</div>	74 <div>74 W Tungsten 183.84 2-8-18-32-12-2</div>	75 <div>75 Re Rhenium 186.21 2-8-18-32-13-2</div>	76 <div>76 Os Osmium 190.23 2-8-18-32-14-2</div>	77 <div>77 Ir Iridium 192.22 2-8-18-32-15-2</div>	78 <div>78 Pt Platinum 195.08 2-8-18-32-17-1</div>	79 <div>79 Au Gold 196.97 2-8-18-32-18-1</div>	80 <div>80 Hg Mercury 200.59 2-8-18-32-18-2</div>	81 <div>81 Tl Thallium 204.38 2-8-18-32-18-3</div>	82 <div>82 Pb Lead 207.2 2-8-18-32-18-4</div>	83 <div>83 Bi Bismuth 208.98 2-8-18-32-18-5</div>	84 <div>84 Po Polonium (209) 2-8-18-32-18-6</div>	85 <div>85 At Astatine (210) 2-8-18-32-18-7</div>	86 <div>86 Rn Radon (222) 2-8-18-32-18-8</div>
87 <div>87 Fr Francium (223) 2-8-18-32-18-6-1</div>	88 <div>88 Ra Radium (226) 2-8-18-32-18-6-2</div>	89-103 Actinides		104 <div>104 Rf Rutherfordium (267) 2-8-18-32-32-10-2</div>	105 <div>105 Db Dubnium (268) 2-8-18-32-32-11-2</div>	106 <div>106 Sg Seaborgium (269) 2-8-18-32-32-12-2</div>	107 <div>107 Bh Bohrium (270) 2-8-18-32-32-13-2</div>	108 <div>108 Hs Hassium (277) 2-8-18-32-32-14-2</div>	109 <div>109 Mt Meitnerium (278) 2-8-18-32-32-15-2</div>	110 <div>110 Ds Darmstadtium (281) 2-8-18-32-32-17-1</div>	111 <div>111 Rg Roentgenium (282) 2-8-18-32-32-17-2</div>	112 <div>112 Cn Copernicium (285) 2-8-18-32-32-18-2</div>	113 <div>113 Nh Nihonium (286) 2-8-18-32-32-18-3</div>	114 <div>114 Fl Flerovium (289) 2-8-18-32-32-18-4</div>	115 <div>115 Mc Moscovium (290) 2-8-18-32-32-18-5</div>	116 <div>116 Lv Livermorium (293) 2-8-18-32-32-18-6</div>	117 <div>117 Ts Tennessine (294) 2-8-18-32-32-18-7</div>	118 <div>118 Og Oganesson (294) 2-8-18-32-32-18-8</div>
57 <div>57 La Lanthanum 138.91 2-8-18-18-9-2</div>	58 <div>58 Ce Cerium 140.12 2-8-18-18-9-2</div>	59 <div>59 Pr Praseodymium 140.91 2-8-18-21-8-2</div>	60 <div>60 Nd Neodymium 144.24 2-8-18-22-8-2</div>	61 <div>61 Pm Promethium (145) 2-8-18-22-8-2</div>	62 <div>62 Sm Samarium 150.36 2-8-18-24-8-2</div>	63 <div>63 Eu Europium 151.96 2-8-18-25-8-2</div>	64 <div>64 Gd Gadolinium 157.25 2-8-18-25-9-2</div>	65 <div>65 Tb Terbium 158.93 2-8-18-27-8-2</div>	66 <div>66 Dy Dysprosium 162.50 2-8-18-28-8-2</div>	67 <div>67 Ho Holmium 164.93 2-8-18-29-8-2</div>	68 <div>68 Er Erbium 167.26 2-8-18-30-8-2</div>	69 <div>69 Tm Thulium 168.93 2-8-18-31-8-2</div>	70 <div>70 Yb Ytterbium 173.05 2-8-18-32-8-2</div>	71 <div>71 Lu Lutetium 174.97 2-8-18-32-9-2</div>				
89 <div>89 Ac Actinium (227) 2-8-18-32-18-9-2</div>	90 <div>90 Th Thorium 232.04 2-8-18-32-18-10-2</div>	91 <div>91 Pa Protactinium 231.04 2-8-18-32-20-9-2</div>	92 <div>92 U Uranium 238.03 2-8-18-32-21-9-2</div>	93 <div>93 Np Neptunium (237) 2-8-18-32-22-9-2</div>	94 <div>94 Pu Plutonium (244) 2-8-18-32-24-8-2</div>	95 <div>95 Am Americium (243) 2-8-18-32-25-8-2</div>	96 <div>96 Cm Curium (247) 2-8-18-32-25-9-2</div>	97 <div>97 Bk Berkelium (247) 2-8-18-32-27-8-2</div>	98 <div>98 Cf Californium (251) 2-8-18-32-28-8-2</div>	99 <div>99 Es Einsteinium (252) 2-8-18-32-29-8-2</div>	100 <div>100 Fm Fermium (257) 2-8-18-32-30-8-2</div>	101 <div>101 Md Mendelevium (258) 2-8-18-32-31-8-2</div>	102 <div>102 No Nobelium (259) 2-8-18-32-32-8-2</div>	103 <div>103 Lr Lawrencium (260) 2-8-18-32-32-8-3</div>				

Atomic Number →

← Symbol

Name →

← Atomic Weight

Electrons per shell →

State of matter (color of name)

GAS LIQUID SOLID UNKNOWN

Subcategory in the metal-metalloid-nonmetal trend (color of background)

Alkali metals Alkaline earth metals Transition metals Lanthanides Actinides Post-transition metals Metalloids Reactive nonmetals Noble gases Unknown chemical properties

Atomic Number → 13

← Symbol **Al**

Name → Aluminium

← Atomic Weight 26.982

Electrons per shell → 2-8-3

State of matter (color of name)
GAS LIQUID SOLID UNKNOWN

Subcategory in the metal-metalloid-nonmetal trend (color of background)

- Alkali metals
- Alkaline earth metals
- Transition metals
- Lanthanides
- Actinides
- Post-transition metals
- Metalloids
- Reactive nonmetals
- Noble gases

Unknown chemical properties

توزیع و اثرهای عناصر آلیاژی در فولادها

□ مشارکت عناصر آلیاژی و ناخالصی‌ها در خواص و ساختار فولادها، با قرار گرفتن آن‌ها به جای اتم‌های آهن (اگر اندازه آنها تقریباً برابر آهن باشد) و یا نشستن در فضاهای بین‌نشینی (اگر اندازه اتمی آنها بسیار کوچکتر از آهن باشد) امکان‌پذیر است.

□ در بعضی مواقع اگر مقادیر عناصر آلیاژی بیش‌تر از حد حلالیت باشند، فازهای دیگری به‌وجود می‌آیند. برای نمونه در اثر اضافه کردن مقدار کمی کرم به آلیاژ آهن-کربن، فاز M_3C (M)، نشان دهنده مجموعه‌ای از کرم و آهن است) با ساختار بلوری سمنتیت به‌وجود می‌آید که تا ۸۹۰ درجه سانتیگراد پایدار است. با افزایش بیشتر کرم ابتدا M_7C_3 و سپس $M_{23}C_6$ به‌وجود می‌آید.

توزیع و اثرهای
عناصر آلیاژی
در فولادها

جدول ۱-۱ توزیع تقریبی عناصر آلیاژی در فولادهای آلیاژی [۱۶].*

عنصر آلیاژی	محل در فریت	ترکیب به صورت کاربید	نوع کاربید	ناخالصی های غیرفلزی	ترکیب های بین فلزی	به صورت خالص
نیکل	Ni				Ni-Si (?) Ni ₃ Al	
سیلیسیم	Si			SiO ₂ -M _x O _y		
زیرکونیم	Zr			ZrO ₂	Zr _x N _y	
منگنز	Mn	Mn ↔ Mn	(FeMn)C _r	MnC MnO.SiO ₂		
کروم	Cr	Cr ↔ Cr	rC(FeMn)	Cr _x O _y		
			Cr _v C _r			
			Cr ₂₃ C ₆			
مولیبدن	Mo	Mo ↔ Mo	MoC _r			
تنگستن	W	W ↔ W	W _r C			
وانادیم	V	V ↔ V	V _r C _r	V _x O _y	V _x N _y	
تیتانیم	Ti	Ti ↔ Ti	TiC	Ti _x O _y	Ti _x N _y C _z Ti _x N _y	
کلمبیم	Cb	Cb ↔ Cb	CbC			
آلومینیوم	Al			Al ₂ O ₃	Al _x N _y	
گوگرد	S(?)			(MnFe)S ZrS		
مس	Cu < ۰.۰۸٪					Cu > ۰.۰۸٪
سرب						Pb
نقره						Ag

کاربیدساز قوی

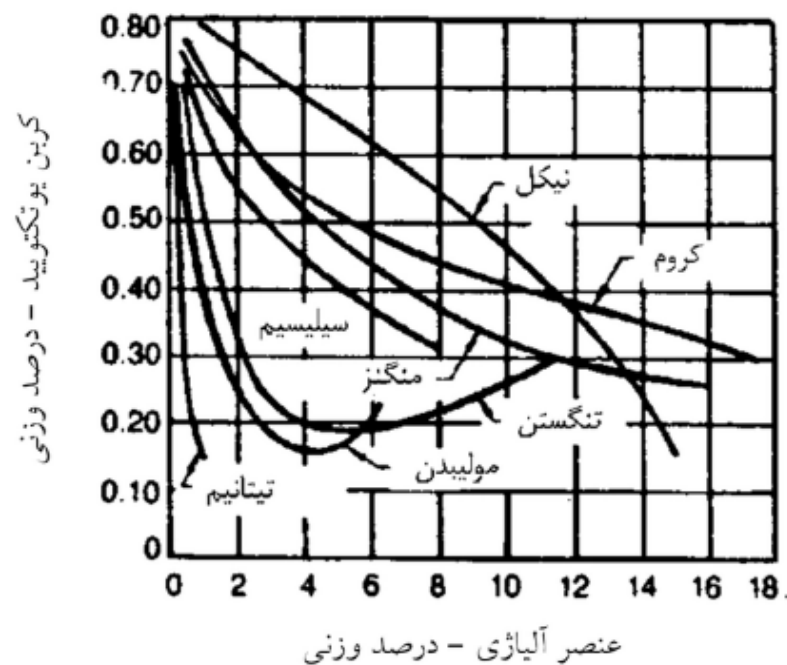
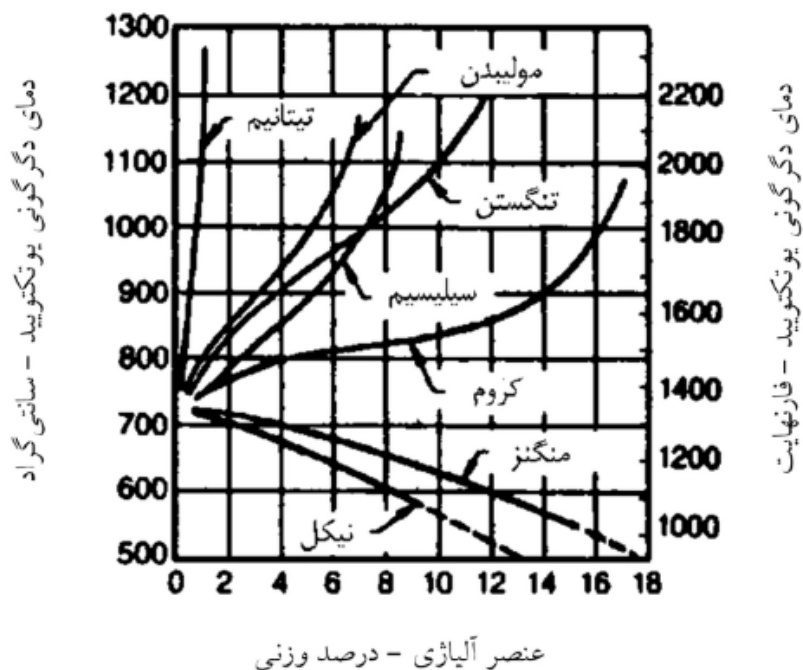
* علامت های پیکان، تمایل عنصر آلیاژی را به حل شدن در فریت و یا تشکیل کاربید نشان می دهند.

از بررسی و مطالعه این جدول می‌توان نتیجه گرفت که نیکل نسبت به آهن تمایل کمتری به تشکیل کاربید دارد و به طور عمده در فریت حل می‌شود. سیلیسیم تا حدودی با اکسیژن ترکیب می‌گردد و ناخالصی نافلزی تشکیل می‌دهد و در غیر این صورت، در فریت حل می‌شود. بدون توجه به درصد کربن فولاد، درصد زیادی از منگنز در فریت حل خواهد شد. توانایی منگنز به تشکیل کاربید، در حد بسیار کمی بیشتر از آهن است و منگیزی که کاربید را تشکیل می‌دهد، به طور معمول به شکل $(Fe, Mn)_3C$ وارد ساختار سمنتیت می‌شود.

کروم، بین فازهای فریت و کاربید توزیع می‌شود. توزیع کروم 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 مانند تیتانیم و کلمبیم وجود نداشته باشند، تنگستن و مولیبدن با کربن فولاد ترکیب می‌شوند و تشکیل کاربید می‌دهند. در غیر این صورت، عناصر یادشده می‌توانند در فریت حل شوند. وانادیم، تیتانیم و کلمبیم، عناصر کاربیدساز بسیار قوی هستند و به طور کلی در فولادها به صورت کاربید یافت می‌شوند. اگر در فولاد، نیتروژن به اندازه کافی وجود داشته باشد، مقداری نیتريد^۱ کلمبیم نیز تشکیل می‌شود. آلومینیوم با اکسیژن و نیتروژن فولاد ترکیب می‌گردد و به ترتیب، اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) و نیتريد آلومینیوم (AlN) را تشکیل می‌دهد.

تمام عناصر آلیاژی که بصورت جانشینی در فولادها وارد می‌شوند، مانند کرم و نیکل، درصد کربن نقطه یوتکتوید را کاهش می‌دهند. در این رابطه تیتانیوم، تنگستن و مولیبدن بیشترین اثر را دارند.

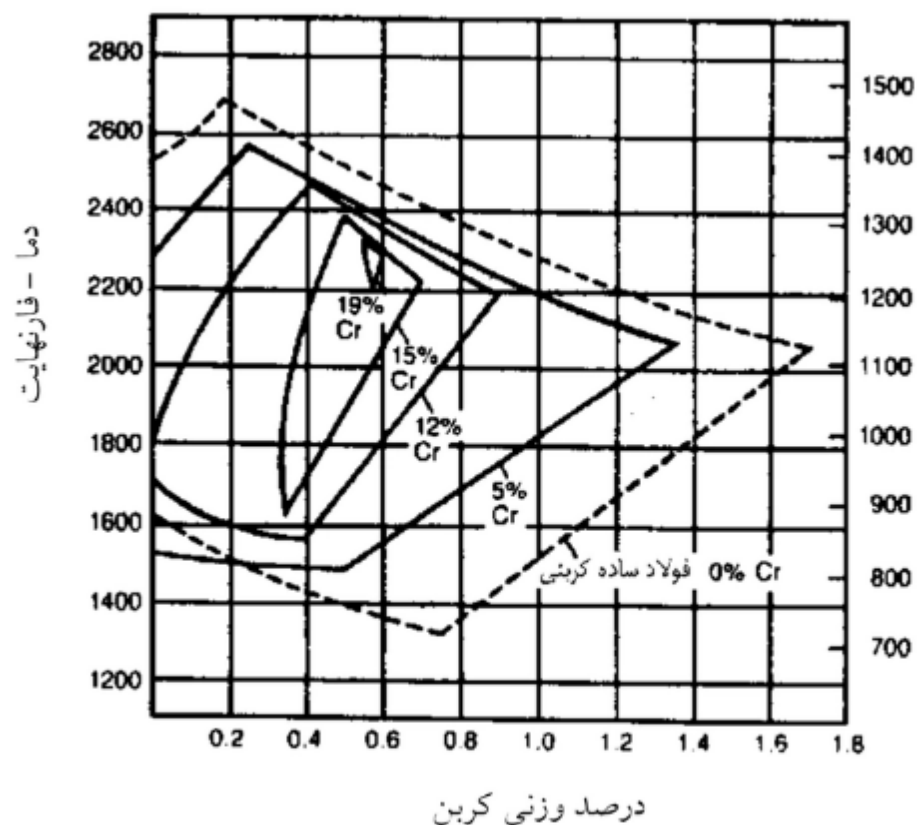
بعضی از عناصر آلیاژی، دمای یوتکتوید را در فولادها کاهش و برخی افزایش می‌دهند. منگنز و نیکل باعث کاهش دمای یوتکتوید می‌شوند و به عنوان **عناصر پایدار کننده آستنیت** معروفند.



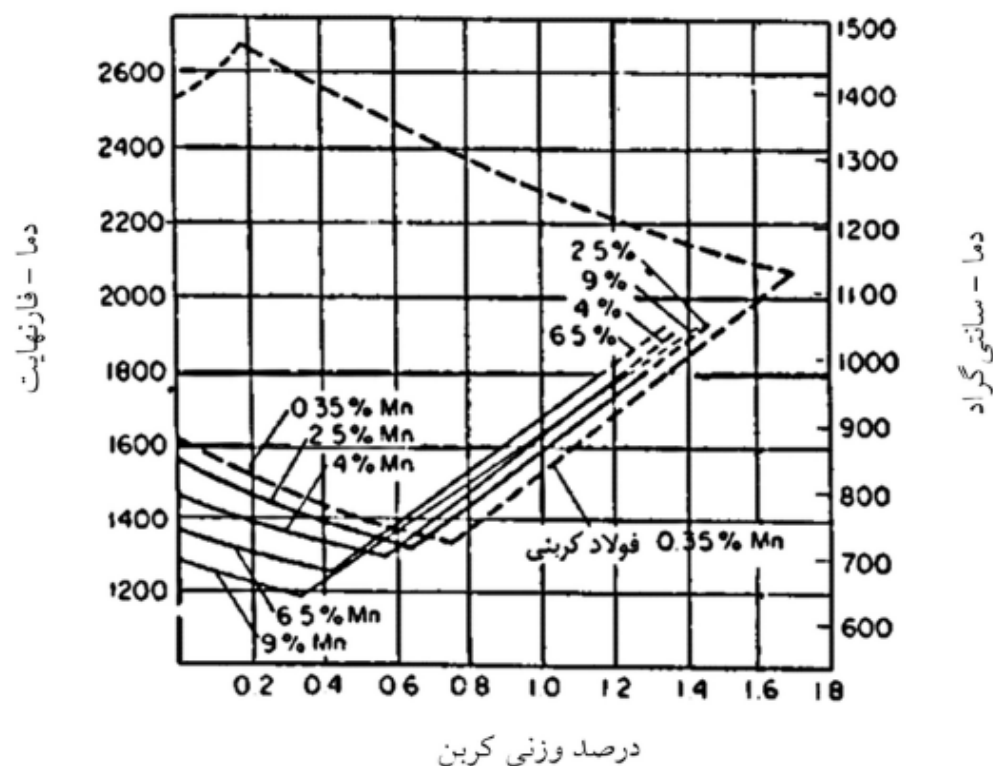
شکل ۱-۱۱ اثر عناصر آلیاژی جانشینی روی درصد کربن نقطه یوتکتوید در فولاد [۱].

شکل ۱-۱۲ اثر عناصر آلیاژی جانشینی روی دمای دگرگونی یوتکتوید در فولاد [۱].

عناصر تشکیل دهنده کاربید، مانند تنگستن، مولیبدن، تیتانیم و کروم، دمای یوتکتوید را افزایش و در نتیجه، گستره ناحیه تشکیل و پایداری آستنیت را کاهش می دهند. بنابراین، این عناصر به پایدارکننده های فریت موسوم اند.



شکل ۱۴-۱ اثر کروم روی گستره ناحیه پایداری آستنیت [۱].



شکل ۱۳-۱ اثر منگنز روی گستره ناحیه پایداری آستنیت در فولادهای کربنی [۱۳].

جدول ۱-۲ توزیع و آثار ویژه عناصر آلیاژی در فولادها [۱۶ و ۳۷].

عنصر	حالات در فاز جامد		اثر روی فریت	اثر روی آستنیت (سختی پذیری)	اثری که از طریق کاربرد دارد		نقش اصلی
	در آهن گاما	در آهن آلفا			تمایل به کاربرد ساز	اثر در ضمن بازگشت	
آلومینیوم Al	۱/۱ درصد (توسط کربن زیاد می شود)	۳۶ درصد	با تشکیل محلول جامد، سختی را به طور چشمگیری زیاد می کند.	اگر در آستنیت حل شود، سختی پذیری را به طور متوسط زیاد می کند.	عنصری گرافیت زاست.	-	۱- به اندازه کافی اکسیژن زدایی می کند. ۲- با تشکیل اکسیدها و نیتrideهای پراکنده، رشد دانه ها را محدود می کند. ۳- عنصر آلیاژی در فولادهایی می باشد که قرار است، نیتروژن دهی شوند.
کروم Cr	۱۲/۸ درصد (پنج درصد با ۰/۵ درصد کربن)	نامحدود	کمی سخت می کند. مقاومت خوردگی را زیاد می کند.	سختی پذیری را به طور متوسط زیاد می کند.	بیشتر از منگنز، کمتر از تنگستن	به طور متوسط از نرم شدن جلوگیری می کند.	۱- مقاومت در برابر خوردگی و اکسایش را زیاد می کند. ۲- سختی پذیری را زیاد می کند. ۳- استحکام در دماهای بالا را زیاد می کند.
کوبالت Co	نامحدود	۷۵ درصد	با تشکیل محلول جامد، سختی را به طور چشمگیری زیاد می کند.	وقتی در آستنیت حل شود، سختی پذیری را کم می کند.	مشابه آهن	با تشکیل محلول جامد، سختی را زیاد می کند.	۱- از رشد دانه ها در دماهای بالا جلوگیری می کند. ۲- با سخت کردن فریت به سختی سرخ کمک می کند و استحکام گرم را بهبود می دهد. ۳- مقاومت در برابر بازگشت را زیاد می کند.

ادامه جدول ۱-۲

عنصر	حلالیت در فاز جامد		اثر روی فریت	اثر روی آستنیت (سختی پذیری)	اثری که از طریق کاربرد دارد		نقش اصلی
	در آهن گاما	در آهن آلفا			تماثل به کاربرد ساز	اثر در ضمن بازگشت	
منگنز Mn	نامحدود	سه درصد	۱- به طور قابل توجهی سخت می کند. ۲- قابلیت تغییر شکل مومسان را کم می کند.	سختی پذیری را به طور متوسط زیاد می کند.	بیشتر از آهن، کمتر از کروم	بسیار کم، در درصدهای معمولی	۱- با تردی ناشی از اثر گوگرد، مقابله می کند. ۲- سختی پذیری را زیاد می کند.
مولیبدن Mo	سه درصد (هشت درصد با ۰/۳ درصد کربن)	۳۷/۵ درصد (با کاهش دما کم می شود)	در آلیاژهای پرمولیبدن- آهن، سیستم پیرسختی را به وجود می آورد.	سختی پذیری را به طور قابل توجهی زیاد می کند (اثر آن بیشتر از کروم است).	شدیدتر از کروم	به وسیله سختی ثانویه از نرم شدن جلوگیری می کند.	۱- دمای درشت (خشن) شدن دانه های آستنیت را افزایش می دهد. ۲- عمق سختی را زیاد می کند. ۳- با تردی حرارتی مقابله می کند. ۴- استحکام خزش گرم و سختی سرخ را افزایش می دهد. ۵- مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن را بهبود می دهد. ۶- فاز مقاوم در برابر سایش را تشکیل می دهد.
تنگستن W	شش درصد (۱۱ درصد با ۰/۲۵ درصد کربن)	۳۲ درصد (با کاهش دما کم می شود)	موجب پیرسختی در آلیاژهای پرتنگستن-آهن می شود.	در مقادیر کم، سختی پذیری را به شدت افزایش می دهد.	شدید	توسط سختی ثانویه از نرم شدن جلوگیری می کند.	۱- فاز سخت و مقاوم به سایش را در فولادهای ابزار تشکیل می دهد. ۲- سختی و استحکام در دماهای بالا را زیاد می کند.

ادامه جدول ۱-۲

عنصر	حلالیت در فاز جامد		اثر روی فریت	اثر روی آستنیت (سختی پذیری)	اثری که از طریق کاربرد دارد		نقش اصلی
	در آهن گاما	در آهن آلفا			تمایل به کاربرد ساز	اثر در ضمن بازگشت	
وانادیم V	یک درصد (چهار درصد با ۰/۲ درصد کربن)	نامحدود	با تشکیل محلول جامد، سختی را به طور متوسط زیاد می کند.	وقتی که به صورت محلول درمی آید، سختی پذیری را خیلی شدید زیاد می کند.	بسیار شدید (کمتر از تیتانیم یا کلمیم)	حداکثر برای سختی ثانویه	۱- دمای درشت (خشن) شدن دانه های آستنیت را افزایش می دهد (موجب ریز شدن دانه ها می شود). ۲- وقتی حل شود، سختی پذیری را زیاد می کند ۳- مقاومت در برابر بازگشت را افزایش می دهد و سختی ثانویه قابل توجهی را به وجود می آورد.
نیکل Ni	۱۰ درصد (بدون توجه به کربن)	نامحدود	با تشکیل محلول جامد، استحکام و چقرمگی را زیاد می کند.	سختی پذیری را به طور متوسط افزایش می دهد، ولی در درصد های زیاد کربن، مقدار آستنیت باقیمانده را زیاد می کند.	عنصری گرافیت زاست.	در درصد های کم، بسیار کم است.	۱- موجب افزایش استحکام فولادهای آهسته سرد شده یا آنیل شده می شود. ۲- چقرمگی فولادهای فریتی- پربیتی را زیاد می کند (به ویژه در دماهای پایین) ۳- موجب آستنیتی شدن فولادهای پرکروم خواهد شد.

ادامه جدول ۱-۲

عنصر	حلالیت در فاز جامد		اثر روی فریت	اثر روی آستنیت (سختی پذیری)	اثری که از طریق کاربرد دارد		نقش اصلی
	در آهن گاما	در آهن آلفا			تمایل به کاربرد ساز	اثر در ضمن بازگشت	
تیتانیم Ti	۰/۷۵ درصد (یک درصد با ۰/۲ درصد کربن)	شش درصد (با کاهش دما کم می شود)	در فولادهای پرتیتانیم-آهن، موجب پیروسیختگی می شود.	۱- وقتی حل می شود، سختی پذیری را افزایش می دهد. ۲- در اثر تشکیل کاربید، سختی پذیری را کاهش می دهد.	بیشترین تمایل را دارد (۰/۲) درصد تیتانیم، موجب می شود که فولاد کربنی با ۰/۵ درصد کربن در اثر سریع سرد شدن، سخت نشود)	کاربیدها تحت تأثیر قرار نمی گیرند. مقدار کمی سختی ثانویه ایجاد می شود.	۱- سختی مارتنزیت و سختی پذیری را در فولادها با کربن متوسط کاهش می دهد. ۲- از تشکیل آستنیت در فولادهای پرکروم جلوگیری می کند ۳- از فقیر شدن موضعی کروم در فولادهای زنگ نزن در ضمن حرارت دادن طولانی جلوگیری می کند.
بور B	۰/۰۳۳ درصد	-	سرعت جوانه زنی فریت و یا پرلیت را کم می کند.	۱- با به تعویق انداختن شروع دگرگونی های نفوذی، سختی پذیری را به طور قابل توجهی بهبود می دهد. ۲- در فولادهای ۸-۱۸ موجب رسوب سختی و افزایش حد تسلیم می شود، ولی مقاومت خوردگی را کم می کند.	-	سرعت آنیل شدن را افزایش می دهد.	در مقادیر کم، سختی پذیری را به طور قابل توجهی زیاد می کند.

ادامه جدول ۲-۱

عنصر	حلالیت در فاز جامد		اثر روی فریت	اثر روی آستنیت (سختی پذیری)	اثری که از طریق کاربرد دارد		نقش اصلی
	در آهن گاما	در آهن آلفا			تمایل به کاربرد ساز	اثر در ضمن بازگشت	
فسفر P	۰/۵ درصد	۲/۸ درصد (بدون توجه به درصد کربن)	با تشکیل محلول جامد، سختی را افزایش می دهد.	سختی پذیری را زیاد می کند.	بی اثر	-	۱- استحکام فولادهای کم کربن را زیاد می کند. ۲- مقاومت در برابر خوردگی را زیاد می کند. ۳- قابلیت ماشین کاری در فولادهای خوش تراش را بهبود می دهد.
سیلیسیم Si	دو درصد (نه درصد یا ۰/۲۵ درصد کربن)	۱۸/۵ درصد (با تغییر درصد کربن، تغییر چندانی نمی کند)	سختی را افزایش ولی قابلیت تغییر شکل مومسان را کاهش می دهد (اثر متکثر، کمتر از اثر سیلیسیم و اثر فسفر است).	سختی پذیری را به طور متوسط افزایش می دهد.	عنصری گرافیت زد است	با تشکیل محلول جامد لایم شدن جلوگیری می کند	۱- به عنوان عنصر اکسیژن زدا استفاده می شود. ۲- عنصر آلیاژ ساز برای صفحه های الکتریکی و مغناطیسی ۳- مقاومت در برابر اکسایش را بهبود می دهد. ۴- استحکام فولادهای کم آلیاژ را زیاد می کند. ۵- سختی پذیری فولادهای دارای عناصر غیرگرافیت زا را افزایش می دهد.

فاز کاربید در فولادهای آلیاژی

فاز کاربید در فولادها فقط توسط فلزهایی که در جدول تناوبی عناصر در سمت چپ آهن و پایین آن قرار دارند تشکیل می‌شود (از Mn تا Hf).

این فلزات مانند آهن، جزء عناصر انتقالی (واسطه) هستند.

عناصری که در جدول تناوبی بیش‌تر به سمت چپ باشند آخرین لایه الکترونی d آنها از الکترون تهی‌تر است و تمایل بیش‌تری به تشکیل کاربید دارند و کاربیدهای پایدارتری را نیز تشکیل می‌دهند.

فقط عناصری که تعداد الکترون‌های آخرین لایه الکترونی d آنها در مقایسه با آهن کم‌تر باشد، به عنوان عناصر آلیاژی کاربید ساز تلقی می‌شوند.

نتایج حاصل از مطالعه‌ها و پژوهش‌ها نشان می‌دهند که در فرایند تشکیل کاربید، کربن، الکترون‌های ظرفیت خود را به منظور پر کردن لایه الکترونی d اتم‌های فلزی از دست می‌دهد. از سوی دیگر، الکترون‌های ظرفیت که توسط فلز گرفته می‌شوند، صرف تشکیل پیوند فلزی خواهند شد. این پیوند فلزی به کاربید حاصل، خواص فلزی می‌دهد.

ترکیب‌های کاربیدی زیر می‌توانند در فولاد تشکیل شوند:

$$\text{کاربیدهای گروه I؛ } \left[\frac{r_c}{r_m} > 0.59 \right]$$



$$\text{کاربیدهای گروه II (فازهای بین‌نشینی)؛ } \left[\frac{r_c}{r_m} < 0.59 \right]$$

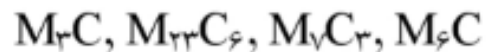


این کاربیدها نمی‌توانند بصورت خالص در فولاد تشکیل شوند. تمامی کاربیدهای عناصر آلیاژی دارای مقداری آهن بصورت محلول اند. در صورت وجود عناصر آلیاژی کاربید ساز دیگر، این عناصر نیز در ترکیب و ساختار کاربید موجود، وارد می‌شوند مانند کاربید کمپلکس $(\text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ در فولاد کرم منگنزدار.

فاز کاربید در فولادهای آلیاژی

کاربیدهایی که دارای فرمول شیمیایی یکسان باشند، به طور متقابل در یکدیگر محلول اند. بنابراین اگر برای نمونه، به یک فولاد به صورت هم‌زمان عناصر تیتانیم و نیوبیم اضافه شود، به جای تشکیل کاربیدهای مجزای تیتانیم و نیوبیم، کاربید کمپلکسی از این عناصر تشکیل خواهد شد. به همین دلیل، تعداد و انواع کاربیدهایی که احتمال تشکیل آنها در فولادهای آلیاژی وجود دارد، کمتر از آنچه پیش از این اشاره شد، است. در حقیقت فقط شش نوع کاربید با فرمول‌های زیر در فولادها تشکیل می‌شوند:

$$\text{کاربیدهای گروه I؛ } \left[\frac{r_c}{r_m} > 0.59 \right]:$$



$$\text{کاربیدهای گروه II (فازهای بین‌نشینی)؛ } \left[\frac{r_c}{r_m} < 0.59 \right]:$$



در این فرمول‌ها، M ، مجموع عناصر فلزی تشکیل دهنده کاربید است.

Carbide

 48 languages 

Article [Talk](#)

[Read](#) [Edit](#) [View history](#) [Tools](#) 

From Wikipedia, the free encyclopedia

For the software development tool targeting the Symbian OS, see [Carbide.c++](#). For the metallic compound commonly used in machine tools, see [Tungsten carbide](#). For the town in West Virginia, see [Carbide, Wetzel County, West Virginia](#).

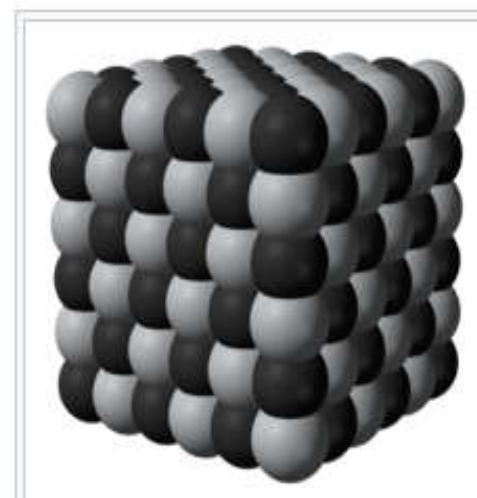
In [chemistry](#), a **carbide** usually describes a [compound](#) composed of [carbon](#) and a metal. In [metallurgy](#), [carbiding](#) or [carburizing](#) is the process for producing carbide coatings on a metal piece.^[1]


Interstitial / Metallic carbides [\[edit\]](#)

The carbides of the group 4, 5 and 6 transition metals (with the exception of chromium) are often described as [interstitial compounds](#).^[2] These carbides have metallic properties and are [refractory](#). Some exhibit a range of [stoichiometries](#), being a non-stoichiometric mixture of various carbides arising due to crystal defects. Some of them, including [titanium carbide](#) and [tungsten carbide](#), are important industrially and are used to coat metals in cutting tools.^[3]

The long-held view is that the carbon atoms fit into octahedral interstices in a close-packed metal lattice when the metal atom radius is greater than approximately 135 pm.^[2]

- When the metal atoms are [cubic close-packed](#), (ccp), then filling all of the octahedral interstices with carbon achieves 1:1 stoichiometry with the rock salt structure.^[4]
- When the metal atoms are [hexagonal close-packed](#), (hcp), as the octahedral interstices lie directly opposite each other on either side of the layer of metal atoms, filling only one of these with carbon achieves 2:1 stoichiometry with the CdI₂ structure.^[4]



Lattice structure of [titanium carbide](#) 



[Tungsten carbide end mills](#) 

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

از جمله ویژگی‌های گروه II شبکه بلوری ساده آن‌ها می‌باشد، که همواره با کمبود کربن روبرو است.

بیان 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 یادشده در آستنیت حل نخواهند شد. از این رو، این کاربیدها را می‌توان به راحتی 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.

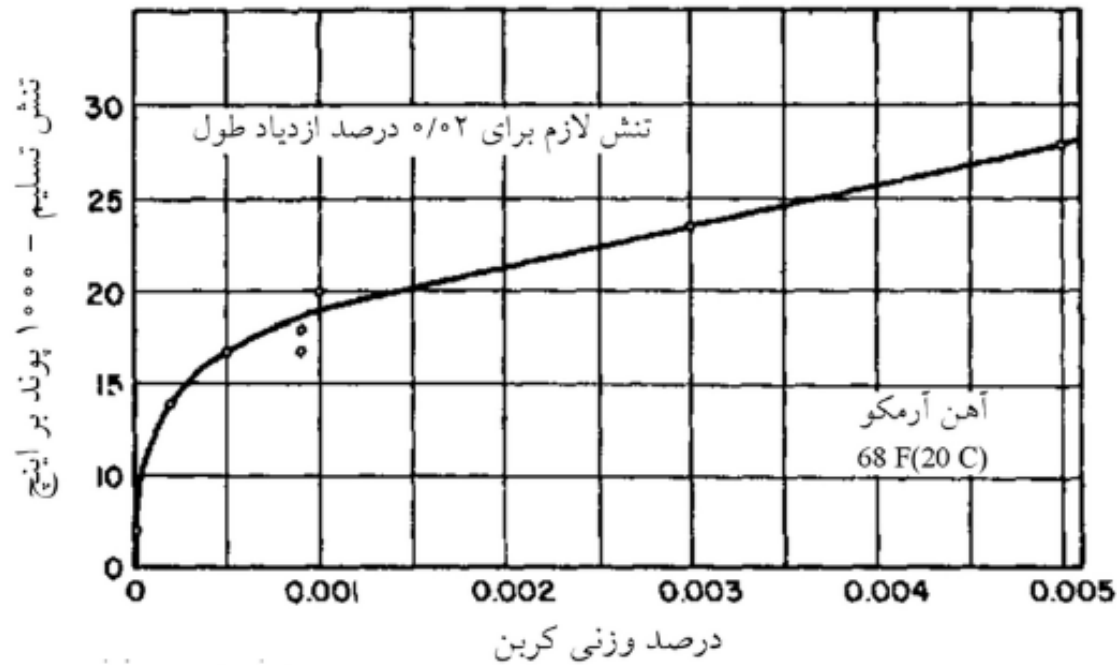
ترتیب انحلال کاربیدها در آستنیت، توسط پایداری نسبی آنها و توانایی آستنیت در حل کردن آنها مشخص می‌شود (زیرا حد حلالیت کربن در آستنیت محدود است). برای نمونه اگر در یک آلیاژ، سه نوع کاربید M_3C ، M_2C و MC وجود داشته باشند، نخست کاربید M_3C (برای نمونه Cr_3C_2) در آستنیت حل می‌شود، در حالی که کاربیدهای M_2C و MC (مانند کاربیدهای تنگستن و وانادیم) هم‌چنان حل نشده باقی خواهند ماند.

اثر عناصر آلیاژی روی فریت

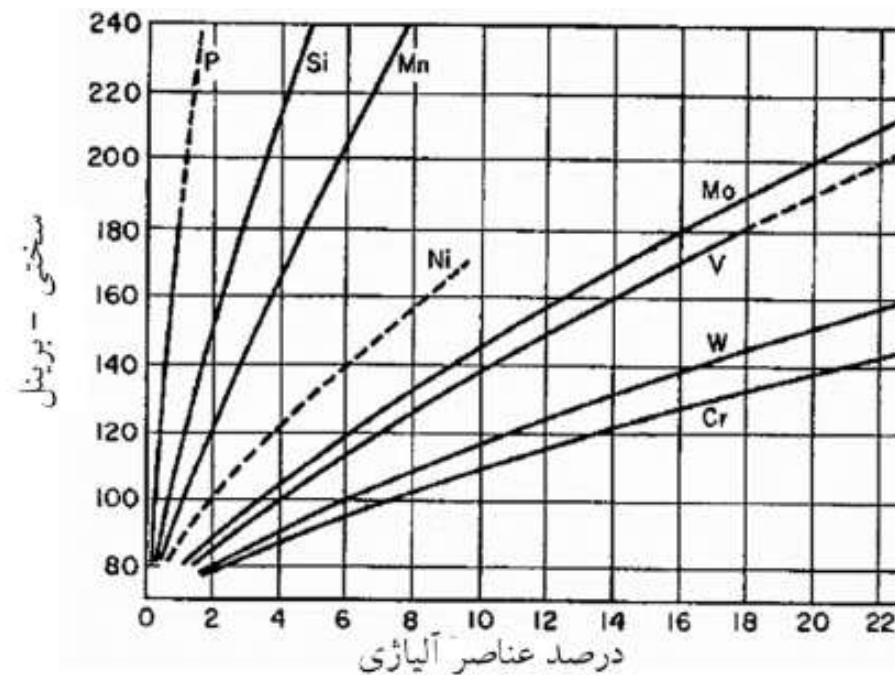
انحلال عناصر آلیاژی در آهن آلفا با جانشین شدن اتم‌های آنها به جای اتم‌های آهن انجام می‌شود. از آنجایی که عناصر آلیاژی از نظر اندازه اتمی و ساختار، متفاوت از آهن هستند، موقعی که به جای اتم‌های آهن قرار می‌گیرند، شبکه بلوری آهن را تحت تنش قرار خواهند داد و در نتیجه، پارامتر شبکه آن را تغییر می‌دهند. هرچه 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 می‌دهند. از طرف دیگر، عناصری که شعاع اتمی آنها بیشتر از شعاع اتمی آهن باشد، پارامتر شبکه آهن را افزایش می‌دهند.

اثرهای عناصر آلیاژی روی خواص مختلف مانند استحکام تسلیم، استحکام کششی و سختی یکسان نیست.

اثرات عناصر آلیاژی روی فریت



شکل ۱-۱۶ اثر مقدار بسیار کمی کربن محلول در فریت بر استحکام تسلیم آهن آلفا در دمای اتاق [۱۶].



شکل ۱-۱۷ اثرهای احتمالی عناصر مختلف به صورت محلول در آهن خالص روی سختی [۱۶].

□ ترتیب افزایش اثرهای عناصر آلیاژی مختلف محلول، روی سختی فریت بصورت زیر است: کرم، تنگستن، وانادیم، مولیبدن، نیکل، منگنز، سیلیسیم و فسفر.

□ مولیبدن، تنگستن، سیلیسیم و منگنز مقاومت به ضربه فریت را بطور چشم‌گیری کاهش می‌دهند.

□ ازجمله مهم‌ترین اثرهای عناصر آلیاژی محلول در فریت، اثر آنها بر دمای تبدیل شکست ترد به نرم (Ductile-Brittle Transition Temperature) است.

□ در بین شش عنصر آلیاژی (Cr, Ni, Mo, Si, Mn, W) که بیش‌ترین مصرف را در فولادسازی دارند، **نیکل** باارزش‌ترین آنها شناخته شده است. این عنصر درحالی که سختی و استحکام فریت را بطور چشم‌گیری افزایش می‌دهد، **دمای تبدیل شکست ترد به نرم را نیز کاهش** می‌دهد. همچنین نیکل مقاومت به ضربه فولاد را کاهش نمی‌دهد.

□ این در حالی است که سایر عناصر آلیاژی که استحکام را به نحو قابل توجهی افزایش می‌دهند، انرژی ضربه فریت را به شدت کاهش می‌دهند (مثلا Si و Mn)

((و اینکه برای انسان بهره‌ای جز سعی [و کوشش] او، نیست)) (سوره مبارکه نجم، آیه ۳۹)

اللَّهُمَّ مَا بِنَا مِنْ نِعْمَةٍ فَمِنْكَ

بارالها؛ هر نعمتی که بر ماست، از آن توست

با آرزوی سلامتی و موفقیت روز افزون شما

* دکتر محمود سمیع زاده *

m_sameezadeh@sbu.ac.ir