

ساختار بلوری و خواص آهن خالص:

آهن عنصری است که با علامت شیمیایی Fe در گروه ۸ و در دوره ۴ در جدول تناوبی قرار دارد. جرم اتمی این عنصر ۵۵,۸۴ گرم بر مول، عدد اتمی آن ۲۶ و چگالی آن ۷,۸۶ گرم بر سانتیمتر مکعب میباشد. شبکه بلوری این عنصر از نوع مکعبی است. این فلز از سنگ معدن آهن استخراج میشود و در حالت طبیعی (خالص) یافت نمیشود. در خصوص اهمیت آهن میتوان گفت اساس تمدن صنعت جهان امروز وابسته به آهن و آلیاژهای مختلف آن است. کاربرد آهن از تمامی فلزات بیشتر است و ۹۵ درصد تناژ فلزات تولید شده در سراسر جهان را تشکیل میدهد. این عنصر چهارمین عنصر فراوان در پوسته زمین بوده و مقدار آن حدود ۵ درصد میباشد. آهن به دلیل استحکام کم، در صنعت مصرف ندارد و اکثراً آلیاژهای مختلف آن شامل فولادها و چدن ها مورد مصرف می باشند.

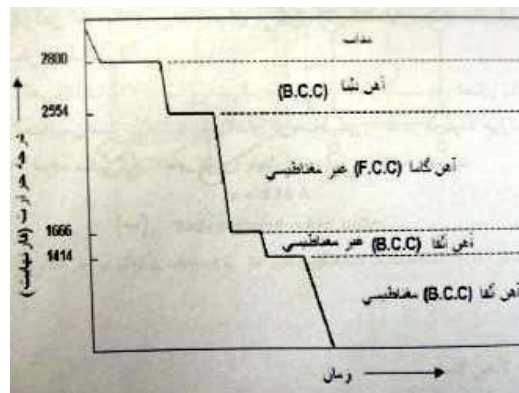
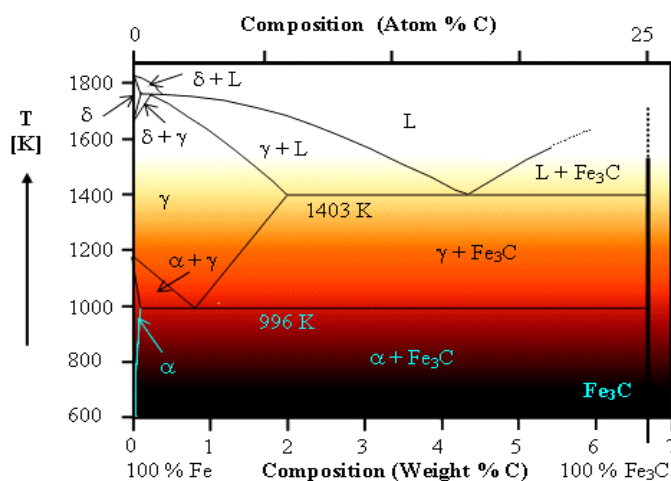
خواص آهن:

این عنصر در حالت جامد دارای خواص چکش خواری و جلای فلزی می باشد. نقطه ذوب آهن خالص ۱۵۳۹ درجه سانتیگراد و نقطه بخار آن ۳۲۰۰ درجه سانتیگراد است. این عنصر در هنگام ذوب به میزان ۴,۴ درصد منبسط میگردد.

آلوتروپی های آهن:

آهن عنصری است چند شکلی است. بدین معنی که در فشار یک اتمسفر با افزایش دما شبکه بلوری آهن تغییر می کند.

گستره های حرارتی مربوط به پایداری شبکه های بلوری مختلف آهن بر روی محور عمودی در سمت چپ نمودار نشان داده شده است.

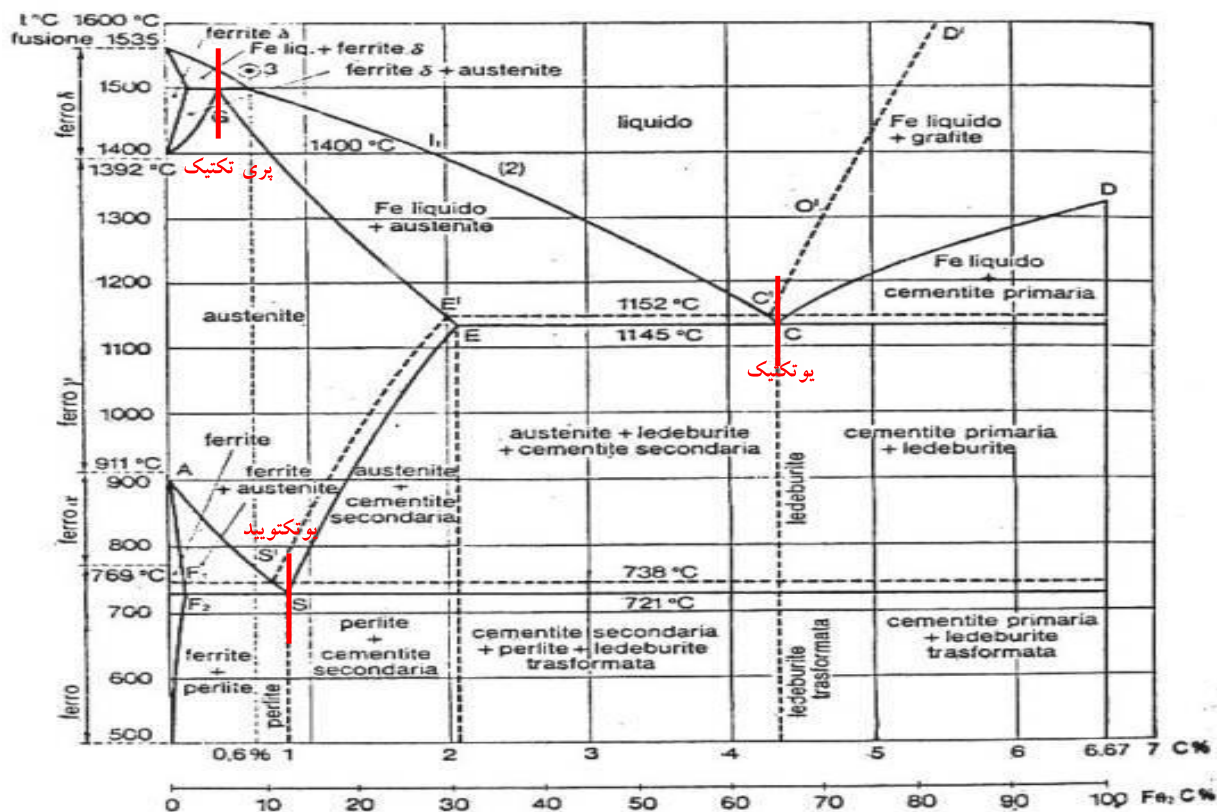


آهن آلفا یا آهن فریتی: یکی از آلوتروپ های آهن می باشد. این آلوتروپ از دمای ۲۷۳- درجه سانتی گراد تا ۹۱۲ درجه سانتی گراد پایدار است. این آلوتروپ دارای ساختمان بلوری مکعبی با مرکز پر است (b.c.c). ثابت شبکه آهن آلفا فرومغناطیس ۲/۸۶ انگستروم است. آهن آلفا، تا دمای ۷۷۰ درجه سانتیگراد خاصیت آهنربایی دارد و از این دما بالاتر تا دمای ۹۱۲ درجه سانتیگراد این خاصیت خود را از دست می دهد. دمای ۷۷۰ درجه سانتیگراد به دمای کوری موسوم است. آهن با شبکه بلوری b.c.c که خاصیت آهنربایی ندارد. (۷۷۰-۹۱۲) به آهن بتا موسوم است.

آهن گاما: یکی دیگر از آلتروپ های آهن می باشد که دردمای ۹۱۲ تا ۱۳۹۴ درجه سانتیگراد پایدار است. این آلتروپ دارای ساختمان بلوری مکعبی با سطوح مرکز دار است (f.c.c). ثابت شبکه آهن گاما ۳/۵۶ انگستروم است بنابراین بزرگتر از ثابت شبکه آهن آلفا است به همین دلیل چگالی این آهن از آهن آلفا بیشتر است. لذا در تحول آهن گاما به آهن آلفا انبساط روی میدهد (تغییر حجم اتمی حدود ۱ درصد است). برعکس اسن قضیه نیز صادق است. یعنی در در هنگام حرارت دادن آهن آلفا و تبدیل آهن به آهن گاما، انقباض رخ میدهد. آهن گاما خاصیت مغناطیسی بسیار ضعیفی دارد و پارا مغناطیس است. ندارد

آهن دلتا: یکی دیگر از آلتروپ های آهن و آخرین فازی است که ممکن است در آهن خالص وجود داشته باشد. این آلتروپ از دمای ۱۳۹۴ درجه سانتیگراد تا نقطه ذوب آهن خالص یعنی ۱۵۳۸ درجه سانتی گراد پایدار است. این آلتروپ دارای ساختار بلوری مشابه با آهن آلفا است (b.c.c). آهن دلتا دارای خاصیت آهنربایی است. ثابت شبکه آهن دلتا اندکی بزرگتر از آهن آلفا است. ثابت شبکه آهن دلتا برابر با ۲/۹۳ انگستروم است.

فازها و ساختارها و دگرگونیهای فازی در آلیاژهای Fe-C



خطوط خط چین مربوط به پایداری گرافیت و خطوط ممتد پایداری سمانتیت میباشد. همچنین نقاط استحاله نیز باخط پر رنگ نشان داده شده است

فازهای تعادلی در نمودار آهن کربن

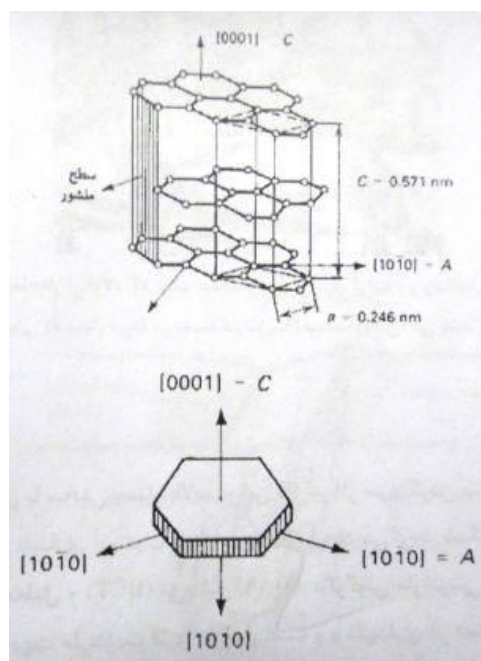
فازهای موجود در آلیاژهای آهن و کربن شامل **فریت**، **آستنیت**، **فریت دلتا** و **سمانتیت** و **استدیت** می باشد

فریت: فریت محلول جامد بین نشین کربن در آهن آلفا با شبکه بلوری BCC است. میزان انحلال کربن در فریت بسیار کمتر از آستنیت بوده و بیشترین قابلیت انحلال کربن در آهن آلفا برابر ۰,۰۲۵ درصد وزنی در دمای ۷۲۳ درجه سانتیگراد است. که در درجه حرارت صفر درجه سانتیگراد به ۰,۰۰۲۵ درصد میرسد. فریت دارای استحکام پایینی بوده و خواص آن بطور کلی عبارتند از: چکش خواری و چقرمگی شکست خوب، مقاوم به سایش کم، استحکام کم، ضریب هدایت گرمایی نسبتاً خوب و ماشینکاری خوب می باشد.

آستنیت: محلول جامد بین نشینی کربن در آهن fcc می باشد. در نمودار آهن کربن منطقه وسیع آهن گاما نسبت به آهن آلفا نمایانگر حلالیت بیشتر کربن در آهن گاما می باشد. پایداری این فاز در دماهای بالا بوده و در دماهای پایین ناپایدار میگردد و به فریت و پرلیت تجزیه میشود. حضور مقادیر مشخص از عناصر نیکل و منگنز در آلیاژهای آهن و کربن موجب پایداری فاز آستنیت تا دمای محیط میشود. از این آلیاژها میتوان در کاربردهای مقاوم در برابر خوردگی و اکسید شونده در دماهای بالا استفاده نمود. میزان حداکثر حلالیت کربن در دمای ۱۱۳۰ به مقدار ۲ درصد می باشد. لازم به ذکر است حلالیت زیاد کربن در آهن گاما در عملیات حرارتی بسیار اهمیت دارد و مورد توجه است.

فریت دلتا: محلول جامد کربن در آهن دلتا می باشد.

گرافیت: گرافیت همان کربن آزاد است که در شرایط محیطی بصورت هگزا گونال متبلور میشود. کربن در آلیاژهای آهنی در حالت آزاد بصورت گرافیت و در حالت ترکیبی به صورت سمانتیت یافت میشود. گرافیت ماده ای است سیاه رنگ که از استحکام پایینی برخوردار است. گرافیت دارای وزن مخصوص ۲,۲ گرم بر سانتیمتر مکعب بوده و به همین جهت نسبت به آهن حجم زیادی را اشغال میکند. ساختمان کریستالی گرافیت لایه ای می باشد و سطح هر یک از لایه ها تشکیل صفحه قاعده را داده و لبه های لایه ها صفحات جانبی کریستال را به وجود می آورد



سمانتیت: علاوه بر حالت آزاد کربن (گرافیت) کربن ممکن است با آهن ترکیب شود و تشکیل کاربید آهن Fe_3C بدهد. به کاربید آهن سمانتیت هم گفته میشود. در صورت ترکیب کربن با عناصر آلیاژی کاربید زای موجود در ترکیب آلیاژ ، کاربید های مختلفی تشکیل میشود که این کاربید ها نیز دارای سختی بالایی میباشند . باتوجه به وزن اتمی آهن و کربن ، میزان کربن در سمانتیت ۶٫۶۷ درصد میباشد . ساختار کریستالی سمانتیت اورتو رمبیک است و دارای سختی و شکنندگی بالا و شکل پذیری کم می باشد . از این رو در کاربرد های سایشی مورد استفاده قرار میگیرد . این فاز هنگامی که درصد کربن بیش از حد حلالیت آن در آستنیت و فریت باشد به وجود می آید . شبکه سمانتیت دارای نسبت ثابت یک اتم کربن و سه اتم آهن است .. واحد شبکه سمانتیت دارای ۱۲ اتم آهن و ۴ اتم کربن میباشد . سمانتیت تغییرات آلوتروپیک ندارد و از آنجایی که ترکیب ناپایداری است میتواند تحت تجزیه به گرافیت تبدیل شود . نقطه ذوب سمانتیت ۱۲۵۲ درجه سانتیگراد است .

انواع کاربیدها:

کاربیدهای اولیه :کاربیدهای درشت هستند که مستقیما از ذوب جدا شده و دارای خواص مکانیکی نامناسب میباشند
کاربیدهای ثانویه : کاربیدهایی هستند که از کربن مازاد بر حلالیت در آستنیت تشکیل میشوند
کاربیدهای ثلثیه : کاربیدهایی هستند که از کربن مازاد بر میزان حلالیت در فریت تشکیل شده و بسیار ریز هستند و با میکروسکپ الکترونی قابل رویت هستند.

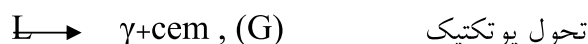
این لغت برگرفته از کلمه Cement در زبان انگلیسی به معنای ماده ای است که مواد مختلف را به هم می چسباند، می باشد.

این فاز در زبان آلمانی با Zementit و در انگلیسی با Cementite نشان داده می شود.

استدیت : این فاز در چدن ها هنگامی به وجود می آید که درصد فسفر زیاد باشد در واقع فاز استدیت، یوتکتیک سه تایی آهن - فسفر - فسفید آهن می باشد که تشکیل یک یوتکتیک سه تایی را داده که به آن فسفید استدیت گفته می شود. این فاز دارای نقطه ذوب پایینی در حدود ۹۴۰ تا ۹۷۰ درجه سانتی گراد است و لذا جزء آخرین اجزایی است که در مذاب منجمد می شود . به همین دلیل است که این فاز همیشه در مرز دانه ها تجمع می کند و باعث کاهش خواص مکانیکی می شود لذا هرچه توزیع استدیت یکنواخت تر شود خواص مکانیکی بهتر می شود که معمولا توزیع استدیت و یکنواخت سازی آن از طریق عملیات حرارتی انجام می شود که این عملیات ماشین کاری قطعه میگرداند این فاز در چدن ها هنگامی به وجود می آید که درصد فسفر زیاد باشد در واقع فاز استدیت، یوتکتیک سه تایی آهن - فسفر - فسفید آهن می باشد که تشکیل یک یوتکتیک سه تایی را داده که به آن فسفید استدیت گفته می شود. این فاز دارای نقطه ذوب پایینی در حدود ۹۴۰ تا ۹۷۰ درجه سانتی گراد است و لذا جزء آخرین اجزایی است که در مذاب منجمد می شود. به همین دلیل است که این فاز همیشه در مرز دانه ها تجمع می کند و باعث کاهش خواص مکانیکی می شود لذا هرچه توزیع استدیت یکنواخت تر شود خواص مکانیکی بهتر می شود که معمولا توزیع استدیت و یکنواخت سازی آن از طریق عملیات حرارتی انجام می شود که این عملیات باعث افزایش قابلیت ماشین کاری قطعه میشود

دگرگونیها :

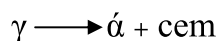
*** تحول یوتکتیک :** تحول یوتکتیک شامل تبدیل یک فاز مذاب به دو فاز جامد بصورت همزمان میباشد . در آلیاژهای آهن ، کربن در دمای ۱۱۵۲ درجه سانتیگراد و با ۴,۲۶ درصد در حالت پایدار (فازهای آستنیت و گرافیت) و در دمای ۱۱۴۵ درجه سانتیگراد و با کربن معادل ۴,۳ درصد در حالت نیمه پایدار (تعادل فازهای آستنیت ، سمانتیت) با هم و به طور هم زمان منجمد شده و تشکیل ساختارهای یوتکتیکی را میدهند که در حالت نیمه پایدار به لد بوریت موسود است



*** تحول پری تکتیک :** تحول پری تکتیک تحولی است که در درجه حرارت ثابت یک مذاب و یک جامد به جامد دیگر تبدیل میشوند . در این تحول در دمای ۱۴۹۸ درجه سانتیگراد و غلظت کربن ۰,۱۸ درصد ، مذاب به همراه ذرات جامد شده کریستالهای فریت دلتا تبدیل آستنیت میگردند



*** تحول یوتکتوئید:** تحول یوتکتوئید عبارت است از دگرگونی که در آن یک فاز جامد به دو فاز جامد جدید بصورت همزمان تبدیل شود . در دیاگرام تعادلی آهن کربن در دمای ۷۲۷ درجه سانتیگراد و با درصد کربن ۰,۷۷ تحول یوتکتوئید صورت میگیرد و فاز آستنیت به دو فاز سمانتیت و فریت تبدیل میگردد که به آن ساختار پرلیتی گویند



ساختارها :

پرلیت : محصول تحول یوتکتوئید ساختاری است که از لایه های دو فاز فریت و سمنتیت تشکیل شده است . این ساختار به پرلیت موسوم است . علت نامگذاری آن به خاطر شکل صدفی آن است . این شکل حاصل از لایه های متناوب فازهای فریت و سمانتیت میباشد . پرلیت تا حدودی سخت بوده و از چقرمگی کمتری نسبت به فریت برخوردار است . بطور کلی خواص مکانیکی پرلیت متأثر از فاصله لایه های فریت سمانتیت است . که این خود وابسته به سرعت سرد شدن از دمای آستنیت تا دمای محیط است . پرلیت دارای خواص ماشینکاری خوب و خواص هدایت حرارتی کم میباشد .

لدبوریت : به مخلوط یوتکتیکی آستنیت و سمنتیت، لدبوریت گفته می شود که از مذابی با ۴,۳ درصد کربن در دمای ۱۱۴۷ درجه سانتیگراد تحت یک واکنش یوتکتیکی حاصل می شود. از آنجایی که اوستنیت در دمای محیط پایدار نیست و بر اساس یک واکنش یوتکتوئیدی به پرلیت تبدیل می شود، لذا ساختمان لدبوریت در دمای محیط بصورت پرلیت و سمنتیت خواهد بود.

بینیت: این فاز به یادبود E.C. Bain شیمیدان آمریکایی نامگذاری شده است.

تاریخچه آستمپرینگ به سال ۱۹۳۰ بر می گردد، زمانی که Grossman و Bain در آزمایشگاه های فولاد ایالات متحده بر روی ارزیابی پاسخ متالورژیکی فولادهای سرد شده با سرعت زیاد از دمای ۱۴۵۰ درجه فارنهایت (۷۸۸ درجه سانتیگراد) به دماهای متناوبا بالا و نگهداری در این دماها به مدت زمانهای مختلف های در حال کار بودند.

نتیجه تحقیقات آنها چیزی است که ما امروزه به عنوان دیاگرامهای استحاله همدم (Isothermal Transformation Diagram) می شناسیم.

Bain و Grossman با ساختارهای معمول متالورژیکی فریت، پرلیت و مارتنزیت آشنا بودند. چیزی که آنها کشف کردند ساختار دیگری بود که در بالاتر از دمای آغاز تشکیل مارتنزیت (Ms) و پایین تر از دمای تشکیل پرلیت بود. در فولادها این ساختار شکل ساختارهای سوزنی (بشقابی) با ظاهری پر مانند را داراست. تحقیقات X ray نشان داد که بینیت شامل فریت و کاربید فلزی است.



مارتنزیت: اگر آستنیت به قدری سریع سرد شود که هیچ یک از استحاله‌های بر پایه نفوذ در آن اتفاق نیافتد و فوق سرمایش تا حدی ادامه یابد که ساختار fcc پایدار نباشد، این ساختار بصورت برشی (جابجایی همزمان تعداد زیادی از اتمها) به bcc تبدیل می‌شود که از کربن فوق اشباع شده است. فاز حاصل را مارتنزیت می‌نامند

MARTENSITE

cast irons

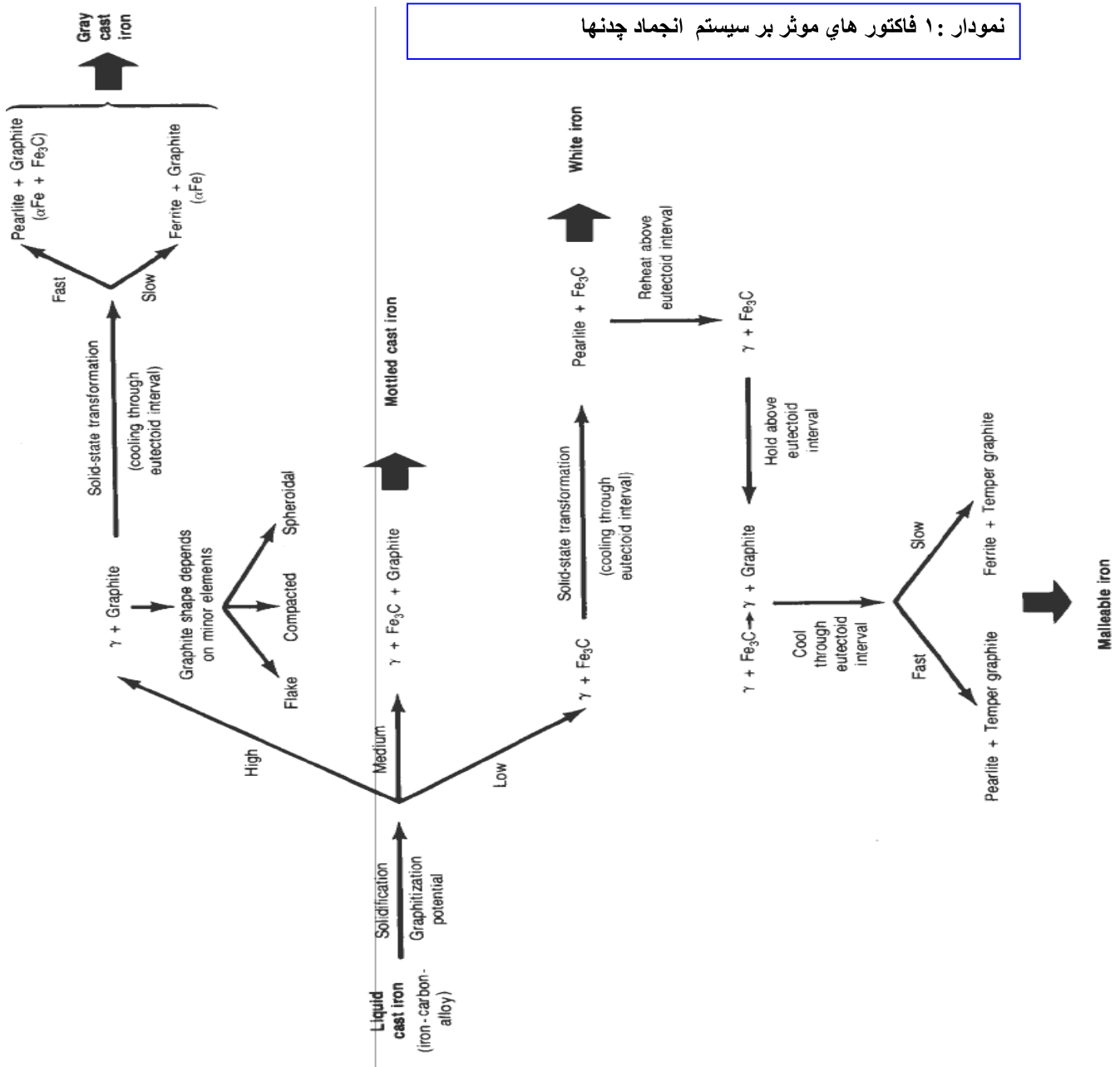
مقدمه ای بر چدن‌ها

چدن (cast iron) و فولاد (steel) گروه بزرگی از آلیاژهای آهنی هستند

اگر بخواهیم تعریف صحیحی از چدن داشته باشیم میتوانیم بگوییم که چدن‌ها آن دسته از آلیاژهای آهنی هستند که استحاله یوتکتیک در آنها رخ میدهد و عناصر اصلی آنها آهن، کربن و سیلیس میباشد. چدن‌ها از مقدار بیشتری کربن و سیلیس نسبت به فولادها برخوردار هستند. و به علت داشتن درصد کربن بیشتر، دارای ساختاری پر کربن و متفاوت از فولاد میباشد. و با توجه به ترکیب اصلی، سرعت انجماد و عملیات کیفی صورت گرفته بر روی مذاب، میتوانند از نظر ترمودینامیکی در دو سیستم نیمه پایدار ($Fe-Fe_3C$) و در سیستم پایدار ($Fe-Gr$) منجمد شوند (شکل ۱). در حالت نیمه پایدار فاز غنی از کربن، که از استحاله یوتکتیک به وجود می‌آید کاربید آهن (Fe_3C) میباشد. و زمانی که در حالت پایدار منجمد شود. فاز پر کربن ما فاز گرافیت میباشد. با توجه به نمودار آهن کربن، میتوانیم چدن‌ها را آلیاژهای آهنی با بیش از ۲ درصد کربن بدانیم، البته سیلیسیم و دیگر عناصر آلیاژی میتوانند میزان حلالیت کربن را در آستنیت تغییر دهند. بنابراین در موارد خاص در آلیاژهایی با کمتر از ۲ درصد کربن نیز میتوانند دارای استحاله یوتکتیک باشند و در خانواده چدن‌ها قرار بگیرند.

انجماد چدن دو سیستم نیمه پایدار (metastable) یا پایدار (stable) تابع فاکتورهای زیادی مانند انرژی جوانه زنی ترکیب شیمیایی و نرخ سرد شدن میباشد. دو فاکتور اول پتانسیل گرافیت زایی چدن را تعیین میکنند. گرافیت زایی در چدن‌های پرکربن دارای پتانسیل بالایی میباشد و در صورتی که کاربید آهن وجود داشته باشد، میل به گرافیت زایی به شدت کم میشود. نمودار ۱ مطالب فوق را نشان میدهد. چدنهایی که در سیستم‌های پایدار منجمد میشوند با چدنهایی که در سیستم نیمه پایدار منجمد میشوند دارای اختلاف بسیار زیادی در خواص مکانیکی مانند استحکام کششی، سختی، تافنس و داکتیلیته میباشند. بنابراین خواص چدن‌ها تابع نوع مقدار، و مورفولوژی (شکل) فاز یوتکتیک با توجه به خواص مکانیکی مورد نیاز میباشد.

نمودار ۱: فاکتور های موثر بر سیستم انجماد چدن‌ها



ریز ساختار چدن‌ها :

چنانچه میدانید ، خواص فلزات متأثر از ریز ساختار آنها است . در چدن ها نیز ریز ساختار از اهمیت خاصی برخوردار است . بطور کلی ریز ساختار تمامی چدن‌ها شامل دو قسمت یکی زمینه اصلی (فازهای آستنیت ، فریت ، پرلیت ، بینیت ، مارتنزیت) و دیگری فاز گرافیت (در حالتی که کربن به صورت آزاد است) و یا توده های سمانتیت (در حالتی که کربن به صورت ترکیبی است ، در زمینه اصلی میباشد . قبرای بررسی ریز ساختار در چدن ها بایستی هر دو جزء فوق مورد بررسی قرار گیرد . بعنوان نمونه میتوان گفت که تشکیل پرلیت که دارای سختی ، مقاومت به سایش و استحکام کششی بیشتری نسبت به فریت میباشد ولی شکل پذیری آن کمتر است . در برخی از کاربردها زمینه

فritی مطلوب است از جمله مواقعی که قابلیت ماشینکاری خوب نیاز باشد . و هنگامی که سطوحی با مقاومت به سایشی بالا نیاز باشد وجود فريت در زمینه نامطلوب تلقی میشود . همچنین به وجود آمدن کاربید موجب کاهش قابلیت ماشینکاری شده و افزایش سختی زیادی را به دنبال دارد .. در جدول زیر میزان سختی برای انواع زمینه در چدن خاکستری آورده شده است .

جدول (۳-۱) میزان سختی برای چدن خاکستری با وجود فازهای مختلف زمینه^(۳)

ریزساختار	سختی برینل (HB)
فريت + گرافيت	۱۱۰-۱۴۰
پرليت + گرافيت	۲۰۰-۲۶۰
پرليت + گرافيت + توده کاربید	۳۰۰-۴۵۰
بینيت + گرافيت	۲۶۰-۳۵۰
مارتنزيت تمپر شده + گرافيت	۳۵۰-۵۵۰
آستنيت + گرافيت	۱۴۰-۱۶۰

در چدن‌ها علاوه بر این ساختارها امکان تولید مخلوطی از آستنیت و فريت به نام آسفریت مشهور شده است توسط عملیات حرارتی قابل دست یابی است . همین امر موجب تشکیل گروه های جدید چدنهای داکتیل آستمبر شده به نام ADI و چدنهای خاکستری آستمبر شده AGI شده است . این گروه از چدن‌ها در مجموع خواص مکانیکی بالاتری نسبت به چدن‌ها دارا میباشند .

حضور گرافیت به عنوان یک فاز با استحکام بسیار پایین در زمینه اصلی موجب تضعیف خواص مکانیکی چدن‌ها نسبت به فولاد ها میشود . کاهش مقاومت چدن ها در برابر تنش های کششی نیز به علت وجود گرافیت در ساختار میباشد . از جمله خواص دیگر چدن ها که تحت تاثیر حضور گرافیت ، توزیع و شکل آنها در زمینه تغییر میکند استحکام خستگی ، استحکام پیچشی و استحکام کششی است . فاز گرافیت ممکن است به صورت ورقه ای یا کروی در ساختار حضور داشته باشد. عموماً از نظر خواص مکانیکی شکل کروی گرافیت ها مطلوب تر میباشد.

در چدن ها عمدتاً انعطاف پذیری مربوط به شکل گرافیت و سختی مربوط به ساختار زمینه آنها میباشد. وجود گرافیت در چدن ها باعث افزایش برخی خواص در آنها نسبت به فولاد میگردد. از جمله آنها میتوان به جذب ارتعاش بهتر و بهبود قابلیت ماشینکاری آنها اشاره نمود .

طبقه بندی چدن‌ها :

در زمانهای ابتدایی چدن‌ها را به دو دسته طبقه بندی کرده بودند

۱: چدن سفید (white iron) – که دارای سطح مقطع شکست سفید میباشد . چون شکست در طول صفحات

کاریبیدی اتفاق میافتد . که در نتیجه انجماد چدن در سیستم نیمه پایدار میباشد . (Fe_3C -eutectic)

۲: چدن خاکستری (Gray iron) – که دارای سطح مقطع شکست خاکستری بوده است . چون شکست در طول

ورقه های گرافیت اتفاق میافتد که در نتیجه انجماد چدن در سیستم پایدار میباشد . (Gr eutectic)

با پیشرفت علم متالوگرافی و علم چدن‌ها ، طبقه بندی چدن‌ها ساختارمیکروسکوپی آنها صورت گرفت . چدن‌ها بر حسب نوع ساختار میکروسکوپی آنها تقسیم بندی میشوند . بر این اساس ، پنج نوع چدن وجود دارد که عبارتند از: چدن سفید ، چدن مالیل (چکش خوار) ، چدن خاکستری ، چدن با گرافیت فشرده ، چدن با گرافیت کروی (نشکن)

ترکیب شیمیایی عمومی چدنهای فوق در جدول زیر آورده شده است

درصد(%)					نوع چدن
کربن	سیلیسیم	منگنز	گوگرد	فسفر	
3.6~1.8	1.9~0.5	0.8~0.25	0.2~0.06	0.2~0.06	چدن سفید
2.9~2.2	1.9~0.9	1.2~0.15	0.2~0.02	0.2~0.02	مالیل (ریختگی به صورت چدن سفید)
4~2.5	3~1	1~0.2	0.25~0.02	1~0.01	چدن خاکستری
4~3	2.8~1.8	1~0.1	0.03~0.01	0.1~0.01	چدن نشکن (با گرافیت کروی)
4~2.5	3~1	1~0.2	0.03~0.01	0.1~0.01	چدن با گرافیت فشرده

شکلهای مختلف گرافیت

- ۱: گرافیت لایه ای شکل _ (lamellar (flake) graphite) که به نام اختصاری FG شناخته میشوند
- ۲: گرافیت کروی شکل _ (spheroidal (nodular) graphite) که به نام اختصاری SG شناخته میشوند .
- ۳: گرافیت فشرده (compact graphite) که با نام اختصاری CG شناخته میشوند
- ۴: گرافیت تمپر شده که در اثر واکنشهای حالت جامد به وجود میآید و با نام TG شناخته میشوند .

فاز زمینه نیز میتواند فریت ، پرلیت ، آستنیت ، مارتنزیت و بینیت باشد

Table 1 Classification of cast iron by commercial designation, microstructure, and fracture

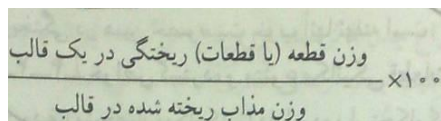
Commercial designation	Carbon-rich phase	Matrix(a)	Fracture	Final structure after
Gray iron	Lamellar graphite	P	Gray	Solidification
Ductile iron	Spheroidal graphite	F, P, A	Silver-gray	Solidification or heat treatment
Compacted graphite iron	Compacted vermicular graphite	F, P	Gray	Solidification
White iron	Fe ₃ C	P, M	White	Solidification and heat treatment(b)
Mottled iron	Lamellar Gr + Fe ₃ C	P	Mottled	Solidification
Malleable iron	Temper graphite	F, P	Silver-gray	Heat treatment
Austempered ductile iron	Spheroidal graphite	At	Silver-gray	Heat treatment

(a) F, ferrite; P, pearlite; A, austenite; M, martensite; At, austempered (bainite). (b) White irons are not usually heat treated, except for stress relief and to continue austenite transformation.

خال دار = mottled

مزایای چدنها :

- ۱: انعطاف پذیری در تولید : انواع روشهای ریخته گری شامل قالب ماسه ای ، دائمی ، گریز از مرکز و تحت فشار (برای قطعات کوچک)
- ۲: دارا بودن نقطه ذوب پایین : برخلاف فولاد ها که برای ذوب آنها به کوره های برقی نظیر قوس الکتریکی و القایی نیاز میباشد ، چدن ها را میتوان در انواع کوره ها با سوخت مایع - جامد و گازی ذوب نمود (کوره های زمینی - دوار و کوپل)
- ارزانی قطعات تولیدی (بازده ریختگی) : به علت نیاز به تغذیه گزاری کمتر چدن ها نسبت به سایر آلیاژ ها (به علت وجود گرافیت و انقباض کمتر) ، دور ریز کمتر و بازده بالاتری داریم



بعنوان مثال ، چنانچه ۱۲۰ کیلوگرم مذاب ریخته شده در قالبی ، ۹۰ کیلوگرم قطعه ریختگی بدست آید ، (یعنی ۳۰ کیلوگرم وزن راهگاه ها و تغذیه باشد) بهره بازدهی ریختگی برابر خواهد بود با

$$\frac{90}{120} \times 100 = 75\%$$

یکنواختی خواص مکانیکی: منظور از یکنواختی خواص مکانیکی ، عدم تغییر این خواص در جهات مختلف یک قطعه ریختگی است . چنانچه از نقاط مختلف یک قطعه ریختگی و در جهات مختلف نمونه بریده شود و تحت آزمایشات مکانیکی قرار گیرد ، خواص یکسانی را از خود نشان میدهند . به این خاصیت ایزوتروپی (همسویی) قطعه گویند بیشتر فولاد های کار شده ، فولاد های آلیاژی ریختگی ، مس ، آلومنیوم و آلیاژ های آنها دارای خواص مختلف در جهات مختلف هستند

قابلیت ماشینکاری خوب : بعلت وجود گرافیت در چدن ها ، از قابلیت ماشینکاری مناسب برخوردار هستند چون گرافیت بعنوان ناپیوستگی در ساختار چدن میباشد باعث ایجاد ماشینکاری منقطع و راحت تر میشود .
قابلیت جوشکاری : قابلیت جوشکاری چدن ها رعایت دستور العمل جوشکاری چدن ها (پیشگرم و استفاده از الکترودهای نیکلی) امکانپذیر است

مقاومت به خوردگی : این خاصیت بیشتر در چدن های آلیاژی که دارای مقدار سیلیسیم حدود ۱۷ درصد میباشدند در مقابل محیط های اسیدی خورنده مقاوم میباشدند .
محدودیت ها :

استحکام مکانیکی پایین تر نسبت به فولاد ها : چدن ها دارای مقاومت به ضربه (چقرمگی پایین تر) و درصد تغییر طول کمتری نسبت به فولاد ها میباشدند . در نتیجه در مقابل ضربه و استحکام کششی ، از فولاد ها ضعیف تر میباشدند .

اصول متالورژی چدن ها :

هدف یک متالورژ این است که فرایند تولید را طوری طراحی کند که به خواص مکانیکی مورد نظر دست یابد . این امر مستلزم این است که دانش کاملی از فاکتور هایی که خواص چدن به شدت تحت تاثیر آنهاست را داشته باشد . این فاکتورها ترکیب شیمیایی ، نرخ سرد شدن ، عملیات کیفی مذاب و عملیات حرارتی می باشد .

چدن سفید :

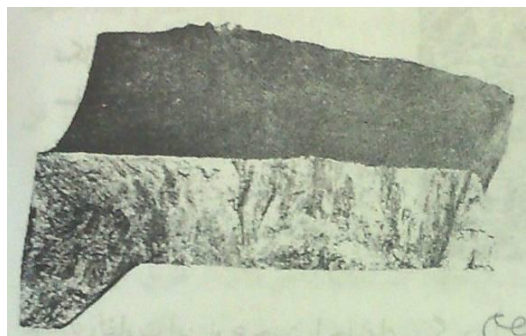


اگر ترکیب شیمیایی چدن در گستره چدن سفید و آهنک سرد شدن و انجماد به اندازه کافی سریع باشد چدن سفید به دست می آید . در چدن سفید ، تمامی کربن موجود به حالت ترکیب و به صورت سمنتیت وجود دارد . که ترکیبی سخت و ترد است .

ساختار یک چدن سفید (اچ شده با محلول نایتال با بزرگنمایی ۱۰۰)
قسمت های سفید کاربید (ساختار لدبوریتی) و قسمت های خاکستری رنگ پرلیت میباشد

سطح مقطع چدن سفید به صورت سیاه و سفید (شکل بالا) است ، نواحی سیاه رنگ پرلیت و سفیدها لدبوریت یوتکتیکی می باشند. این چدن چندان مصارف صنعتی نداشته و اکثرا برای ساخت چدن مالیبل از آن استفاده می شود. چدن سفید محتوی کربن و سیلیسیم کمی بوده و لذا دارای سیالیت کم ، تمایل به انقباض و ترک های حرارتی گرم و سرد زیاد می باشد. علاوه بر آن قطعات ریختگی چدن سفید در جریان انجماد و سرد شدن دارای تنش های پسماند زیادی هستند. استفاده از تغذیه و مبرد در چدن های سفید به خصوص در قسمت های ضخیم قطعه به منظور پرهیز از ایجاد حفره های ریز و درشت انقباض ضروری است.

تفاوت این چدن با چدنهای دیگر آن است که اصولا کربن آزاد (گرافیت) در آنها بسیار جزیی بوده و یا اصلا شامل کربن آزاد نمیباشند و تمامی کربن به صورت ترکیب (سمانتیت) در ساختار وجود دارد . این حالت چدن را سخت و شکننده کرده و معمولا آن را غیر قابل ماشینکاری میسازد . البته این چدن ها به علت وجود سمانتیت دارای خواص عالی مقاومت به سایش می باشند. نام چدن سفید از سطح مقطع شکست آن گرفته شده است . چنانچه قطعه ای از چدن سفید شکسته گردد ، مقطع شکست آن نشان دهنده کریستالهای سفید رنگی به شکل زیر است



چدن سفید دارای استحکام فشاری بسیار بالا به همراه مقاومت در برابر سایش عالی بوده و این خواص تا مرحله سرخ شدن قطعات در اثر حرارت دیدن حفظ میکند . به علت اینکه چدن های سفید دارای نقطه انجماد بالاتری نسبت به دیگر چدن ها میباشند ، لذا ریخته گری آنها مشکل تر بوده و از طرفی چون دارای گرافیت آزاد نیستند ، لذا انقباض حاصل از انجماد بیشتری دارند و در نتیجه به تغذیه گذاری بیشتری نیازمند هستند . در قسمتهایی از چدن که ترکیب آن شامل چدن خاکستری ولی دارای سرعت سرد شدن بالایی باشند ، کاربرد آهن (سمانتیت) میتواند در مجاورت گرافیت آزاد شکل گیرد که به آن چدن خالدار گویند . شکل زیر ساختار چدن خالدار را نشان داده است .



ساختار چدن خالدار

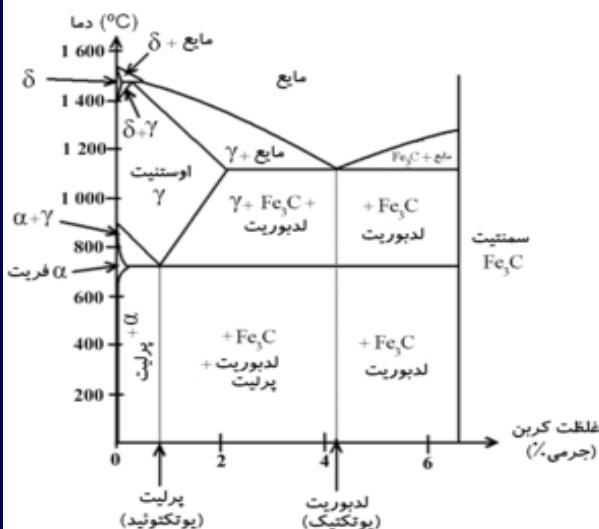
انواع چدن سفید بر اساس ساختار

۱- چدن سفید یوتکتیکی لدبوریتی $P + Fe_3C$

۲- چدن سفید هیپو یوتکتیک $Ld + P + Fe_3C$

۳- چدن هایپر یوتکتیکی $Ld + Fe_3C$

* ساختار لدبوریتی شامل آستنیت و سمانتیت در دمای بالا است که در هنگام انجماد، آستنیت آن به پرلیت تبدیل میشود و در دنیای ساختار لدبوریتی شامل پرلیت و سمانتیت در دمای محیط میباشد.

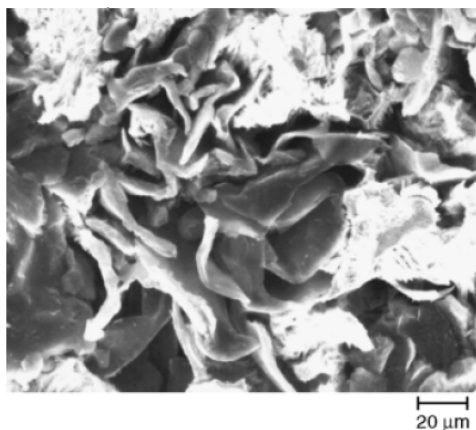


اگر چدن سفید را آلیاژی کنیم مبدل به یکی از پرمصرفترین چدن های خانواده چدن های آلیاژی می شود. که عمدتاً به عنوان قطعات مقاوم در برابر سایش و همچنین به عنوان قطعات مقاوم در مقابل اکسیداسیون و حرارت کاربرد دارد. چدن های سفید غیر آلیاژی و کم آلیاژی که کاربرد آنها از نوع سمانتیت است طی گذشت زمان های طولانی به دلیل مقاومت آنها در مقابل سایش (که از سخت بودن فاز سمانتیت ناشی می شود) مورد استفاده قرار گرفته و هم اکنون نیز جهت پاره ای از مصارف محدود صنعتی کاربرد دارد. در حالی که در شرایط کاری شدید سایش و ضربه عملکرد آنها محدود نیست. محدودیت آنها مربوط به شبکه پیوسته کاربرد آهن می شود که دانه های آستنیت را در خود احاطه کرده است و باعث تردی زیاد آنها می شود. تولید چدن سفید در مقاطع ضخیم با مشکل روبرو است زیرا امکان به وجود آمدن گرافیت آزاد و کاهش مقاومت به سایش وجود دارد. به وسیله آلیاژی کردن می توان سمانتیت، یا همان کاربرد آهن را در چدن های سفید با کاربرد های دیگر جایگزین کرد. زمانی که یک عنصر کاربردزا در حد معینی وارد آلیاژ شود، سمانتیت را ناپایدار نموده، به گونه ای که با کاربرد های دیگر جایگزین می شود. به این طریق این امکان وجود دارد که چدن های سفیدی را تولید نمود که فاز کاربرد آنها از سمانتیت سخت تر بوده و از نظر ساختاری نیز خواص مکانیکی بهتری را حاصل کند. بعنوان نمونه افزودن عنصر کرم به ترکیب شیمیایی باعث تولید کاربرد کرم (M_7C_3) نموده که علاوه بر ایجاد سختی بالا، چقرمگی قطعه نیز تا حدودی حفظ شود. قطعات ساخته شده از چنین آلیاژی علاوه بر مقاومت در برابر سایش در برابر ضربه های احتمالی در حین کار نیز مقاومت خوبی دارند. عواملی که روی خواص مکانیکی چدن های سفید از جمله سختی، ضربه پذیری اثر می گذارند عبارت اند از: نوع کاربرد - شکل و اندازه کاربردها - اندازه دانه - ساختار زمینه نوع کاربرد

چدن خاکستری (گرافیت ورقه ای):

تعریف: چدن های خاکستری جزو مهمترین چدن های مهندسی هستند اگر ترکیب شیمیایی چدن در محدوده چدن خاکستری و آهنگ انجماد معتدل باشد، کربن موجود در آهن به هنگام انجماد از آن جدا شده و رشته های گرافیت را شکل میدهند. چدن های خاکستری سیالترین آلیاژهای آهنی هستند و در نتیجه، مقاطع پیچیده و نازک را میتوان

ایجاد کرد. این چدن ها نام این چدن ها از خصوصیات رنگ خاکستری سطح مقطع شکست آن و شکل گرافیت مشتق می شود. خواص چدن های خاکستری به اندازه، مقدار و نحوه توزیع گرافیت ها و ساختار زمینه بستگی دارد. کاربرد این چدن ها در ساخت ماشین آلات عمومی، کمپرسورهای سبک و سنگین، قالب ها، میل لنگ ها، شیر فلکه ها و اتصالات لوله ها می باشد.



تصویر گرافیت ورقه ای که با میکروسکوپ الکترونی روبشی گرفته شده است

اثر عناصر آلیاژی عمده در چدن خاکستری:

عناصری که معمولا در چدن خاکستری وجود داشته و یا سپس به آن اضافه میشوند، میتوانند مطابق اثرشان روی چدن در خلال انجماد و خنک کاری به دو گروه تقسیم شوند. عناصری که باعث تسریع تشکیل گرافیت میشوند و به عناصر گرافیت زا مثل سیلیسیم، آلومنیوم، تیتانیوم، نیکل و مس و آنهایی که موجب ماندن کربن بصورت کاربید های آهن در چدن میشوند به عناصر کاربید زا مثل منگنز، مولیبدن، کرم و وانادیوم موسومند.

سیلیسیم: سیلیسیم بعد از عنصر کربن قویترین عامل گرافیت زا به شمار میرود. این عنصر احتمالا با آهن Fe_3Si تشکیل داده و از خود گرافیت آزاد به جای میگذارد. بیشترین حد سیلیسیم در چدن ها به مقدار ۳ درصد میرسد.

نیکل: نیکل نیز به گرافیت شدن کمک میکند ولی تاثیر آن به اندازه نصف تاثیر سیلیسیم میباشد. نیکل باعث افزایش استحکام، سختی و خواص مکانیکی می شود و همچنین باعث افزایش وزن مخصوص چدن می شود که یک عامل پرلیت زا می باشد که باعث ایجاد پرلیت ریز در چدن خاکستری می شود. نیکل معمولا به همراه عنصر کرم استفاده می شود.

قلع: این عنصر مشابه مس بوده و پرلیت زایی قوی می باشد و همچنین باعث ایجاد پرلیت ریز می شود.

کرم: کرم کاربیدهای پایداری را تشکیل میدهد و به تشکیل پرلیت نیز کمک میکند. و باعث افزایش مقاومت به سایش میشود.

مولیبدن: مولیبدن باعث ریز شدن پرلیت شده و باعث افزایش استحکام چدن میشود.

مس: مس تشکیل گرافیت را به اندازه یک پنجم سیلیسیم تسریع میکند.

وانادیوم: عنصری کاربید زا و باعث ریزدانگی میشود.

سرب: این عنصر مضر بوده و مخرب گرافیت می باشد و همچنین باعث پوک شدن گرافیت های موجود در مذاب چدن می شود

گوگرد: این عنصر کاربرد زیادی بسیار قوی ای می باشد که اثر خود را در چدن های خاکستری با منگنز خنثی می کند

فرمول تعیین میزان منگنز مصرفی $Mn = 1/7\% S + 0/3$

فسفر: مقدار فسفر معمولاً بین ۰,۸ تا ۰,۰۲ درصد بوده و باعث افزایش سیالیت ذوب میشود. البته فسفر به مقدار بالاتر از ۰,۱۵ درصد به صورت اجزای یوتکتیک با آهن (استدیت) تشکیل داده و که دارای نقطه ذوب ۹۸۰ درجه سانتیگراد میباشد که باعث پارگی گرم در دماهای بالا میشود.

کلاسهای چدن خاکستری:

استاندارد ASTM-SPEC A48 به طور ساده چدنهای خاکستری را بر حسب میزان استحکام کششی آنها بر حسب Ksi دسته بندی کرده است. و از کلاس ۲۰ شروع و تا کلاس ۶۰ ادامه دارد.

با بالا رفتن کلاس چدن، خواص زیر آشکار میشود

۱: استحکام چدن و استحکام در دمای بالا * ۲: کیفیت سطحی بالاتر در ماشینکاری * ۳: مدول الاستیسیته بالاتر * ۴: مقاومت به سایش *

و برعکس با بالا رفتن کلاس چدن، خواص زیر کاهش پیدا میکنند.

۱: قابلیت ماشینکاری * ۲: پایداری در مقابل شوکهای حرارتی * ۳: خاصیت ضربه گیری *

۴: قابلیت ریخته گری در مقاطع نازک *

ترکیب شیمیایی چدن خاکستری:

ترکیب شیمیایی چدن خاکستری باید به نحوی انتخاب شود که نیازهای زیر را برآورده سازد

۱: شکل و توزیع مورد نیاز گرافیت.

۲: ساختار کاربرد آزاد

۳: زمینه مورد نیاز

در چدنهای خاکستری معمولی، عناصر آلیاژی اصلی کربن و سیلیسیم میباشد. در شکل ۲ رنج عناصر آلیاژی چدن با فولاد مقایسه شده است. شکل نشان میدهد که حداکثر مقدار کربنی که در آستنیت قابل حل است ۲ درصد میباشد و با خط نازک نشان داده شده است. درصد کربن بالا مقدار کربن و سمانتیت را تشدید میکند. درصدهای بالاتر کربن قابلیت گرافیت زایی و خواص ریخته گری خاکستری را بهبود میبخشد

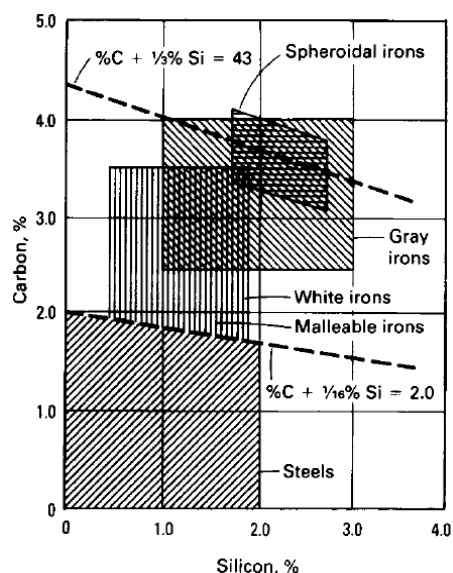
کربن معادل:

تاثیر مشترک عناصر اصلی چدنهای تحت عنوان کربن معادل (carbon equivalent) نام دارد به صورت اختصاری

$$CE = \%C + \frac{1}{3}(\%Si + \%P)$$

CE نامیده میشود.

مقایسه عناصر در چدن خاکستری و فولاد



اشکال مختلف گرافیت در چدن خاکستری: ASTM-A247

مثال: مشخص کنید که کدامیک از آلیاژهای زیر از سیالیت بیشتری برخوردار است؟ (راهنمایی: هرچه ترکیب آلیاژ به نقطه یوتکتیک نزدیکتر باشد از سیالیت بالاتری برخوردار است)

A: c=3% si=4% p= 0.5%

B: c=3.5% si=2% p= 0.5%

C: c=2.5 si=6% p= 0.5%

عناصر آلیاژی تاثیر بسیار مهمی بر روی شکل گرافیت (مورفولوژی) چدن خاکستری دارد - مورفولوژی های

گرافیت روقه ای به صورت زیر میباشد

گرافیت نوع A: این نوع گرافیت در اثر عملیات تلقیح و سرعت سرد کردن معتدل به دست میآید. این نوع گرافیت

دارای بهترین خواص مکانیکی میباشد. این گرافیت بهترین نوع گرافیت در چدن خاکستری بوده و در میان گرافیت ها

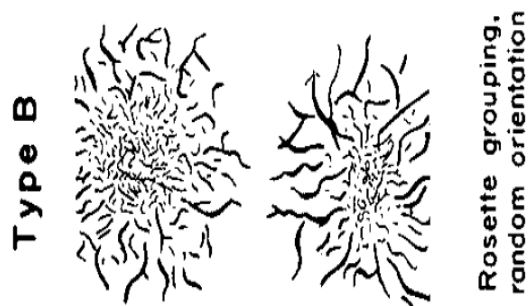
بیشترین قابلیت جذب ارتعاش را دارد

Type A

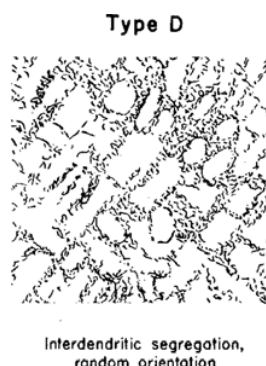


Uniform distribution,
random orientation

گرافیت نوع B (Rosette): این نوع گرافیت در چدنهایی با ترکیب نزدیک به ترکیب یوتکتیک ایجاد میشود. و در حضور مقدار محدود جوانه اتفاق میافتد. مقدار مادون انجماد نیز کم بوده و دارای ساختار درشت دانه یوتکتیک میباشند.

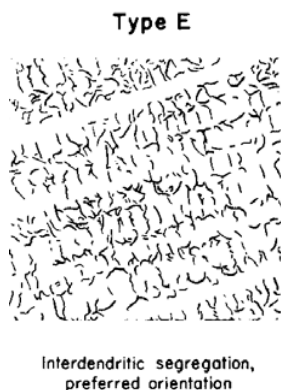


گرافیت نوع C (کیش): این نوع گرافیت در چدنهای هایپر یوتکتیک به وجود و با نرخ سرد شدن کم به وجود می آید. این نوع گرافیت در چدن های هایپر به وجود می آید. و در واقع گرافیت کیش کربنی است که از مذاب جدا شده و بر اثر تجزیه سمیتیت به وجود می آید. و مقاطع درشت به صورت درشت و مقاطع نازک به صورت ستاره ای شکل دیده می شود این نوع گرافیت باعث کاهش خواص مکانیکی شده و کمترین خواص مکانیکی را در بین گرافیت ها دارد اما دارای بیشترین خواص فیزیکی در بین گرافیت ها می باشد. مانند خواص حرارتی و رسانایی خوب



گرافیت نوع D:

اندازه گرافیتها بسیار ریز ، دندریته کاملاً مشخص است. در جایی که نیاز به سطوح تراشیده شده بسیار صاف مطرح است. این نوع گرافیت در چدنهایی نزدیک به ترکیب یوتکتیک که خیلی سریع سرد شده اند و جوانه زایی (تلقیح) نیز به علت سرعت بالای سرد شدن به خوبی انجام نگرفته باشد به وجود میآید



گرافیت نوع E: فقط گرافیت نوع E در چدنهایی که دارای کربن پایینی هستند (چدن با ترکیب شدید زیر یوتکتیک) به وجود می آید. این نوع گرافیت دارای ساختاری دندریتی (که در حقیقت دندریتهای آستنیت اولیه هستند) بوده که ذرات گرافیت روی شاخه دندريت با جهات ترجیحی قرار می گیرند.

تمایل به ایجاد این نوع گرافیت که از نظر ظاهری شبیه گرافیت نوع D است (و در حقیقت محتوی مقداری گرافیت نوع D نیز می باشد) با کاهش مقدار کربن معادل در چدن افزایش می یابد. از نظر خواص مکانیکی قطعات، گرافیت نوع E از نوع A بدتر بوده ولی از انواع دیگر گرافیتها بهتر است.

نکته مهم این است که همیشه شکل گرافیت تنها تعیین کننده خواص نیست. بلکه سایز گرافیت نیز بسیار تاثیر گذار میباشد چون طور مستقیم به استحکام مربوط میشود. با توجه به اینکه اندازه گرافیت به صورت لایه ای و بیای کروی تاثیر زیادی بر روی خواص چدن ها دارد، به همین دلیل کنترل آنها با توجه به کاربرد قطعات ریختگی چدن خاکستری امری ضروری است. بعنوان مثال گرافیت های ورقه ای بزرگ برای انتقال حرارت و گرافیت های ریز برای خواص ضربه گیری و خواص کششی بالاتر و خواص ماشینکاری بالاتر مورد استفاده دارند. از این رو در استاندارد ASTM -A247 علاوه بر شکل و نوع گرافیت ها، استاندارد برای اندازه گیری ابعاد گرافیت ها در حالت لایه ای و یا کروی وجود دارد. که در جدول زیر آورده شده است

جدول (۶-۳) اندازه های ذرات گرافیت^(۳)

اندازه های مرجع	اندازه ذرات قابل مشاهده در بزرگنمایی ۱۰۰	اندازه های حقیقی
۱	$100 <$	$1 <$
۲	۵۰-۱۰۰	۰/۵-۱
۳	۲۵-۵۰	۰/۲۵-۰/۵
۴	۱۲-۲۵	۰/۱۲-۰/۲۵
۵	۶-۱۲	۰/۰۶-۰/۱۲
۶	۳-۶	۰/۰۳-۰/۰۶
۷	۱/۵-۳	۰/۰۱۵-۰/۰۳
۸	$1/5 >$	$0/015 >$

