

به نام خدا



# مرکز دانلود رایگان مهندسی متالورژی و مواد

[www.Iran-mavad.com](http://www.Iran-mavad.com)



# متالورژی و عملیات حرارتی

## چدن‌ها

کلیه مطالب زمینه این جزوه آموزشی برگرفته از کتاب  
"اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها و چدن‌ها"  
تالیف دکتر محمد علی گل‌عذار می باشد . فهرست  
مراجع موارد افزوده شده به مطالب منبع فوق ، در  
انتهای این جزوه آمده است .

## دیباچه

چدن‌ها خانواده‌ای از آلیاژهای آهنی با خواص کاملاً متنوع بوده که اکثراً به روش ریخته‌گری شکل داده می‌شوند. برخلاف فولادها که حاوی کمتر از ۲ درصد (و معمولاً کمتر از ۱ درصد) کربن هستند، چدن‌ها معمولاً دارای ۲ تا ۴ درصد کربن و ۱ تا ۳ درصد سیلیسیم می‌باشند. به‌علاوه، اغلب عناصر آلیاژی دیگر (فلز و یا غیرفلز) جهت کنترل ترکیب شیمیایی، ساختمان میکروسکوپی و در نتیجه خواص مکانیکی به چدن‌ها اضافه می‌شود.

علاوه بر ترکیب شیمیایی، پارامترهای مهم دیگر که بر روی خواص نهائی اثر می‌گذارند عبارتند از: فرآیند انجماد، سرعت انجماد، سرعت سرد شدن پس از انجماد و عملیات حرارتی.

برخی از خواص ویژه چدن‌ها که آنها را از فولادها متمایز می‌سازد عبارتند از: ارزانی قیمت، نقطه ذوب پائین (بین ۱۱۳۰ تا ۱۲۵۰ درجه سانتیگراد)، سیالیت بالا، پائین بودن میزان انقباض در موقع انجماد و سرد شدن، مقاومت ضربه پائین، انعطاف‌پذیری کم، قابلیت جذب ارتعاش، مقاومت خوب سایش و عدم حساسیت در برابر شیارهای سطحی.

نکته قابل تذکر در مورد خواص فوق این است که، بسیاری از آنها شدیداً بستگی به ساختمان میکروسکوپی زمینه و نحوه توزیع کربن در آن دارد. از اینرو، با تغییر هر یک از پارامترهای فوق خواص چدن نیز ممکن است کاملاً تغییر کند. به عنوان مثال در حالی که گرافیت لایه‌ای شکل، انعطاف‌پذیری چدن را شدیداً کاهش می‌دهد، چدن‌های نشکن از انعطاف‌پذیری بسیار خوبی برخوردارند، و یا اینکه چدن‌های نشکن با زمینه بینیتی دارای مقاومت به ضربه و سایش بسیار خوبی می‌باشند.

مطالب این جزوه به دو بخش تقسیم شده، در بخش اول متالورژی چدن‌ها را مورد بررسی قرار داده و در بخش دوم عملیات حرارتی چدن‌ها و چگونگی بهبود خواص مکانیکی آنها، با استفاده از روشهای مختلف عملیات حرارتی مطالعه خواهد شد.

## ۱- متالورژی چدن‌ها

اساساً چدن‌ها، از آهن خام<sup>۱</sup> که محصول کوره بلند بوده و معمولاً دارای ۲ الی ۴ درصد کربن، حداکثر ۳/۵ درصد سیلیسیم، حداکثر ۲ درصد فسفر، حداکثر ۲ درصد منگنز و ۰/۴ درصد گوگرد می‌باشد تهیه می‌شوند. برای این کار آهن خام با ترکیب شیمیائی مزبور را همراه با درصد مشخصی از چدن و یا قراضه فولاد ذوب کرده، پس از تنظیم ترکیب شیمیائی به کمک عناصر دیگری که به مذاب اضافه می‌کنند، آنرا در اشکال مورد نظر ریخته‌گری می‌نمایند.

همانگونه که گفته شد، خواص مکانیکی چدن‌ها نظیر سختی و استحکام، شدیداً بستگی به ساختمان میکروسکوپی، یعنی طبیعت ساختمان زمینه و نحوه توزیع کربن دارد. تحت شرایطی که هر یک از پارامترهای مزبور منجر به ایجاد خواص نامطلوب در چدن‌ها شود، به کمک عناصر آلیاژی و یا عملیاتی که بر روی مذاب انجام می‌گیرد و یا عملیات حرارتی، پارامتر مورد نظر را در جهت بهبود خواص مکانیکی می‌توان تغییر داد.

در این بخش ابتدا پدیده گرافیت‌زائی<sup>۲</sup> در چدن‌ها و بعد نمودارهای شبه تعادلی آهن - سمیتیت و تعادلی آهن - گرافیت مورد بررسی قرار می‌گیرند. سپس پارامترهائی نظیر توزیع و شکل گرافیت، ساختمان زمینه و اثر ضخامت قطعه مطالعه شده و در پایان، انواع مختلف چدن‌ها معرفی خواهند شد. روشهای عملیات حرارتی چدن‌ها در بخش بعد توضیح داده می‌شوند.

### ۱-۱- گرافیت‌زائی

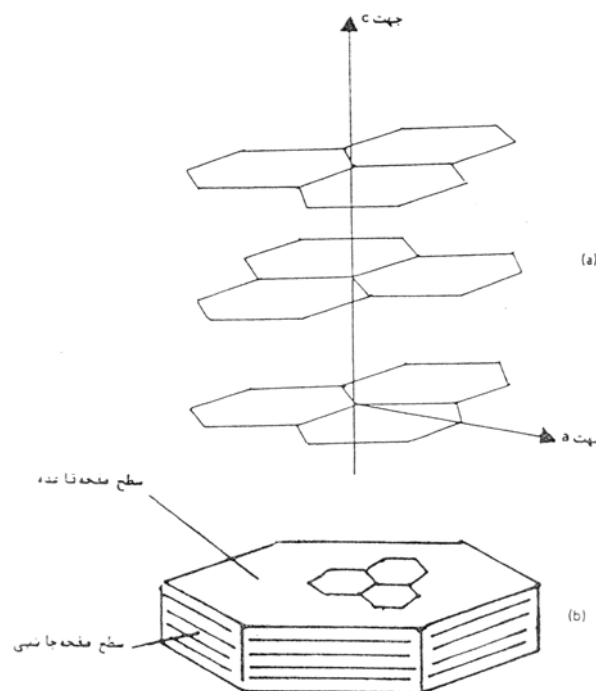
کربن می‌تواند به دو صورت یکی الماس<sup>۳</sup> و دیگری گرافیت<sup>۴</sup> وجود داشته باشد، الماس نوع بسیار کمیاب کربن بوده و در آلیاژها تشکیل نمی‌شود. کربن چدن‌ها می‌تواند به صورت آزاد، یعنی گرافیت، و یا به صورت ترکیبی، یعنی سمیتیت، باشد. گرافیت دارای ساختمان کریستالی لایه‌ای شبیه به شکل ۱a می‌باشد. سطح هر یک از لایه‌ها تشکیل

- 
- Pig Iron
  - Graphitization
  - Diamond
  - Graphite

صفحه قاعده را داده و لبه‌های لایه‌ها صفحات جانبی را به وجود می‌آورند (شکل ۱b). در چندهای خاکستری سرعت رشد گرافیت در جهات کریستالی  $a$  و  $c$  یکسان نیست.

به این صورت که رشد آن در امتداد محور  $a$  راحت تر و بیشتر از محور  $c$  می‌باشد. از جمله دلایلی که برای این امر آورده شده، عبارت است از: جذب گوگرد و اکسیژن مذاب بر روی صفحات قاعده و در نتیجه محدود کردن سرعت رشد گرافیت در جهت محور  $c$ . این نکته با مطالعه و مقایسه آلیاژهای  $Fe-C-Si$  خالص و عاری از اکسیژن و گوگرد و آلیاژهای معمولی  $Fe-C-Si$  به اثبات رسیده است. گرافیت از استحکام و خاصیت پلاستیکی بسیار پائین برخوردار می‌باشد.

از مقایسه ساختمان کریستالی و ترکیب شیمیائی آستنیت، سمیتیت و گرافیت نتایج صفحه بعد به دست می‌آیند.



شکل ۱: (a) مدل شبکه فضائی گرافیت (b) شکل هندسی گرافیت ورقه‌ای

تشابه بین ساختمان کریستالی آستنیت و سمنتیت در مقایسه با تشابه بین ساختمان کریستالی آستنیت و گرافیت بیشتر است. از نظر ترکیب شیمیایی، شباهت آستنیت (که حداکثر می‌تواند ۲ درصد کربن داشته باشد) به سمنتیت (با ۶/۶۷ درصد کربن) بسیار بیشتر از شباهت آستنیت به گرافیت (که کربن خالص است) می‌باشد.

از اینرو، تشکیل سمنتیت از مذاب و یا آستنیت بسیار ساده‌تر از تشکیل گرافیت از مذاب و یا آستنیت می‌باشد. بنابراین از نظر سینتیکی، احتمال تشکیل مخلوط آستنیت - سمنتیت و یا فریت - سمنتیت بسیار بیشتر از احتمال تشکیل مخلوط آستنیت - گرافیت و یا فریت - گرافیت خواهد بود.

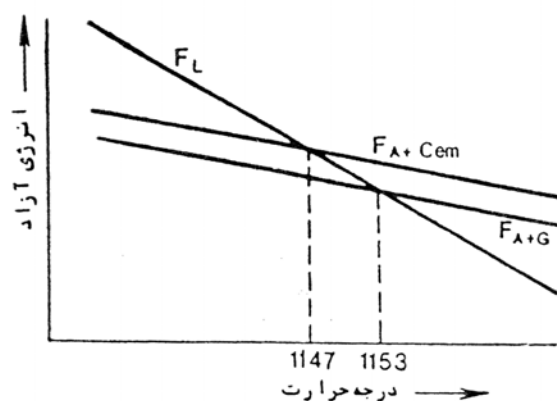
از سوی دیگر گرافیت به مراتب پایدارتر از سمنتیت می‌باشد. به بیان دیگر انرژی آزاد مخلوط فریت - گرافیت و یا آستنیت - گرافیت نسبت به مخلوط مشابهی از فریت - سمنتیت و یا آستنیت - سمنتیت به مراتب کمتر است. بنابراین، از نظر ترمودینامیکی تمایل برای تشکیل گرافیت به مراتب بیشتر از سمنتیت می‌باشد.

در موقع مطالعه چگونگی انجماد و سرد شدن چندهای مختلف شرایط فوق باید در نظر گرفته شوند. در حقیقت اگر شرایط موجود به نحوی باشد که امکان تشکیل جوانه‌های گرافیت وجود داشته باشد، کربن موجود در چدن عمدتاً به شکل گرافیت ظاهر می‌شود. در غیر این صورت، به جای گرافیت آزاد سمنتیت تشکیل خواهد شد.

به‌طور کلی تغییر حالت یک ماده موقعی امکانپذیر است که حالت جدید آن از نظر ترمودینامیکی پایدارتر باشد. به بیان دیگر دارای انرژی آزاد کمتری باشد. به عنوان مثال، در انجماد یک فلز در زیر درجه حرارت انجماد، حالت متبلور شده آن (جامد) نسبت به مذاب دارای انرژی آزاد کمتری بوده و بنابراین از نظر ترمودینامیکی پایدارتر می‌باشد. از اینرو انجماد در آن درجه حرارت انجام می‌گیرد.

درجه حرارت پایانی انجماد مذاب به مخلوط آستنیت - سمنتیت برابر ۱۱۴۷ درجه سانتیگراد می‌باشد. بنابراین منحنیهای مربوط به تغییرات انرژی آزاد بر حسب درجه حرارت برای مذاب و مخلوط آستنیت - سمنتیت یکدیگر را در ۱۱۴۷ درجه سانتیگراد قطع می‌کنند (شکل ۲). یعنی در زیر درجه حرارت مزبور انجماد و در بالای آن ذوب انجام می‌گیرد.

همانگونه که بحث شد، مخلوط آستنیت - گرافیت از نظر ترمودینامیکی پایدارتر از مخلوط آستنیت - سمیتیت می باشد. از اینرو منحنی مربوط به تغییرات انرژی آزاد مخلوط آستنیت - گرافیت برحسب درجه حرارت، در تمام دماها باید در زیر منحنی مربوط به تغییرات انرژی آزاد مخلوط آستنیت - سمیتیت باشد.



شکل ۲: اثر درجه حرارت بر روی انرژی آزاد مذاب و مخلوط آستنیت - سمیتیت و آستنیت - گرافیت

بنابراین منحنی انرژی آزاد مخلوط آستنیت - گرافیت، منحنی انرژی آزاد مذاب را در دمائی بالاتر از ۱۱۴۷ درجه سانتیگراد قطع می کند. این درجه حرارت در حدود ۱۱۵۳ درجه سانتیگراد می باشد. از بحث فوق این نتایج به دست می آید:

در زیر درجه حرارت تعادلی واکنش  $L \rightarrow A + Cem$  (یعنی ۱۱۴۷ درجه سانتیگراد)، انجماد همراه با تشکیل سمیتیت می باشد. زیرا انجام واکنش مزبور از نظر سینتیکی امکانپذیرتر است. تحت شرایط فوق تشکیل گرافیت فقط در اثر یک واکنش ثانویه (یعنی تجزیه سمیتیت تشکیل شده در مرحله قبل) امکانپذیر می باشد.

در محدوده حرارتی ۱۱۴۷ تا ۱۱۵۳ درجه سانتیگراد، اصولاً تشکیل مخلوط فریت - سمیتیت از مذاب غیر ممکن بوده و انجماد با تشکیل مخلوط آستنیت-گرافیت، مستقیماً از مذاب صورت می گیرد.

با استدلال مشابهی می توان مشخص کرد که آستنیت چه موقع به مخلوط فریت- سمیتیت و چه موقع به مخلوط فریت - گرافیت تجزیه می شود. نتایج تجربی به دست آمده نشان داده اند که واکنش  $A \rightarrow F + Cem$  در ۷۲۷



درجه سانتیگراد و واکنش  $A \rightarrow F + G$  در درجه حرارتی بالاتر یعنی ۷۳۸ درجه سانتیگراد، انجام می‌گیرد. بنابراین در

محدوده حرارتی ۷۲۷ تا ۷۳۸ درجه سانتیگراد آستنیت می‌تواند به مخلوط فریت - گرافیت تجزیه شود.

به بیان دیگر در محدوده حرارتی فوق، تشکیل مخلوط فریت - سمیتیت (پرلیت) اصولاً امکانپذیر نیست.

ملاحظات سینتیکی - ترمودینامیکی فوق که پایه و اساس متالورژی چدن‌هاست باید بر روی نمودار آهن - کربن نشان داده شوند.

در نمودار آهن - کربن، دماهای تشکیل مجموعه فازهای آستنیت - سمیتیت و یا فریت - سمیتیت را معمولاً توسط خطوط ممتد نشان می‌دهند و به نمودار شبه پایدار موسوم است. از سوی دیگر، مجموعه فازهای آستنیت - گرافیت و یا فریت - گرافیت در دماهایی بالاتر تشکیل می‌شوند. بنابراین خطوط تعادلی فازی آنها که معمولاً توسط خط منقطع نشان داده می‌شوند باید بالاتر از خطوط ممتد قرار گیرند، از اینرو در نمودارهای آهن - کربن معمولاً دو خطه رسم می‌شوند، یکی خط ممتد که تعادل بین آستنیت (فریت) و سمیتیت را نشان می‌دهد و دیگری خط منقطع که تعادل بین فازهای آستنیت (فریت) و گرافیت را مشخص می‌کند.

تشکیل گرافیت از مذاب و آستنیت در دامنه حرارتی محدودی، یعنی بین خطوط پایدار (منقطع) و شبه پایدار (ممتد) در نمودار آهن - کربن، انجام می‌گیرد. به بیان دیگر، تحت شرایطی که میزان تحت تبرید در ضمن انجماد و تجزیه آستنیت بسیار کم باشد. لازمه داشتن تحت تبرید کم، سرعت سرد شدن آهسته می‌باشد. علاوه بر سرعت سرد شدن، پارامترهای دیگری نیز وجود دارند که نقش بسیار مهمی را در رابطه با تشکیل گرافیت ایفا می‌کنند. برخی از این پارامترها عبارتند از:

- ترکیب شیمیایی
- میزان فوق گداز
- مواد جوانه زا

## ۱-۲- بررسی نمودار شبه تعادلی آهن - سمیتیت

همانگونه که بحث شد، اگر سرعت سرد شدن به اندازه کافی زیاد باشد، در ضمن انجماد و مراحل بعد از آن تشکیل گرافیت امکانپذیر نبوده و در عوض سمیتیت به وجود می‌آید. بنابراین انتظار می‌رود که ساختمان نهائی شامل مجموعه‌ای از فریت و سمیتیت باشد. معه‌ذا درصد و نحوه توزیع هر یک از فازهای مزبور در ساختمان میکروسکوپی نهائی بستگی به درصد کربن چدن دارد (معمولاً در چدن‌ها به جای درصد کربن، از کربن معادل<sup>۵</sup> استفاده می‌شود). به علت وجود فاز سفید رنگ سمیتیت در ساختمان میکروسکوپی این نوع چدن‌ها، سطح مقطع شکست آنها سفید و براق می‌باشد. از اینرو به آنها چدن سفید<sup>۶</sup> گفته می‌شود. چدن‌های سفید بسیار ترد و شکننده بوده و قابلیت ماشینکاری ندارند. از سوی دیگر، مقاومت به سایش آنها بسیار عالی است.

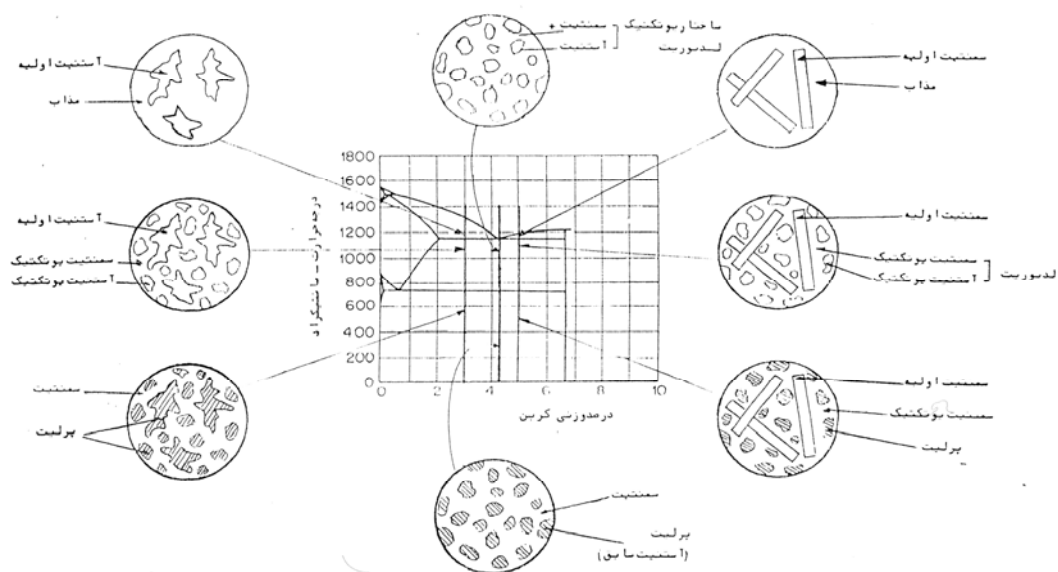
### ۱-۲-۱- انجماد آلیاژهای هیپوئوتکتیک در سیستم آهن - سمیتیت

انجماد این نوع چدن‌ها با جدا شدن فاز آستنیت اولیه که به صورت دندریتی رشد می‌کند شروع می‌شود. با کاهش درجه حرارت، آستنیت بیشتری تشکیل شده و همزمان درصد کربن مذاب باقیمانده افزایش می‌یابد. در ۱۱۴۷ درجه سانتیگراد درصد کربن مذاب باقیمانده به  $\frac{4}{3}$  (یعنی برابر درصد کربن یوتکتیک) می‌رسد. در این درجه حرارت مذاب مزبور در اثر یک تحول یوتکتیکی به مجموعه‌ای از آستنیت و سمیتیت تبدیل می‌شود که به لدبوریت<sup>۷</sup> موسوم است (شکل ۳). ساختمان حاصل از استحاله یوتکتیکی مزبور (لدبوریت) لایه‌ای نبوده، بلکه به شکل میله‌ای<sup>۸</sup> می‌باشد. با ادامه سرد کردن به علت کاهش حد حلالیت کربن در آستنیت، از آستنیت اولیه و همچنین آستنیت یوتکتیکی مقداری سمیتیت را سب شده و درصد کربن آنها را کاهش می‌دهد. سمیتیت مزبور ممکن است به‌طور مستقل رسوب کند. ولی اغلب به سمیتیت‌هایی که از قبل تشکیل شده ملحق می‌شود. در ۷۲۷ درجه سانتیگراد، آستنیت که حاوی ۰/۷۷ درصد کربن می‌باشد طی یک تحول یوتکتوئیدی به پرلیت تبدیل شده، در حالی که سمیتیت زمینه همچنان

- 
- Carbon Equivalent
  - White Cast Iron
  - Ledeburite
  - Rod Like Eutectic

بدون تغییر باقی می ماند (شکل ۳). از این لحظه به بعد تا دمای اتاق، تغییر چندانی در ساختمان میکروسکوپی به وجود نمی آید.

ساختمان میکروسکوپی مربوط به یک چدن هیپویوتکتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل دندریتهای آستنیت اولیه (نواحی سیاه رنگ) و یوتکتیک لدبوریتی (زمینه سفید شامل نواحی ریز سیاه رنگ) کاملاً مشخص هستند. مطالعه ساختمان میکروسکوپی مزبور در بزرگنماییهای بالاتر، نشان می دهد که نواحی سیاه رنگ در حقیقت لایه های متناوب فریت و سمیتیت یعنی پرلیت حاصل از استحاله یوتکتوئیدی آستنیت می باشد (شکلهای ۵ و ۶). در تصاویر ۴ و ۵ ملاحظه می شود که نواحی پرلیتی به طور غیریکنواخت اچ شده اند، این امر می تواند ناشی از پدیده جدایش<sup>۹</sup> و یا کورینگ<sup>۱۰</sup> در ساختمان دندریتی آستنیت اولیه باشد.



شکل ۳: نمودار شبه تعادلی آهن - سمیتیت و نمایش شماتیک چگونگی انجماد، سرد شدن و ساختارهای میکروسکوپی حاصل مربوط به چدنهای یوتکتیک، هیپویوتکتیک و هایپریوتکتیک.

-Segregation

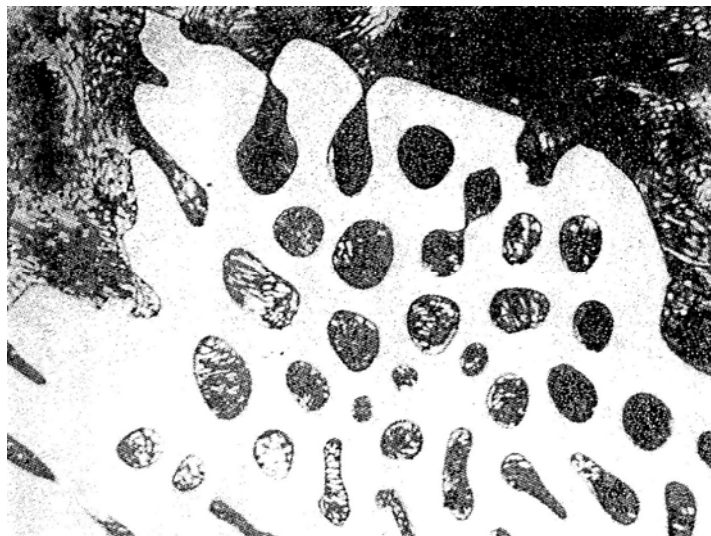
-Coring



شکل ۴: تصویر میکروسکوپی چدن سفید هیپوئکتیک، نواحی پرلیت دندریتی شکل (آستنیت اولیه) و یوکتیک لدوریته کاملاً مشخص است. محلول اچ پیکرال . بزرگنمایی ۱۰۰



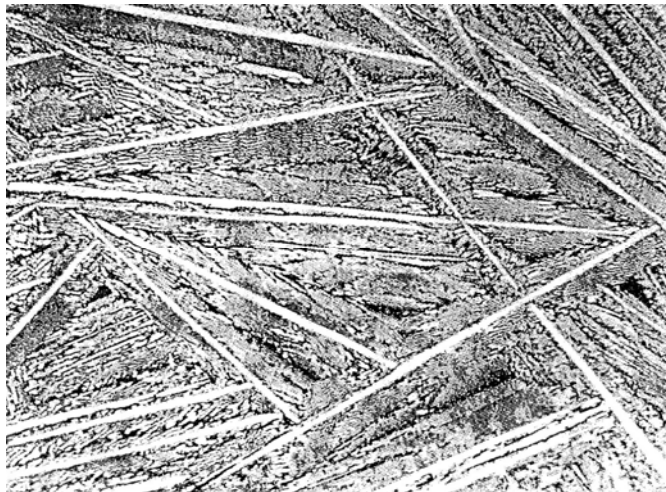
شکل ۵: مشابه شکل ۴ ولی با بزرگنمایی بیشتر، پرلیت در دندریتهای آستنیت تا حدودی مشخص می‌باشد . بزرگنمایی ۵۰۰



شکل ۶: مشابه شکل ۴ ولی با بزرگنمایی بیشتر. پرلیت در آستنیت لدبوریتی نیز مشخص می‌باشد. بزرگنمایی ۱۰۰۰

#### ۱-۲-۲- انجماد آلیاژهای هایپریوتکتیک در سیستم آهن - سمنتیت

انجماد این نوع آلیاژها با تشکیل کاربید آهن (سمنتیت) سوزنی شکل شروع می‌شود. با ادامه انجماد و تشکیل بیشتر سمنتیت، درصد کربن مذاب باقیمانده کاهش یافته تا اینکه در ۱۱۴۷ درجه سانتیگراد به درصد کربن نقطه یوتکتیک برسد. در این درجه حرارت مذاب باقیمانده در اثر یک تحول یوتکتیکی به لدبوریت تبدیل می‌شود (شکل ۳). همانگونه که در رابطه با چدنهای هیپویوتکتیک بحث شد، در اینجا نیز با ادامه سرد شدن در حد فاصل ۱۱۴۷ تا ۷۲۷ درجه سانتیگراد مقداری سمنتیت از فاز آستنیت را سب می‌شود. در ۷۲۷ درجه سانتیگراد آستنیت موجود در ساختمان میکروسکوپی در اثر تحول یوتکتوئیدی به پرلیت تبدیل می‌شود (شکل ۳). سرد کردن بیشتر، اثر چندانی بر روی ساختمان میکروسکوپی نخواهد داشت.



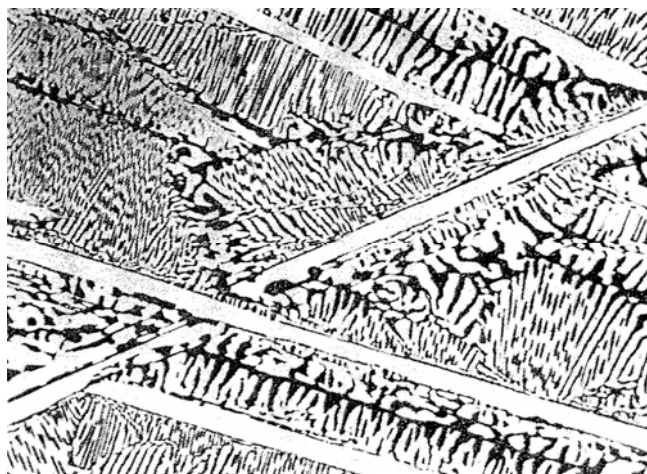
شکل ۷: تصویر میکروسکوپی چدن سفید هایپریوتکتیک در بزرگنمایی کم. سمنتیت اولیه (نواحی سفید رنگ سوزنی شکل) به خوبی مشخص می‌باشد. محلول اچ پیکرال ۴ درصد. بزرگنمایی ۲۰

تصاویر میکروسکوپی مربوط به ساختمانهای چدنهای هایپریوتکتیک از این نوع در شکلهای ۷ تا ۹ نشان داده شده‌اند. در شکلهای ۷ و ۸ سوزنهای سمنتیت اولیه (سفید رنگ) که توسط یوتکتیک لدبوریتی احاطه شده‌اند کاملاً مشخص هستند. مطالعه ساختمانهای میکروسکوپی مزبور در بزرگنمایی بالاتر (شکل ۹) نشان می‌دهد که آستنیت موجود در ساختمان لدبوریتی (که در ۷۲۷ درجه سانتیگراد به پرلیت تبدیل شده است) به شکل میله‌ای در زمینه سمنتیت توزیع شده است.

### ۱-۲-۳- انجماد آلیاژهای یوتکتیک در سیستم آهن - سمنتیت

انجماد این نوع چدن‌ها از درجه حرارت یوتکتیک و با استحالته یوتکتیکی  $\text{Cem} + \gamma \rightarrow \text{L}$  شروع می‌شود. پس از پایان استحاله فوق، انجماد نیز تمام می‌شود. از اینرو ساختمان میکروسکوپی آنها فاقد فازهای آستنیت و یا سمنتیت اولیه بوده و از صد درصد یوتکتیک لدبوریتی تشکیل شده است (شکل ۳).





شکل ۸: ساختار میکروسکوپی چدن سفید هایپریوتکتیک. سمتیت اولیه (نواحی سفیدرنگ و طویل) همراه با یوتکتیک لدبوریتی کاملاً مشخص است. بزرگنمایی ۱۰۰



شکل ۹: ناحیه یوتکتیکی از شکل ۸ با بزرگنمایی بیشتر. طبیعت میله‌ای شکل آستنیت در لدبوریت کاملاً دیده می‌شود. آستنیت مزبور در درجه حرارت استحاله یوتکتوئیدی به پرلیت تبدیل شده است. بزرگنمایی ۵۰۰

تغییرات حاصل در ساختمان میکروسکوپی این چدن‌ها در اثر سرد شدن تا درجه حرارت اتاق، مشابه با تغییرات بحث شده در مورد چدن‌های هیپو و هایپریوتکتیک می‌باشد. بنابراین ساختمان نهایی در درجه حرارت اتاق، شامل فاز سمتیت زمینه است که در اثر تحول یوتکتیک به وجود آمده و پرلیت که همان آستنیت لدبوریتی سابق

می‌باشد. در ضمن، در حد فاصل ۱۱۴۷ تا ۷۲۷ درجه سانتیگراد مقداری سمنتیت در اثر کاهش حد حلالیت کربن در آستنیت لدبوریتی از آن رسوب می‌کند که در بطن سمنتیت زمینه و سمنتیت پرلیتی محو می‌شود.

### ۱-۳- بررسی نمودار تعادلی آهن - گرافیت

ساختمان میکروسکوپی چدنهایی که انجماد و نحوه سرد شدن آنها از نمودار آهن - گرافیت تبعیت می‌کند به جای کربن ترکیبی (به شکل سمنتیت) دارای کربن آزاد (یعنی گرافیت) می‌باشد. موقعی که یک قطعه از این نوع چدن‌ها شکسته شود، مسیر شکست معمولاً در امتداد لایه‌های گرافیت پیش می‌رود و به علت وجود گرافیت، سطح مقطع شکست خاکستری رنگ مشاهده می‌شود. از اینرو به چدنهای خاکستری<sup>۱۱</sup> موسوم هستند.

چدنهای خاکستری معمولاً به سادگی ماشینکاری می‌شوند و جاذب ارتعاش و شوکهای حرارتی هستند. استحکام و سختی این نوع چدن‌ها بستگی به ساختمان زمینه آنها دارد. برای آشنائی بیشتر با نحوه انجماد و ساختمان میکروسکوپی چدنهایی که از سیستم تعادلی آهن - گرافیت پیروی می‌کنند در ادامه بحث، چگونگی انجماد و سرد شدن سه نوع چدن از این خانواده با درصدهای مختلف کربن مورد بررسی قرار داده می‌شوند.

#### ۱-۳-۱- انجماد آلیاژهای هیپوئوتکتیک در سیستم آهن - گرافیت

در این نوع چدن‌ها، انجماد با تشکیل دندریتهای آستنیت اولیه شروع می‌شود. با کاهش درجه حرارت، دندریتهای فوق رشد کرده و همراه با آن درصد کربن مذاب باقیمانده افزایش می‌یابد. در ۱۱۵۳ درجه سانتیگراد، مذاب باقیمانده که حاوی ۴/۲۶ درصد کربن می‌باشد در یک تحول یوتکتیکی به گرافیت و آستنیت تبدیل می‌شود. (شکل ۱۰)، رشد یوتکتیک از جوانه‌های مختلف زیادی در فصل مشترک آستنیت اولیه با مذاب شروع شده و سلولهای یوتکتیکی<sup>۱۲</sup> را تشکیل می‌دهد. در نهایت، سلولهای یوتکتیکی با یکدیگر برخورد کرده و مذاب باقیمانده در فضاهای محدود بین آنها منجمد می‌شود.

---

-Gray Cast Iron

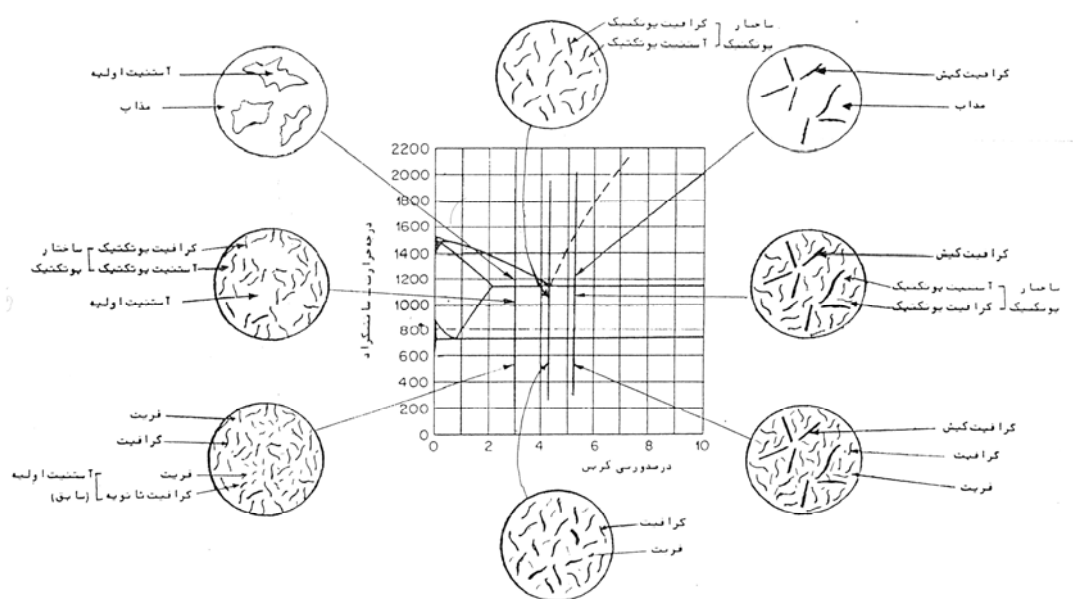
-Eutectic Cells



در ضمن تحول یوتکتیک، آستنیت یوتکتیکی با آستنیت اولیه ادغام شده و زمینه ساختمان میکروسکوپی را به وجود می‌آورد. بنابر این ساختمان میکروسکوپی حاصل در این مرحله شامل رشته‌های پراکنده گرافیت در زمینه‌ای از آستنیت می‌باشد. پس از پایان انجماد، سلولهای (آستنیت) ساختمان یوتکتیک و دندریته‌های آستنیت اولیه را معمولاً به روش متالوگرافی نمی‌توان از یکدیگر تمیز داد، مگر اینکه درصد فاز آستنیت اولیه خیلی زیاد باشد و یا اینکه از محلولهای شیمیائی اچ ویژه استفاده شود.

با ادامه سرد کردن در حد فاصل یوتکتیک - یوتکتوئید، حد حلالیت کربن در آستنیت کاهش یافته و کربن خارج شده به صورت گرافیت بر روی گرافیت‌های یوتکتیکی نشسته، باعث ضخیم و درشت شدن آنها می‌شود. در ۷۳۸ درجه سانتیگراد، آستنیت موجود که در حدود ۰/۶۸ درصد کربن دارد در اثر یک واکنش یوتکتوئیدی به مجموعه‌ای از فریت و گرافیت تبدیل می‌شود (شکل ۱۰).

گرافیت حاصل بر روی گرافیت‌های موجود نشسته و فریت حاصل، زمینه ساختمان میکروسکوپی را تشکیل می‌دهد. تحت شرایطی که آستنیت اولیه نسبتاً زیاد باشد، در ضمن تحول یوتکتوئید، گرافیت تشکیل شده در داخل دندریته‌های آستنیت اولیه مستقلاً جوانه زده و رشد می‌کنند. شکل ۱۱ آرایش لایه‌های گرافیت را در چدن هیپویوتکتیک نشان می‌دهد. قابل توجه است که، برای مشاهده گرافیت در ساختمان میکروسکوپی نیازی به اچ کردن نمونه نمی‌باشد. تصویر میکروسکوپ الکترونی از موقعیت لایه‌های گرافیت یوتکتیکی در چدن هیپویوتکتیک در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این تصویر که پس از اچ کردن و انحلال زمینه ساختمان میکروسکوپی گرفته شده، نشان می‌دهد که لایه‌های گرافیت در سطح، جزئی از یک اسکلت پیوسته و ممتد گرافیتی در قطعه می‌باشند.

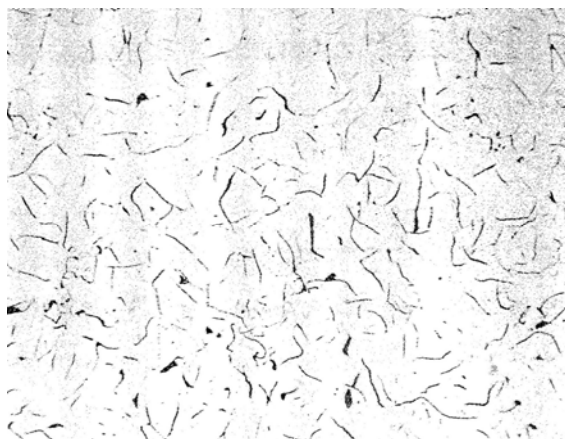


شکل ۱۰: نمودار تعادلی آهن - گرافیت و نمایش شماتیک نحوه انجماد، سرد شدن و تغییر ساختار میکروسکوپی آلیاژهای یوتکتیک، هیپویوتکتیک و هایپریوتکتیک.

### ۱-۳-۲- انجماد آلیاژهای هایپریوتکتیک در سیستم آهن - گرافیت

انجماد این نوع چدن‌ها با رسوب لایه‌های نسبتاً ضخیم و بزرگ گرافیت موسوم به گرافیت کبش<sup>۱۳</sup> شروع می‌شود. با ادامه سرد شدن گرافیت‌های بیشتری از مذاب رسوب کرده و در نتیجه درصد کربن مذاب را کاهش می‌دهد، به نحوی که در درجه حرارت یوتکتیک (یعنی ۱۱۵۳ درجه سانتیگراد) مذاب باقیمانده حاوی ۴/۲۶ درصد کربن بوده و مستعد برای تحول یوتکتیک می‌باشد. همانند آلیاژهای هیپویوتکتیک، در اینجا نیز مذاب باقیمانده در اثر تحول یوتکتیکی به مجموعه‌ای از آستنیت و گرافیت تبدیل می‌شود. بنابراین درست پس از انجماد، ساختمان میکروسکوپی شامل گرافیت کبش و یوتکتیک آستنیت - گرافیت می‌باشد. (شکل ۱۰)

در ضمن سرد کردن در حد فاصل خطوط یوتکتیک - یوتکتوئید، حد حلالیت کربن در آستنیت کاهش یافته و کربن اضافی به صورت گرافیت بر روی گرافیت‌های از قبل تشکیل شده رسوب می‌کند و ضخامت آنها را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۱: تصویر میکروسکوپی نمونه چدن خاکستری در شرایط پولیش شده (نمونه اچ نشده است). به توزیع یکنواخت ورقه‌های گرافیت توجه شود. بزرگنمایی ۱۰۰



شکل ۱۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی از گرافیت یوتکتیکی در چدن خاکستری هیپویوتکتیک. بزرگنمایی ۴۰۰

در ۷۳۸ درجه سانتیگراد آستنیت موجود در ساختمان میکروسکوپی دارای ۰/۶۸ درصد کربن می‌باشد که در اثر تحول یوتکتوئیدی به مجموعه‌ای از فریت و گرافیت تبدیل می‌شود. مجدداً گرافیت حاصل در این مرحله بر روی گرافیت‌های قبلی رسوب می‌کند. به این ترتیب ساختمان نهایی شامل زمینه فریتی و گرافیت لایه‌ای می‌باشد (شکل ۱۰).

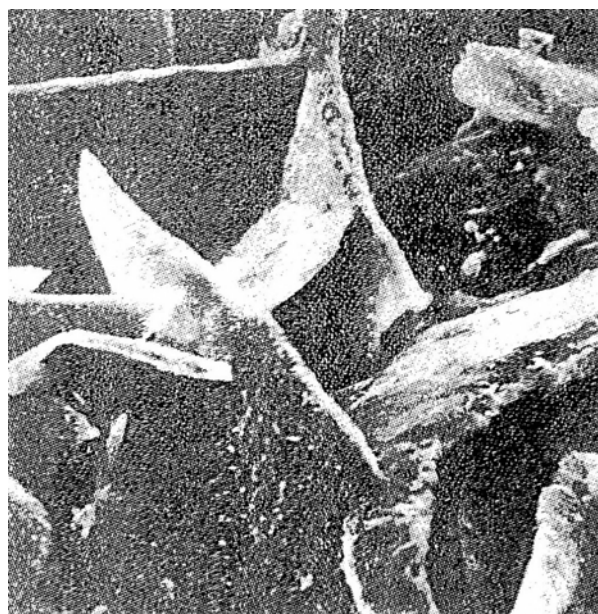
تصویر میکروسکوپی نشان داده شده در شکل ۱۳ که مربوط به نمونه پولیش شده (ولی اچ نشده) از یک چدن هایپر یوتکتیک است، توزیع گرافیت‌های کیش و یوتکتیکی را به خوبی نشان می‌دهد. شکل ۱۴ تصویر سه بعدی (میکروسکوپ الکترونی) از گرافیت کیش را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، مشابه با گرافیت یوتکتیکی (شکل ۱۲)، گرافیت کیش نیز به صورت مجموعه‌ای پیوسته و ممتد تشکیل می‌شود.

### ۱-۳-۳- انجماد آلیاژهای یوتکتیک در سیستم آهن - گرافیت

تنها تفاوتی که بین انجماد این نوع آلیاژها با آلیاژهای هیپو و هایپر یوتکتیک از این نوع وجود دارد، این است که در ساختمان میکروسکوپی آنها فاز اولیه (آستنیت اولیه و یا گرافیت کیش) وجود ندارد. به بیان دیگر، انجماد این نوع چدن‌ها با استحاله یوتکتیکی  $L \rightarrow \gamma + G$  شروع می‌شود. تغییرات بعدی که در ضمن سرد شدن از درجه حرارت انجماد (یوتکتیک) تا دمای اتاق در ساختمان میکروسکوپی آنها به وجود می‌آید، مشابه با تغییرات بحث شده در مورد آلیاژهای هیپو و هایپر یوتکتیک می‌باشد (شکل ۱۰). به این ترتیب ملاحظه می‌شود که ساختمان میکروسکوپی این نوع چدن‌ها نیز شامل فریت زمینه و لایه‌های گرافیت می‌باشد.



شکل ۱۳: تصویر میکروسکوپی چدن خاکستری هایپر یوتکتیک پس از پولیش و قبل از اچ کردن. علاوه بر گرافیت یوتکتیکی، گرافیت کیش نیز در ساختار میکروسکوپی مشخص است. بزرگنمایی ۱۰۰



شکل ۱۴: تصویر میکروسکوپ الکترونی از ورقه‌های ضخیم گرافیت کیش در چدن خاکستری هایپریونکتیک. بزرگنمایی ۴۰۰

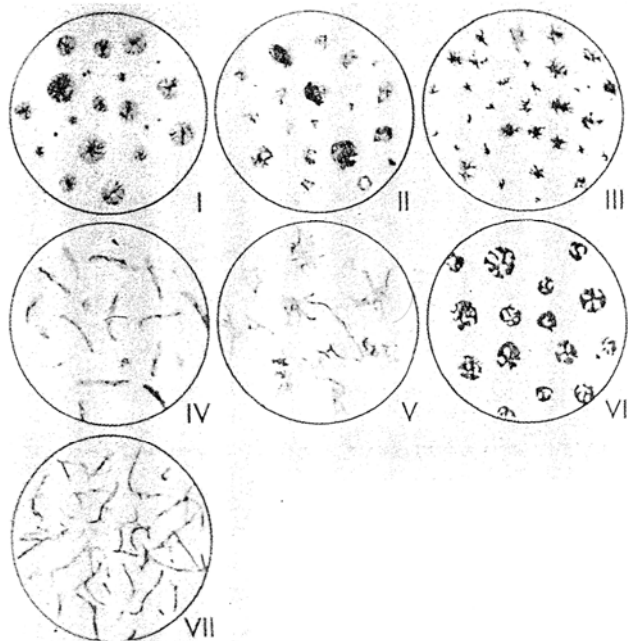
#### ۱-۴- اشکال مختلف گرافیت

براساس استاندارد ASTM-A247<sup>۱۴</sup>، هفت (و براساس استاندارد ISO<sup>۱۵</sup> شش) شکل مختلف گرافیت در

چدن‌ها وجود دارد (شکل ۱۵) که به ترتیب عبارتند از:

مشخصات	معادل ISO	شماره ASTM
گرافیت کروی <sup>۱۶</sup> که در چدن‌های داکتیل یا نشکن <sup>۱۷</sup> وجود دارد.	VI	I
گرافیت کروی، در شرایطی که کاملاً کروی نشده باشد.	VI	II
کربن (گرافیت) تمپر شده <sup>۱۸</sup> که در چدن‌های مالیبل یا چکشخوار <sup>۱۹</sup> دیده می‌شود.	IV	III
گرافیت فشرده <sup>۲۰</sup> یا کرمی شکل <sup>۲۱</sup> مخصوص چدن‌ها با گرافیت فشرده.	III	IV
گرافیت خرچنگی <sup>۲۲</sup> که فرم تغییر شکل یافته گرافیت کروی است.	II	V
گرافیت کروی نامنظم یا باز <sup>۲۳</sup> که جزء گروه گرافیت‌های کروی است. در اینجا رشته‌های گرافیت از مرکز کره بیرون زده شده‌اند.	V	VI
گرافیت لایه‌ای، ورقه‌ای و یا رشته‌ای <sup>۲۴</sup> که مربوط به چدن‌های خاکستری می‌باشد. این نوع گرافیت براساس نحوه توزیع، به پنج دسته تقسیم می‌شود.	I	VII

- 
- American Socitey for Testing Materials
  - International Standard Organization
  - Nodular, Spheroidal Graphite
  - Ductile Cast Iron
  - Aggregate graphite, Temper Carbon
  - Malleable Cast Iron
  - Compacted Graphite
  - Vermicular Graphite
  - Crab-Form Graphite
  - Irregular (open) type nodules, Exploded- graphite
  - Flake graphite



شکل ۱۵: اشکال مختلف گرافیت براساس استاندارد ASTM-A247

#### ۱-۵- انواع توزیع گرافیت لایه‌ای

بر طبق استاندارد ASTM-A247، نحوه توزیع ورقه‌های گرافیت در ساختمان میکروسکوپی چدنهای خاکستری به پنج دسته تقسیم می‌شود که از A تا E نامگذاری شده‌اند. (شکل ۱۶)

##### توزیع نوع A:

در این نوع، لایه‌های گرافیت به طور یکنواخت در زمینه پخش می‌شوند، منتهی دارای جهات خاصی نمی‌باشند. توزیع مزبور اکثراً در چدنهای خاکستری با ضخامتهای زیاد تا متوسط دیده می‌شود و برای بیشتر کاربردها مطلوب می‌باشد. در کاربردهای سایشی نظیر سیلندرهای موتورهای احتراق داخلی، گرافیت نوع A با اندازه‌های متوسط نسبت به انواع دیگر آن مزیت دارد.



## توزیع نوع B:

در این حالت، توزیع گرافیت‌های لایه‌ای اصولاً به توزیع گل رزی<sup>۲۵</sup> موسوم است و معمولاً در چدن‌ها با ترکیب شیمیایی نزدیک به یوتکتیک که انجماد آنها با تعداد معدودی جوانه انجام گیرد دیده می‌شود. در مرکز هر مجموعه گرافیت، لایه‌ها نازک و ظریف می‌باشند. علت این امر، تحت انجماد موقتی است که در شروع انجماد به وجود می‌آید. سپس با آزاد شدن گرمای نهان انجماد، درجه حرارت مذاب افزایش یافته و تحت انجماد موقتی از بین می‌رود. بنابراین ادامه انجماد در درجه حرارت معمولی انجام گرفته و در نتیجه لایه‌های گرافیت خارجی در هر مجموعه ضخیم‌تر و درشت‌تر خواهند شد. از نظر ابعاد، این نوع توزیع گرافیت در مقاطع نازک (در حدود ۱۰ میلیمتر) و بر روی سطوح مقاطع متوسط دیده می‌شود و گاهی نیز ناشی از عملکرد ضعیف جوانه‌زها می‌باشد.

## توزیع نوع C:<sup>۲۶</sup>

در این نوع توزیع، لایه‌های ضخیم، بزرگ و مستقیم گرافیت (گرافیت کیش) همراه با لایه‌های نازک و کوچکتر گرافیت در ساختمان دیده می‌شوند. گرافیت نوع C در چدن‌های هایپریوتکتیک، یعنی تحت شرایطی که گرافیت قبل از شروع انجماد یوتکتیک در مذاب تشکیل شود، دیده می‌شود. این نوع گرافیت باعث افزایش قابلیت هدایت حرارت و کاهش مدول الاستیک چدن می‌شود. در نتیجه تنش‌های حرارتی را کاهش داده و مقاومت چدن در برابر شوک‌های حرارتی را زیاد می‌کند. از سوی دیگر، درموردی که کیفیت خوب سطوح قطعات ماشینکاری شده و یا استحکام و مقاومت به ضربه نسبتاً خوب موردنظر باشد، گرافیت کیش مناسب نمی‌باشد.

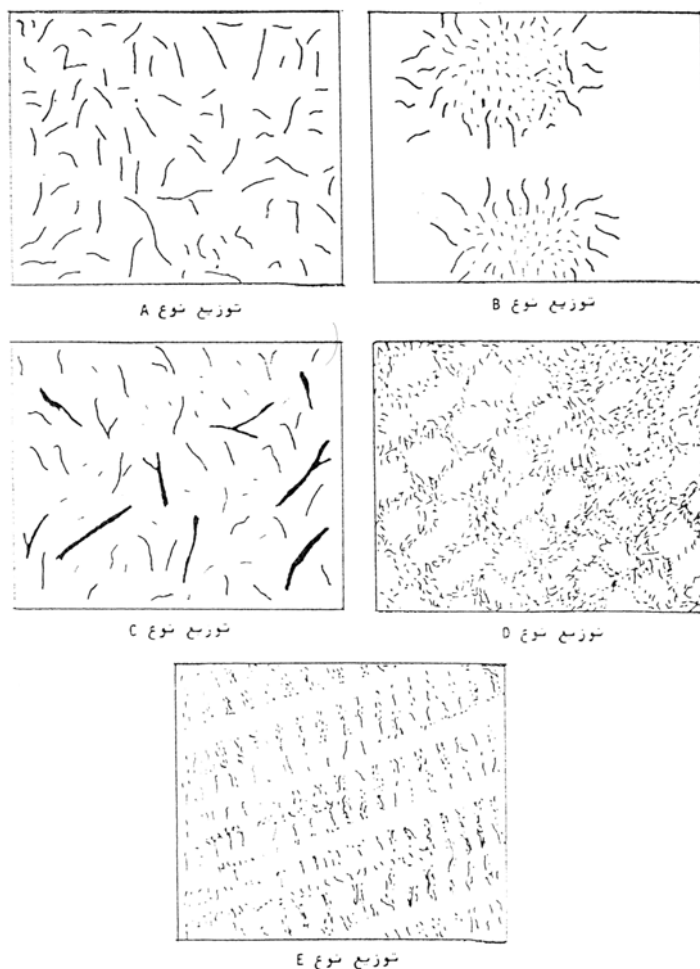
## توزیع نوع D:

در این توزیع، لایه‌های گرافیت به صورت رسوب بین دندریتی<sup>۲۷</sup> تشکیل شده و دارای جهات خاصی نمی‌باشند. این نوع توزیع اغلب در آلیاژهایی دیده می‌شود که خیلی سریع سرد شده و در نتیجه انجماد در درجه حرارتی زیردمای تعادلی انجماد انجام گیرد. برای این کار، آلیاژ مورد نظر باید به اندازه کافی سیلیسیم داشته باشد تا از تشکیل کاربید

---

-Rosette Pattern  
-Superimposed Flake Graphite  
-Inter-Dendritic Segregation





شکل ۱۶: انواع توزیعهای مختلف گرافیت لایه‌ای براساس استاندارد ASTM-A247 (A: توزیع یکنواخت، بدون جهت خاص. B: توزیع گل رزی، بدون جهت خاص. C: ورقه‌های ضخیم و نازک گرافیت، بدون جهت خاص. D: گرافیت بین دندریتی، بدون جهت خاص. F: گرافیت بین دندریتی، در یک جهت خاص).

جلوگیری شود. نواحی عاری از گرافیت در این ساختمان، ناشی از تشکیل دندریتهای آستنیت قبل از شروع استحاله یوتکتیک می‌باشد.

این امر نشان می‌دهد که آلیاژ فوق باید هیپویوتکتیک باشد. ولی در عین حال، این نوع گرافیت در آلیاژهای یوتکتیک سریع سرد شده نیز به وجود می‌آید. در حقیقت، تحت انجماد در آلیاژهای یوتکتیک، منجر به تغییر مکان

نمودار تعادلی شده، به نحوی که حتی در آلیاژ مزبور (یوتکتیکی) فاز آستنیت اولیه ظاهر می‌شود. در یک سختی یکسان، خواص کششی چدنهای خاکستری با گرافیت نوع D نسبت به گرافیت نوع A به مراتب بالاتر می‌باشد، ولی تهیه زمینه کاملاً پرلیتی با این نوع گرافیت، نسبتاً مشکل است.

علت این امر مربوط می‌شود به مسافت بسیار کوتاه برای نفوذ کربن و نشستن بر روی لایه‌های گرافیت، از جمله کاربردهای این نوع گرافیت عبارت است از ساخت قالبهای دائم. وجود این نوع گرافیت، باعث بهبود کیفیت سطوح قطعات ماشینکاری شده خواهد شد.

### توزیع نوع E:

در این نوع توزیع لایه‌های بسیار نازک و کوچک گرافیت، همانند نوع D، در بین ساختمان دندریتی آستنیت اولیه محبوس شده و بنابراین به رسوبات بین دندریتی موسوم هستند. ولی برخلاف نوع D، در این نوع توزیع گرافیتها دارای جهات خاصی می‌باشند. توزیع نوع E در چدنهایی که درصد کربن آنها پائین بوده (آستنیت اولیه در آنها زیاد باشد) و با سرعتهای معمولی سرد شده باشند دیده می‌شود. برخلاف نوع D، این نوع گرافیت را می‌توان در زمینه پرلیتی به دست آورد.

### ۱-۶- اندازه گرافیتهای لایه‌ای و کنترل آن

اندازه‌گیری لایه‌های گرافیت براساس طول بزرگترین لایه‌ها در مقطع پولیش ولی اچ نشده و در بزرگنمایی ۱۰۰X انجام می‌گیرد. برای این کار از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$2^{8-N} = \text{طول بزرگترین لایه گرافیت برحسب میلیمتر در بزرگنمایی } 100 \times$$

در این رابطه، N عدد طول لایه گرافیت می‌باشد.

همچنین با مقایسه اندازه لایه‌های گرافیت در بزرگنمایی ۱۰۰X با چارت اندازه استاندارد ASTM می‌توان عدد طول لایه گرافیت را مشخص کرد (شبیه به تعیین اندازه دانه‌ها). در مورد گرافیتهای کروی، از چارت استاندارد مشابه دیگری که مربوط به گرافیت کروی است استفاده می‌کنند.

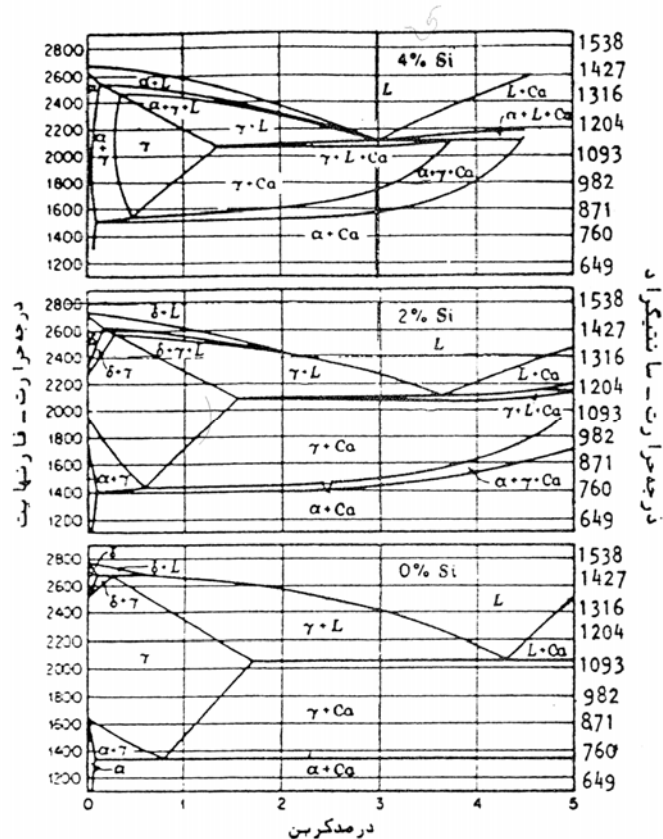
نظر به اینکه اندازه لایه‌های گرافیت و یا اندازه گرافیت در شکل‌های دیگر نقش بسیار مهمی بر روی خواص چدن‌ها دارد، کنترل آن در متالورژی چدن‌ها بسیار مهم می‌باشد. مناسبترین روش برای کنترل توزیع و اندازه گرافیت‌ها استفاده از تلقیح کننده‌ها نظیر  $\text{CaSi}$  و  $\text{SiC}$ ,  $\text{FeS}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Zr}$  می‌باشد. نقش عوامل فوق عبارت است از ایجاد مکان‌های مناسب برای جوانه‌زنی گرافیت.

#### ۱-۷- اثر ترکیب شیمیایی بر روی ساختمان میکروسکوپی و خواص چدن‌ها

مقدار عناصر آلیاژی موجود در اکثر کلاس‌های فولادها نسبتاً کم می‌باشد. از اینرو فولادهای مزبور را می‌توان آلیاژهای دوتائی آهن - کربن تصور کرد. بنابر این، نمودار دوتائی آهن - سمیتیت را برای مطالعه و تفسیر ساختمان میکروسکوپی آنها تحت شرایط تعادلی و یا آهسته سرد شده می‌توان به کار برد. از سوی دیگر، چدن‌های معمولی حاوی مقدار قابل توجهی عناصر آلیاژی و یا ناخالصیهائی نظیر سیلیسیم، گوگرد، منگنز و فسفر می‌باشند. عناصر فوق به نحو قابل توجهی بر روی شرایط گرافیت‌زائی اثر گذاشته و به این ترتیب ساختمان میکروسکوپی و خواص چدن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این قسمت اثرات عناصر فوق مورد بررسی قرار گرفته و مطالعه چدن‌های آلیاژی به بخش ۱-۱۱-۸ موکول می‌گردد.

#### ۱-۷-۱- سیلیسیم

شکل ۱۷ اثرات سیلیسیم را بر روی نمودار آهن - کربن نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، سیلیسیم ترکیب شیمیائی نقاط یوتکتیک و یوتکتوئید و حداکثر حلالیت کربن در آستنیت را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌شود که اضافه کردن سیلیسیم به سیستم آهن - کربن باعث افزایش دماهای استحاله‌های یوتکتیک و یوتکتوئید خواهد شد. به علاوه در حضور سیلیسیم، استحاله‌های فوق به جای یک درجه حرارت ثابت، در یک محدوده از درجه حرارت انجام می‌گیرند. این محدوده حرارتی تابع درصد سیلیسیم بوده، و با افزایش درصد سیلیسیم، افزایش می‌یابد.



شکل ۱۷: مقاطعی از نمودار تعادلی سه تائی Fe-C-Si با صفر، ۲ و ۴ درصد سیلیسیم.

پارامتر مهم دیگری که در رابطه با سیلیسیم باید به آن اشاره کرد این است که، سیلیسیم تمایل چدن به گرافیت زائی را شدیداً افزایش می دهد. اثر آن به این صورت است که درجه حرارت تعادلی تشکیل گرافیت را افزایش و از آن سمیتیت را کاهش می دهد. بنابراین محدوده حرارتی تشکیل گرافیت را وسیع می کند. معهذا استفاده از سیلیسیم به این منظور محدودیت دارد، زیرا سیلیسیم زیادی باعث فریتی کردن زمینه و در نتیجه کاهش استحکام خواهد شد. لازم به تذکر است که سیلیسیم مازاد بر مقدار فوق در فریت حل شده و استحکام و سختی را مجدداً افزایش می دهد. میزان افزایش بستگی به درصد سیلیسیم حل شده در فریت دارد و می تواند برای سختی تا ۱۰۰ الی ۱۴۰ برینل و برای استحکام کششی تا ۵۰۰۰۰ الی ۷۰۰۰۰ پوند بر اینچ مربع باشد. در عمل برای اجتناب از تشکیل کاربید در

چدنهای خاکستری با استحکام بالا، به جای استفاده از سیلیسیم به عنوان عنصر آلیاژی، از مواد جوانه‌زا حاوی سیلیسیم استفاده می‌شود. مواد فوق را درست قبل از ریخته‌گری به مذاب اضافه می‌کنند.

#### ۱-۷-۲- گوگرد

گرچه گوگرد عنصری نیست که عمداً به آلیاژهای آهنی اضافه شود، ولی تقریباً در تمامی فولادها و چدنهای تجارتي به مقدار خیلی کم وجود دارد. نقش گوگرد عبارت است از تثبیت و پایدار کردن سمیتیت. از اینرو وجود گوگرد در چدن‌ها، میل به سفید شدن آنها را تشدید می‌کند. به علاوه، گوگرد با آهن ترکیب شده و سولفید آهن ( $\text{FeS}$ ) حاصل در مرز دانه‌ها رسوب کرده و خواص مکانیکی چدن‌ها را کاهش می‌دهد. در چدنهای خاکستری معمولی، مقدار گوگرد به ندرت از ۰/۱۴ درصد تجاوز می‌کند. اثرات گوگرد را توسط منگنز خنثی می‌کنند. برای این منظور درصد منگنز



شکل ۱۸: تصویر میکروسکوپی از چدن خاکستری با زمینه پرلیتی. همچنین سولفید منگنز ( $\text{MnS}$ ) به صورت ذرات چندوجهی و به رنگ خاکستری مشخص هستند. از آنجائی که سولفید منگنز بالاتر از درجه حرارت انجماد چدن منجمد می‌شود، به صورت ذرات مجزا در ساختمان ظاهر می‌گردد.

مورد نیاز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\%Mn = 1/7\%S + 0/3$$

منگنز اضافه شده با گوگرد ترکیب شده ( $Mn + S \rightarrow MnS$ ) و سولفید منگنز ( $MnS$ ) تولید می کند. سولفید منگنز حاصله به سطح مذاب صعود کرده و به صورت سرباره درمی آید که باید از مذاب خارج شود. همچنین درصدی از سولفید که در ضمن انجماد در قطعه محبوس شده است به صورت رسوبات پراکنده با اشکال هندسی نامنظم در ساختمان میکروسکوپی باقی می ماند (شکل ۱۸). رسوبات فوق اثرات قابل توجهی بر خواص مکانیکی چدن ندارند.

#### ۱-۷-۳- منگنز

همانگونه که بحث شد، منگنز عمدتاً برای خشی کردن اثرات مخرب گوگرد استفاده می شود. منگنز به تنهایی عامل تثبیت و پایدار کننده سمیتیت می باشد، ولی در کنار گوگرد، چون یک عامل پایدار کننده قوی سمیتیت (یعنی گوگرد) را از محیط خارج می کند، به طور غیرمستقیم نقش گرافیت زائی دارد. در حالت اخیر، منگنز در صورتی می تواند نقش واقعی خود را ایفا کند که مقدار آن بیشتر از  $0/3 + (\%S) 1/7$  باشد. درصد منگنز لازم برای پرلیتی شدن زمینه چدنهای خاکستری از رابطه زیر به دست می آید :

$$\%Mn = 3\%S + 0/35$$

در صورتی که درصد منگنز بیشتر از مقدار فوق باشد، چدن به سمت سفید شدن میل می کند.

#### ۱-۷-۴- فسفر

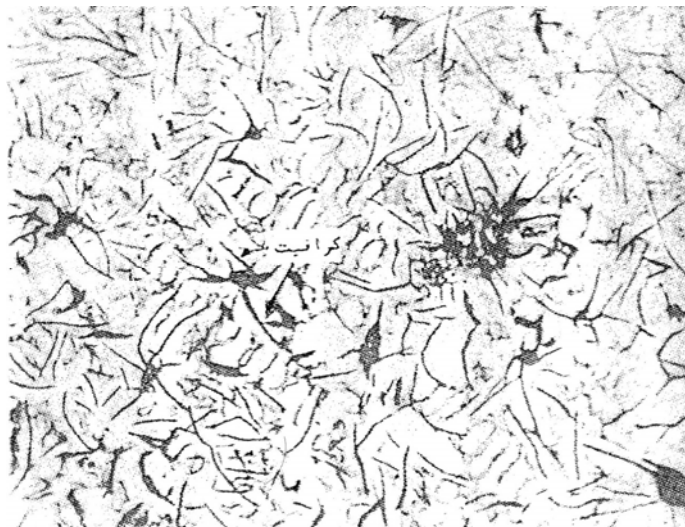
فسفر تا حدود ۰/۱ درصد در آهن محلول می‌باشد. مقادیر بیشتر آن با آهن ترکیب شده و فسفید آهن ( $\text{Fe}_3\text{P}$ ) تشکیل می‌دهد. این ترکیب با آستنیت و سمیتیت، یوتکتیک سه‌تایی موسوم به استدیت<sup>۲۸</sup> را به وجود می‌آورد. نقطه ذوب استدیت بین ۹۵۴ تا ۹۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد، از اینرو در آخرین مراحل انجماد چدنهای فسفردار منجمد می‌شود.

در نتیجه در مرز بین سلولهای یوتکتیکی تشکیل خواهد شد (شکلهای ۱۹ و ۲۰). در چدنهای خاکستری حاوی ۰/۲ درصد فسفر و یا کمتر، تشکیل استدیت معمولاً محدود می‌شود به محلهای تلافی مرزهای سه سلول و شکلی



شکل ۱۹: تصویر میکروسکوپی چدن خاکستری فسفردار پس از اچ کردن در محلول پیکرال. ساختار میکروسکوپی شامل گرافیتهای کیش و یوتکتیک در زمینه‌ای از پرلیت ظاهر نشده می‌باشد. شبکه یوتکتیک استدیت نیز قابل تشخیص است. بزرگنمایی ۱۰۰.

-Steadite



شکل ۲۰: مشابه با شکل ۱۹ ولی با بزرگنمایی بیشتر. یونکتیک استدیت و زمینه پرلیتی کاملاً مشخص شده‌اند. بزرگنمایی ۵۰۰

شبیه به یک سه ضلعی مقعر دارد. این مقدار فسفر اثر چندانی بر روی خواص مکانیکی چدن ندارد. در چدنهای خاکستری با تقریباً ۰/۵ درصد فسفر، یک شبکه تقریباً بسته از استدیت در مرز بین سلولها تشکیل می‌شود. به علت ترد و شکننده بودن استدیت، این ساختمان قابلیت ماشینکاری و استحکام ضربه چدن را به نحو قابل توجهی کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، چدنهای پرفسفر مقاومت به سایش بسیار خوبی دارند.

#### ۸-۱- کربن معادل

کربن معادل (C.E) پارامتری است که به کمک آن اثر ترکیب شیمیایی چدن (معمولاً در چدنهای غیرآلیاژی) نسبت به اثر درصد کربن ارزیابی شده و به آن تبدیل می‌شود. فرمول کلی برای تعیین کربن معادل را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$C.E = \%C + \frac{1}{3}(\%Si + \%P) + 0.4(\%S) + 0.3(\%Mn)$$

با توجه به اهمیت نقش فسفر و سیلیسیم در چدن، متداولترین رابطه برای تعیین کربن معادل عبارت است از:



$$C.E. = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3}$$

مقایسه عدد کربن معادل یک چدن با درصد کربن نقطه یوتکتیک در سیستم دوتائی آهن - کربن (یعنی ۴/۳ درصد) مشخص می‌کند که، چدن مزبور در ضمن انجماد رفتاری مشابه با کدام یک از آلیاژهای یوتکتیک، هیپو و یا هایپریوتکتیک خواهد داشت.

#### ۱-۹- ساختمانهای زمینه

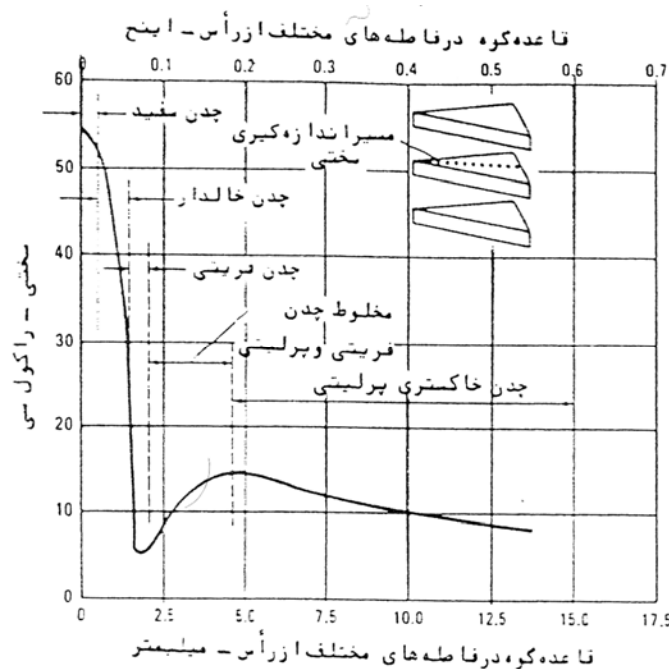
تقسیم‌بندی چدن‌ها براساس نحوه مشارکت قسمت عمده کربن در ساختمان میکروسکوپی، به صورت کربن ترکیبی (سمتیت) و یا کربن آزاد (گرافیت) می‌باشد. مثلاً چدنهای خاکستری، سفید، نشکن و یا غیره. هر گروه از چدن‌ها، براساس ساختمان میکروسکوپی زمینه به انواع مختلف دیگر تقسیم می‌شود. مثلاً چدنهای نشکن فریتی، نشکن مارتنزیتی و یا غیره.

همانند فولادها، ساختمانهای میکروسکوپی زمینه در چدن‌ها می‌تواند فریت، پرلیت، بینیت، مارتنزیت و یا مجموعه‌ای از دو و یا چند تا از آنها باشد. به علاوه اجزاء دیگری (مثلاً آستنیت) می‌توانند جزئی از ساختمان میکروسکوپی زمینه را تشکیل دهند. مشخصات ساختمانی و اثرات هر یک از اجزاء تشکیل دهنده زمینه بر روی خواص مکانیکی چدن‌ها تقریباً مشابه با اثرات بحث شده در مورد فولادهاست. منتهی به علت متفاوت بودن ترکیب شیمیائی چدن‌ها از فولادها، استثنائاتی نیز وجود دارد. به عنوان مثال در چدن‌ها، فریت معمولاً حاوی کمی منگنز و مقدار قابل ملاحظه‌ای سیلیسیم به صورت محلول می‌باشد. به علاوه عناصر دیگری نظیر مس و یا نیکل نیز ممکن است در فریت حل شوند. از اینرو فریت در چدن‌ها، اغلب سخت‌تر و استحکام آن بیشتر از فریت در فولادهاست.

## ۱-۱۰- اثر ضخامت قطعه

اثر ضخامت قطعه بر روی خواص مکانیکی چدن‌ها ناشی از تأثیر آن بر روی نحوه انجماد و سرد شدن و در نتیجه نوع چدن و ساختمان میکروسکوپی حاصل می‌باشد. در یک ترکیب شیمیایی ثابت، هر چه ضخامت قطعه بیشتر باشد، سرعت سرد شدن کمتر، احتمال گرافیتی شدن ساختمان بیشتر و در نتیجه سختی آن کمتر خواهد بود. از سوی دیگر هر چه ضخامت قطعه کمتر باشد، سرعت سرد شدن آن بیشتر، احتمال تشکیل کاربید بیشتر و بنابر این سختی قطعه بالاتر خواهد بود.

یکی از مناسب ترین راهها برای بررسی اثر ضخامت قطعه بر روی ساختمان و سختی استفاده از آزمایش گوه می‌باشد. برای این کار، نمونه‌ای گوه‌ای شکل با زاویه رأس ۱۰ درجه از چدن با ترکیب شیمیایی مورد نظر را در قالب ماسه‌ای ریخته‌گری می‌کنند. سپس در امتداد ارتفاع و از وسط، نمونه را مقطع زده و سختی آن را در امتداد ارتفاع نمونه (از راس به سمت قاعده) اندازه می‌گیرند. همچنین ساختمان میکروسکوپی سطح مقطع را مشخص می‌کنند.



شکل ۲۱: اثر ضخامت قطعه بر روی سختی و ساختار چدن. سختیها در محل نشان داده شده بر روی شکل اندازه‌گیری شده‌اند.

ترکیب شیمیایی چدن مورد آزمایش عبارت بوده از: 0.086%S, 0.215%P, 1.01%Mn, 2.55%Si, 3.52%C

شکل ۲۱ نمونه‌ای از نتایج به دست آمده از آزمایش گوه را برای چدنی با ترکیب شیمیایی Fe-3.52%C-2.55%Si-1.01%Mn-0.215%P-0.082%S نشان می‌دهد. مطالعه ساختمان میکروسکوپی سطح مقطع برش در امتداد ارتفاع گوه (از رأس به سمت قاعده) تغییرات سختی مربوط به شکل ۲۱ را توجیه می‌کند. ساختمانهای میکروسکوپی مشاهده شده در امتداد ارتفاع (از چپ به راست در شکل ۲۱) به ترتیب عبارتند از: رأس گوه از چدن سفید (مخلوط کاربید و پرلیت) با سختی بیشتر از ۵۰HRC تشکیل شده است.

با دور شدن از رأس از درصد کاربید کاسته شده و در عوض گرافیت در ساختمان ظاهر می‌شود (چدن خالدار). در نتیجه سختی شدیداً افت می‌کند. با حذف سمیتیت و گرافیتی شدن کامل چدن (از نوع D) با زمینه فریتی، سختی به حداقل مقدار خود کاهش می‌یابد. در سرعتهای سرد کردن کمی کمتر، ساختمان میکروسکوپی شامل لایه‌های گرافیت با توزیع نوع A در زمینه پرلیتی به وجود می‌آید و در نتیجه سختی مجدداً افزایش یافته به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد. این ساختمان مطلوب ترین حالت برای مقاومت به سایش و استحکام خوب است.

با افزایش بیشتر ضخامت، ورقه‌های گرافیت ضخیمتر شده و لایه‌های پرلیت درشت‌تر (خشن تر) می‌شوند. در نتیجه سختی کمی کاهش می‌یابد. با افزایش باز هم بیشتر ضخامت و یا کاهش بیشتر سرعت سرد شدن، پرلیت به مجموعه‌ای از فریت و گرافیت تجزیه شده و در نتیجه سختی و استحکام بیشتر کاهش می‌یابد.

ساختمان اکثر قطعات صنعتی چدنی، مشابه با ساختمان ناحیه بلافاصله سمت راست ماکزیمم منحنی سختی (یعنی در حد فاصل ضخامت ۵ تا ۱۵ میلیمتر) می‌باشد. این ساختمان شامل گرافیت لایه‌ای در زمینه پرلیتی است.

یکی از تکنیکهای استحکام بخشی به قطعات چدنی خارج کردن زود هنگام از قالب (Hot Shake Out) می‌باشد. به طوریکه از نظر زمانی، انجماد قطعه پایان پذیرفته اما دمای آن کماکان بالای  $A_1$  باشد. چنین کاری سبب می‌شود سرعت سرد شدن قطعه در هنگام استحاله یوکتوئید بالا بوده و در نتیجه ساختمان زمینه به جای فریت و یا فریت-پرلیت خشن، پرلیت ظریف باشد. بهره‌گیری از چنین تکنیکی نیازمند انتخاب دقیق زمان تخریب قالب به همراه تمهیدات لازم جهت جلوگیری از ترک خوردن قطعه است. (مرجع ۳)

## ۱۱-۱- انواع چدن‌ها

چدن‌ها را با توجه به ساختمان میکروسکوپی آنها تقسیم‌بندی می‌کنند. در این تقسیم‌بندی که براساس نوع فاز غنی از کربن (یعنی سمنتیت و یا گرافیت) و شکل آن می‌باشد، پنج گروه اصلی چدن وجود دارد که عبارتند از: چدن سفید، چدن خاکستری، چدن نشکن یا چدن با گرافیت کروی که به چدن داکتیل یا چدن SG نیز موسوم است، چدن مالیبل یا چدن چکشخوار و چدن با گرافیت فشرده. جدول ۱ محدوده ترکیب شیمیایی برای چدن‌های غیرآلیاژی و شکل ۲۲ دامنه تقریبی کربن و سیلیسیم چدن‌های مزبور را در مقایسه با فولادها نشان می‌دهند.

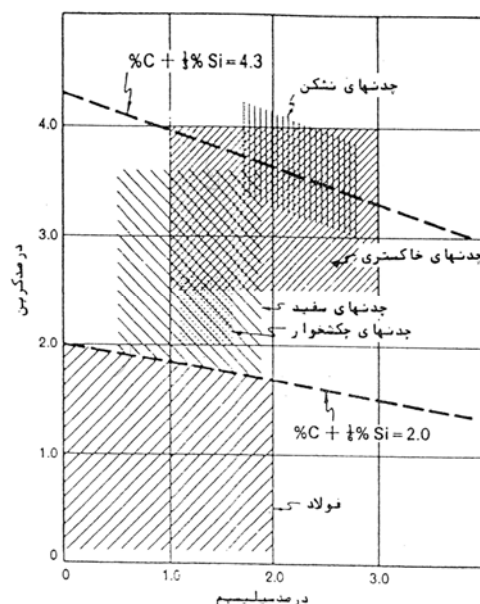
به منظور بهبود خواص مکانیکی، به هر یک از چدن‌های فوق می‌توان مقدار کمی عناصر آلیاژی اضافه کرد، بدون آنکه کلاس و طبقه‌بندی چدن تغییر کند. بجز پنج گروه اصلی، حالات بینابینی نیز در طبقه‌بندی چدن‌ها وجود دارند که عبارتند از: چدن خالدار و چدن سرد شده. بعلاوه چدن‌های پرآلیاژ گروه دیگری از چدن‌های پرمصرف با خواصی بسیار عالی را تشکیل می‌دهند.

جدول ۱: محدوده ترکیب شیمیایی چدن‌های غیرآلیاژی

درصد عناصر					نوع چدن
کربن	سیلیسیم	منگنز	گوگرد	فسفر	
۱/۸-۳/۶	۰/۵-۱/۹	۰/۲۵-۰/۸	۰/۰۶-۰/۲	۰/۰۶-۰/۲	سفید
۲/۵-۴	۱-۳	۰/۲-۱	۰/۰۲-۰/۲۵	۰/۰۲-۱	خاکستری
۲/۲-۲/۹	۰/۹-۱/۹	۰/۱۵-۱/۲	۰/۰۲-۰/۲	۰/۰۲-۰/۲	مالیبل
۳-۴	۱/۸-۲/۸	۰/۱-۱	۰/۰۱-۰/۰۳	۰/۰۱-۰/۰۱	داکتیل
۲/۵-۴	۱-۳	۰/۲-۱	۰/۰۱-۰/۰۳	۰/۰۱-۰/۰۱	گرافیت فشرده

#### ۱-۱۱-۱- چدن سفید

تحت شرایطی که ترکیب شیمیائی آلیاژ و یا سرعت سرد شدن به نحوی باشد که تمامی کربن موجود به صورت سمیتیت درآید، اصطلاحاً گفته می‌شود که چدن سفید به دست آمده است (بخش ۱-۲). همانطور که قبلاً اشاره شد، مبنای این نامگذاری، ظاهر سطح مقطع شکست این نوع چدن‌ها می‌باشد. به علت وجود توده‌های سمیتیت در ساختمان میکروسکوپی این نوع چدن‌ها، سطح مقطع شکست آنها سفید، براق و حالت دانه‌ای دارد. چدن‌های سفید، استحکام فشاری بسیار زیاد، مقاومت سایشی عالی و سختی بالایی دارند. این چدن‌ها سختی خود را تا دمای سرخ شدن<sup>۲۹</sup> برای زمان محدودی حفظ می‌کنند.



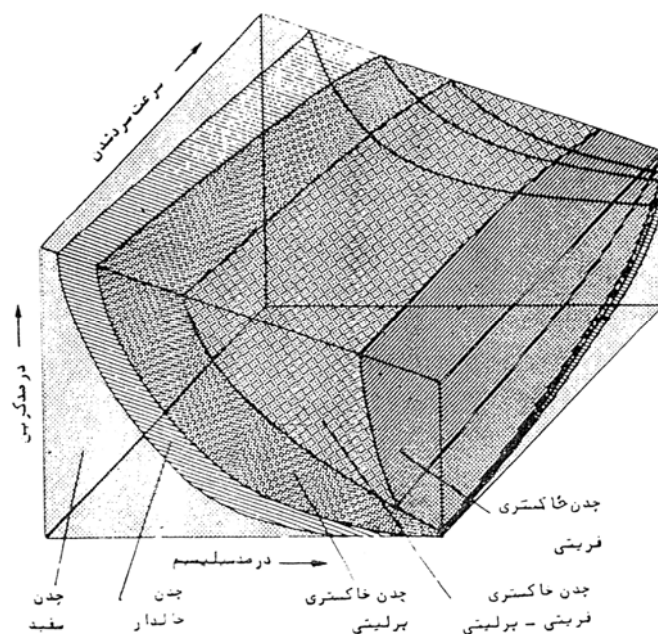
شکل ۲۲: محدوده تقریبی درصد کربن و سیلیسیم برای آلیاژهای آهنی

#### ۱-۱۱-۲- چدن خاکستری

ترکیب شیمیائی چدن و سرعت سرد شدن آنرا می‌توان به نحوی انتخاب کرد که در ضمن انجماد، کربن به صورت گرافیت رسوب کند. همانگونه که در بخش ۱-۱ بحث شد، در چدن‌های حاوی گوگرد و اکسیژن سرعت رشد

-Red Temperature

گرافیت در جهات مختلف متفاوت می‌باشد، به این صورت که رشد آن در امتداد محور  $a$  نسبت به محور  $c$  (شکل ۱) با سهولت بسیار بیشتری انجام می‌گیرد. از اینرو گرافیت‌های حاصل به شکل ورقه‌ای در ساختمان ظاهر می‌شوند. موقعی که چدن با این نوع ساختمان میکروسکوپی شکسته شود، مسیر شکست عمدتاً در امتداد لایه‌های گرافیت پیش می‌رود. در نتیجه سطح مقطع شکست خاکستری رنگ به نظر می‌رسد. از اینرو به چدن خاکستری موسوم است.



شکل ۲۳: اثر سرعت سرد شدن و ترکیب شیمیایی بر روی ساختار میکروسکوپی چدن.

خواص چدن‌های خاکستری تحت تأثیر اندازه، مقدار و توزیع گرافیت‌های لایه‌ای تغییر می‌کند. به علاوه، نوع زمینه ساختمان میکروسکوپی نیز در کنترل خواص مکانیکی نقش مهمی را به عهده دارد. پارامترهای فوق عمدتاً توسط درصد کربن، درصد سلیسیم و سرعت سرد شدن کنترل می‌شود (شکل ۲۳). کاهش سرعت سرد شدن و افزایش درصد کربن و یا سلیسیم منجر به تشکیل گرافیت‌های بیشتر و ضخیم‌تر می‌شوند. علاوه بر آن پارامترهای فوق منجر به فریتی شدن زمینه و کاهش استحکام خواهند شد.

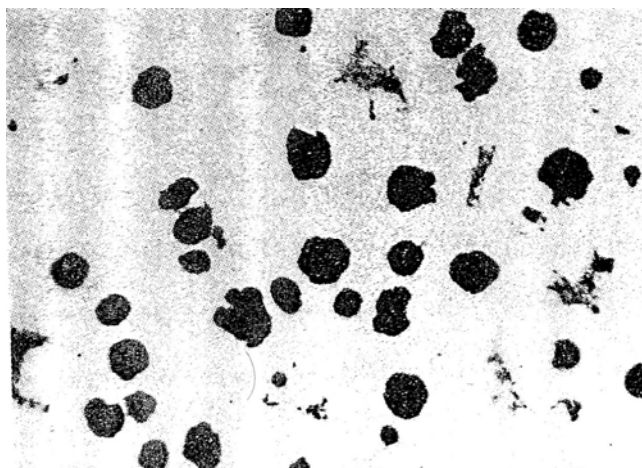
مهمترین خواص چدنهای خاکستری که آنها را به عنوان یکی از پرمصرفترین آلیاژهای صنعتی درآورده است عبارتند از: نقطه ذوب پائین، سیالیت زیاد، انقباض کم در حین انجماد، مقاومت در برابر سایش (ناشی از وجود لایه‌های گرافیت)، قابلیت جذب ارتعاش، قیمت ارزان و قابلیت ماشینکاری عالی. از سوی دیگر چدنهای خاکستری از انعطاف‌پذیری و مقاومت به ضربه بسیار کم برخوردارند.

گرافیت ورقه‌ای در چدنهای خاکستری می‌تواند یکی از توزیعهای نوع A تا E (شکل ۱۶) را داشته باشد، که بسته به نوع توزیع اثر آن در خواص چدن متفاوت خواهد بود (به بخش ۱-۵ مراجعه شود). پارامترهای مختلفی بر روی مکانیزم جوانه‌زنی و رشد گرافیت ورقه‌ای و در نتیجه نحوه توزیع آن مؤثر می‌باشند. برخی از این پارامترها در بخش ۱-۵ مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

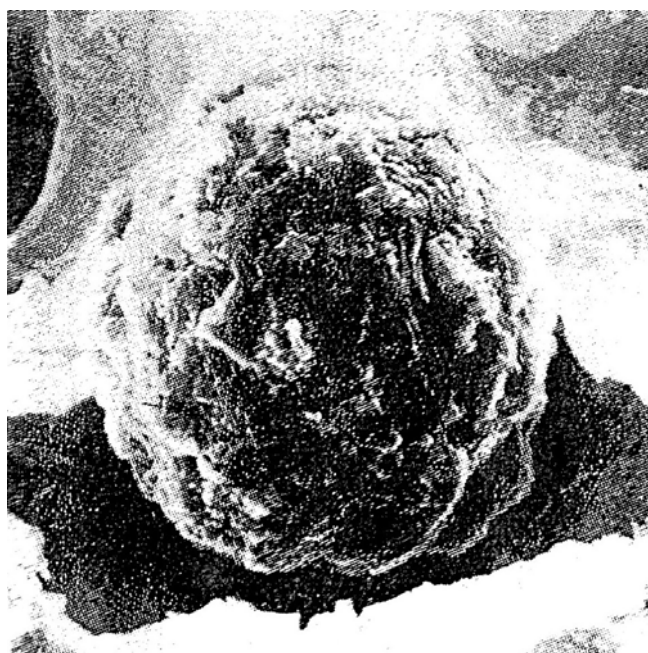
#### ۱-۱۱-۳- چدن با گرافیت کروی - چدن نشکن

این نوع چدن از نظر ترکیب شیمیایی شبیه به چدن خاکستری ولی با درصد گوگرد و فسفر کمتری (جدول ۱) می‌باشد منتهی در ضمن انجماد، گرافیت به جای ورقه‌ای به شکل کروی (شکل ۱۵ نوع I و II) رسوب می‌کند. شکل ۲۴ تصویر میکروسکوپی چدن با گرافیت کروی در زمینه فریتی و شکل ۲۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی از یک کره گرافیت را نشان می‌دهد.

عمل کروی کردن توسط اضافه کردن مقدار بسیار کم، ولی محاسبه و کنترل شده، از عناصری نظیر لیتیم، سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم، سرب و... درست قبل از ریختن مذاب به درون قالب انجام می‌گیرد. لازم به تذکر است که عملیات کروی کردن در داخل راهگاه قالب نیز امکانپذیر می‌باشد. گرافیت کروی مستقیماً از مذاب ولی در تحت انجماد بیشتری نسبت به گرافیت ورقه‌ای به وجود می‌آید. از بین عناصر یاد شده برای کروی کردن گرافیت، منیزیم بیشترین مورد استفاده را دارد، زیرا هم ارزانتر است و هم در دامنه وسیعتری از چدن‌ها قابل استفاده می‌باشد.

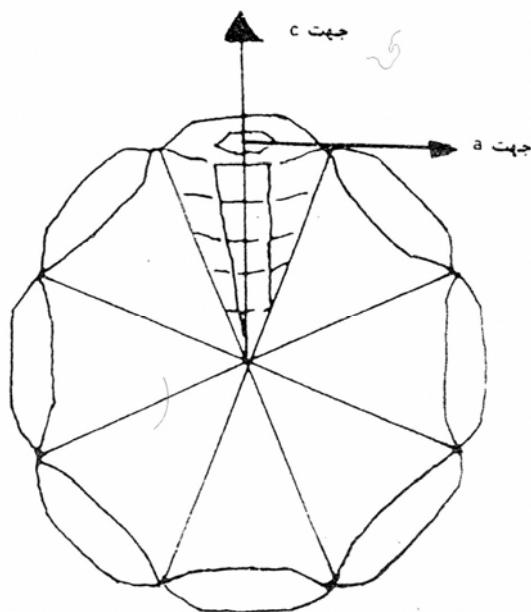


شکل ۲۴: تصویر میکروسکوپی چدن نشکن با زمینه فریتی، محلول اچ، نایتال، بزرگنمایی ۱۰۰



شکل ۲۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی از کره‌های گرافیت پس از اچ کردن زمینه اطراف. بزرگنمایی ۹۵۰





شکل ۲۶: نمایش ترسیمی شکل هندسی گرافیت کروی.

گرچه مکانیزم و نحوه دقیق کروی شدن گرافیت هنوز از مباحث تحقیقاتی می باشد، ولی مشخص شده است که علت اصلی کروی شدن حذف گوگرد و اکسیژن از مذاب می باشد. در غیاب عناصر فوق، سینتیک رشد گرافیت در جهات **a** و **c** یکسان است، در حالی که در حضور عناصر فوق، رشد گرافیت در امتداد محور **a** بیشتر از محور **c** می باشد (به بخش ۱-۱ مراجعه شود).

نتایج حاصل از بررسی ساختمان کره های گرافیت نشان می دهد که محور **c** در شبکه کریستالی گرافیت (شکل ۱) تقریباً هم جهت و موازی شعاع بوده و صفحات قاعده بطور موضعی موازی سطح کره گرافیت می باشند. (شکل ۲۶).

چدنهای نشکن همانند چدنهای خاکستری دارای سیالیت بالا، نقطه ذوب پائین، قابلیت ماشینکاری خوب و مقاومت سایش عالی (ناشی از وجود گرافیت) می باشند، مزیت عمده چدنهای نشکن بر چدنهای خاکستری استحکام و انعطاف پذیری بالا می باشد. به عنوان مثال، چدن نشکن با زمینه مارتنزیتی استحکامی در حدود  $120 \text{ Ksi}$  ( $830 \text{ Mpa}$ )

و ازدیاد طولی در حدود ۲ درصد از خود نشان می‌دهد و یا برای استحکام تقریباً یکسان و برابر با  $60 \text{ Ksi}$  ( $415 \text{ Mpa}$ ) ازدیاد طول چدن خاکستری در حدود  $0.6$  درصد بوده در حالی که انعطاف‌پذیری چدن نشکن در حدود ۱۸ درصد می‌باشد. مزیت دیگر چدن با گرافیت کروی عبارتست از مدول الاستیسیته<sup>۳۰</sup> زیاد.

برای تولید چدن با گرافیت کروی و زمینه فریتی، معمولاً از عملیات حرارتی کمک گرفته می‌شود. به این صورت که، ابتدا چدن با زمینه پرلیتی را ریخته‌گری کرده و سپس به کمک عملیات حرارتی آنیل، پرلیت را به فریت و گرافیت تجزیه می‌کنند. گرافیت حاصل بر روی گرافیت‌های کروی موجود رسوب می‌کند.

همچنین تحت شرایطی، زمینه فریتی را می‌توان مستقیماً از ریخته‌گری به دست آورد. در شرایطی که ساختمان زمینه، مخلوطی از فریت و پرلیت باشد، دانه‌های فریت اغلب به صورت هاله‌ای در اطراف کره‌های گرافیت تشکیل می‌شوند (شکل ۲۷). علت این امر برمی‌گردد به این نکته که، کربن محلول در زمینه، در اطراف ذرات گرافیت به راحتی می‌تواند به سمت گرافیتها نفوذ کرده و بر روی آنها رسوب کند. این ساختمان به ساختمان چشم گاوی<sup>۳۱</sup> موسوم است.

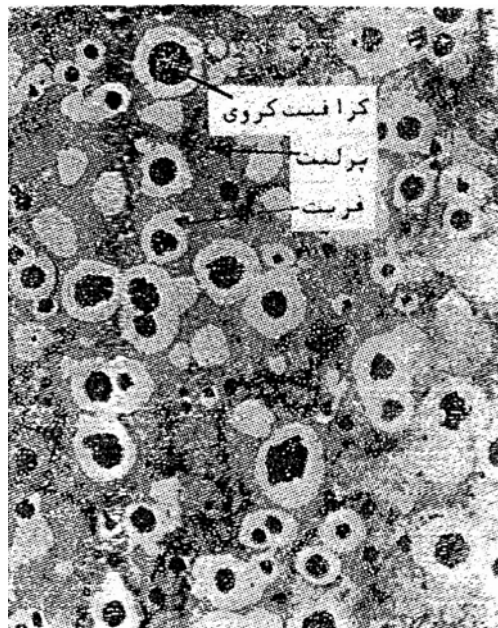
#### ۱-۱۱-۴- چدن مالیل - چدن چکشخوار

این نوع چدن که در ایران به چدن چکشخوار و نیز چدن قیچی موسوم است، از عملیات حرارتی چدنهای سفید با ترکیب شیمیائی مناسب (جدول ۱) به دست می‌آید. در اثر عملیات حرارتی چدن مزبور، سمیتیت تجزیه شده و کربن به صورت کره‌های متلاشی شده و نامنظم گرافیت (شکل ۱۵ توزیع نوع III) رسوب می‌کند، از این‌رو به کربن تمپر شده موسوم است، زیرا از مذاب به وجود نمی‌آید، بلکه در اثر عملیات حرارتی تشکیل می‌شود. بنابراین تهیه چدن چکشخوار شامل دو مرحله است: یکی ریخته‌گری و تهیه چدن سفید و دیگری عملیات حرارتی آن به منظور تجزیه سمیتیت و تشکیل گرافیت. در مرحله اول، باید تمامی کربن موجود تشکیل سمیتیت دهد. در صورتی که در این مرحله گرافیت لایه‌ای به وجود آید، کربن حاصل از تجزیه سمیتیت در ضمن آنیل کردن ترجیحاً بر روی لایه‌های گرافیت

---

-Modulus of Elasticity

-Bulls-eye Structure



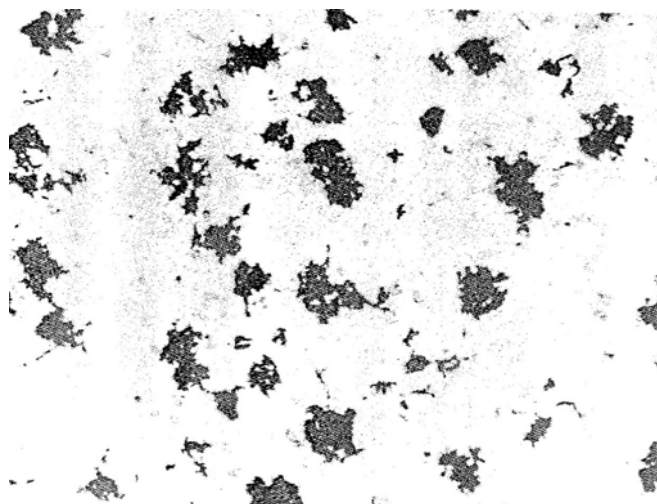
شکل ۲۷: تصویر میکروسکوپی از چدن با گرافیت کروی و زمینه پرلیتی. همچنین هاله‌ای از فریت در اطراف کره‌های گرافیت مشخص است. این نوع ساختار اصطلاحاً به ساختمان چشم گاوی موسوم است. بزرگنمایی ۱۰۰

می‌نشیند.

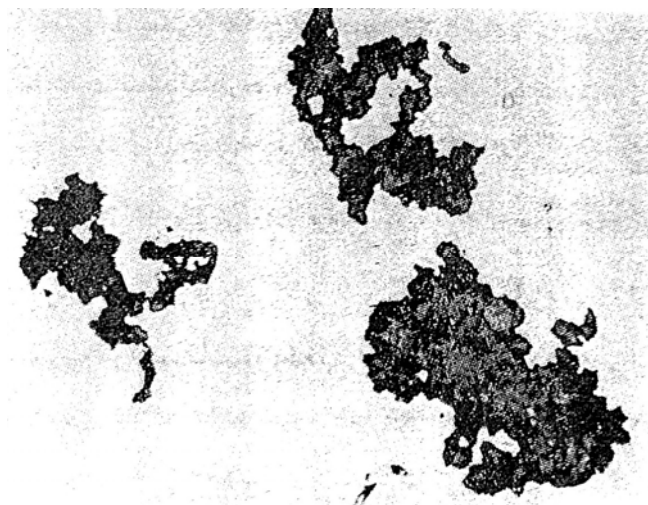
در مرحله دوم، سمیتیت باید به راحتی تجزیه شود، در غیر این صورت مالیل شدن به خوبی انجام نگرفته و یا اینکه عملیات حرارتی مستلزم زمان طولانی خواهد شد. از اینرو، در چدنهای مالیل توجه به دو نکته ضروری است: یکی ابعاد قطعه که سرعت سرد شدن را کنترل می‌کند و دیگری ترکیب شیمیایی مذاب. از آنجائی که در ضمن انجماد در هیچ قسمت قطعه نباید گرافیت به وجود آید و حداقل سرعت سرد شدن، مربوط به ضخیمترین قسمتها می‌باشد، بنابراین با توجه به ابعاد این قسمتها درصد کربن، سیلیسیم و دیگر عناصر آلیاژی را تنظیم می‌کنند. علاوه بر اینها ترکیب شیمیائی چدن مالیل، تابعی از زمینه ساختمان میکروسکوپی نهائی مورد نظر می‌باشد.

به عنوان مثال، مقدار منگنز برای زمینه پرلیتی در محدوده ۰/۲ تا ۱/۳ درصد، ولی برای زمینه فریتی بین ۰/۲ تا ۰/۶ درصد انتخاب می‌شود. همچنین برای جلوگیری از خالدار شدن (ایجاد لایه‌های گرافیت در چدن سفید اولیه)

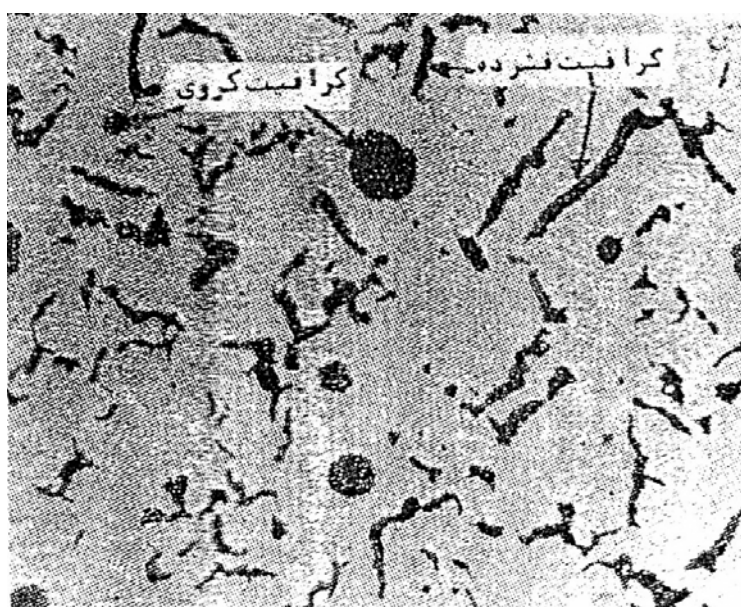
مقادیر جزئی Te, Bi (در حدود ۰/۰۱ درصد) و برای زیاد کردن تعداد جوانه‌ها در مرحله عملیات حرارتی مقادیر کمی B و Al به مذاب اضافه می‌کنند. شکل ۲۸ تصویر میکروسکوپی از توزیع گرافیتها در این نوع چدن را نشان می‌دهد. توزیع مزبور با بزرگنمایی بیشتر در شکل ۲۹ به طور دقیقتر نشان داده شده است. از نظر خواص مکانیکی، نظیر انعطاف‌پذیری و تافنس ضربه، این نوع چدن تقریباً شبیه چدن با گرافیت کروی می‌باشد، ولی چدن مالیل از برخی جنبه‌ها مزیت دارد. به عنوان مثال برای تهیه قطعات نازک، قطعاتی که قرار است سوراخ کاری شده و یا کار سرد شوند، قطعاتی که نیاز به ماشینکاری زیاد دارند، و تحت شرایطی که به مدول الاستیسیته بالا نیاز باشد. بطور کلی می‌توان گفت که برای ساخت یک قطعه انتخاب بین چدن چکشخوار و یا چدن نشکن بیشتر بستگی به قیمت تمام شده و امکانات دارد تا خواص نهائی.



شکل ۲۸: تصویر میکروسکوپی از شکل گرافیتها در چدن چکشخوار. بزرگنمایی ۱۰۰



شکل ۲۹: تصویر میکروسکوپی از شکل گرافیتها در چدن چکشخوار با بزرگنمایی ۵۰۰



شکل ۳۰: تصویر میکروسکوپی از گرافیت فشرده همراه با تعدادی گرافیت کروی. نمونه بدون آج، بزرگنمایی ۱۰۰

#### ۱-۱۱-۵- چدن با گرافیت فشرده

این نوع چدن که اغلب به چدن CG و یا چدن با گرافیت کرمی شکل موسوم است، مشابه با چدن خاکستری حاوی لایه‌های گرافیت محصور شده بین سلولهای یوتکتیکی می‌باشد، معه‌ذا، در مقایسه با گرافیت لایه‌ای، گرافیت در چدنهای CG درشت‌تر، ضخیم‌تر و تا حدودی گردتر می‌باشد (شکل ۱۵ توزیع نوع IV). به بیان دیگر، می‌توان گفت که گرافیت در چدنهای CG، شکل واسطه‌ای بین گرافیت لایه‌ای و گرافیت کروی دارد (شکل ۳۰). از اینرو به گرافیت شبه ورقه‌ای<sup>۳۲</sup> نیز موسوم است.

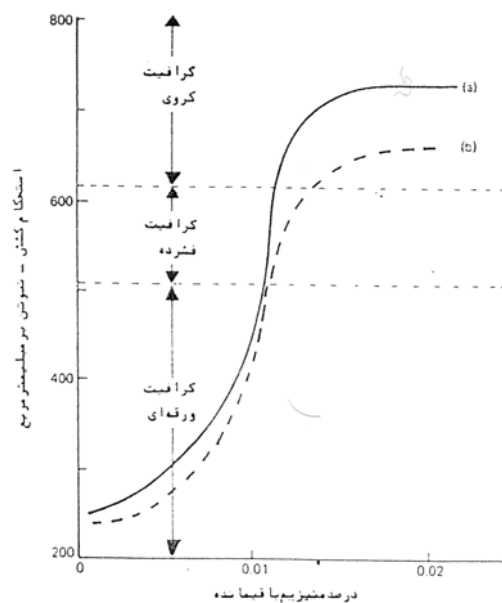
خواص این نوع چدن‌ها تقریباً حد واسطه‌ای بین خواص چدنهای خاکستری و نشکن می‌باشد. منتهی در بعضی موارد، چدن با گرافیت کرمی شکل نسبت به هر دو نوع چدن مزبور برتری دارد. به عنوان مثال، در حالی که چدن با گرافیت فشرده بسیاری از خواص ریخته‌گری چدن خاکستری را حفظ می‌کند از استحکام کششی و انعطاف‌پذیری بیشتری برخوردار می‌باشد.

شبهه به گرافیت کروی، گرافیت کرمی شکل نیز با اضافه کردن مقدار مشخصی منیزیم و یا عناصر مشابه دیگر به مذاب با ترکیب شیمیائی مشخص (جدول ۱) به دست می‌آید. ولی برای این کار به عناصر دیگری نظیر تیتانیم به منظور به حداقل رساندن امکان تشکیل گرافیت کروی نیاز می‌باشد. تذکر این نکته ضروری است که، عدم دقت کافی در تنظیم مقدار منیزیم می‌تواند منجر به لایه‌ای شدن و یا کروی شدن گرافیت شود. این امر ناشی از دامنه مجاز بسیار محدود درصد منیزیم برای تهیه چدن با گرافیت فشرده می‌باشد. شکل ۳۱ اثر درصد منیزیم اضافه شده به مذاب، بر روی شکل گرافیت و استحکام کششی چدن با زمینه پرلیتی را نشان می‌دهد.

#### ۱-۱۱-۶- چدن خالدار

تحت شرایطی که ترکیب شیمیائی مذاب، سرعت سرد شدن و نحوه انجماد طوری باشد که قسمتی از کربن در ضمن انجماد به صورت گرافیت رسوب کرده و بقیه به صورت سمیتیت درآید، ساختمان میکروسکوپی حاوی

رگه‌های سیاه رنگ گرافیت و نواحی سفید رنگ سمتیت خواهد بود (شکل ۳۲). از اینرو به چدن خالدار موسوم است. اثر درصد سیلیسیم و کربن مذاب بر روی چدن در شکل ۳۳ نشان داده شده است. این نمودار براساس ساختمان حاصل از ریخته‌گری قطعه‌ای به ابعاد  $10 \times 10 \times 20$  سانتیمتر رسم شده است.



شکل ۳۱: اثر درصد منیزیم اضافه شده به چدن بر روی شکل گرافیت (a) و استحکام کششی چدن با زمینه پرلیتی (b)

#### ۱-۱۱-۷- چدن سرد شده

اگر ترکیب شیمیایی مذاب به نحوی باشد که در شرایط معمولی انجماد، تبدیل به چدن خاکستری شود ولی آنرا سریعتر از حد معمولی سرد نمائیم، قسمتهائی از قطعه که با سرعت کافی سرد شده باشند تبدیل به چدن سفید میشوند. این نوع چدن سفید را چدن سرد شده می‌نامند.

یکی از مهمترین کاربردهای چدن سفید سرد شده در رابطه با ساخت قطعاتی است که در عین حالی که نیاز به سطحی سخت و مقاوم در برابر سایش دارند، باید از مقاومت به ضربه خوبی نیز برخوردار باشند. این نوع قطعات را معمولاً به نحوی ریخته‌گری می‌کنند که در سطح آنها لایه‌ای از چدن سفید تشکیل شده ولی در مغز قطعه چدن خاکستری به وجود آید.



برای این منظور مذاب با ترکیب شیمیائی مناسب برای تهیه چدن خاکستری را در قالب فلزی و یا گرافیتی سرد



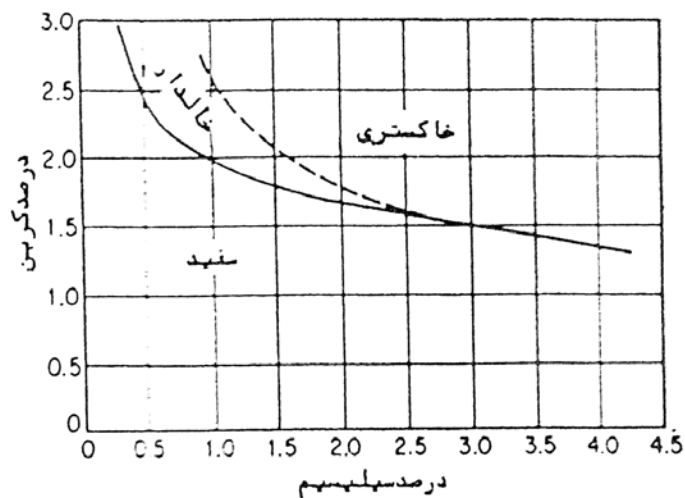
شکل ۳۲: تصویر میکروسکوپی چدن خالدار که هم دارای گرافیت (سیاه رنگ) و هم دارای کاربید آهن اولیه (سفید رنگ) می باشد.

بزرگنمایی ۱۰۰

شده ریخته گری می کنند. سرعت زیاد سرد شدن در شروع انجماد باعث تشکیل لایه ای از چدن سفید در سطح می شود.

ولی در ادامه انجماد سرعت انتقال حرارت کاهش یافته و در نتیجه مغز قطعه خاکستری خواهد شد.





شکل ۳۳: اثر سیلیسیم و کربن بر روی نوع چدن

#### ۱-۱۱-۸- چدنهای آلیاژی

این گروه شامل چدنهای آلیاژی سفید، خاکستری و نشکن می‌باشند. عناصر آلیاژی معمولاً به چدنهای چکشخوار اضافه نمی‌شوند. علت این امر به خاطر اثرات نامطلوب عناصر آلیاژی بر عملیات حرارتی مالیل کردن می‌باشد. همچنین نقش عناصر آلیاژی بر روی خواص چدن با گرافیت فشرده مراحل اولیه تحقیقاتی خود را می‌گذرانند. عناصر فلزی که بیشتر از ۰/۱ درصد به چدن اضافه شوند، جزء عناصر آلیاژی محسوب می‌شوند. مقدار عناصر آلیاژی که برای اصلاح خواص و یا بهبود قابلیت ریخته‌گری به چدن اضافه می‌شود، معمولاً تا حدود ۳ درصد می‌باشد. تحت شرایطی که به چدن با خواص کاملاً جدید و متفاوت از چدنهای معمولی نیاز باشد، مقدار عناصر آلیاژی می‌تواند بین ۳ تا بیشتر از ۳۰ درصد باشد. این نوع چدن به چدنهای پرآلیاژ موسوم هستند و در کاربردهائی نظیر مواقعی که به مقاومت سایش، مقاومت حرارتی و یا مقاومت خوردگی بسیار عالی نیاز باشد، استفاده می‌شوند. همچنین برخی از چدنهای فوق دارای خواص فیزیکی غیرعادی نظیر انبساط حرارتی بسیار کم و یا خواص غیرمغناطیسی می‌باشند.

نیکل معمولترین عنصر آلیاژی است که استفاده می‌شود، زیرا هیچگونه اثر نامطلوبی بر روی خواص چدن ندارد. نیکل پایداری کاربیدهای اولیه را کاهش داده، در حالی که باعث ریز شدن و پایداری پرلیت می‌شود. به این

ترتیب استحکام چدن را افزایش می‌دهد. همچنین با اضافه کردن مس، استحکام و سختی چدن افزایش می‌یابد. علت این امر ناشی از کاهش فریت و ریز شدن پرلیت می‌باشد. در این مورد تذکر این نکته ضروری است که مقدار مسی که می‌توان به چدن اضافه کرد محدود به حد حلالیت آن در حضور سیلیسیم می‌باشد. کرم در چدن‌ها تشکیل کاربید داده و تمایل به سفید شدن در حین انجماد را افزایش می‌دهد. به علاوه در حین سرد شدن از تجزیه کاربید جلوگیری می‌کند. این امر باعث افزایش مقاومت سایشی چدن شده و همچنین در دماهای بالا اکسید شدن آنرا به تعویق می‌اندازد.

مولیدن عنصر آلیاژی بسیار مناسب برای افزایش استحکام چدن مخصوصاً در دماهای بالا می‌باشد. در چدن‌های کم آلیاژ افزایش این عنصر تا حدود ۲ درصد سبب افزایش استحکام دمای بالا و زمان باقیمانده تا شکست (TTF) می‌شود (مرجع ۲). همچنین استفاده از این عنصر به جای کرم در عین افزایش استحکام سبب بهبود قابلیت ماشینکاری می‌شود چرا که مولیدن بر خلاف کرم تشکیل کاربید مرز دانه‌ای نمی‌دهد (مرجع ۴). و نادیم عنصر آلیاژی بسیار فعال برای تشکیل کاربید می‌باشد. از این عنصر به مقدار بسیار کم برای ریز کردن اندازه لایه‌های گرافیت استفاده می‌شود. آلومینیوم را به مقدار ۲ تا ۲۰ درصد برای تهیه چدن‌های آلیاژی آلومینیوم‌دار با خواص کاملاً متنوع استفاده می‌کنند. چدن‌های آلیاژی سیلیسیم‌دار با درصد سیلیسیم بیشتر از حد معمول، دارای مقاومت خوردگی و اکسیداسیون بسیار عالی می‌باشند. چدن‌های آلیاژی منگنزدار مقاومت سایشی خوبی دارند. اثرات عناصر آلیاژی مختلف در چدن‌ها در جدول ۲ خلاصه شده است.

مهمترین گروه‌های چدن‌های آلیاژی عبارتند از:

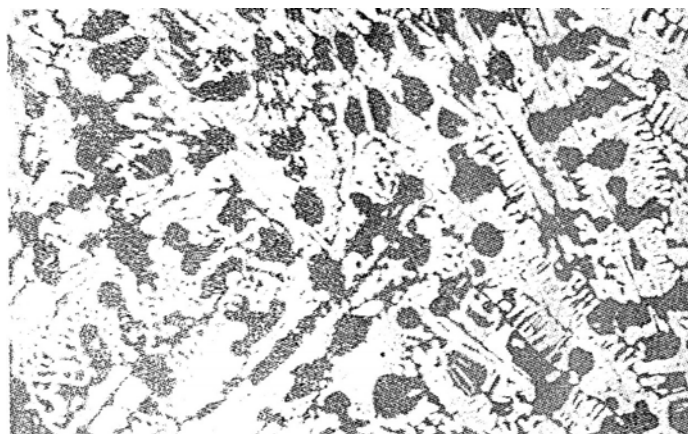
#### ۱- چدن‌های مقاوم در برابر سایش

این گروه شامل چدن‌های مارتنزیتی نیکل - کرم‌دار موسوم به نای هارد<sup>۳۳</sup> با ساختمان میکروسکوپی شامل مارتنزیت، آستنیت باقیمانده و زمینه سمیتیتی (شکل ۳۴)، چدن‌های سفید پرکرم با ساختمانی شامل آستنیت باقیمانده، مارتنزیت و کاربید آلیاژی (شکل ۳۵)، چدن‌های کرم - مولیدن‌دار با همان ساختمان میکروسکوپی و بالاخره چدن‌های

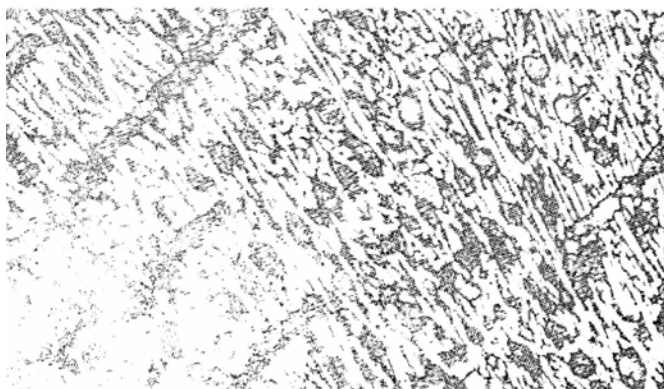
سفید کم کربن با ساختمانی شامل پرلیت درشت و زمینه سمنتیتی می باشد. ترکیب شیمیائی این نوع چدن‌ها در جدول ۳ آمده است.

جدول ۲: تأثیر بعضی از عناصر بر روی ساختمان میکروسکوپی چدن‌ها

نوع عنصر	اثر عنصر در ضمن انجماد	اثر عنصر در ضمن واکنش یوتکتوئید
آلومینیوم	گرافیت زای قوی	امکان تشکیل فریت و گرافیت را افزایش می دهد
آنتیموان	در محدوده مقادیر استفاده شده تأثیر آن کم است	تثبیت کننده قوی پرلیت است
بیسموت	باعث تشکیل سمنتیت می شود ، ولی خودش کاربرد تشکیل نمی دهد	اثر متوسطی در تثبیت پرلیت دارد
بور (تا ۰/۱۵ درصد)	گرافیت زای قوی	باعث تشکیل گرافیت می شود
بور (بیش از ۰/۱۵ درصد)	تثبیت کننده کاربرد	تثبیت کننده قوی پرلیت
کرم	تثبیت کننده کاربرد . تشکیل دهنده کاربیدهای کمپلکس بسیار پایدار	تشکیل دهنده و تثبیت کننده قوی پرلیت
مس	گرافیت زای متوسط است	امکان تشکیل پرلیت را افزایش می دهد
منگنز	عنصر کاربیدزای متوسطی است	باعث تشکیل پرلیت می شود
مولیبدن	عنصر کاربیدزای متوسطی است	تشکیل دهنده و تثبیت کننده قوی پرلیت
نیکل	عنصری است گرافیت زا	تشکیل پرلیت را در حد متوسط افزایش می - دهد
سیلیسیم	گرافیت زای قوی	امکان تشکیل گرافیت و فریت را افزایش می دهد
تلور	تشکیل دهنده قوی کاربرد می باشد ولی باعث پایداری کاربرد نمی شود	تثبیت کننده متوسط پرلیت
قلع	در محدوده مقادیر استفاده شده اثر آن کم است	تثبیت کننده قوی پرلیت می باشد
تیتانیوم (کمتر از ۰/۲۵ درصد)	عنصری است گرافیت زا	تشکیل گرافیت و فریت را افزایش می دهد
تیتانیوم (بیشتر از ۰/۲۵ درصد)	کاربید تیتانیوم که بسیار پایدار است را تشکیل می دهد	
وانادیوم	تشکیل دهنده قوی کاربرد	تشکیل پرلیت را شدیداً افزایش می دهد



شکل ۳۴: تصویر میکروسکوپی از چدن نیکل - کرم دار مقاوم در برابر سایش (کلاس 1، نوع 1 از استاندارد ASTM-A532) با ترکیب شیمیائی  $3.3\%C$ ,  $0.55\%Si$ ,  $2.0\%Cr$ ,  $4.2\%Ni$  و  $0.75\%Mo$  Max در شرایط ریخته‌گری شده به شکل میله و به قطر ۲۵ میلیمتر (یک اینچ). در ساختار میکروسکوپی چدن سفید فوق، دندریتهای آستنیت (سیاه رنگ) و یوتکتیک بین دندریتی آستنیت (نقاط سیاه رنگ) و کاربید (سفید رنگ) کاملاً مشخص‌اند. در اثر اصطکاک و سایش، آستنیت به مارتنزیت تبدیل می‌شود. محلول اچ، نایتال ۳ درصد، بزرگنمایی ۱۰۰



شکل ۳۵: چدن پرکرم ( $28\%Cr$ ) مقاوم در برابر سایش (نوع III استاندارد ASTM-A532) در شرایط ریخته‌گری شده. در چدن مزبور، شبکه بین دندریتی کاربید آهن - کرم (سفید رنگ) و طبیعت دندریتی شکل مارتنزیت (سیاه رنگ) به خوبی مشخص است. محلول اچ، نایتال ۳ درصد. بزرگنمایی ۱۰۰

جدول ۳: ترکیب شیمیائی و سختی چدنهای سفید آلیاژی

نوع چدن	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%P	%S	سختی برینل
نیکل-کرم مارتنزیتی	۳-۳/۶	۰/۴-۰/۷	۰/۴-۰/۷	۱/۴-۳/۵	۴-۴/۷۵	۰/۴	۰/۱۵	۵۵۰
سفید پرکرم	۲/۲۵-۲/۸۵	۰/۲۵-۱	۰/۵-۱/۲۵	۲۴-۳۰		۰/۴	۰/۱۵	۵۰۰

جدول ۴: ترکیب شیمیائی و خواص مکانیکی چدنهای مقاوم در برابر حرارت

نوع چدن					پارامتر مورد نظر
پرسیلیسیم	پرکرم	پرنیکل Ni-resist	پرآلومینیوم	نیکل، کرم و سیلیسیم	
۱/۶-۲/۵	۱/۸-۳	۱/۸-۳	۱/۳-۲	۱/۸-۲/۶	درصد کربن
۴-۶	۰/۵-۲/۵	۱-۲/۷۵	۱/۳-۶	۵-۶	درصد سیلیسیم
۰/۴-۰/۸	۰/۳-۱/۵	۰/۴-۱/۵	۰/۴-۱	۰/۴-۱	درصد منگنر
	۰-۵	۱۴-۳۰		۱۳-۲۲	درصد نیکل
	۱۵-۲۳	۱/۷۵-۵/۵		۱/۸-۵/۵	درصد کرم
		۰-۷		۰-۱۰	درصد مس
		۰-۱		۰-۱	درصد مولیبدن
			۲۰-۲۵		درصد آلومینیوم
۱۷۰-۲۵۰	۲۵۰-۵۰۰	۱۳۰-۲۵۰	۱۸۰-۲۵۰	۱۱۰-۲۱۰	سختی برینل
۲۵-۴۵	۳۰-۹۰	۲۵-۴۵	۱۳-۱۶	۲۰-۴۵	استحکام کششی (ksi)
۹۰-۱۵۰	۱۰۰	۱۰۰-۱۶۰		۷۰-۱۰۰	استحکام فشاری (ksi)
۱۵-۲۳	۲۰-۳۵	۶۰-۱۵۰		۸۰-۱۵۰	مقاومت ضربه (ft-lb)

## ۲- چدنهای مقاوم در برابر حرارت

این چدن‌ها آلیاژهای Fe-C-Si با بیشتر از ۳ درصد سیلیسیم می‌باشند. به علاوه عناصر دیگری نظیر کرم، نیکل، مولیبدن و آلومینیوم نیز برای بهبود مقاومت در برابر حرارت به آنها اضافه می‌شود. ترکیب شیمیائی و خواص مکانیکی برخی از چدنهای مقاوم در برابر حرارت در جدول ۴ خلاصه شده است. از جمله نکات مهم در مورد این نوع

چدن‌ها، کاهش خواص مکانیکی در اثر پدیده باد کردن (رشد)<sup>۳۴</sup> وقتی که درجه حرارت کار از ۴۲۵ درجه سانتیگراد بیشتر شود، می‌باشد. باد کردن یا رشد در چدن‌ها، مخصوصاً در چدن‌های خاکستری، عبارت است از افزایش حجم در اثر گرم شدن. علت این پدیده عبارت است از:

- انبساط ناشی از تجزیه سمیتیت و تبدیل آن به گرافیت و آهن

- اکسیداسیون آهن، پس از اکسید شدن گرافیت و خارج شدن به صورت مونواکسید کربن

در حالی که عناصر گرافیت‌زا پدیده باد کردن را تشدید می‌کنند، عناصر تثبیت کننده کاربید، از آن جلوگیری می‌نمایند. شکل ۳۶ اثر کرم را بر روی باد کردن چدن‌ها نشان می‌دهد. زمینه ساختمان میکروسکوپی چدن‌های پرسلیسیم اغلب فریتی و گرافیت آن به شکل ورقه‌ای و یا کروی می‌باشد. شکل ۳۷ ساختمان میکروسکوپی چدن پرسلیسیم مقاوم در برابر حرارت در شرایط ریخته‌گری شده را نشان می‌دهد.

### ۳- چدن‌های مقاوم در برابر خوردگی

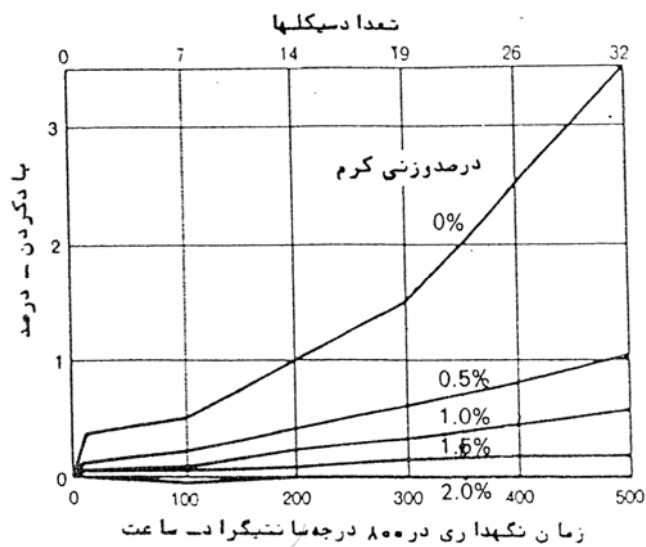
مقاومت خوردگی چدن‌های آلیاژی عمدتاً بستگی به ترکیب شیمیایی و ساختار میکروسکوپی آنها دارد. در واقع، پارامترهای کنترل کننده در این رابطه، ترکیب شیمیایی و ساختار زمینه می‌باشند. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی برخی از چدن‌های آلیاژی مقاوم در برابر خوردگی در جدول ۵ آمده است. سه گروه اصلی از این نوع چدن‌ها وجود دارند که عبارتند از:

الف: چدن‌های پرسلیسیم موسوم به دورآیرن<sup>۳۵</sup> و دوریکلر<sup>۳۶</sup>

نوع دوم حاوی مولیبدن بوده و نسبت به خوردگی حفره‌ای<sup>۳۷</sup> مقاوم می‌باشد. شکل ۳۸ تصویر میکروسکوپی از این نوع چدن را نشان می‌دهد. ساختمان میکروسکوپی این گروه از چدن‌ها شامل گرافیت لایه‌ای و زمینه فریتی می‌باشد.

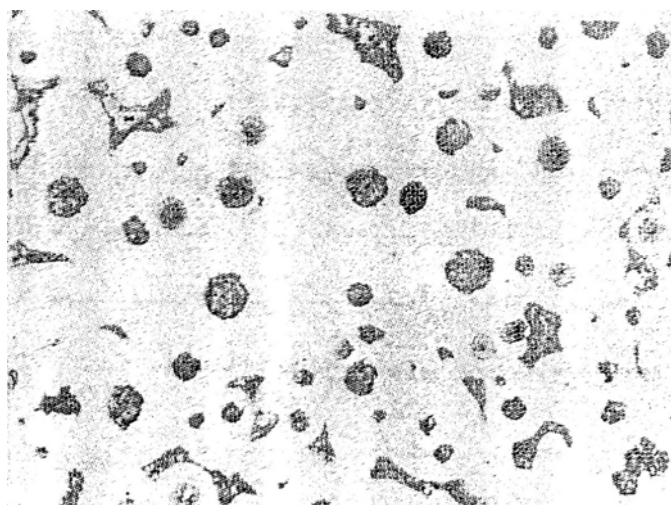
---

-Growth  
-Duriron  
-Durichlor  
-Pitting Corrosion



شکل ۳۶: اثر کرم بر روی سرعت باد کردن چدن خاکستری وقتی که در معرض گرم کردن متناوب در ۸۰۰ درجه سانتیگراد قرار

گیرد.



شکل ۳۷: چدن پرسلیسیم مقاوم در برابر حرارت (0.7%Mn, 3.5%Si, 3.5%C) در شرایط ریخته‌گری شده. ساختار میکروسکوپی شامل کره‌های گرافیت، در زمینه‌ای از ۱۵ درصد پرلیت (جزء خاکستری غیرمنظم) و ۸۵ درصد فریت آزاد (سفید رنگ) می‌باشد. محلول اچ، نایتال ۳ درصد. بزرگمایی ۱۰۰

از اینرو از خواص مکانیکی نسبتاً ضعیفی برخوردار هستند.

ب: چدنهای آستنیتی پرنیکل

این گروه از چدن‌ها که دارای زمینه‌ای آستنیتی بوده و گرافیت‌ها به شکل ورقه‌ای و یا کروی هستند نسبت به محیط‌های بازی و اکسید کننده متوسط مقاوم بوده و به چدنهای نای رزیست<sup>۳۸</sup> موسوم‌اند. شکل ۳۹ تصویر میکروسکوپی این نوع چدن‌ها را در شرایط ریخته‌گری شده نشان می‌دهد.

ج: چدنهای پرکرم

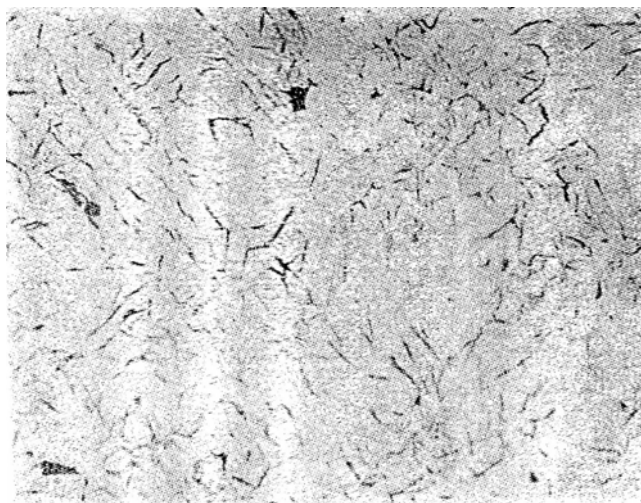
تصاویر میکروسکوپی در شرایط ریخته‌گری شده و نرماله شده از این نوع چدن‌ها در شکل‌های ۴۰ و ۴۱ نشان داده شده است. این گروه از چدن‌ها که جزء چدنهای سفید محسوب می‌شوند و بنابراین از مقاومت به سایش خوبی نیز برخوردارند، نسبت به محیط‌های اکسید کننده مقاوم می‌باشند. این نوع چدن‌ها در مقایسه با چدنهای پرسلیسیم از خواص مکانیکی بهتری برخوردارند. معه‌ذا، ماشینکاری آنها بسیار مشکل می‌باشد.

جدول ۵: ترکیب شیمیائی و خواص مکانیکی تعدادی از چدنهای مقاوم در برابر خوردگی .

پارامتر مورد نظر	نوع چدن		
	پرسلیسیم	پرنیکل Ni-resist	پرکرم
درصد کربن	۰/۴-۱	۱/۸-۳	۱/۲-۲/۵
درصد سیلیسیم	۱۴-۱۷	۱-۲/۷۵	۰/۵-۲/۵
درصد منگنز	۰/۴-۱	۰/۴-۱/۵	۰/۳-۱
درصد نیکل		۱۴-۳۰	۰-۵
درصد کرم		۰/۵-۵/۵	۲۰-۳۵
درصد مس		۰-۷	
درصد مولیبدن	۰-۳/۵	۰-۱	
سختی برینل	۴۵۰-۵۰۰	۱۰۰-۲۳۰	۲۹۰-۴۰۰
استحکام کششی (ksi)	۱۳-۱۸	۲۵-۴۵	۳۰-۹۰
استحکام فشاری (ksi)		۱۰۰-۱۶۰	۱۰۰
مقاومت ضربه (ft-lb)	۲-۴	۶۰-۱۵۰	۲۰-۳۵

-Ni-Resist

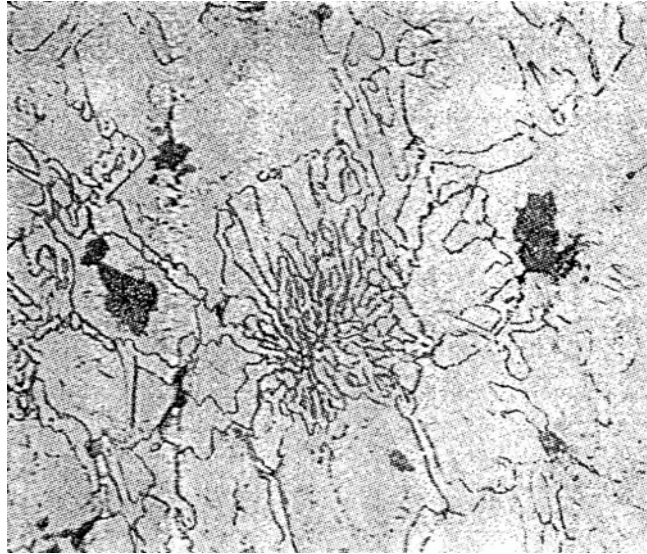




شکل ۳۸: تصویر میکروسکوپی چدن خاکستری پرسلیسیم مقاوم در برابر خوردگی، ساختار میکروسکوپی چدن پرسلیسیم (14.5%Si) از نوع ASTM-A518، در شرایط ریخته‌گری شده می‌باشد. چدن خاکستری فوق شامل گرافیت ورقه‌ای از نوع A (تیره رنگ) در زمینه‌ای از محلول جامد فریت شامل سیلیسیم و آهن (روشن) می‌باشد. بزرگنمایی ۱۰۰



شکل ۳۹: تصویر میکروسکوپی چدن خاکستری پر نیکل مقاوم در برابر خوردگی. چدن خاکستری پر آلیاژ (30%Ni, 3%Cr) از نوع ASTM-A436، در شرایط ریخته‌گری شده می‌باشد. تصویر فوق شامل گرافیت لایه‌ای از نوع A (تیره رنگ) و فاز بین دندریتی  $(Fe - Cr)_3C$  به رنگ خاکستری در زمینه‌ای از آستنیت پرنیکل می‌باشد. بزرگنمایی ۲۵۰



شکل ۴۰: ساختار میکروسکوپی چدن سفید پرکرم مقاوم در برابر خوردگی، با ترکیب شیمیایی 0.46%V, 3.3%Mo, 17.8%Cr, 0.52%Si, 3.09%C در شرایط ریخته‌گری شده، شامل یوتکتیک  $(Cr-Fe)_7C_3$  (نواحی سفید محصور بین خطوط). پرلیت (خاکستری رنگ) در زمینه‌ای از محلول جامد Fe-Cr (فریت). بزرگنمایی ۲۵۰



شکل ۴۱: مشابه چدن مربوط به شکل ۲-۴۰ ولی در شرایط نرماله شده در ۱۰۱۰ درجه سانتیگراد و سپس تمپر شده در ۲۶۰ درجه سانتیگراد. یوتکتیک  $(Cr-Fe)_7C_3$  (نواحی سفید محصور بین خطوط) در زمینه‌ای از مارتریت تمپر شده می‌باشد. بزرگنمایی ۲۵۰

## ۱-۱۲- ساختمان و خواص چدن‌ها

نظر به اینکه ساختمان میکروسکوپی چدن‌ها (به جز چدن سفید) شامل زمینه فلزی و کریستالهای گرافیت (یک جزء غیرفلزی) می‌باشد، خواص آنها نیز شامل مجموعه خواص هر دو جزء است. از آنجائی که گرافیت یک جزء غیرفلزی است، وجود آن در ساختمان میکروسکوپی چدن‌ها را می‌توان به عنوان یک فضای خالی، حفره و یا ترک تلقی کرد. بنابر این چدن‌ها را می‌توان فولادهائی در نظر گرفت که حاوی مقدار زیادی ترک و یا حفره باشند. از این لحاظ گفته می‌شود که چدن‌ها در مقایسه با فولادها، از خواص مکانیکی نامرغوبتری برخوردارند.

در ارتباط با گرافیت، خواص مکانیکی چدن تابعی از مقدار گرافیت، شکل گرافیت، نحوه توزیع گرافیت و اندازه ذرات گرافیت می‌باشد. طبیعتاً با افزایش مقدار گرافیت که از استحکام بسیار پائینی برخوردار است، خواص مکانیکی چدن بیشتر کاهش می‌یابد. برای مقدار ثابتی گرافیت، خواص مکانیکی چدن تابعی از شکل و نحوه توزیع گرافیت در ساختمان می‌باشد.

بدترین حالت موقعی است که فاز گرافیت، تشکیل شبکه پیوسته‌ای را بدهد. به علاوه، در صورتی که یک توزیع غیریکنواخت از گرافیت داشته باشیم، مناطقی که از تراکم بیشتر گرافیت برخوردارند استحکام پائینی دارند، در حالی که در نواحی دیگر که گرافیت تراکم کمتری دارد استحکام بالا می‌باشد. بنابراین یک حالت غیریکنواختی در خواص مکانیکی قطعه به وجود می‌آید.

پس بهترین حالت موقعی است که یک توزیع یکنواخت از کریستالهای گرافیت در ساختمان داشته باشیم. در رابطه با اندازه ذرات گرافیت، تحقیقات نشان داده‌اند که، هر چه ذرات گرافیت ریزتر باشند، اثرات مخرب آنها بر خواص مکانیکی کمتر می‌باشد، بنابراین مطلوبتر خواهند بود. همچنین افزایش بیش از حد ضخامت لایه‌های گرافیت سبب افت کیفیت سطحی قطعات چدنی پس از ماشینکاری می‌شود. (مرجع ۱)

از آنجائی که گرافیت‌های لایه‌ای نقش شکافها و ترکهای بسیار تیز را بازی می‌کنند، تحت شرایطی که تنشهای کششی بر چدن‌ها اعمال شود، خواص مکانیکی آنها را شدیداً کاهش می‌دهد. از سوی دیگر تحت شرایط تنشهای فشاری، خواص مکانیکی چدن‌ها بسیار عالی بوده و تقریباً مشابه با رفتار فولادها با همان ترکیب شیمیائی و ساختمان

زمینه می‌باشد. بنابراین نتیجه می‌شود که، استحکام فشاری و سختی چدن‌ها عمدتاً بستگی به ساختمان زمینه فلزی دارد و تنها اختلاف بسیار جزئی با فولادها با ساختمان مشابه خواهد داشت.

بعضی از خواص دیگر چدن‌ها، به ویژه استحکام پارگی<sup>۳۹</sup>، استحکام خمشی<sup>۴۰</sup> و استحکام پیچش<sup>۴۱</sup> شدیداً تابعی از مقدار گرافیت، شکل و اندازه ذرات آن بوده و به نحو قابل ملاحظه‌ای با خواص مشابه در فولادها با ساختمان زمینه یکسان متفاوت می‌باشد. این مساله عمدتاً مربوط به چدن‌های خاکستری با گرافیت لایه‌ای می‌باشد. باید توجه داشت که با تغییر شکل گرافیت از ورقه‌ای به کروی اثرات نامطلوب آن بر خواص مکانیکی نیز کاهش می‌یابد.

برخلاف گرافیت لایه‌ای، گرافیت کروی دیگر نقش ترک و یا شکاف تیز را بازی نمی‌کند، بنابراین احتمال ایجاد تمرکز تنش حذف می‌شود. از اینرو، چدن‌های نشکن با گرافیت کروی نسبت به چدن‌های خاکستری با گرافیت ورقه‌ای از استحکام کششی و خمشی به مراتب بالاتری برخوردار بوده و به همین خاطر به چدن‌های با استحکام بالا<sup>۴۲</sup> موسوم هستند. استحکام چدن‌های چکشخوار با گرافیت برفکی (و یا فلشی)<sup>۴۳</sup> بین استحکام چدن‌ها با گرافیت لایه‌ای و کروی می‌باشد.

نتایج به دست آمده از آزمایشهای کشش و سختی بر روی چدن‌ها با شکلهای مختلف گرافیت و ساختمانهای میکروسکوپی متفاوت نشان داده است که انعطاف‌پذیری (درصد ازدیاد طول در آزمایش کشش) عمدتاً بستگی به شکل گرافیت داشته، در حالی که سختی تابع ساختار زمینه بود و شکل گرافیت بر آن اثری ندارد (جدول ۶).

جدول ۶: اثر ساختار میکروسکوپی بر روی خواص مکانیکی چدن‌ها

شکل گرافیت	لایه‌ای	برفکی	کروی
درصد ازدیاد طول	۰/۲-۰/۵	۵-۱۰	۱۰-۱۵
ساختمان زمینه	فریت	فریت-پرلیت	پرلیت
سختی برینل	۱۵۰	۲۰۰	۲۵۰

- 
- Rupture Strength
  - Bending Strength
  - Torsional Strength
  - High Strength Cast Iron
  - Flaky Graphite

به جز فریت و پرلیت، زمینه ساختمان میکروسکوپی چدن‌ها می‌تواند از اجزاء دیگری نظیر بینیت و یا مارتنزیت که از استحکام بالاتری نیز برخوردارند تشکیل شود. معه‌ذا باید توجه داشت که، استحکام و انعطاف‌پذیری چدن‌های خاکستری معمولی، عمدتاً توسط شکل گرافیت کنترل می‌شوند و اساساً تغییر ساختمان زمینه اثر نامحسوسی بر آنها دارد. ولی در چدن‌ها با گرافیت کروی و یا برفکی، با تغییر ساختمان زمینه خواص مکانیکی نظیر استحکام و انعطاف‌پذیری به نحو قابل توجهی تغییر خواهد کرد. تغییر زمینه ساختمان میکروسکوپی به کمک عملیات حرارتی امکانپذیر می‌باشد.

گرچه ذرات گرافیت، مخصوصاً گرافیت لایه‌ای، اثر نامطلوبی بر خواص مکانیکی چدن‌ها نظیر استحکام کششی و انعطاف‌پذیری آنها دارد ولی مشخص شده است که در بسیاری از موارد، عامل برتری چدن‌ها در مقایسه با فولادها همین فاز گرافیت می‌باشد. موارد فوق عبارتند از:

الف: از آنجائی که گرافیت منجر به تُرد و شکننده شدن و یا خرد شدن تراشه‌های حاصل از ماشینکاری می‌شود، موجب بهبود قابلیت ماشینکاری چدن‌ها خواهد شد.

ب: به علت خاصیت روغنکاری گرافیت، چدن‌ها نسبت به فولادها از خواص ضد اصطکاک<sup>۴۴</sup> بهتری برخوردارند.

ج: ذرات گرافیت باعث می‌شوند که ارتعاشات وارد شده به چدن‌ها خیلی سریع جذب شود.

د: چدن‌ها تقریباً نسبت به ترک‌های سطحی غیر حساس‌اند. در حقیقت از آنجائی که چدن‌ها حاوی تعداد زیادی ذرات گرافیت بوده که نقش حفره و شکاف را باز می‌کنند، طبیعی است که حضور تعداد معدودی ترک‌های سطحی اضافی اثر بسیار جزئی در خواص مکانیکی آنها دارد. در صورتی که در فولادها با استحکام بالا، که عاری از هرگونه ناخالصی غیرفلزی هستند، حضور تعداد کمی ترک سطحی نقش تعیین کننده‌ای را در خواص مکانیکی آنها خواهد داشت.

علاوه بر مزیت‌های فوق، چدن‌ها نسبت به فولادها از خواص ریخته‌گری بهتری برخوردارند، زیرا اولاً درجه حرارت ذوب و انجماد آنها پائینتر بوده و ثانیاً دامنه حرارتی انجماد آنها محدودتر می‌باشد. به علاوه سیالیت آنها بیشتر بوده و قالب را بهتر پر می‌کنند.

### ۱۳-۱- قابلیت ماشینکاری

یکی از دیگر از کمیتهای مهم در رابطه با چدن‌ها قابلیت ماشینکاری آنها می‌باشد. از آنجا که قطعات چدنی عمدتاً به روش ریخته‌گری شکل داده می‌شوند پس از انجماد نیاز به فرآیندهایی نظیر تمیزکاری سطحی، عملیات حرارتی و ماشینکاری دارند. ماشینکاری فرآیندی است که به کمک آن قطعات به ابعاد نهایی مورد نظر رسانده می‌شوند. نظر به اهمیت دقت ابعادی، قابلیت ماشینکاری چدن‌ها پارامتری بسیار مهم است. این پارامتر عمدتاً به وسیله عمر ابزار برش بیان می‌شود. عمر ابزار برش مدت زمانی است که در سرعت جابجایی ابزار و فشار ثابت، عمق مشخصی از ابزار در اثر سایش با سطح قطعه دچار تخریب می‌شود. در نتیجه دقت ابعادی، کیفیت سطحی و سرعت فرآیند ماشینکاری کاهش می‌یابد. پارامترهای مهم در قابلیت ماشینکاری یک ماده عبارتند از:

- عمر ابزار برش

- کیفیت سطح پرداخت شده و

- توان مصرفی برای ماشینکاری

در مورد چدن‌ها بررسی‌ها نشان داده‌اند که هرچه ساختار زمینه از فریت به سمت پرلیت می‌رود عمر ابزار کاهش و توان مصرفی برای ماشینکاری افزایش می‌یابد به نحوی که زمینه فریتی بالاترین و زمینه پرلیتی ظریف یا دارای کاربرد آزاد کمترین قابلیت ماشینکاری را دارد. قابلیت ماشینکاری به سختی و استحکام بسیار وابسته است به طوریکه هرچه سختی و استحکام بالاتر باشد توانایی ماشینکاری پایین‌تر است. البته بهتر است این قابلیت از روی ریز ساختار تخمین زده شود و نه بر پایه اعداد سختی و استحکام (مرجع ۱). این قابلیت همچنین با کاهش ضریب اصطکاک قطعه با ابزار افزایش می‌یابد (مرجع ۳).

## ۲- عملیات حرارتی چدن‌ها

در میان آلیاژهای صنعتی چدن‌ها متنوع‌ترین خواص را با ارزانترین قیمت دارا می‌باشند. استفاده کامل از دامنه وسیع خواص مزبور مستلزم بررسی دقیق اثرات و نتایج حاصل از اعمال روشهای مختلف عملیات حرارتی بر روی ساختمان و خواص چدن‌ها می‌باشد. از جمله اهداف عملیات حرارتی چدن‌ها عبارتند از:

- برطرف کردن تنشهای داخلی

- بهبود قابلیت ماشینکاری

- افزایش انعطاف پذیری و تافنس ضربه

- افزایش استحکام و مقاومت به سایش

- به عنوان یک مرحله از فرآیند تولید مثلاً برای تهیه چدن مالیل

روشهای مختلف عملیات حرارتی چدن‌ها و فولادها، همچنین واژه‌های استفاده شده در مورد آنها بسیار شبیه به یکدیگر می‌باشند. با وجود این پنج اختلاف مهم و اساسی بین آنها وجود دارد که عبارتند از:

۱- در فولادها، درصد کربن مهمترین عامل تعیین کننده درجه حرارت سخت کردن است، در حالی که در چدن‌ها، سیلیسیم عنصر اصلی تعیین کننده محدوده حرارتی فوق می‌باشد. سیلیسیم محدوده حرارتی بحرانی چدن‌ها را در مقایسه با فولادهای پرکربن افزایش می‌دهد، از این رو به منظور آستنیته شدن کامل درجه حرارت سخت کردن چدن‌ها باید نسبتاً بالا و با توجه به درصد کربن زمینه و درصد سیلیسیم انتخاب شود.

۲- چدن‌ها اغلب حاوی مقدار قابل ملاحظه‌ای منگنز و عناصر آلیاژی دیگر می‌باشند. در نتیجه از سختی پذیری بالایی برخوردار بوده، به نحوی که اغلب به جای کوئنچ کردن در آب، آنها را در روغن و یا در هوا سرد می‌کنند.

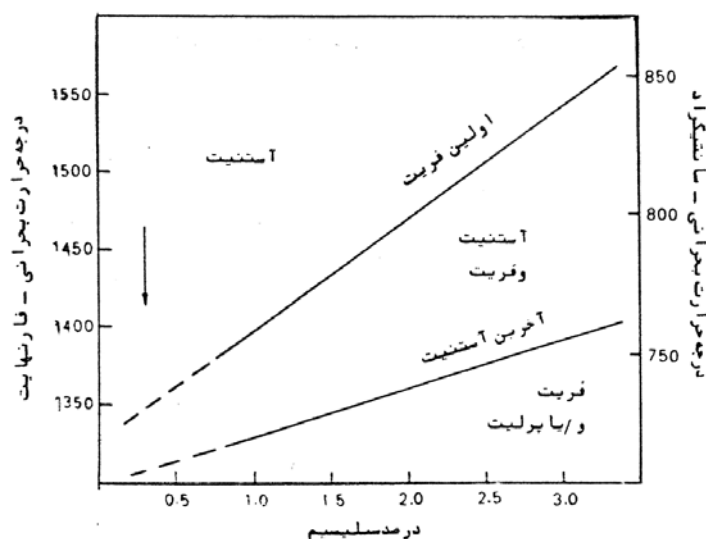
۳- قطعات ریخته‌گری اغلب دارای اشکال پیچیده‌ای بوده که می‌تواند موجب مشکلات در عملیات حرارتی آنها شود. بر خلاف مقاطع نازک و قسمتهای خارجی که سریع گرم می‌شوند، مقاطع ضخیم و قسمتهای داخلی به راحتی گرم

نمی‌شوند. از اینرو سرعت گرم کردن و زمان نگهداری در درجه حرارت سخت کردن باید به نحوی تنظیم شود که مناسب با شکل پیچیده قطعه باشد.

۴- در ضمن سریع سرد کردن شکل پیچیده قطعه می‌تواند منجر به خسارت دیدن آن شود، بدین صورت که تنشهای داخلی زیادی در قطعه به وجود آید و یا اینکه حتی قطعه بشکند. به منظور حذف تنشهای داخلی و احتمال ترک خوردن، بلافاصله پس از کوئنچ کردن باید عملیات حرارتی تمپر کردن بر روی قطعه انجام گیرد.

۵- در هنگام عملیات حرارتی در کوره‌های الکتریکی با اتمسفر خنثی نظیر نیتروژن، اکثر قطعات چدنی قادر هستند که اتمسفر محافظ مورد نیاز خود را تامین کنند. با وجود این در کوره‌های شعله‌ای، قطعات چدنی به راحتی اکسید شده و یا دی‌کربوره می‌شوند. قطعات چدنی که شدیداً اکسید شده باشند می‌توانند مساله آفرین باشند، زیرا اکسید تشکیل شده بر روی چدن معمولاً بسیار چسبنده بوده و موجب سایش و خسارت دیدن ابزارهای برش خواهد شد.

همانگونه که ملاحظه شد سیلیسیم در چدن‌ها اثر قابل ملاحظه‌ای بر روی درجه حرارت‌های بحرانی دارد، این مطلب برای سرد شدن در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۴۲: اثر درصد سیلیسیم بر روی محدوده حرارتی

بحرانی برای چدن‌های مالیل، خاکستری و نشکن در شرایطی

که با سرعتی معادل ۵ درجه سانتیگراد بر ساعت سرد شوند.



در حقیقت سیلیسیم باعث می‌شود که انجماد، ذوب و نحوه سرد و گرم شدن چدن‌ها از سیستم سه تایی Fe-C-Si پیروی کند. از این رو استحاله یوتکتوئیدی در چدن‌ها به جای یک درجه حرارت ثابت، در یک محدوده حرارتی انجام می‌گیرد. وسعت محدوده حرارتی فوق بستگی به درصد سیلیسیم چدن دارد. در صورتی که منحنیهای شکل ۴۲ به اندازه ۳۳ درجه سانتیگراد به بالا تغییر مکان داده شوند، منحنیهای مربوط به گرم کردن چدن‌ها به دست می‌آید. علاوه بر سیلیسیم عناصر آلیاژی دیگر نظیر منگنز، فسفر، نیکل، مس و ... دماهای بحرانی را تغییر می‌دهند. فسفر و کرم همانند سیلیسیم عمل می‌کنند، در حالی که نیکل و منگنز باعث کاهش دماهای بحرانی خواهند شد. در ادامه اصول کلی و کاربرد روشهای مختلف عملیات حرارتی چدن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲-۱- تنش گیری

قطعات چدنی ریخته‌گری شده با شکلهای نسبتاً پیچیده، معمولاً دارای تنشهای داخلی می‌باشند. گرچه تنشهای فوق در بیشتر حالات کم بوده و اثرات مخربی ندارند ولی در مواردی نیز می‌توانند منجر به تاب برداشتن و یا حتی شکسته شدن قطعه شوند. این امر به ویژه در هنگام ماشینکاری قطعات ریخته‌گری دیده شده است. اگر قسمتهایی از قطعه که تحت تنش باشند با ماشینکاری حذف شوند، برای به حالت تعادل در آمدن تنشهای داخلی، قطعه تغییر شکل و یا تغییر ابعاد خواهد داد. به طور کلی تنشهای داخلی ناشی از طراحی و یا عملیات مربوط به فرآیند تولید قطعه خواهد بود و می‌تواند از یکی از منابع زیر به وجود آید:

- ۱- شیب حرارتی در داخل قطعه، که ناشی از اختلاف سرعت سرد شدن سطح و منطقه داخلی آن می‌باشد.
- ۲- وجود مقاطع غیریکنواخت، که منجر به ایجاد شیب حرارتی بین مقاطع نازک (که سریع سرد می‌شوند) و مقاطع ضخیم (که آهسته سرد می‌شوند) خواهد شد.

۳- عوامل مکانیکی بازدارنده انقباضهای حرارتی قطعه در حین انجماد و سرد شدن . به عنوان مثال ، تحت شرایطی که بعضی از قسمت‌ها به علت شکل خاص قطعه به راحتی منقبض می‌شوند ولی نواحی دیگر سعی در جلوگیری از انقباض این قسمت‌ها دارند .

۴- ساچمه‌زنی سطح در ضمن تمیزکاری آن : تحت شرایط فوق تنشهای فشاری سطحی نه تنها مضر نیستند ، بلکه می‌توانند مفید نیز باشند ، ولی در صورتی که توزیع تنشهای مزبور در قسمت‌های مختلف یکسان نباشند ، خطر تاب برداشتن قطعه وجود دارد .

۵- تنشهای ناشی از عملیات حرارتی یا ماشینکاری قطعه .

در تنش گیری درجه حرارت و زمان عملیات باید به نحوی انتخاب شود که درعین حالی که تنشهای داخلی به حد کافی حذف می‌شوند ، استحکام و سختی بیش از حد کاهش نیابد . قابلیت نرم شدن و یا حذف تنشهای داخلی چدن‌ها در اثر حرارت دیدن ، عمدتاً بستگی به ترکیب شیمیایی آنها دارد . عناصر آلیاژی به ویژه منگنز ، کرم و مولیبدن ، استحکام چدن در دماهای بالا را افزایش می‌دهند . از این رو درجه حرارت تنش‌گیری برای چدن‌های آلیاژی در مقایسه با چدن‌های غیرآلیاژی به مراتب بالاتر می‌باشد . در اینجا تذکر این نکته ضروری است که ابعاد قطعه و میزان تنشهای داخلی که باید حذف شوند نیز در انتخاب درجه حرارت و زمان تنش‌گیری موثر می‌باشد .

## ۲-۲- آنیل کردن

هدف از آنیل کردن چدن‌ها عبارت است از حرارت دادن قطعه در دمایی بالاتر از درجه حرارت بحرانی ( $A_1$ ) و سپس آهسته سرد کردن (معمولاً در کوره) به منظور کاهش سختی و استحکام و افزایش انعطاف پذیری آن . تفاوت عمده‌ای که بین نتایج حاصل از آنیل چدن‌ها و فولادها وجود دارد عبارت است از : تجزیه سمیتیت در چدن‌ها ، به نحوی که ساختمان میکروسکوپی آنیل شده آنها می‌تواند شامل فریت و گرافیت باشد . روشهای مختلفی برای آنیل چدن‌ها وجود دارد که به ترتیب صفحه بعد هستند .

### آنیل کردن در درجه حرارت بالا :

برای این کار قطعات را در دمایی بین ۹۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد حرارت می‌دهند. در نتیجه کاربید اولیه و کاربید یوتکتیکی به آستنیت و گرافیت تجزیه می‌شوند. این تجزیه با مقداری افزایش حجم همراه است. اگر از درجه حرارت فوق تا زیر دمای یوتکتوئید قطعات به آهستگی (در کوره) سرد شوند، ساختمان نهایی شامل فریت و گرافیت با حداقل سختی خواهد بود. عملیات مزبور، همان عملیات حرارتی مالیل کردن به منظور تهیه چدن مالیل فریتی از چدن سفید می‌باشد. اگر هدف فقط حذف سمیتیت اولیه از چدن سفید و داشتن زمینه پرلیتی باشد، پس از پایان آنیل در درجه حرارت بالا، قطعات را از کوره خارج کرده و در هوا سرد می‌کنند. البته سرعت تجزیه کاربیدها بستگی به میزان تنش در آنها نیز دارد. کاربیدهایی که در قسمتهای کم تنش قطعه قرار دارند دیرتر تجزیه می‌شوند. (مرجع ۵)

لازم به یادآوری است که دمای بالا با مشکلاتی همچون اکسیداسیون، پوسته دار شدن، رشد بیش از حد دانه و در نتیجه تخریب خواص فیزیکی قطعات همراه است. از این رو در انتخاب دمای آستنیت کردن با محدودیت روبرو هستیم. همچنین فریتی شدن بیش از حد زمینه اگرچه ماشینکاری را آسان می‌کند اما موجب افت کیفیت سطحی قطعات می‌شود چرا که فریت به علت نرم بودن در هنگام ماشینکاری دچار کشیدگی و پارگی (Drag and Tear) می‌شود و لذا سطح پرداخت شده از کیفیت مناسبی برخوردار نخواهد بود. (مرجع ۵)

### آنیل کردن در درجه حرارت متوسط :

این عملیات محدود می‌شود به قطعات چدنی که فاقد کریستالهای درشت سمیتیت اولیه باشند، به بیان دیگر سمیتیت موجود نسبتاً کم و به صورت کریستالهای ریز و کاملاً پراکنده در ساختار توزیع شده باشد. در این روش قطعات چدنی را درست بالاتر از درجه حرارت بحرانی (یعنی بین ۸۲۰ تا ۹۰۰ درجه سانتیگراد) گرم کرده و سپس به آهستگی سرد می‌کنند. درجه حرارت آنیل عمدتاً بستگی به درصد سیلیسیم دارد، زیرا افزایش درصد سیلیسیم درجه حرارت بحرانی را افزایش می‌دهد. این عملیات برای فریتی کردن کامل زمینه در چدنهای غیرآلیاژی و یا تهیه چدن با زمینه پرلیتی از آلیاژهایی که دارای مقادیر متوسطی از کرم، مولیبدن، وانادیوم و یا مقدار زیادی منگنز باشند استفاده می‌شود. در هر یک از حالات فوق باید توجه داشت که چدن نباید دارای سمیتیت آزاد باشد.

### آنیل کردن در درجه حرارت پایین :

چدنهایی که فقط شامل سمیتیت در پرلیت باشند را با حرارت دادن در دمایی درست زیر درجه حرارت بحرانی و سپس آهسته سرد کردن به نحو موفقیت آمیزی می توان آنیل کرد . در این روش زمینه پرلیتی در اثر نفوذ تدریجی به مجموعه ای از فریت و گرافیت تبدیل می شود . در واقع در این عملیات تغییر فازی نخواهیم داشت . در مورد چدنهای غیرآلیاژی عملیات فوق شامل حرارت دادن قطعات تا درجه حرارتی حدود ۷۳۰ تا ۷۹۰ درجه سانتیگراد و سپس نگهداشتن برای مدتی در حدود یک ساعت برای هر یک اینچ ضخامت و سرد کردن آهسته (تقریباً ۵۰ درجه سانتیگراد در ساعت) می باشد . سرعت فریتی شدن چدنهای غیرآلیاژی تابعی از درصد سیلیسیم ، درجه حرارت آنیل ، ساختمان و توزیع گرافیت اولیه می باشد . در این روش چدنهایی که دارای ۲ درصد سیلیسیم باشند خیلی سریع فریتی می شوند ، به نحوی که در ۷۶۰ درجه سانتیگراد و در مدت ۲۰ تا ۳۰ دقیقه تا حدود ۹۰ درصد از پرلیت در مقاطع نازک را به فریت و گرافیت می توان تبدیل کرد . با وجود این باید توجه داشت که واکنش فوق در حضور عناصر آلیاژی و یا بیش از ۰/۷ درصد منگنز به تاخیر می افتد . گرچه همانگونه که بحث شد در این روش می توان ساختمان صد در صد فریتی گرفت ، ولی از نظر اقتصادی و صرف وقت ، عملیات آنیل در درجه حرارت متوسط مناسب تر می باشد .

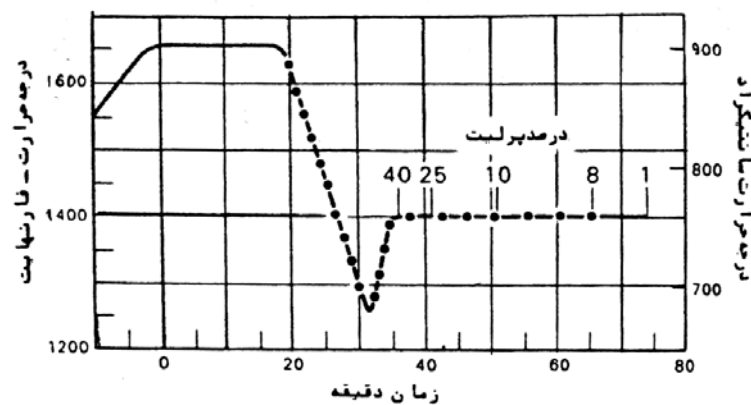
### آنیل دو مرحله ای :

گرچه نتایج حاصل از روشهای معمولی آنیل کردن کاملاً رضایت بخش می باشند ، ولی تحقیقات انجام شده بر روی چدن با گرافیت کروی نشان داده اند که عملیات آنیل دو مرحله ای در زمان نسبتاً کوتاهی ، نتایج مشابه و یا حتی بهتری را می دهد . چگونگی عملیات آنیل دو مرحله ای برای یک نمونه چدنی به ضخامت ۱۲/۵ میلیمتر (۰/۵ اینچ) به صورت زیر می باشد :

- آستنیتیزه کردن برای مدتی در حدود ۲۰ دقیقه در ۹۰۰ درجه سانتیگراد به منظور انحلال تمامی کاربیدهای آزاد .
- سرد کردن تا ۶۷۵ درجه سانتیگراد به منظور انجام استحاله آستنیت به پرلیت . سپس گرم کردن مجدد تا ۷۶۰ درجه سانتیگراد به منظور تجزیه پرلیت به فریت و گرافیت .

به روش فوق در مدتی در حدود ۱۰ دقیقه، حدود ۹۰ درصد پرلیت به فریت تبدیل می‌شود. عملیات به طور شماتیک

در شکل ۴۳ نشان داده شده است.



شکل ۴۳: آنیل دومرحله‌ای برای چدن نشکن. درصد پرلیت باقیمانده بر

حسب زمان نگهداری در درجه حرارت مرحله دوم آنیل نشان داده شده است

جدول ۷: عملیات حرارتی توصیه شده برای آنیل چدنهای خاکستری

نوع عملیات آنیل	هدف	درجه حرارت	زمان	سرعت سرد شدن
درجه حرارت پایین (فریتی کردن)	برای تبدیل پرلیت به فریت در چدنهای غیرآلیاژی، برای حصول حداکثر قابلیت ماشینکاری	۷۶۰-۷۰۰ درجه سانتیگراد	۴۵ دقیقه برای هر ۲۵ میلیمتر ضخامت مقطع	تا ۳۱۵ درجه سانتیگراد در کوره سرد شود (۵۵ درجه سانتیگراد بر ساعت) سپس تا درجه حرارت اتاق در هوای آرام سرد شود.
درجه حرارت متوسط (آنیل کامل)	برای تبدیل پرلیت به فریت در چدنهایی که روشن قبل برای آنها کارایی خوبی ندارد. برای حذف مقادیر کم و کاملاً پراکنده کاربید آزاد در چدنهای غیرآلیاژی	۹۰۰-۸۱۵ درجه سانتیگراد	یک ساعت برای هر ۲۵ میلیمتر ضخامت مقطع	تا ۳۱۵ درجه سانتیگراد در کوره سرد شده و سپس تا دمای اتاق در هوای آرام سرد شود
درجه حرارت بالا (گرافیت‌زایی یا آنیل کامل)	حذف توده‌های سمیتیت آزاد در چدنهای خالدار یا سفید و تبدیل پرلیت به فریت برای حصول حداکثر قابلیت ماشینکاری	۹۵۰-۹۰۰ درجه سانتیگراد	۱ تا ۳ ساعت به علاوه ۱ ساعت برای هر ۲۵ میلیمتر ضخامت	تا ۳۱۵ درجه سانتیگراد در کوره سرد شده و سپس تا دمای اتاق در هوا سرد شود
آنیل نرماله کردن	حذف توده‌های کاربید آزاد و ابقاء پرلیت برای حصول سختی و استحکام مناسب	۹۵۰-۸۷۰ درجه سانتیگراد	۱ تا ۳ ساعت به علاوه یک ساعت برای هر ۲۵ میلیمتر ضخامت	از درجه حرارت آنیل تا زیر ۴۸۰ درجه سانتیگراد در هوا سرد شود

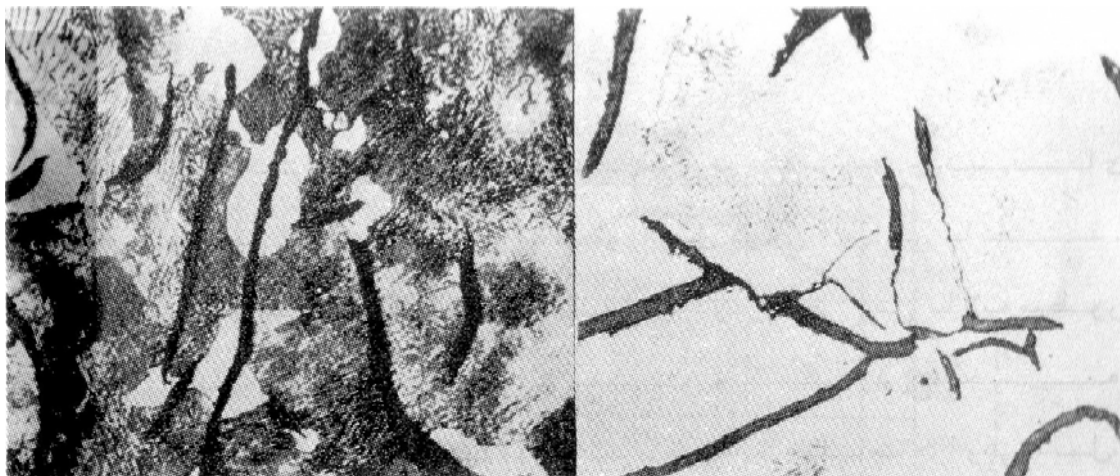
## آنیل کردن چدنهای آلیاژی :

همانگونه که قبلاً بحث شد ، وجود یک یا چند عنصر پایدار کننده کاربید نظیر کرم ، مولیبدن ، وانادیوم ، منگنز (تا حدودی)، نیکل و مس باعث اختلال در امر نرم شدن چدن‌ها در ضمن عملیات حرارتی آنیل می‌شود . برای غلبه بر اثر ممانعت کنندگی عناصر فوق قطعات چدنی که شامل مقادیر قابل توجهی از این عناصر باشند را ، در مقایسه با چدنهای غیرآلیاژی ، باید در درجه حرارتی بالاتر و برای مدت زمانی طولانی‌تر آنیل نمود .

از سوی دیگر کربن و سیلیسیم واکنش گرافیت زایی کاربید را تشدید می‌کنند . از این رو برای مطالعه و مقایسه روشهای مختلف آنیل بر روی چدنهای مختلف ، باید نقش کربن ، سیلیسیم و عناصر تثبیت کننده کاربید در نظر گرفته شوند . در چدنهای مالیل ، سرعت آنیل شدن معمولاً توسط نسبت منگنز به گوگرد کنترل می‌شود . مناسب ترین حالت برای این منظور هنگامی است که درصد منگنز برابر  $0.2\% + 0.1\% (S)$  باشد.

## **۲-۲-۱- آنیل کردن چدنهای خاکستری**

به جز در مورد تنش گیری ، اکثر عملیات حرارتی که بر روی چدنهای خاکستری انجام می‌گیرد ، معمولاً به منظور آنیل کردن آنها می‌باشد . آنیل چدنهای خاکستری شامل حرارت دادن در دمایی بالا به منظور نرم کردن ، کاهش یا حذف توده های سمیتیت یوتکتیکی و در نتیجه افزایش قابلیت ماشینکاری آنها می‌باشد . با وجود این عملیات حرارتی آنیل خواص چدنهای خاکستری را کاهش می‌دهد . به بیان دقیق تر این عملیات باعث کاهش کلاس چدن به یک مرحله پایینتر می‌شود . به عنوان مثال در ثر آنیل کردن ، خواص مکانیکی چدن خاکستری کلاس ۴۰ تا حد خواص مکانیکی چدن خاکستری کلاس ۳۰ کاهش می‌یابد . میزان کاهش خواص بستگی به درجه حرارت آنیل ، زمان نگهداری و ترکیب شیمیایی چدن دارد . انتخاب روش مناسب بستگی به خواص مکانیکی نهایی مورد نظر دارد . در شکل ۴۴ ساختمان میکروسکوپی و سختی چدن خاکستری غیرآلیاژی در شرایط ریخته‌گری و پس از عملیات حرارتی آنیل در درجه حرارت پایین (آنیل فریتی) با یکدیگر مقایسه شده‌اند .



شکل ۴۴: تبدیل ساختار پرلیتی چدن خاکستری آلیاژی به فریت و گرافیت توسط آنیل کردن. سختی پس از ریخته‌گری ۱۸۰ برینل. سختی پس از آنیل کردن به مدت یک ساعت در ۷۶۰ درجه سانتیگراد ۲۰ برینل. بزرگمایی ۵۰۰

از جمله پارامترهای مهم در رابطه با آنیل چدن های خاکستری اثر عناصر آلیاژی بر روی زمان نگهداری در درجه حرارت عملیات می‌باشد. عناصر مشخصی نظیر کربن و سیلیسیم تجزیه پرلیت و سمیتیت آزاد در درجه حرارت آنیل را افزایش می‌دهند. از این رو، در صورتی که چدن حاوی مقادیر کافی از عناصر فوق باشد، زمان آنیل کردن را می‌توان کاهش داد. نتایج حاصل از مطالعات انجام گرفته بر روی اثر سیلیسیم نشان می‌دهد که اگر درصد سیلیسیم از ۱/۹۳ به ۲/۶۸ افزایش یابد، زمان لازم برای تجزیه کامل پرلیت در ۷۵۰ درجه سانتیگراد از ۴۵ دقیقه به ۱۰ دقیقه کاهش خواهد یافت.

از سوی دیگر عناصر تثبیت کننده کاربید نظیر وانادیوم، کرم، منگنز و عناصر تثبیت کننده پرلیت نظیر فسفر، نیکل و مس تجزیه پرلیت را به تعویق می‌اندازند. درصد افزایش زمان لازم برای تجزیه پرلیت، ناشی از اضافه کردن ۰/۱ درصد از هریک از عناصر فوق به ترتیب جدول ۸ می‌باشد.



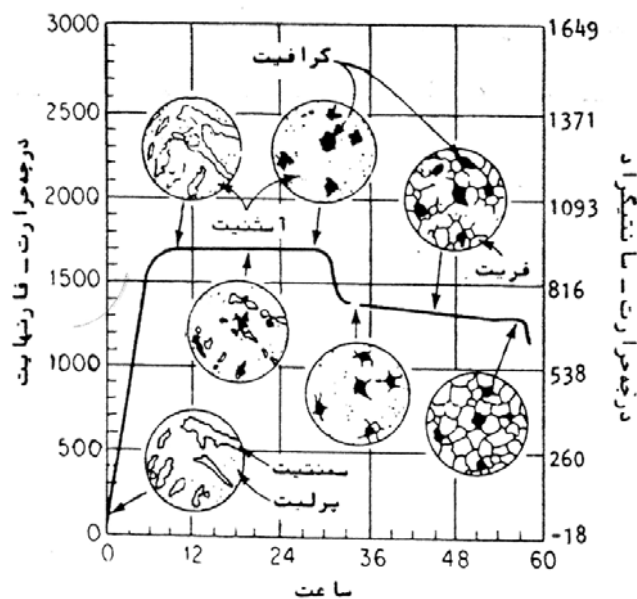
نوع عنصر	درصد افزایش زمان
منگنز	۶۰
نیکل	۳۰
مس	۳۰
کرم	۲۰۰
فسفر	۳۰

جدول ۸

## ۲-۲-۲ آنیل کردن به منظور تهیه چدن مالیل (مالیلازینگ)

مالیل کردن در حقیقت همان عملیات حرارتی آنیل در درجه حرارت بالا می‌باشد. این عملیات موجب تبدیل چدن سخت و شکننده سفید به چدن مالیل (چکشخوار) می‌شود. اصول عملیات حرارتی مالیل کردن بر اساس طبیعت ناپایدار کاربید آهن در سیستم تعادلی Fe-C-Si می‌باشد.

ساختمان اولیه مورد نیاز برای تهیه چدن مالیل، باید شامل پرلیت و کاربید آزاد باشد. به بیان دیگر چدن باید صد در صد سفید باشد. در صورتی که کربن آزاد و به شکل ورقه‌ای در ساختمان چدن اولیه وجود داشته باشد (چدن خالدار باشد)، گرافیت‌های حاصل از تجزیه سمیتیت در مراحل مختلف آنیل، ترجیحاً بر روی ورقه‌های گرافیت موجود نشسته و در نتیجه عملیات مالیل کردن به نحو مطلوبی انجام نخواهد گرفت. سیکل عملیات حرارتی مالیل کردن به طور شماتیک در شکل ۴۵ نشان داده شده است.



شکل ۴۵: سیکل عملیات حرارتی جهت تهیه چدن مالیل

مالیل کردن شامل سه مرحله می باشد که عبارتند از :

مرحله اول : شامل جوانه زنی گرافیت می باشد . این مرحله عمدتاً گرم کردن تا درجه حرارت بالا و شروع نگهداری در این درجه حرارت را شامل می شود .

مرحله دوم : که به اولین مرحله گرافیت زایی (FSG) موسوم است ، شامل نگهداری در درجه حرارت بالا یعنی بین ۸۴۰ تا ۹۸۰ درجه سانتیگراد می باشد . هدف از این مرحله عبارت است از حذف توده های سمتیت آزاد از ساختمان میکروسکوپی چدن سفید .

مرحله سوم : که به دومین مرحله گرافیت زایی (SSG) موسوم است ، شامل سرد کردن آهسته در محدوده حرارتی استحاله یوکتوئیدی می باشد . هدف از این مرحله عبارت است از تشکیل زمینه کاملاً فریتی و عاری از هرگونه پرلیت و یا کاربید .

## ۲-۳- نرماله کردن

هدف از نرماله کردن عبارت است از سرد کردن در هوا از درجه حرارتی بالاتر از محدوده حرارتی بحرانی . سرعت سرد شدن قطعات چدنی عاری از ماسه در هوا ، معمولاً سریعتر از سرعت سرد شدن آنها در قالب می باشد . به این ترتیب ساختمان میکروسکوپی نهایی چنین قطعاتی معمولاً شامل زمینه پرلیتی ریز بوده و در نتیجه در مقایسه با قطعات سرد شده در قالب و یا آنیل شده از سختی و استحکام بیشتری برخوردار می باشند .

قطعات چدنی را به سه روش مختلف می توان نرماله کرد . انتخاب هر یک از روشها بستگی به شرایط موجود دارد .  
روش اول : به عنوان عملیات حرارتی کاملاً مستقل و به منظور افزایش سختی و استحکام قطعات چدنی که در قالبهای ماسه ای سرد شده اند ، استفاده می شود .

روش دوم : پس از عملیات آنیل در دمای بالا که به منظور حذف توده های سمیتیت آزاد انجام می گیرد ، برای جلوگیری از تشکیل فریت نرم ، قطعات مورد نظر را در هوا سرد می کنند . در نتیجه ساختمان پرلیتی ریز با سختی و استحکام نسبتاً بالا به دست می آید .

روش سوم : پس از انجماد ولی قبل از سرد شدن تا درجه حرارت بحرانی ، قطعات را از قالب خارج کرده ، از ماسه تمیز می کنند و در هوا سرد می نمایند . با توجه به این که سرعت سرد شدن در هوا بیشتر از سرعت سرد شدن در قالب می باشد ، قطعاتی که به این ترتیب سرد می شوند از سختی و استحکام بالاتری برخوردارند . نکته قابل توجه این است که قطعاتی که دارای شکل های پیچیده بوده و به این ترتیب سرد شوند نیاز به تنش گیری دارند . به جز در مورد قطعاتی که دارای شکل های پیچیده باشند ، سرعت حرارت دادن در عملیات نرماله کردن چدن ها ، با توجه به امکانات موجود انتخاب می شود . در قطعات با شکل های پیچیده اختلاف زیاد درجه حرارت در قسمتهای مختلف که ناشی از گرم کردن سریع می باشد ، می تواند منجر به تغییر شکل و یا شکست قطعه شود . از این رو در مورد قطعات مزبور سعی می شود از سرعت سرد کردن نسبتاً کم استفاده شود . زمان نگهداری در درجه حرارت نرماله کردن بستگی به ابعاد و حداکثر ضخامت قطعه داشته و باید در حدی باشد که تمام قسمتهای آن هم دما شود . درجه حرارت نرماله کردن بستگی به ترکیب شیمیایی و عمدتاً درصد سیلیسیم دارد . زیرا افزایش درصد سیلیسیم موجب افزایش وسعت محدوده حرارتی

بحرانی خواهد شد. به طور کلی درجه حرارت نرماله کردن باید در حدود ۵۰ درجه سانتیگراد بالاتر از محدوده حرارتی بحرانی انتخاب شود. این محدوده حرارتی برای چدنهای مالیل ۸۰۰ الی ۸۳۰ درجه سانتیگراد، برای چدنهای خاکستری با استحکام زیاد ۸۱۰ الی ۸۷۰ درجه سانتیگراد، برای چدنهای خاکستری با استحکام کم ۸۴۰ الی ۹۰۰ درجه سانتیگراد و برای چدنهای نشکن ۸۷۰ الی ۹۴۰ درجه سانتیگراد می باشد.

برای سرد کردن قطعات در عملیات نرماله کردن، از هوای آرام و یا هوای فشرده استفاده می شود. هر چه قطعات حجیم تر بوده و یا ضخامت قسمتهای مختلف آن بیشتر باشد، سرعت سرد کردن نیز باید بیشتر باشد. معمولاً قطعات بزرگ با شکلهای پیچیده، مناسب برای نرماله شدن نیستند. از سوی دیگر چدنهای آلیاژی و چدنهای پرمنگنز را، که در محدوده حرارتی استحاله پرلیتی از سختی پذیری بالایی برخوردارند، با استفاده از سرعتهای سرد شدن آهسته به راحتی می توان نرماله کرد. همچنین در مقایسه با چدنهای غیرآلیاژی مقاطع ضخیم تری از این چدن ها می توان نرماله کرد.

## ۲-۳-۱- نرماله کردن چدنهای خاکستری

چدنهای خاکستری را به منظورهای مختلف نظیر افزایش نسبی سختی و استحکام کششی و یا بازگرداندن خواص ریختگی، به قطعاتی که تحت عملیاتی نظیر پیشگرم و یا پسگرم در جوشکاری تعمیراتی قرار گرفته باشند، نرماله می کنند. برای این کار قطعه مورد نظر را برای مدتی در حدود یک ساعت برای هر ۲۵ میلیمتر ضخامت در درجه حرارتی در محدوده ۸۸۵ تا ۹۲۵ درجه سانتیگراد نگهداشته و سپس در هوا سرد می کنند.

برای چدنهای آلیاژی هر چه درجه حرارت نرماله کردن بیشتر باشد، ساختمان حاصل از سختی و استحکام بیشتری برخوردار خواهد بود. درحالی که برای چدنهای غیرآلیاژی، استحکام و سختی نهایی تقریباً مستقل از درجه حرارت نرماله کردن می باشد. درواقع خواص مکانیکی حاصل از نرماله کردن، تابع عناصر آلیاژی است. نقش عناصر آلیاژی ریز کردن پرلیت و کاهش فاصله بین لایه های آن می باشد.

## ۲-۴- سخت کردن

عملیات سخت کردن چدن‌ها، شامل حرارت دادن در درجه حرارتی بالاتر از محدوده حرارتی بحرانی و سپس سریع سرد کردن (کوئنچ کردن) می‌باشد. با کوئنچ کردن استحاله نفوذی متوقف شده و به جای پرلیت، مارتنزیت با حداکثر سختی و استحکام به دست می‌آید. برای حذف تنشهای داخلی و در نتیجه جلوگیری از احتمال تاب برداشتن و یا ترک خوردن، قطعات را پس از کوئنچ کردن معمولاً بازگشت می‌دهند. زمان بازگشت معمولاً یک ساعت و درجه حرارت بازگشت بستگی به سختی و استحکام نهایی مورد نظر دارد. در یک سختی یکسان قابلیت ماشینکاری ساختمان میکروسکوپی حاصل از کوئنچ و تمپر نسبت به ساختمان میکروسکوپی پرلیتی معمولاً بیشتر می‌باشد. همانند فولادها قابلیت سخت شدن چدن‌ها را نیز توسط پارامتر سختی پذیری مشخص می‌کنند. سختی پذیری را می‌توان با استفاده از ترکیب شیمیایی و یا به کمک آزمایش جамینی تعیین کرد.

## ۲-۵- تمپر کردن

عملیات تمپر کردن شامل حرارت دادن و نگهداری قطعات سخت و یا نرماله شده در درجه حرارتی زیر محدوده حرارتی بحرانی و سپس سرد کردن در هوا می‌باشد. به منظور کاهش تنشهای داخلی، احتمال تاب برداشتن و یا ترک خوردن، همچنین کاهش میزان آستنیت باقیمانده، توصیه می‌شود که قطعات را بلافاصله پس از کوئنچ کردن بازگشت دهند. حتی در شرایطی که حداکثر سختی مورد نظر باشد، تمپر کردن در درجه حرارتی بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد مفید می‌باشد، در ضمن عملیات فوق اثر چندانی بر روی سختی قطعه نخواهد داشت.

- 1- M.Field & J.F.Kahles , “ Machining Characteristics of Gray Cast Irons “ , A.F.S Transactions , 1954 .
- 2- G.K.Turnball & J.F.Wallace , “ Molybdenum Effect on Gray Iron Elevated Temperatures Properties “ , A.F.S Transactions , 1959 .
- 3- W.W.Moore & J.O.Lord , “ Gray Cast Iron Machinability : Quantitative Measurements of Graphite and Pearlite Effects “ , A.F.S Transactions , 1959 .
- 4- J.F.Janowak & R.B.Gundlach , “ Improved Machinability of High Strength Gray irons “ , A.F.S Transactions , 1985 .
- 5- A.W.Demmler, “Annealing Iron Castings for Machinability “ , A.F.S Transactions , 1954 .