

بسم الله الرحمن الرحيم



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
مجمع آموزش عالی اسفراين

نام درس: عملیات حرارتی

فصل پنجم

عملیات حرارتی برای
تشکیل ساختارهای تعادلی

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

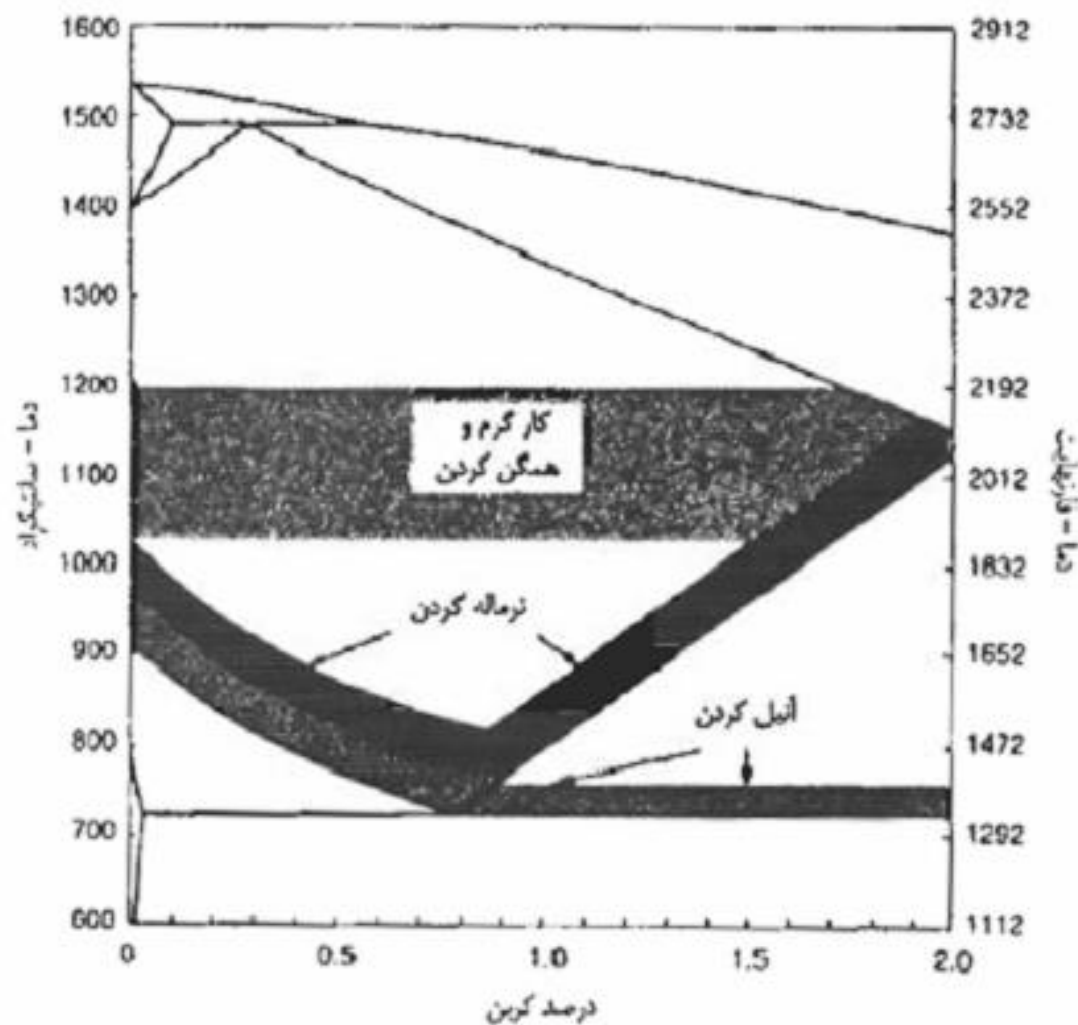
ممکن کردن^۱ (یکنواخت کردن) Homogenising

از جمله مشخصه‌های فولادهای ریخته‌گری شده عبارت از ساختار شاخه‌ای^۲، جدایش موضعی^۳ و نایکنواختی در ترکیب شیمیایی^۴ است. پدیده‌های مزبور که ناشی از ناعادلانه سرد شدن در ضمن انجماد و عدم نفوذ کامل عناصر آلیاژی است، باعث افت خواص مکانیکی فولاد از جمله قابلیت کار گرم و / یا سرد و همچنین کاهش کیفیت و کارایی عملیات حرارتی مختلف

می‌شوند. از این رو، ساختار و ترکیب شیمیایی فولادهای ریخته‌گری شده باید به کمک عملیات حرارتی مناسب یکنواخت شود.

برای این منظور قطعات مورد نظر را در دمای نسبتاً بالا (شکل

۵-۱) برای مدت زمان نسبتاً طولانی (زمان حرارت دادن بستگی به ابعاد و ترکیب شیمیایی قطعه دارد) حرارت داده و سپس به آهستگی تا دمای اتاق سرد می‌کنند.



این عملیات به همگن (یکنواخت) کردن یا آنیل نفوذی^۱ موسوم است. از آنجایی که دمای انتخاب شده نسبتاً بالاست نفوذ سریع بوده و بنابراین پس از پایان عملیات، نایکنواختی میکروساختار و ترکیب شیمیایی از بین می‌رود. به علاوه، فازهای ثانویه نظیر کاربیدهای راسب شده به هنگام انجماد، در آستنیت حل شده و به صورت محلول درمی‌آیند.

آنیل کردن^۲ Annealing

به هر نوع عملیات

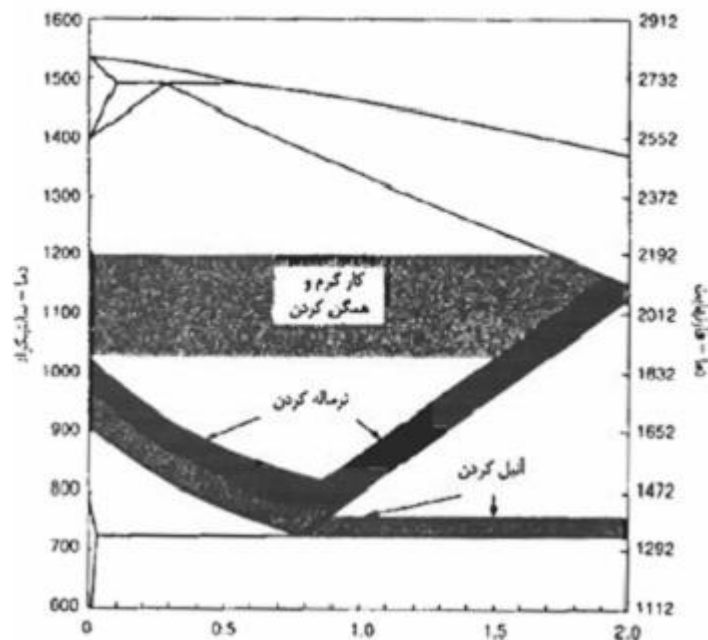
حرارتی که منجر به تشکیل ساختاری بجز مارتنزیت و یا سختی کم و انعطاف پذیری زیاد شود اطلاق می شود. از آنجایی که این مفهوم بسیار کلی است، عملیات حرارتی آنیل به یک سری فرایندهای مشخصتر و دقیقتر تقسیم می شود. این تقسیم بندی بر اساس دمای عملیات، روش سرد کردن، ساختار و خواص نهایی است.

آنیل کامل^۱ Full annealing

آنیل کامل عبارت از حرارت دادن فولاد در گستره دمایی نشان داده شده در شکل ۵-۱ و سپس سرد کردن آهسته، معمولاً در کوره است. تحت شرایط فوق آهنگ سرد شدن در حدود ۵/۰۲ درجه سانتیگراد بر ثانیه است. همچنان که از شکل ۵-۱ مشخص است، گستره دمایی آستنیته کردن برای آنیل کامل، تابع درصد کربن فولاد است. بدین صورت که، برای فولادهای هیپروتکتوئید حدود ۵۰ درجه سانتیگراد بالای خط A_1 و برای فولادهای هایپروتکتوئید

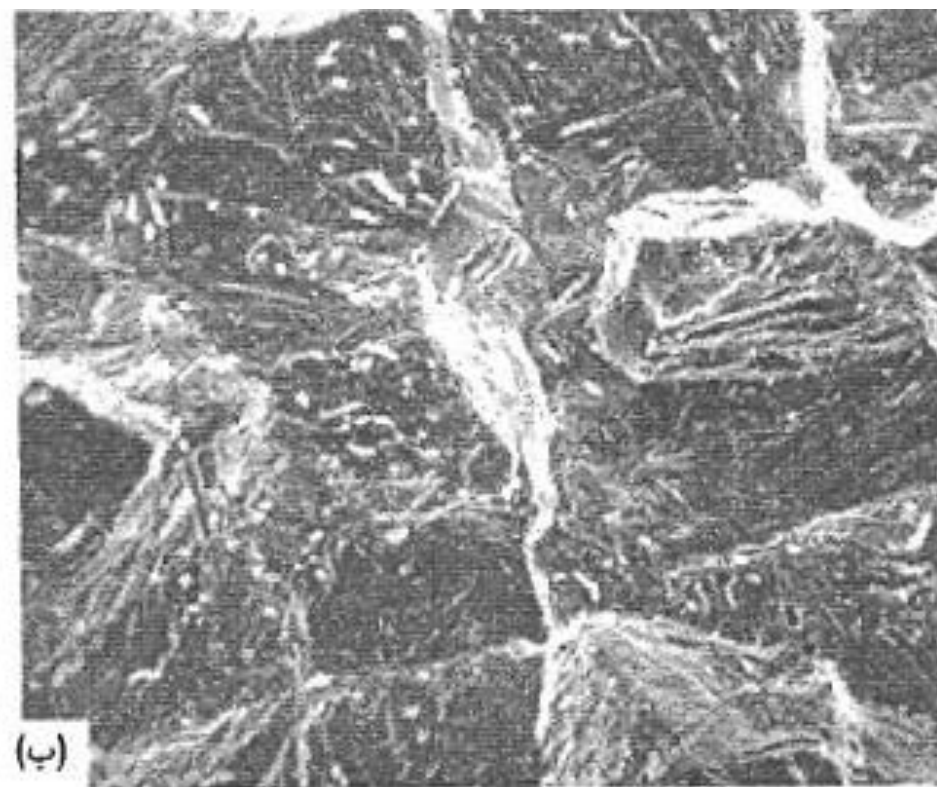
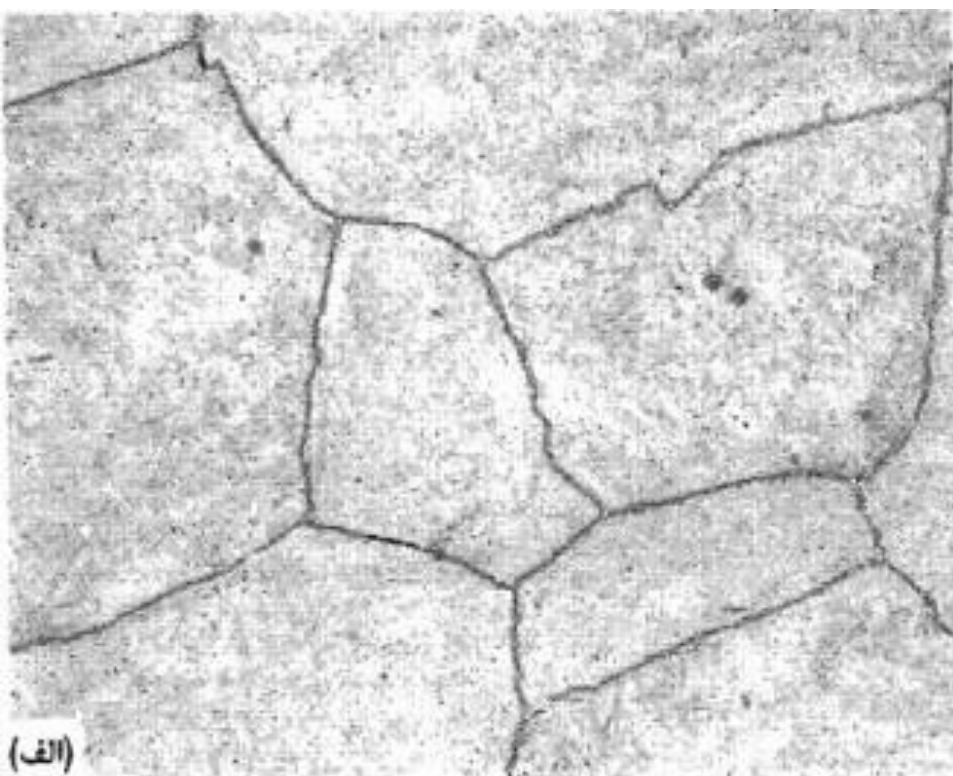
حدود ۵۰ درجه سانتیگراد بالای خط A_1 است.

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



دماهای بحرانی A_1 و A_3 تا حدودی تحت تأثیر عناصر آلیاژی در فولادها تغییر می‌کند. بنابراین، به طور کلی در عملیات آنیل کامل، فولادهای هیپروتکتوئید را در ناحیه تکفازی آستنیت و فولادهای هایپروتکتوئید را در ناحیه دوفازی آستنیت - سمنتیت حرارت می‌دهند.

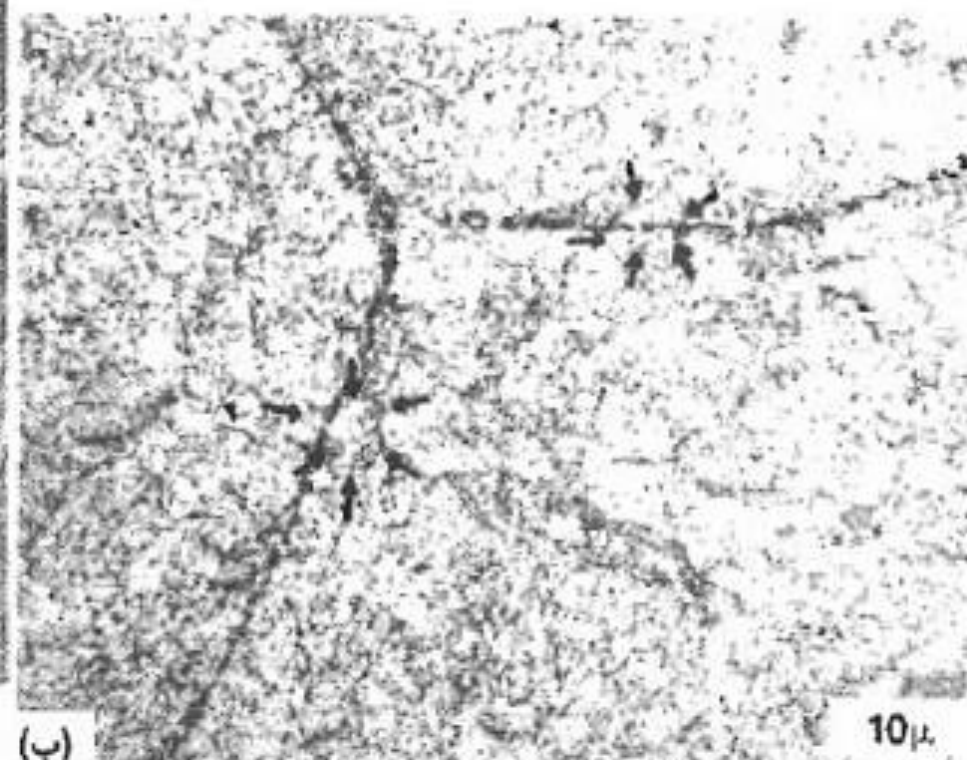
علت آستنیت‌کردن فولادهای هایپروتکتوئید در ناحیه دوفازی آستنیت - سمنتیت این است که سمنتیت پرویوتکتوئید در این فولاد به صورت کروی و مجتمع شده در آید. اگر چنین فولادی تا بالای خط A_{cm} حرارت داده شود، در ضمن آهسته سرد شدن سمنتیت پرویوتکتوئید به صورت شبکه پیوسته‌ای در مرز دانه‌های آستنیت رسوب می‌کند و در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



شکل ۲-۵ (الف) شبکه پیوسته کاربید در مرز دانه‌های استنیت اولیه در فولاد ۵۲۱۰۰ میکروساختار نوری، محلول حکاکی نایتال، بزرگنمایی $\times 600$ (ب) شکست در امتداد کاربیدهای تشکیل شده در مرز دانه‌های استنیت در فولاد ۵۲۱۰۰ میکروساختار الکترونی. بزرگنمایی $\times 415$ [۱].

بنابراین در عملیات آنیل کامل، هدف از آستنیته کردن

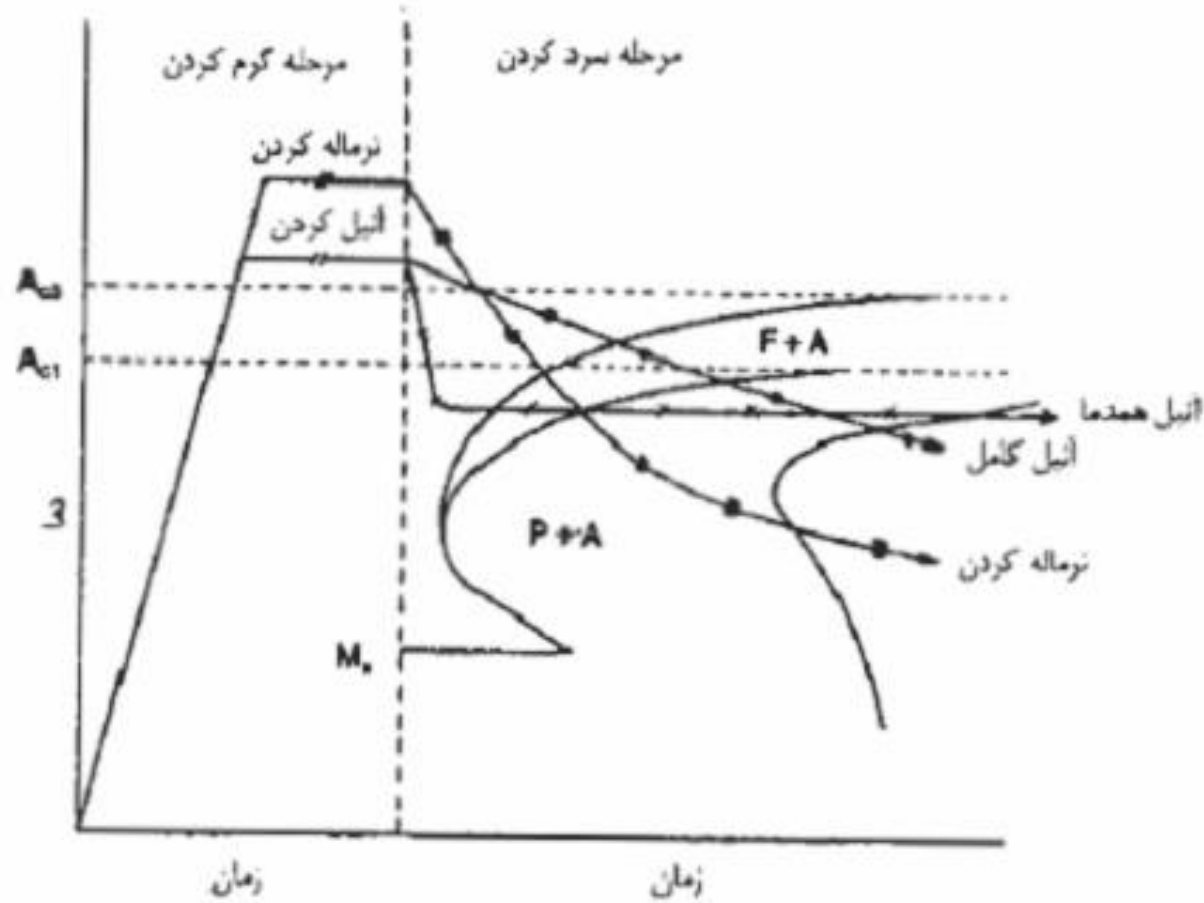
فولادهای هایپریوتکتوئید در ناحیه دوفازی آستنیت - سمنتیت، عبارت از شکستن شبکه پیوسته کاربید یاد شده و تبدیل آن به ذرات ریز و کروی شکل مجزا از یکدیگر است. نیروی



شکل ۳-۵ (الف) سمنتیت پرویوتکتوئید در فولاد ۵۲۱۰۰ نرماله شده. (ب) سمنتیت پرویوتکتوئید مربوط به تصویر الف پس از اینکه فولاد به منظور سخت شدن در ۸۵۰ درجه سانتیگراد آستنیته شده باشد. در این شکل ذرات بسیار ریز، همان سمنتیت مربوط به پرلیت اولیه بوده که کروی شده است. علامتهای پیکان، دانه‌های ریز آستنیتی را نشان می‌دهد که در ضمن آستنیته کردن در ۸۵۰ درجه سانتیگراد به وجود آمده‌اند [۱].

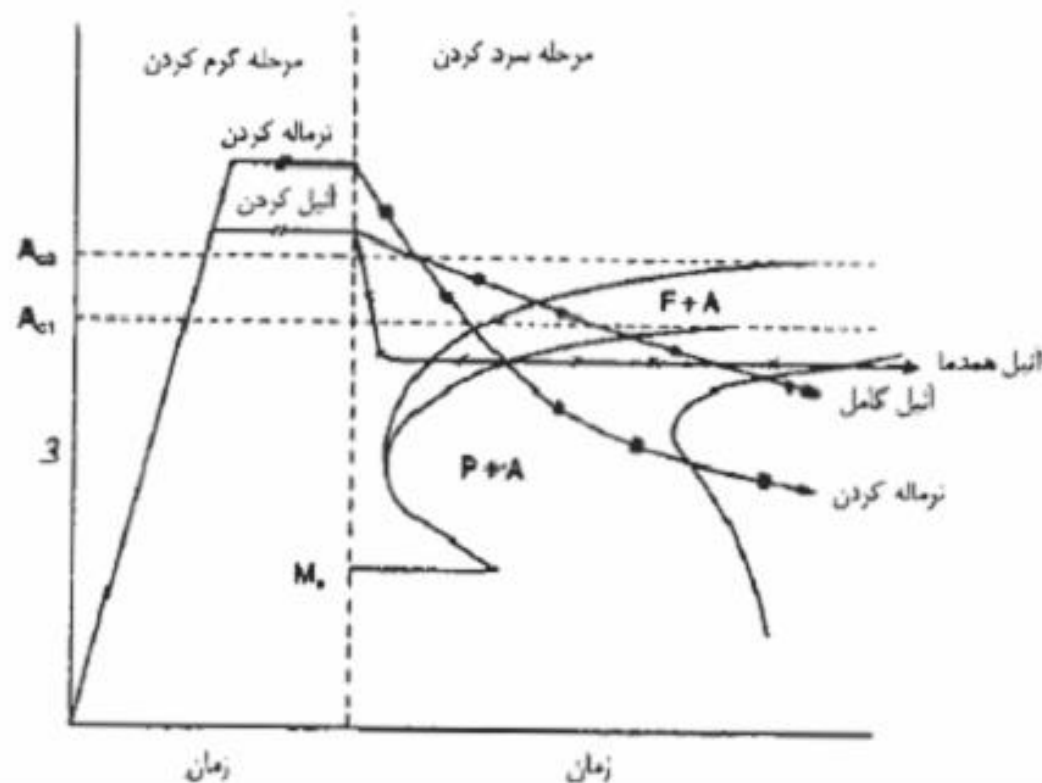
در عملیات آنیل کامل، نه تنها دمای آستنیته کردن بلکه آهنگ سرد شدن نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

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



آنیل همدم

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



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

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

از جمله موارد عمده کاربرد آنیل همدمما در رابطه با فولادهای آلیاژی است که دارای سختی پذیری^۱ بالایی اند (به فصل ششم مراجعه شود). در صورتی که پیر روی این فولادها عملیات حرارتی آنیل کامل انجام شود به علت سختی پذیری زیاد، ساختار نهایی حاصل به جای پرنیت خشن، ممکن است پرنیت ظریف و یا حتی مخلوطی از پرنیت ظریف و بینیت بالایی باشد.

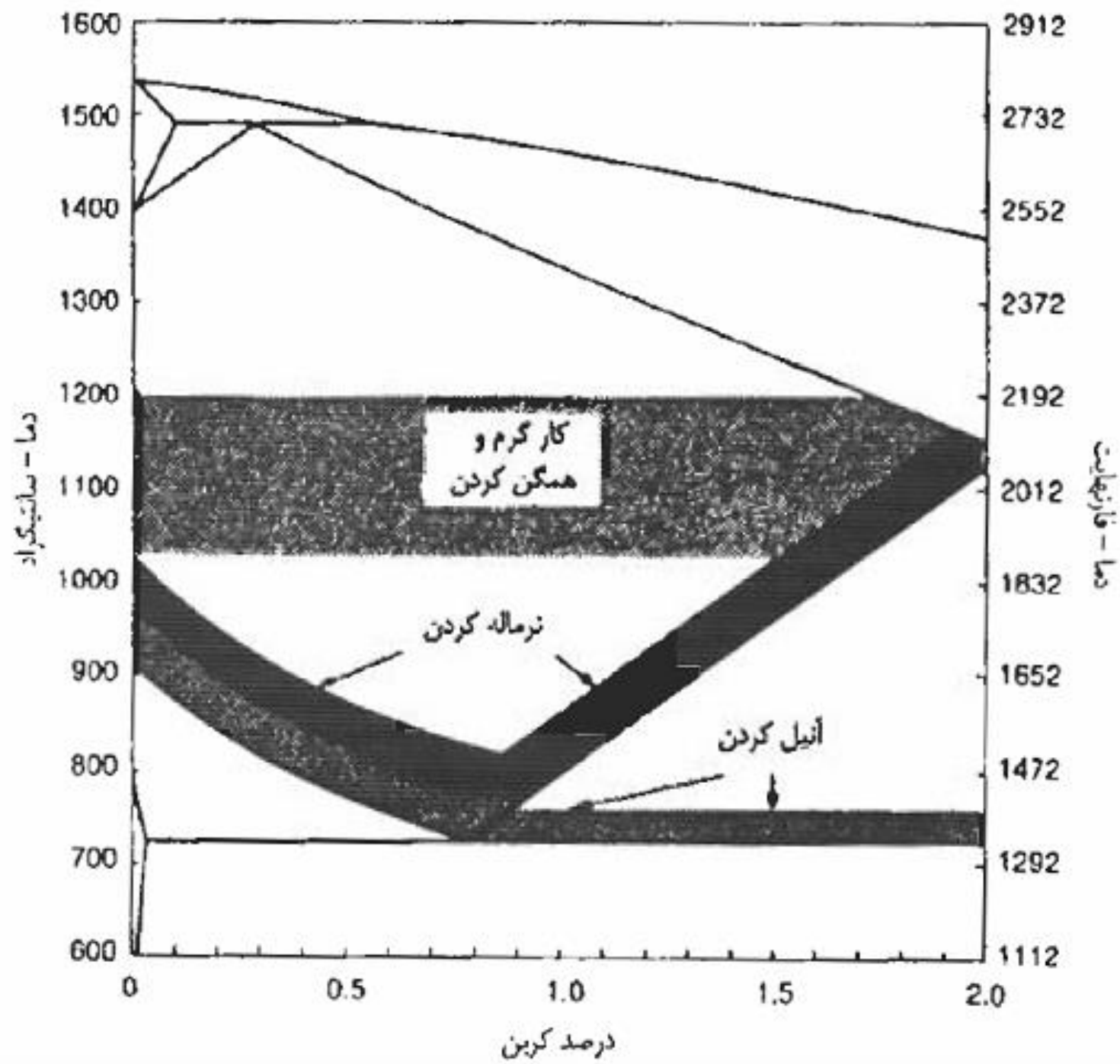
نرماله کردن^۳ Normalizing

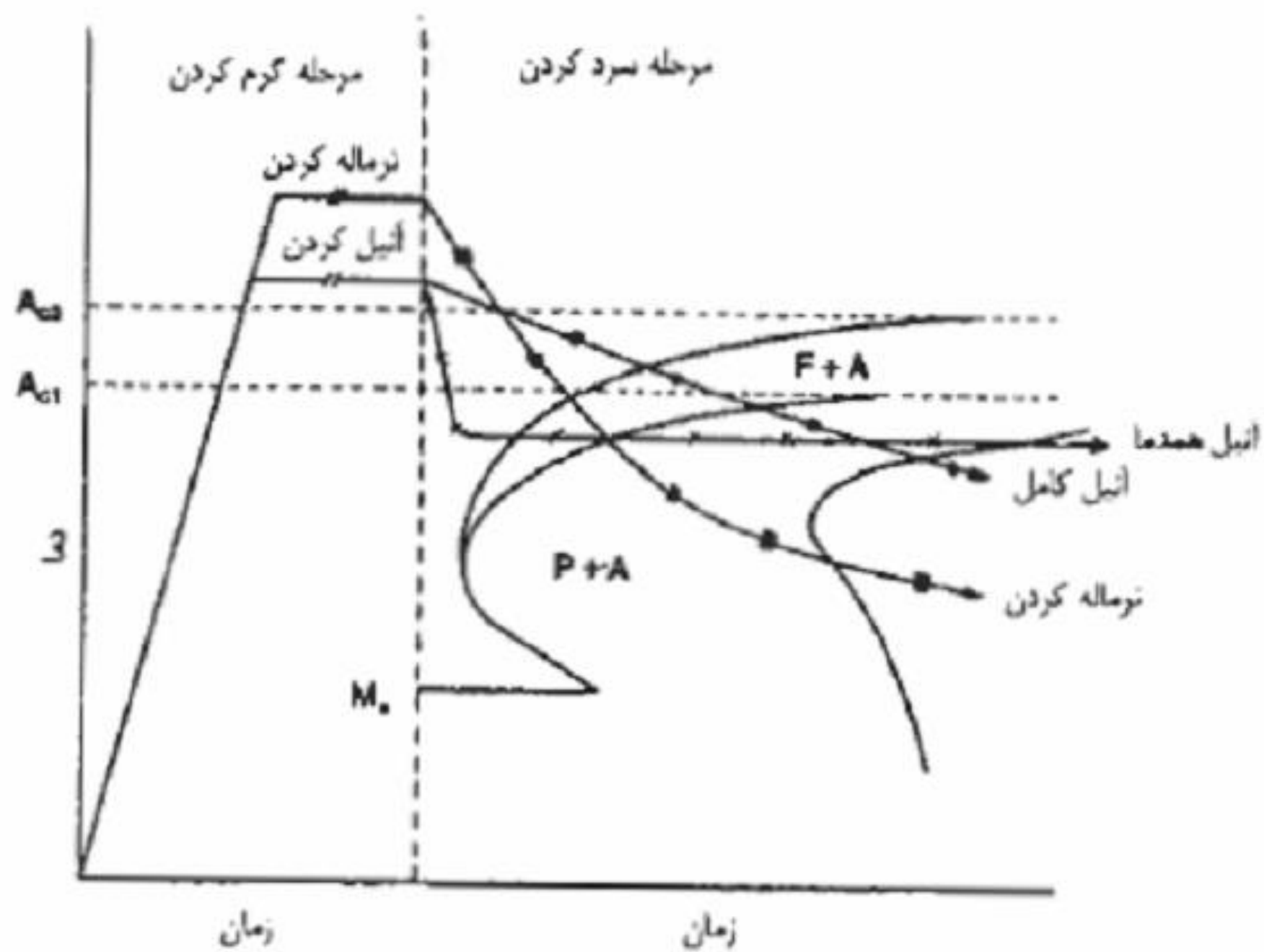
نرماله کردن یکی دیگر از انواع روشهای عملیات حرارتی است که میکروساختار حاصل همانند آنیل کردن شامل پرلایت، مخلوطی از پرلایت و فریت و یا مخلوطی از پرلایت و سمنتیت (بستگی به ترکیب شیمیایی فولاد) است.

در نرماله کردن، دمای استنیته کردن برای فولادهای هیپوئکتوئید کمی بالاتر از گستره دمایی مربوط به آنیل کردن است در حالی که برای فولادهای هایپروکتوئید از گستره دمایی حدود ۵۰ درجه سانتیگراد بالای A_{cm} استفاده می شود.

برخلاف آنیل کامل که فولاد در کوره

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





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

یکی دیگر از اهداف مهم نرماله کردن عبارت است از

ریز کردن دانه‌های درشتی که اغلب به هنگام کارگرم در دمای بالا و یا در ضمن ریخته‌گری و انجماد به وجود آمده‌اند.

در عملیات نرماله کردن فولادهای هیپویوتکتوئید، ابتدا آستنیتی با ساختار همگن و دانه‌های ریز به وجود می‌آید و سپس در اثر سرد شدن در هوا به فریت و پرلیت تبدیل می‌شود. از نظر خواص مکانیکی، میکروساختار حاصل از نرماله کردن می‌تواند در بعضی موارد به عنوان عملیات حرارتی نهایی منظور شود. در مواردی که هدف سخت کردن قطعاتی باشد که دارای دانه‌های درشت هستند، نرماله کردن به عنوان عملیات حرارتی اولیه جهت ریز کردن دانه‌ها استفاده

برای نرماله کردن فولادهای هایپریوتکتوئید از گستره دمایی بین خط A_{cm} و حدود ۵۰ درجه سانتیگراد بالای آن استفاده می شود (شکل ۵-۱). انتخاب این گستره دمایی به منظور ریز کردن دانه های آستنیت، انحلال کاربیدهای راسب شده و همچنین شکسته شدن شبکه پیوسته کاربیدی که احتمالاً در ضمن عملیات قبلی در مرز دانه ها به وجود آمده اند، است.

از آنجایی که در نرماله کردن قطعات در هوا سرد می شوند، میکروساختارهای به دست آمده اختلاف قابل توجهی با میکروساختارهای حاصل از آنیل دارند.

با توجه به اینکه در نرماله کردن

فریت و سمیتیت و فاصله بین لایه ای پرلایت هر دو کاهش می یابند. بنابراین، در مقایسه با خواص حاصل از فرایند آنیل، استحکام و سختی افزایش یافته و انعطاف پذیری تا حدودی کاهش می یابد.

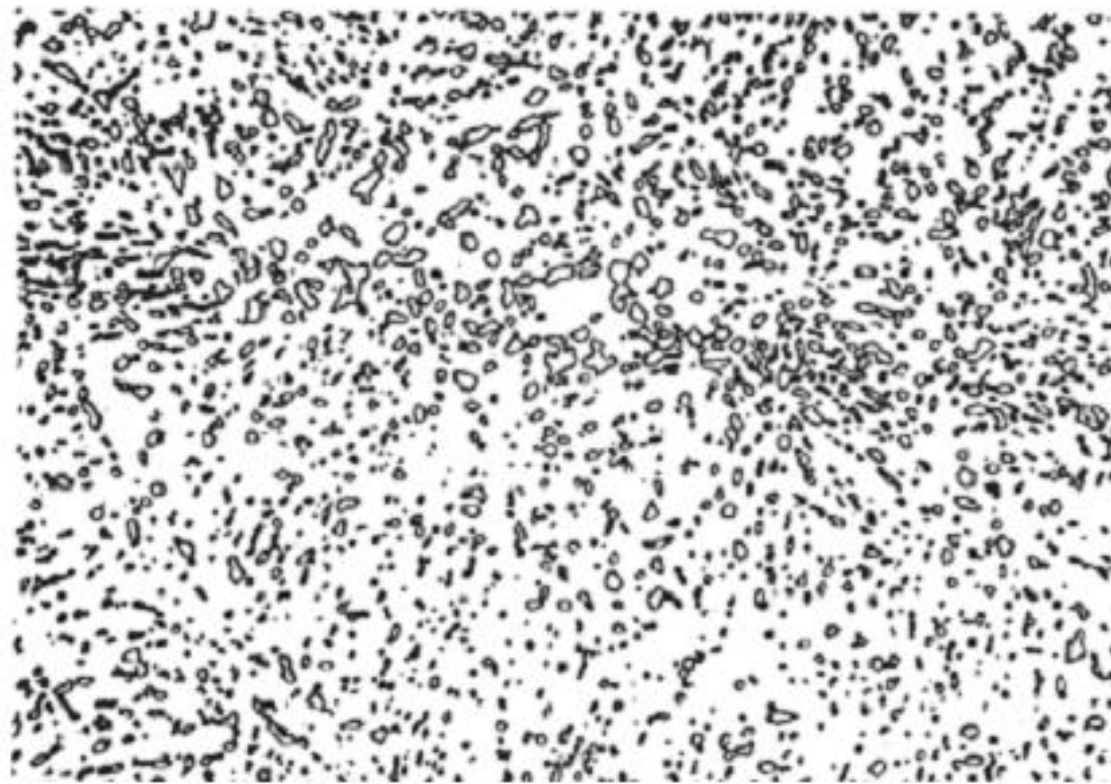
نکته‌ای که باید در رابطه با سرد شدن قطعات در هوا در ضمن نرماله کردن بدان توجه داشت این است که، نقاط مختلف در داخل یک قطعه با آهنگهای متفاوت سرد می‌شوند. همچنین آهنگهای سرد شدن یاد شده، با تغییر ابعاد قطعه تغییر می‌کنند.

از اثر ابعاد قطعه بر روی آهنگ سرد شدن، دو نتیجه مهم استنتاج

می‌شود؛ اول، در مقاطع خیلی بزرگ آهنگ سرد شدن سطح قطعه ممکن است به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از ناحیه داخلی باشد و در نتیجه باعث ایجاد تنش در آن شود. دوم اینکه در قطعات خیلی کوچک، به خصوص در مورد فولادهای آلیاژی، سرد شدن در هوا ممکن است منجر به تشکیل بینیت و یا حتی مارتنزیت به جای مخلوط فریت و پرلیت شود. با توجه به این نکته توصیه می‌شود که عملیات نرماله کردن بر روی فولادهای آلیاژی اعمال نشود.

کروی کردن^۵ Spheroidizing

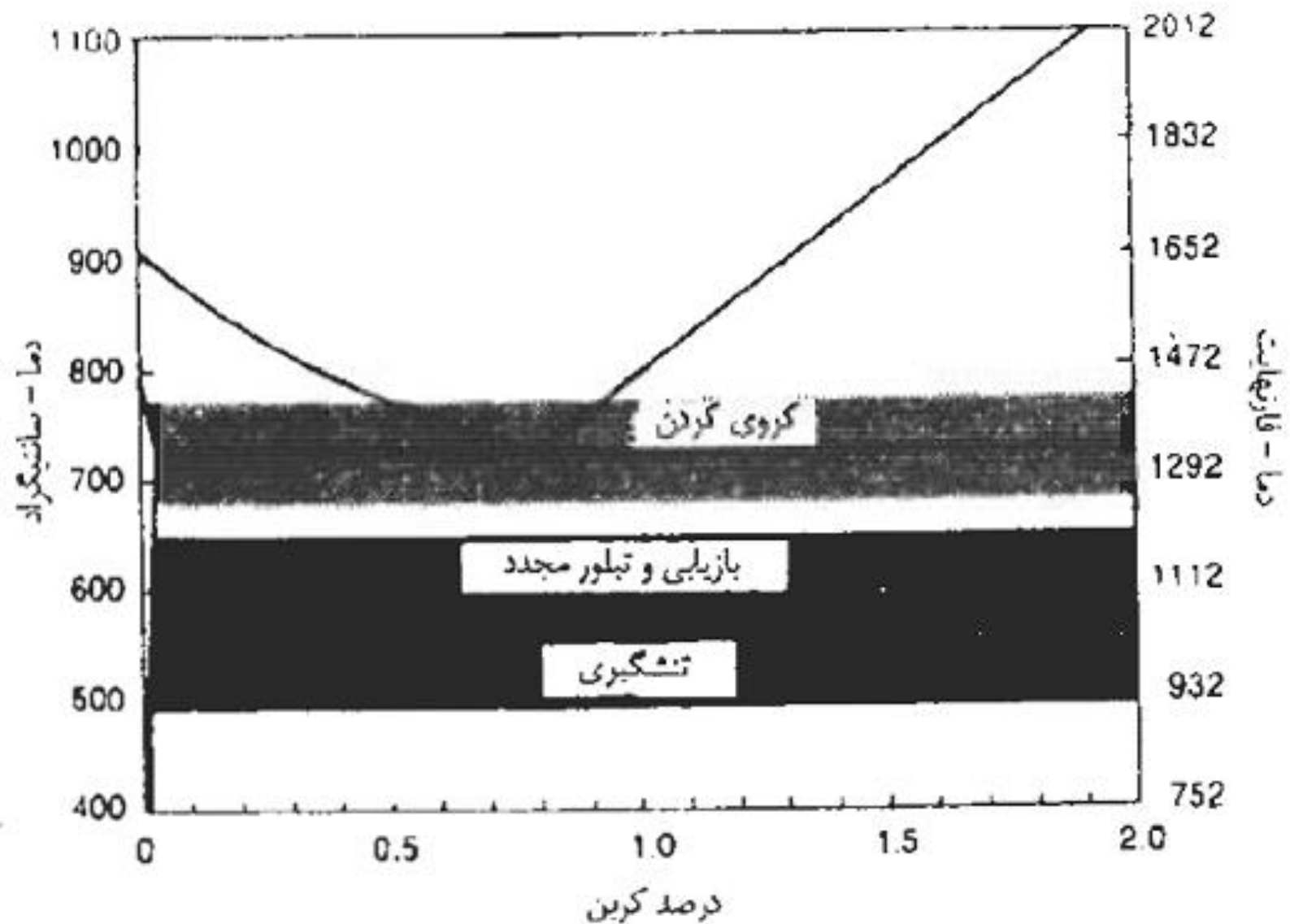
انعطاف پذیرترین و نرمترین شرایط در هر فولاد مربوط به میکروساختاری شامل سمیتیت کروی توزیع شده به طور یکنواخت در زمینه فیریتی می‌شود.



شکل ۵-۵ میکروساختار سمیتیت کروی در فولاد $0.6\%C-1\%Mn-Fe$ که با حرارت دادن مارتنزیت به مدت ۲۴ ساعت در $704^{\circ}C$ درجه سانتیگراد ($1300^{\circ}F$ درجه فارنهایت) به دست آمده است. محلول حکاکی، پیکرال، بزرگنمایی $1000\times$ [۱].

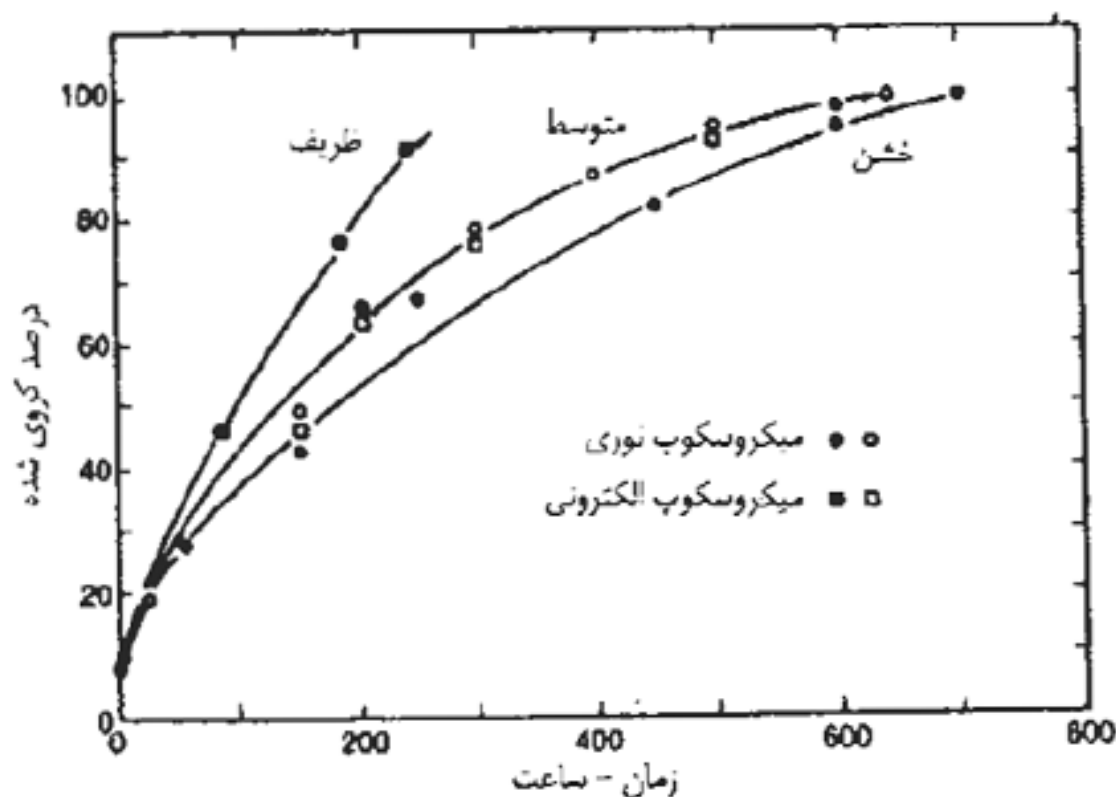
انعطاف پذیری بسیار خوب فولادهای کم کربن و کربن متوسط با سمنتیت کروی از این نظر اهمیت دارد که این فولادها اغلب توسط کار سرد شکل می گیرند. از طرف دیگر از آنجایی که ساخت قطعات از جنس فولادهای پرکربن اغلب نیاز به ماشین کاری زیاد دارند، سختی کم میکروساختار سمنتیت کروی این فولادها اهمیت قابل ملاحظه ای دارد.

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



شکل ۵-۶ بخشی از نمودار تعادلی آهن - کربن همراه با گستردهای دمایی مربوط به کروی کردن، بازیابی و تبلور مجدد و همچنین تنشگیری [۱].

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



شکل ۵-۷ پیشرفت عملیات کروی شدن سمنتیت مربوط به پرلیت ظریف، متوسط و خشن در فولاد $Fe-0.4\%C-0.7\%Si$ در $700^{\circ}C$ سانتیگراد (۱۲۹۲ درجه فارنهایت) [۱].

در حقیقت لایه‌های

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

اگر کاربری‌های اولیه به شکل ذرات ریز و مجزا از یکدیگر (بینیت) باشند، کرووی شدن بسیار سریع‌تر خواهد بود. اگر ساختار اولیه مارتنزیت باشد، کرووی شدن حتی سریع‌تر خواهد شد. در حقیقت در ساختارهای مارتنزیتی نیازی به شکسته شدن صفحات سمنتیتی و سپس کرووی شدن نیست، بلکه کرووی شدن بدین صورت است که کربن فوق اشباع در ضمن خروج از شبکه آهن و تشکیل سمنتیت به شکل کرووی رسوب می‌کند.

مهمترین روشهای عملیات حرارتی کروی کردن عبارت‌اند از:

۱- حرارت دادن فولاد تا درست زیر دمای Ac_1 ، نگه داشتن برای مدت زمان کافی جهت کروی شدن و سپس سرد کردن آن در هوا تا دمای اتاق.

۲- حرارت دادن فولاد تا ناحیه دوفازی بین Ac_3 - Ac_1 برای فولادهای هیپوئکتوئید و یا بین Acm - Ac_1 برای فولادهای هایپروئکتوئید به منظور آستنیت‌کردن جزئی، سرد کردن آهسته تا زیر دمای A_{r1} ، نگه داشتن برای مدت زمان کافی جهت کروی شدن و سپس سرد کردن در هوا تا دمای اتاق.

۳- حرارت دادن فولاد تا بالای دمای Ac_1 و آستنیت‌کردن جزئی، سرد کردن تا زیر دمای A_{r1} و نگه داشتن برای مدت زمانی در حدود ۳۰ دقیقه، گرم کردن مجدد تا بالای Ac_1 و تکرار عملیات تا اینکه میکروساختاری با سمنتیت کاملاً کروی شده به دست آید. پس از کروی شدن سمنتیت، قطعه را تا دمای اتاق در هوا سرد می‌کنند.

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

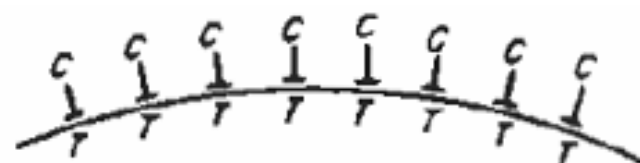
از آنجایی که در روشهای دوم و سوم فولاد به طور جزئی آستنیت می شود، تجزیه و شکسته شدن لایه های سمنتیت تسریع شده و بنابراین انتظار می رود که کرووی شدن فولادهای پرلیتی سریعتر از روش اول باشد. در روش سوم، فولاد متناوباً در حوالی دمای A_{e1} گرم و سرد می شود. در حقیقت هر بار که فولاد به ناحیه دوفازی می رسد، عمده‌تاً لایه های سمنتیت حل شده و با سرد شدن فولاد در زیر دمای A_{T1} به کره های سمنتیت افزوده می شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که کرووی شدن فولادهای پرلیتی توسط روش سوم سریعتر از روش دوم است.

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

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

بازیابی

در ضمن عملیات حرارتی بازیابی، تغییرات عمده‌ای که در ساختار بلوری فلز به وجود می‌آید، عبارت از کاهش و یا از بین رفتن معایب بلوری که از قدرت تحرک زیادی برخوردارند است. در این عملیات، معایب نقطه‌ای نظیر جاهای خالی و اتمهای اضافی یکدیگر را خنثی می‌کنند، نابه‌جاییهای پیچی^۴ چپ گرد و راست گرد و نابه‌جاییهای لبه‌ای^۵ مثبت و منفی به ترتیب در یکدیگر ادغام شده و حذف می‌شوند. در نتیجه انرژی داخلی کاهش می‌یابد.

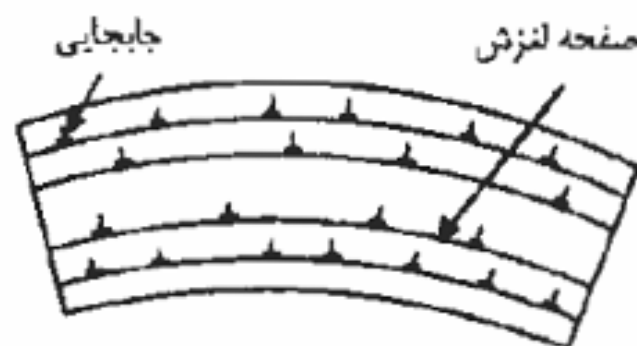


قبل از لغزش و صعود



بعد از لغزش و صعود

شکل ۵-۸ شمایی از لغزش و صعود نابه‌جاییها به منظور کاهش انرژی داخلی
(رسم مجدد با استفاده از مراجع ۹ و ۱۴).



(الف)



(ب)

شکل ۵-۹ شمایی از چندوجهی شدن: (الف) بلور تغییر شکل داده شده حاوی انبوهی از نابه‌جاییها بر روی صفحات لغزش، (ب) مرزهای فرعی در بلور بازیابی شده (رسم مجدد با استفاده از مراجع ۹ و ۱۳).

در عملیات بازیابی خواص فیزیکی تقریباً به طور کامل بازیابی شده و تا حدودی به خواص فیزیکی قطعه قبل از کار سرد برمی گردد. در حالی که، تغییرات خواص مکانیکی چندان محسوس نیست. در حقیقت، عملیات حرارتی تبلور مجدد است که باعث بازیابی خواص مکانیکی قطعه کار سرد شده می شود.

تغییراتی که در

ساختار بلوری در ضمن عملیات بازیابی به وجود می آید را نمی توان به کمک میکروسکوپ نوری مطالعه کرد و نیاز به میکروسکوپ الکترونی دارد.

تبلور مجدد

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

در حقیقت، تبلور مجدد ادامه عملیات حرارتی بازیابی است و

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



(الف)



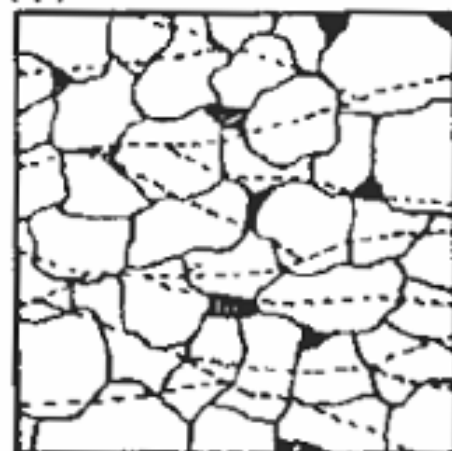
(ب)



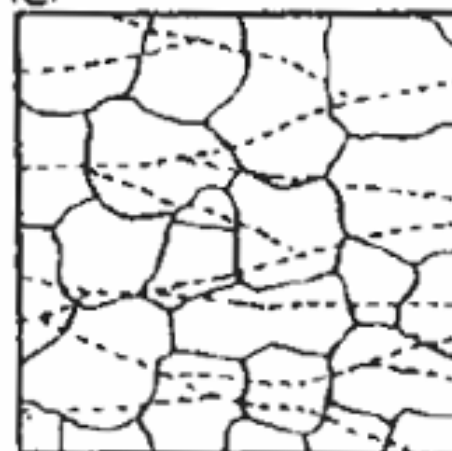
(ج)



(د)

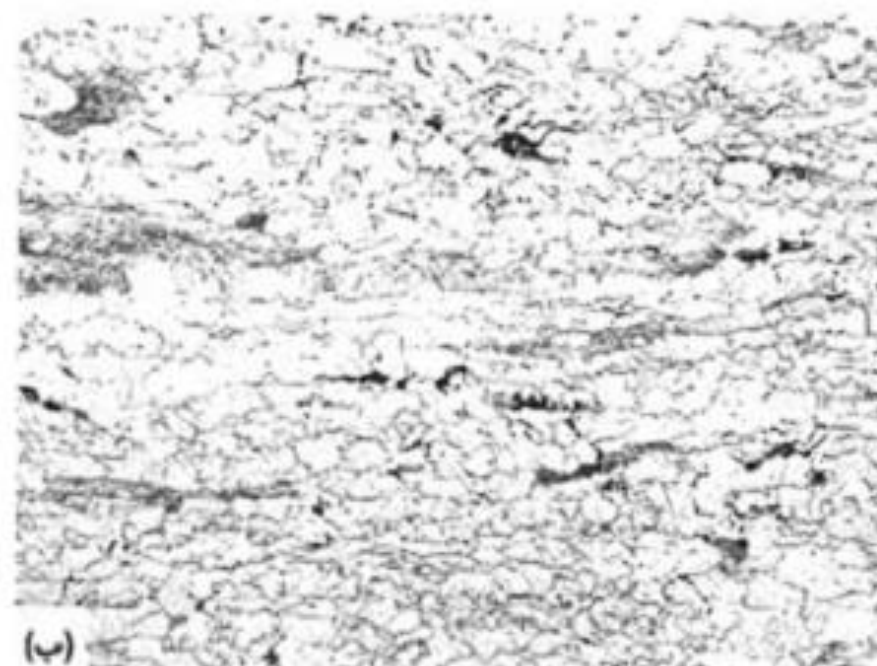


(هـ)

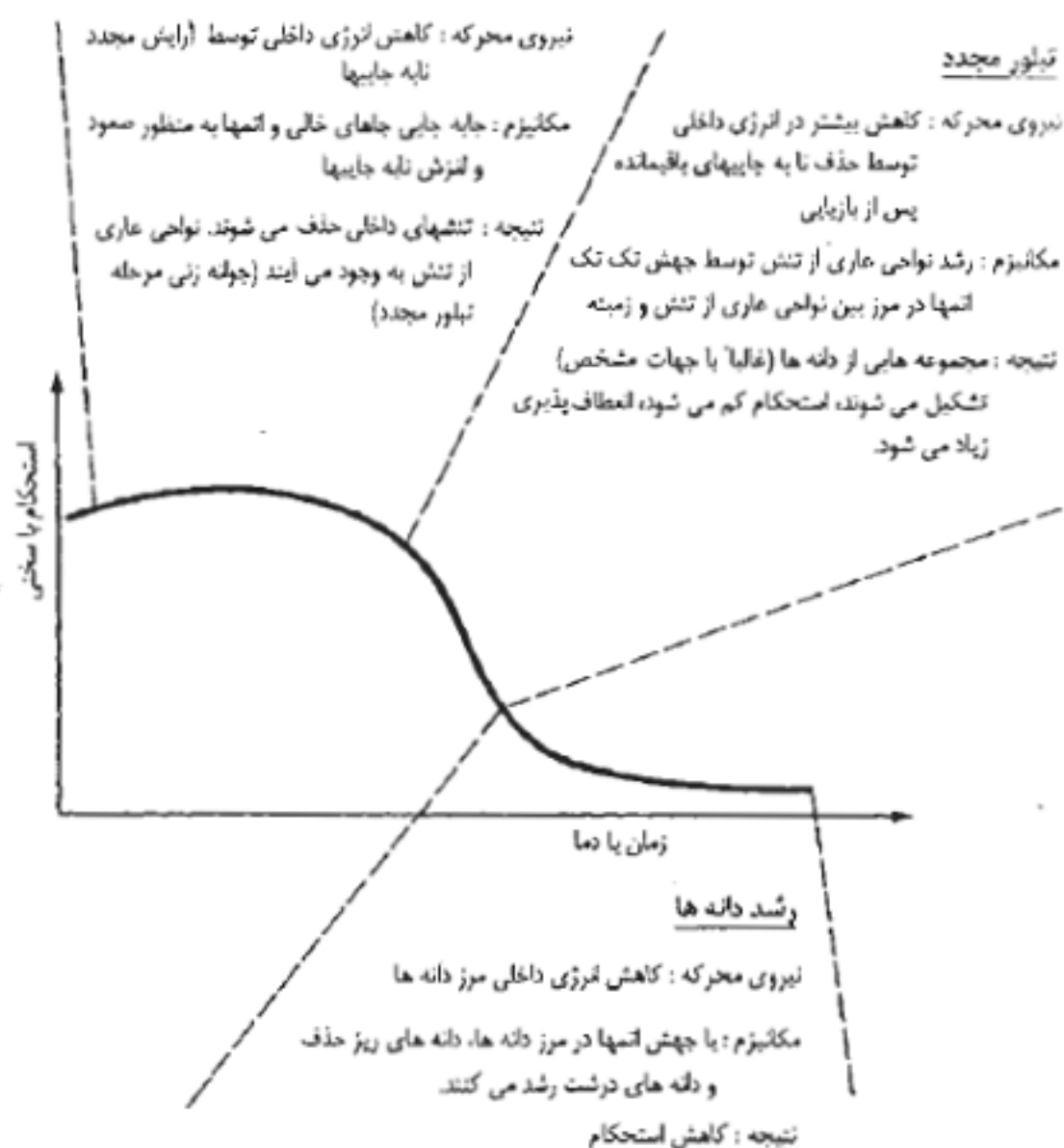


(و)

شکل ۵-۱۱ مراحل مختلف در تبلور مجدد یک فلز: (الف) میکروساختار فلز در شرایط کار سرد شده، (ب) با تشکیل جوانه‌هایی از دانه‌های هم‌محور و عاری از تنش، تبلور مجدد شروع می‌شود. (ج-ه) با رشد دانه‌های جدید، تبلور مجدد ادامه می‌یابد. (و) تبلور مجدد به طور کامل انجام شده است. خطوط منقطع در شکل (و) برای نشان دادن موقعیت مرز دانه‌ها در قطعه کار سرد شده است [۳].



شکل ۵-۱۲ (الف) میکروساختار آلیاژ $\text{Fe}-0.3\text{C}$ پس از اینکه به مقدار ۶۰ درصد کار سرد (نورد) بر روی آن انجام شده است. (ب) میکروساختار فولاد (الف) پس از اینکه به مدت ۲ ساعت در 538°C درجه سانتیگراد (1000°F درجه فارنهایت) انیل شده باشد. در شکل (ب) در حدود ۸۰ درصد ساختار تغییر شکل داده شده (شکل (الف)) به دانه‌های ریز و هم‌محور تبدیل شده است. میکروساختار نوری، محلول حکاکی نایتال، بزرگنمایی $\times 100$ [۱].



شکل ۵-۱۳ خلاصه ای از نیروی محرکه، مکانیزم و نتایج حاصل از بازیابی، تیلور مجدد و رشد دانه ها [۵].

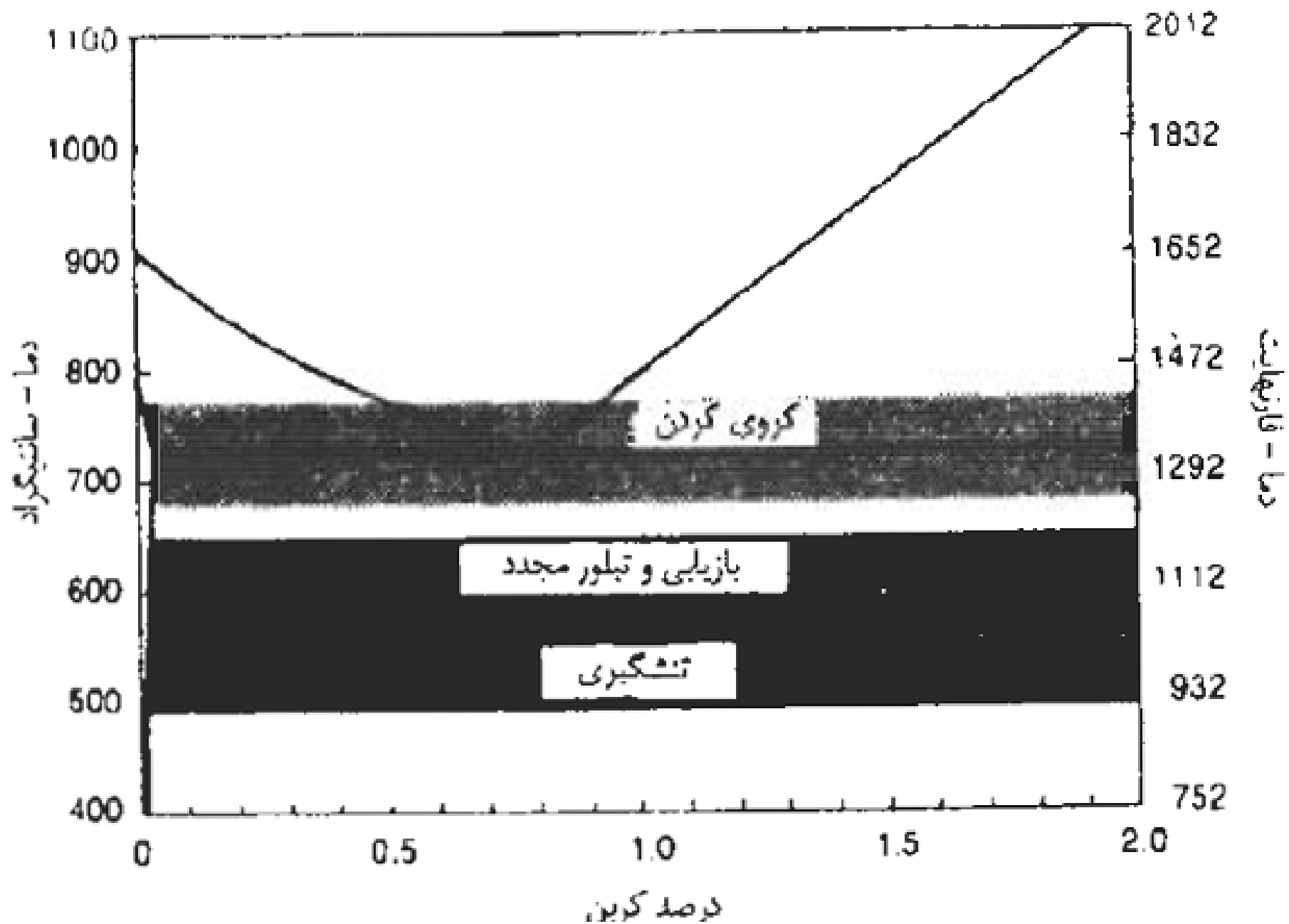
برخی از فرایندهای عملیات حرارتی و یا مکانیکی در قطعات ایجاد تنشهای داخلی می کنند که می تواند مخرب بوده و بر عملکرد این قطعات تأثیر نامطلوب گذارد. تنشهای داخلی حاصل، ممکن است منجر به تاب برداشتن، ترک خوردن و یا انهدام قطعات در تنشهایی به مراتب کمتر از سطح تنش طراحی شده برای آنها شود. از جمله منابع تنشهای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

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

۲- ماشینکاری و کار سرد

۳- جوشکاری

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



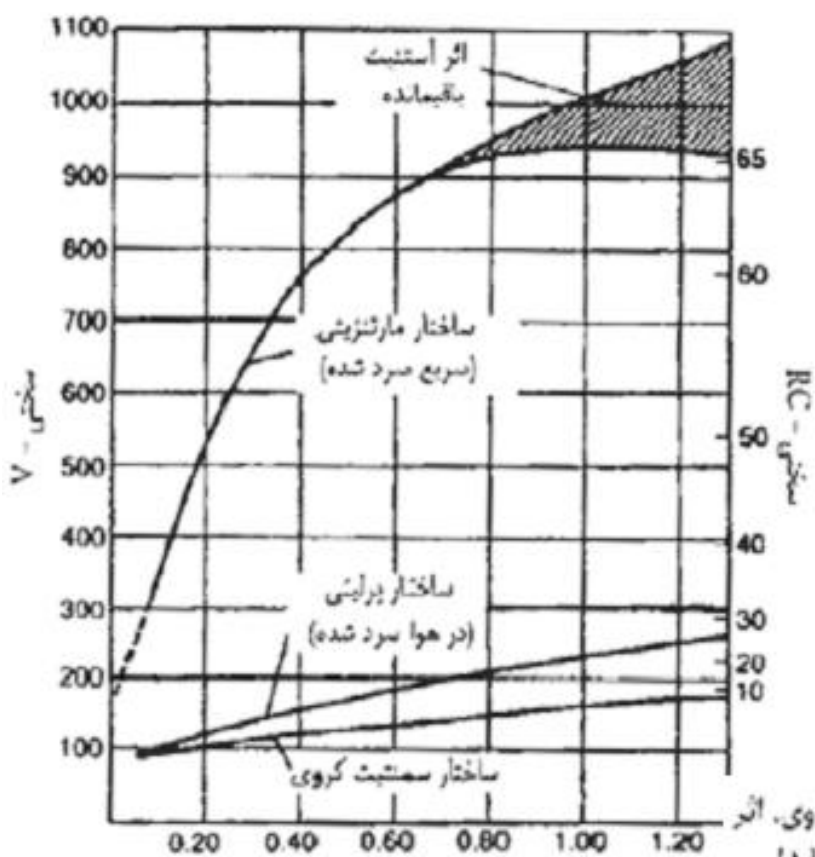
فصل ششم

سختی و سختی پذیری

سختی و درصد کربن

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

کروی - فریت است.



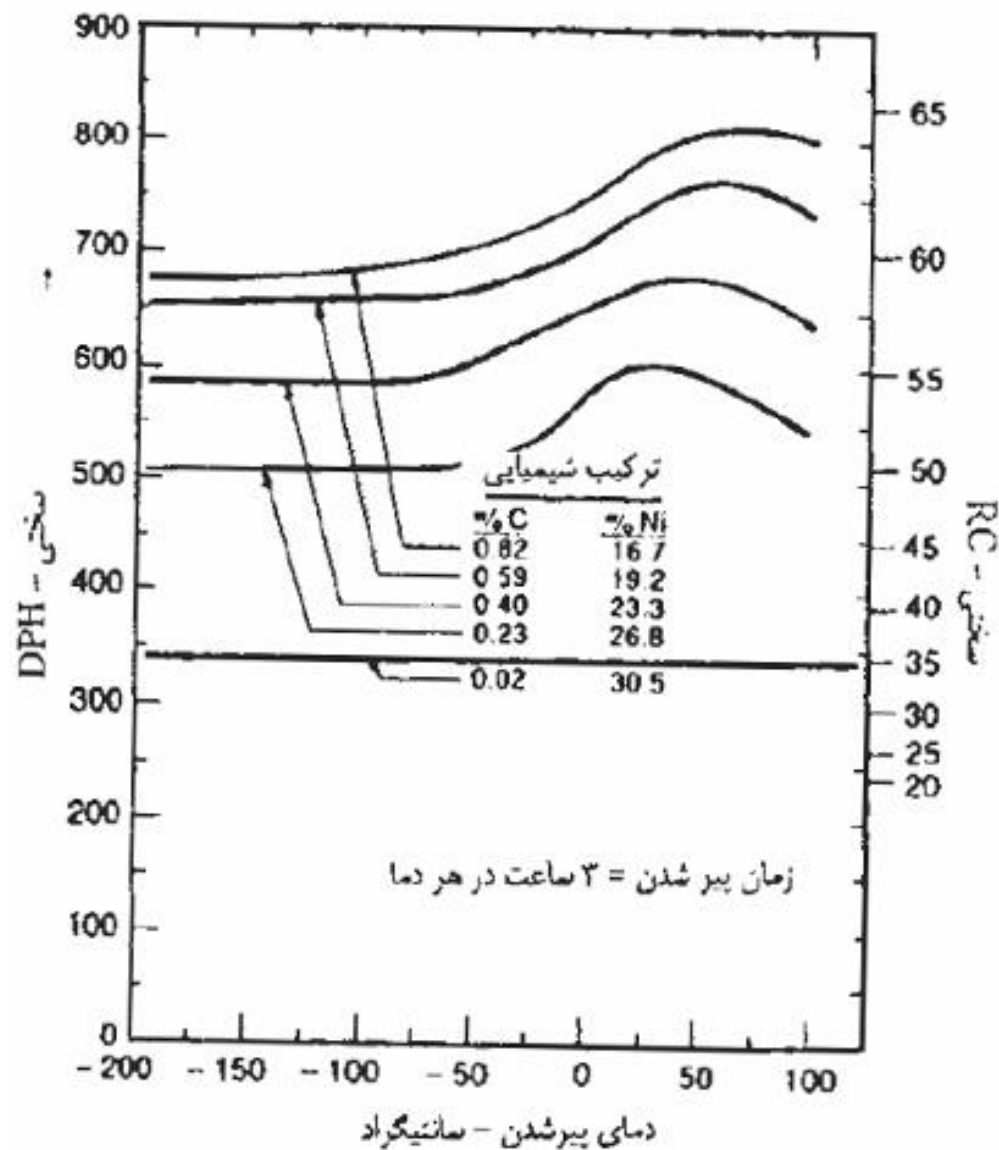
شکل ۶-۱ اثر کربن بر روی سختی فولاد با ساختارهای مارتنزیتی، پرلیتی و سمیتیت کروی. اثر استیت یا قیامنده بر روی سختی مارتنزیت توسط ناحیه هاسور زده مشخص شده است [۱].

به منظور بهبود خواص مکانیکی، تقریباً در تمامی موارد، فرایند سخت کردن (تشکیل مارتنزیت) همراه با بازپخت^۱ است

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

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

از جمله پارامترهای دیگر که بر روی سختی مارتنزیت اثر می‌گذارد پدیده پیرشدن^۱ یا گذشت زمان است. شکل ۳-۶ نشان می‌دهد که پیرشدن مارتنزیت در دمای اتاق باعث افزایش سختی فولادهای Fe-Ni-C می‌شود. نتایج تحقیقات مشابه بر روی فولادهای کربنی ساده نشان می‌دهد که تغییرات مشابهی در سختی مارتنزیت این نوع فولادها نیز مشاهده شده است. بنابراین اگر توجهی به فاصله زمانی بین سریع سرد شدن قطعه و اندازه‌گیری سختی نشود تغییرات پراکنده‌ای در نتایج حاصل دیده خواهد شد.



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

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

استحکام مارتنزیت

در فصل سوم، در رابطه با نظریه تشکیل مارتنزیت به این نکته اشاره شد که در اثر سریع سرد شدن فولاد از ناحیه آستنیت، اتمهای کربن در حفره‌های هشت وجهی شبکه fcc محبوس شده و از تبدیل آن به شبکه تعادلی bcc در دمای اتاق جلوگیری می‌کند. این موضوع باعث جابه‌جا شدن اتمهای آهن از محل‌های استقرار اولیه خود و به وجود آمدن شبکه بلوری bcc می‌شود.

در حقیقت یکی از عوامل عمده افزایش سختی و استحکام مارتنزیت همین

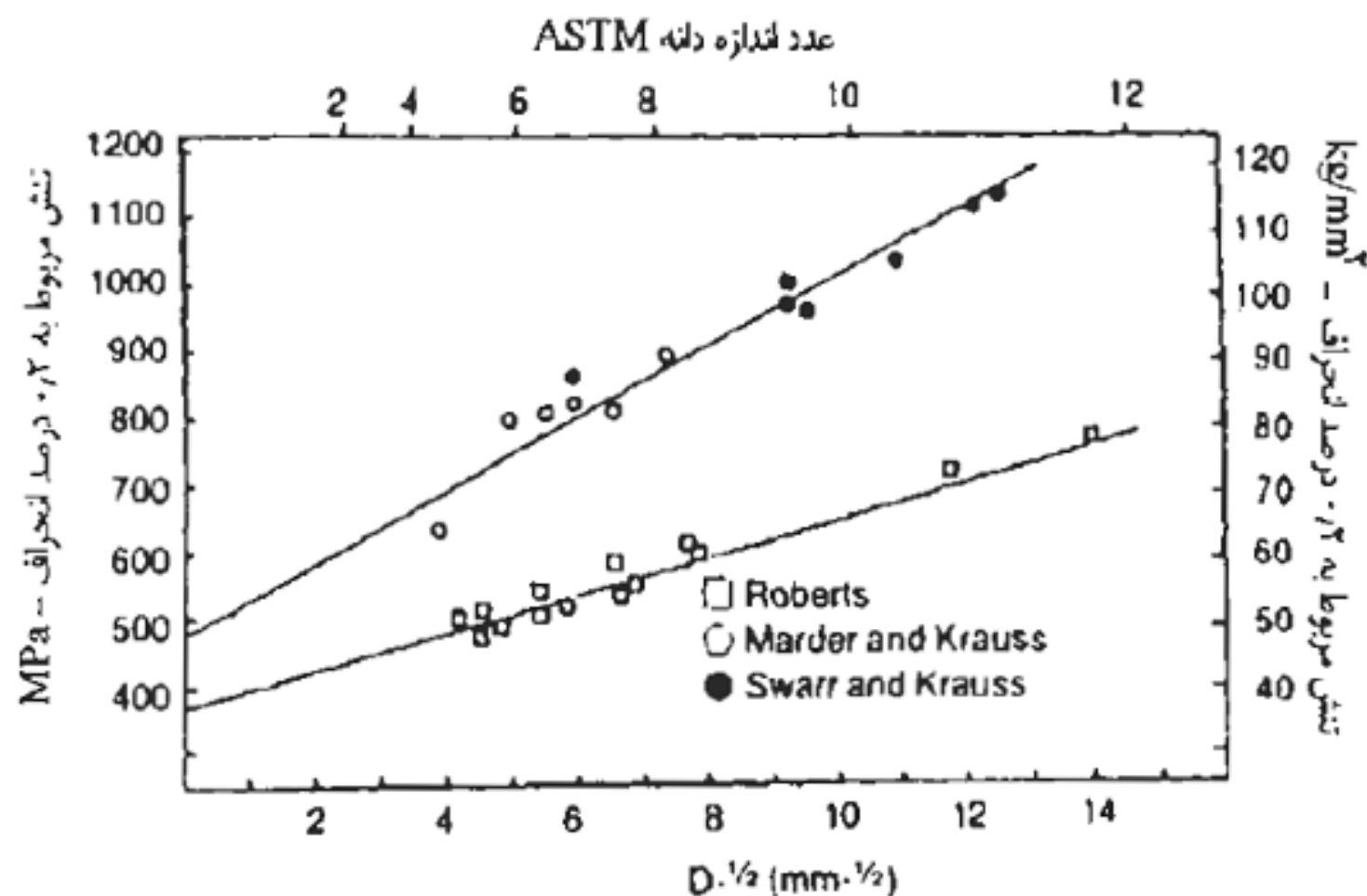
اختلالات شبکه بلوری است که در نتیجه آن حرکت ناب‌جاییها بسیار مشکل می‌شود.

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

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

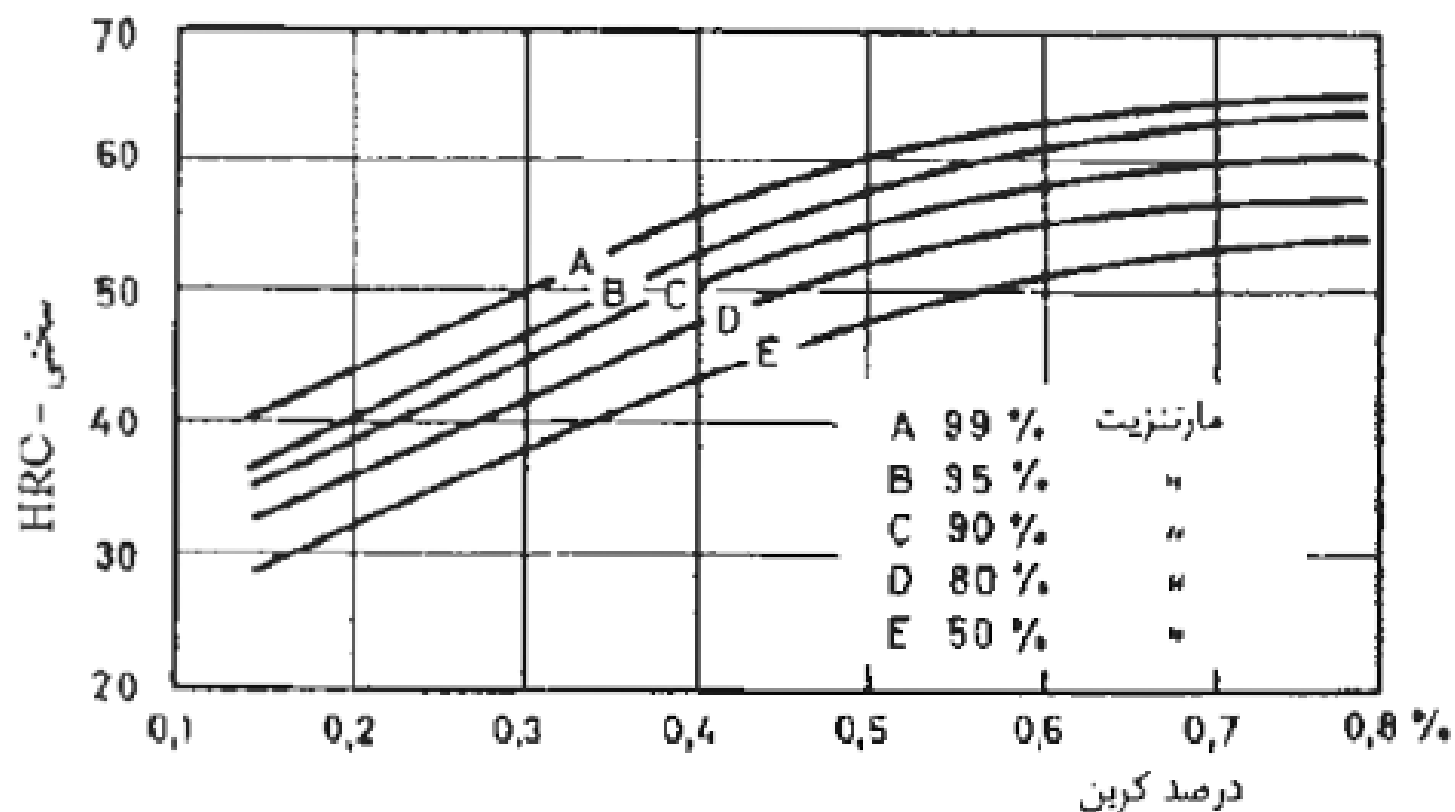
از آنجایی که دمای M_s مربوط به فولادهای کربنی ساده مخصوصاً فولادهای کم کربن نسبتاً بالاست (شکل ۳-۶)، در ضمن سریع سرد شدن و قبل از رسیدن به دمای اتاق درصدی از کربن که به صورت محلول در فضاها و هشت وجهی محبوس شده است نفوذ کرده و بر روی نابه جاییها، فصل مشترک بین لایه های مارتنزیتی و فصل مشترک بین بسته های مارتنزیتی رسوب می کند. این فرایند به بازپخت خود به خود^۲ موسوم است و به نظر می رسد که اثر کربن

محلول بر روی استحکام کششی را باید کاهش دهد.



شکل ۵-۶ اثر اندازه بسته‌های مارتنزیت (D) بر روی افزایش استحکام مارتنزیت لایه‌ای. منحنی بالایی مربوط به فولاد $\text{Fe}-0.2\%\text{C}$ و منحنی پایینی مربوط به مارتنزیت Fe-Mn است [۱].

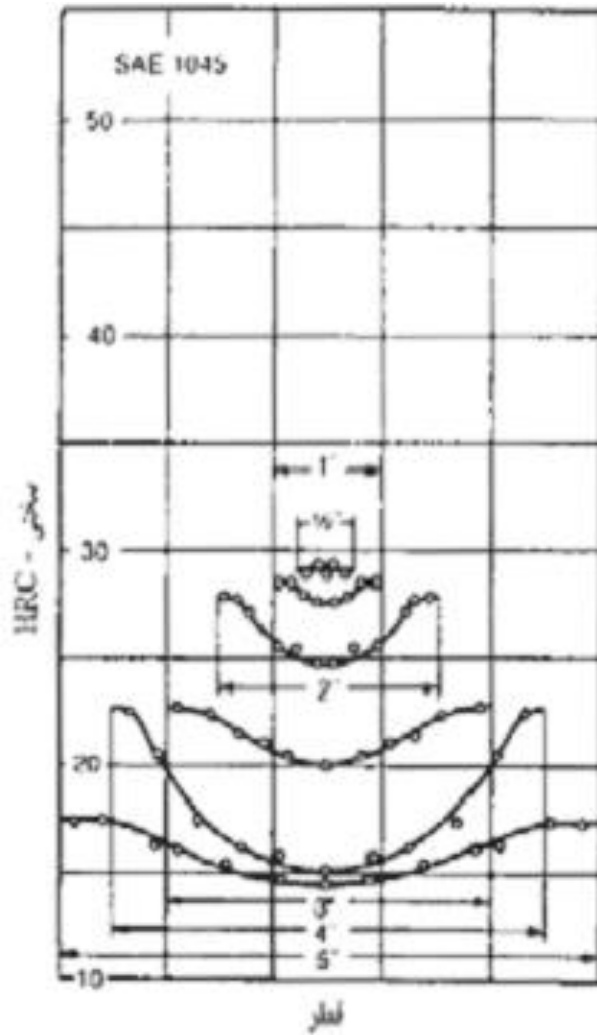
در صورتی که آهنگ سرد شدن یک فولاد از ناحیه آستنیت بیشتر از آهنگ سرد شدن بحرانی^۱ (حداقل آهنگ سرد شدنی که از تشکیل پرلیت و بینیت جلوگیری شود) باشد، سختی حاصل عمدتاً بستگی به درصد کربن فولاد دارد. اگر آهنگ سرد شدن کمتر از آهنگ سرد شدن بحرانی باشد، درصد مارتنزیت حاصل کاهش یافته و بنابراین سختی فولاد نیز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



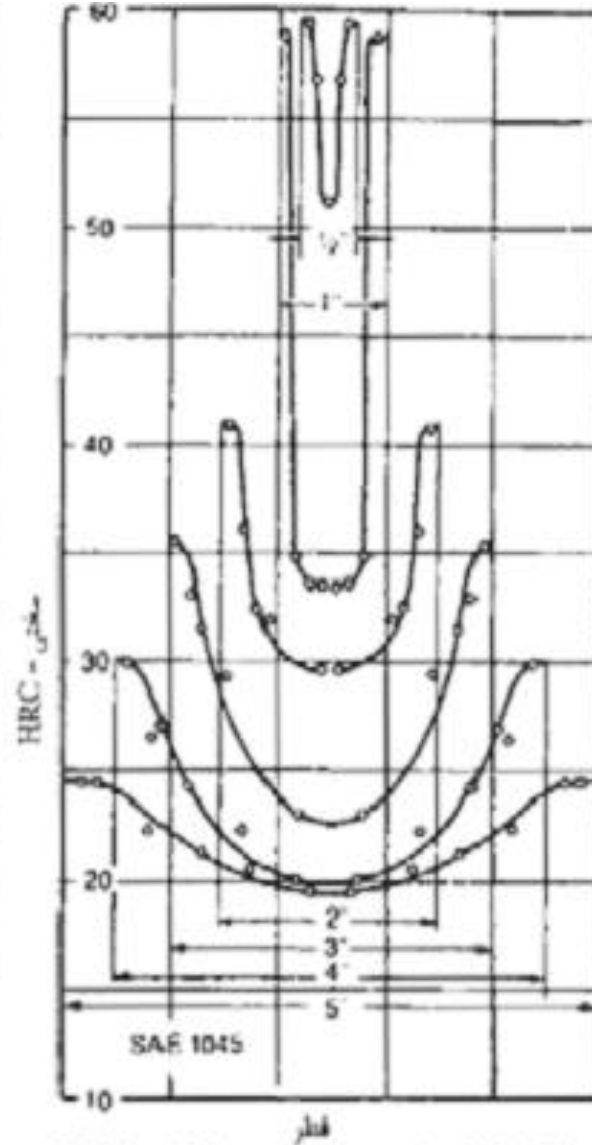
شکل ۶-۶ ارتباط بین سختی، درصد کربن و درصد مارتنزیت [۶].

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

توزیع سختی در یک قطعه



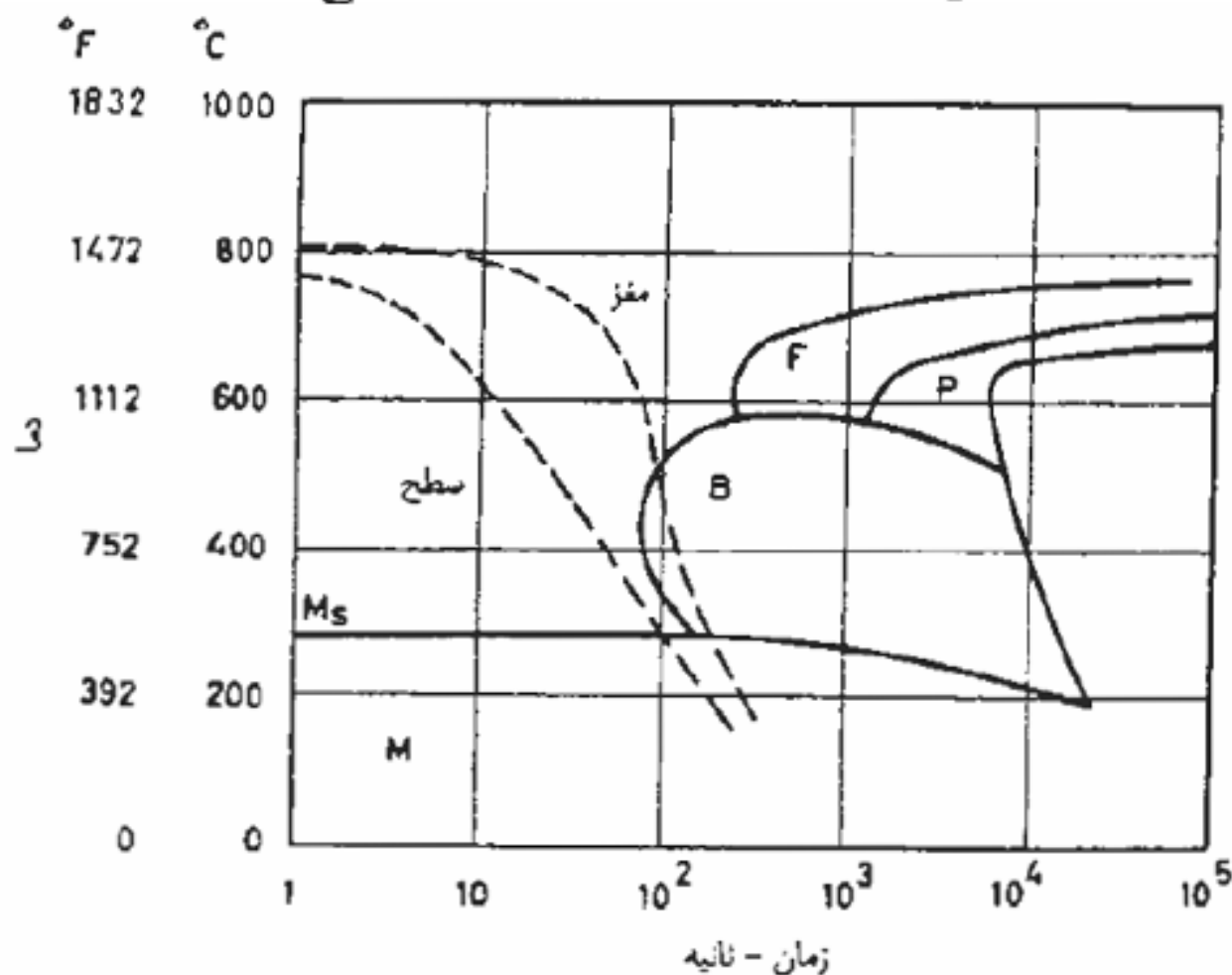
شکل ۶-۸ توزیع سختی در میله‌هایی با قطرهای متفاوت و از جنس فولاد SAE ۱۰۴۵ که در روغن سریع سرد شده باشند [۱].



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

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

سختی از سطح به طرف مرکز کاهش می یابد. دلیل اینکه چرا سطح یک فولاد سریع سرد شده سخت تر از مرکز آن است را می توان به کمک نمودار CCT توضیح داد.



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

از مطالعه شکل‌های ۶-۷ و ۶-۸ همچنین مشخص است که با افزایش قطر یا ضخامت، سختی تمام نقاط از جمله سطح و مرکز نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در حقیقت با افزایش ابعاد قطعه، آهنگ سرد شدن کاهش می‌یابد و در نتیجه در مرکز آن پرلیت و فریت تشکیل شده که منجر به کاهش بیشتر سختی مرکز می‌شود.

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

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

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

پارامترهای مؤثر بر روی سختی پذیری

۱- اندازه دانه های آستینیت

۲- درصد کربن

۳- عناصر آلیاژی

۴- آخال - ناخالصیهای نافلزی^۱

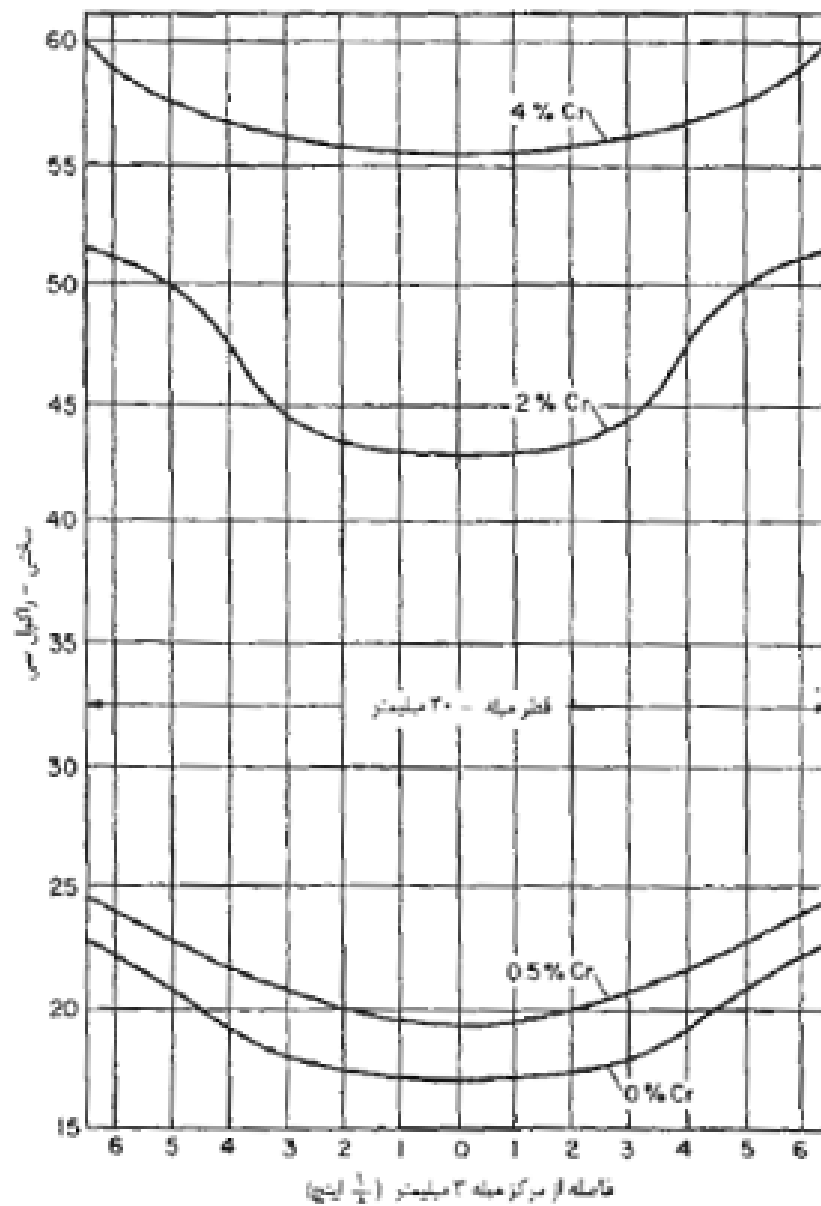
۵- ممکن بودن میکروساختار

۱- اندازه دانه‌های آستنیت

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

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

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



شکل ۶-۱۲ توزیع سختی در داخل میل‌های فولادی به قطر ۴۰ میلیمتر (۱۵ اینچ). فولادها ۰/۳۵ درصد کربن داشته و درصد کرم بر روی متحنه‌های سختی نشان داده شده است. میل‌ها در روغن سریع سرد شده و عاری از کاوید کرم حل نشده بوده‌اند [۱۶].

۴- آخال - ناخالصیهای نافلزی^۱

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

در حالی که کاربید آهن به راحتی در فاز آستنیت حل می‌شود، بعضی از کاربیدهای آلیاژی نظیر کاربیدهایی که توسط کرم، مولیبدن و عناصر مشابه دیگر تشکیل می‌شوند نرخ انحلال کمتری دارند.

در

مواردی که فولاد قبل از انحلال کامل کاربیدها و توزیع یکنواخت آنها در آستنیت سریع سرد شود، نواحی مختلف آستنیت از نظر ترکیب شیمیایی همگن نخواهد بود. تحت چنین شرایطی سختی پذیری نقاطی که از نظر درصد کربن و عنصر آلیاژی فقیرند کم خواهد بود. از سوی دیگر نواحی پرکربن که از نظر درصد عنصر آلیاژی نیز غنی هستند از سختی پذیری خوبی برخوردار خواهند بود. بنابراین، به طور کلی ناهمگن بودن آستنیت از نظر ترکیب شیمیایی باعث کاهش سختی پذیری فولاد می‌شود. این عیب را می‌توان با افزایش دما و یا زمان آستنیت‌کودن و در نتیجه انحلال بیشتر و یکنواخت‌تر کاربیدها در آستنیت برطرف کرد.

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

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

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

تأثیر یک محیط سردکننده را توسط پارامتر انتقال حرارت معادل^۲ که مشخص کننده شدت یا قدرت سردکنندگی محیط است و توسط حرف "H" نشان داده می شود معین می کنند. مقدار H را می توان از معادله زیر به دست آورد:

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

که در این معادله F پارامتر انتقال حرارت^۳ با واحد Btu/in.sec.°F و K هدایت حرارتی^۴ فولاد با واحد Btu/in.sec.°F است. در عمل برای مشخص کردن شدت سردکنندگی محیطهای مختلف و همچنین مقایسه و بررسی اثرات آنها، شدت سردکنندگی آب را تحت شرایط مشخص و ثابتی برابر یک فرض کرده و شدت سردکنندگی محیطهای دیگر را نسبت به آن می سنجند.

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

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

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

کمیت سختی پذیری

کمیت سختی پذیری (Quantitative Hardenability) در واقع بیان کننده میزان سختی پذیری بر حسب عوامل موثر بر سختی پذیری (مانند ترکیب شیمیایی فولاد و محیط سرد کننده) است.

سختی پذیری توسط ضخامت پوسته سخت شده مشخص می شود و ضخامت پوسته سخت شده عبارت از فاصله سطح نمونه تا محلی در داخل آن است که مقدار مارتنزیت تا حدود ۵۰ درصد کاهش یافته باشد.

معمولا ۵۰ درصد بقیه ساختار را بینیت در نظر می گیرند، گرچه بر حسب ترکیب شیمیایی قطعه، ۵۰ درصد دوم ممکن است کاملا بینیت نبوده و حتی پرلیت و فریت باشد.

مکانیزم مطالعه سختی پذیری بر اساس دو پارامتر، یکی قطر یا اندازه بحرانی و دیگری قطر یا اندازه ایده آل استوار است.

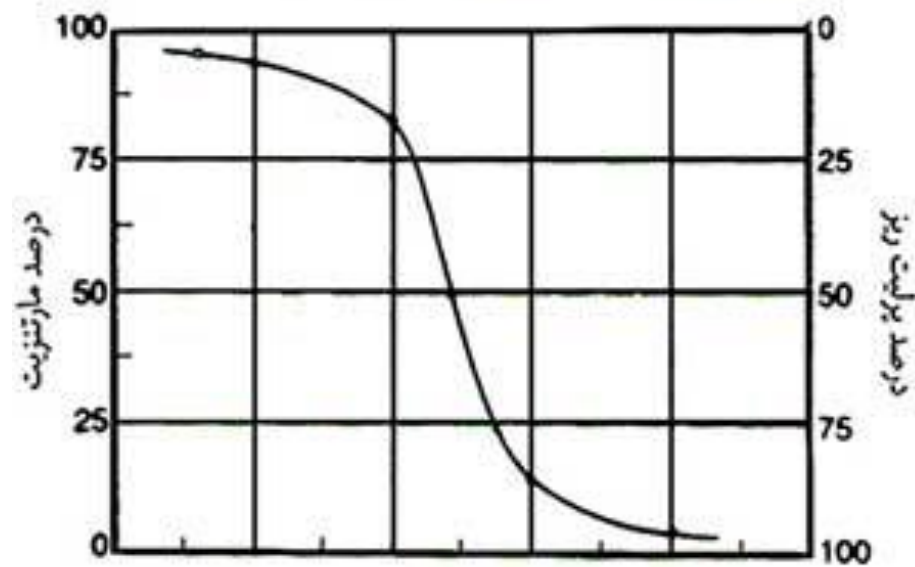
قطر بحرانی بزرگترین قطر میله ای است که هرگاه در محیط مورد نظر سرد شود، مرکز آن سخت شود.

قطر ایده آل بزرگترین قطر میله ای است که در صورت سرد شدن در یک محیط ایده آل مرکز آن سخت شود.

جنبه بسیار مهم تعاریف فوق، عبارت از عدد سختی است که مشخص کننده مرکز سخت شده از مرکز سخت نشده است. عدد سختی انتخاب شده در این رابطه، سختی ریز ساختاری است که حداقل دارای ۵۰ درصد مارتنزیت باشد.

در عملیات حرارتی، تمامی اطلاعات ترسیمی و محاسبات سختی پذیری بر اساس قرارداد های بالاست. دلایل انتخاب ۵۰ درصد مارتنزیت به عنوان معیار برای مشخص کردن ضخامت پوسته سخت شده و همچنین قطر بحرانی و ایده آل در شکل روبرو نشان داده شده است و عبارت اند از:

۱- اختلاف بین ریز ساختار سطح سخت شده یک میله و مرکز سخت نشده آن پس از پولیش و اچ به بهترین وجه و با بیشترین وضوح در حوالی ناحیه ۵۰ درصد مارتنزیت - ۵۰ درصد پرلیت مشخص است.



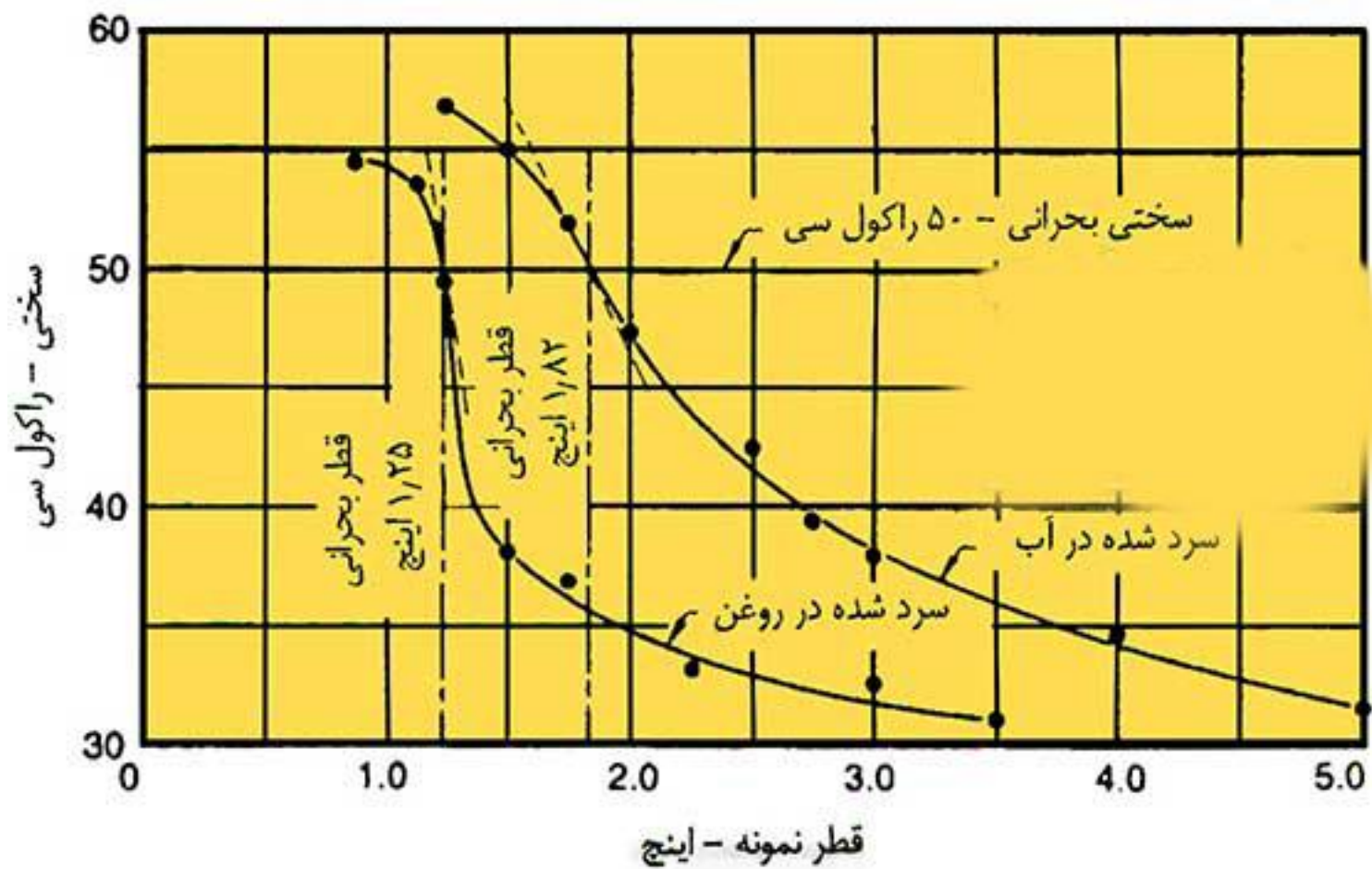
انتقال از ساختار مارتنزیتی در ناحیه سخت شده به ساختار پرلیتی در ناحیه سخت نشده مربوط به یک فولاد سریع سرد شده

۲- بررسی سطح مقطع شکست یک قطعه سریع سرد شده نشان می دهد که ناحیه ۵۰ درصد مارتنزیت فصل مشترک کاملاً مشخص و معینی را بین سطح شکست بین دانه ای که صاف و هموار است و سطح شکست میان دانه ای که ناهموار و خشن است به وجود می آورد. سطح شکست اول مربوط می شود به ریزساختاری با بیشتر از ۵۰ درصد مارتنزیت، در حالی که ناحیه دوم مربوط به شکست نرم محصولات غیر مارتنزیتی حاصل از دگرگونی آستنیت می شود. لازم به اشاره است که در رابطه با شکست بین دانه ای مارتنزیت در حالت اول اعتقاد بر این است که این نوع شکست مربوط به آستنیت شدن و تجمع ناخالصی هایی نظیر فسفر در مرز دانه های آستنیت و در نتیجه ترد و شکننده شدن آن می شود. بررسی سطح مقطع شکست و ریز ساختار اچ شده حتی در مقیاس ماکروسکوپی هم اغلب می تواند به منظور ارزیابی عمق سخت شده (در حد ۵۰ درصد مارتنزیت) به کار رود.

۳- کاهش سختی از سطح به مرکز در ناحیه ۵۰ درصد مارتنزیت بسیار شدید است.

شکل زیر تغییرات سختی مرکز بر حسب قطر میله هایی از جنس فولاد کرم- نیکل ۳۱۴۰ SAE که در آب و روغن سریع سرد شده باشند را نشان می دهد.

برای هر دو محیط مشاهده می شود که در حوالی سختی HRC 50 افزایش قطر میله، سختی مرکز به شدت افت می کند. این پدیده مشخص کننده ۵۰ درصد مارتنزیت در ساختار و در نتیجه اندازه قطر بحرانی است.



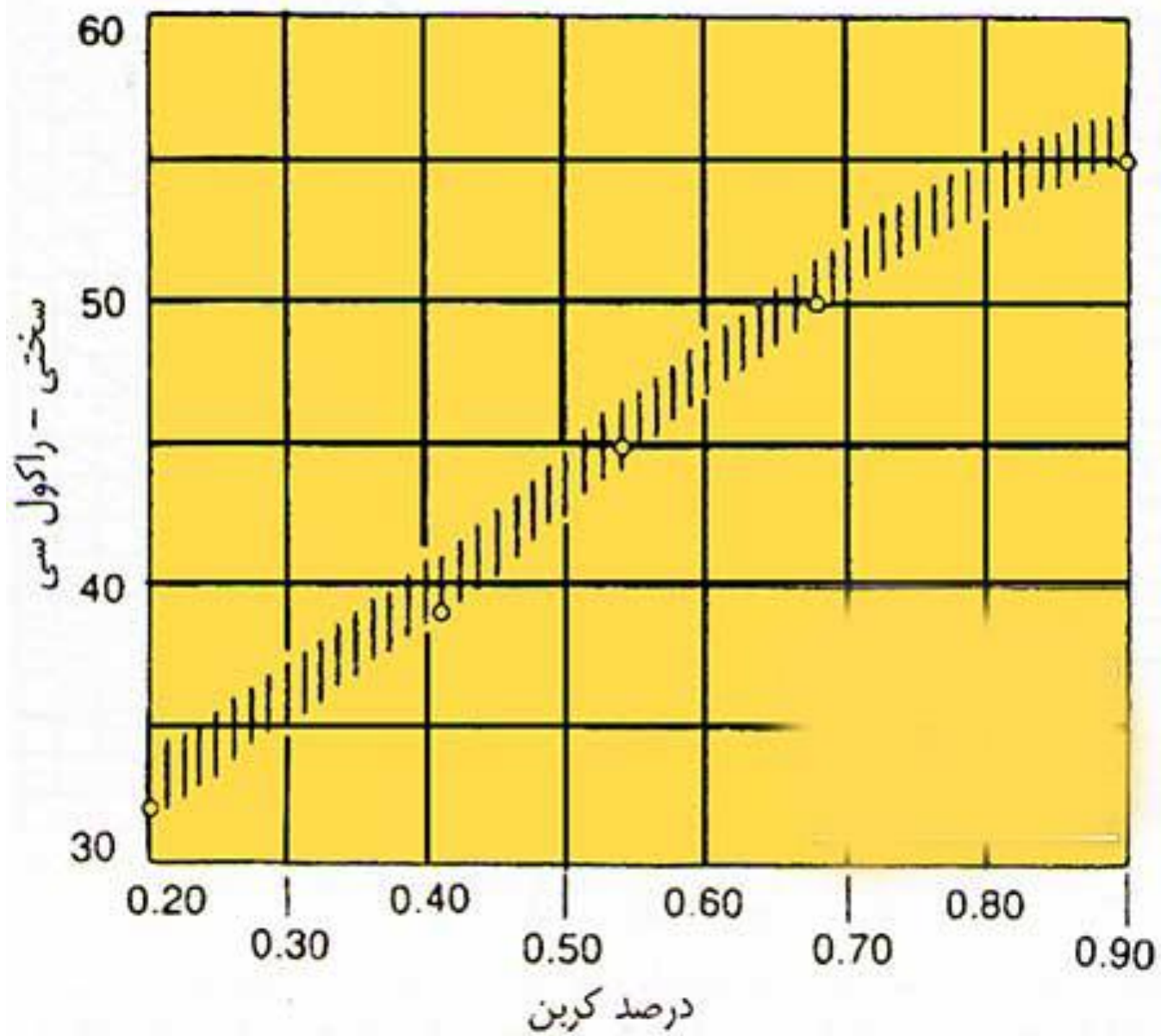
از آنجایی که تشخیص ۵۰ درصد مارتنزیت از منحنی تغییرات سختی برحسب قطر میله اساسا کار مشکلی است، همواره از منحنی تغییرات سختی ۵۰ درصد مارتنزیت برحسب درصد کربن کمک گرفته می شود. شکل زیر منحنی مزبور را برای فولادهای کربنی ساده نشان می دهد.

انتظار می رود که سختی ۵۰ درصد مارتنزیت برای فولاد های آلیاژی کمی بیشتر از فولاد های کربنی ساده باشد.

در این رابطه شکل زیر نشان می دهد که سختی ۵۰ درصد مارتنزیت برای فولاد کربنی ساده با ۰.۴ درصد کربن در حدود HRC 40 است.

در حالی که از شکل فوق چنین بر می آید که، قطر بحرانی در حوالی سختی HRC 50 است.

یک توجیه احتمالی برای این تفاوت عبارت است از: در فولاد آلیاژی ۳۱۴۰ در کنار ۵۰ درصد مارتنزیت مقدار زیادی بینیت که دارای سختی نسبتا بالایی است وجود دارد، در حالی که در فولاد کربنی ساده در جوار ۵۰ درصد مارتنزیت عمدتا پرلیت و فریت با سختی نسبتا پایین تشکیل می شوند.



در رابطه با سختی پذیری نتیجه می شود که؛ قطر یا اندازه بحرانی یک فولاد با ترکیب شیمیایی داده شده، مستقیماً مربوط به محیط سریع سرد کننده مشخص می شود و با تغییر محیط، قطر یا اندازه بحرانی نیز تغییر می کند.

بدین صورت که هر چه شدت سردکنندگی محیط بیشتر باشد قطر بحرانی نیز بیشتر خواهد بود.

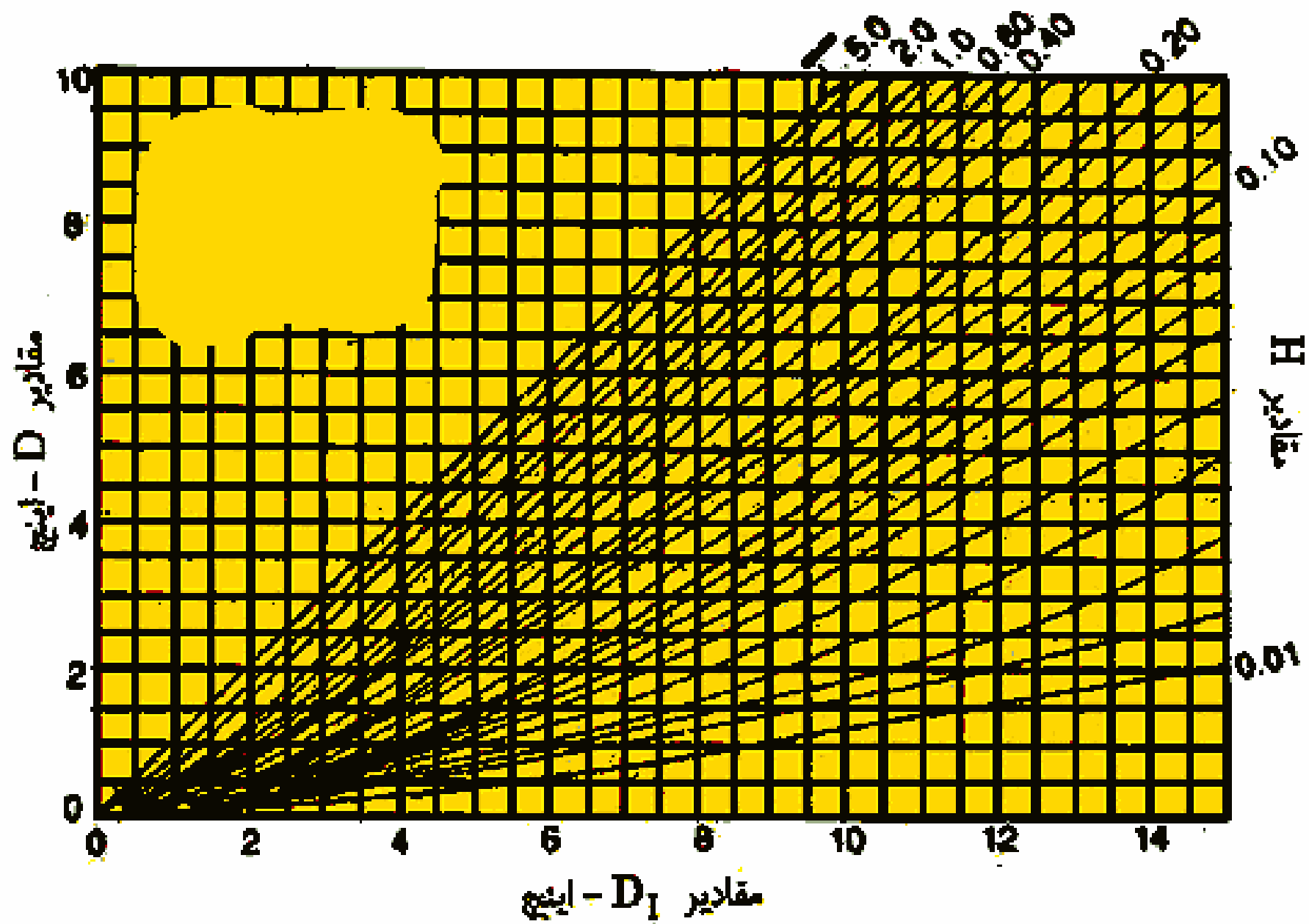
از طرف دیگر، از آنجایی که قطر یا اندازه ایده آل در رابطه با یک محیط ایده آل یعنی محیطی که شدت سرد کنندگی آن بی نهایت باشد تعریف می شود، مقدار آن تابع محیط سرد کننده نخواهد بود و بنابراین می تواند به عنوان معیار واقعی برای مشخص کردن سختی پذیری یک فولاد با ترکیب شیمیایی داده شده قرار گیرد.

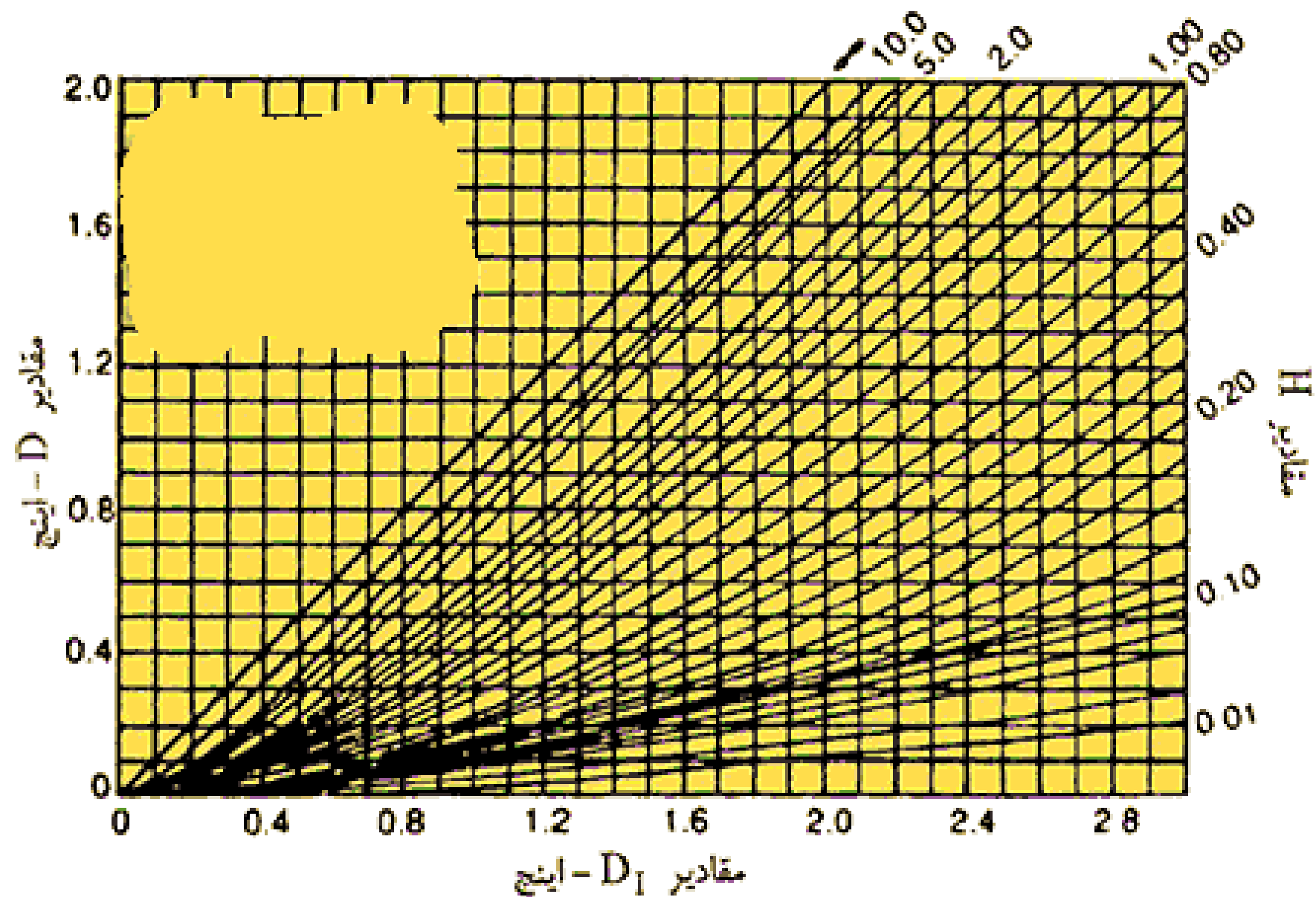
از قطر ایده آل می توان به منظور تعیین قطر بحرانی فولاد ها هنگامی که در محیط های مختلف با شدت سردکنندگی متفاوت سرد می شوند استفاده کرد.

در شکل های زیر ارتباط بین قطر بحرانی (D) ، قطر ایده آل (DI) و شدت سردکنندگی (H) برای محیط های مختلف نشان داده شده است.

در شکل های فوق خط مستقیم که با شدت سردکنندگی بی نهایت مشخص شده است نشان می دهد که برای یک محیط سردکننده ایده آل قطر های بحرانی و ایده آل با یکدیگر برابرند.

از سوی دیگر، برای یک قطر ایده آل ثابت با کاهش شدت سردکنندگی محیط (کاهش مقدار H) قطر بحرانی نیز کاهش می یابد. منحنی های مشابهی برای ارتباط بین صفحات بحرانی، ضخامت ایده آل و شدت سردکنندگی محیط نیز رسم شده اند و در کتاب های مرجع وجود دارد.





محاسبه قطر ایده آل در سختی پذیری

با محاسبه قطر ایده آل در سختی پذیری (Determination of Ideal Size in

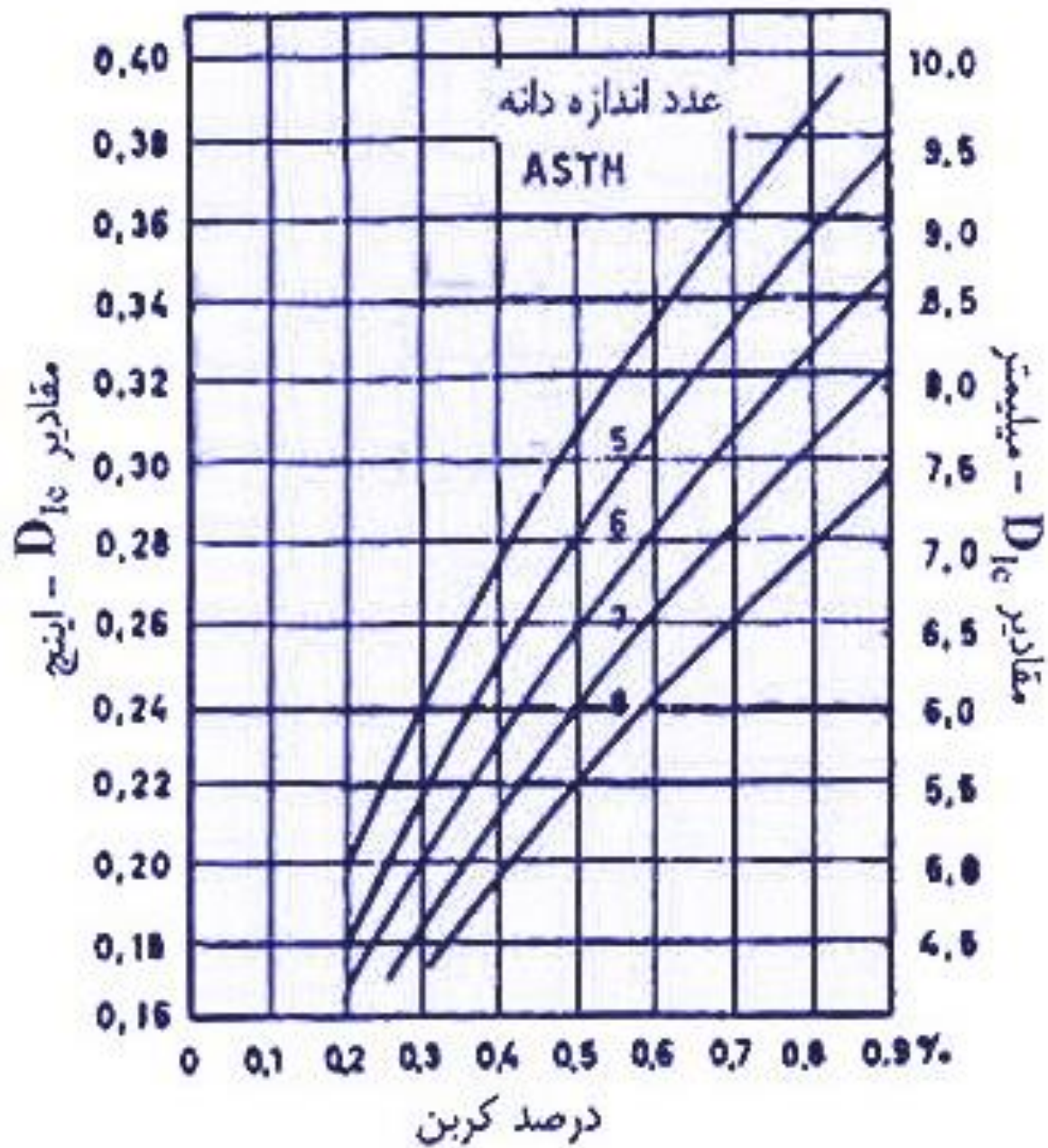
Hardenability) می توان فولاد مناسب را برای کاربرد مشخص انتخاب کرد و بنابراین از مصرف فولاد های گران قیمت اجتناب نمود.

قطر ایده آل معیار واقعی سنجش و مقایسه سختی پذیری فولادهای مختلف است. به علاوه با داشتن قطر ایده آل می توان اثرات محیط های سرد کننده مختلف را روی ضخامت پوسته سخت شده مطالعه کرد. در حقیقت باتوجه به قطر بحرانی و قطر ایده آل لازم، از به کار بردن فولاد های پر آلیاژ که سختی پذیری زیاد از حد داشته و بنابراین گران قیمت اند اجتناب می شود. از طرفی در صورت نیاز به ضخامت زیادتر پوسته سخت شده می توان با استفاده از قطر بحرانی به جای استفاده از فولاد کربنی ساده و محیط سرد کننده شدید که احتمال ترک برداشتن و یا اعوجاج قطعه را ایجاد می کند، فولاد آلیاژی مناسب و محیط سرد کننده ملایم تری را انتخاب کرد، به طوری که ضمن حصول ضخامت سخت شده مورد امکان ترک خوردن نیز برطرف شود. قطر ایده آل را می توان با استفاده از ترکیب شیمیایی و یا به کمک آزمایش های استاندارد بر روی نمونه های فولادی و نتایج به دست آمده از آن ها محاسبه کرد.

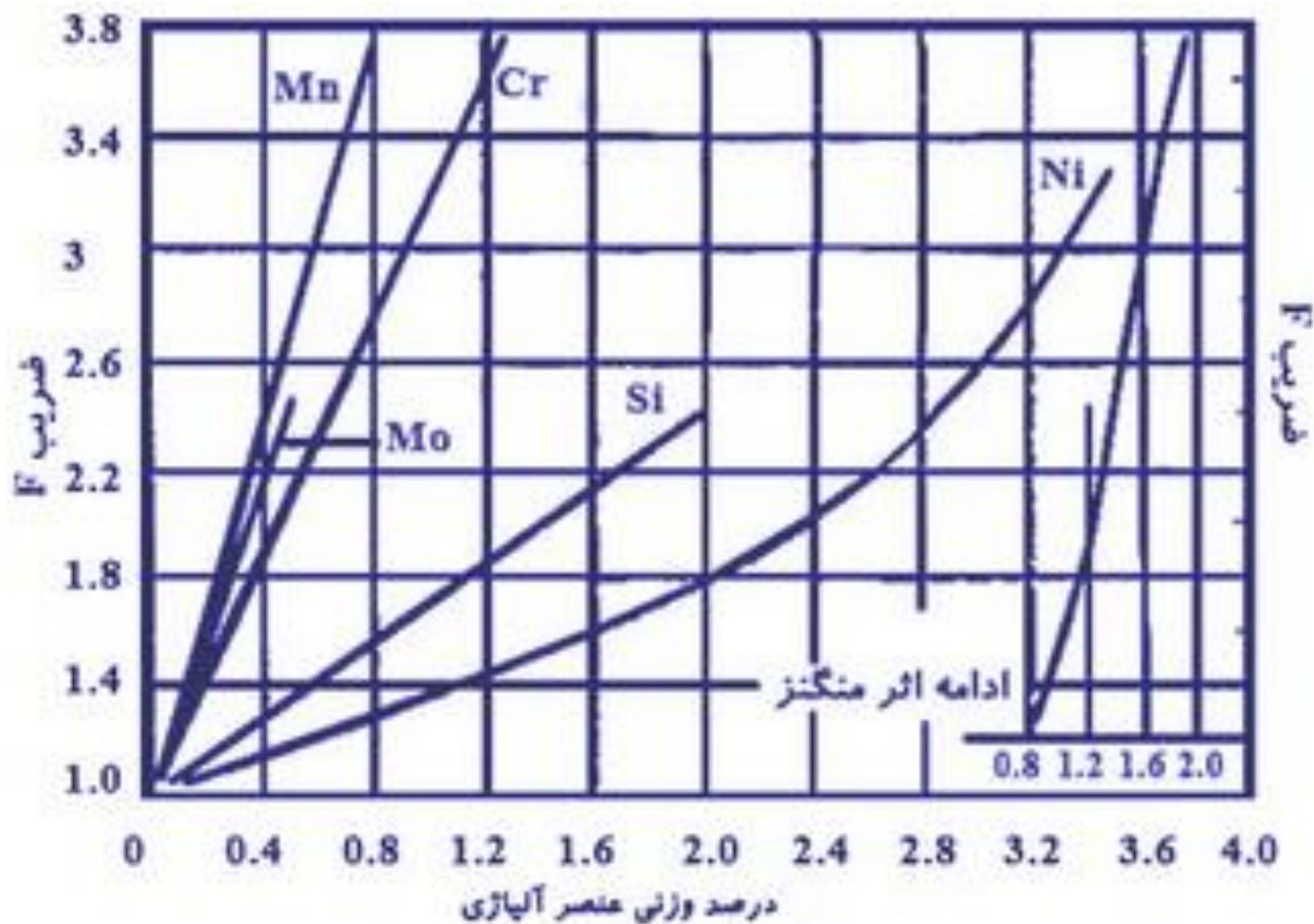
محاسبه قطر ایده آل با استفاده از ترکیب شیمیایی

قطر ایده آل را برای فولاد های کم آلیاژ و آلیاژ متوسط می توان به کمک درصد عناصر آلیاژی محلول در آستنیت و عدد اندازه دانه به دست آورد. برای این منظور، از نمودار های موجود که اثر پارامتر های مزبور را بر روی قطر ایده آل مشخص می کنند استفاده می شود. اثر درصد کربن و عدد اندازه دانه و اثر عناصر آلیاژی به ترتیب در نمودار های رسم شده در شکل های زیر نشان داده شده است. برای تعیین قطر ایده آل یک فولاد، ابتدا به شکل الف مراجعه شده و با توجه به درصد کربن و عدد اندازه دانه فولاد مقدار D_{IC} حساب می شود. سپس با مراجعه به شکل ب اثرات هر یک از عناصر آلیاژی به صورت یک عدد (F) مشخص شده و با استفاده از معادله زیر قطر ایده آل فولاد مربوطه محاسبه می شود. مقدار D_I را معمولاً بر حسب اینچ نشان می دهند.

$$D_1 = D_{1c} \times F_1 \times F_2 \times F_3 \times \dots$$



الف) قطر بحرانی ایده آل بر حسب درصد کربن و عدد اندازه دانه آستنیت برای فولادهای کربنی ساده



ب) اثرات عناصر آلیاژی مختلف بر روی سختی پذیری

لازم به ذکر است که نمودار های فوق از آزمایش های متعددی که به ترتیب روی فولاد های کربنی ساده و آلیاژی با درصدهای مختلف کربن و عنصر آلیاژی انجام گرفته استنتاج شده و توسط مؤسسه آهن و فولاد آمریکا نیز تأیید شده است.

در رابطه با فولاد هایی که بیشتر از ۰.۸ درصد کربن داشته باشند از شکل الف در صورتی می توان استفاده کرد که در دمای آستنیت کردن تمامی کربن به صورت محلول در آستیت باشد. ولی معمولاً چنین نیست و با توجه به اینکه این نوع فولاد ها را در دمایی بین A_{cm} و A_1 حرارت داده و سپس سریع سرد می کنند، در دمای آستنیت کردن مقداری از کربن به صورت کاربید در ساختار باقی می ماند. در حقیقت انحلال تمامی کاربیدها به صورت محلول در آستینیت، اولاً منجر به تشکیل مقدار زیادی آستینیت باقیمانده در ساختار و در نتیجه کاهش سختی شده و ثانیاً می تواند منجر به رشد سریع دانه ها شود. بنابراین، اگر در هنگام سخت کردن فولاد های کم آلیاژ و یا آلیاژ متوسط از گستره دمایی معمولی برای آستنیت کردن استفاده شود انتظار می رود که با افزایش درصد کربن بیشتر از ۰.۸، سختی پذیری کاهش یابد. این موضوع به این دلیل است که، کربن اضافی با عناصر آلیاژی که سختی پذیری را افزایش می دهند (نظیر کرم و مولیبدن) ترکیب شده و تشکیل کاربید می دهد. بنابراین نقش آن ها به عنوان یک عنصر آلیاژی افزایش دهنده سختی پذیری از بین می رود. با وجود کاهش سختی پذیری، فولاد های پرکربن (مثلاً ۱ درصد کربن) کاربرد فراوانی دارند، زیرا کاربید های تشکیل شده باعث افزایش مقاومت فولاد در برابر سایش می شود.

محاسبه قطر ایده آل به روش گراسمن

برای تعیین قطر ایده آل و در نتیجه سختی پذیری به روش گراسمن باید تعدادی گلوله یا میله فولادی با قطر های مختلف در محیط مورد نظر سریع سرد شوند.

سپس تمام گلوله ها یا میله ها از وسط به دو نیم شده و به کمک متالوگرافی ریز ساختار آن ها بررسی شود.

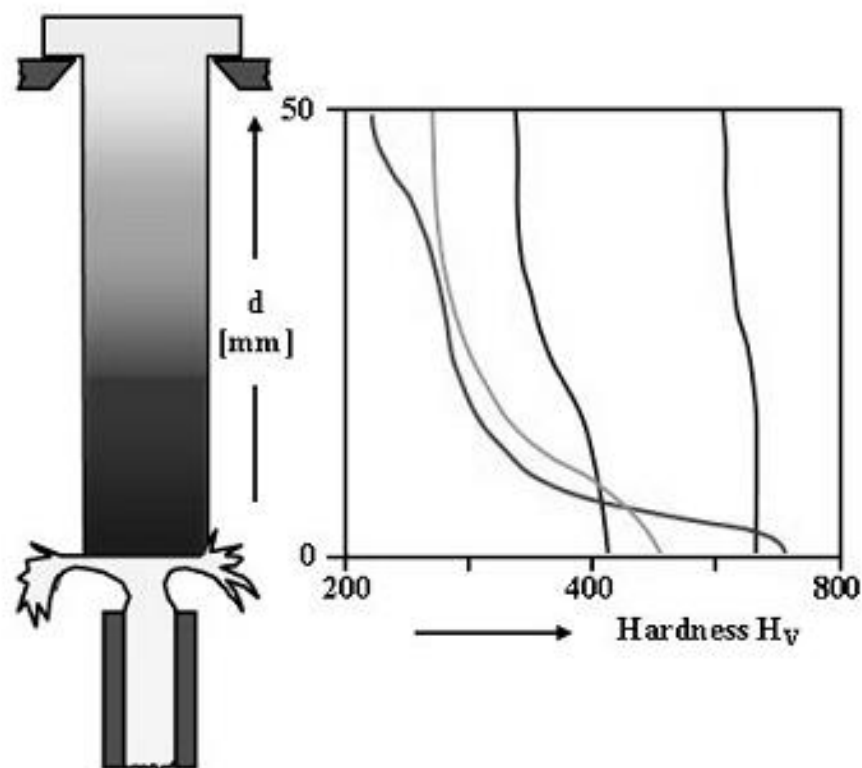
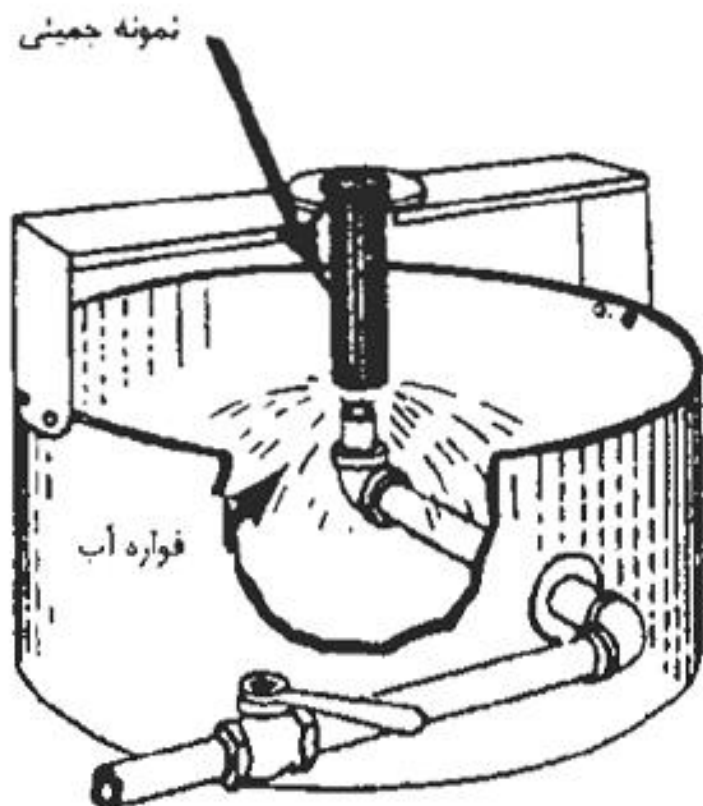
قطر گلوله یا میله ای که در مرکز آن ۵۰ درصد مارتنزیت داشته باشد، همان قطر بحرانی فولاد مورد نظر در محیط سرد شده است.

به کمک شدت سردکنندگی محیط استفاده شده، مشخص می شود و قطر ایده آل به دست می آید. لازم به یادآوری است که با اندازه گیری سختی مرکز گلوله ها یا میله های سریع سرد شده و رسم تغییرات سختی بر حسب قطر گلوله یا میله ها نیز می توان قطر بحرانی را مشخص کرد. در حقیقت روش دوم ساده تر و تا حدودی دقیق تر از روش اول است.

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

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

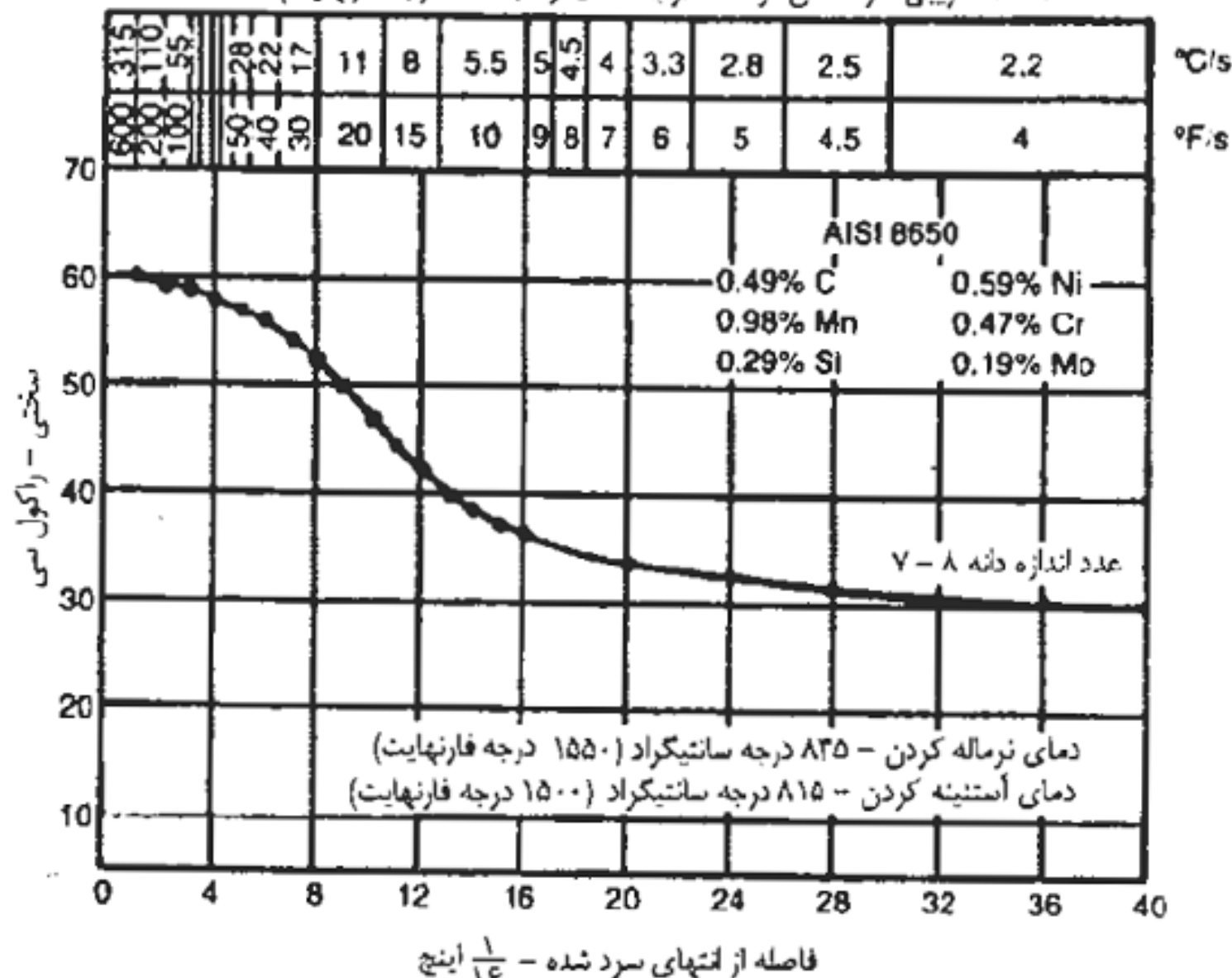
به مدت تقریباً ۲۰ دقیقه در آن دما نگه می‌دارند. پس از آن به کمک یک فواره آب با فشار و دبی مشخص، نمونه را از یک انتها توسط آب ۲۵ درجه سانتیگراد سرد می‌کنند. فاصله فواره از انتهای نمونه در حدود ۱۲/۵ میلیمتر (۵/۸ اینچ) است (شکل‌های ۶-۲۳ و ۶-۲۴). تحت این شرایط، آهنگ سرد شدن نقاط مختلف نمونه از انتهای سریع سرد شده (آب پاشیده شده) به سمت دیگر کاهش می‌یابد.



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

پس از سرد شدن، دو طرف نمونه موازی طول آن به اندازه $4/0$ میلیمتر از هر طرف سنگ زده و سختی نمونه در امتداد محور طولی از یک انتها به انتهای دیگر و به فواصل $5/1$ میلیمتر ($\frac{1}{16}$ اینچ) اندازه گیری می شود. به این ترتیب منحنی تغییرات سختی برحسب فاصله از انتهای سریع سرد شده که به نمودار جامینی موسوم است را رسم می کنند.

آهنک تقریبی سرد شدن در ۷۰۰ درجه سانتیگراد (۱۳۰۰ درجه فارنهایت)



شکل ۶-۲۵ روش نشان دادن سختی پذیری یک فولاد با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش جامینی. اطلاعات داده شده در این شکل مربوط به فولاد AISI ۸۶۵۰ است [۱].

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

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

فصل هفتم

Tempering بازپخت

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

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

دمای A_{c1} ، نگه داشتن برای مدت زمان مشخص و سپس سرد کردن آهسته تا دمای اتاق. دما و زمان حرارت دادن به ترکیب شیمیایی فولاد، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر بستگی دارد. در اثر بازپخت تنشهای داخلی کاهش یافته و یا حذف می‌شوند و بنابراین استحکام ضربه‌ای افزایش می‌یابد (شکندگی کم می‌شود). در عوض سختی و استحکام قطعه سخت شده تا حدودی کاهش خواهد یافت.

تغییرات میکروساختار

ساختار یک فولاد سریع سرد (مارتنزیت) شده ناپایدار است. دلایل ناپایداری عبارت‌اند از: وجود کربن به صورت فوق اشباع در شبکه بلوری bcc مارتنزیت، انرژی تنش ناشی از وجود نابه‌جاییها و دوقلوهای بسیار زیاد در ساختار بلوری صفحات مارتنزیتی، انرژی سطحی ناشی از فصل مشترکهای بسیار زیاد بین صفحات مارتنزیتی و بالاخره وجود آستنیت باقیمانده که حتی در فولادهای کم‌کربن نیز اجتناب‌ناپذیر است.

بررسیهای سیستماتیک که به کمک پراش پرتوی ایکس^۱ بر روی میکروساختار فولادهای سریع سرد و بازپخت شده انجام شده است، سه مرحله کاملاً مشخص و مجزا از یکدیگر را در رابطه با تغییر میکروساختار مارتنزیت در ضمن بازپخت نشان می‌دهد. این سه مرحله عبارت‌اند از:

مرحله اول: تشکیل کاربیدهای انتقالی نظیر کاربید اپسلین^۲ (ε) و یا کاربید اتا^۳ (η) و در نتیجه کاهش درصد کربن زمینه مارتنزیتی تا حدود ۰/۲۵ درصد.

مرحله دوم: تبدیل آستنیت باقیمانده به فریت و سمنتیت.

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

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

در اینجا تذکر این نکته ضروری است که بجز موارد اشاره

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

درصد کربن در هر دو نوع کاربید اپسیلین (با

فرمول $Fe_{2/4}C$) و اتا (با فرمول Fe_2C) از درصد کربن سمنتیت (با فرمول Fe_3C) که در دماهای بالاتر تشکیل می شود به مراتب بیشتر است.

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

مرحله دوم بازپخت شامل تجزیه آستنیت باقیمانده و تبدیل آن به مخلوط فریت و سمنتیت است.

مطالعات انجام شده بر روی فولادهای کم الیاژ و کربن متوسط ۴۱۳۰ و ۴۳۴۰ سریع سرد شده نشان داده‌اند که مقدار آستنیت باقیمانده در این فولادها به ترتیب در حدود ۲ و ۴ درصد است. در صورتی که زمان بازپخت این برای فولادها یک ساعت باشد، تجزیه آستنیت باقیمانده در حوالی ۲۰۰ درجه سانتیگراد شروع شده و در حوالی ۳۰۰ درجه سانتیگراد تمام می‌شود.

بنابراین اگر فولادهای فوق در ۳۰۰ درجه سانتیگراد و یا بالاتر از آن بازپخت شوند، یکی از اجزای اصلی و عمده ساختار را سمنتیت تشکیل خواهد داد.

مرحله سوم بازپخت شامل تشکیل مخلوط فریت و سمنتیت براساس نمودار تعادلی آهن - کربن است. شواهدی در دست است که قبل از تشکیل سمنتیت (مخصوصاً در فولادهای پرکربن) کاربید کای^۱ با شبکه بلوری منوکلینیک^۲ و فرمول Fe_5C_7 به وجود می‌آید. گرچه بین سمنتیت و کاربید کای تفاوت‌هایی وجود دارد، لیکن شبکه‌های بلوری و موقعیت اتمها در دو نوع کاربید آنقدر به یکدیگر شبیه‌اند که تشخیص آنها از یکدیگر به کمک پرتوی ایکس و یا روشهای مشابه به سادگی امکانپذیر نیست.

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

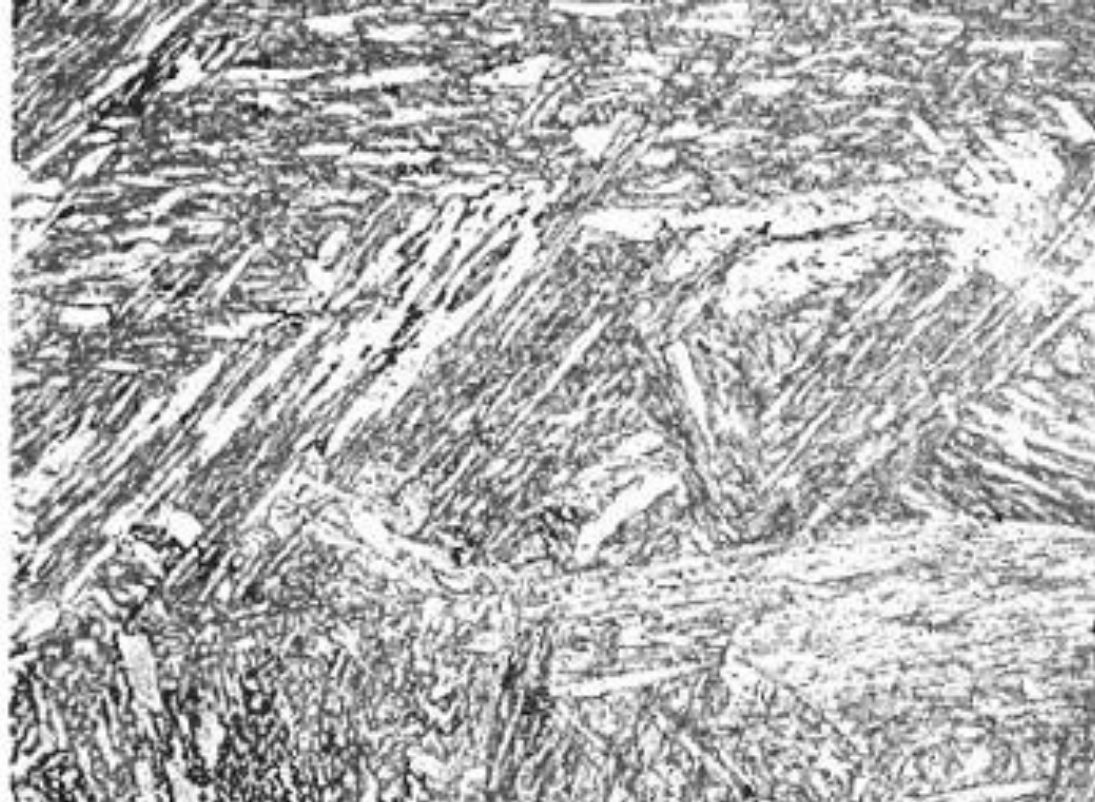
در رابطه با تشکیل کاربردهای آلیاژی از سمنتیت دو نظریه وجود دارد:

یکی تشکیل مستقیم کاربردها از سمنتیت و دیگری انحلال

سمنتیت در زمینه فریتی و سپس جوانه زدن و رشد کاربردهای آلیاژی به طور مستقل.

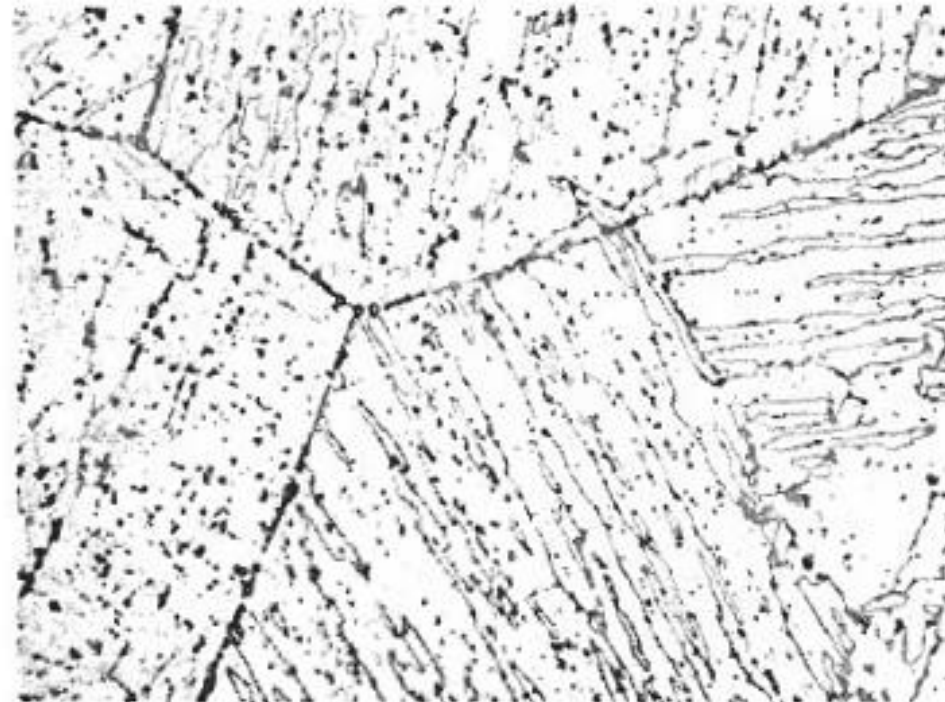
عملیات بازپخت در تشکیل انواع مختلف کاربردها خلاصه نشده و برای حصول ساختار کاملاً بازپخت شده که عبارت از سمنتیت کروی در زمینه فریت هم محور است، تغییرات مهمی نیز در شبکه بلوری و ساختار زمینه مارتنزیتی انجام می شود. در حقیقت ابتدا با تشکیل کاربردهای انتقالی از درصد کربن مارتنزیت کاسته شده و بنابراین تتراگونالیتی شبکه بلوری آن کاهش می یابد.

به عبارت دیگر شبکه بلوری ناعادلی bcc مارتنزیت به سمت شبکه بلوری تعادلی bcc فریت متمایل می شود و در نهایت با خروج کربن بیشتر از شبکه بلوری مارتنزیت، صفحات فریتی جایگزین صفحات مارتنزیت در ساختار می شوند. با ادامه عملیات بازپخت، صفحات فریتی رشد کرده و زمینه یکنواخت فریت هم محور به وجود می آید.



شکل ۷-۸ میکروساختار مارتنزیت لایه‌ای در آلیاژ $\text{Fe}-1.22\% \text{C}$ بعد از بازپخت به مدت ۱۵ دقیقه در 400°C سانتیگراد (752°F درجه فارنهایت). میکروساختار نوری. محلول حکاکی نایتال. بزرگنمایی $\times 500$ [۱].

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



شکل ۸-۸ میکروساختار مارتنزیت لایه‌ای در آلیاژ $\text{Fe}-0.22\text{C}$ بعد از بازپخت به مدت ۲ ساعت در 700°C سانتیگراد (1292°F درجه فارنهایت) میکروساختار نوری، محلول حکاکی، نایتال، بزرگنمایی $\times 100$.

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

شکل ۸-۸ نشان می‌دهد که حتی پس از بازپخت نسبتاً

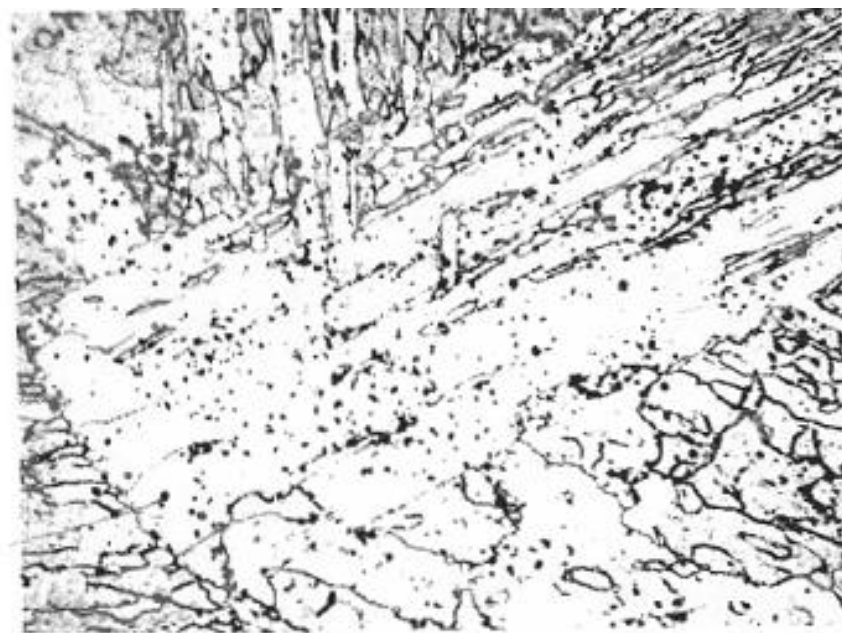
زیاد، شکل اولیه بسته‌های مارتنزیت و واحدهای منفرد موازی در آنها هنوز به طور کامل مشخص است.

تا این مرحله مهمترین اثرات بازپخت بر روی میکروساختار عبارت از حذف

صفحات کوچک مارتنزیتی و تشکیل کاربیدهای کرووی بر روی مرز دانه‌های آستنیت اولیه (و در نتیجه نمایان شدن آنها) در داخل بسته‌های مارتنزیت است.

بازپخت بیشتر (۱۲ ساعت در ۷۰۰

درجه سانتیگراد) موجب می‌شود که بلورهای صفحه‌ای شکل فریت باقیمانده در داخل بسته‌های مارتنزیتی از بین رفته و به جای آنها دانه‌های هم‌محور فریتی بیشتری تشکیل شود



شکل ۸-۹ میکروساختار مارتنزیت لایه‌ای در آلیاژ $\text{Fe}-1/2\% \text{C}$ بعد از بازپخت به مدت ۱۲ ساعت در ۷۰۰ درجه سانتیگراد (۱۲۹۲ درجه فارنهایت). میکروساختار نوری. محلول حکاکی نایتال. بزرگنمایی $\times 500$ [۱].

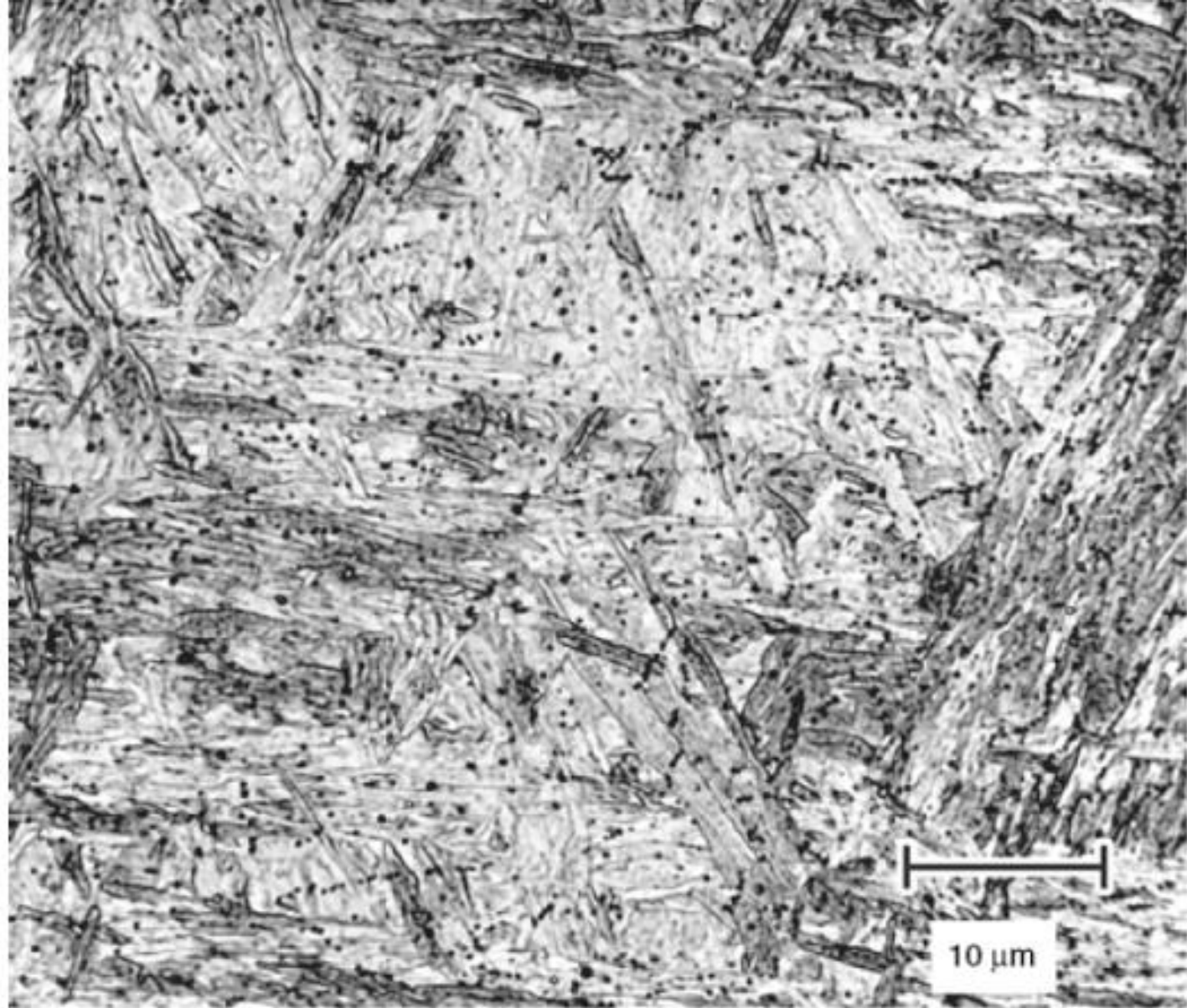


Fig. 22 Microstructure of tempered plate martensite showing small, rounded carbides that precipitated during the tempering treatment. 4% picral + 2% nital etch. Original magnification 1000×

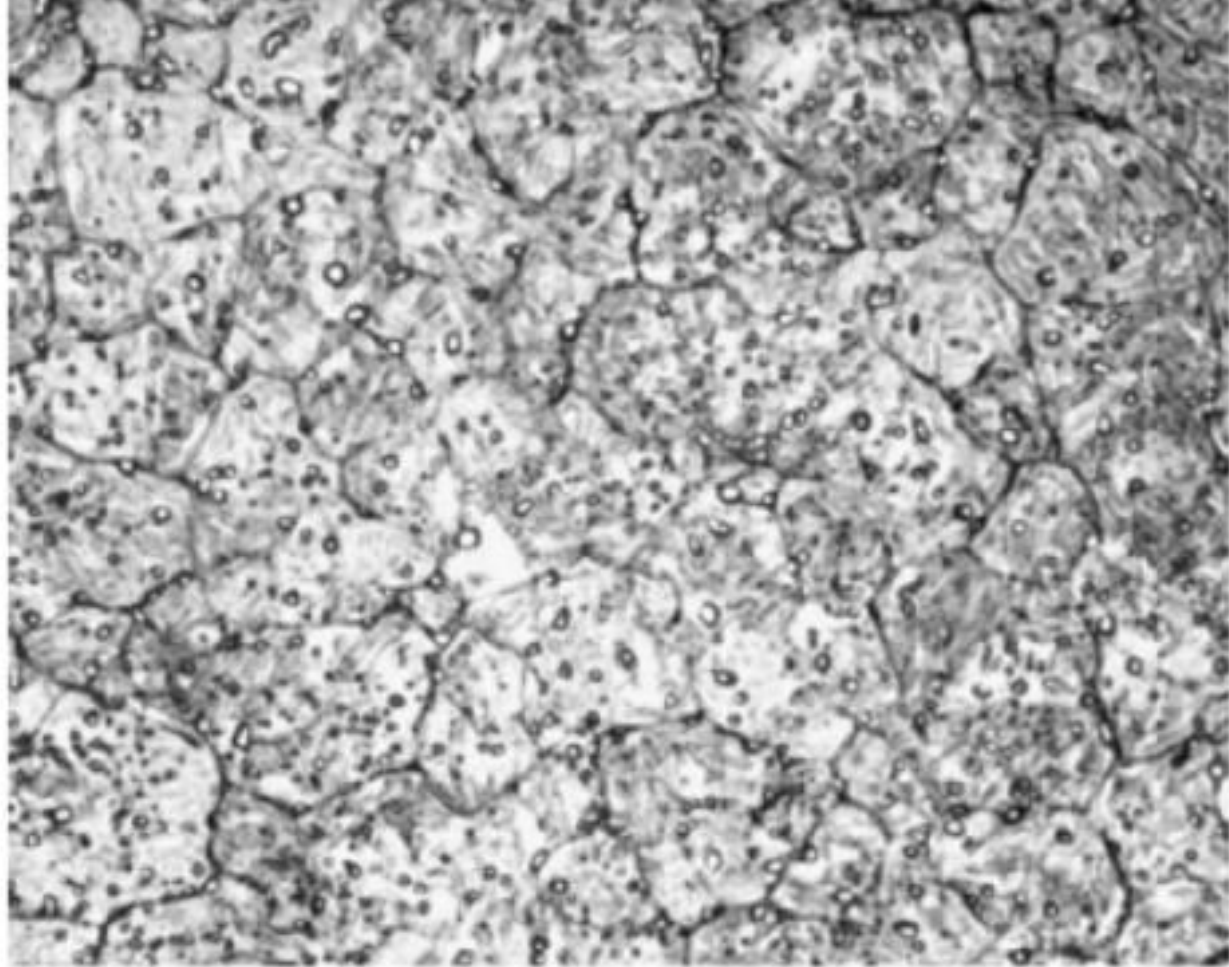


Fig. 49 Microstructure of quenched and tempered low-alloy steel showing delineation of the prior-austenite grain boundaries. The individual carbides are also delineated. Modified Winstead's reagent. Original magnification 1000×

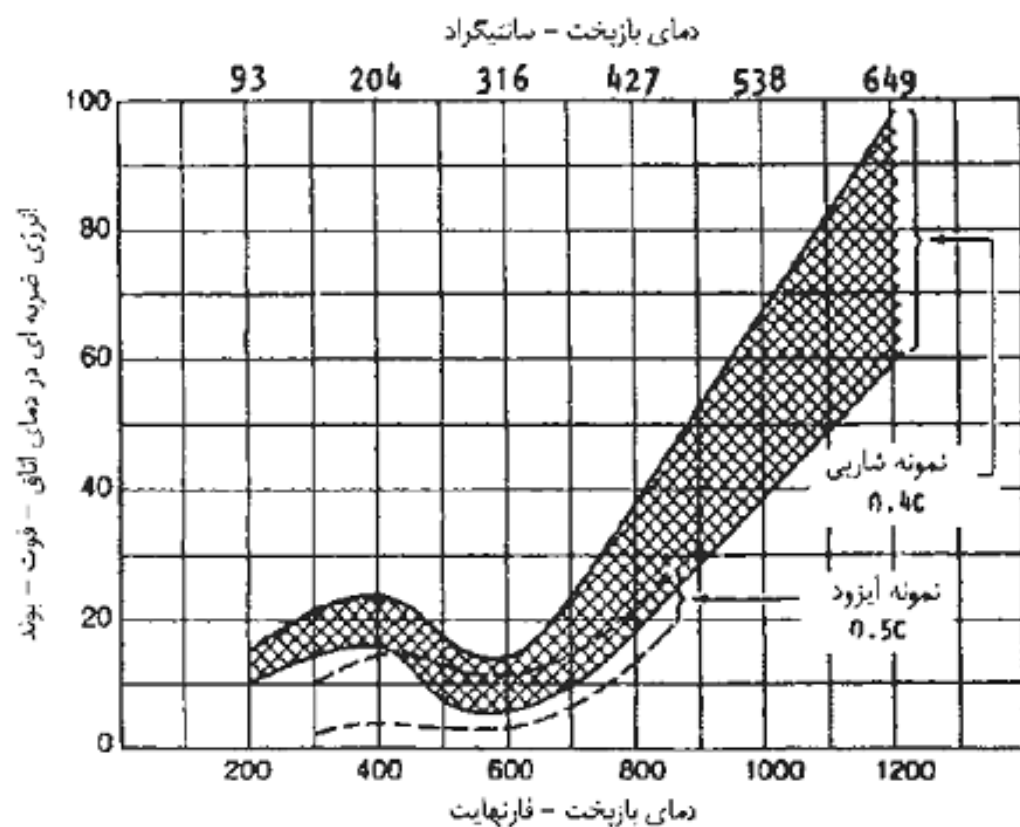
مارتنزیت که میکروساختار مورد نظر در عملیات سرد کردن سریع فولادهاست، کاملاً سخت و در عین حال بسیار ترد و شکننده است. برخی از پارامترها که منجر به ترد و شکننده شدن مارتنزیت می‌شوند عبارت‌اند از: خارج شدن شبکه بلوری فولاد از شکل طبیعی خود در اثر محبوس شدن کربن اضافی در فضاهای هشت‌وجهی (به شکل ۶-۴ مراجعه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

هدف اصلی از عملیات حرارتی بازپخت کاهش تردی و

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

از آنجایی که

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



شکل ۸-۱۱ اثر دمای بازپخت بر روی انرژی ضربه ای فولادهای کم آلیاژ با کربن متوسط

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

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

در این فرمول:

T : دمای بازپخت برحسب فارنهایت

H_c : سختی محاسبه شده از ترکیب شیمیایی

H_a : سختی مورد نظر پس از بازپخت است.

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

$$T = 16/67(H_c - H_a) - 17/8$$

فصل هشتم

سایر روشهای عملیات حرارتی

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

(۱) سریع سرد کردن مستقیم،

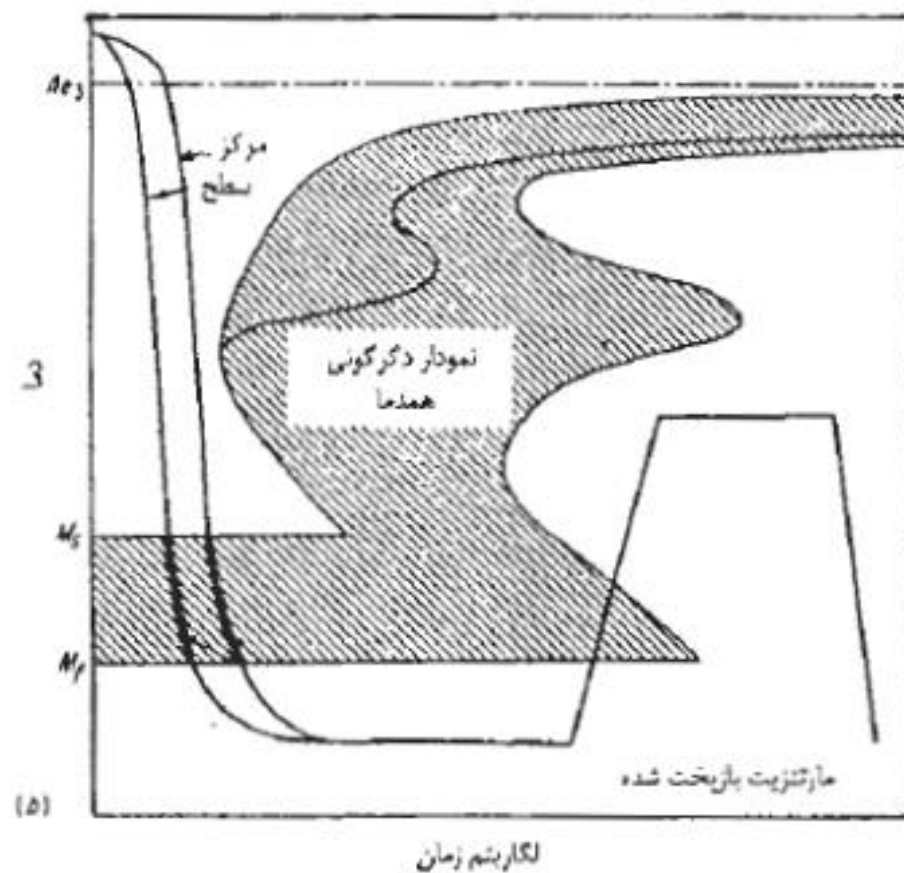
(۲) مارتمپرینگ^۱

(۳) آستمپرینگ^۱

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

این پدیده منجر به ایجاد تنشهای داخلی در قطعه شده و نهایتاً می‌تواند قطعه را

شکسته و یا تغییر شکل دهد. تحت شرایط خاص، می‌توان از روشهای دوم و سوم به جای روش اول استفاده کرد و در نتیجه از اثرات زیان‌آور تنشهای داخلی جلوگیری نمود.



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

الف : مارتمپرینگ

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

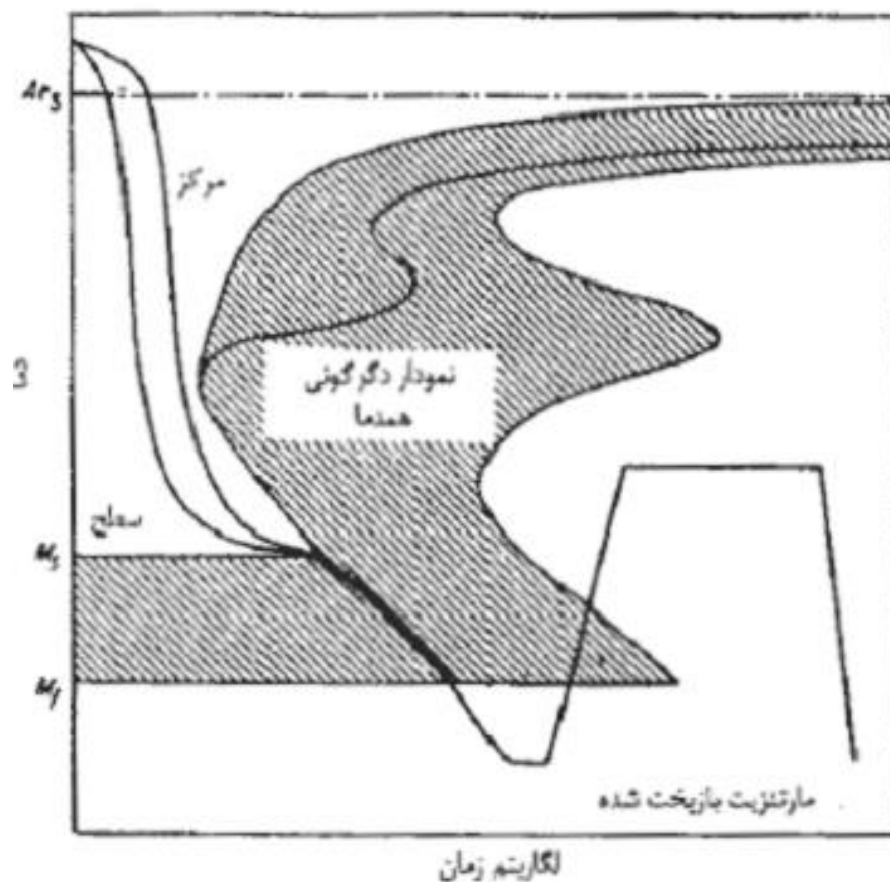
۱- آستنیت‌ه کردن فولاد

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

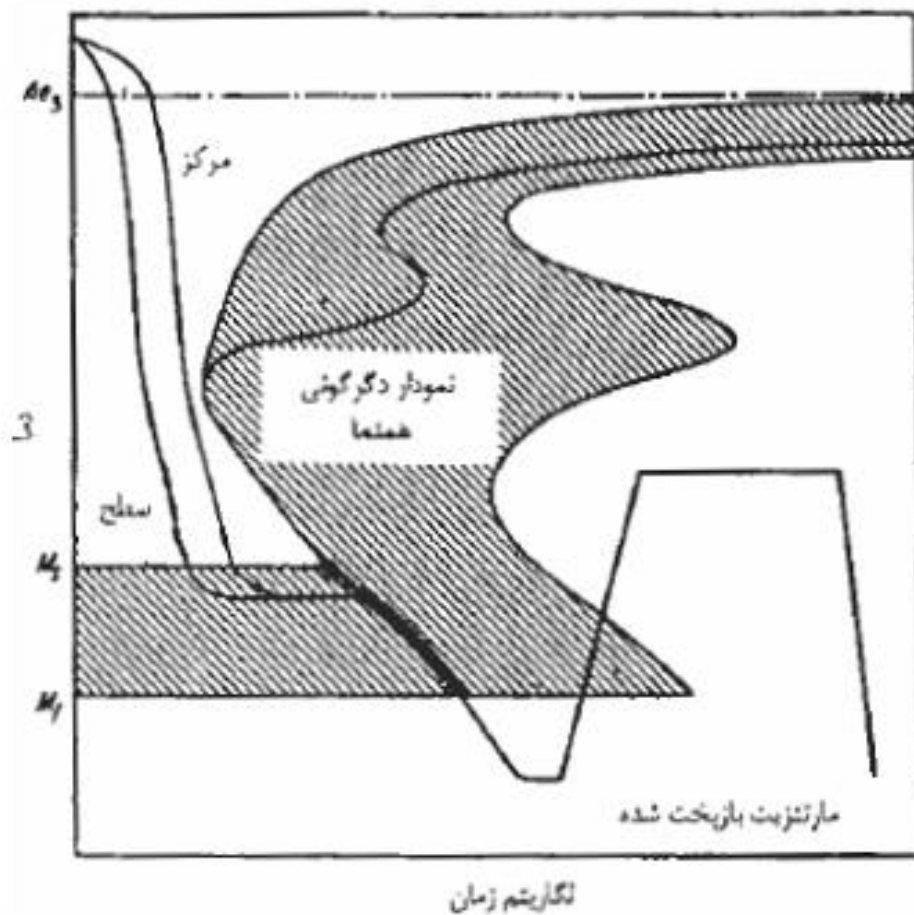
۳- نگه داشتن در محیط یاد شده تا اینکه دمای قطعه در تمام قسمت‌های آن یکنواخت شود. زمان نگهداری در این دما بستگی به موقعیت نمودار TTT و ضخامت قطعه دارد. این زمان معمولاً بین ۲ تا ۴ دقیقه برای هر ۱۰ میلیمتر ضخامت است. زمان کمتر برای حالتی است که فولاد در دماهای پایین آستنیت‌ه شود، در حالی که زمان بیشتر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

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

۵- بازپخت دادن قطعه به منظور افزایش چقرمگی.



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



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

روش دوم (شکل ۹-۱۴) اصطلاحاً به مارتمپرینگ اصلاح شده^۲ موسوم است.

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

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

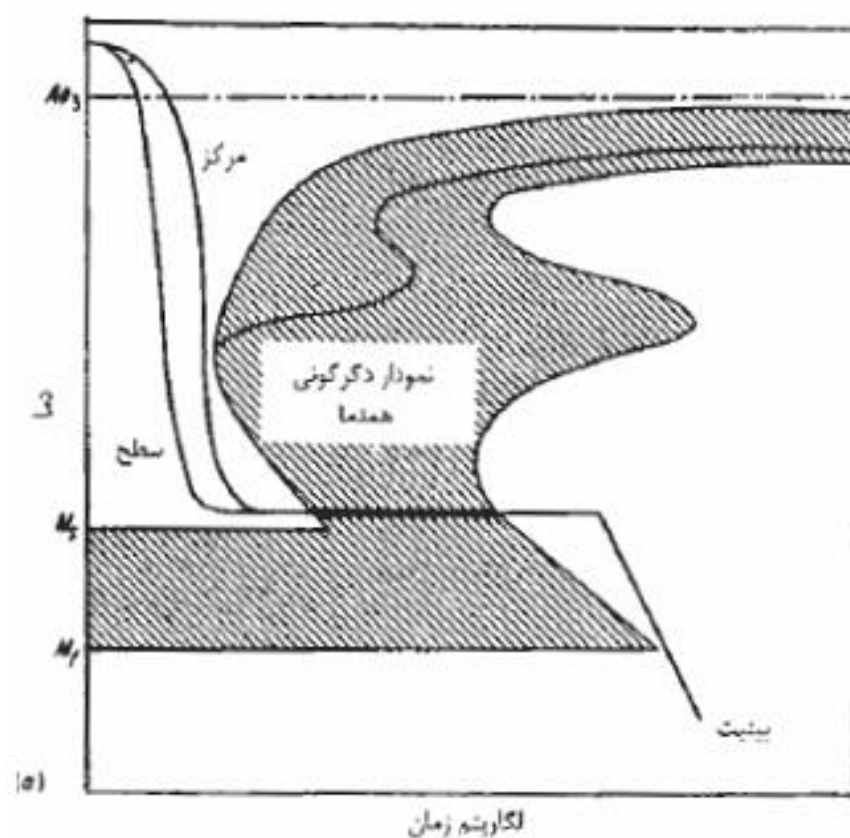
نوع عملیات حرارتی	سختی HRC	مقاومت به ضربه fb-lb	ازدیاد طول درصد
سرد کردن در آب و بازپخت ۵۳	۵۳	۱۲	۰
مارتمپر و بازپخت ۵۳	۵۳	۲۸	۰

ب : آستمپرینگ

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

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

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



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

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

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

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

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

در رابطه با آستمپر کردن فولادهای

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

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

سخت گردنِ ستمی

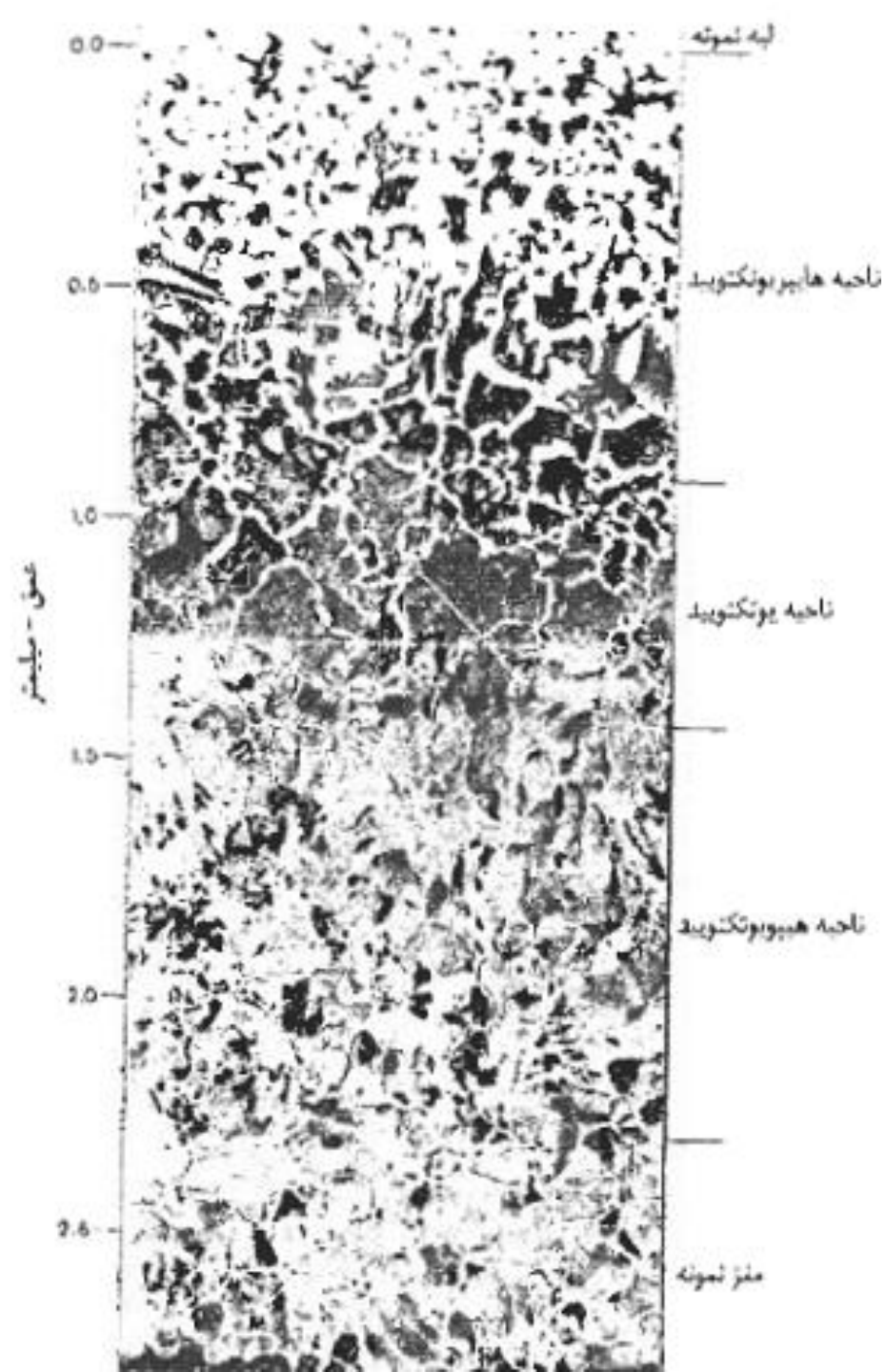
در بسیاری از کاربردهای صنعتی نیاز به قطعاتی است که دارای سطحی سخت بوده و در عین حال از چقرمگی یا مقاومت به ضربه خوبی نیز برخوردار باشند. از جمله مواردی که می‌توان در این رابطه به عنوان مثال به آنها اشاره کرد عبارت‌اند از: میل لنگ، میل بادامک، چرخ دنده و قطعات مشابه. این قطعات باید سطحی بسیار سخت و مقاوم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

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

روشهای مختلف عملیات حرارتی که به کمک آنها می توان سطح قطعات را سخت کرد، عمدتاً به دو دسته تقسیم می شوند. دسته اول عملیاتی که منجر به تغییر ترکیب شیمیایی سطح فولاد می شوند و به عملیات حرارتی - شیمیایی^۲ یا عملیات ترموشیمی موسوم اند، نظیر کربن دهی^۳، نیتروژن دهی^۴، و کربن نیتروژن دهی^۵. دسته دوم روشهایی که بدون تغییر ترکیب شیمیایی سطح و فقط به کمک عملیات حرارتی که در لایه سطحی متمرکز شده و باعث سخت شدن سطح می شوند و به عملیات حرارتی موضعی^۶ موسوم اند، مانند سخت کردن شعله ای^۱ و سخت کردن القایی^۲.

کربن دهی

هنگامی که یک قطعه فولاد کم کربن (مثلاً ۰/۱۵ درصد) در مواد کربن ده مانند ذغال قرار گرفته و در دمایی بالا نظیر ۹۲۵ درجه سانتیگراد (۱۷۰۰ درجه فارنهایت) حرارت داده شود کربن اتمی از ماده کربن ده آزاد شده و به داخل سطح قطعه نفوذ می کند. گرچه این عملیات نیاز به زمان دارد ولی در مدت چند ساعت سطح قطعه می تواند مقدار قابل ملاحظه ای کربن (تا ۱/۲ درصد) جذب کند. به این ترتیب قطعه ای ساخته می شود که مغز آن را فولاد کم کربن و سطح آن را فولاد پر کربن تشکیل می دهد.



شکل ۱۰-۱ میکروساختار تعادلی سرد شده لایه کربن داده شده

کربن دهی پودری (جامد)

در این روش قطعات مورد نظر همراه با مواد کربن ده که اغلب ذغال چوب و یک ماده انرژی زا (جدول ۱۰-۲) است را در یک جعبه فولادی که از جنس فولاد نسوز ($20\%Ni-25\%Cr$) است، به نحوی بسته بندی می کنند که فاصله بین قطعات در حدود ۵۰ میلیمتر باشد. سپس در جعبه را به نحوی می بندند که هیچ گونه تبادل هوا با خارج نداشته باشد. برای این منظور می توان از آزیست استفاده کرد. این جعبه را تا دمای کربن دهی که اغلب بین ۸۷۵ تا ۹۲۵ درجه سانتیگراد است حرارت داده و برای مدت زمان مشخصی در این دما نگه می دارند. زمان نگهداری در دمای کربن دهی بستگی به ضخامت لایه سطحی مورد نیاز دارد.

جدول ۱۰-۲ ترکیب مخلوط مواد کربن ده پودری (جامد) برحسب درصد وزنی [۱].

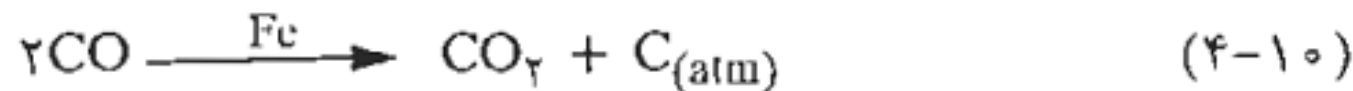
شماره مخلوط	ذغال چوب	کربنات باریم $BaCO_3$	کربنات کلسیم $CaCO_3$	سود خشک $NaOH$	کک	کربنات سدیم Na_2CO_3
۱	۸۷	—	۳	۱۰	—	—
۲	۹۰-۸۵	—	—	۱۵-۱۰	—	—
۳	۹۰	۱۰	—	—	—	—
۴	۶۰	۴۰	—	—	—	—
۵	۴۵	۱۲	—	—	۴۳	—
۶	۵۵	۱۲-۱۰	—	—	۳۰	۵-۳

نقش مواد انرژی زا افزایش نرخ کربن دهی است.

گرچه در این روش قطعه کار در مخلوط پودری از مواد کربن ده حرارت داده می شود ولی عامل اصلی تولید کننده کربن، گاز منواکسید کربن (CO) است که کربن اتمی را به سطح قطعه حمل می کند. گاز منواکسید کربن براساس واکنش (۱۰-۳) که بین اکسیژن محبوس شده در جعبه و مواد کربن ده (ذغال) انجام می گیرد تولید می شود.



سپس در سطح فولاد، گاز منواکسید کربن تجزیه شده و تولید کربن اتمی می کند.



کربن اتمی آزاد شده در سطح فولاد که تا ناحیه حرارتی آستنیت گرم شده است به صورت بین نشینی در فولاد حل می شود.

اگر نیاز باشد که قسمتهایی از سطح قطعه کربن داده نشوند، این نواحی را می توان توسط یک لایه مسی به ضخامت $1/8$ تا $75/8$ میلیمتر پوشش داد. از آنجایی که در دمای کربن دهی، کربن در مس نامحلول است در نواحی پوشش داده شده کربن جذب نمی شود.

پس از اینکه عملیات کربن دهی پایان یافت، برحسب ساختار و خواص مکانیکی مورد نظر قطعات کربن داده شده را می توان در آب و یا روغن سریع سرد کرده و یا اینکه تا دمای اتاق در جعبه و یا در هوا سرد نمود.

معمولاً قطعات فولادی را پس از کربن دهی مستقیماً (به ویژه در آب) سریع سرد نمی کنند، زیرا امکان شکسته شدن آنها در ضمن سریع سرد شدن، و / یا عدم دستیابی به سختی مورد نیاز زیاد است. علت این امر عبارت اند از:

- ۱- از آنجایی که دمای کربن‌دهی نسبتاً بالاست (در حدود ۹۰۰ درجه سانتیگراد)، گستره دمای که قطعه در ضمن سریع سرد شدن از آن عبور می‌کند زیاد است و در نتیجه تنشهای ایجاد شده در قطعه (به ویژه تنشهای حرارتی) زیاد خواهند بود.
- ۲- از آنجایی که قطعه برای مدت زمان نسبتاً طولانی در دمای بالایی بوده است، دانه‌ها نسبتاً درشت شده و در نتیجه احتمال ترد و شکننده شدن فولاد وجود دارد.
- ۳- سریع سرد شدن مستقیم از دمای کربن‌دهی باعث می‌شود که ساختار نهایی لایه کربن داده شده شامل مقدار زیادی آستنیت باقیمانده باشد، در نتیجه سختی سطح در حد مورد نظر افزایش نم‌یابد.

به منظور جلوگیری از به وجود آمدن معایب بالا در قطعات کربن داده شده، مناسبترین روش عبارت‌اند از سرد کردن فولاد از دمای کربن‌دهی در هوا و یا در جعبهٔ سمانتاسیون و سپس انجام یکی از فرایندهای عملیات حرارتی زیر:

۱- حرارت دادن قطعه کربن داده شده تا دمای سخت کردن مناسب، نگه داشتن برای مدت زمان مشخص و سپس سریع سرد کردن در آب و یا روغن. اغلب روغن محیط مناسبتری برای این منظور است.

۲- این روش شامل دو مرحله حرارت دادن و سرد کردن به صورت زیر است:

در مرحلهٔ اول، فولاد کربن داده شده را در دمایی در حدود 850°C درجهٔ سانتیگراد آستنیت‌ه کرده و سپس در هوا سرد می‌کنند. این عملیات به منظور ریز کردن دانه‌های مغز قطعه است. در مرحلهٔ دوم، قطعه را دوباره حرارت داده و در دمایی در حدود 760°C درجهٔ سانتیگراد آستنیت‌ه می‌کنند. سپس نمونه را در روغن سریع سرد می‌کنند. هدف از این مرحله ریز کردن دانه‌های لایه سطحی کربن داده شده و سخت کردن همزمان آن است.

کربن دهی مایع

کربن دهی مایع در مذاب مخلوط نمکهای سیانید سدیم (۲۰ تا ۵۰ درصد)، کربنات سدیم (۴۰ درصد) و مقادیر متنابهی از کلرید سدیم و یا کلرید باریم انجام می شود. این مخلوط غنی از

سیانید را در بوته هایی با پوشش شیمیایی آلومینیم (آلومینیم کاری^۱ شده) ذوب کرده و در دمایی بین ۸۷۰ تا ۹۵۰ درجه سانتیگراد نگه می دارند. قطعات مورد نظر برای کربن دهی را در سبدهای فلزی ریخته و یا توسط سیمهای فلزی به طور معلق در مذاب فوق برای مدت زمانی در حدود ۵ دقیقه تا یک ساعت نگه می دارند. زمان کربن دهی بستگی به عمق نفوذ مورد نظر دارد.

پس از پایان عملیات، سبد حاوی قطعات کربن داده شده را در آب و یا روغن فرو می‌برند. کربن‌دهی مایع را معمولاً برای قطعات کوچک که نیاز به ضخامت لایه سطحی کمی داشته باشند، به کار می‌برند. از آنجایی که ظرفیت حرارتی نمک مذاب بالا بوده و انتقال حرارت از مایع به قطعه سریع است، این روش نسبت به کربن‌دهی پودری سریعتر و اقتصادیتر است.

در اینجا تذکر این نکته ضروری است که نمکهای سیانید و بخارات حاصل از مذاب آنها بسیار سمی بوده و هنگام کار کردن با آنها باید تمام نکات ایمنی مربوطه به کار گرفته شوند.

کربن دهی گازی

کربن دهی گازی که نسبت به روشهای پودری و مایع از قدمت کمتری برخوردار است، به عنوان اقتصادیترین و سریعترین روش کربن دهی برای تولید انبوه شناخته شده است. تحت شرایطی که ضخامت لایه سطحی کربن داده شده نسبتاً کمی مورد نظر باشد، این مزیت بسیار حائز اهمیت است. به علاوه در این روش کربن سطح را بسیار دقیقتر و ساده تر از روشهای دیگر می توان کنترل کرد.

در کربن دهی گازی قطعات کار را در ۹۰۰ درجه سانتیگراد برای مدت ۳ تا ۴ ساعت در محیطی که شامل گاز یا گازهایی باشد که بتواند در سطح فولاد تجزیه شده و تولید کربن اتمی کند حرارت می دهند. این محیط معمولاً از هیدروکربنها نظیر متان (گاز طبیعی)، اتان (CH_4) و یا پروپان (C_3H_8) تشکیل شده است که به طور جزئی در کوره سوخته شده و یا اینکه با یک گاز رقیق کننده موسوم به گاز حامل^۱ مخلوط شده باشد.

نیتروژن دهی

نیتروژن دهی عبارت از وارد کردن نیتروژن اتمی در لایه سطحی فولاد است. بنابراین سختی سطح در این روش بستگی به نیتريد فلزی تشکیل شده دارد. در حالی که امکان نیتروژن دهی برای بسیاری از فولادها وجود دارد، تنها هنگامی می توان سختی زیاد در سطح به دست آورد که قطعه مورد نظر از جنس فولادهای آلیاژی مخصوص، شامل عناصر آلیاژی نظیر آلومینیم، کرم، مولیبدن و یا وانادیم باشد. این عناصر در سطح قطعه به محض تماس پیدا کردن با نیتروژن اتمی با آن ترکیب شده و تشکیل نیتريد های پایدار و سخت می دهند.

با توجه به آنچه گفته شد، تفاوت بین عملیات کربن‌دهی و نیتروژن‌دهی مشخص می‌شود. در حالی که کربن‌دهی باید در گستره دمایی پایداری آستنیت (۸۷۵ تا ۹۲۵ درجه سانتیگراد) انجام شود، نیتروژن‌دهی را می‌توان در گستره دمایی پایداری فریت (۵۵۰ تا ۶۵۰ درجه سانتیگراد) انجام داد. به علاوه، پس از نیتروژن‌دهی نیازی به سریع سرد کردن قطعه نیست. معمولاً قطعات نیتروژن داده شده را پس از پایان عملیات و از دمای نیتروژن‌دهی در هوا سرد می‌کنند.

کربن - نیتروژن دهی

کربن - نیتروژن دهی عملیات سخت کردن سطحی است که در آن نیتروژن و کربن هر دو جذب سطح فولاد می شوند و به این ترتیب نیتروژن جذب شده، سختی سطح کربن داده شده را بیشتر افزایش می دهد. گرچه در کربن دهی مایع نیز تقریباً همین عمل انجام می شود ولی واژه کربن - نیتروژن دهی معمولاً به سخت کردن سطحی که در آن از محیط گازی استفاده شود گفته می شود.

عملیات کربن - نیتروژن دهی معمولاً در گستره دمایی ۸۰۰ تا ۸۷۵ درجه سانتیگراد و در محیطی از مخلوط منواکسید کربن و هیدروکربن شامل ۳ تا ۸ درصد آمونیاک انجام می شود. درصد کربن و نیتروژن جذب شده توسط فولاد را می توان با کنترل دما و غلظت آمونیاک تغییر داد.

نیتروژن - کربن دهی

این فرایند که شامل نفوذ همزمان نیتروژن و کربن به داخل فولاد است در گستره دمایی پایداری فاز فریت (زیر دمای A_1) انجام می شود و لذا به نیتروژن - کربن دهی فریتی^۲ نیز موسوم است. انجام این فرایند به هر دو صورت گازی و مایع امکانپذیر است. از جمله مزایای مشترک این روشها، تشکیل لایه نازک تکفازی از کاربونیترید اپسیلن و یک ترکیب سه تایی از آهن - نیتروژن و کربن تشکیل شده در گستره دمایی ۴۵۰ تا ۵۹۰ درجه سانتیگراد است.

سخت کردن سطحی به کمک عملیات حرارتی موضعی

در این روش مغز و سطح قطعه دارای ترکیب شیمیایی یکسان بوده و تنها عملیات حرارتی سخت کردن است که در سطح متمرکز می‌شود. از آنجایی که سطح باید کربن کافی جهت سخت شدن داشته باشد، این عملیات معمولاً بر روی فولادهای کربنی که شامل ۰/۳۵ تا ۰/۵ درصد کربن داشته باشند اعمال می‌شود. همچنین فولادهای کم‌آلیاژ که دارای حداکثر ۱ درصد کرم و در حدود ۰/۲۵ درصد مولیبدن و ۰/۵ درصد نیکل باشند را نیز از این روش سختی سطحی می‌کنند. در این روش تنشهای فشاری حاصل از مارتنزیت شدن لایه سطحی استحکام خستگی قطعه را نیز افزایش می‌دهد.

برای به دست آوردن ساختار و خواص مکانیکی مناسب (چقرمگی خوب) در مغز قطعاتی که باید به روش عملیات حرارتی موضعی سخت شوند؛ ابتدا آنها را مارتنزیت کرده و بازپخت می‌دهند و یا نرماله می‌کنند، سپس با حرارت دادن موضعی، سطح قطعات را آستنیت و بلافاصله سریع سرد می‌کنند. بنابراین در حالی که درصد کربن قطعه در تمام نقاط ثابت و در حدود ۰/۴ درصد است، مغز قطعه مارتنزیت بازپخت شده و یا مخلوطی از فریت و پرلیت با چقرمگی خوب بوده و سطح آن از مارتنزیت با سختی نسبتاً بالا تشکیل شده است. سطح و مغز در این قطعات معمولاً توسط یک لایه بینیتی از یکدیگر جدا شده و به این ترتیب احتمال پوسته شدن به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

سخت کردن شعله‌ای

در این روش سطح قطعه به کمک یک شعله گازی حرارت داده شده و پس از آستنیته شدن بلافاصله سریع سرد می‌شود. شعله مورد نیاز در این روش را می‌توان از طریق مشعل اکسیژن و

یک گاز قابل احتراق مانند استیلن^۱، پروپان^۲ و یا گاز طبیعی^۳ تهیه نمود. قطعات کوچک و یا نواحی موضعی مانند لبه ابزارهای برش و یا انتهای آچارها را می‌توان به کمک شعله دستی حرارت داده و سپس تمام قطعه را در آب سریع سرد کرد. برای سخت کردن قطعات بزرگ و یا سطوح زیاد می‌توان از دستگاههای خودکار که در آنها شعله و یک آب‌فشان تعبیه شده‌اند، استفاده کرد.

از جمله معایب عمده سخت کردن شعله‌ای، اکسایش سطح و یا کاهش درصد کربن سطح قطعه است. این امر ناشی از تماس مستقیم قطعه گرم شده با اکسیژن هواست. به علاوه، نوع شعله نیز در این رابطه دخالت دارد. با استفاده از شعله‌های اکسیدکننده ضعیف و یا احیاکننده، این عیب را تا حدودی می‌توان کاهش داده و یا حتی حذف کرد.

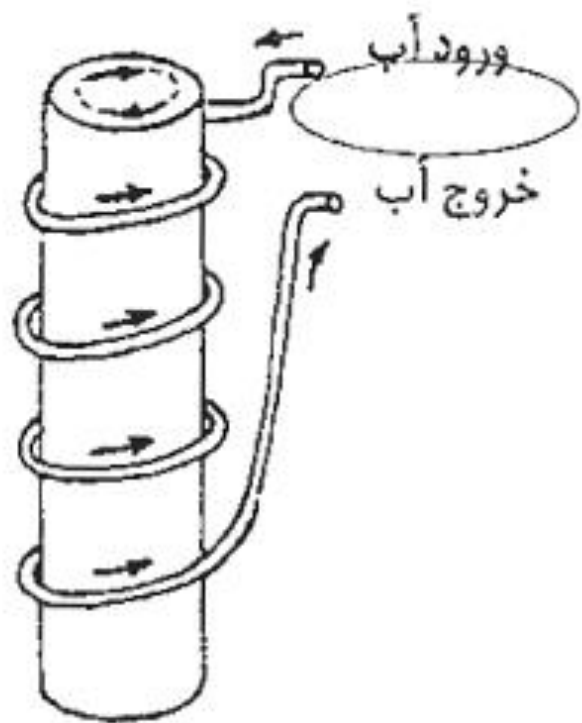
مقدار کربن توصیه شده و مناسب برای فولادهایی که قرار است به روش سخت کردن شعله‌ای سخت شوند، در حدود $0/4$ تا $0/5$ درصد است. همچنین فولادهایی که بیشتر از این مقدار کربن داشته باشند را نیز می‌توان با استفاده از این روش سخت کرد. ولی حرارت دادن و سرد کردن این نوع فولادها باید با دقت بسیار زیاد انجام شود تا اینکه از شکسته شدن و یا ترک برداشتن احتمالی آنها جلوگیری شود.

سخت کردن القایی

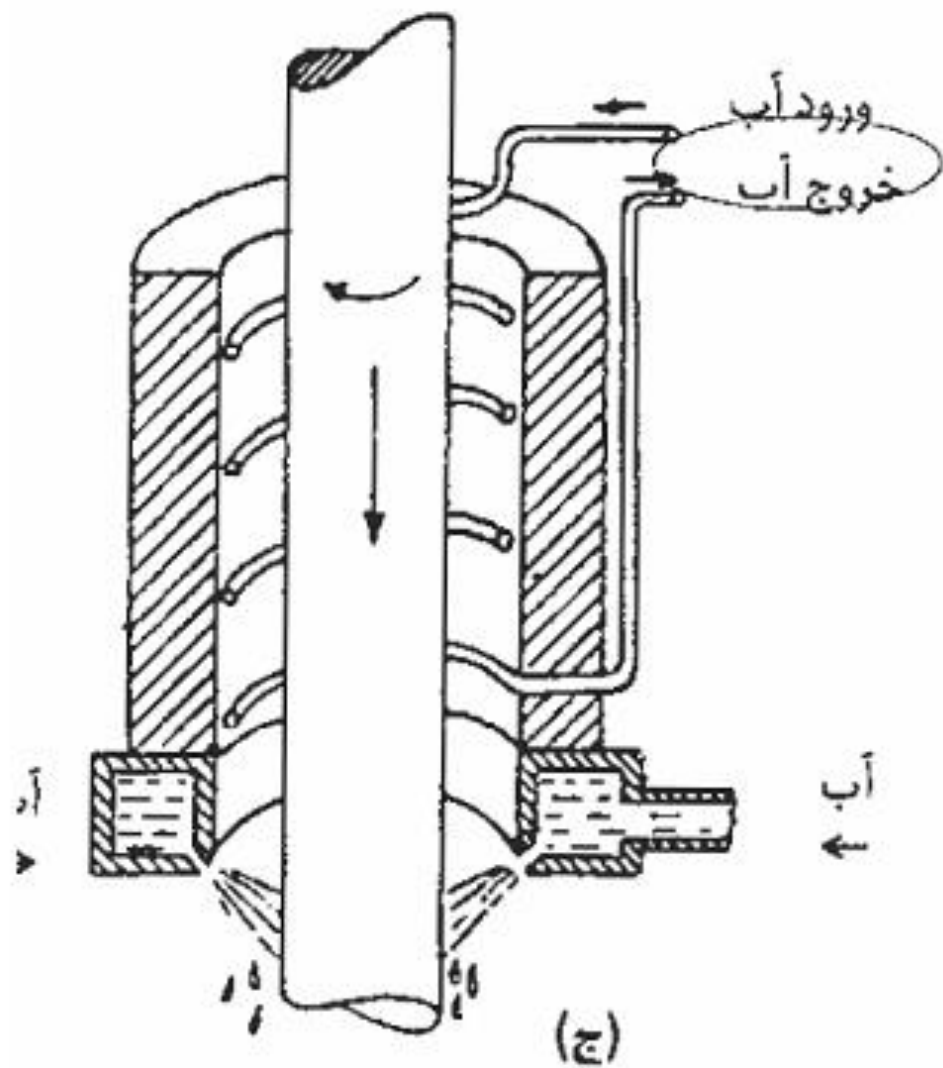
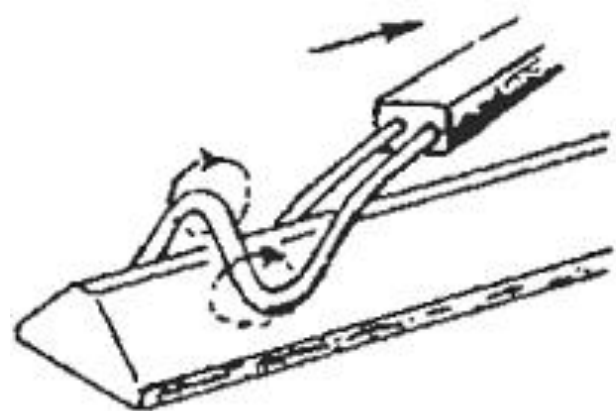
اصول این روش شبیه به سخت کردن شعله‌ای است.

اما در این روش حرارت دادن سطح به کمک یک سیم‌پیچ

هادی که از آن جریان متناوب با فرکانس زیاد (در محدوده ۲ تا ۵۰ کیلوهرتز^۱) عبور می‌کند انجام می‌شود.



(ب)



(ج)

پایان