فصل ۵

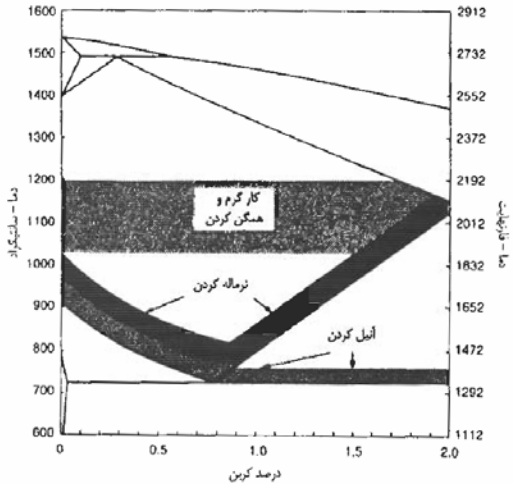
عملیات حرارتی برای تشکیل ساختارهای تعادلی

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.

همگن کردن[1] (یکنواخت کردن) Homogenising

از جمله مشخصه‌های فولادهای ریخته‌گری شده عبارت از ساختار شاخه‌ای[2]، جدایش موضعی[3] و ناپکنواختی در ترکیب شیمیایی[4] است. پدیده‌های مزبور که ناشی از ناتعادلی 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.



شکل ۵-۱

این عملیات به همگن (یکنواخت) کردن و یا آنیل نفوذی[1] 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.

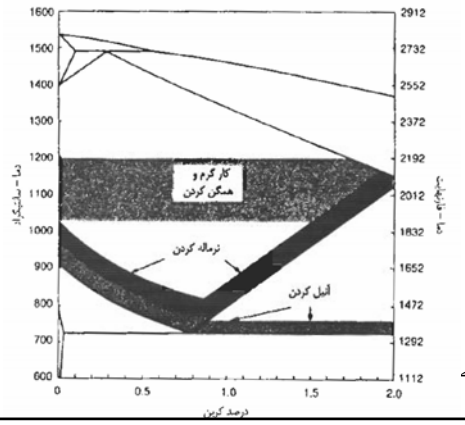
آنیل کردن[2] Annealing

به هر نوع عملیات

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

آنیل کامل[1] Full annealing

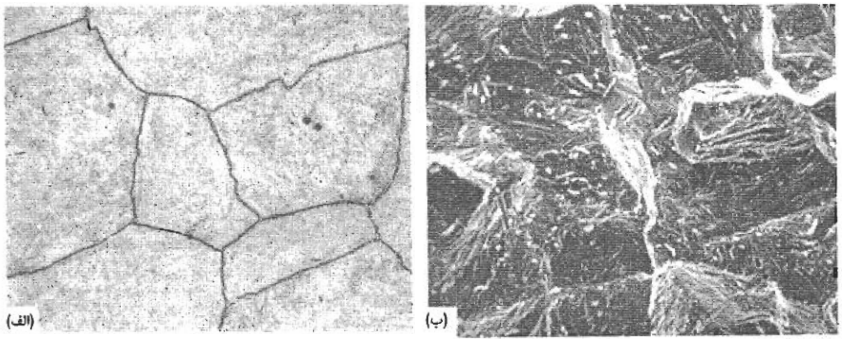
آنیل کامل عبارت از حرارت دادن فولاد در گسترهٔ دمایی نشان داده شده در شکل ۵-۱ و سپس سرد کردن آهسته، معمولاً در کوره است. تحت شرایط فوق آهنگ سرد شدن در حدود ۰/۰۲ درجه سانتیگراد بر ثانیه است. همچنان که از شکل ۵-۱ مشخص است، گسترهٔ دمایی آستنیته کردن برای آنیل کامل، تابع درصد کربن فولاد است. بدین صورت که، برای فولادهای هیپریوتکتوییدحدود ۵۰ درجهٔ سانتیگراد بالای خط A_3 و برای فولادهای هایپریوتکتوییدحدود 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 هیپریوتکتوییدرا در ناحیه تکفازی آستنیت و فولادهای هایپریوتکتوییدرا در ناحیهٔ دوفازی آستنیت - سمنتیت حرارت می‌دهند.

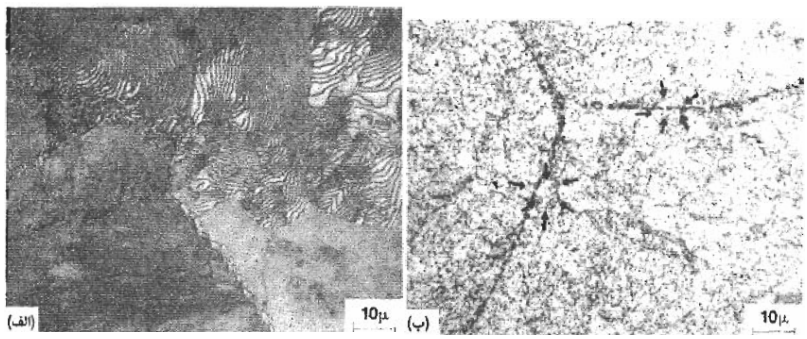
علت آستنیته کردن فولادهای هایپریوتکتوییددر ناحیهٔ دوفازی آستنیت - سمنتیت این است که سمنتیت پریوتکتوییددر این فولاد به صورت کروی و مجتمع شده در آید. اگر چنین فولادی تا بالای خط A_{cm} حرارت داده شود، در ضمن آهسته سرد شدن سمنتیت پریوتکتوییدبه صورت شبکه پیوسته‌ای در مرز دانه‌های آستنیت رسوب می‌کند و در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



شکل ۵-۲ (الف) شبکهٔ پیوسته کاربید در مرز دانه‌های آستنیت اولیه در فولاد ۵۲۱۰۰ میکروساختار نوری، محلول حکاکی نایتال، بزرگنمایی × ۶۰۰ (ب) شکست در امتداد کاربیدهای تشکیل شدد در مرز دانـه‌های آستنیت در فولاد ۵۲۱۰۰ میکروساختار الکترونی. بزرگنمایی × ۴۱۵ [۱].

بنابراین در عملیات آنیل کامل، هدف از آستنیته کردن

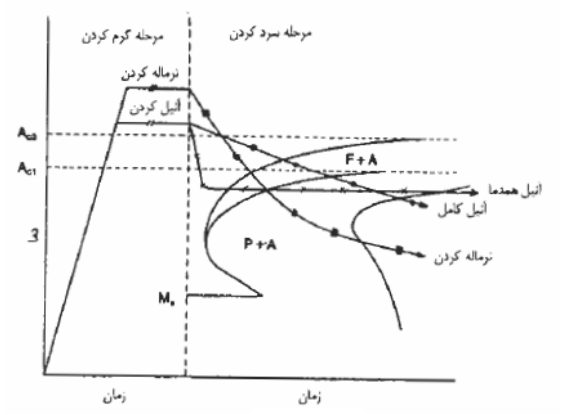
فولادهای هایپریوتکتویید در ناحیهٔ دوفازی آستنیت - سمنتیت، عبارت از شکستن شبکهٔ پیوسته کاربید یاد شده و تبدیل آن به ذرات ریز و کروی شکل مجزا از یکدیگر است. نیروی



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

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

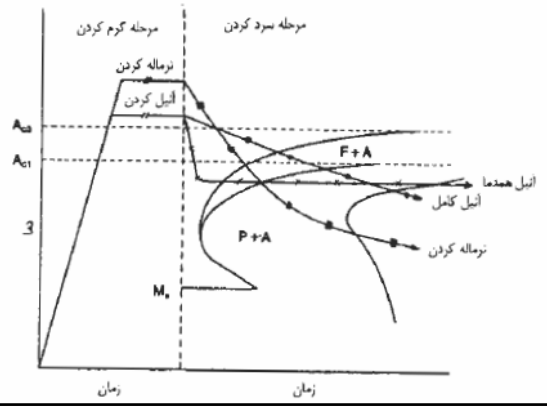
به علت سرد شدن آهسته، فریت تشکیل شده دارای دانه‌های درشت و هم محور بوده و پرلیت دارای فاصله بین لایه‌ای نسبتاً زیاد (پرلیت خشن یا درشت) است. از جمله مشخصه‌های مکانیکی این میکروساختار عبارت از کاهش سختی و استحکام و افزایش انعطاف پذیری است.



شکل ۵-۴

آنیل همدما

این عملیات، شامل حرارت دادن فولاد در دو دمای مختلف است، ابتدا عملیات آستنیته کردن که در همان گسترهٔ دمایی 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 همدما 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 همدما در فولادهای هیپویوتکتوییدی، یوتکتوییدی و هایپریوتکتوییدی به ترتیب عبارت از فریت - پرلیت، پرلیت و پرلیت - سمنتیت است. ولی پرلیت حاصل نسبتاً ظریفتر و درصد فریت و سمنتیت پرویوتکتوییدی تا حدودی کمتر است.

از جمله موارد عمده کاربرد آنیل همدما در رابطه با فولادهای آلیاژی است که دارای سختی‌پذیری[1] بالایی‌اند (به فصل ششم مراجعه شود). در صورتی که بر روی این فولادها عملیات حرارتی آنیل کامل انجام شود به علت سختی‌پذیری زیاد، ساختار نهایی حاصل به جای پرلیت خشن، ممکن است پرلیت ظریف و یا حتی مخلوطی از پرلیت ظریف و بینیت بالایی باشد.

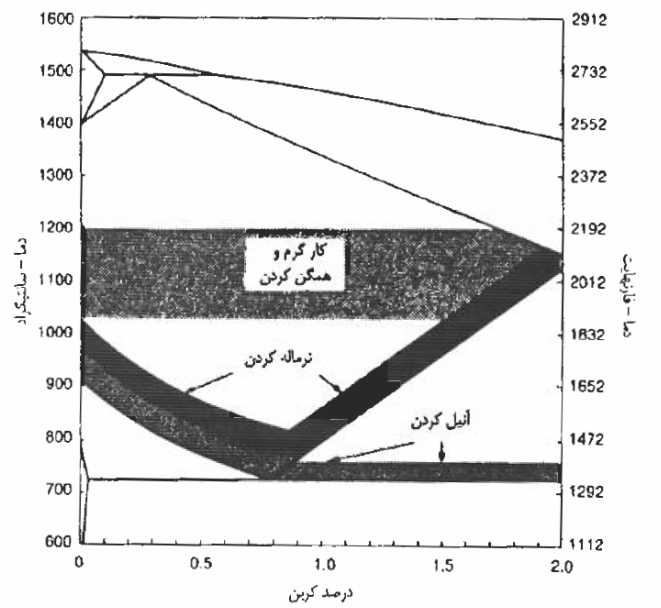
نرماله کردن[3] Normalizing

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

در نرماله کردن، دمای آستنیته کردن برای فولادهای هیپویوتکتوییدی کمی بالاتر از گسترهٔ دمایی مربوط به آنیل کردن است در حالی که برای فولادهای هایپریوتکتوییدی از گسترهٔ دمایی حدود ۵۰ درجهٔ سانتیگراد بالای A_{cm} استفاده می‌شود

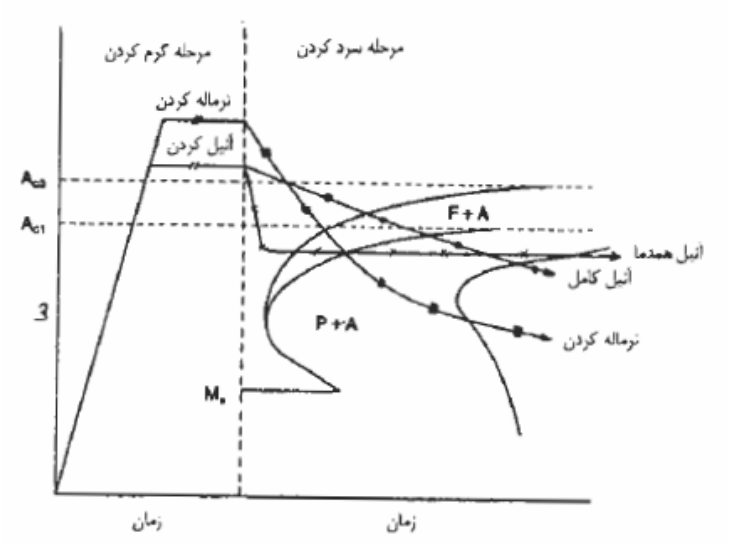
برخلاف آنیل کامل که فولاد در کوره

سرد می‌شود در عملیات نرماله کردن قطعات پس از آستنیته شدن در هوا سرد می‌شوند



فصل پنجم

15



فصل پنجم

16

از آنجایی که در نرماله کردن فولادهای هیپویوتکتوییدگستره دمایی آستنیته کردن بالاتر از گستره دمایی مربوط به آنیل است، ساختار آستنیت و همچنین توزیع عناصر آلیاژی از یکنواختی 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 هیپویوتکتوییدی، 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 می‌شود.

برای نرماله کردن فولادهای هایپریوتکتوییدی از گسترهٔ دمایی بین خط A_{cm} و حدود ۵۰ درجهٔ سانتیگراد بالای آن استفاده می‌شود (شکل ۵-۱). انتخاب این گسترهٔ دمایی به منظور ریز کردن دانه‌های آستنیت، انحلال کاربیدهای راسب شده و همچنین شکسته شدن شبکهٔ پیوسته کاربیدی که احتمالاً در ضمن عملیات قبلی در مرز دانه‌ها به وجود آمده‌اند، است.

از آنجایی که در نرماله کردن قطعات در هوا سرد می‌شوند، میکروساختارهای به‌دست آمده اختلاف قابل توجهی با میکروساختارهای حاصل از آنیل دارند.

با توجه به اینکه در نرماله کردن
فریت و سمنتیت و فاصله بین لایه‌ای پرلیت هر دو کاهش می‌یابند. بنابراین، در مقایسه با خواص حاصل از فرایند آنیل، استحکام و سختی افزایش یافته و انعطاف پذیری تا حدودی کاهش می‌یابد.

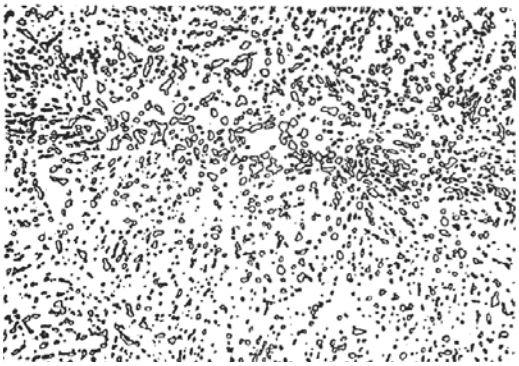
نکته‌ای که باید در رابطه با سرد شدن قطعات در هوا در ضمن نرماله کردن بدان توجه داشت این است که، نقاط مختلف در داخل یک قطعه با آهنگهای متفاوت سرد می‌شوند.

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[5] Spheroidizing

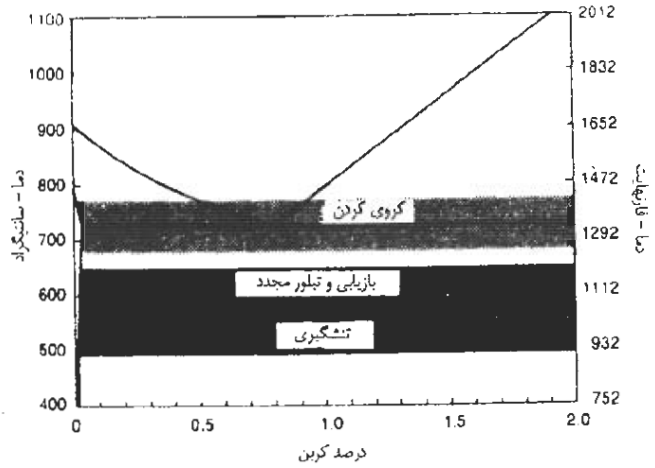
انعطاف پذیرترین و نرمترین شرایط در هر فولاد مربوط به میکروساختاری شامل سمنتیت کروی توزیع شده به طور یکنواخت در زمینه فریتی می‌شود.



شکل ۵-۵ میکروساختار سمنتیت کروی در فولاد Fe-٪۰٫۶۶C-٪۱Mn که با حرارت دادن مارتنزیت به مدت ۲۴ ساعت در ۷۰۴ درجهٔ سانتیگراد (۱۳۰۰ درجهٔ فارنهایت) به دست آمده است. محلول حکاکی، پیکرال، بزرگنمایی × ۱۰۰۰ [۱].

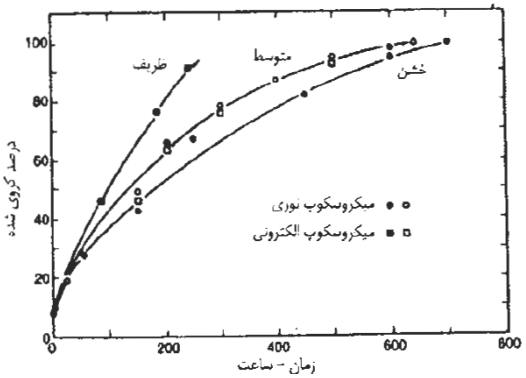
انعطاف‌پذیری بسیار خوب فولادهای کم‌کربن و کربن متوسط با سمنتیت کروی از این نظر اهمیت دارد که این فولادها اغلب توسط کار سرد شکل می‌گیرند. از طرف دیگر از آنجایی که ساخت قطعات از جنس فولادهای پرکربن اغلب نیاز به ماشین‌کاری زیاد دارند، سختی کم میکروساختار سمنتیت کروی این فولادها اهمیت قابل ملاحظه‌ای دارد.

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 می‌آید. از آنجایی که کروی‌کردن 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 گسترده‌های 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 شدنّ 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 ۷Si٪ ۰-۷۴C-٪ ۰-Fe-٪ در ۷۰۰ درجهٔ سانتیگراد (۱۲۹۲ درجه فارنهایت) [۱].

در حقیقت لایه‌های

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

اگر کاربیدهای اولیه به شکل ذرات ریز و مجزا از یکدیگر (بینیت) باشند، کروی شدن بسیار سریعتر خواهد بود. اگر ساختار اولیه مارتنزیت باشد، کروی شدن حتی سریعتر خواهد شد. در حقیقت در ساختارهای مارتنزیتی نیازی به شکسته شدن صفحات سمنتیتی و سپس کروی شدن نیست، بلکه کروی شدن بدین صورت است که کربن فوق اشباع در ضمن خروج از شبکه آهن و تشکیل سمنتیت به شکل کروی 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_1-Ac_3 برای فولادهای هیپویوتکتوییید و یا بین Acm-Ac برای فولادهای هایپریوتکتوییید به منظور آستنیته کردن جزیی، سرد کردن آهسته تا زیر دمای Ar_1، 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 آستنیته کردن جزیی، سرد کردن تا زیر دمای Ar_1 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 کروی کردن، آهنگ سرد شدن تا دمای اتاق اثری بر روی درصد سمنتیت کروی و یا ساختار زمینه ندارد. لیکن، ترجیح داده می‌شود که قطعات در کوره و یا در هوا سرد شوند.

از آنجایی که در روشهای دوم و سوم فولاد به طور جزیی آستنیته می‌شود، تجزیه و شکسته شدن لایه‌های سمنتیت تسریع شده و بنابراین انتظار می‌رود که کروی شدن فولادهای پرلیتی سریعتر از روش اول باشد. در روش سوم، فولاد متناوباً در حوالی دمای Ae_1 گرم و سرد می‌شود. در حقیقت هر بار که فولاد به ناحیه دوفازی می‌رسد، عمدتاً لایه‌های سمنتیت حل شده و با سرد شدن فولاد در زیر دمای Ar_1 به کره‌های سمنتیت افزوده می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که کروی 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.

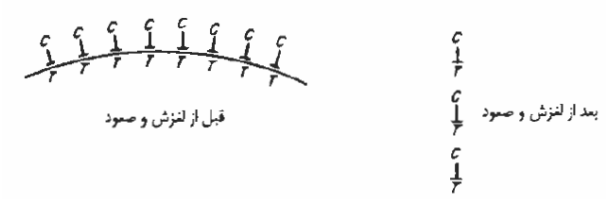
بازیابی[1] و تبلور مجدد[2]

۱- Recovery Recrystallization

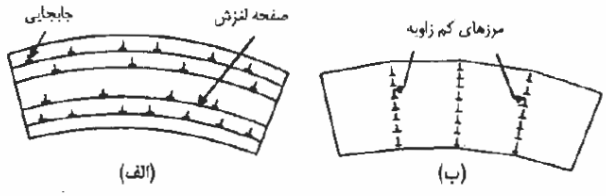
انجام کار سرد بر روی فولادها (تقریباً تمامی فلزات و آلیاژها) باعث افزایش استحکام و سختی و کاهش انعطاف پذیری و یا شکل‌پذیری آنها می‌شود. این پدیده که به کار سختی[3] موسوم است ناشی از افزایش پیوسته معایب بلوری در اثر ادامه انجام کار سرد است. در اثر کار سرد انرژی داخلی فلز افزایش یافته و بنابراین از نظر ترمودینامیکی ناپایدار خواهد شد. حرارت دادن چنین قطعه‌ای باعث از بین رفتن معایب بلوری موجود و بازیابی میکروساختار و خواص فیزیکی و مکانیکی اولیه می‌شود. این پدیده در کتابهای متالورژی تحت عنوان بازیابی و تبلور مجدد بررسی و مطالعه شده که در ادامه به طور مختصر شرح داده می‌شود.

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.



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



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 برمی‌گردد. در حالی که، تغییرات خواص مکانیکی چندان محسوس نیست. در حقیقت، عملیات حرارتی تبلور مجدد است که باعث بازیابی خواص مکانیکی قطعهٔ کار سرد شده می‌شود.

تغییراتی که در

ساختار بلوری در ضمن عملیات بازیابی به وجود می‌آید را نمی‌توان به کمک میکروسکوپ نوری مطالعه کرد و نیاز به میکروسکوپ الکترونی دارد.

تبلور مجدد

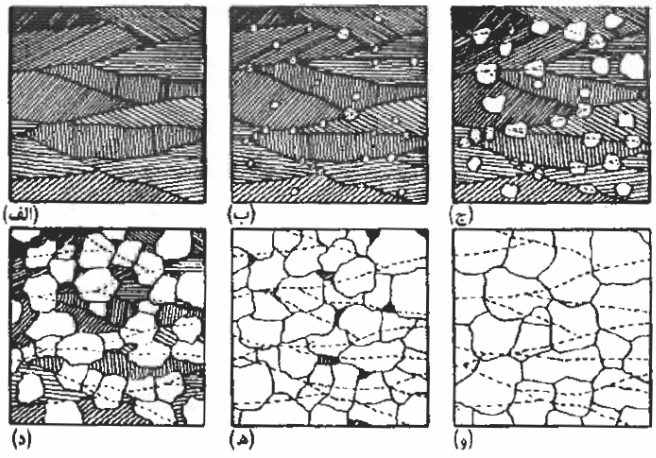
از جمله اثرات کار سرد عبارت از تغییر شکل دانه‌ها در جهت اعمال نیرو و ایجاد تنشهای داخلی است.

در عملیات حرارتی تبلور مجدد دانه‌های جدید هم محور

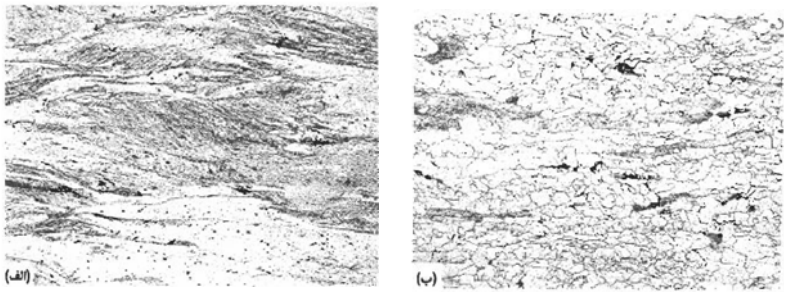
و عاری از تنش در فلز کار سرد شده به وجود می‌آید.

در حقیقت، تبلور مجدد ادامهٔ عملیات حرارتی بازیابی است و

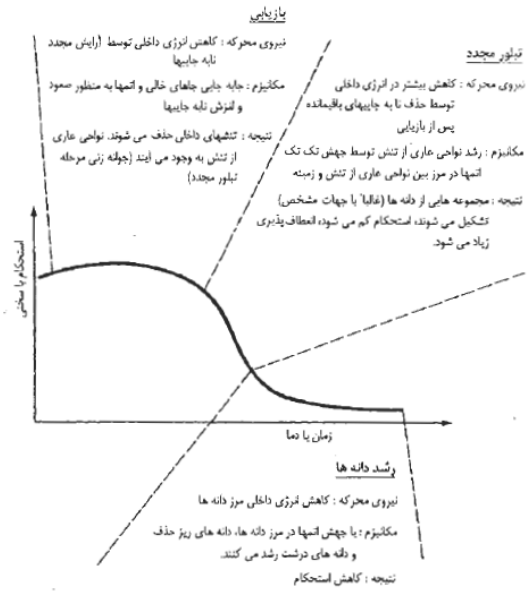
دانه‌های جدید عاری از تنش می‌توانند از دانه‌های فرعی حاصل از عملیات بازیابی به وجود آیند. اساساً فرایند تبلور مجدد شامل جوانه‌زنی و رشد بوده که نیروی محرکه برای این عملیات،



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-هـ) 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 Fe-۰/۰۰۳C 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 ۵۳۸ درجهٔ سانتیگراد (۱۰۰۰ درجه فارنهایت) آنیل 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 × ۱۰۰ [۱].



شکل ۵-۱۳ خلاصه‌ای از نیروی محرکه، مکانیزم و نتایج حاصل از بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه‌ها [۵].

تنش گیری[1] Stress relieving

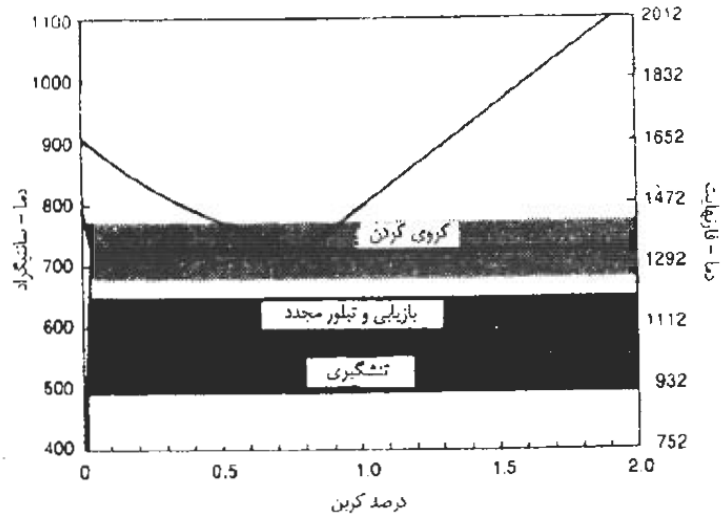
برخی از فرایندهای عملیات حرارتی و یا مکانیکی در قطعات ایجاد تنشهای داخلی می‌کنند که می‌تواند مخرب بوده و بر عملکرد این قطعات تأثیر نامطلوب گذارد. تنشهای داخلی حاصل، ممکن است منجر به تاب برداشتن، ترک خوردن و یا انهدام قطعات در تنشهایی به مراتب کمتر از سطح تنش طراحی شده برای آنها شود. از جمله منابع تنشهای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



پایان فصل پنجم