

بسمه تعالی



دانشگاه شهید بهشتی
دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی

فصل پنجم: عملیات حرارتی برای تشکیل ساختارهای تعادلی

برگرفته از کتاب مبانی و کاربردهای عملیات حرارتی فولادها و چدن ها
(نوشته دکتر محمد علی گل‌عذار)

دکتر محمود سمیع زاده

m_sameezadeh@sbu.ac.ir

فصل پنجم - عملیات حرارتی برای تشکیل ساختارهای تعادلی

در این فصل، روش‌های مختلف عملیات حرارتی که منجر به تشکیل ریزساختارهای تعادلی می‌شوند، بررسی خواهند شد. این ساختارها که همگی شامل فریت و سمیتیت، ولی با توزیع‌های متفاوت‌اند، بیشتر به کمک حرارت دادن فولاد در دماهای تا حدودی بالا و سپس سرد کردن آهسته تا دمای اتاق به دست می‌آیند. در فولادهای آلیاژی، افزون بر فریت و سمیتیت، کاربیدهای آلیاژی نیز وجود دارند. بنابراین، افزون بر ترکیب شیمیایی و ساختار اولیه، دما و زمان حرارت دادن، از جمله عوامل کنترل‌کننده ریزساختار و خواص مکانیکی نهایی‌اند. از جمله خواص مورد نظر در این عملیات عبارت‌اند از: بهبود انعطاف‌پذیری، کاهش تنش‌های داخلی و باقیمانده از عملیات قبلی، بهبود قابلیت ماشین‌کاری و ایجاد یکنواختی در ریزساختار.

همگن سازی (یکنواخت کردن)

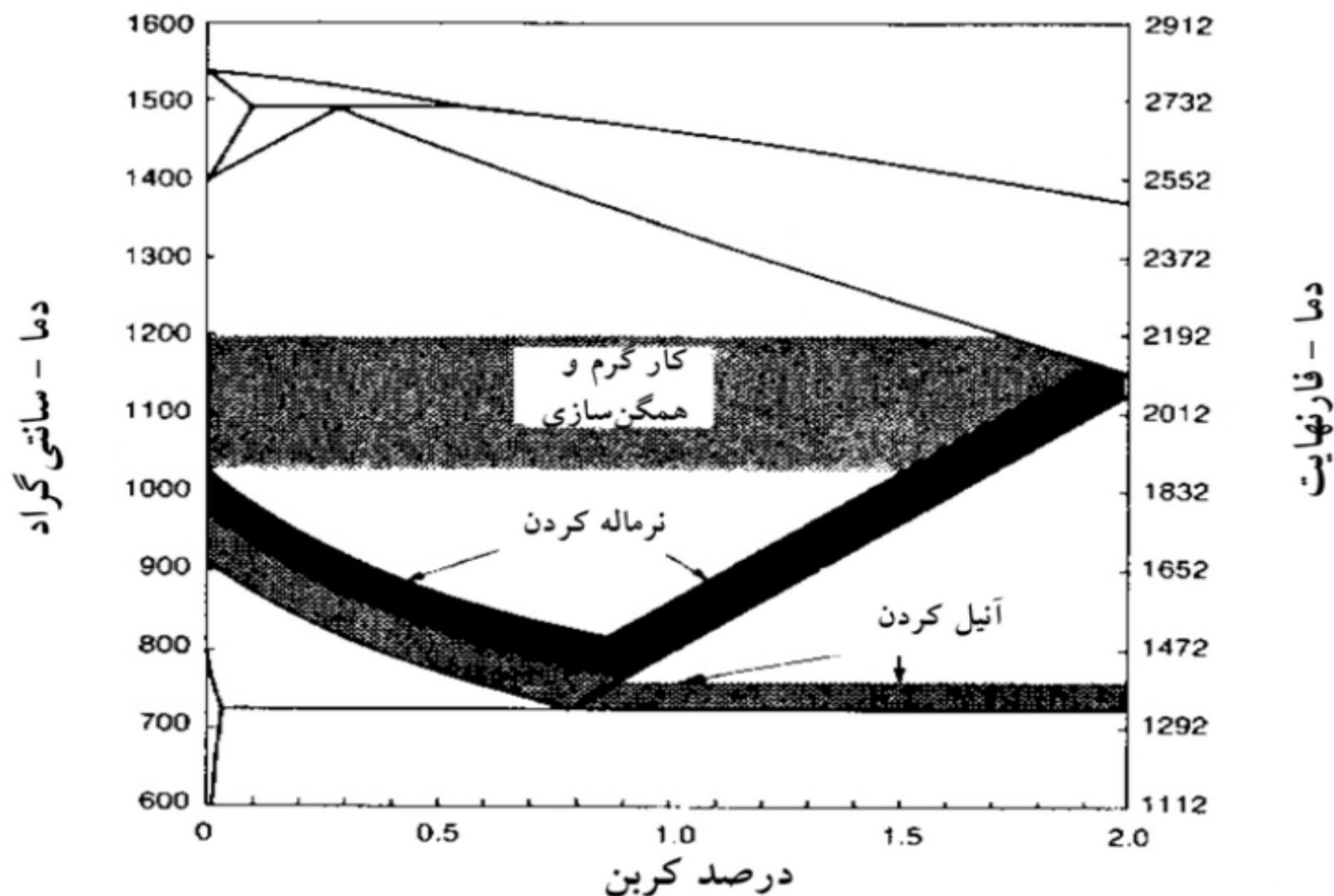
از جمله ویژگی‌های فولادهای ریخته‌گری شده ساختار شاخه‌ای (Dendritic structure)، جدایش موضعی (Segregation) و غیریکنواختی در ترکیب شیمیایی (Coring) است.

این پدیده‌ها که ناشی از **غیرتعادلی سرد شدن و عدم نفوذ کامل عناصر آلیاژی** هستند، باعث **افت خواص مکانیکی فولاد** از جمله قابلیت کارگرم و یا سرد و همچنین کاهش کیفیت و کارایی عملیات حرارتی مختلف می‌شوند.

برای همگن کردن ساختار قطعه را در **دمای نسبتاً بالا** برای مدت زمان **نسبتاً طولانی** حرارت می‌دهند و سپس **به آهستگی** تا دمای اتاق سرد می‌کنند. زمان حرارت دادن به ابعاد و ترکیب شیمیایی قطعه بستگی دارد.

این عملیات به همگن سازی (**Homogenising**) یا آنیل نفوذی (Diffusion annealing) موسوم است.

از آنجایی که دمای انتخاب شده بالا می‌باشد، نفوذ سریع است و بنابراین پس از پایان عملیات، نایکنواختی‌های ریزساختار و ترکیب شیمیایی از بین می‌روند. افزون بر این، فازهای ثانویه مانند کاربیدهای رسوب‌یافته به هنگام انجماد، در آستنیت حل می‌شوند و به صورت محلول درمی‌آیند. هم‌چنان که از شکل ۵-۱ مشخص است، بازه دمایی همگن‌سازی و کارگرم بر یکدیگر منطبق‌اند.



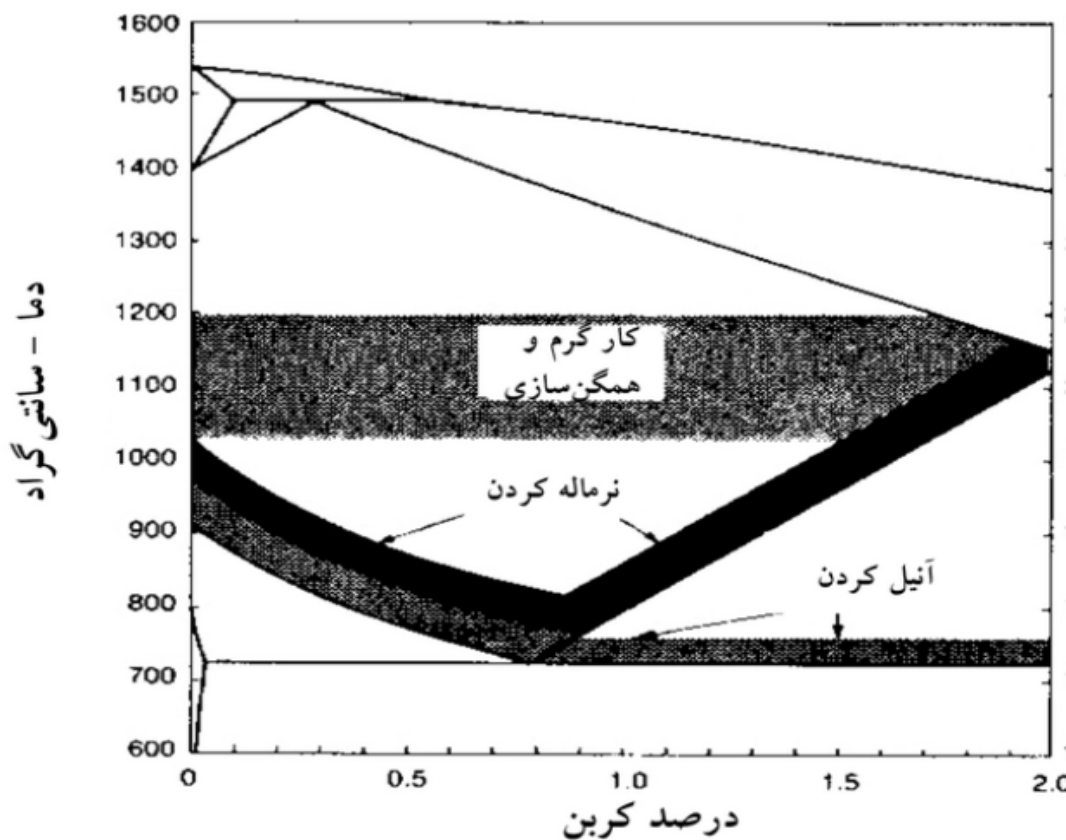
شکل ۱-۵ ناحیه‌ای از نمودار تعادلی آهن - کربن همراه با بازه‌های دمایی مربوط به کار گرم، همگن‌سازی، نرماله کردن و آیل کردن [۱].

آنیل کردن (Annealing)

واژه آنیل به هر نوع عملیات حرارتی که منجر به تشکیل **ساختاری بجز مارتنزیت** و با سختی کم و انعطاف پذیری زیاد شود، گفته می شود.

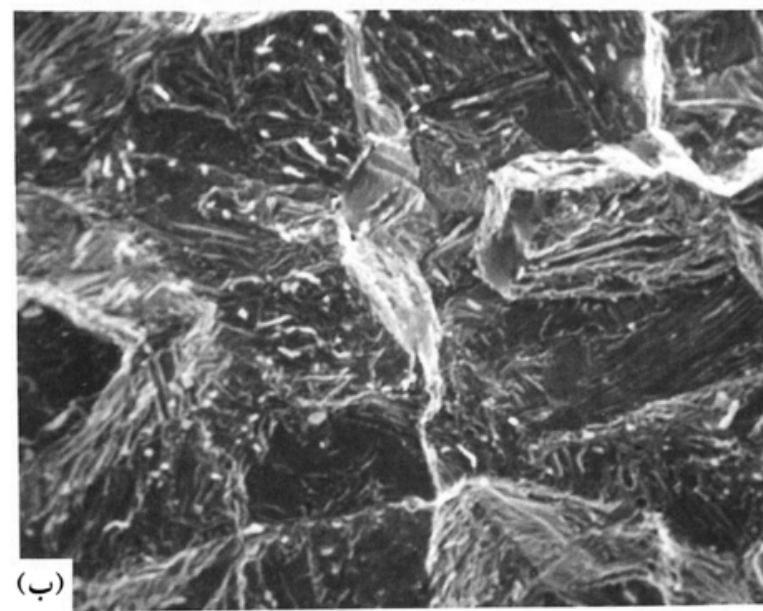
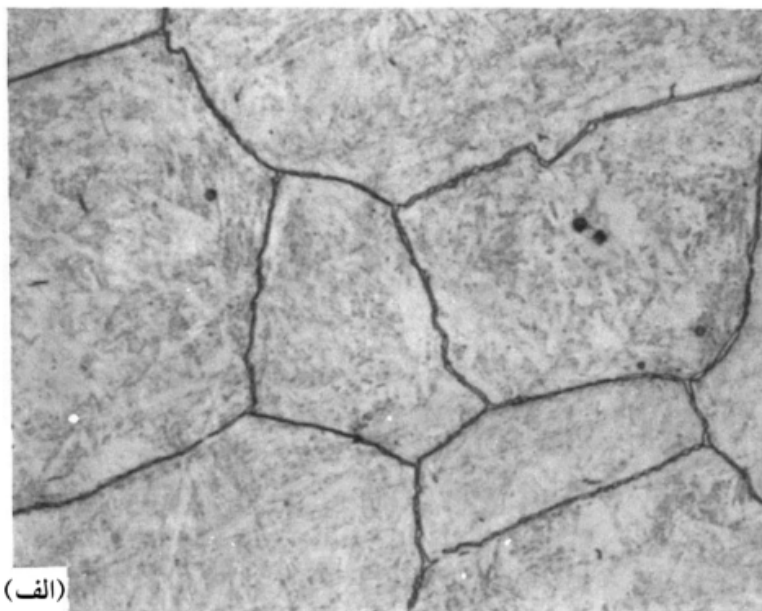
۱- آنیل کامل (Full annealing)

آنیل کامل، حرارت دادن فولاد در بازه دمایی نشان داده شده در شکل ۵-۱ و سپس سرد کردن آهسته (بطور معمول **در کوره**، نرخ سرد شدن حدود $0.2^\circ\text{C}/\text{s}$ درجه سانتیگراد بر ثانیه) است. بازه دمایی آستنیتیزه کردن برای آنیل کامل، تابع درصد کربن فولاد می باشد. بطور کلی در عملیات آنیل کامل، فولادهای **هیپروآکتنوئید را در ناحیه تک فازی آستنیت** (حدود 50°C بالای A3) و فولادهای **هایپروآکتنوئید را در ناحیه دوفازی آستنیت-سمنتیت** (حدود 50°C بالای A1) حرارت می دهند.



اگر فولادهای هایپروآکتنوئید تا بالای خط A_{cm} حرارت داده شود، در ضمن آهسته سرد شدن، سمنتیت پرویوآکتنوئید بصورت شبکه پیوسته ای در مرزدانه های آستنیت رسوب می کند و در نتیجه منجر به ترد و شکننده شدن فولاد می شود. با این تدبیر سمانتیت پرویوآکتنوئید کروی می شود.

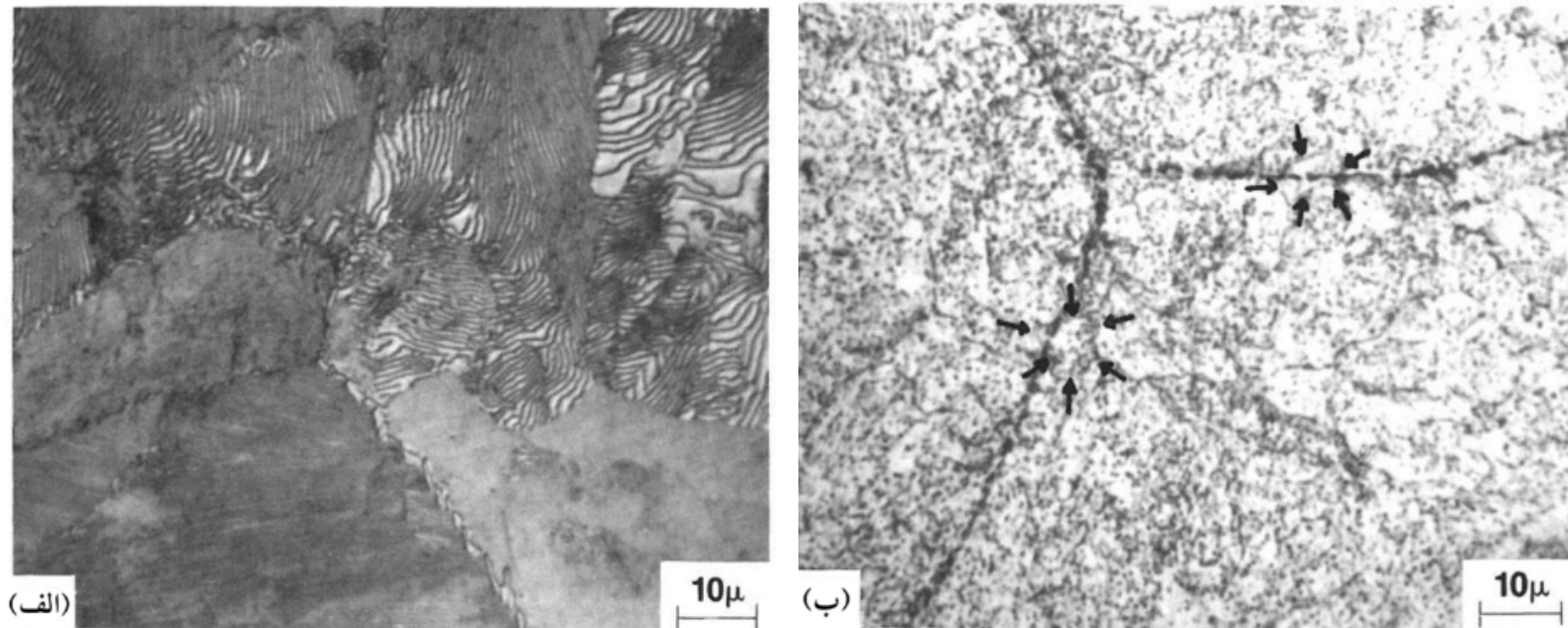
در شکل ۵-۲ فولاد از ناحیه تک‌فازی آستنیت تا بالای خط A_1 آهسته و سپس سریع سرد شده است. ساختار نهایی شامل مارتنزیت در کنار شبکه پیوسته کاربید در مرزدانه‌های آستنیت اولیه است. اگر این فولاد به‌جای سریع سرد شدن، تا زیر خط A_1 آهسته سرد شود، ساختار نهایی شامل شبکه پیوسته کاربید در مرزدانه‌ها و پرلیت خشن در داخل دانه‌ها خواهد شد. شکست در تست ضربه در امتداد شبکه پیوسته کاربید پیشرفت کرده است.



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

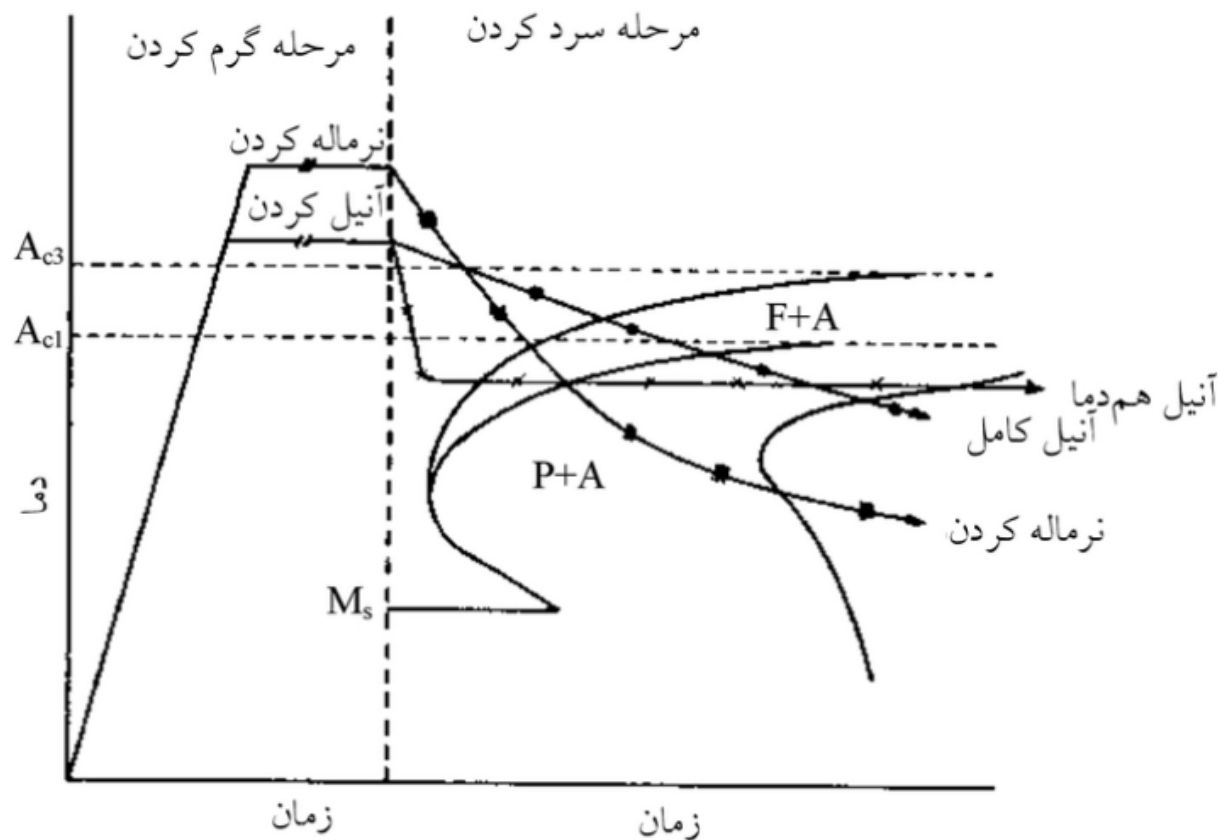
در عملیات آنیل کامل، هدف از آستنیت‌کردن فولادهای هاپریوتکتوئید در ناحیه دوفازی آستنیت-سمنتیت، شکستن شبکه پیوسته کاربید و تبدیل آن به ذره‌های ریز و کروی شکل مجزا است. نیرو محرکه در این عملیات، کاهش انرژی فصل مشترک ناشی از کروی شدن ذرات کاربید و کاهش مقدار فصل مشترک آستنیت-کاربید می‌باشد.

شکل ۵-۳-ب: سمنتیت پرویوتکتوئید در فولاد ۵۲۱۰۰ که بصورت جزئی کروی شده است



شکل ۵-۳-الف) سمنتیت پرویوتکتوئید در فولاد ۵۲۱۰۰ نرم‌شده، (ب) سمنتیت پرویوتکتوئید مربوط به تصویر الف پس از این که فولاد به منظور سخت شدن در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد آستنیت‌شده باشد. در این شکل، ذره‌های بسیار ریز، همان سمنتیت مربوط به پرلیت هستند که کروی شده‌اند. علامت‌های پیکان، دانه‌های ریز آستنیتی را نشان می‌دهند که در ضمن آستنیت‌کردن در ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد به وجود آمده‌اند [۱].

در آنیل کامل نه تنها دمای آستنیت کردن بلکه آهنگ سرد شدن نیز از اهمیت ویژه ای برخوردار است. سرد کردن آهسته که معادل **سرد شدن در کوره** می باشد، باعث می شود که درضمن عبور از خطوط A_1 و A_3 ، (در فولاد هیپوئکتوئید)، نخست فریت و سپس پرلیت از آستنیت بوجود آید. به علت آهسته سرد شدن، فریت تشکیل شده دارای دانه های درشت و هم محور است و پرلیت، دارای فاصله بین لایه ای نسبتاً زیاد (پرلیت خشن/درشت) می باشد. از جمله ویژگی های مکانیکی این ریزساختار، کاهش سختی و استحکام و افزایش انعطاف پذیری است.

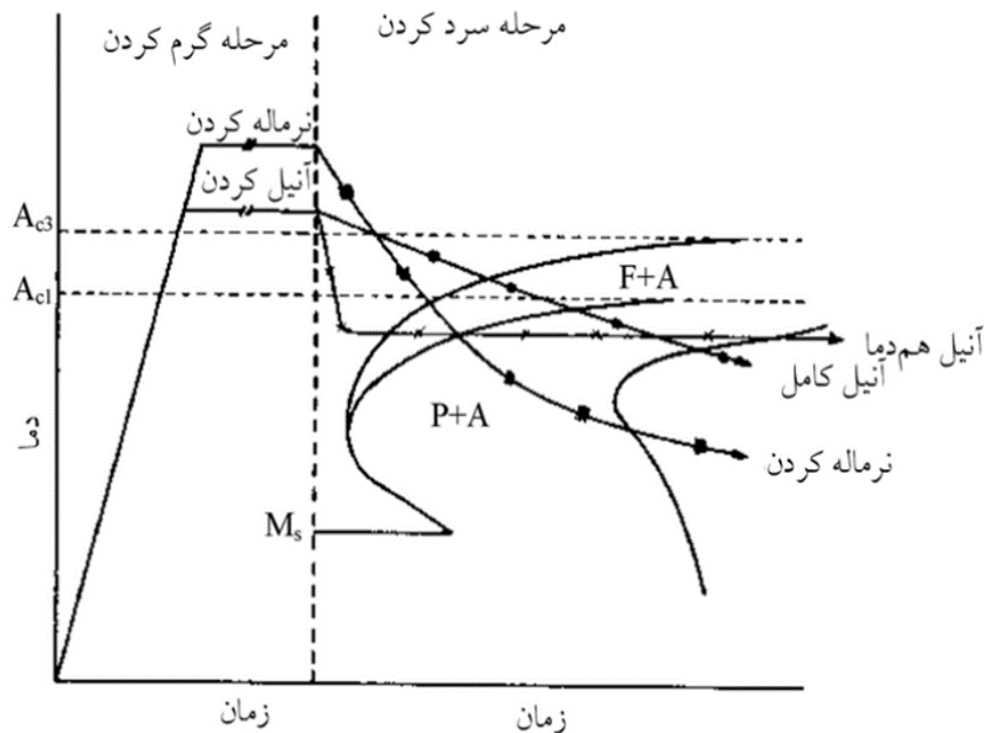


شکل ۴-۵ شمایی از تغییرهای دما - زمان برای عملیات نرماله کردن (■)، آنیل کامل (●) و آنیل هم دما (*) [رسم دوباره با استفاده از مرجع ۱].

آنیل هم‌دما

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

شکل ۴-۵، شمایی از مراحل گرم و سرد شدن را در عملیات آنیل هم‌دما برای یک فولاد هیپویوتکتوئید نشان می‌دهد. **مشابه با آنیل کامل**، ریزساختار حاصل از آنیل هم‌دما در فولادهای هیپویوتکتوئید، یوتکتوئید و هایپریوتکتوئید به ترتیب، فریت-پرلیت، پرلیت و پرلیت-سمنتیت است. **ولی پرلیت حاصل تاحدودی ظریف‌تر و درصد فریت و سمنتیت پرویوتکتوئید تاحدودی کم‌تر می‌باشد.**



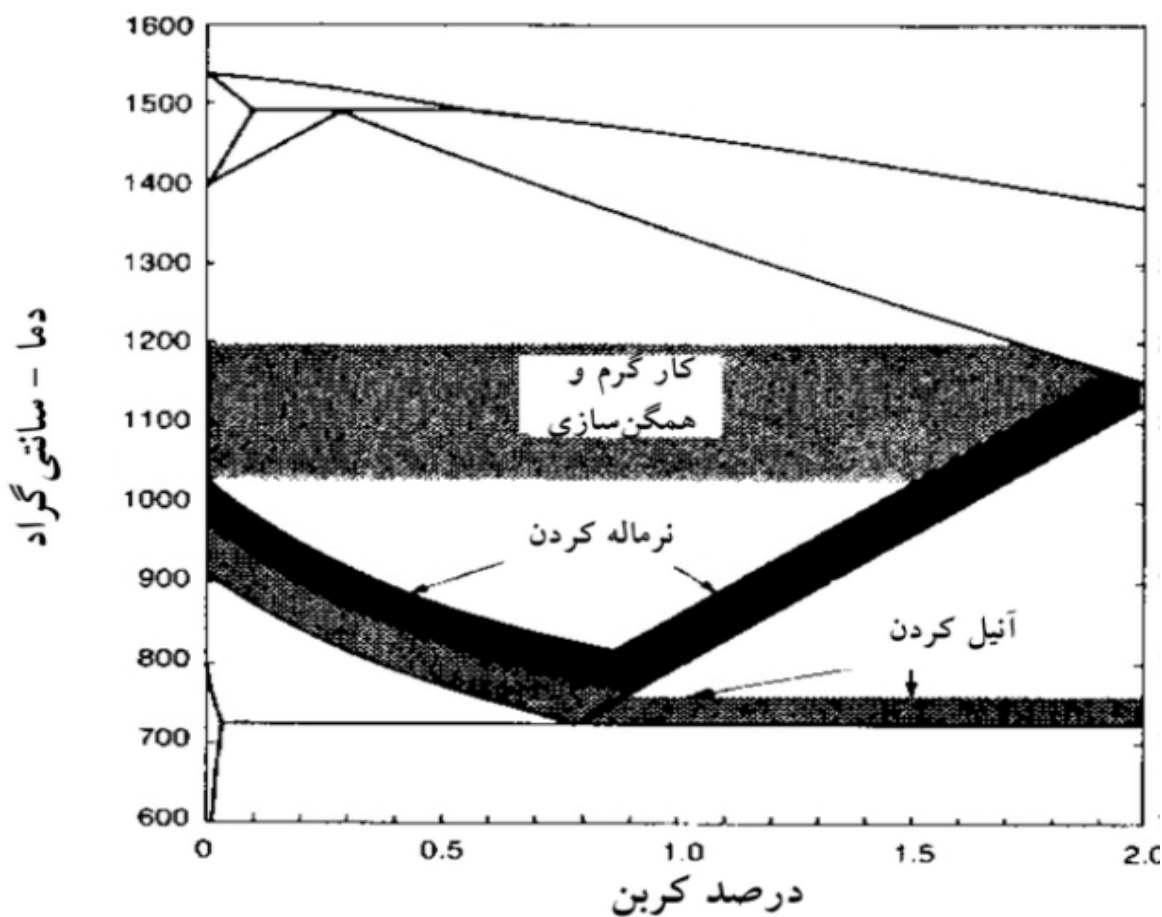
از جمله موارد عمده کاربرد آنیل هم‌دما، در رابطه با فولادهای آلیاژی است که دارای سختی‌پذیری^۱ بالایی هستند (به فصل ششم مراجعه شود). در صورتی که روی این فولادها عملیات حرارتی آنیل کامل انجام شود، به علت سختی‌پذیری زیاد، ساختار نهایی حاصل به جای پرلیت خشن، ممکن است، پرلیت ظریف و یا حتی مخلوطی از پرلیت ظریف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

آنیل هم‌دما در ضمن مراحل ساخت قطعه‌های فولادی نیز استفاده می‌شود. اگر یک شمش ریخته‌گری یا نوردشده از جنس فولاد آلیاژی سخت‌شونده در هوا^۲ را از ناحیه آستنیت تا دمای اتاق در هوا سرد کنند، احتمال تشکیل ترک‌های سطحی روی آن زیاد است. این پدیده به هنگام مارتنزیت شدن مغز قطعه و در نتیجه، اعمال تنش کششی (ناشی از انبساط) روی سطح آن، که پیش‌تر مارتنزیت و سخت شده است، رخ می‌دهد. از این رو، به منظور جلوگیری از ایجاد ترک‌های سطحی، شمش‌های گرم را در کوره‌های آنیل هم‌دما در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نگه می‌دارند تا دگرگونی آستنیت به پرلیت، به طور کامل انجام شود. از این پس، نرخ سرد شدن اثر چندانی در ساختار و خواص نهایی ندارد، با این حال، پس از پایان دگرگونی، قطعه‌ها به طور معمول در هوا سرد می‌شوند.

نرماله کردن (Normalizing)

نرماله کردن، یکی دیگر از انواع روش‌های عملیات حرارتی است که ریزساختار حاصل، مشابه با آنیل کردن، شامل پرلیت، مخلوطی از پرلیت و فریت و یا مخلوطی از پرلیت و سمیتیت (با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد) می‌باشد، اما تفاوت‌های مهمی بین نرماله کردن و آنیل کردن وجود دارد.

□ در نرماله کردن، دمای آستنیتیزه کردن برای فولادهای هیپوئوتکتوئید کمی بالاتر از بازه دمایی مربوط به آنیل کردن است، در حالی که برای فولادهای هایپروئوتکتوئید از بازه دمایی A_{cm} تا حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد بالای A_{cm} استفاده می‌شود.



□ در عملیات نرماله کردن قطعه‌ها پس از آستنیتیزه شدن، در **هوا** سرد خواهند شد.

□ نرخ سرد شدن حدود ۱ - ۰/۱ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه

□ ساختار حاصل مشابه با آنیل کردن شامل پرلیت، مخلوطی از پرلیت و فریت و یا مخلوطی از پرلیت و سمیتیت خواهد بود.

از آنجایی که در نرماله کردن فولادهای هیپویوتکتوئید، بازه دمایی آستنیتیزه کردن، بالاتر از بازه دمایی مربوط به آنیل است، ساختار آستنیت و همچنین توزیع عناصر آلیاژی، از یکنواختی بیشتری برخوردار خواهند بود. یکی دیگر از اهداف مهم نرماله کردن، ریز کردن دانه‌های درشتی است که بیشتر به هنگام کار گرم در دمای بالا و یا در ضمن ریخته‌گری و انجماد به وجود آمده‌اند. هنگامی که قطعه کار گرم یا ریخته‌گری‌شده با دانه‌های درشت در دمایی بین Ac_1 و Ac_3 قرار گیرد، دانه‌های جدید آستنیت جوانه می‌زنند و رشد می‌کنند. در صورتی که دمای آستنیتیزه کردن به بازه دمایی نشان‌داده‌شده در شکل ۵-۱ محدود شود، آستنیتی با ساختار همگن و دانه‌های ریز به وجود می‌آید. حرارت دادن در دماهای بالاتر از بازه دمایی یادشده ممکن است، منجر به درشت شدن دانه‌ها شود (به فصل هفتم مراجعه شود). بنابراین در عملیات نرماله کردن فولادهای هیپویوتکتوئید، نخست 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، ریزساختار حاصل از نرماله کردن می‌تواند در بعضی موارد به‌عنوان عملیات حرارتی نهایی منظور شود. در مواردی که هدف، سخت کردن قطعه‌هایی باشد که دارای دانه‌های درشت هستند، نرماله کردن به‌عنوان عملیات حرارتی اولیه برای ریز کردن دانه‌ها استفاده می‌شود.

□ برای نرماله کردن فولادهای هایپریوتکتوئید، از بازه دمایی بین خطوط A_{cm} و حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد بالای آن استفاده می‌شود. انتخاب این بازه دمایی، به منظور ریز کردن دانه‌های آستینیت، انحلال کاربیدهای رسوب یافته و شکسته شدن شبکه پیوسته کاربیدی که در ضمن عملیات قبلی در مرزدانه‌ها بوجود آمده‌اند، است.

□ از آنجایی که در نرماله کردن قطعه‌ها در هوا سرد می‌شوند، ریزساختارهای بدست آمده تفاوت قابل توجهی با ریزساختارهای حاصل از آنیل دارند. در نرماله کردن فریت و پرلیت در دمایی کم‌تر و با نرخ‌ی بیش‌تر از آنیل کردن تشکیل می‌شوند، بنابراین اندازه دانه‌های فریت و سمنتیت و فاصله بین لایه‌ای پرلیت هردو کاهش می‌یابند. استحکام و سختی، افزایش و انعطاف‌پذیری تا حدودی کاهش می‌یابد.

□ از اثر ابعاد قطعه روی نرخ سرد شدن، دو نتیجه مهم به دست می‌آید: اول آن که در مقاطع خیلی بزرگ، نرخ سرد شدن سطح قطعه ممکن است، به طور چشمگیری بیشتر از ناحیه داخلی باشد و در نتیجه باعث ایجاد تنش در آن شود. دوم این که در قطعه‌های خیلی کوچک (مقاطع نازک)، به‌ویژه 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 روی فولادهای آلیاژی اعمال نشود.

از جمله عوامل مهم که روی خواص مکانیکی فولادهای نرماله و آنیل شده اثر می‌گذارد، **درصد کربن** فولاد است. **هرچه درصد کربن فولاد بیشتر باشد**، پرلیت بیشتری تشکیل می‌شود و استحکام و سختی فولاد زیادتر و انعطاف‌پذیری آن کم‌تر خواهد شد.

به منظور محاسبه استحکام کششی (TS) فولادهای ساده کربنی و کم‌آلیاژ در شرایط نرماله‌شده، از معادله‌های موجود در کتاب‌ها می‌توان استفاده کرد. برای نمونه بعضی از این معادله‌ها عبارت‌اند از:

$$TS = 27 + 56C_p \quad (1-5) \text{ برای فولاد گرم نوردیده شده}^1$$

$$TS = 27 + 50C_p \quad (2-5) \text{ برای فولاد آهنگری شده}^2$$

$$TS = 27 + 48C_p \quad (3-5) \text{ برای فولاد ریخته‌گری شده}^3$$

در این معادله‌ها، استحکام کششی بر حسب ksi و درصد عناصر آلیاژی بر حسب درصد وزنی است) در اینجا C_p که به مجموع پتانسیل‌های کربن^۴ موسوم است، از رابطه ۴-۵ به دست می‌آید:

$$C_p = [1 + 0.5(C - 0.2)]C + 0.15Si + [0.125 + 0.25(C - 0.2)]Mn + [1/25 - 0.5(C - 0.2)]P + 0.2Cr + 0.1Ni \quad (4-5)$$

همان‌طور که از معادله‌های بالا مشخص است، اثر اندازه و ابعاد قطعه در استحکام کششی در نظر گرفته نشده است.

^۱ - Hot - rolled steel

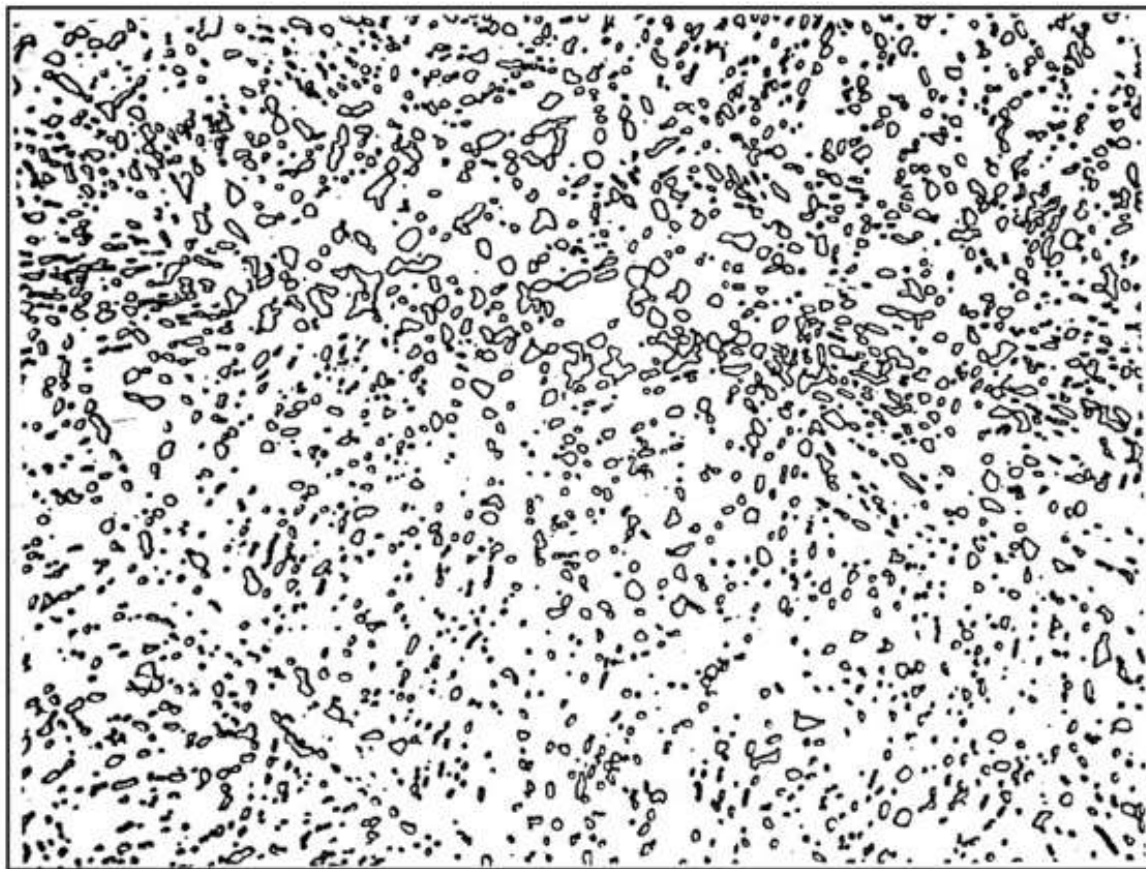
^۲ - Forged steel

^۳ - Cast steel

^۴ - Carbon potentials

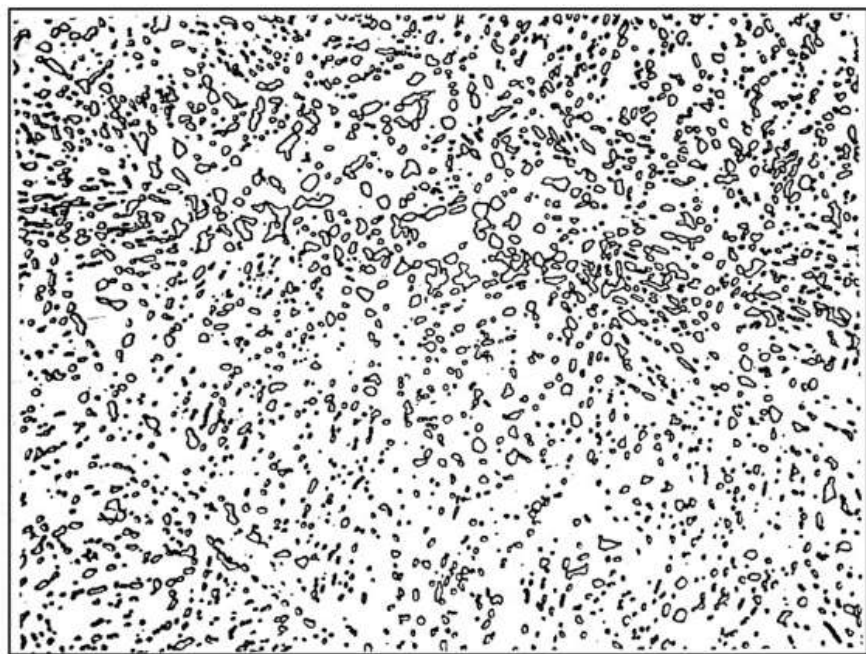
کروی کردن (Spheroidizing)

انعطاف پذیرترین و نرم ترین شرایط در هر فولاد، مربوط به ریزساختاری شامل سمنتیت کروی توزیع شده بطور یکنواخت در زمینه فریتی می شود. انعطاف پذیری زیاد این ریزساختار، مستقیماً مربوط به زمینه یکنواخت و پیوسته فریتی می شود.

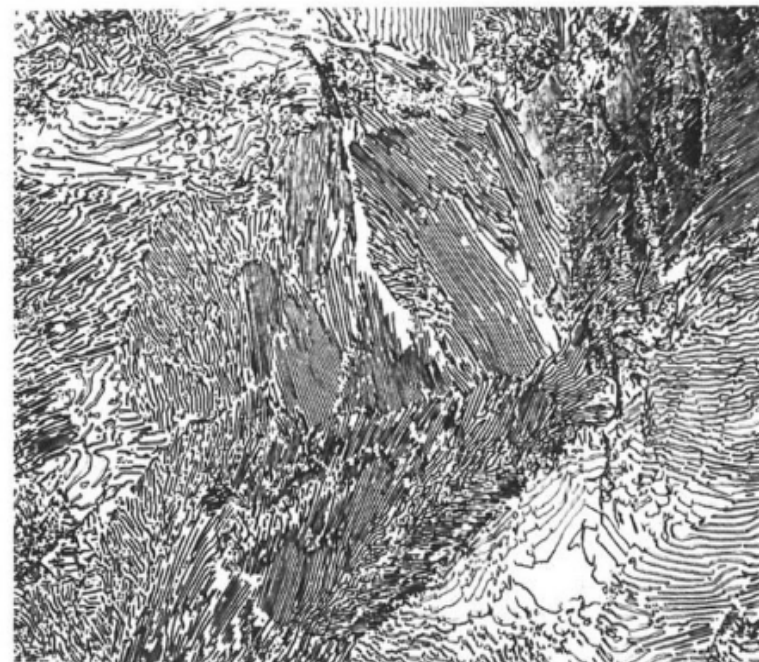


شکل ۵-۵ ریزساختار سمنتیت کروی در فولاد Fe-۰/۶۶C - ۱Mn که با حرارت دادن مارتنزیت به مدت ۲۴ ساعت در ۷۰۴ درجه سانتی گراد (۱۳۰۰ درجه فارنهایت) به دست آمده است. محلول حکاکی پیکرال، بزرگنمایی $\times 1000$ [۱].

در پرلیت (به شکل ۲-۲ مراجعه شود)، لایه‌های سمنتیت باعث ناپیوستگی و تقسیم زمینه فریتی می‌شوند و در نتیجه، تغییر شکل را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهند. بنابراین در مقایسه با ساختار کروی، انعطاف‌پذیری ساختار پرلیت، کمتر و سختی آن، بیشتر است. انعطاف‌پذیری بسیار خوب فولادهای کم کربن و کربن متوسط با سمنتیت کروی از این نظر اهمیت دارد که این فولادها، بیشتر توسط کار سرد شکل می‌گیرند. از طرف دیگر، از آنجایی که ساخت قطعه‌هایی از جنس فولادهای پرکربن، بیشتر وقت‌ها نیاز به ماشین‌کاری زیاد دارد، سختی کم ریزساختار سمنتیت کروی این فولادها از اهمیت زیادی برخوردار است.

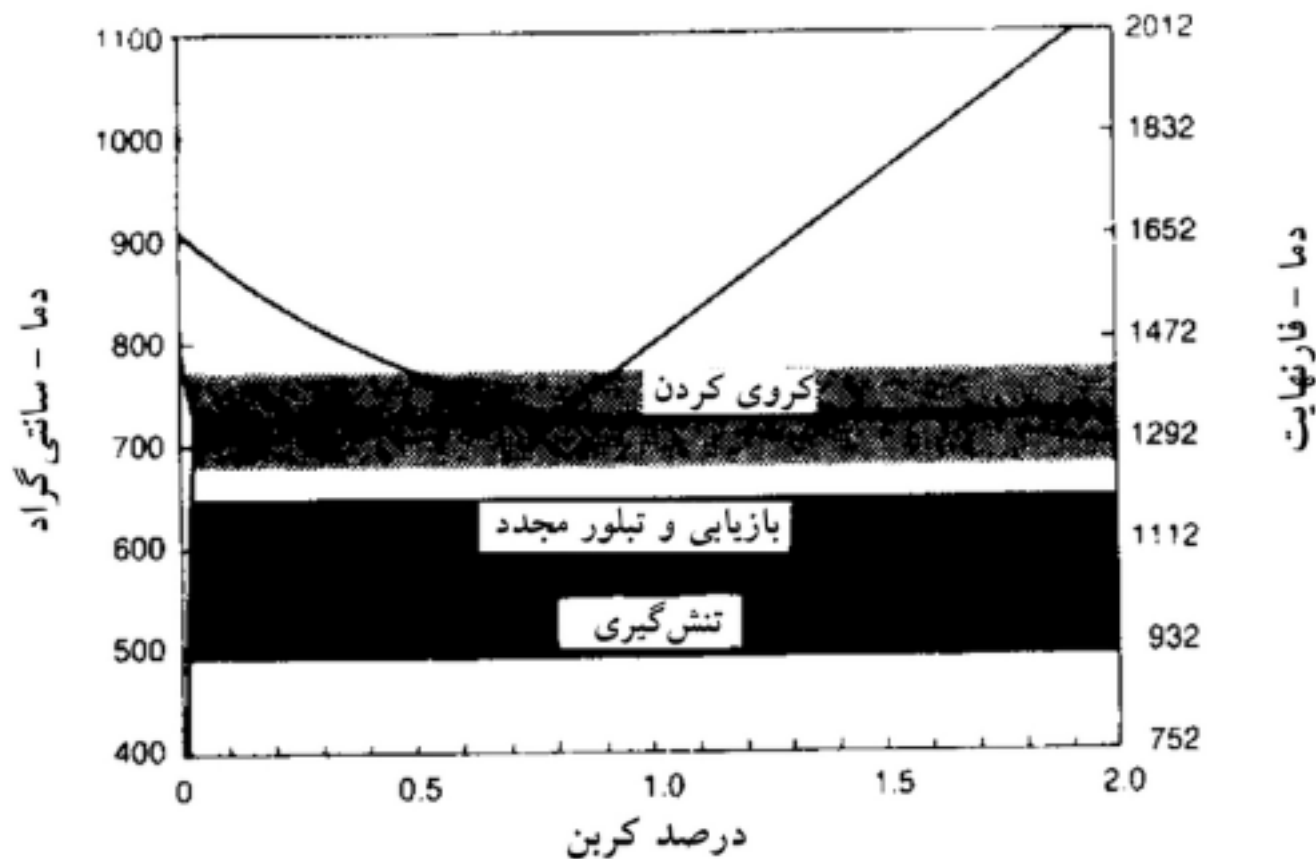


شکل ۵-۵ ریزساختار سمنتیت کروی در فولاد $\text{Fe}-0.66\text{C} - 1\text{Mn}$ که با حرارت دادن مارتنزیت به مدت ۲۴ ساعت در 704°C (درجه سانتی‌گراد 1300°F درجه فارنهایت) به دست آمده است. محلول حکاکی پیکرال، بزرگ‌نمایی $1000\times$ [۱].



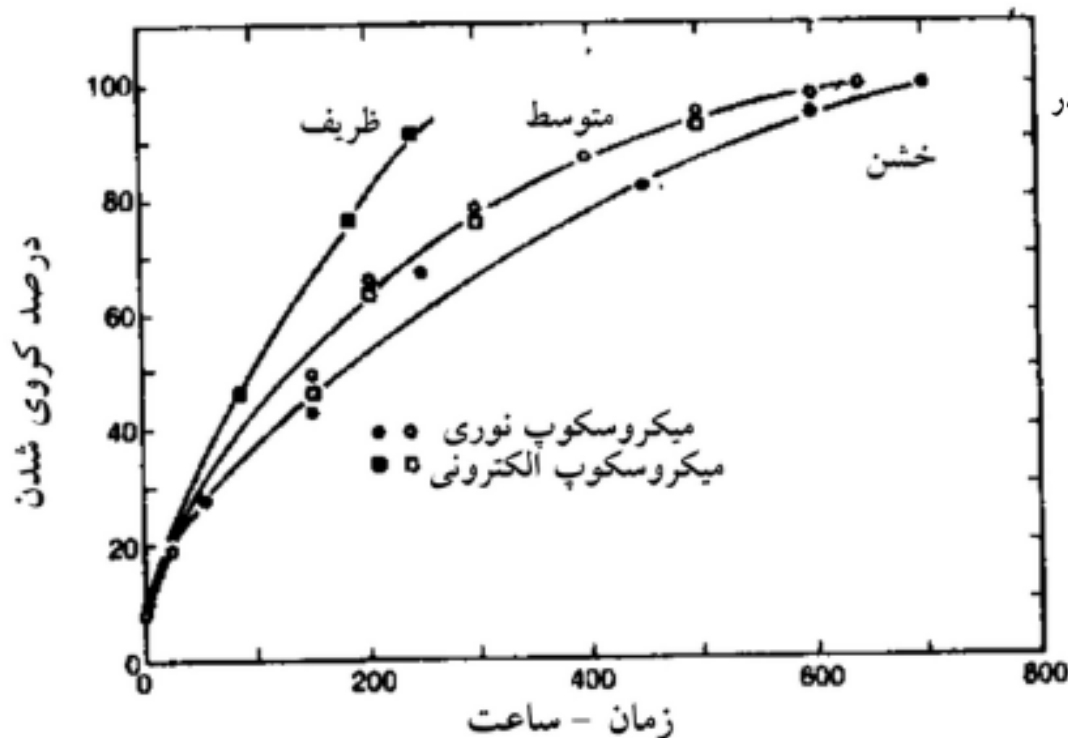
شکل ۲-۲ ریزساختار پرلیت مربوط به آلیاژ $\text{Fe}-0.75\text{C}$ که پس از آستنیت شدن در کوره سرد شده است. محلول حکاکی پیکرال، بزرگ‌نمایی $500\times$ [۱].

سمنتیت کرووی پایدارترین ریزساختار موجود در فولادها است که با حرارت دادن فولاد در مدت زمان مناسب در بازه مشخص شده، به دست می آید. از آنجایی که کرووی کردن سمنتیت نیازمند نفوذ است، دما و زمان عملیات باید طوری انتخاب شوند که در کوتاه‌ترین مدت، بیشترین درصد سمنتیت کرووی شود. نرخ کرووی شدن سمنتیت بستگی به ریزساختار اولیه فولاد و شیوه عملیات حرارتی کرووی کردن دارد.



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

- ❑ از نظر ریزساختاری **پرلیت نیازمند بیشترین زمان** برای کروی شدن است. هرچه لایه‌های پرلیت درشت‌تر باشند، زمان کروی شدن هم بیش‌تر می‌شود (بیشترین زمان برای پرلیت خشن).
- ❑ ابتدا لایه‌های سمانتیت شکسته و به ذرات ریز سمانتیت تبدیل شده و سپس کروی می‌شوند. لذا هرچه لایه‌های سمانتیت ضخیم‌تر باشند، زمان بیش‌تری نیاز است.
- ❑ اگر کاربیدهای اولیه به شکل ذره‌های ریز و مجزا از یکدیگر (بینیت) باشند، کروی شدن بسیار سریع‌تر خواهد شد.
- ❑ در ساختارهای مارتنزیتی نیازی به شکسته شدن صفحه‌های سمنتیتی و سپس کروی شدن نیست (کربن فوق‌اشباع ضمن خروج از شبکه آهن به شکل سمنتیت کروی رسوب می‌کند)، در نتیجه اگر ساختار اولیه مارتنزیت باشد، کروی شدن سریع‌تر خواهد بود.



شکل ۷-۵ پیشرفت عملیات کروی شدن سمنتیت مربوط به پرلیت ظریف، متوسط و خشن در فولاد Fe-۰/۷۴C - ۰/۰۷Si در ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (۱۲۹۲ درجه فارنهایت) [۱].

صدها ساعت حرارت دادن حوالی دمای A1 برای کروی شدن کامل این ساختار پرلیتی لازم است.

مهم‌ترین روش‌های عملیات حرارتی کروی کردن:

- ۱- حرارت دادن فولاد، درست تا زیر دمای Ac_1 ، نگه داشتن به مدت کافی برای کروی شدن و سپس سرد کردن در هوا تا دمای اتاق
 - ۲- حرارت دادن فولاد تا ناحیه دو فاز Ac_3-Ac_1 برای فولادهای هیپوئوتکتوئید و یا بین $Ac_{cm}-Ac_1$ برای فولادهای هایپریوتکتوئید به منظور آستنیت‌زدایی، سرد کردن آهسته تا زیر دمای Ar_1 ، نگه داشتن به مدت کافی برای کروی شدن و سپس سرد کردن در هوا تا دمای اتاق
 - ۳- حرارت دادن فولاد تا بالای دمای Ac_1 و آستنیت‌زدایی، سرد کردن تا زیر دمای Ar_1 و نگه داشتن برای مدت زمانی حدود ۳۰ دقیقه، گرم کردن دوباره تا بالای Ac_1 و تکرار عملیات تا آن که ریزساختاری با سمیتیت کروی‌شده به دست آید. پس از کروی شدن سمیتیت، قطعه را تا دمای اتاق در هوا سرد می‌کنند.
- در اینجا یادآوری این نکته ضروری است که پس از پایان چرخه عملیات حرارتی کروی کردن، نرخ سرد شدن تا دمای اتاق اثری روی درصد سمیتیت کروی و یا ساختار زمینه ندارد، اما بهتر است که قطعه‌ها در کوره و یا در هوا سرد شوند.

گفتنی است که در روش‌های دوم و سوم، دمای آستنیته کردن باید به همان بازه دمایی کروی که در شکل ۵-۶ نشان داده شده است، محدود شود. هر چه دمای آستنیته کردن کمتر باشد، ریزساختار آستنیت حاصل، ناهمگن‌تر و ذره‌های سمیتیت حل‌نشده در آن، بیشتر است. از آنجایی که ذره‌های سمیتیت حل‌نشده به‌عنوان جوانه‌های اولیه برای تشکیل سمیتیت کروی عمل می‌کنند، هر چه تعداد آنها بیشتر باشد (دمای آستنیته کردن کمتر باشد)، تشکیل ساختار با سمیتیت کروی، سریع‌تر خواهد بود. هم‌چنان که در ضمن مطالعه عملیات آنیل و نرماله کردن دیده شد، در صورت بالا بودن دمای آستنیته کردن، ریزساختار آستنیت حاصل، تا حدودی یکنواختی بیشتری دارد و عاری از کاربیده‌های حل‌نشده خواهد بود. این شرایط، تشکیل سمیتیت کروی را محدود و در عوض، زمینه را برای تشکیل پرلیت، مناسب‌تر می‌کند.

از آنجایی که عملیات کروی شدن نیازمند تجزیه و انحلال جزیی سمیتیت لایه‌ای و سپس تشکیل آن روی کره‌های سمیتیت است، نفوذ کربن در فاز فریت نقش مهمی را در این رابطه ایفا می‌کند؛ به این صورت که هر چه نرخ نفوذ کربن زیادتر شود، کروی شدن نیز سریع‌تر خواهد شد. به طور کلی، از آنجایی که عناصر آلیاژی، نرخ نفوذ کربن در فاز فریت را کاهش می‌دهند، بنابراین، عملیات کروی شدن را به تعویق می‌اندازند. از آنجایی که رشد کاربیده‌های آلیاژی نیازمند نفوذ عناصر آلیاژی کاربیدساز است و نفوذ این عناصر در مقایسه با کربن، بسیار آهسته‌تر می‌باشد، بنابراین، وجود عناصر آلیاژی کاربیدساز نیز کروی شدن را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد.

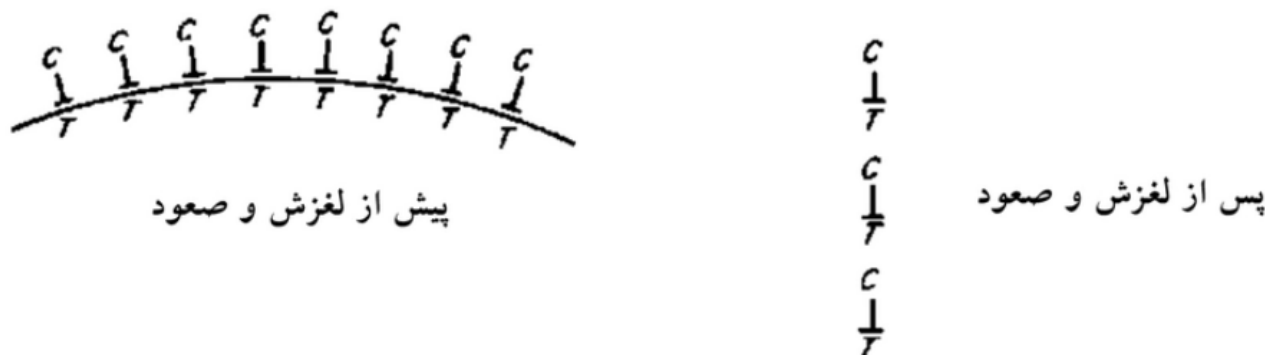
بازیابی و تبلور مجدد (Recovery & Recrystallization)

انجام کار سرد روی فولادها باعث افزایش استحکام و سختی و نیز کاهش انعطاف پذیری آنها می شود. این پدیده که به کار سختی (Work hardening) موسوم است، از افزایش پیوسته معایب بلوری در اثر انجام و ادامه کار سرد ناشی می شود.

اثر کار سرد، انرژی داخلی فلز افزایش می یابد و بنابراین از نظر ترمودینامیکی ناپایدار خواهد شد. حرارت دادن چنین قطعه ای باعث از بین رفتن معایب بلوری موجود و بازیابی ریزساختار و خواص فیزیکی و مکانیکی اولیه می شود. این پدیده در کتاب های متالورژی با عنوان بازیابی و تبلور مجدد، بررسی و مطالعه شده است و در ادامه، به طور مختصر شرح داده می شود.

بازیابی

تغییرهای عمده‌ای که در ضمن عملیات حرارتی بازیابی، در ساختار بلوری فلز به وجود می‌آیند، کاهش و یا از بین رفتن معایب بلوری هستند که از قدرت تحرک زیادی برخوردارند. در این عملیات، معایب نقطه‌ای مانند جاهای خالی و اتم‌های اضافی، یکدیگر را خشی می‌کنند، نابجایی‌های پیچی^۱ چپ‌گرد و راست‌گرد و نابجایی‌های لبه‌ای^۲ مثبت و منفی، به‌ترتیب در یکدیگر، ادغام و حذف می‌شوند و در نتیجه، انرژی داخلی کاهش می‌یابد. ادامه عملیات حرارتی بازیابی، همراه با لغزش و صعود نابجایی‌های باقیمانده (شکل ۵-۸) و زیر هم قرار گرفتن آنهاست (شکل ۵-۹). به این ترتیب، مرزهای فرعی^۳ (شکل ۵-۹-ب و شکل ۵-۱۰) تشکیل می‌شوند. تشکیل مرزهای فرعی که به چند وجهی شدن^۴ موسوم است (شکل ۵-۹)، عملی خودبه‌خود می‌باشد؛ زیرا انرژی آزاد داخلی ریزساختار با دانه‌های فرعی^۵ در مقایسه با قطعه کار سردشده، بسیار کمتر است.



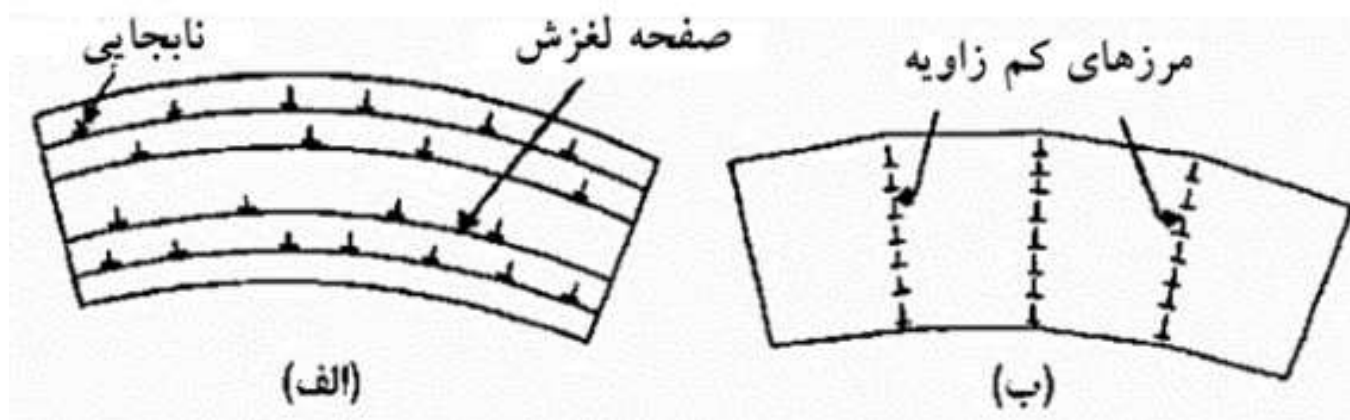
شکل ۵-۸ شمایی از لغزش و صعود نابجایی‌ها به منظور کاهش انرژی داخلی

۱-Screw dislocation ۲-Edge dislocation ۳-Sub grainboundary

۴-Polyganization ۵-Sub grain = law-angle grain

با ردیف قرار گرفتن نابجایی‌ها در زیر هم، میدان تنش کششی هر نابجایی بر میدان تنش فشاری نابجایی دیگر اثر می‌گذارد، آن را کاهش می‌دهد یا خنثی می‌کند.

نیرو محرکه در عملیات حرارتی بازیابی، کاهش انرژی داخلی ناشی از حذف یا آرایش دوباره معایب بلوری ایجاد شده در ضمن کارسختی است.

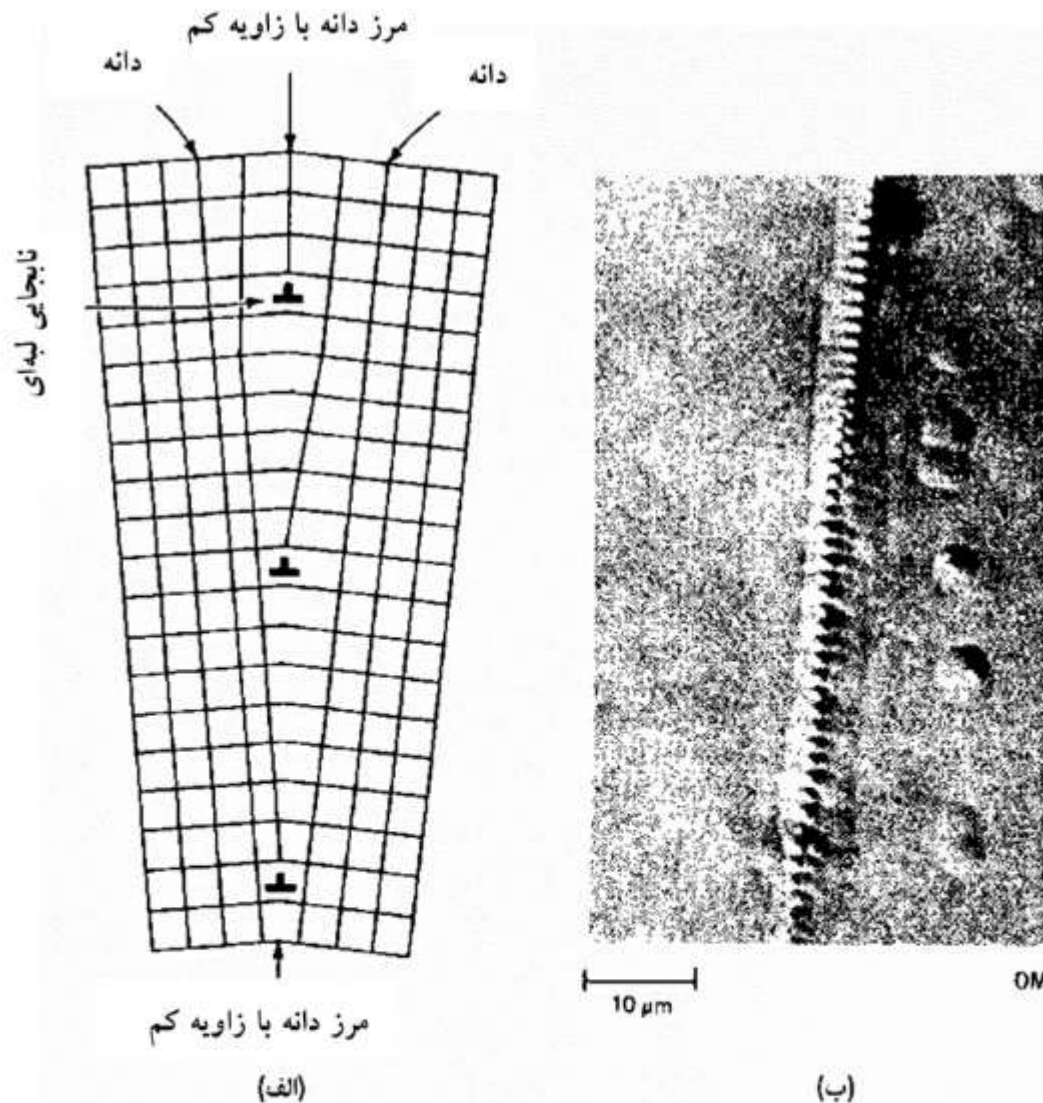


شکل ۵-۹ شمایی از چند وجهی شدن: (الف) بلور تغییر شکل داده شده دارای انبوهی از نابجایی‌ها روی صفحه‌های لغزش، (ب) مرزهای فرعی در بلور بازیابی شده [رسم دوباره با استفاده از مراجع‌های ۹ و ۱۳].

در عملیات **بازیابی**، **خواص فیزیکی** بازیابی می‌شوند و تا حدودی به خواص فیزیکی قبل از کارسرد برمی‌گردند، درحالی که تغییرات خواص مکانیکی چندان محسوس نیست.

تغییراتی که در ساختار بلوری حین بازیابی رخ می‌دهد توسط میکروسکوپ نوری قابل مشاهده نیست و نیاز به میکروسکوپ الکترونی می‌باشد.

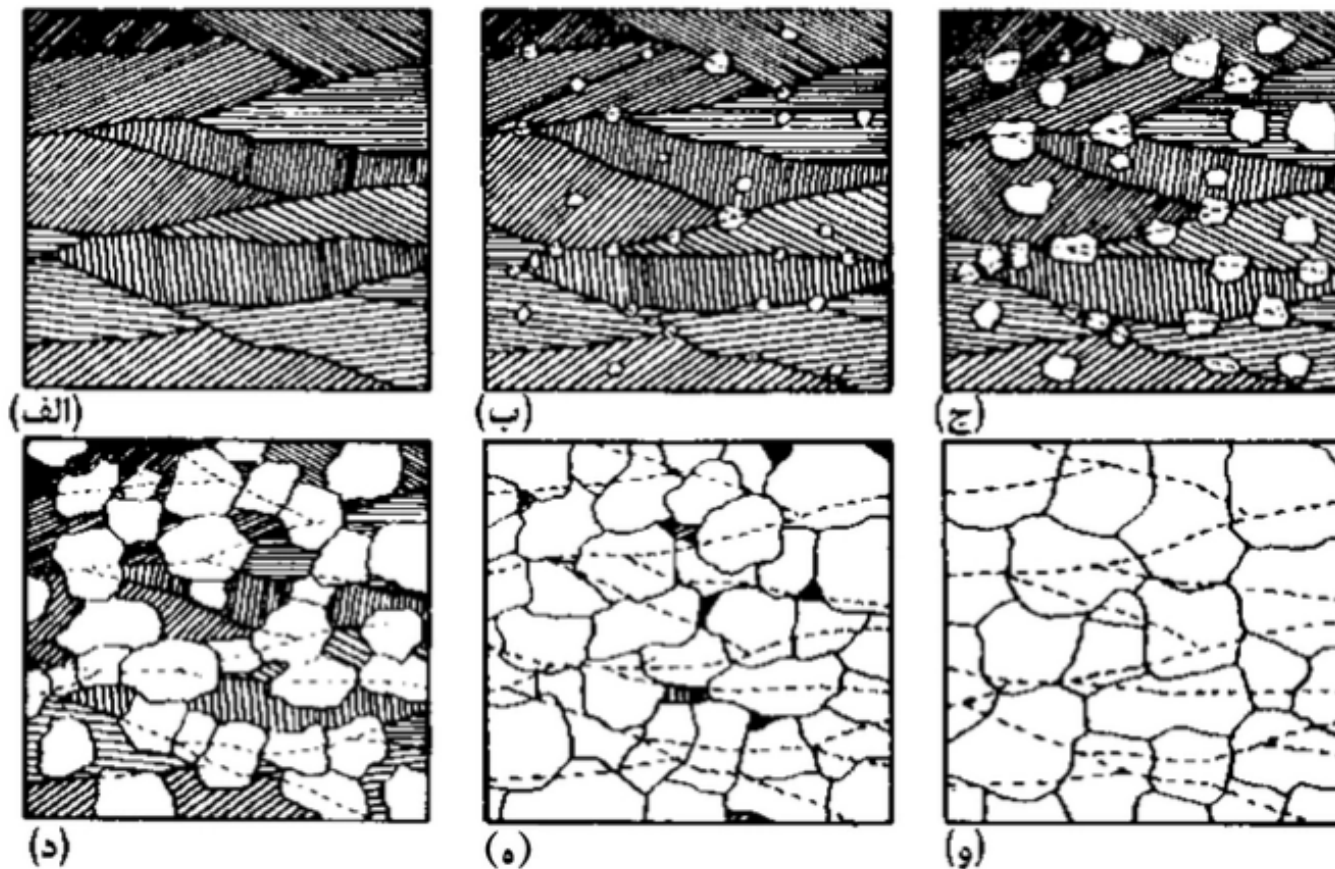
عملیات حرارتی **تبلور مجدد** باعث بازیابی **خواص مکانیکی** قطعه کارسرد شده می‌شود.



شکل ۵-۱۰ (الف) شمایی از نابجایی‌های لبه‌ای ردیف‌شده که باعث انحراف دو قسمت بلور از یکدیگر شده‌اند. (ب) مرز فرعی روی سطح پولیش و حکاکی شده بلور ژرمانیم. مراکز نابجایی‌ها در تماس با محلول شیمیایی حکاکی، بیشتر خورده شده‌اند و ردیفی از حفره‌ها که همان مرز فرعی است را به وجود آورده‌اند [۱].

تبلور مجدد

در عملیات حرارتی تبلور مجدد، **دانه‌های جدید هم‌محور و عاری از تنش** در فلز کارسرد شده بوجود می‌آیند. تبلور مجدد ادامه عملیات حرارتی بازپایی است و دانه‌های جدید عاری از تنش می‌توانند از دانه‌های فرعی حاصل از عملیات بازپایی بوجود آیند. بطور کلی فرآیند تبلور مجدد **شامل جوانه‌زنی و رشد** می‌شود که نیرو محرکه آن، همان کاهش انرژی آزاد در اثر کاهش چگالی نابجایی‌ها است.

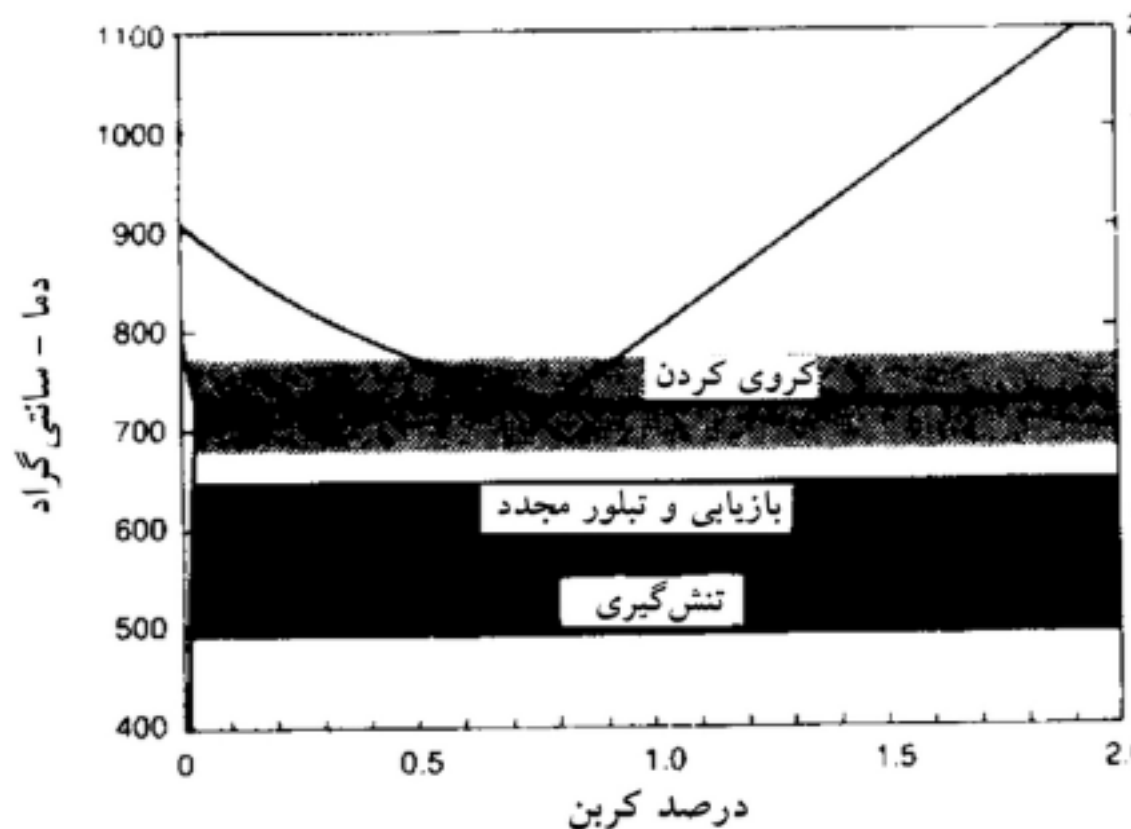


تغییراتی که حین کارسرد در خواص فیزیکی و مکانیکی به وجود آمده اند از بین می‌روند و قطعه به حالت قبل کارسرد بر می‌گردد.

شکل ۵-۱۱ مراحل مختلف تبلور مجدد یک فلز. (الف) ریزساختار فلز در شرایط کار سردشده، (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 سردشده است [۳].

عملیات حرارتی تبلور مجدد فولادها در ناحیه دو فازی فریت - سمیتیت (شکل ۵-۶) انجام می‌شود، تغییرهای ساختار، همراه با تغییر فاز نخواهد بود. به طور کلی، ریزساختار فولادهای کم کربن و کربن متوسط، پیش از کار سرد، شامل سمیتیت کروی و یا فریت با مقدار کمی پرلیت است که هر دو از انعطاف‌پذیری خوبی برخوردارند. فریت موجود در این ساختار، عاری از تنش و دارای دانه‌های هم‌محور^۱ است. کار سرد، دانه‌های فریت را به منظور انجام کار مکانیکی تغییر شکل می‌دهد و معایب بلوری را در آن زیاد می‌کند.

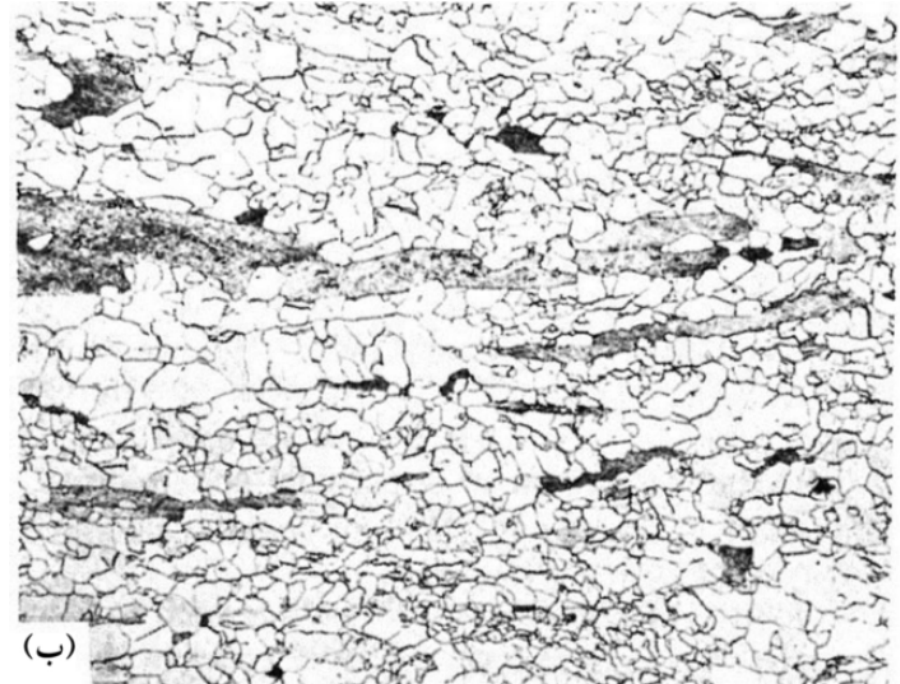
¹ Equiaxed



اثر کار سرد روی ریزساختار یک ورق فولادی کم کربن ($0.03\%C$) پس از ۶۰ درصد کاهش ضخامت در شکل ۵-۱۲-الف نشان داده شده است. در این شکل، کشیدگی دانه‌های فریت در جهت نورد و همچنین اثرهای تغییر شکل داخل دانه‌ها، به‌روشنی مشخص هستند. عملیات حرارتی تبلور مجدد باعث می‌شود که دانه‌های جدید هم‌محور و عاری از تنش در زمینه فریت تغییر شکل‌یافته، به وجود آیند و رشد کنند. در نتیجه، ریزساختار اولیه، دوباره به وجود می‌آید.



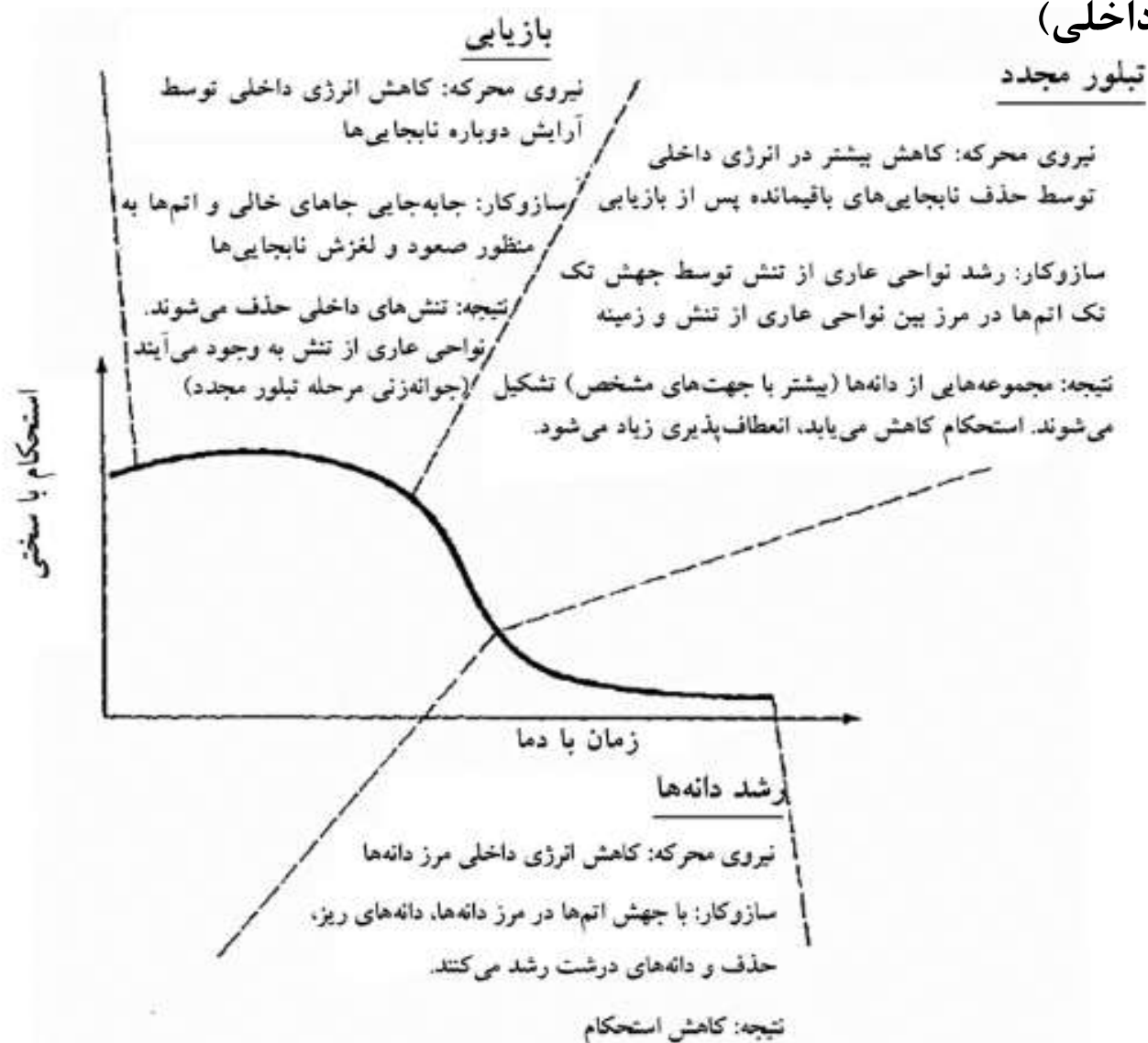
(الف)



(ب)

شکل ۵-۱۲ (الف) ریزساختار آلیاژ $Fe-0.03\%C$ پس از این که ۶۰ درصد کار سرد (نورد) روی آن انجام شده است. (ب) ریزساختار فولاد الف پس از این که به مدت دو ساعت در ۵۳۸ درجه سانتی‌گراد (۱۰۰۰ درجه فارنهایت) آنیل شده باشد. در شکل ب، حدود ۸۰ درصد ساختار کار سرد شده به دانه‌های ریز و هم‌محور تبدیل شده است. ریزساختار نوری، محلول حکاکی نایتال، بزرگ‌نمایی $100\times$ [۱].

پس از اینکه تبلور مجدد به پایان رسید، اگر بازهم حرارت دادن قطعه ادامه یابد، **دانه‌های هم‌محور موجود، شروع به درشت شدن** می‌کنند. این عملیات به **رشد دانه (Grain growth)** موسوم است. درحقیقت با مهاجرت مرزدانه‌ها، دانه‌های ریز به‌ترتیب به دانه‌های درشت کناری می‌پیوندند. نیروی محرکه، همان انرژی مرزدانه‌ها است. (کاهش مرزدانه، کاهش انرژی داخلی)



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

تنش‌گیری (Stress relieving)

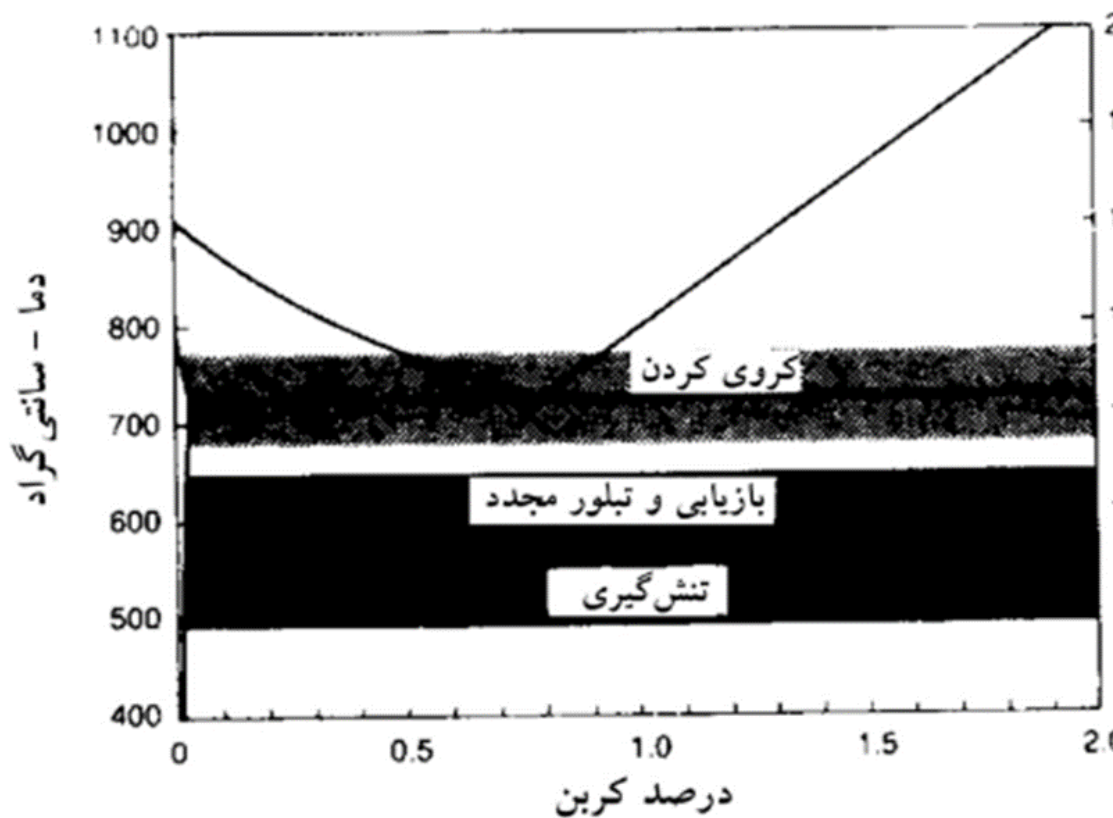
برخی از فرآیندهای عملیات حرارتی و یا مکانیکی در قطعات، تنش‌های داخلی ایجاد می‌کنند. تنش‌های داخلی حاصل ممکن است منجر به تاب برداشتن، ترک خوردن و یا شکست قطعه‌ها در تنش‌هایی بسیار کم‌تر از سطح تنش طراحی شده برای آن‌ها شود.

۱- نایکنواخت سرد شدن نقاط مختلف قطعه در ضمن کاهش دما از ناحیه آستنیت. این پدیده، به‌ویژه در رابطه با قطعه‌های حجیم دیده می‌شود، به طوری که حتی ممکن است، چنین قطعه‌هایی در هوا سرد شوند و تنش‌های داخلی در آن‌ها به وجود آید؛ به این صورت که سطح قطعه‌ای که در هوا سرد می‌شود، پیش از ناحیه مرکزی به فریت و سمنتیت تبدیل خواهد شد. بنابراین هنگام تغییر فاز ناحیه مرکزی، افزایش حجم یا انبساط ناشی از تشکیل فریت، لایه‌های سطحی که پیش‌تر تغییر فاز داده و سرد شده‌اند را تحت تنش کششی قرار می‌دهد. در صورتی که این تنش از حد تسلیم نمونه کمتر باشد، به صورت تنش‌های داخلی در قطعه باقی می‌ماند. از سوی دیگر، در صورتی که این تنش بیشتر از حد تسلیم باشد، باعث تغییر شکل مومسان (تاب برداشتن) و یا حتی شکستن قطعه می‌شود. در عملیات سریع سرد کردن برای تشکیل مارتنزیت، پدیده‌ای مشابه، ولی در مقیاس گسترده‌تر وجود دارد (فصل نهم)، به طوری که ممکن است، در رابطه با مقاطع کوچک نیز منجر به ایجاد تنش‌های داخلی و یا حتی شکستن قطعه شود. این پدیده، یکی از دلایل اصلی آلیاژ کردن فولادها به منظور افزایش سختی‌پذیری آن‌ها و در نتیجه، به دست آوردن مارتنزیت در نرخ‌های سرد شدن آهسته است (به فصل ششم مراجعه شود).

از جمله منابع
تنش‌های داخلی
عبارتند از:

۲- ماشین کاری و کارسرد: عامل ایجاد تنش در این عملیات، افزایش معایب بلوری و عدم توزیع یکنواخت کارسرد انجام شده در نقاط مختلف قطعه می باشد.

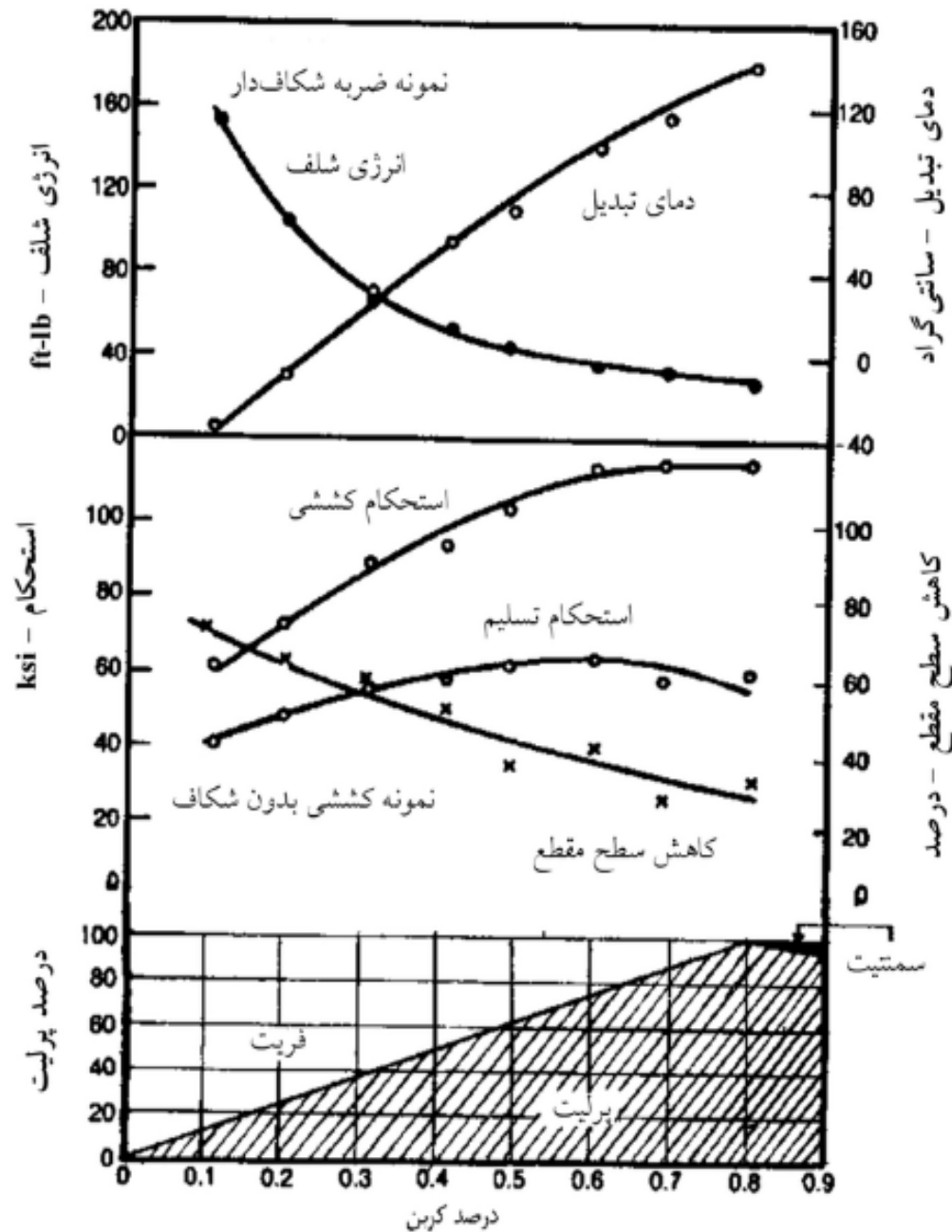
۳- جوشکاری: ناحیه جوش که به حالت مذاب درآمده است، در ضمن انجماد منقبض می شود. از آنجایی که فاز پایه سرد است و انعطاف پذیری کمتری دارد، در برابر تغییر شکل ناشی از انقباض ناحیه جوش مقاومت می کند و ناحیه جوش و نواحی کناری آن را تحت تنش کششی قرار می دهد.



برای حذف یا کاهش تنش‌های باقیمانده از عملیات قبلی، قطعه‌های مورد نظر را برای زمان مشخص در دمایی زیر دمای بحرانی Ac_1 حرارت می‌دهند. زمان حرارت‌دهی بستگی به ابعاد قطعه و دمای تنش‌گیری دارد. هر چه 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 تنش‌گیری، حرارت دادن به دمای تنش‌گیری و یا سرد کردن از آن دما باید خیلی آهسته انجام شود. این موضوع، به‌ویژه در رابطه با قطعه‌های حجیم و تجهیزات بزرگ جوش‌کاری‌شده صادق است.

هدف از عملیات تنش‌گیری این نیست که تغییرهای عمده‌ای در خواص مکانیکی قطعه مانند آنچه در تبلور مجدد مورد نظر است، ایجاد شود، بلکه رفع تنش فقط توسط سازوکار بازیابی انجام می‌گیرد. به طور کلی، عملیات بازیابی تا حدودی هم‌زمان با حرارت دادن و گرم کردن قطعه شروع می‌شود. در یک دمای ثابت، نرخ بازیابی، نخست زیاد است و سپس با گذشت زمان کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، از آنجایی که در تبلور مجدد نیاز به جوانه‌زنی است، این عملیات خیلی آهسته شروع می‌شود و بنابراین، امکان برطرف کردن تنش‌های باقیمانده، بدون تغییر چشمگیری در خواص مکانیکی قطعه وجود دارد. در حقیقت، به کمک عملیات تنش‌گیری صحیح (انتخاب صحیح دما و زمان)، به راحتی می‌توان اثرهای زیان‌آور تنش‌های کششی سطحی ناشی از کار سرد را به طور کامل برطرف کرد، در حالی که استحکام و سختی قطعه هم‌چنان بدون تغییر باقی بماند.

خواص مکانیکی ریزساختارهای تعادلی



طبق شکل ۵-۱۴ با افزایش درصد کربن، درصد پرلایت، استحکام تسلیم (Yield strength) و استحکام کشش (Tensile strength) همگی افزایش می‌یابند.

وجود پرلایت نرخ کارسختی را در فولادها افزایش می‌دهد (فاصله گرفتن منحنی های تسلیم و استحکام نهایی).

همچنین با افزایش درصد کربن، انعطاف پذیری فولاد کم می‌شود.

به کمک تعیین دمای تبدیل شکست نرم به ترد تا حدودی می‌توان چقرمگی (انرژی جذب شده حین شکست، مقاومت به ضربه، Toughness) یک فولاد را مشخص کرد.

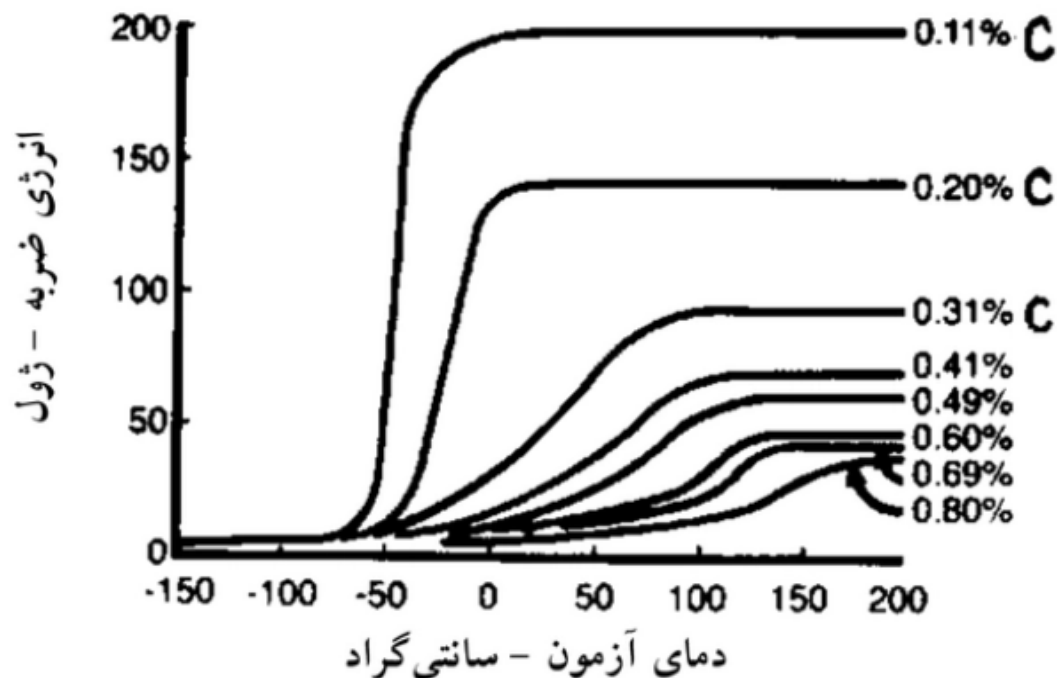
(DBTT: Ductile/Brittle Transition Temperature)

شکل ۵-۱۴ اثر کربن روی ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای ساده

کربنی فریتی - پرلیتی [رسم دوباره با استفاده از مرجع ۱].

دمای تبدیل، دمایی است که در حوالی آن تغییرهای انرژی جذب شده برحسب دمای آزمون، به نسبت سریع باشد. انرژی جذب شده در شکست نرم به انرژی شلف (Shelf energy) یا انرژی شکست نرم موسوم است و بطور کلی مستقل از دما است. **افزایش درصد کربن، انرژی شکست نرم را کاهش و دمای تبدیل شکست نرم به ترد را افزایش می‌دهد.**

مطابق با شکل ۵-۱۵ **دمای تبدیل فولادهای پرکربن بطور چشمگیری بالاتر از دمای اتاق** است، بنابراین این فولادها در دمای اتاق **بصورت ترد** می‌شکنند. از آنجایی که دمای تبدیل فولادهای کم‌کربن (فریتی) زیر صفر درجه سانتی‌گراد است، این فولادها در حوالی دمای اتاق در برابر ضربه مقاوم هستند.

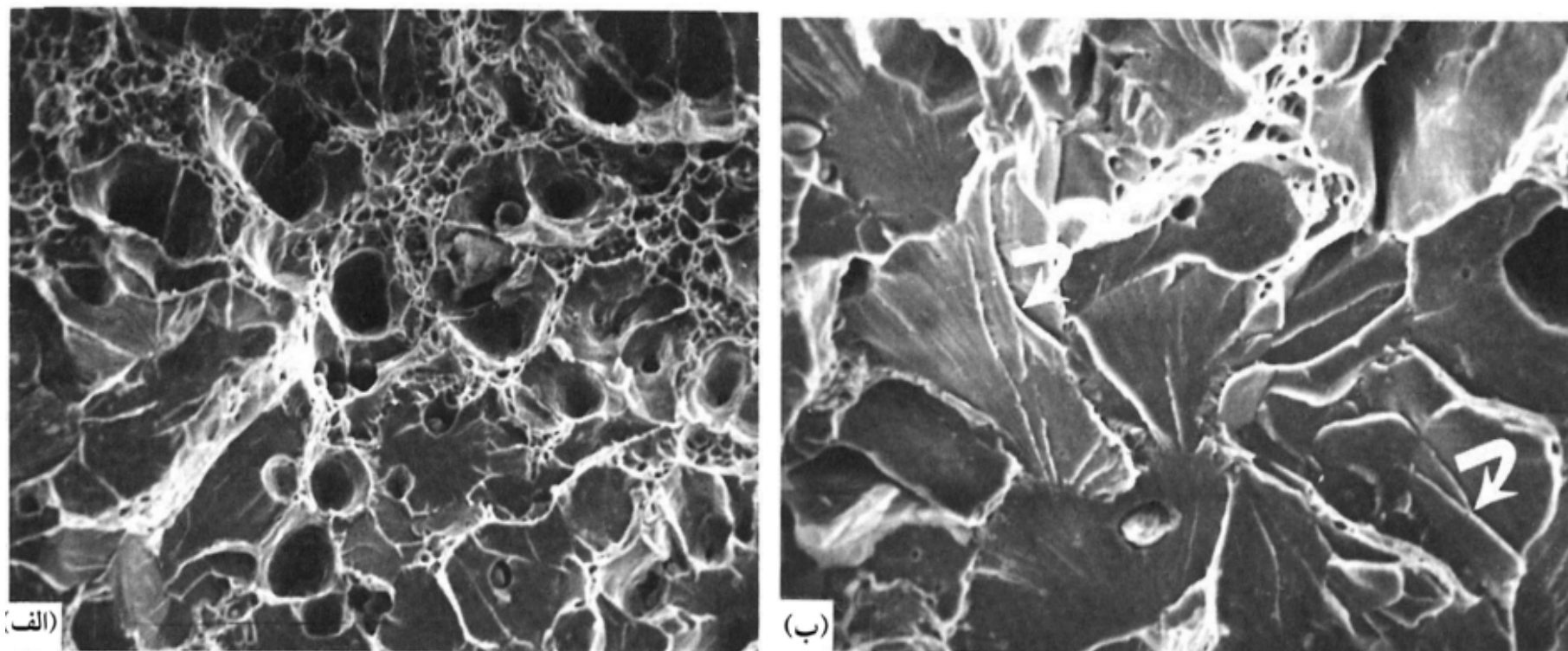


از نظر میکروسکوپی دمای تبدیل، دمایی است که اگر در آن دما آزمون ضربه رخ دهد، ظاهر سطح شکست ۵۰ درصد ترد و ۵۰ درصد نرم است.

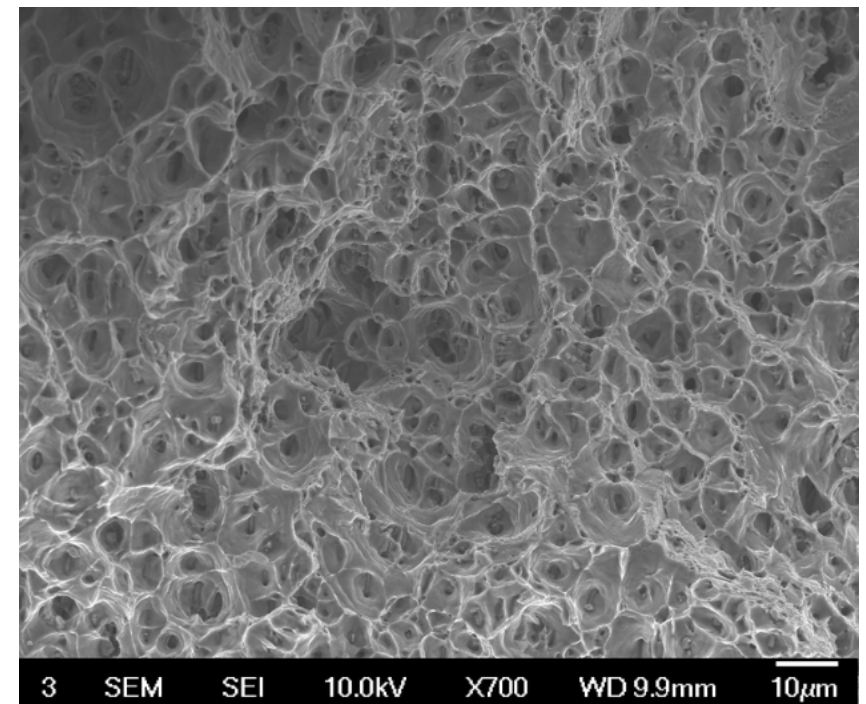
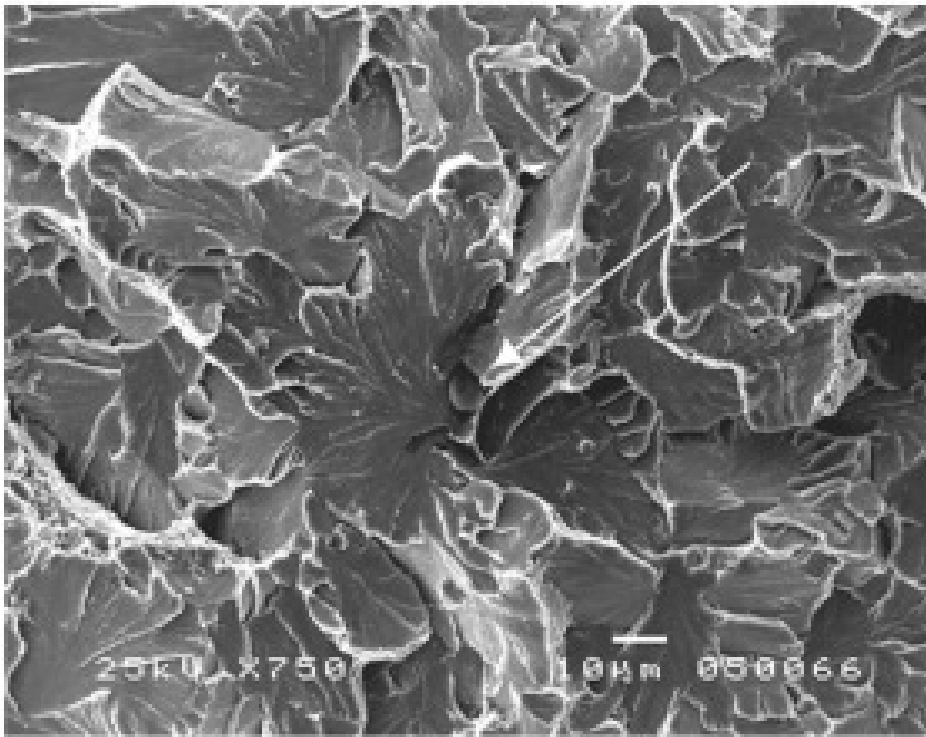
شکل ۵-۱۵ اثر درصد کربن در فولادهای ساده کربنی نرماله‌شده روی منحنی‌های انتقال [۱].

شکست نرم، در اثر تشکیل، رشد و به هم پیوستن حفره‌های بسیار ریز ((Microvoid coalescence (MVC)) در اطراف کاربیدها و یا ذره‌های ناخالصی مانند اکسیدها و سولفیدها اتفاق می‌افتد. این شکست نیاز به لغزش (Shear) یا تغییر شکل پلاستیک زیادی دارد و انرژی جذب شده در ضمن شکست به نسبت زیاد است.

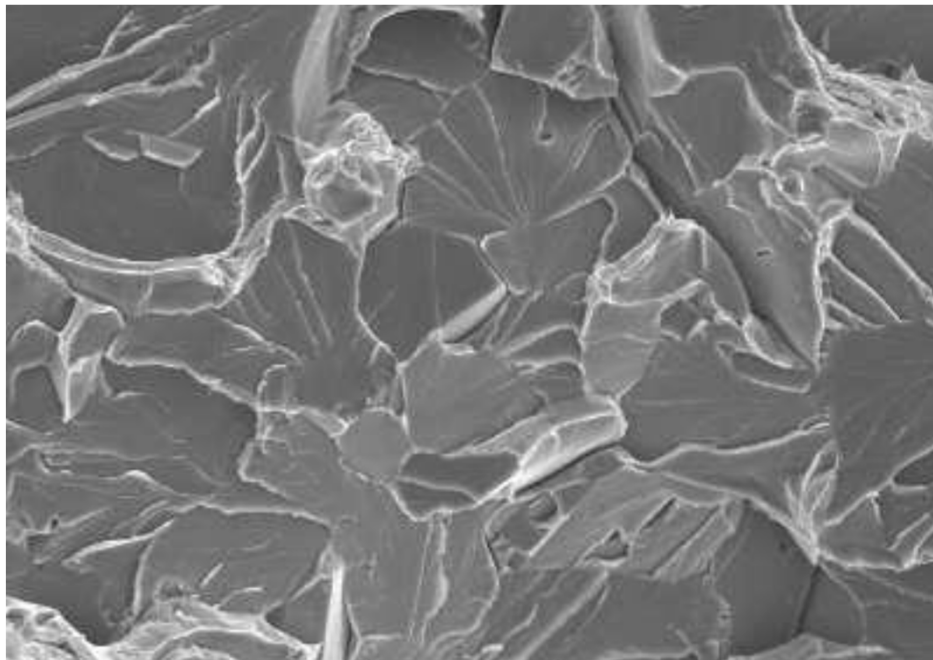
دمای تبدیل فولادهای ساده کربنی را می‌توان به کمک ریزساختار و یا ترکیب شیمیایی تغییر داد.



شکل ۵-۱۶ (الف) ریزساختار نشان‌دهنده شکست نرم و ترد. حفره‌های کله‌قندی که از ویژگی‌های بارز شکست نرم هستند، در قسمت بالای تصویر مشخص‌اند. بزرگ‌نمایی $\times 500$ ، (ب) شکست ترد ناشی از تورق. علامت‌های پیکان، فصل مشترک بین صفحه‌های مختلف تورق را نشان می‌دهند. بزرگ‌نمایی $\times 1000$ ریزساختار الکترونی [۱].



Microvoid coalescence



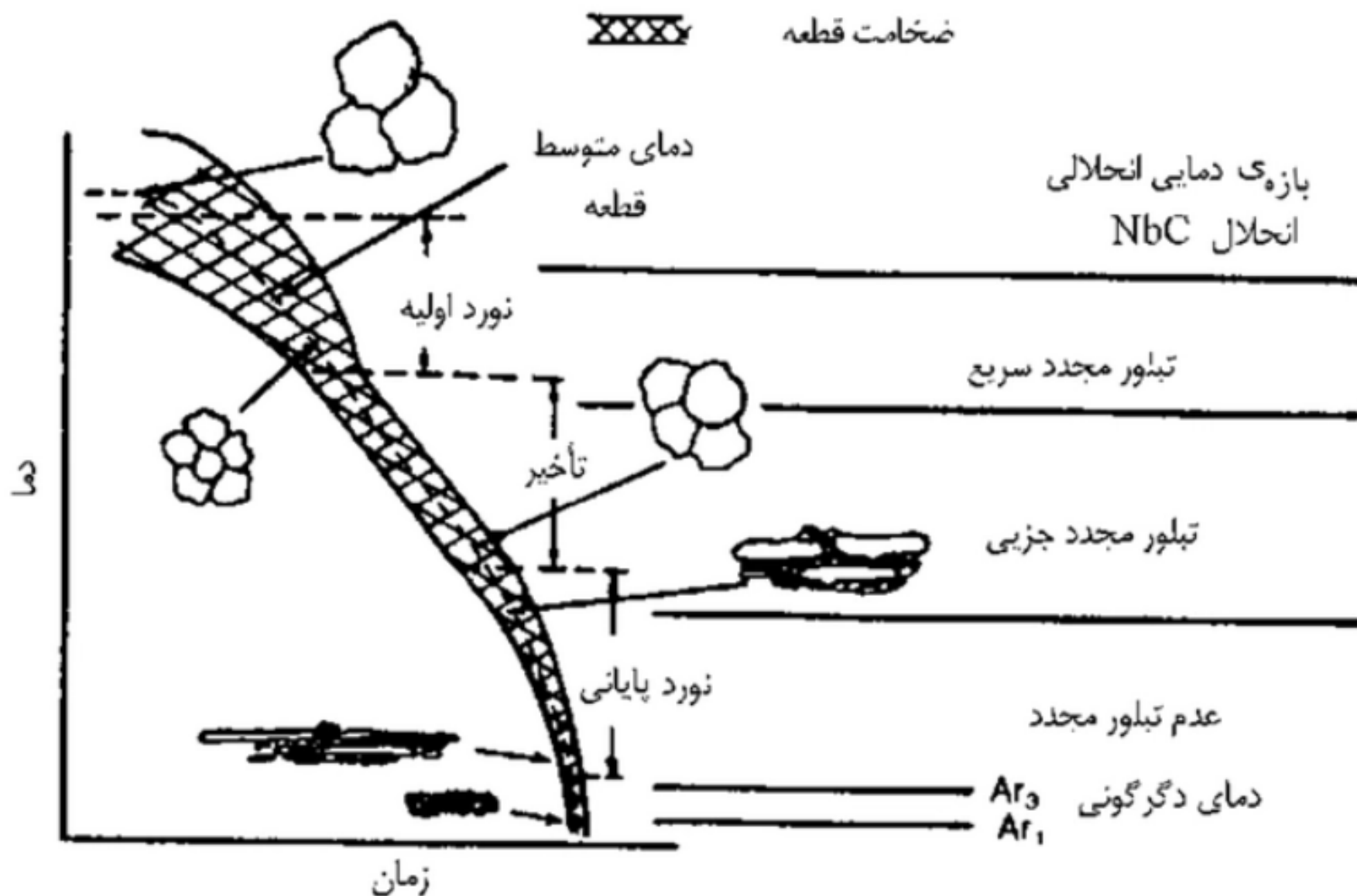
Cleavage Fracture

Cleavage Fracture of metals occurs by direct separation along crystallographic planes due to simple breaking of atomic bonds. Its main characteristics are that it occurs with a particular crystallographic plane. (*B.H. Dhage et al., JETIR 2019*)

[در فولادهای با ساختار تعادلی] خواص مکانیکی فولادها، نه تنها به مقدار پرلیت موجود در ریزساختار آنها بستگی دارد، بلکه تابعی از اندازه دانه‌های فریت، فاصله بین لایه‌ای پرلیت و ترکیب شیمیایی فولاد است. به عنوان مثال با ریزشدن دانه‌های فریت، هم استحکام و هم چقرمگی افزایش می‌یابد. به منظور ریز کردن دانه‌های فریت از روش‌هایی مانند آلیاژ کردن، استفاده از پایین‌ترین دمای ممکن برای کار گرم و آستنیت‌ه کردن فولاد در پایین‌ترین دمای ممکن در نرماله کردن استفاده می‌شود.

فولادهای فریتی که ریزساختار آنها دارای دانه‌های فریت بسیار ریز و در نتیجه، استحکام و چقرمگی بسیار زیادند (استحکام تسلیم این فولادها، بین ۵۰ ksi تا ۸۰ ksi است)، گسترش یافته‌اند. بیشتر این فولادها که به فولادهای کم‌آلیاژ با استحکام بالا یا HSLA^۵ موسوم‌اند، دارای ۰/۰۵ تا ۰/۱ درصد کربن‌اند. کنترل اندازه دانه‌های فریت در این فولادها به کمک مقادیر بسیار کم (به‌ندرت از ۰/۱ درصد وزنی تجاوز می‌کند) عناصر آلیاژ مانند وانادیم، نیوبیم و عناصر آلیاژی مشابه که با کربن و یا نیتروژن ترکیب می‌شوند و کاربید، نیتريد و یا کاربونیتريد بسیار ریز تشکیل می‌دهند، انجام می‌شود. این رسوب‌ها، تبلور مجدد و یا رشد دانه‌های آستنیت را در ضمن نورد گرم محدود می‌کنند و بنابراین، فریت حاصل از آستنیت یادشده، دارای دانه‌های بسیار ریز خواهد بود.

عملیات تولید این نوع فولادها شامل مجموعه‌ای از عملیات حرارتی و نورد گرم (عملیات مکانیکی - حرارتی)^۱ است که به طور خلاصه، شامل مراحل زیر می‌شود: به منظور انحلال رسوب‌های موجود در ریزساختار، فولاد با ترکیب شیمیایی مناسب را تا دمایی بالاتر از ۱۲۳۰ درجه سانتی‌گراد (دمای انحلال رسوب‌ها) حرارت می‌دهند و سپس فولاد، تحت عملیات نورد گرم قرار می‌گیرد. در ضمن نورد گرم و کاهش دما، کاربید، نیتريد و کاربونیتریدهای آلیاژی، داخل آستنیت رسوب می‌نمایند (شکل ۵-۱۷). این رسوب‌ها تحرک مرز دانه‌ها، نابجایی‌ها و مرزهای فرعی را کم می‌کنند و بنابراین، انجام تبلور مجدد در ضمن نورد گرم را کاهش می‌دهند و یا متوقف می‌کنند (کاهش تبلور مجدد و یا متوقف کردن آن بستگی به دمای عملیات دارد). نتیجه نهایی این عملیات، به وجود آمدن آستنیت با دانه‌های ریز است. از آنجایی که فریت، به طور عمده در مرز دانه‌های آستنیت جوانه می‌زند، کاهش اندازه دانه‌های آستنیت که معادل با افزایش مرز دانه‌ها در واحد حجم است، باعث می‌شود که محل‌های مناسب برای جوانه‌زنی فریت و یا به بیان دیگر، جوانه‌های فریت افزایش یابد. در نتیجه، اندازه دانه‌های فریت نهایی نیز کاهش خواهد یافت. سرانجام، آن مقدار از عناصر آلیاژی که هنوز محلول هستند، به صورت کاربید، نیتريد و کاربونیترید، داخل ساختار فریتی رسوب می‌کنند و باعث افزایش بیشتر استحکام فولاد می‌شوند. شکل ۵-۱۸، شمایی از روش ساخت فولادهای HSLA را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۸ شمایی از عملیات حرارتی - مکانیکی برای تهیه فولادهای HSLA

استحکام تسلیم و دمای تبدیل فولادهای ساده کربنی که حداکثر ۰/۲۵ درصد کربن داشته باشند را می‌توان با تقریب از معادله‌های زیر بدست آورد:

استحکام تسلیم $(\text{MPa}, \pm 31 \text{ MPa}) =$

$$K + 37 (\% \text{Mn}) + 83 (\% \text{Si}) + 2918 (\% \text{N}_f) + 15/1 (d^{-0/5}) \quad (5-5)$$

دمای تبدیل $(C \pm 30^\circ \text{C}) =$

$$-19 + 44 (\% \text{Si}) + 700 (\% \text{N}_f) - 11/5 (d^{-0/5}) + 2/2 (\text{درصد پرلیت}) \quad (6-5)$$

در این معادله‌ها، K ، برای فولادهای نرماله و انیل شده، به ترتیب برابر با ۸۸ MPa و ۶۲ MPa می‌باشد، N_f ، نیتروژن آزاد (نه ترکیبی) موجود در شبکه فریت و d ، قطر متوسط دانه‌های فریت بر حسب میلی‌متر است.

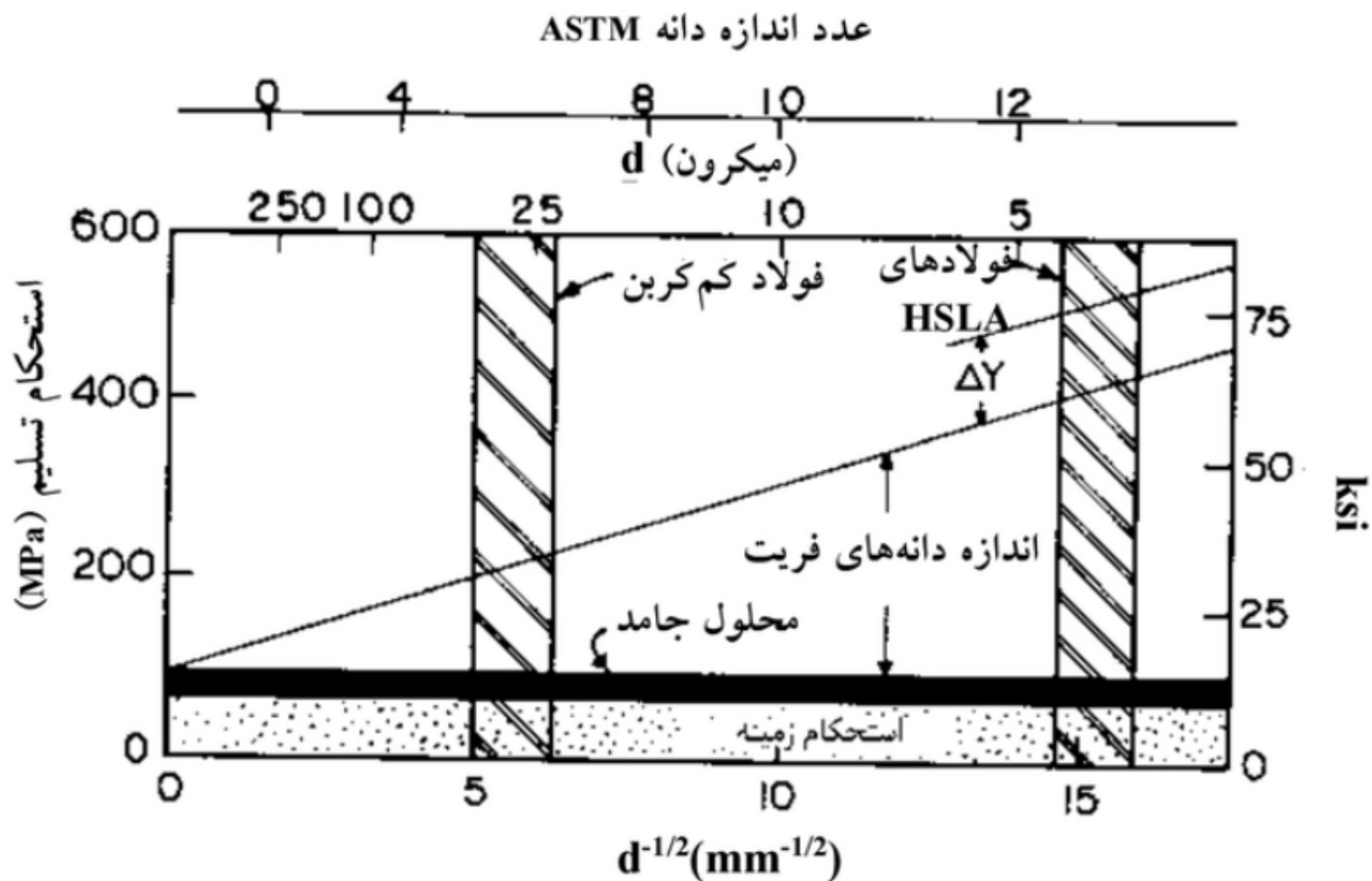
استحکام تسلیم و دمای تبدیل فولادهای ساده کربنی یوتکتویدی را به کمک معادله‌های زیر نیز می‌توان محاسبه کرد:

$$\text{استحکام تسلیم (MPa)} = +2/18 (S^{-0/5}) - 0/4 (P^{-0/5}) - 2/88 (d^{-0/5}) + 52/3 \quad (7-5)$$

$$\text{دمای تبدیل (}^\circ\text{C)} = -0/83 (P^{-0/5}) - 2/98 (d^{-0/5}) + 217/84 \quad (8-5)$$

در این معادله‌ها S ، P و d ، به ترتیب فاصله بین لایه‌ای پرلیت، اندازه کره‌های پرلیت و اندازه دانه‌های آستنیت اولیه بر حسب میلی‌مترند.

در شکل ۱۹-۵ نشان داده شده است که در فولادهای HSLA با سازوکار تشکیل رسوب، افزایش مشخصی (ΔY) در استحکام ایجاد می‌گردد.



شکل ۱۹-۵ استحکام تسلیم بر حسب تابعی از اندازه دانه در فولادهای کم کربن. مشارکت سازوکارهای دیگر افزایش‌دهنده استحکام (و سختی) نیز نشان داده شده‌اند [۱].

ورق‌های فولادی نورد سرد و آنیل شده

کاربرد اصلی ورق‌های فولادی نورد سرد و آنیل شده، در رابطه با بدنه خودروها و موارد مشابه است. این فولادها باید دارای شکل‌پذیری عالی، کیفیت سطحی بسیار خوب و قابلیت خوب جوش‌کاری باشند. این شرایط لازم به بهترین صورت توسط فولادهای کم‌کربن با ریزساختاری به طور عمده فریتی، برآورده می‌شوند.

فولادهای مورد مصرف برای تهیه ورق‌ها را نخست به صورت شمش، ریخته‌گری و سپس توسط نورد به تختال تبدیل می‌کنند و یا این که از ابتدا توسط ریخته‌گری مداوم به صورت تختال ریخته‌گری می‌نمایند. سپس تختال‌ها را با استفاده از نورد گرم به ورق تبدیل می‌کنند و به صورت کلاف درمی‌آورند. کنترل فرایند نورد گرم، نه تنها برای تولید ابعاد مناسب و دقیق مهم است، بلکه برای دستیابی به ساختارهایی که در نهایت پس از نورد سرد و آنیل، خواص خوبی داشته باشند، اهمیت دارد.

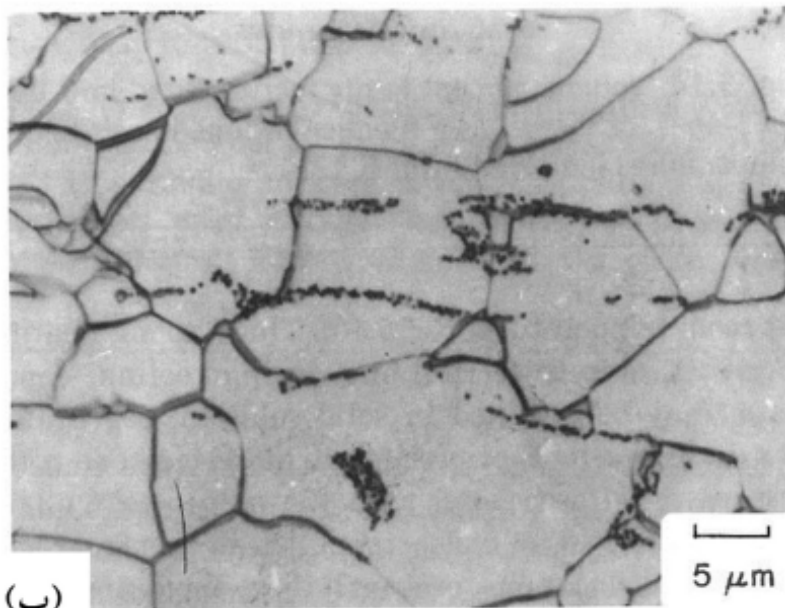
فولادهای فریتی کم‌کربن در دمای اتاق، به طور کامل نرم هستند و در ضمن نورد سرد، نابجایی‌های پیچی به‌سادگی حرکت می‌کنند، می‌لغزند و با هم برخورد می‌کنند. با ادامه نورد سرد، ریزساختاری از نابجایی‌ها شامل دیواره‌های تشکیل شده از نابجایی و سلول‌های عاری از نابجایی به وجود می‌آیند و گسترش می‌یابند.

ریزساختار فریتی-پرلیتی تشکیل شده در ضمن سرد شدن از دمای نورد گرم، توسط نورد سرد تغییر شکل داده و در جهت نورد کشیده شده است.

آنیل کردن موجب شده است که فریت تغییر شکل یافته بصورت دانه‌های هم‌محور عاری از کرنش، دوباره متبلور شود و دسته‌های پرلیتی تغییر شکل داده شده بصورت ردیف‌هایی از ذره‌های ریز و کروی سمنتیت در زمینه فریت درآیند.



(الف)

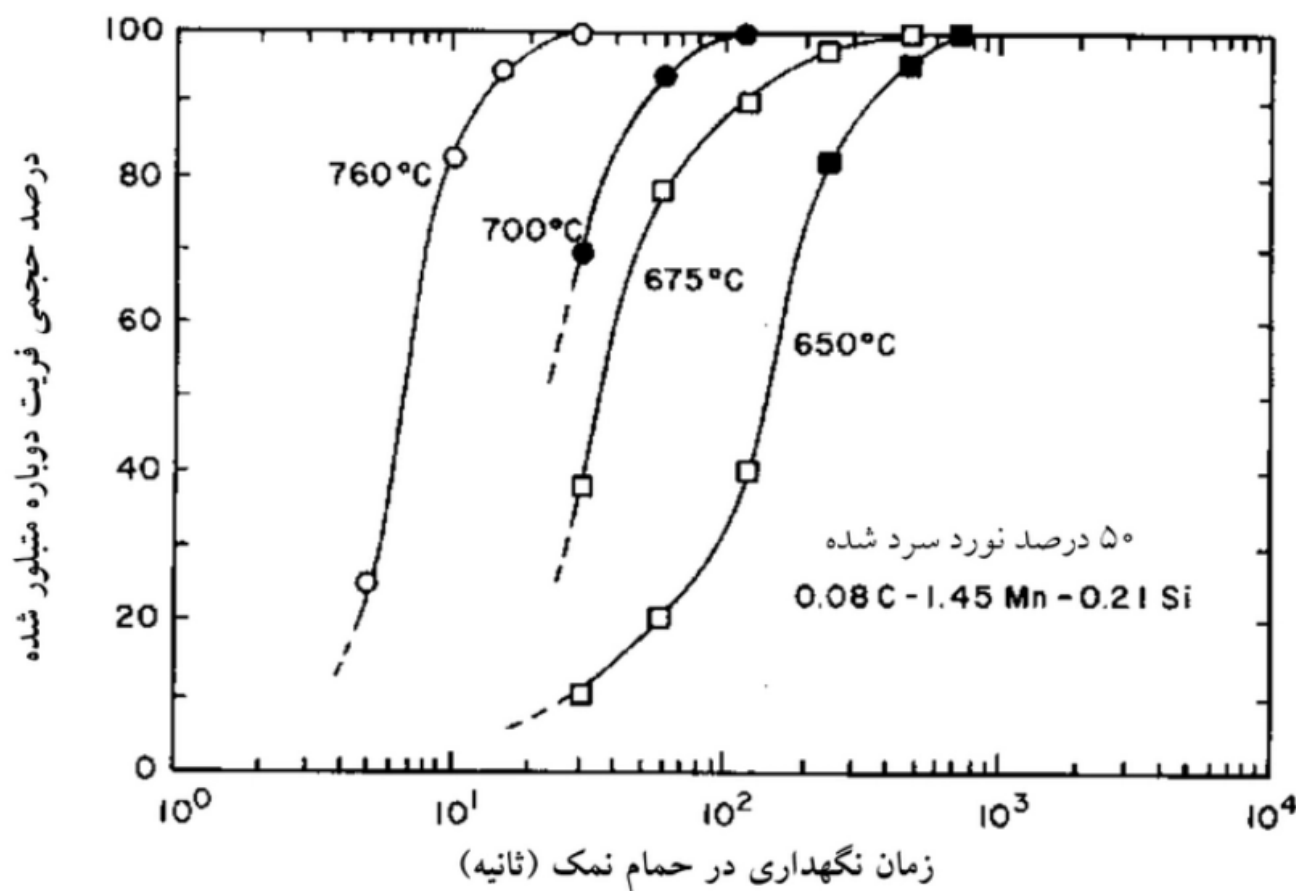


(ب)

شکل ۵-۲۲ ریزساختار نوری از فولاد $Si\ 21\% - Mn\ 45\% - C\ 0.08\%$ (الف) ۵۰ درصد نورد سرد شده، (ب) آنیل شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه [۱].

برای فولاد شکل ۵-۲۳: از جمله ویژگی‌های خاص تبلور مجدد، زمان اولیه شروع آن است. در این مرحله، دانه‌های عاری از کرنش جوانه می‌زنند، ولی در ادامه آن تبلور مجدد آنقدر سریع ادامه می‌یابد که حتی در پایین‌ترین دمای تبلور مجدد (۶۵۰ درجه سانتیگراد)، یک منحنی سینوسی بر حسب زمان برای تبلور مجدد بدست می‌آید.

دمای آنیل ۷۶۰ درجه سانتیگراد، در ناحیه دو فاز آستنیت-فریت است، بنابراین در این دما، علاوه بر تبلور مجدد، آستنیت نیز تشکیل می‌شود.



شکل ۵-۲۳ درصد حجمی فریت متبلور شده در فولاد ۰.۰۸C-۱.۴۵Mn-۰.۲۱Si

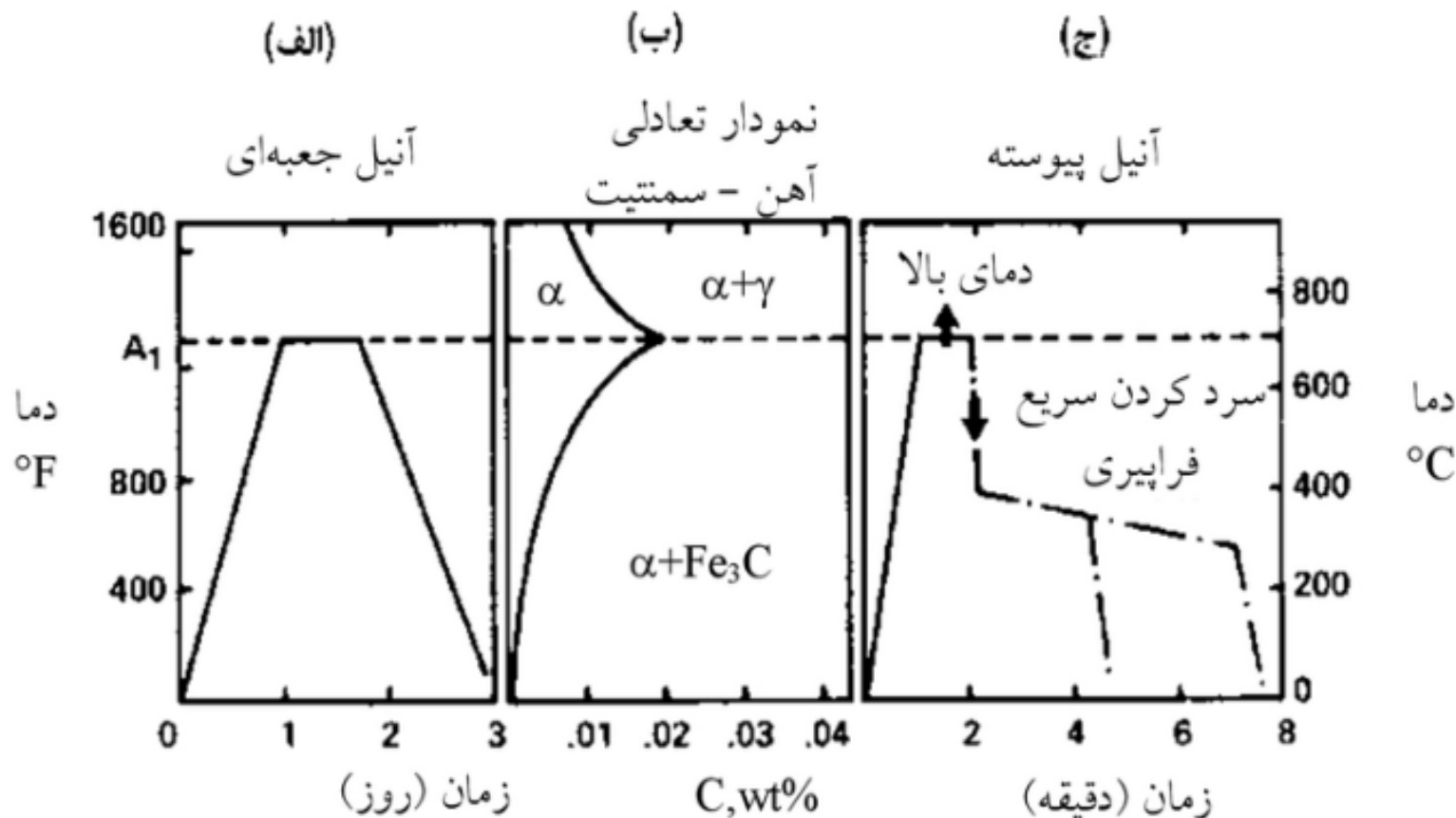
بر حسب تابعی از زمان نگهداری در حمام نمک با دماهای نشان داده شده [۱].

در صنعت دو روش آنیل کردن استفاده می شود:

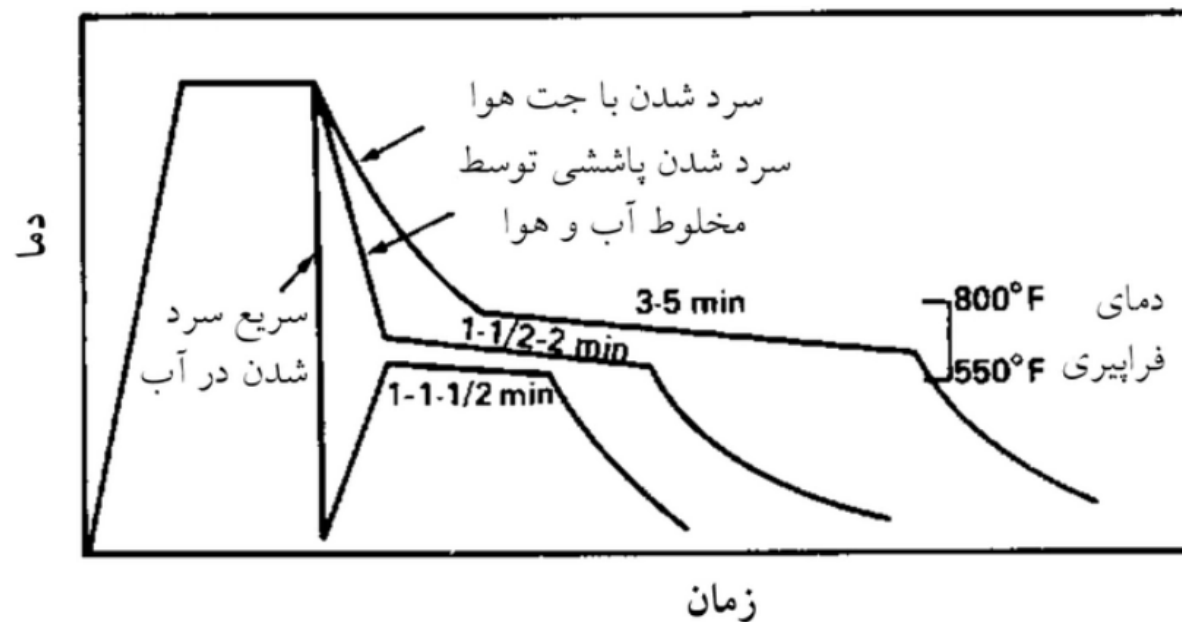
۱- آنیل جعبه‌ای (Box Annealing) ۲- آنیل پیوسته (Continuous Annealing)

در آنیل جعبه‌ای مجموعه‌ای از کلاف‌های ورق را در یک کوره بزرگ قرار می‌دهند بنابراین وزن زیادی از فولاد همزمان گرم و سپس آهسته سرد می‌شوند. این فرآیند گاهی چندروز طول می‌کشد تا تمام شود. دانه‌های حاصل پس از آنیل، درشت هستند و نرخ سرد شدن آهسته، موجب می‌شود که تمام کربن حل شده، در ضمن سرد شدن بصورت کاربید رسوب کند. انعطاف پذیری بسیار خوب خواهد شد.

شکل ۵-۲۵ مقایسه فرایندهای: (الف) آنیل جعبه‌ای و (ج) آنیل پیوسته در ارتباط با (ب) نمودار تعادلی آهن - سمنتیت [۱].



در فرایند آنیل پیوسته، کلاف‌های ورق‌های فولادی نورد سرد شده باز می‌شوند و برای زمانی در حدود چند دقیقه از داخل یک کوره دو مرحله‌ای عبور داده خواهند شد. در مرحله اول، فولاد گرم می‌شود و عمل تبلور مجدد کامل می‌گردد، در حالی که در مرحله دوم، دمای کوره کاهش می‌یابد و در نتیجه، کربن از حالت محلول جامد خارج می‌شود و به صورت کاربید (سمتیت) رسوب می‌کند. بدون مرحله دوم، ورق‌های نازک فولادی سریع سرد خواهند شد و بنابراین، کربن به صورت محلول جامد باقی می‌ماند. این کربن در نهایت موجب پیرسرمایی^۱ یا پیرکرنشی^۲ می‌شود و شکل‌پذیری ورق را کاهش می‌دهد. چند فرایند مختلف برای فرایبری^۳ (رسوب دادن کربن به صورت سمتیت) در شکل ۲۶-۵ نشان داده شده‌اند. فرایندهای آنیل پیوسته را می‌توان زیر دمای بحرانی A_1 و یا بین دماهای بحرانی A_1 و A_3 انجام داد



- ۱-Quench aging
- ۲-Strain aging
- ۳-Overaging

شکل ۲۶-۵ شمایی از فرایندهای مختلف برای فرایبری در آنیل پیوسته ورق‌های فولادی [۱].

پیر کرنشی (strain aging) و پیر سرمایی (quench aging)

□ در ضمن حرارت دادن به فولاد، کربن و نیتروژن در فریت حل می‌شوند و در ضمن سرد شدن ممکن است بصورت محلول جامد باقی بمانند، در مرزدانه‌ها یا نابجایی‌ها رسوب کنند و یا ذره‌های کاربید و نیتريد را تشکیل دهند.

□ پدیده **پیر کرنشی (strain aging)** مربوط به رسوب اتم‌های بین‌نشینی در میدان‌های کرنشی نابجایی‌ها می‌شود. برهمکنش قوی اتم‌ها با نابجایی‌ها، از حرکت نابجایی‌ها تحت تنش اعمال شده جلوگیری می‌کند و گفته می‌شود نابجایی قفل شده است.

□ **پیر سرمایی (quench aging)** نتیجه رسوب کاربیدها و نیتريد‌ها از فریت فوق اشباع شده از اتم‌های بین‌نشینی در ضمن سریع سرد شدن از دمای بالاست.

□ هر دو پدیده موجب **افزایش استحکام و کاهش انعطاف‌پذیری** می‌شوند.

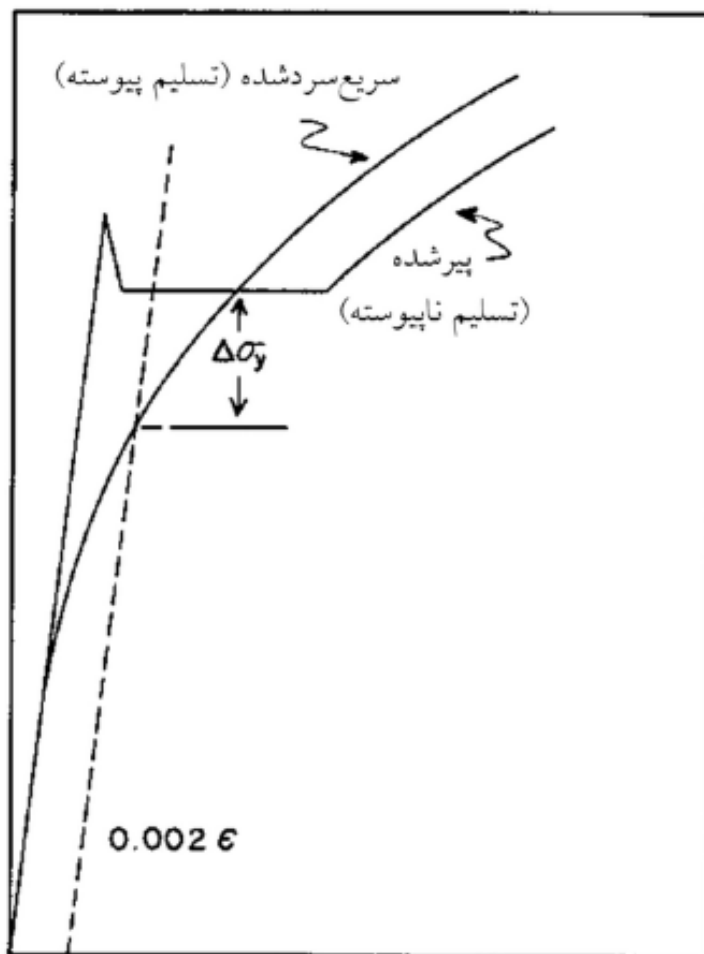
آنیل کردن فولاد کم کربن در ناحیه دوفازی فریت و آستنیت (بین A1 و A3)، بخشی از ریزساختار را به جزایری از آستنیت تبدیل کرده است که درضمن سریع سرد شدن به مارتنزیت تبدیل می‌شوند. ریزساختار حاصل **فریت و مارتنزیت** خواهد بود. فولادها با چنین ساختاری به **فولادهای دوفازی** موسوم‌اند. فریتی که اطراف جزایر مارتنزیتی را احاطه می‌کند، دارای چگالی بالایی از نابجایی‌هاست. این نابجایی‌ها قفل نشده‌اند و آزادند، بطوری که تحت تنش‌های کم به راحتی حرکت می‌کنند.

شمایی از استحکام تسلیم کم، نرخ کرنش سختی اولیه زیاد و تسلیم شدن پیوسته مربوط به فولادهای دوفازی برای نمونه‌های سریع‌سرد شده در شکل ۵-۲۷ نشان داده شده است.

وقتی که فولاد در ناحیه دوفازی **فریت-آستنیت** حرارت داده شود و پس از سریع سرد شدن در دمایی نزدیک دمای اتاق پیر گردد، تشکیل **رسوبات کاربیدی** موجب قفل شدن نابجایی‌ها می‌شود. در نتیجه برای تولید نابجایی‌های جدید جهت تغییر شکل پلاستیک، تنش‌های بیشتری نیاز است.

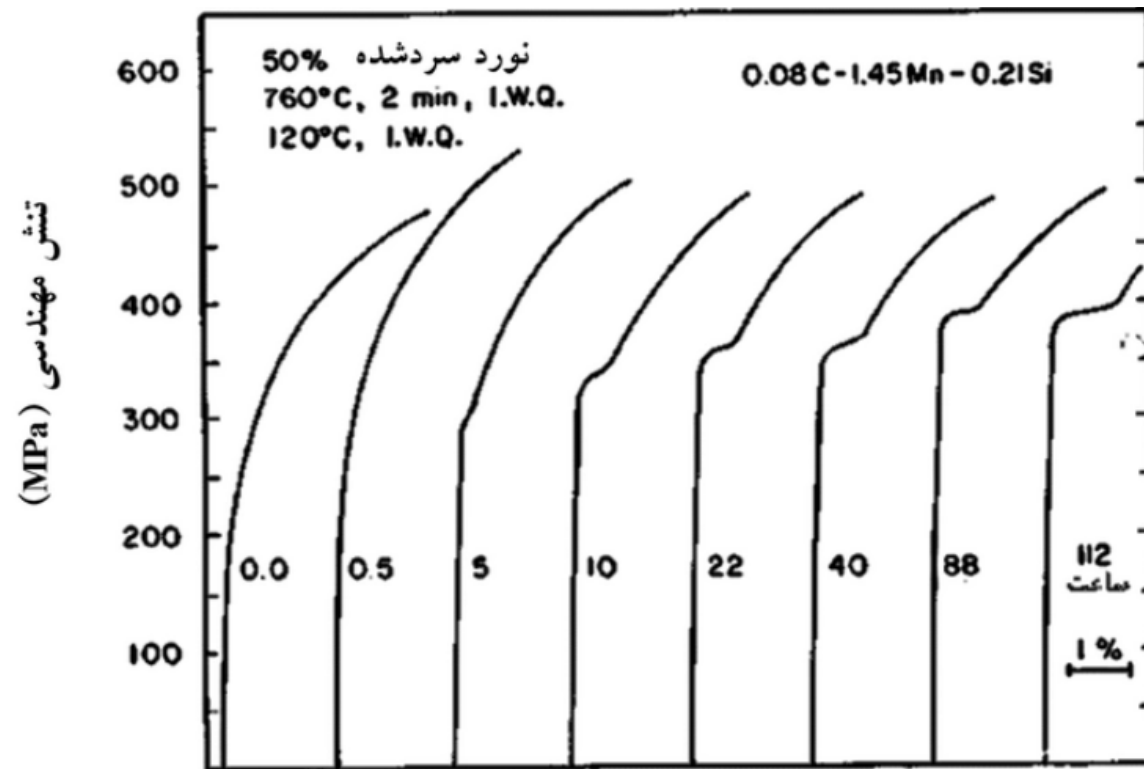
تشکیل ناگهانی چگالی بالایی از نابجایی‌های جدید موجب نازک شدن موضعی در نواحی مختلف نمونه کشش می‌شود. نازک شدن موضعی یا ناپیوسته به نوار لودرز (Luders Band) موسوم است. با ادامه اعمال تنش، نوار لودرز تحت تنش ثابتی موسوم به تنش تسلیم پایینی (Lower yield stress) پیشرفت می‌کند.

شکل ۵-۲۷ شمایی از منحنی‌های تنش - کرنش برای نشان دادن تفاوت بین تسلیم پیوسته (منحنی سریع‌سرد شده) و تسلیم ناپیوسته (منحنی پیر شده) [۱].



کرنش

شکل ۵-۲۸، چگونگی به وجود آمدن و گسترش پدیده تسلیم ناپیوسته ناشی از زمان پیر شدن در ۱۲۰ درجه سانتی گراد در یک فولاد $0.08C-1.45Mn-0.21Si$ پس از نورد سرد و آنیل شدن در دمای ۷۶۰ درجه سانتی گراد (ناحیه دو فاز فريت - آستنیت) را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، با گذشت زمان پیر شدن، استحکام تسلیم و وسعت تسلیم ناپیوسته به تدریج افزایش می‌یابد.



کرنش مهندسی (درصد)

شکل ۵-۲۸ اثر زمان پیری در ۱۲۰ درجه سانتی گراد روی رفتار تسلیم فولاد $0.08C-1.45Mn-0.21Si$ پس از نورد سرد، آنیل در ناحیه دو فاز فريت - آستنیت و سپس سرد شدن سریع [۱].

فولادهای میکروآلیاژی، میله گرد و آهنگری

قطعه‌های آهنگری برای کاربردهای استحکام بالا و متوسط، به طور معمول از فولادهای سخت‌شونده که پس از آهنگری، سریع سرد و سپس بازگشت داده شوند، ساخته می‌شوند. گروه دیگری از فولادها که امروزه برای قطعه‌های آهنگری با استحکام متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرند، فولادهای میکروآلیاژی با کربن متوسط و ریزساختارهای فریتی - پرلیتی‌اند. این فولادها دارای ۰/۳ تا ۰/۵ درصد کربن و مقدار کمی از عناصر وانادیم، نیوبیم و تیتانیم هستند. با سرد کردن مستقیم از دمای آهنگری، این فولادها تا استحکام نهایی در حد ۱۰۰۰ MPa (۱۴۵ ksi) سخت می‌شوند و بنابراین، نیازی به عملیات حرارتی سخت کردن و بازگشت دادن جداگانه ندارند. در سختی ۲۵ تا ۳۰ راکول سی، استحکام خستگی این نوع فولادهای میکروآلیاژی با فولادهای سخت و بازگشت‌داده‌شده قابل رقابت می‌باشد، ولی استحکام ضربه آنها کمتر است.

استحکام فولادهای فریتی - پرلیتی با کربن متوسط و ارتباط آن با ریزساختار و پارامترهای ترکیب شیمیایی، مطالعه و معادله زیر برای محاسبه آن ارائه شده است:

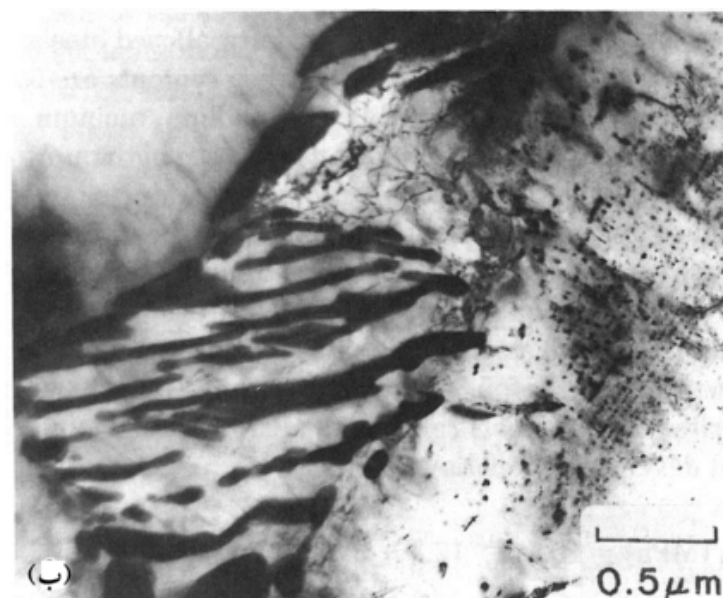
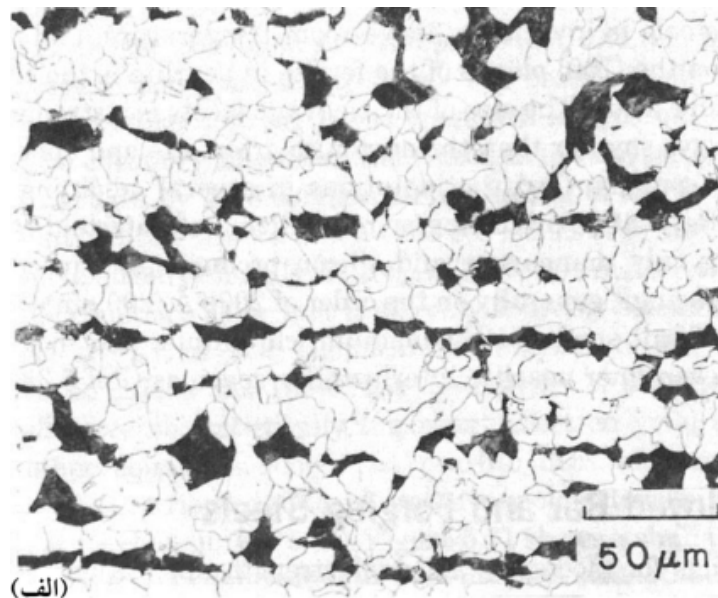
$$\sigma_{ys}(\text{MPa}) = 15/4 \left\{ f_a^{\frac{1}{3}} \left[2/3 + 3/8 (\% \text{Mn}) + 1/13 d^{-\frac{1}{2}} \right] + \left(1 - f_a^{\frac{1}{3}} \right) \left[11/6 + 0/25 S_p^{-\frac{1}{2}} + 4/1 (\% \text{Si}) + 27/6 (\% \text{N}) \right] \right\}$$

f_a ، کسر حجمی فریت
 S_p ، فاصله بین لایه‌ای پرلیت بر حسب میلی‌متر
 d ، قطر متوسط دانه بر حسب میلی‌متر

استحکام اندازه‌گیری شده تمام فولادهای فریتی - پرلیتی، به جز آنهایی که با وانادیم میکروآلیاژ شده باشند، با اعداد به دست آمده از معادله بالا هماهنگی دارند. فولادهای دارای وانادیم، استحکام کششی بالاتر از حد انتظار دارند و این پدیده، خود پایه و اساس گسترش فولادهای آهن‌گری با کربن متوسط و میکروآلیاژ شده است.

در شکل ۵-۳۰، ریزساختار فریتی - پرلیتی فولاد ساده کربنی دارای ۰/۱۵ درصد وانادیم نشان داده شده است. هیچ نوع رسوب میکروآلیاژی در ریزساختار نوری دیده نمی‌شود، اما وقتی که همان ساختار توسط میکروسکوپ الکترونی دیده شود، رسوب‌های بسیار زیاد و ریز در فریت، قابل دیدن هستند.

رسوب‌های بسیار ریز کربونیتريد وانادیم $V(C,N)$ ، همراه با کسر حجمی زیاد پرلیت، اجزای اصلی استحکام بخش فولادهای فریتی-پرلیتی با کربن متوسط و میکروآلیاژ شده‌اند. این رسوب‌ها تمایل دارند که در امتداد خطوط فصل مشترک به وجود آمده در اثر تجزیه آستنیت تشکیل شوند.



شکل ۵-۳۰ (الف) ریزساختار نوری فریت و پرلیت، (ب) ریزساختار الکترونی عبوری از فریت، پرلیت و رسوب‌های $V(C,N)$ ؛ فولاد ۰/۱۵C-۰/۱۵V [۱].