

بسمه تعالی



دانشگاه شهید بهشتی
دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی

فصل هشتم: بازگشت

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 هشتم – بازگشت (Tempering)

به علت تنش‌های داخلی ایجادشده در ضمن سریع سرد شدن، تمامی قطعه‌های سخت‌شده تا حدودی 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 مانند هنگامی که به سختی زیادی نیاز باشد و یا در رابطه با فولادهای کم‌کربن. به طور معمول، فولاد پس از سخت (مارتنزیت) شدن و پیش از استفاده باید بازگشت داده شود. بازگشت، حرارت دادن فولاد سخت (مارتنزیت) شده تا دمایی زیر A_{c1} ، نگه داشتن برای مدت زمان مشخص و سپس سرد کردن آهسته تا دمای اتاق است. دما و زمان حرارت دادن، به ترکیب شیمیایی فولاد، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر بستگی دارند. در اثر بازگشت، تنش‌های داخلی کاهش می‌یابند و یا حذف می‌شوند و بنابراین، استحکام ضربه‌ای افزایش می‌یابد (شکنندگی کم می‌شود). در عوض، سختی و استحکام قطعه سخت‌شده، تا حدودی کاهش خواهد یافت.

تغییرات ریزساختار

ساختار یک فولاد سریع سرد (مارتنزیت) شده ناپایدار است، **دلایل این ناپایداری** عبارتند از:

- وجود کربن بصورت فوق اشباع در شبکه بلوری bct
- انرژی تنش ناشی از وجود نابجایی‌ها و دوقلوپی‌های بسیار زیاد در ساختار بلوری صفحات مارتنزیتی
- انرژی سطحی ناشی از فصل مشترک‌های بسیار زیاد بین صفحات مارتنزیتی
- وجود آستنیت باقی‌مانده که حتی در فولادهای کم کربن نیز اجتناب ناپذیر است.

زمانی که فولاد مارتنزیت شده برای بازگشت حرارت داده می‌شود، **هرکدام از این عوامل نقش**

نیرو محرکه‌ای را برای تغییر ساختار در مراحل مختلف ایفا می‌کنند که عبارتند از:

- کربن فوق اشباع در شبکه مارتنزیت نیروی محرکه برای تشکیل کاربید
- انرژی تنش نیرومحرکه برای بازیابی
- انرژی فصل مشترک نیرومحرکه برای رشد دانه‌ها و یا افزایش پیوستگی و وسعت زمینه فریتی
- آستنیت باقی‌مانده نیرومحرکه برای تشکیل مخلوط فریت و سمنتیت در حین بازگشت

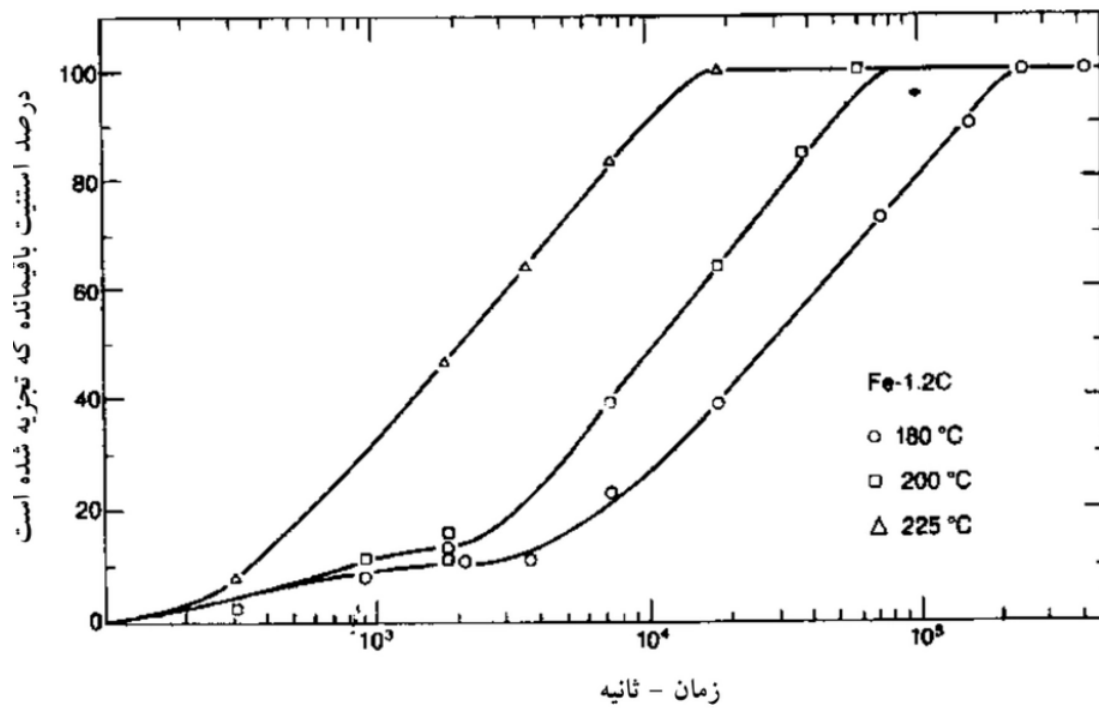
بررسی‌های پراش پرتو ایکس (X-ray diffraction) روی ریزساختار فولادهای سریع سرد و بازگشت داده شده، سه مرحله مشخص و مجزا از یکدیگر در رابطه با تغییر ریزساختار مارتنزیت درضمن بازگشت را نشان داده‌اند:

مرحله اول: تشکیل کاربیدهای انتقالی مانند کاربید اپسیلین (ϵ) و یا کاربید اتا (η) و در نتیجه کاهش درصد کربن زمینه مارتنزیتی تا حدود ۰/۲۵ درصد. اپسیلین (با فرمول $\text{Fe}_{2/3}\text{C}$) و اتا (با فرمول Fe_3C)

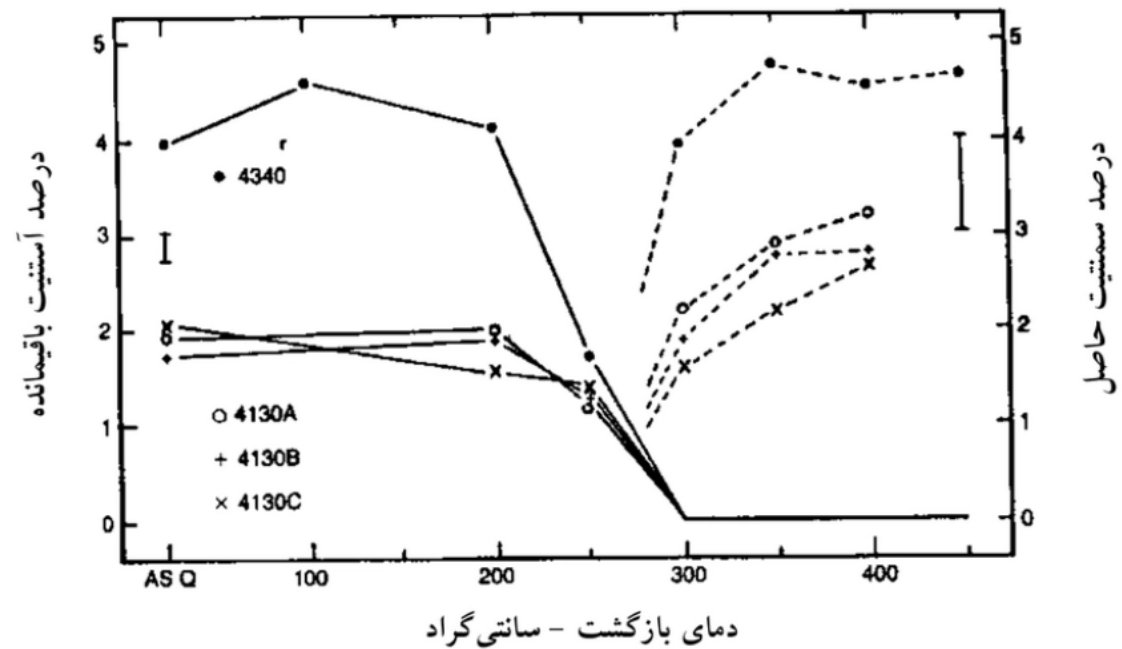
مرحله دوم: تبدیل آستنیت باقیمانده به فریت و سمنتیت.

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

بطور کلی بازه‌های دمایی ۱۰۰-۲۵۰ درجه سانتی‌گراد، ۲۰۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۵۰-۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب برای مراحل اول، دوم و شروع مرحله سوم گزارش شده‌اند. به جز این تغییرات ساختاری مراحل سه گانه، تغییرهای ساختاری دیگری نیز درضمن بازگشت گزارش شده‌اند، از جمله، تشکیل کاربیدهای آلیاژی و ایجاد سختی ثانویه که می‌توان آن را مرحله چهارم بازگشت نامید.



شکل ۸-۴ اثر زمان و دمای بازگشت روی تجزیه آستنیت باقیمانده در آلیاژ Fe-۱/۲C [۱].



شکل ۸-۵ تغییرهای آستنیت باقیمانده و سمتیت در فولادهای ۴۳۴۰ و ۴۱۴۰ بر حسب دمای بازگشت [۱]. (پس از یک ساعت)

مرحله سوم بازگشت، شامل تشکیل مخلوط فریت و سمنتیت بر اساس نمودار تعادلی آهن - کربن می‌شود. شواهدی در دست است که پیش از تشکیل سمنتیت (به‌ویژه در فولادهای پرکربن)، کاربید کای^۱ با شبکه بلوری منوکلینیک^۲ و فرمول Fe_5C_2 به وجود می‌آید. گرچه بین سمنتیت و کاربید کای تفاوت‌هایی وجود دارد، اما شبکه‌های بلوری و موقعیت اتم‌ها در هر دو نوع کاربید آن‌قدر به یکدیگر شبیه‌اند که تشخیص آنها از یکدیگر به کمک پرتوی ایکس و یا روش‌های مشابه به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. ۱-Chi-carbide ۲-Monoclinic

اگر فولادهای آلیاژی با ساختار مارتنزیتی که دارای عناصر آلیاژی کاربیدساز مانند وانادیم، مولیبدن، تنگستن، کروم و یا تیتانیم به صورت محلول باشند، در بازه دمایی تشکیل کاربیدهای آلیاژی (۶۵۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) بازگشت داده شوند، کاهش سختی در آنها نسبت به فولاد ساده کربنی به تعویق می‌افتد و یا حتی سختی آنها افزایش می‌یابد. به تعویق افتادن کاهش سختی و یا افزایش سختی در فولادهای آلیاژی یادشده که به سختی ثانویه موسوم است، به طور مستقیم ناشی از تشکیل کاربیدهای آلیاژی در بازه دمایی یادشده می‌باشد.

□ رسیدن به ساختار به طور کامل بازگشت داده شده عبارت از **سمنتیت کروی در زمینه فریت هم‌محور** است.

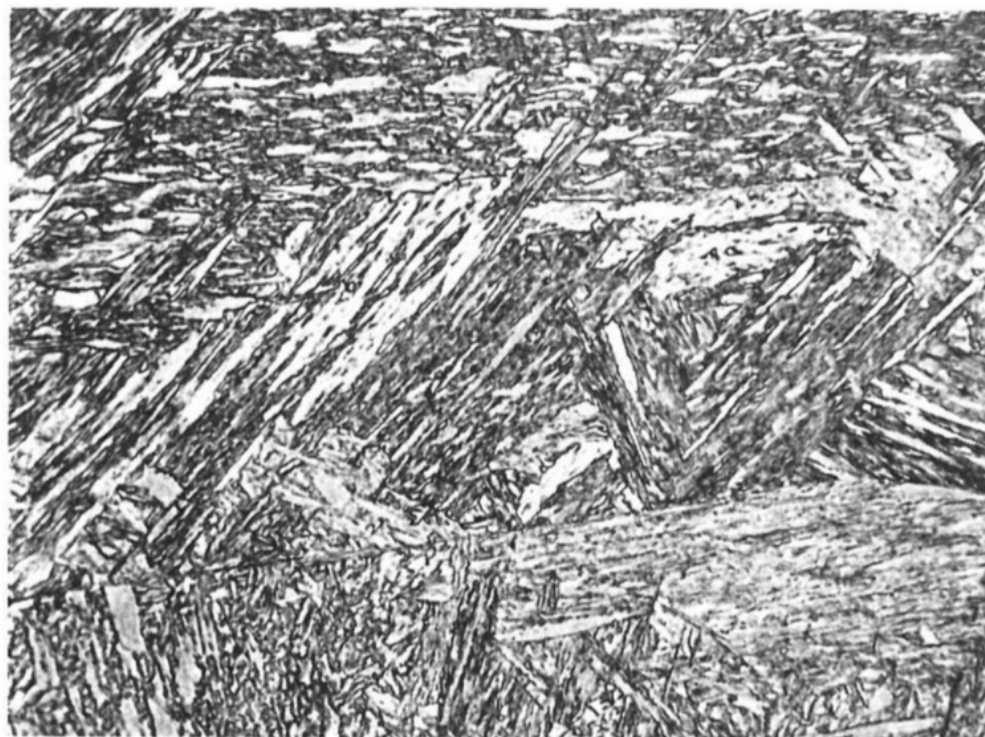
□ نخست با تشکیل کاربیدهای انتقالی از درصد کربن مارتنزیت کاسته می‌شود و بنابراین تتراگونالیتی (نسبت c/a) شبکه بلوری آن کاهش می‌یابد.

□ در نهایت با خروج کربن بیش‌تر از شبکه بلوری مارتنزیت، صفحات فریتی جایگزین صفحات مارتنزیت در ساختار خواهند شد.

□ با ادامه عملیات بازگشت، صفحات فریتی رشد می‌کنند و زمینه یکنواخت فریت هم‌محور بوجود می‌آیند.

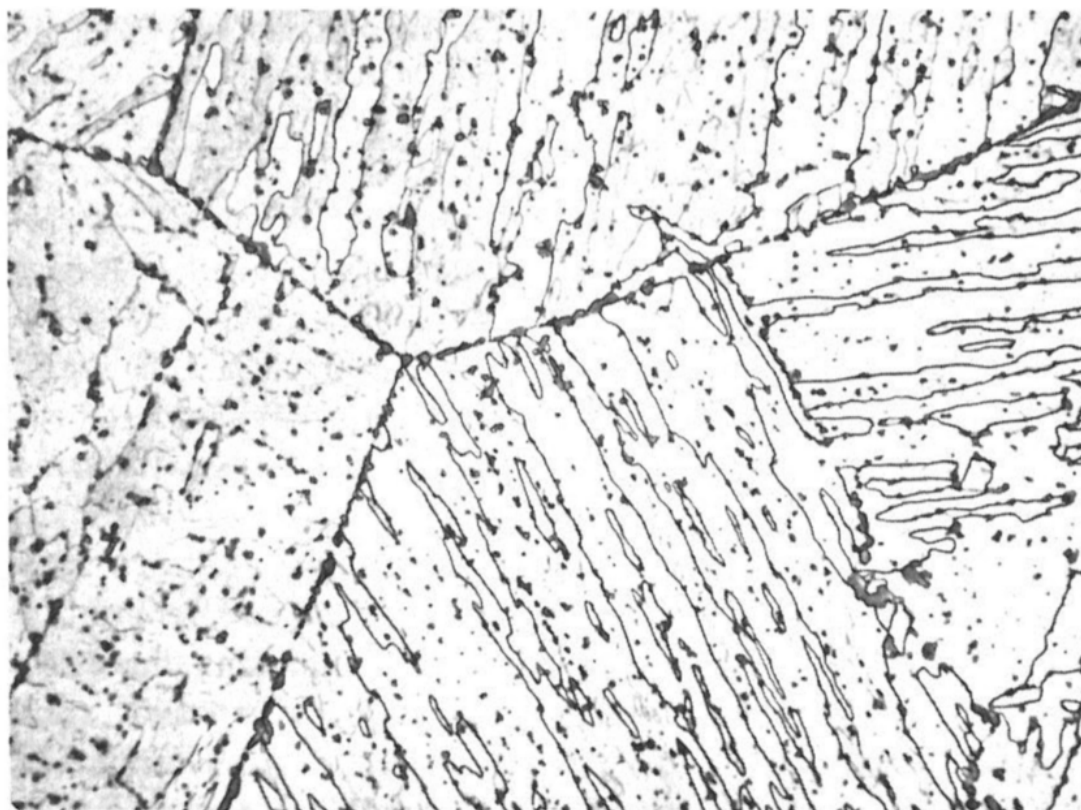
شکل‌های ۷-۸ تا ۸-۱۰،

تغییرهای ریزساختار زمینه فولاد مارتنزیت شده $\text{Fe-}\frac{1}{2}\text{C}$ را در ضمن بازگشت نشان می‌دهند. در بازه تشخیص میکروسکوپ نوری، تغییرهای حاصل در ظاهر ساختار این فولاد، هنگامی که پس از مارتنزیت شدن به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد بازگشت داده شود، بسیار جزیی است (شکل ۷-۸)، در صورتی که تغییرهای بسیار برجسته و مشخص‌تر در ریزساختار نمونه‌هایی که به مدت دو ساعت در ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد بازگشت داده شده‌اند، دیده می‌شود (شکل ۸-۸).



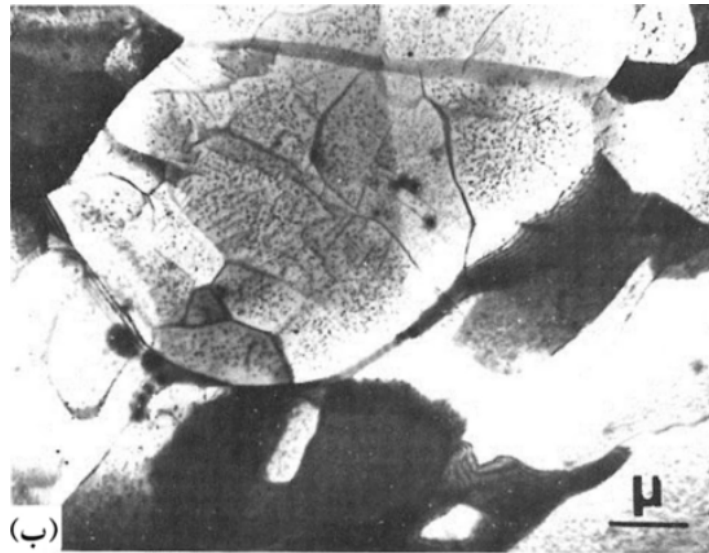
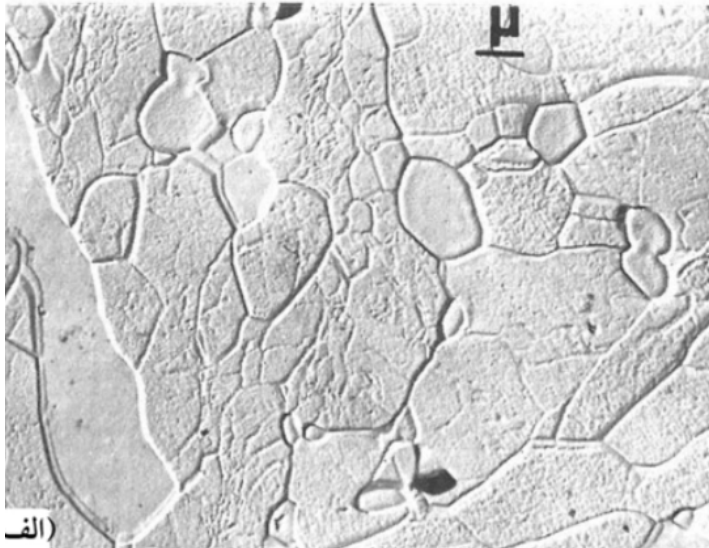
شکل ۷-۸ ریزساختار مارتنزیت لایه‌ای در آلیاژ $\text{Fe-}\frac{1}{2}\text{C}$ بعد از بازگشت به مدت ۱۵ دقیقه در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد (۷۵۲ درجه فارنهایت). ریزساختار نوری، محلول حکاکی نایتال، بزرگ‌نمایی $\times 500$ [۱].

شکل ۸-۸ نشان می‌دهد که حتی پس از بازگشت به نسبت زیاد، شکل اولیه بسته‌های مارتنزیت و واحدهای منفرد موازی در آن‌ها هنوز به طور کامل مشخص هستند. تا این مرحله، مهم‌ترین اثرهای بازگشت روی ریزساختار، شامل حذف صفحات کوچک مارتنزیتی و تشکیل کاربیدهای کرووی روی مرزدانه‌های آستنیت اولیه داخل بسته‌های مارتنزیت می‌باشد.

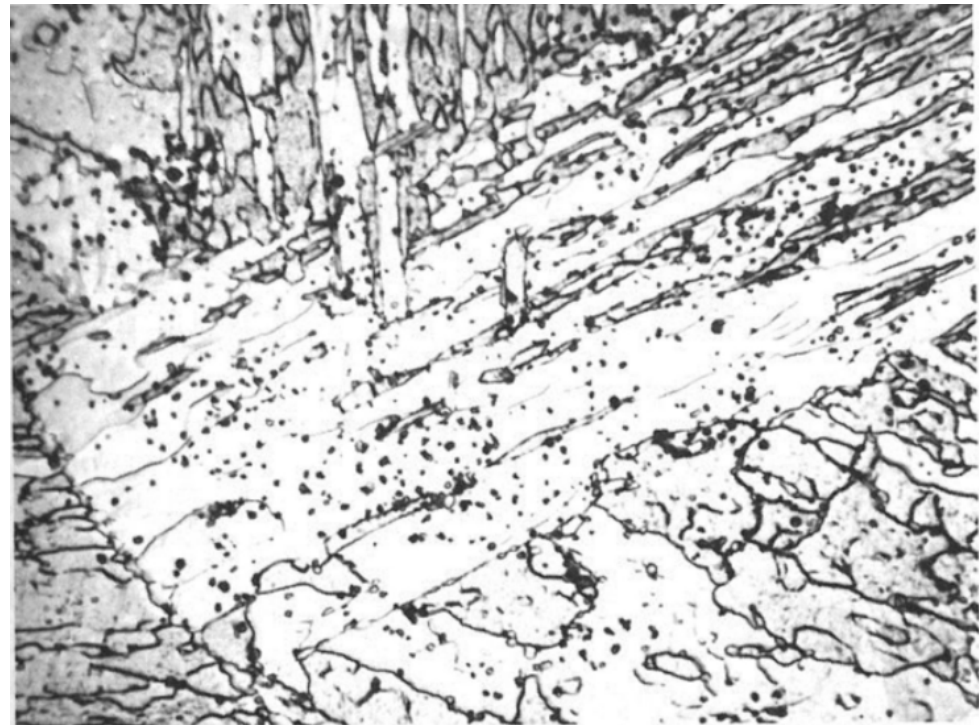


شکل ۸-۸ ریزساختار مارتنزیت لایه‌ای در آلیاژ $\text{Fe-}1/2\text{C}$ بعد از بازگشت به مدت دو ساعت در 700°C درجه سانتی‌گراد (1292°F درجه فارنهایت). ریزساختار نوری، محلول حکاکی نایتال، بزرگ‌نمایی $500\times$ [۱].

بازگشت بیشتر موجب می‌شود که بلورهای صفحه‌ای شکل فریت باقی‌مانده داخل بسته‌های مارتنزیتی از بین بروند و بجای آنها دانه‌های هم‌محور فریتی بیش‌تری تشکیل شوند.



شکل ۸-۱۰ ریزساختار مارتنزیت لایه‌ای در آلیاژ $Fe-1/22C$ بعد از بازگشت به مدت ۱۲ ساعت در $700^{\circ}C$ (درجه سانتی‌گراد (۱۲۹۲ درجه فارنهایت)). (الف) ریزساختار از طریق مشابه‌سازی سطح مقطع پولیش و حکاکی شده تهیه شده است. (ب) ریزساختار الکترونی عبوری [۱].



شکل ۸-۹ ریزساختار مارتنزیت لایه‌ای در آلیاژ $Fe-1/22C$ بعد از بازگشت به مدت ۱۲ ساعت در $700^{\circ}C$ (درجه سانتی‌گراد (۱۲۹۲ درجه فارنهایت)). ریزساختار نوری، محلول حکاکی نایتال، بزرگ‌نمایی $500\times$ [۱].

تغییرات خواص مکانیکی

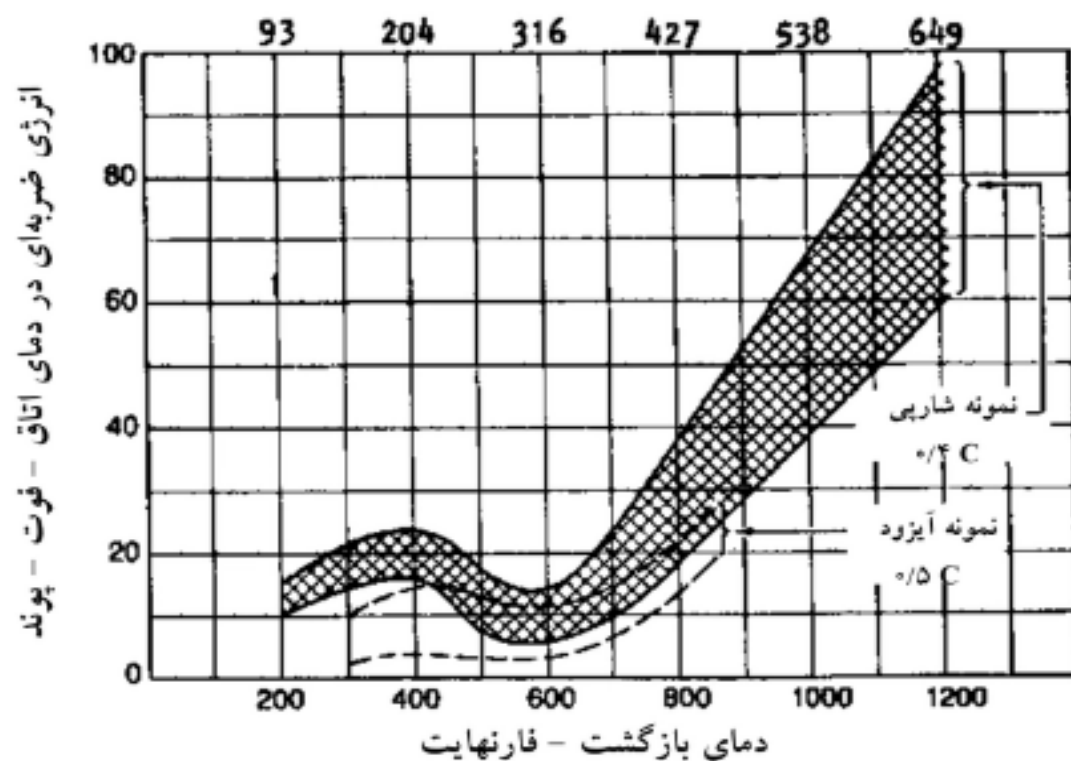
مارتنزیت که ریزساختار مورد نظر در عملیات سرد کردن سریع فولادهاست، بسیار سخت و در عین حال، بسیار ترد و شکننده می‌باشد. برخی از عواملی که منجر به ترد و شکننده شدن مارتنزیت می‌شوند، عبارت‌اند از:

- خارج شدن شبکه بلوری فولاد از شکل طبیعی خود در اثر محبوس شدن کربن اضافی در فضاهاى هشت‌وجهی (به شکل ۶-۴ مراجعه شود)
- رسوب اتم‌های ناخالصی در مرز دانه‌های آستنیت اولیه
- تشکیل کاربید در ضمن سرد شدن
- تنش‌های حاصل از سریع سرد شدن.

هدف اصلی فرایند بازگشت، کاهش تردی و شکنندگی و یا به بیان دیگر، افزایش چقرمگی و مقاومت فولاد در برابر ضربه است. از آنجایی که در عملیات بازگشت، هر دمایی در بازه دمای اتاق تا Ae_1 را می‌توان استفاده کرد، بنابراین، ریزساختار و در نتیجه، خواص مکانیکی متنوعی از مارتنزیت تا سمیتیت کروی در زمینه فریت را می‌توان به دست آورد. در عمل، دما و زمان بازگشت با توجه به خواص مکانیکی، یعنی مقدار سختی، استحکام و چقرمگی لازم انتخاب می‌شوند.

تغییرهای انرژی ضربه بر حسب دمای بازگشت برای فولادهای ساده کربنی که شامل ۰/۴ و ۰/۵ درصد کربن باشند، در شکل ۸-۱۱ نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود، به جز بازه دمایی ۲۶۰-۳۵۰ درجه سانتی گراد (۵۰۰-۷۰۰ درجه فارنهایت)، بازگشت در دماهای دیگر باعث افزایش چقرمگی فولاد می شود. مقاومت به ضربه فولادهایی که در این بازه دمایی بازگشت داده شوند، کاهش می یابد. این پدیده به تردی ۳۵۰ درجه سانتی گراد، تردی ۵۰۰ درجه فارنهایت و یا تردی مارتنزیت بازگشت داده شده موسوم است و گاهی آن را با TME^۱ نشان می دهند. پدیده های تردی در رابطه با بازگشت فولادهای سریع سرد شده در بخش ۸-۷ به طور کامل بحث خواهند شد. به منظور جلوگیری از کاهش مقاومت فولاد در برابر ضربه، همواره سعی می شود که از بازگشت فولاد در بازه دمایی یادشده جلوگیری شود.

دمای بازگشت - سانتی گراد



۱- Tempered Martensite Embrittlement (TME)

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

شکل ۸-۱۱ اثر درصد کربن را نیز روی چقرمگی فولاد سریع سرد و بازگشت داده شده نشان می دهد. فولادهایی که ۵/۰ درصد و یا بیشتر کربن داشته باشند، مقاومت به ضربه کمی دارند (با افزایش درصد کربن، مقاومت به ضربه کاهش می یابد) و فقط هنگامی استفاده می شوند که به سختی و یا مقاومت به سایش زیادی نیاز باشد و یا ثابت ماندن زوایا، گوشه ها و لبه های قطعه به هنگام کار اهمیت ویژه ای داشته باشند. برای نمونه، ابزارهای دستی مانند پیچ گوشتی و تیغچه های برش از فولادهای پرکربن ساخته می شوند و پس از مارتنزیت شدن در دمایی پایین بازگشت داده می شوند.

دمای مناسب برای بازگشت فولادهای ساده کربنی و کم آلیاژ را می توان با توجه به ترکیب شیمیایی آنها و سختی نهایی مورد نظر به طور تقریبی مشخص کرد. این روش بر اساس فرمول ارایه شده توسط گردن^۱ و جف^۲ است که فرض می شود، فولاد پس از سریع سرد شدن به طور عمده، مارتنزیت شده باشد.

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

T دمای بازگشت بر حسب فارنهایت،

H_c سختی محاسبه شده از ترکیب شیمیایی (راکول C)

H_a سختی موردنظر پس از بازگشت

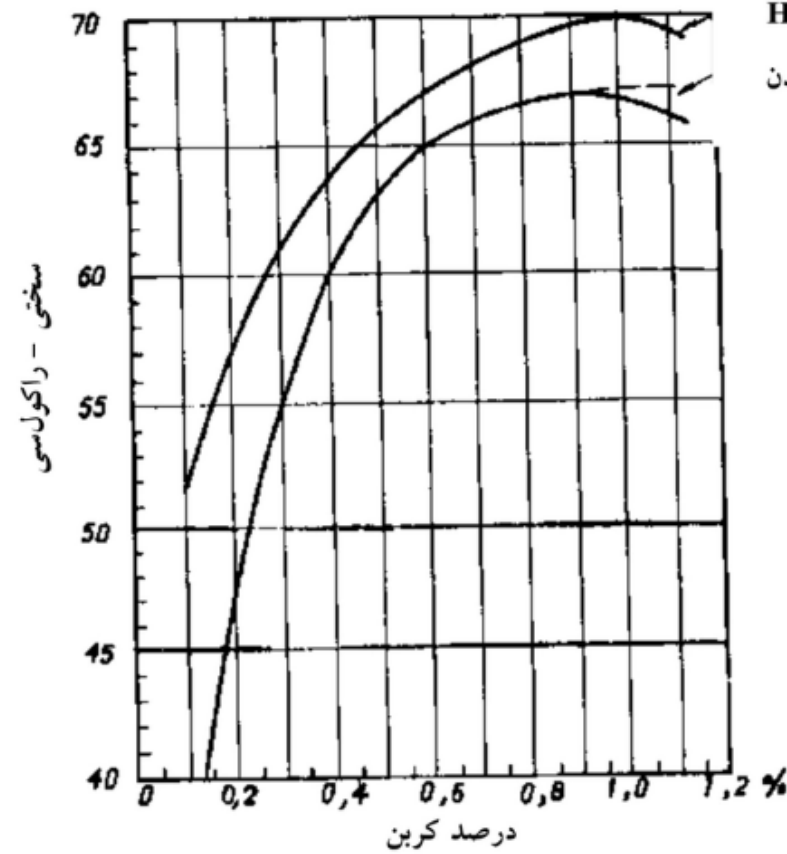
اگر دمای بازگشت به سانتی گراد تبدیل شود:

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

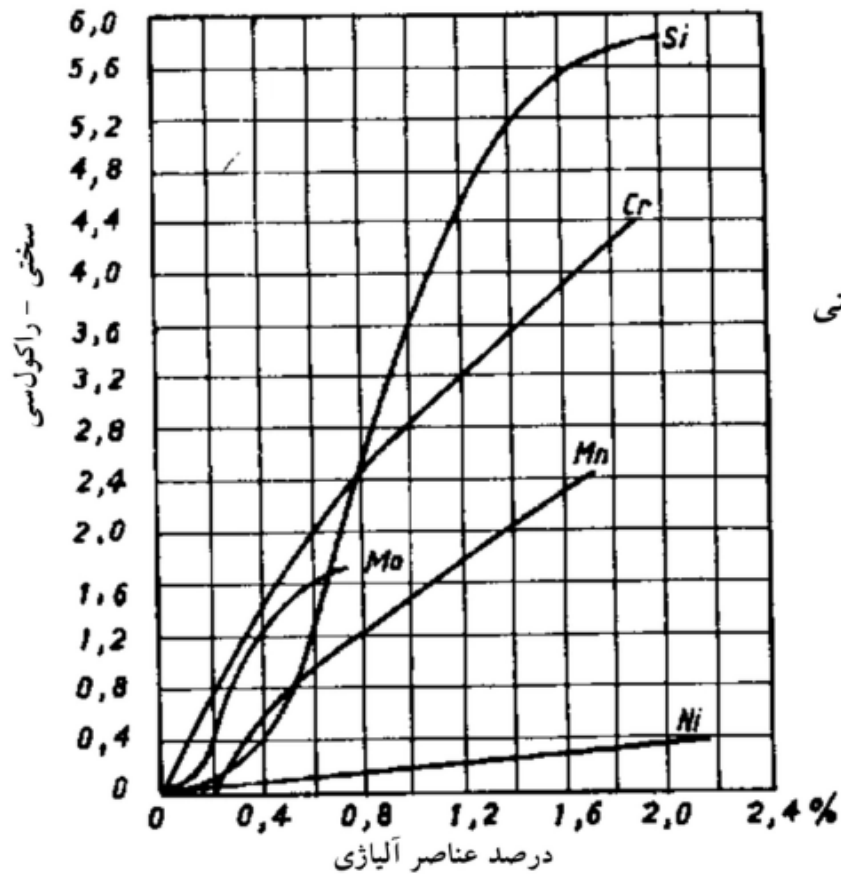
مقادیر مختلف H_c با توجه به درصد کربن و عناصر آلیاژی از شکل های ۸-۱۲ و ۸-۱۳ به دست می آیند. زمان بازگشت توصیه شده در دمای به دست آمده از این فرمول، چهار ساعت است. از آنجایی که با ریز شدن دانه های فولاد، مقاومت آن در برابر نرم شدن در ضمن بازگشت افزایش می یابد، اثر اندازه دانه ها نیز در مقدار H_c باید در نظر گرفته شود. این اثر به صورت زیر است:

عدد اندازه دانه ASTM	۴	۶	۸	۱۰
افزایش مقدار H _c	۰/۶	۰/۹	۱/۲	۱/۵

اثر درصد کربن یا افزایش H_c
سختی پس از سریع سرد شدن



شکل ۸-۱۲ افزایش سختی (راکولسی) با توجه به درصد کربن فولاد. هم چنین سختی پس از سریع سرد شدن بر حسب تابعی از درصد کربن نشان داده شده است [۶].



شکل ۸-۱۳ افزایش سختی (راکولسی) با توجه به عناصر آلیاژی مختلف [۶].

فولاد SIS ۲۴۴۱ با ترکیب شیمیایی زیر را در نظر بگیرید. برای این که سختی نهایی HRC ۴۰ باشد، دمای بازگشت را مشخص کنید.

G.S.No.	%Mo	%Ni	%Cr	%Mn	%Si	%C
۶	۰/۱۵	۱/۲	۱/۳	۰/۶	۰/۲۵	۰/۳۳

حل:

بر طبق نمودارهای ۸-۱۲ و ۸-۱۳، مقادیر افزایش H_c عبارت‌اند از:

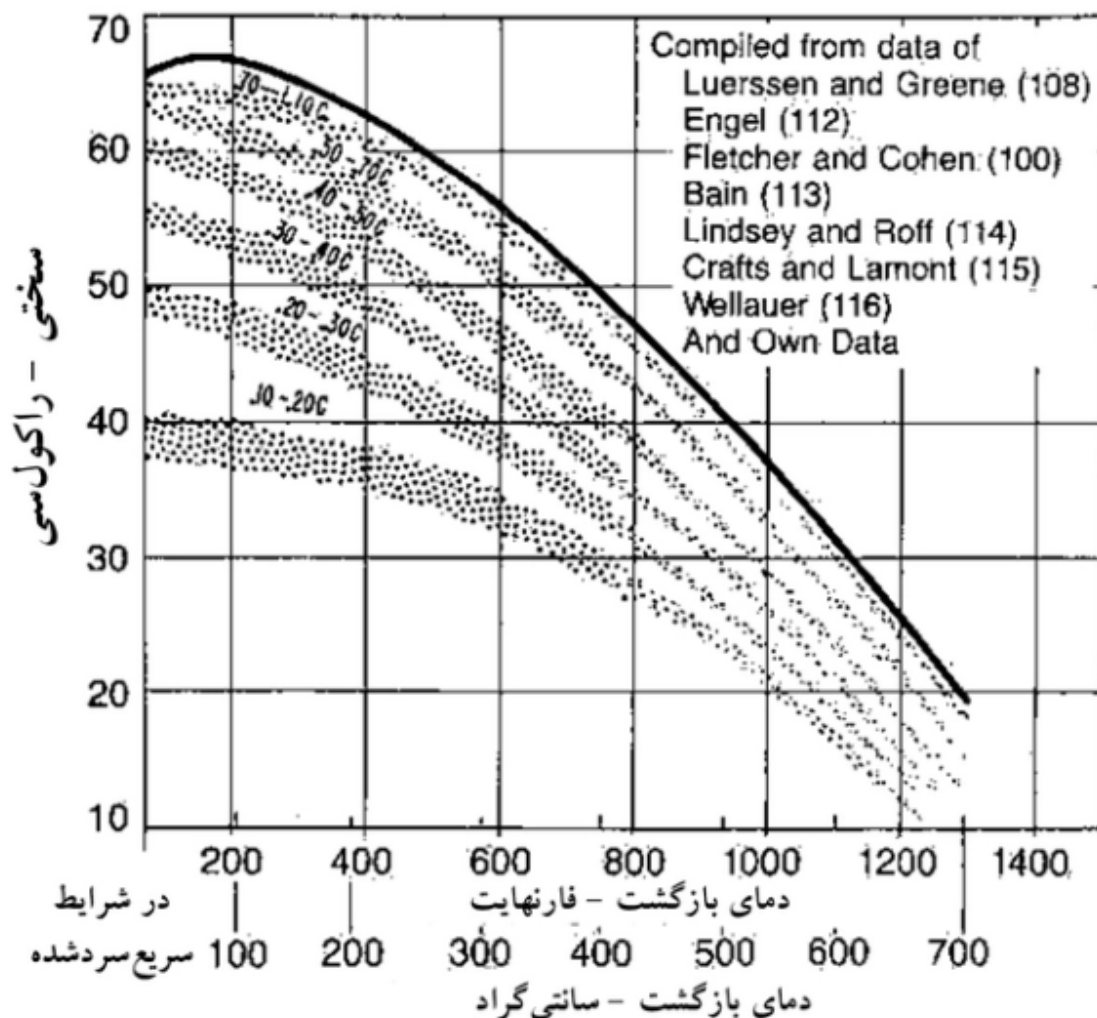
جمع	G.S.No.	Mo	Ni	Cr	Mn	Si	C
۶۷/۷	۰/۹	۰/۲	۰/۲	۳/۳	۰/۹۵	۰/۱۵	۶۲

با قرار دادن مقادیر به دست‌آمده در فرمول ارائه‌شده داریم:

$$T = 16/67 (67/7 - 40) - 17/8 = 444^{\circ}\text{C}$$

گفتنی است که نتایج حاصل تقریبی هستند. از سوی دیگر، این روش برای محاسبه دمای بازگشت برای فولادهای آلیاژی که دارای مقادیر قابل توجهی از عناصری آلیاژی کاربیدساز باشند، مناسب نیست.

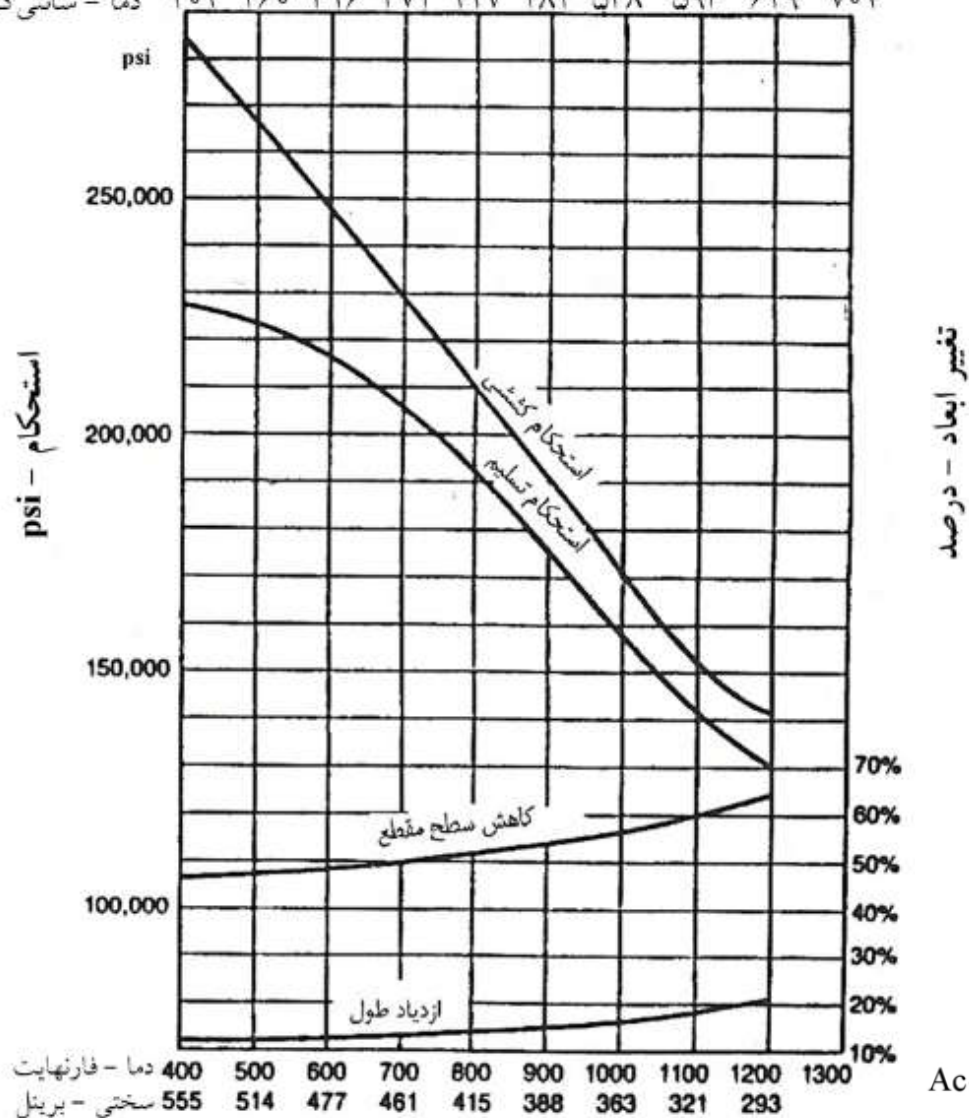
همانطور که در شکل ۸-۱۴ دیده می‌شود، با افزایش دمای بازگشت و یا کاهش درصد کربن، سختی نهایی کاهش می‌یابد. سختی فولادهای پرکربنی که در دمای پایین بازگشت داده شده‌اند در شرایط سریع سرد و بازگشت داده شده **تأخیری** از سختی حاصل از حالت سریع سرد شده است. افزایش سختی در این مرحله ناشی از تشکیل کاربیدهای انتقالی بسیار ریز در بین صفحه‌های مارتنزیتی است.



هرچه دمای بازگشت افزایش یابد، استحکام تسلیم و استحکام کششی کاهش می‌یابد و انعطاف پذیری زیادتر می‌شود.

شکل ۸-۱۴ اثر دمای بازگشت و درصد کربن روی سختی فولادهای ساده کربنی در شرایط سریع سرد و بازگشت داده شده. اعداد روی منحنی‌ها درصد کربن را مشخص می‌کنند [۱].

۷۰۴ ۶۴۹ ۵۹۳ ۵۳۸ ۴۸۲ ۴۲۷ ۳۷۱ ۳۱۶ ۲۶۰ ۲۰۴ دما - سانتی گراد



$Ac_1 = 1350$

و

$Ac_3 = 1415$

و

$Ar_3 = 890$

و

$Ar_1 = 720$

ترکیب شیمیایی و اندازه دانه

اندازه دانه	Mo	Cr	Ni	Si	S	P	Mn	C
۶-۸	۰/۲۶	۰/۷۸	۱/۷۷	۰/۲۶	۰/۰۱۸	۰/۰۲۳	۰/۶۷	۰/۴۱

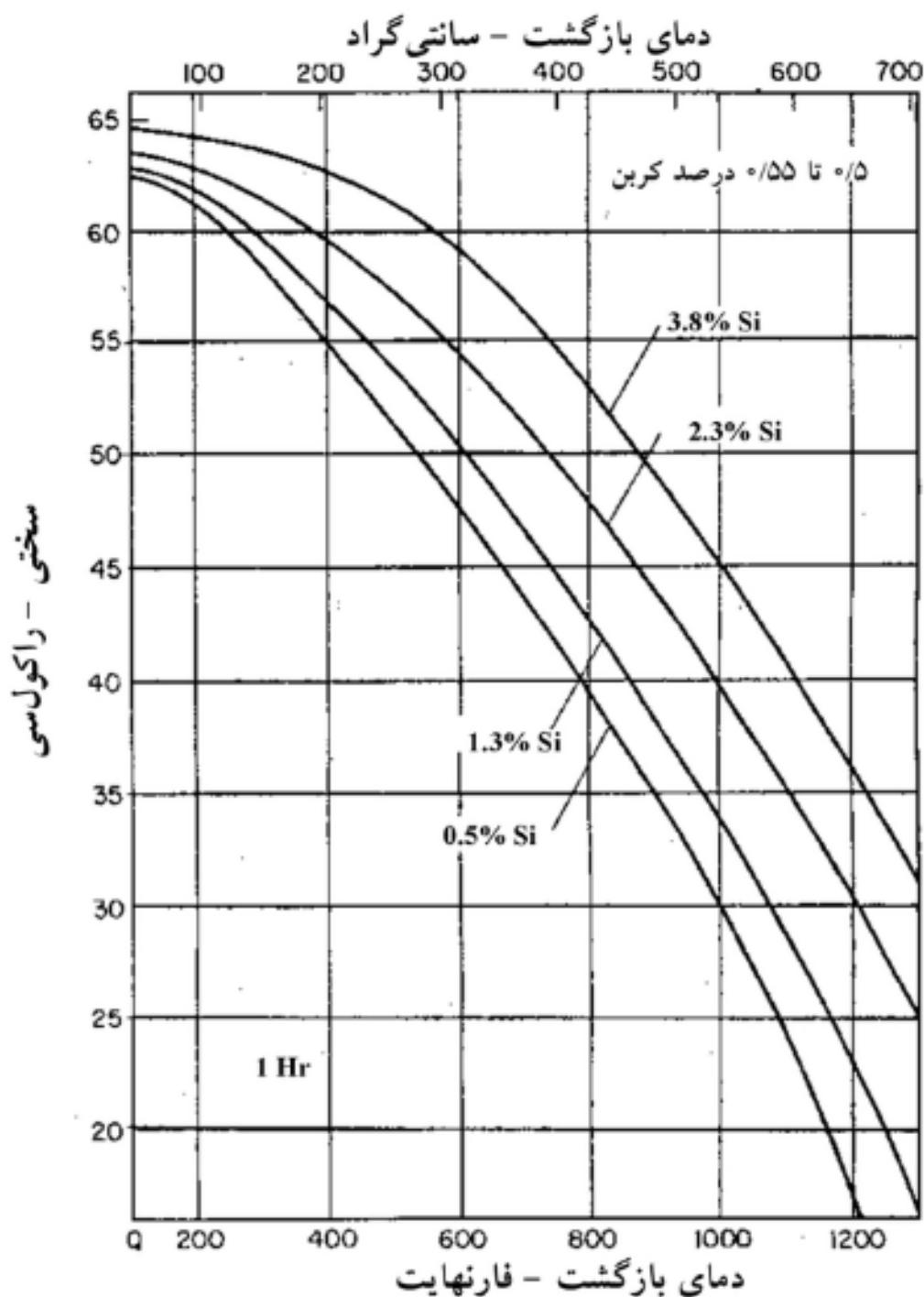
دماهای بحرانی - فارنهایت

شکل ۸-۱۵ اثر دمای بازگشت روی خواص مکانیکی فولاد ۴۳۴۰، عملیات حرارتی: نمونه‌ها در ۸۷۱ درجه سانتی گراد (۱۶۰۰ درجه فارنهایت)، نرماله و سپس در ۸۰۲ درجه سانتی گراد (۱۴۷۵ درجه فارنهایت)، آستنیت و آن‌گاه در روغن متلاطم سریع سرد شده‌اند. سختی حاصل از سریع سرد شدن ۶۰۱ برینل [۱].

تأثیر افزایش دمای بازگشت:
کاهش استحکام کششی و تسلیم،
افزایش انعطاف پذیری
کاهش تفاوت بین استحکام کششی و استحکام تسلیم

اثرهای عناصر آلیاژی

عناصر آلیاژی در حد متوسط می توانند سختی مارتنزیت حاصل از سریع سرد شدن فولادهای کم کربن و یا کربن متوسط را به مقدار بسیار کمی افزایش دهند. با افزایش درصد کربن، احتمال کاهش سختی حاصل از سریع سرد شدن در فولادهای یادشده افزایش می یابد. این پدیده، ناشی از افزایش درصد آستنیت باقیمانده در ساختار حاصل است. به جز موارد یادشده، عناصر آلیاژی، اثرهای بسیار جزئی روی سختی مارتنزیت حاصل از سریع سرد شدن دارند، به طوری که سختی حاصل از سریع سرد شدن در یک فولاد آلیاژی، به ندرت از سختی فولاد ساده کربنی با همان درصد کربن تجاوز می کند. برعکس، در مواردی که مقدار آستنیت باقیمانده زیاد باشد، سختی فولاد آلیاژی، کمتر هم خواهد شد. بازگشت دادن در دمایی مانند ۲۰۰ درجه سانتی گراد (۴۰۰ درجه فارنهایت) منجر به کاهش سختی نهایی فولادهای آلیاژی معمولی می شود، اما وجود عناصر آلیاژی باعث به تعویق افتادن کاهش سختی و استحکام خواهد شد.



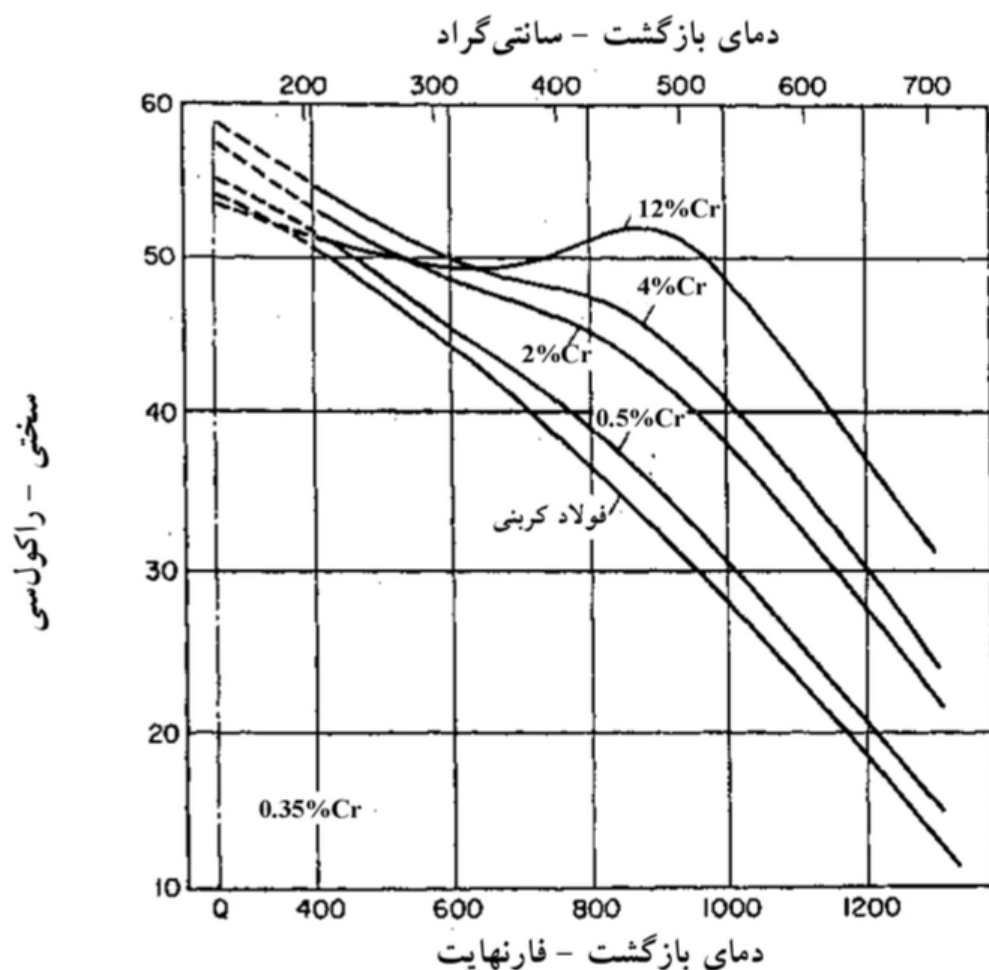
از آنجایی که سیلیسیم به مقدار زیادی در کاربیدها حل نمی‌شود، نقش آن انحلال در فریت زمینه و افزایش سختی و استحکام آن از طریق تشکیل محلول جامد است. عناصری مانند نیکل و منگنز اثری مشابه با سیلیسیم با اثر کم‌تر دارند.

در فولادهایی که بیش از ۰/۹ درصد کربن داشته باشند، کاهش سختی در ضمن بازگشت ممکن است به تعویق افتد. این پدیده ناشی از مقدار چشمگیری آستنیت باقی‌مانده می‌باشد.

شکل ۸-۱۷ اثر سیلیسیم روی سختی حاصل از بازگشت فولادهای سریع‌سرد شده و بازگشت داده‌شده در دماهای مختلف و زمان یک ساعت [۱۶].

حتی ۰/۵ درصد کروم، مقاومت فولاد در برابر نرم شدن را افزایش می‌دهد، بطوری که بدون توجه به دمای بازگشت، **سختی حاصل از سریع سرد و بازگشت داده شدن فولاد کروم‌دار همواره بیش‌تر از سختی فولاد ساده کربنی با همان درصد کربن است.**

با افزایش کروم به بیش از ۲ درصد، سختی مارتنزیتی که در دماهای بالا بازگشت داده شود، افزایش می‌یابد. این افزایش سختی، به **سختی ثانویه موسوم است و علت آن تشکیل کاربیدهای آلیاژی است.**

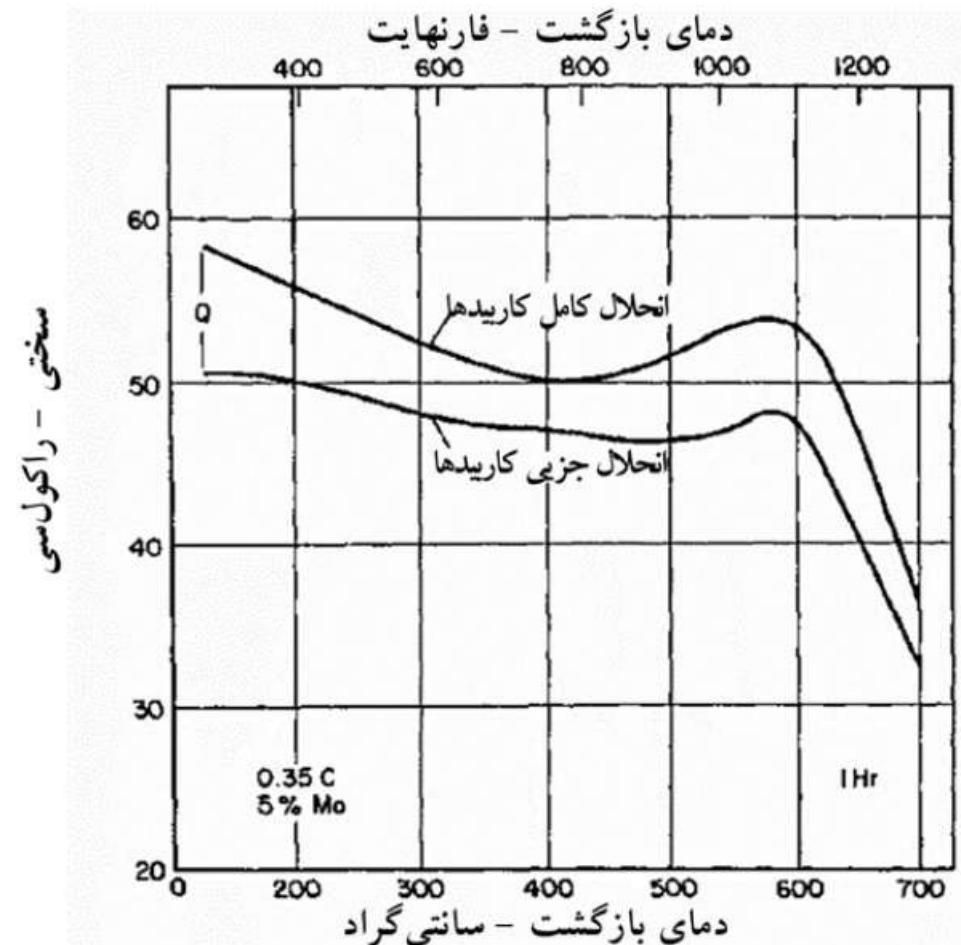
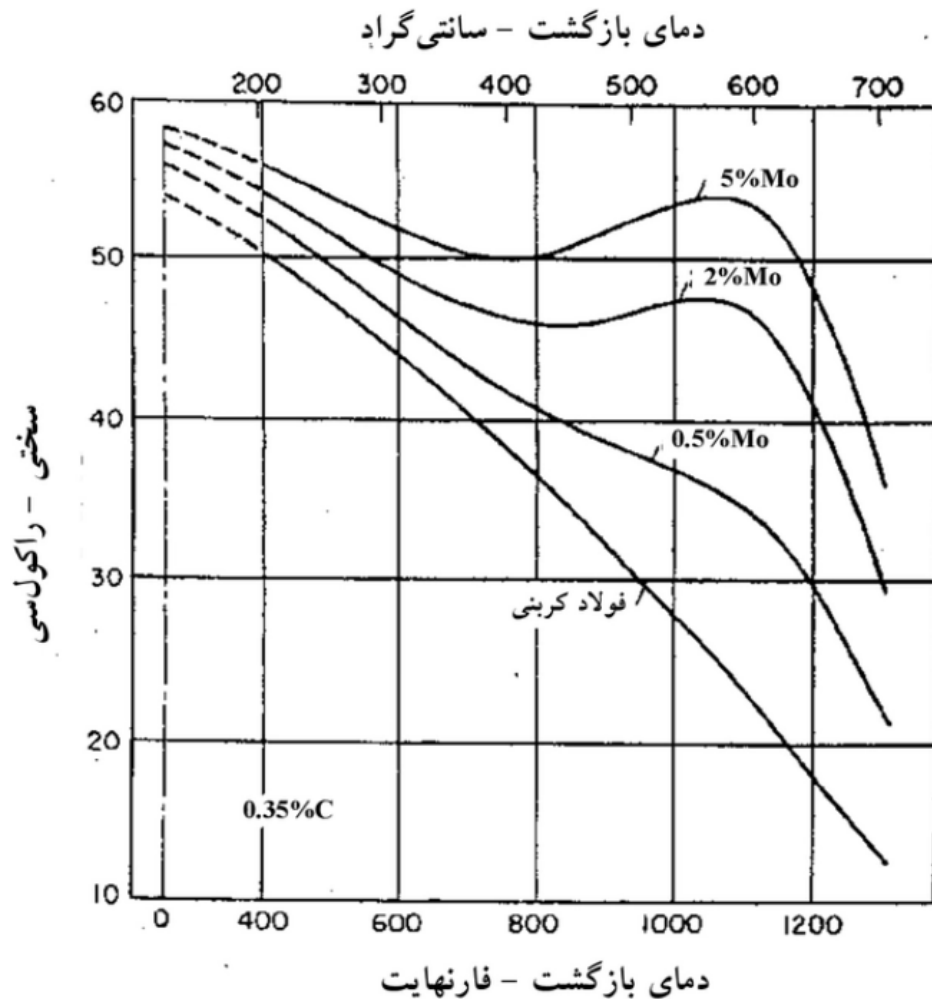


در فولاد شکل ۸-۱۸ پس از سریع سرد شدن مقدار چشمگیری آستنیت باقی‌مانده وجود دارد، که قادر است سختی حاصل از سریع سرد شدن را حتی تا کم‌تر از سختی مارتنزیت حاصل از فولاد ساده کربنی با همان درصد کربن کاهش دهد.

عناصر کاربیدساز درحالی که اثر چشمگیری روی افزایش ضخامت پوسته سخت شده دارند، اثرهای آنها در رابطه با آستنیت باقی‌مانده بسیار کم‌تر از منگنز و نیکل است.

شکل ۸-۱۸ اثر کروم روی سختی حاصل از سریع سرد شدن و بازگشت دادن فولاد در دماهای مختلف و زمان یک ساعت [۱۶].

مولیدن قابلیت کاربیدسازی بیش‌تری نسبت به کروم دارد. سختی و بنابراین استحکام حاصل پس از بازگشت در دمای بالا در فولادهای مولیدن‌دار بسیار بیشتر از فولادهای کروم‌دار است. در شکل ۸-۲۰ دو دمای آستنیت‌ه کردن، یکی ۱۲۰۴ درجه سانتی‌گراد و دیگری ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. در حالت اول که کاربیدهای بیش‌تری در آستنیت حل می‌شوند، سختی حاصل از سریع سرد شدن و سختی در شرایط سریع سرد و بازگشت داده شده، همواره بیش از حالت دوم است.

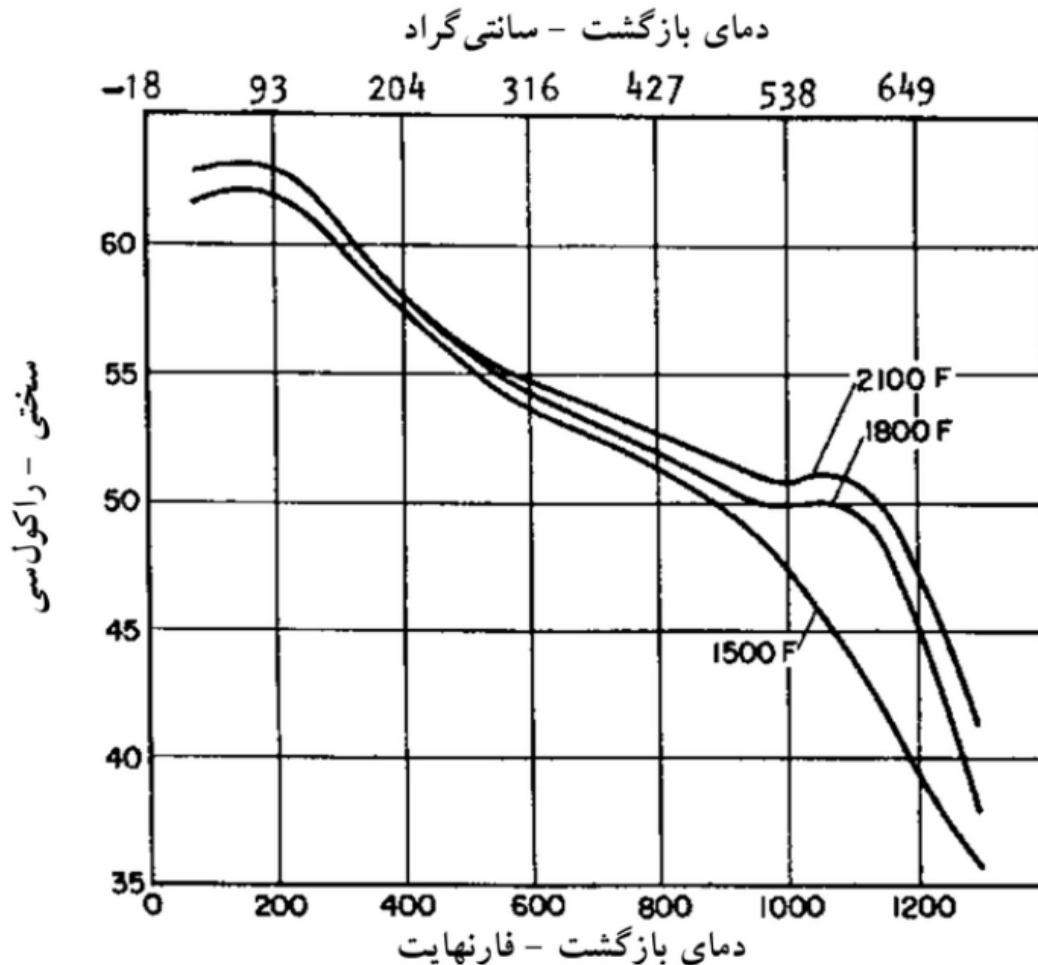


شکل ۸-۲۰ اثر انحلال کاربیدها در آستنیت روی سختی حاصل از بازگشت فولاد سریع‌سردشده و بازگشت‌داده‌شده در دماهای مختلف و زمان بازگشت یک ساعت. دمای آستنیت‌ه برای منحنی بالایی و پایینی، به‌ترتیب ۱۲۰۴ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد (۲۲۰۰ و ۱۷۴۰ درجه فارنهایت) است [۱۶].

شکل ۸-۱۹ اثر مولیدن روی سختی حاصل از بازگشت فولادهای سریع‌سردشده و بازگشت‌داده‌شده در دماهای مختلف و زمان یک ساعت [۱۶].

سریع سرد کردن فولاد کروم-مولیبدن-وانادیم دار از ۸۱۵ درجه سانتی گراد باعث می شود که فقط کروم بصورت محلول در آستنیت درآید و بنابراین با افزایش دمای بازگشت، سختی آن به سرعت کاهش یابد.

از طرف دیگر هنگامی که فولاد از دمای ۹۸۰ و یا ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد سریع سرد شود، درصد بیش تری از عناصر آلیاژی یاد شده در آستنیت حل خواهند شد و نه تنها کاهش سختی باز هم کم تر می شود، بلکه منجر به سختی ثانویه نیز می شود.



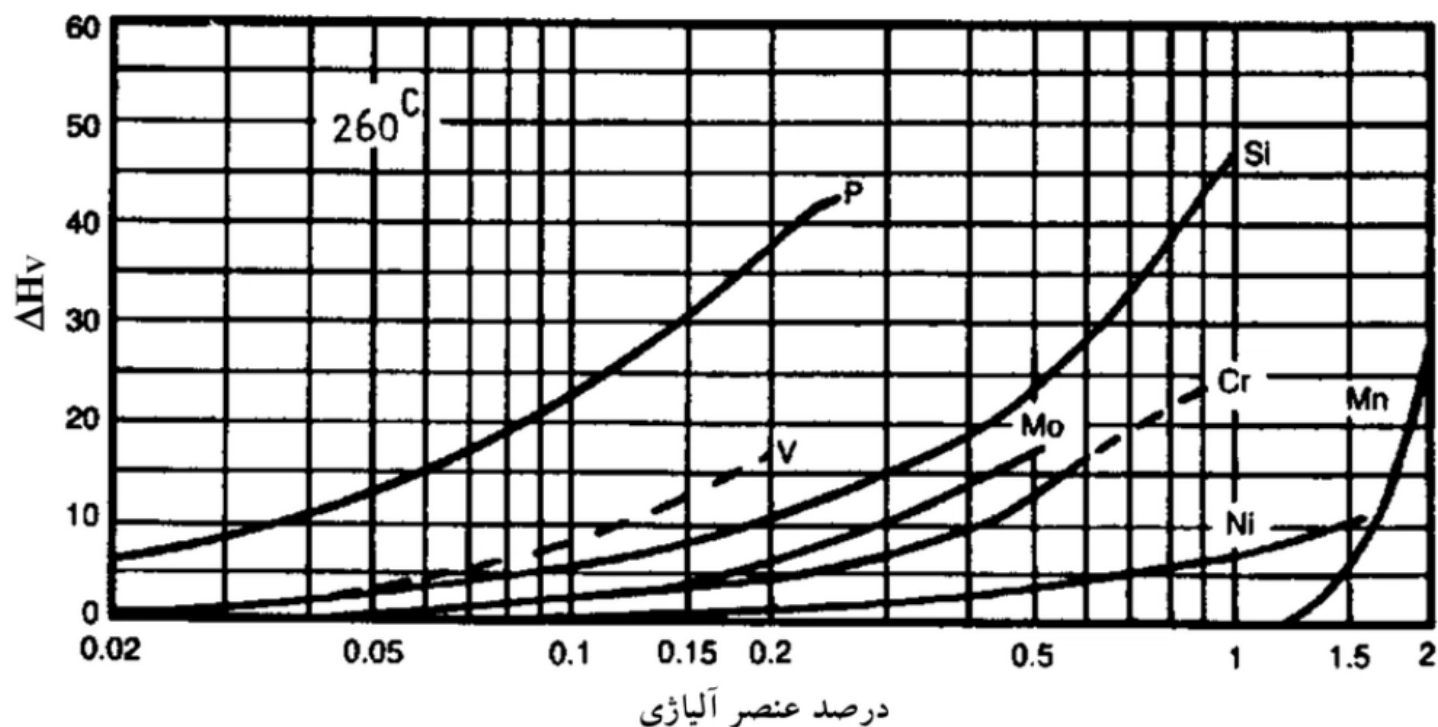
بطور کلی، وجود عناصر آلیاژی در فولادها باعث افزایش سختی قطعه های سریع سرد و بازگشت داده شده نسبت به فولادهای ساده کربنی با همان درصد کربن خواهد شد، اما بر حسب نوع، درصد و نقش عنصر آلیاژی و دمای بازگشت، مقدار افزایش سختی متفاوت است.

شکل ۸-۲۱ اثر انحلال کاربیدها در آستنیت (اثر دمای آستنیت کردن) روی سختی حاصل از بازگشت فولاد کروم - مولیبدن - وانادیم دار پس از سریع سرد شدن و بازگشت دادن در دماهای مختلف [۱۶].

به کمک نمودارهای ۸-۲۲ و ۸-۲۳ و با داشتن درصد کربن و دمای بازگشت می‌توان سختی فولاد سریع سرد و بازگشت داده شده را از نمودار تخمین زد. به کمک نمودارها، افزایش سختی ناشی از وجود عناصر آلیاژی تعیین می‌گردد و آنگاه با استفاده از معادله زیر، سختی فولاد آلیاژی پس از بازگشت محاسبه می‌شود:

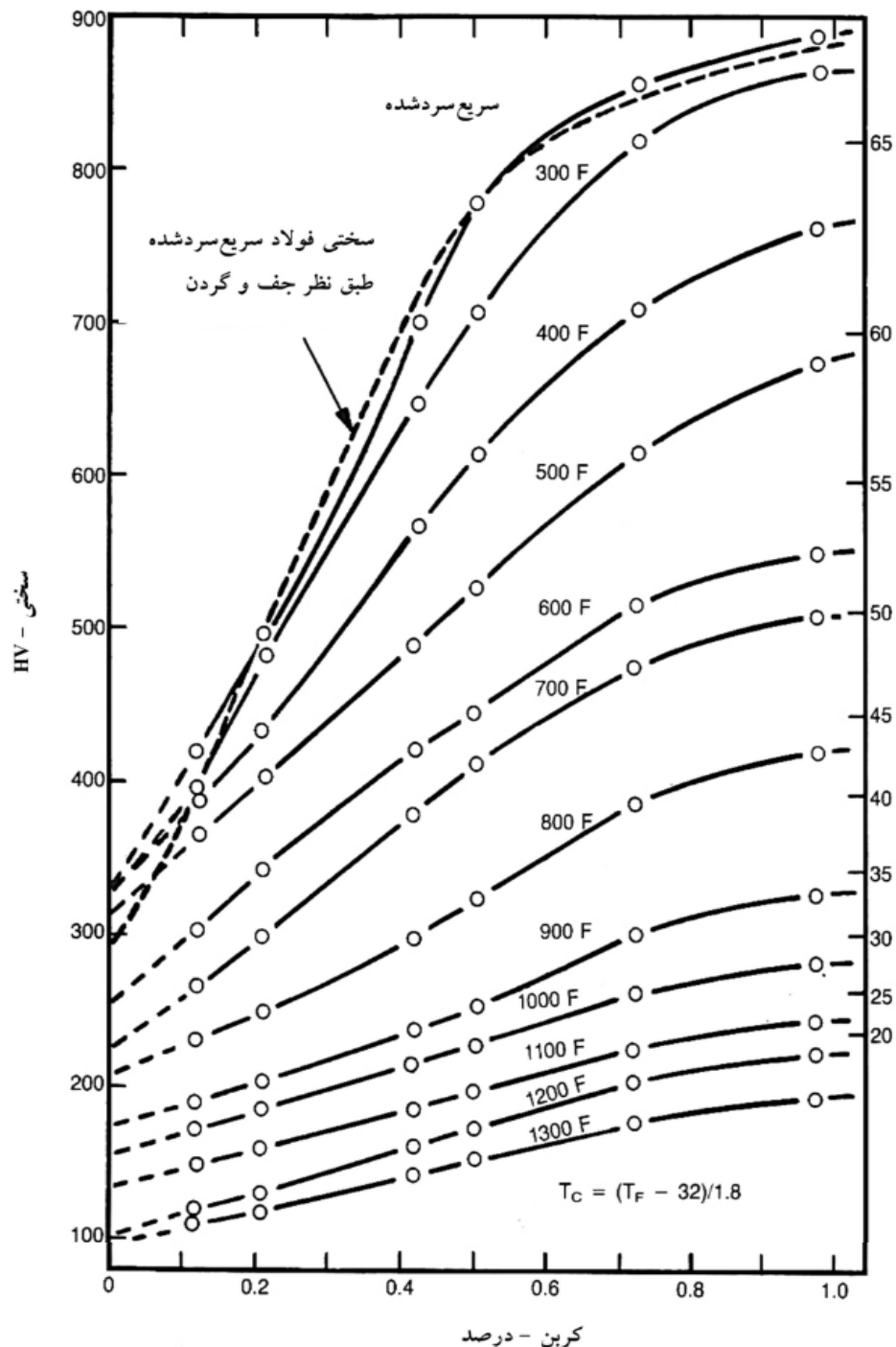
$$H_{AS} = H_{CS} + \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \dots$$

H_{AS} سختی فولاد آلیاژی پس از سریع سرد و بازگشت دادن، H_{CS} سختی فولاد ساده کربنی با همان درصد کربن پس از سریع سرد و بازگشت دادن و ΔH_n اثر عنصر آلیاژی روی افزایش سختی پس از بازگشت است.

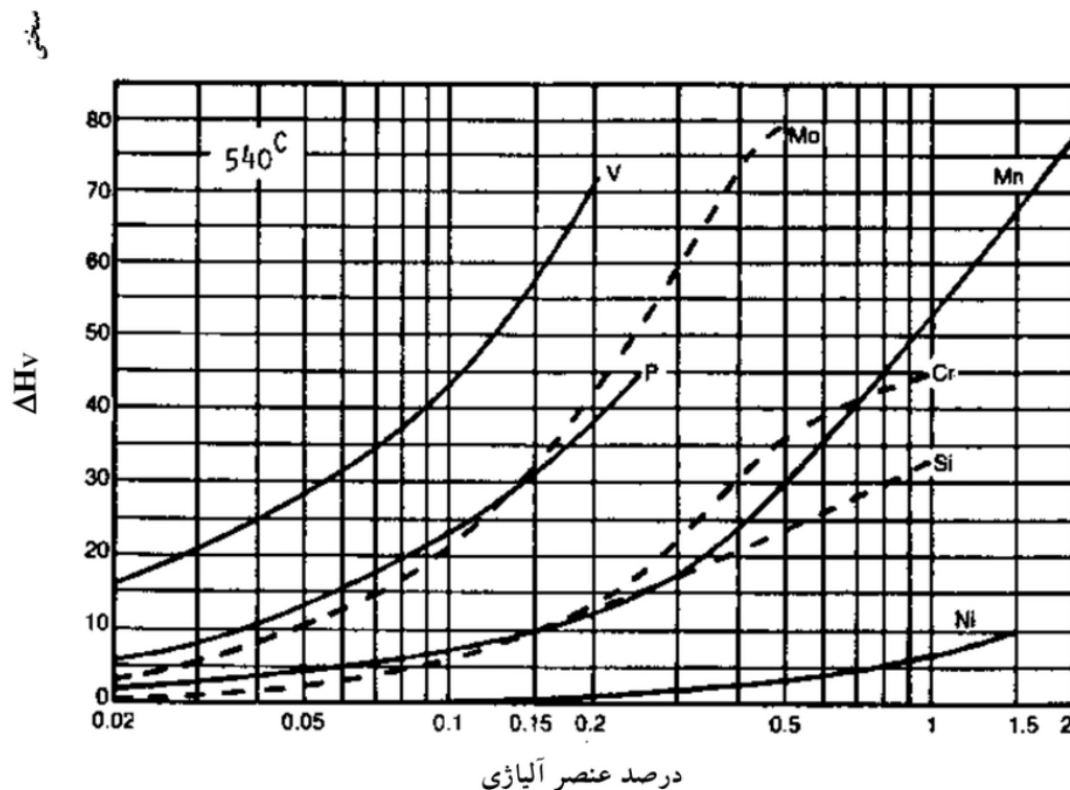


شکل ۸-۲۲ اثر عناصر آلیاژی روی سختی حاصل از بازگشت فولادهای سریع سرد و بازگشت داده شده در دمای ۲۶۰ درجه سانتی گراد (۵۰۰ درجه فارنهایت) در مقایسه با فولاد ساده کربنی [۱].

عناصر کاربیدساز قوی مانند وانادیم و مولیبدن تا قبل از دماهای بالا اثر چشمگیری روی افزایش سختی ندارند. در دماهایی که کاربید تشکیل می‌شود، سختی به سرعت افزایش می‌یابد. اثر نیکل روی فولاد سریع سرد و بازگشت داده شده در تمام دماهای بازگشت به نسبت کم و حدوداً ثابت است.



شکل ۸-۲۴ اثر درصد کربن و دمای بازگشت روی سختی مارتنزیت بازگشت داده شده در فولادهای ساده کربنی [۱].



شکل ۸-۲۳ مشابه با شکل ۸-۲۲، ولی مربوط به دمای بازگشت ۵۴۰ درجه سانتی گراد (۱۰۰۰ درجه فارنهایت) [۱].

اگر فولاد SAE ۶۱۴۰ با ترکیب شیمیایی زیر پس از مارتنزیت شدن در دمای ۵۴۰ درجه سانتی گراد بازگشت داده شود، سختی حاصل چه مقدار است؟

ترکیب شیمیایی بر حسب درصد وزنی:

Mn	P	S	Si	Cr	V	C
۰/۷۳	۰/۰۲۷	۰/۰۲۳	۰/۲۵	۰/۹۴	۰/۱۷	۰/۴۲

حل:

سختی فولاد ساده کربنی Fe-۰/۴۲C که بعد از سریع سرد شدن در دمای ۵۴۰ درجه سانتی گراد (۱۰۰۰ درجه فارنهایت) بازگشت داده شود، برابر با ۲۲۵ ویکرز است (شکل ۸-۲۴). با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد و به کمک نمودار ۸-۲۳، اثرهای عناصر آلیاژی مختلف روی سختی بعد از بازگشت (ΔH_V) به صورت زیر به دست می آید:

عنصر آلیاژی	V	Cr	Si	S	P	Mn
درصد وزنی	۰/۱۷	۰/۹۴	۰/۲۵	۰/۰۲۳	۰/۰۲۷	۰/۷۳
ΔH_V	۶۵	۴۵	۱۵	-	۵	۴۲/۵

با توجه به معادله ۸-۳، سختی این فولاد پس از سریع سرد شدن و بازگشت در دمای ۵۴۰ درجه سانتی گراد برابر است با:

$$H = 22 + 42/5 + 5 + 15 + 45 + 65$$

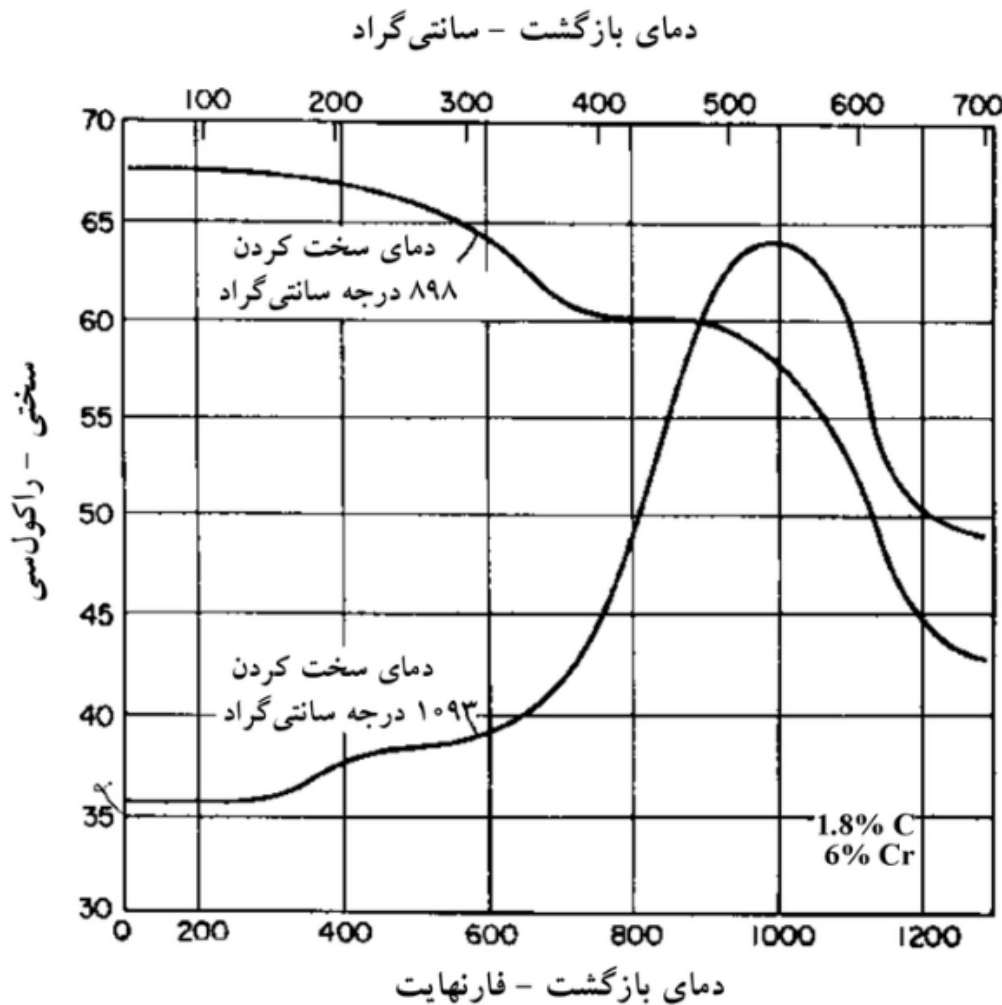
$$H = 397 \text{ HV}$$

نقش آستنیت باقی مانده

در فولادهای پرکربن، به ویژه در مواردی که نیکل و یا مقدار چشمگیری منگنز در فولاد وجود داشته باشد، به علت پایین بودن دماهای M_s و M_f ، دگرگونی آستنیت به مارتنزیت به طور کامل انجام نمی شود و مقداری آستنیت ناپایدار در ساختار باقی خواهد ماند. حتی با سرد کردن تا زیر دمای اتاق، آستنیت یادشده به طور کامل به مارتنزیت تبدیل نمی شود.

درصد آستنیت باقی مانده در فولادهای معمولی می تواند به ۱۰ تا ۲۵ درصد برسد. در بسیاری از فولادها، وجود درصد کمی از آستنیت باقی مانده، سختی حاصل از سریع سرد شدن را به مقدار کمی کاهش می دهد.

شکل ۸-۲۵ اثر دمای سخت شدن روی سختی فولاد پرکروم - پرکربن پس از بازگشت در دماهای مختلف. فولادی که از ۸۹۸ درجه سانتی گراد (۱۶۵۰ درجه فارنهایت) سریع سرد شده باشد، درصد کمی آستنیت باقیمانده خواهد داشت، در حالی که فولاد سریع سردشده از دمای ۱۰۹۳ درجه سانتی گراد (۲۰۰۰ درجه فارنهایت) تا حدودی به طور کامل آستنیتی خواهد بود [۱۶].



فولادی که از ۱۰۹۳ درجه سانتی گراد سریع سرد شده باشد، بدون شک دارای ۸۰ تا ۹۰ درصد آستنیت باقی مانده است که در ضمن بازگشت به اجزای سخت تر از آستنیت تجزیه می شود و **بنابراین باعث افزایش سختی می شود !!!**

فولادی که از ۸۹۸ درجه سانتی گراد سریع سرد شده باشد، فقط درصد کمی آستنیت باقی مانده دارد که می تواند کاهش سختی در ضمن بازگشت را تا حدودی به تعویق اندازد.

آستنیت باقیمانده با رسیدن به دمای مناسب بازگشت، بر اساس نمودارهای دگرگونی هم‌دمایی (IT) شروع به تجزیه شدن می‌کند. در این مرحله، نرخ تجزیه آستنیت باقیمانده هم‌چنان بر طبق نرخ انجام دگرگونی آستنیت در آن دماست. در حقیقت، نمودارهای دگرگونی هم‌دما نشان می‌دهند که چرا برای تجزیه کامل آستنیت باقیمانده در مدت ۳۰ تا ۶۰ دقیقه گاهی به دمایی بیشتر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد (۴۰۰ درجه فارنهایت) نیاز است.

هم‌چنین این نمودارها نشان می‌دهند که محصول دگرگونی آستنیت باقیمانده، مارتنزیت سخت نیست، بلکه محصولی از خانواده بینیت با سختی حدود سختی مارتنزیت بازگشت‌داده‌شده و یا کمی بیشتر از آن است. به طور خلاصه، آستنیت باقیمانده در فولادهای سریع‌سردشده، شبیه به آستنیتی عمل می‌کند که از دمایی در منطقه آستنیت تا دمای بازگشت سرد شده باشد، با این تفاوت که تنش‌های داخلی ممکن است، چگونگی دگرگونی آن را تغییر دهند.

فولادهای پرآلیاژ که دمای M_f آنها زیر دمای اتاق باشد، در حالت سریع سرد شده دارای مقدار چشمگیری آستنیت باقی مانده خواهند بود. درضمن بازگشت این فولادها در بازه دمایی ۵۳۵ تا ۵۶۵ درجه سانتی گراد کاربرد آلیاژی از آستنیت رسوب می کند و **سختی ثانویه** بوجود می آید.

با تشکیل کاربرد آلیاژی، درصد کربن آستنیت باقی مانده کاهش می یابد و بنابراین دمای M_f افزایش خواهد یافت. با سرد شدن این فولاد از دمای بازگشت تا دمای اتاق، آستنیت فقیر از کربن به مارتنزیت تبدیل می شود.

چنین قطعاتی باید پیش از مورد استفاده قرار گرفتن، **دوباره بازگشت** داده شود. این موضوع به **بازگشت دو مرحله ای (Double-Tempering)** موسوم است. به همین دلیل حتی گاهی برای برخی از فولادهای پرآلیاژ-پرکربن بازگشت **سه مرحله ای (Tripple-Tempering)** توصیه می شود.

در حقیقت، هدف از بازگشت های مرحله دوم و سوم، حذف تنش های احتمالی به

وجودآمده در قطعه در اثر تشکیل مارتنزیت جدید در ضمن سرد شدن از دمای بازگشت است.

ارتباط دما و زمان بازگشت

در عملیات بازگشت هنگامی که به زمان بازگشت اشاره‌ای نشود، منظور زمان **یک ساعت** است. ارتباط زمان و دمای بازگشت توسط پارامتر بازگشت (Tempering Parameter) به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$TP = T(C + \log t)$$

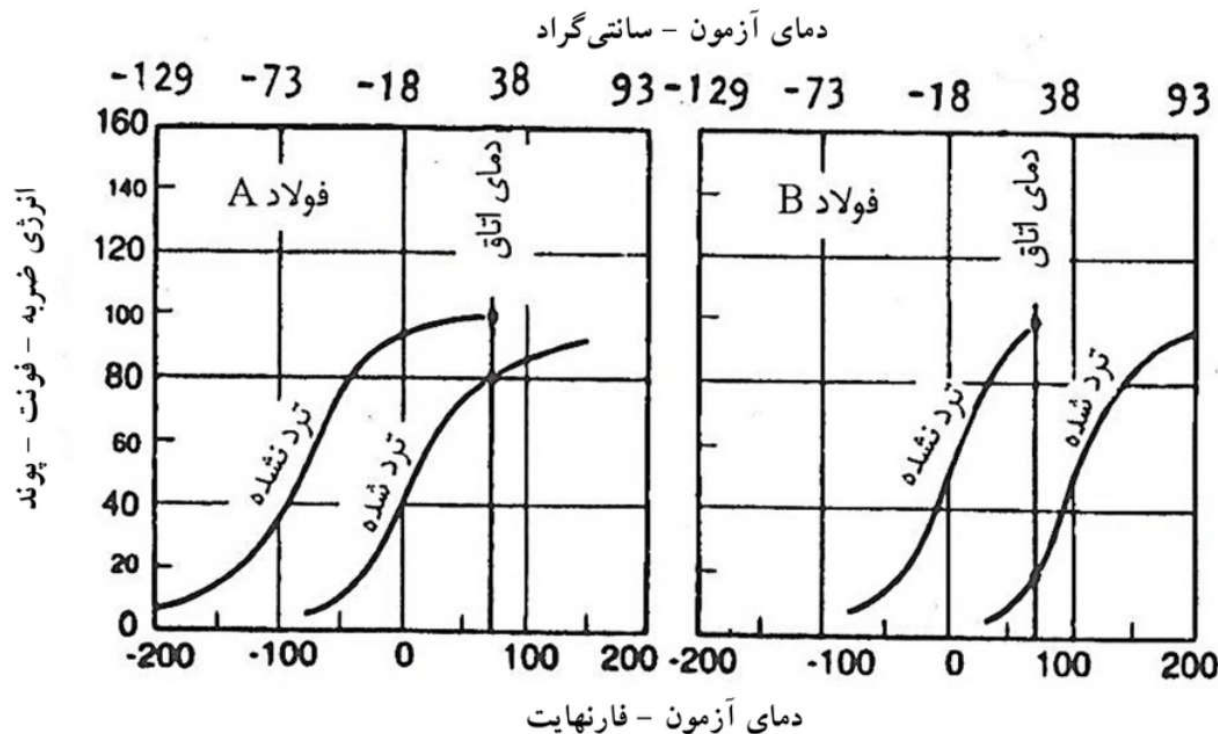
T دمای بازگشت بر حسب کلوین، t زمان بازگشت بر حسب ساعت و C ثابت بازگشت می‌باشد. (C=۱۸)

پارامتر بازگشت در مورد فولادهای آلیاژی که از خود سختی ثانویه نشان می‌دهند محدودیت کاربرد دارد. در ضمن سختی ثانویه، بیش‌ترین سختی بدست آمده در اثر بازگشت، بیش‌تر وقت‌ها تابع دمای بازگشت است.

پدیده تردی

تردی در فولادهای سریع سرد و بازگشت داده شده پدیده‌ای است که باعث کاهش مقاومت به ضربه می‌شود. این پدیده که ناشی از تغییرهای ایجاد شده در ریزساختار مارتنزیت در ضمن بازگشت است، در عمل روی خواص مکانیکی دیگر مانند استحکام کششی، استحکام تسلیم و انعطاف پذیری اثری ندارد (شکل ۸-۱۵). اثر تردی با انتقال دمای تبدیل در آزمون ضربه به سمت دماهای بالاتر به بهترین صورت مشخص می‌شود.

در شکل ۸-۲۷ دمای تبدیل برای فولاد A، حدود ۵۹- درجه سانتی‌گراد است که پس از ترد شدن به ۳- درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. فولاد B دارای دمای تبدیل حدود ۱۸- درجه سانتی‌گراد است که با ترد شدن به حدود ۳۸ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. اگر فولادهای ترد شده A و B تحت فقط یک آزمون ضربه در دمای اتاق قرار گیرند نتایج می‌تواند گمراه کننده باشد، انرژی لازم برای شکست فولاد B بسیار کم‌تر از انرژی لازم برای شکست فولاد A است.



شکل ۸-۲۷ مقایسه جابه‌جایی دمای تبدیل در اثر ترد شدن برای دو فولاد فرضی A و B [۱].

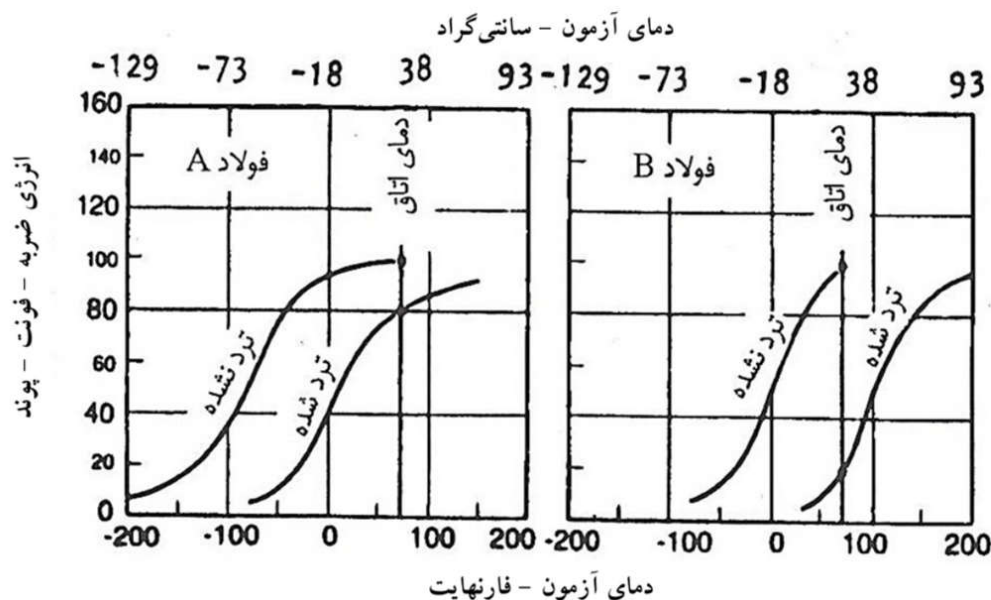
نتایج حاصل از فقط یک آزمون ضربه در دمای اتاق روی فولادهای A و B نشان می‌دهند که فولاد A به طور کلی ترد نشده، در حالی که فولاد B به طور کامل ترد شده است. در صورتی که واقعیت امر چنین نیست و هر دو فولاد به یک اندازه ترد شده‌اند، اما از آنجایی که فولاد A دارای چقرمگی بالایی است (دمای تبدیل بسیار کم)، پس از ترد شدن نیز از خود چقرمگی خوبی را نشان می‌دهد.

به طور کلی فولادهای سریع سرد و بازگشت داده شده به سه نوع تردی حساس‌اند:

□ در اثر بازگشت در بازه دمایی ۲۶۰-۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، که به تردی ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، ۵۰۰ درجه فارنهایت یا **تردی مارتنزیت بازگشت داده شده (TME)** معروف است.

□ تردی در اثر حرارت دادن در بازه دمایی ۳۷۵-۵۷۵ درجه سانتی‌گراد و یا آهسته سرد کردن از بازه دمایی یاد شده که به **تردی بازگشتی (TE)** معروف است.

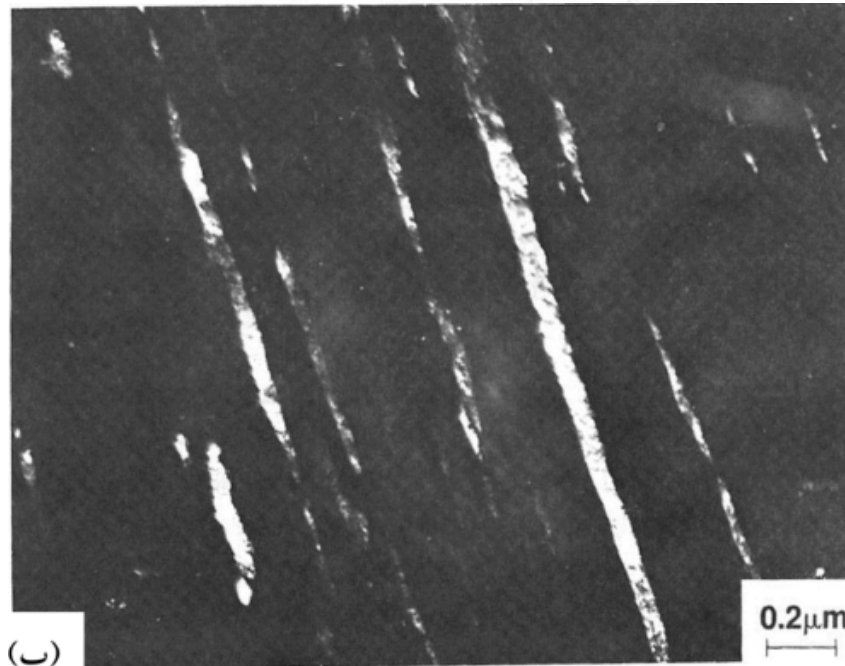
□ تردی ناشی از تشکیل نیتريد آلومینیم.



۱. تردی مارتنزیت بازگشت داده شده (TME)

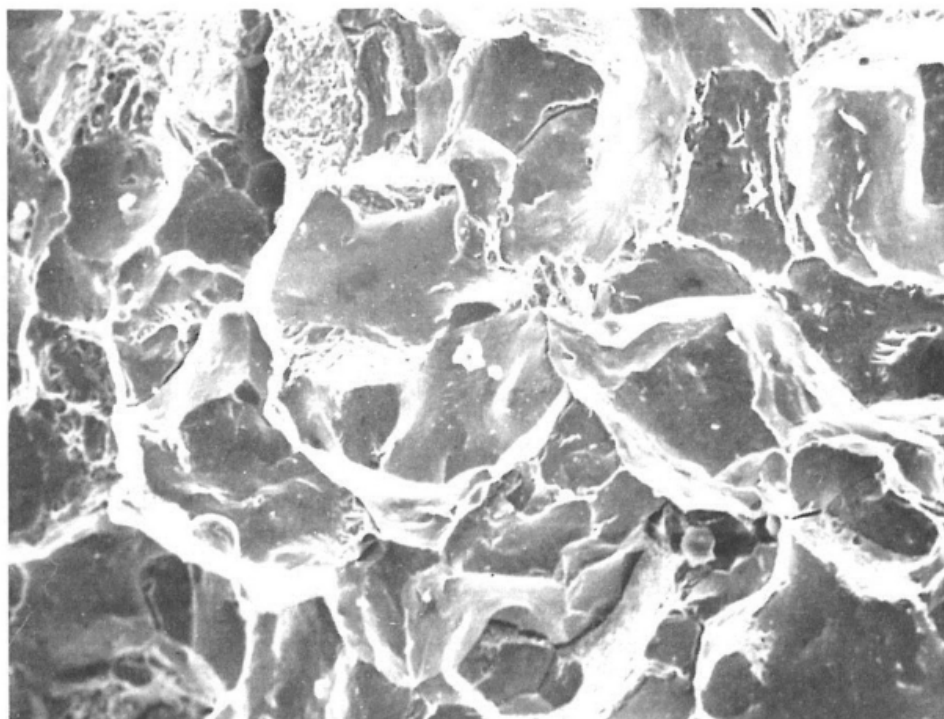
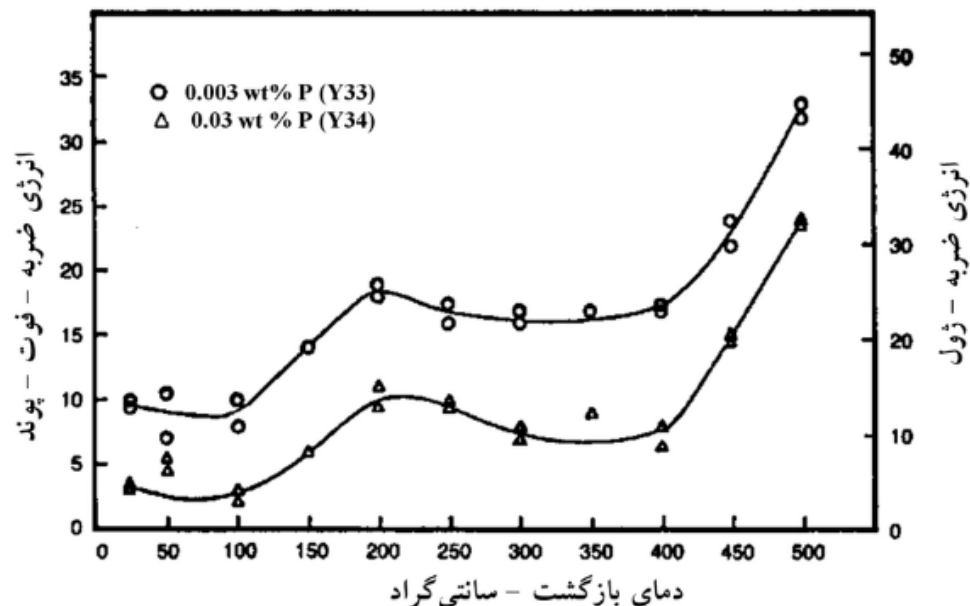
این نوع تردی در بیش تر فولادهای ساده کربنی، کم آلیاژ و فولادهای ابزار و فولادهای ساختمانی که پس از سریع سرد شدن، در بازه دمایی ۲۶۰-۳۵۰ درجه سانتی‌گراد بازگشت داده شده باشد دیده می‌شود.

در فولادهای سریع سرد شده، لایه نازکی از آستنیت باقی‌مانده در بین صفحه‌های مارتنزیتی وجود دارد که پس از بازگشت در بازه دمایی ۲۰۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، به فریت و سمنتیت تجزیه می‌شود. سمنتیت حاصل بصورت نوار نازک و پیوسته‌ای در بین صفحه‌های مارتنزیتی تشکیل خواهد شد.



شکل ۸-۲۸ کاربیده‌های بین لایه‌ای تشکیل شده در ضمن بازگشت فولاد ۴۳۴۰ دارای ۰/۰۰۳ درصد فسفر در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد. (الف) تصویر میدان روشن، (ب) تصویر میدان تاریک. تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری [۱].

شکل ۸-۲۹ نشان می‌دهد که با افزایش درصد فسفر، چقرمگی ضربه برای تمامی دماهای بازگشت کاهش می‌یابد.



شکل ۸-۲۹ انرژی ضربه (آزمون شارپی) در دمای اتاق بر حسب دمای بازگشت برای فولاد ۴۳۴۰ دارای مقادیر مختلف فسفر. دمای آستنیت کردن ۸۷۰ درجه سانتی‌گراد (۱۵۹۸ درجه فارنهایت)، محیط سردکننده روغن، زمان بازگشت در هر دما، یک ساعت [۱].

ریزساختار سطح مقطع شکست فولادهای فسفردار سریع سرد و بازگشت داده شد، بطور کلی بین دانه‌ای و در امتداد مرزدانه‌های آستنیت اولیه است. کاهش چقرمگی ناشی از رسوب اتم‌های فسفر و یا ترکیب‌های آن در مرزدانه‌های آستنیت پیش از سریع سرد شدن است.

شکل ۸-۳۰ شکست بین دانه‌ای فولاد ۴۳۴۰ دارای ۰/۰۳ درصد فسفر پس از سریع سرد کردن و بازگشت دادن به مدت یک ساعت در ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد (۷۵۲ درجه فارنهایت). نمونه توسط آزمون ضربه در دمای اتاق شکسته شده است [۱].

اگر یک فولاد ترد شده در بازه دمایی 260°C – 350°C درجه سانتی گراد در دمایی بالاتر از 350°C درجه سانتی گراد حرارت داده شود، تردی آن حذف می شود و بنابراین، چقرمگی آن به مقدار اولیه برمی گردد. حرارت دادن دوباره این فولاد در بازه دمایی ترد شدن (260°C – 350°C درجه سانتی گراد) منجر به ترد شدن دوباره آن نخواهد شد. از این رو، این نوع تردی را گاهی تردی برگشتناپذیر^۱ می نامند. گفته می شود که حرارت دادن فولاد در دمایی بالاتر از 350°C درجه سانتی گراد به احتمال زیاد باعث کاهش و یا حذف پیوستگی لایه های نازک سمیتیت در فصل مشترک های صفحه های مارتنزیتی خواهد شد که برگشت آن به حالت اولیه امکان پذیر نیست.

۲. تردی بازگشتی (TE)

تردی بازگشتی در شرایط زیر ممکن است، به وجود آید:

- ۱- در اثر حرارت دادن و نگه داشتن فولاد سخت شده در بازه دمایی ۳۷۵ تا ۵۷۵ درجه سانتی گراد، بدون توجه به نرخ سرد شدن
- ۲- در اثر حرارت دادن فولاد سخت شده در دمایی بالاتر از ۵۷۵ درجه سانتی گراد و سپس آهسته سرد کردن آن در بازه دمایی ۳۷۵ تا ۵۷۵ درجه سانتی گراد.

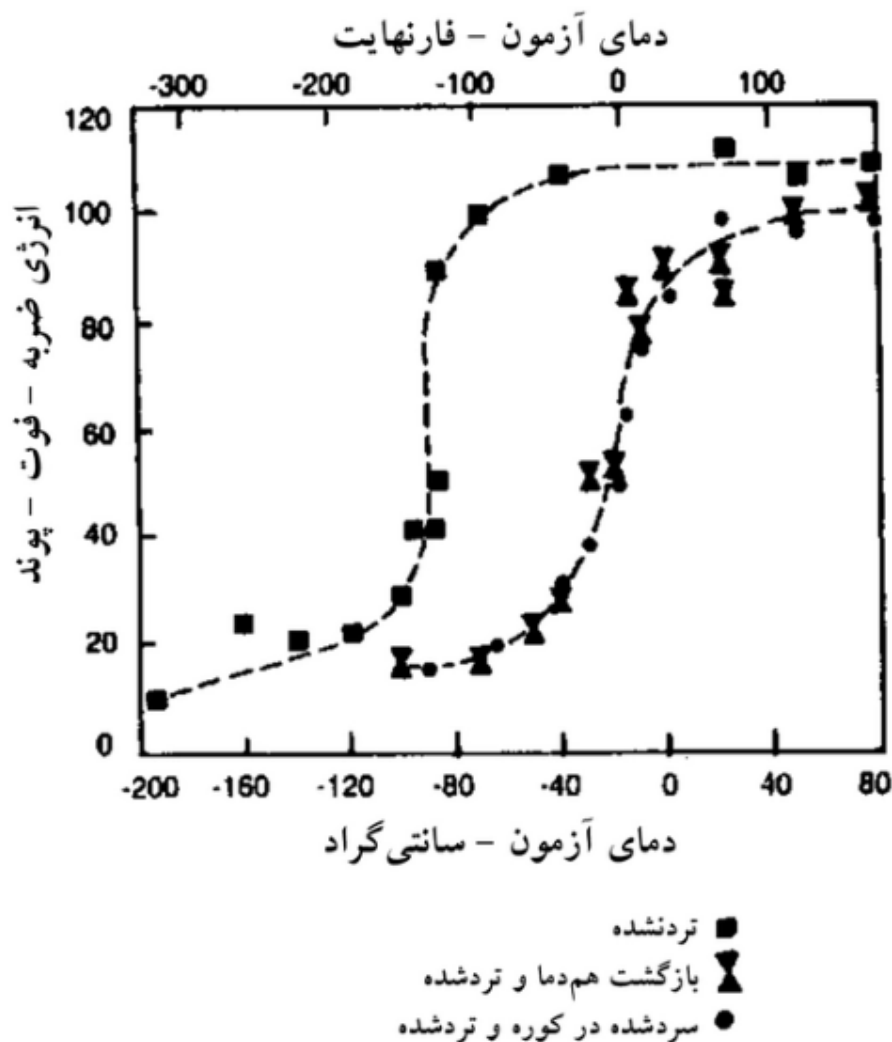
در حالت دوم هنگامی که فولاد از بازه دمایی تردی **سریع عبور** کند، امکان ترد شدن آن وجود ندارد. ولی سرد کردن سریع در حالت اول نمی تواند از از بوجود آمدن تردی جلوگیری کند.

همانطور که در شکل ۸-۳۱ دیده می شود، با حرارت دادن در دمای ثابت در بازه دمایی تردی و یا آهسته سرد کردن فولاد در بازه دمایی تردی، **دمای تبدیل، افزایش می یابد.** برای مشاهده اثرهای تردی اولیه در ۵۵۰ درجه سانتی گراد، زمانی حدود **یک ساعت** کافی است درحالی که در حوالی ۳۷۵ درجه سانتی گراد که پایین ترین دما در بازه دمایی تردی می باشد، **صدها ساعت** حرارت دادن لازم است.

یکی از مهم ترین ویژگی های تردی بازگشتی، طبیعت **برگشت پذیری** آن است. اگر فولادی که در اثر قرار گرفتن در بازه دمایی تردی و یا عبور کردن از آن، ترد شده باشد را تا بالاتر از ۵۷۵ درجه سانتی گراد حرارت دهند و سپس فولاد از بازه دمایی ۳۷۵-۵۷۵ درجه سانتی گراد سریع عبور کند، چقرمگی آن افزایش می یابد و به مقدار قبل از ترد شدن برمی گردد.

اگر این فولاد، دوباره در بازه دمایی TE قرار گیرد، دوباره ترد خواهد شد. از این رو، گاهی به این پدیده **تردی برگشت پذیر** گفته می شود.

کاهش چقرمگی بطور مستقیم با افزایش غلظت ناخالصی ها و یا ترکیب هایی از آن ها در حوالی مرز دانه های آستنیت اولیه ارتباط دارد. مخرب ترین ناخالصی ها در این رابطه آنتیموان، فسفر، قلع و آرسنیک هستند. وجود مقدار بسیار کمی از این عناصر در حد ۱۰۰ ppm نیز می تواند منجر به ترد شدن فولاد شود.



شکل ۸-۳۱ تغییر مکان منحنی انرژی ضربه به دماهای بالاتر در اثر تردی بازگشتی

ایجاد شده در فولادهای SAE ۳۱۴۰ [۱]. ۰/۶۵Cr و ۱/۵Ni

نقش عناصر آلیاژی در ایجاد تردی بازگشتی کمتر از ناخالصی‌ها نیست. در فولادهای ساده کربنی (Fe-C)، تجمع ناخالصی‌های مضر آن‌قدر کم است که منجر به تردی بازگشتی نمی‌شود، در حالی که در صورت وجود عناصر آلیاژی مانند کروم، منگنز، نیکل و سیلیسیم، تجمع ناخالصی‌های یادشده در مرز دانه‌ها به شدت افزایش می‌یابد.

بعضی اتم‌های ناخالصی و عناصر آلیاژی، بسیار بیشتر از اتم‌های ناخالصی و آهن، یکدیگر را جذب می‌کنند. بنابراین، وجود عناصر آلیاژی یادشده در فولاد منجر به تشدید تجمع ناخالصی‌ها و اتم‌های عناصر آلیاژی در مرز دانه‌های آستنیت می‌شود. به طور کلی وجود چند عنصر آلیاژی، تجمع ناخالصی‌ها را بیشتر تشدید می‌کند. برای نمونه، تجمع آنتیموان در فولادهای آلیاژی نیکل - کروم دار، بسیار بیشتر از تجمع آن در فولادهای کروم و یا نیکل دار است. گزارش شده است، در صورتی که

۳. تردی نیتريد آلومينيم

اين نوع تردی که گاهی در فولادهای سخت شده دیده می‌شود، ناشی از رسوب نیتريد آلومينيم در مرزدانه‌های آستنيت اوليه است. توزيع ذره‌های بسيار ريز و ظريف نیتريد آلومينيم در مرزدانه‌های آستنيت برای کنترل رشد دانه‌ها و تهيه فولادهای ريزدانه اثر مفيد و کاربرد صنعتی دارد.

رسوب‌های صفحه‌ای شکل نیتريد آلومينيم که در حين سرد شدن از دمای انجماد و يا در ضمن آستنيت‌ه کردن در دمایی به نسبت بالا تشکيل شده باشند، مخرب هستند و چقرمگی ضربه‌ای را بطور چشمگیری کاهش می‌دهند.

۴. تردی فلز مایع (LME)

در تماس قرار گرفتن فولاد با مذاب برخی از فلزها و یا فلزهای مایع ممکن است، منجر به شکست ترد بین دانه‌ای آن شود. فولادهای ساده کربنی و کم‌آلیاژ ممکن است، با تماس پیدا کردن با مذاب فلزهای سرب، کادمیم، برنج، آلومینیوم، برنز، مس، روی، لحیم سرب - قلع و لیتیم ترد شوند. شروع شکست توسط LME بستگی به زمان ندارد و فقط نیازمند تر یا خیس شدن فولاد توسط فلز مذاب است. در واقع، به محض تر شدن فولاد توسط فلز مایع، شکست می‌تواند شروع شود. بیشتر وقت‌ها تنش بسیار کمی برای شکست از طریق LME کافی است.

به طور خلاصه، برای ترد شدن توسط فلز مایع یا مذاب سه شرط زیر لازم است:

۱- وجود فلز مایع یا مذاب به صورت داخلی و یا خارجی در تماس با فولاد

۲- نیروی کششی روی فولاد

۳- دمایی بین ۲۰۰ و ۴۸۰ درجه سانتی‌گراد.

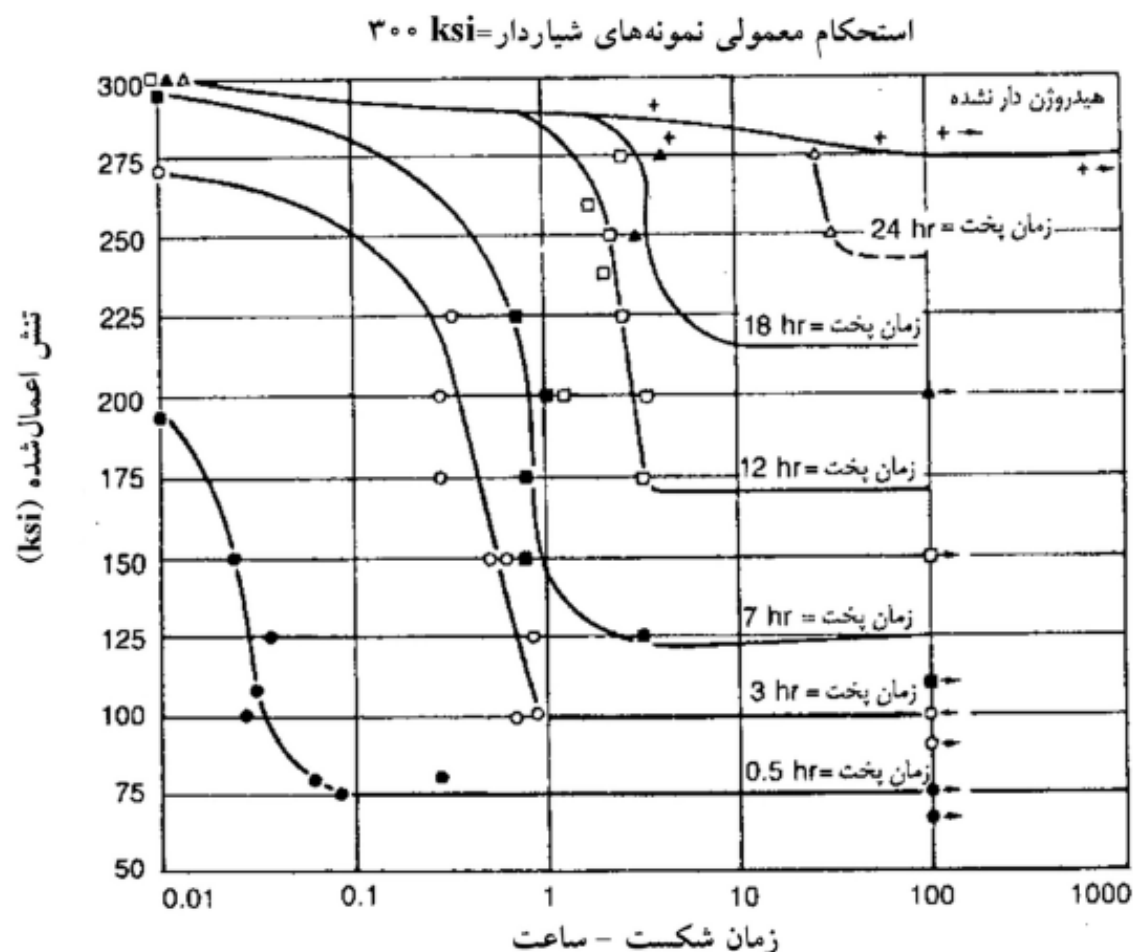
۵. تردی هیدروژنی (HE)

اثرهای پدیده تردی هیدروژنی روی فولادها زیاد هستند؛ استحکام نهایی فولاد ممکن است، کاهش یابد، انعطاف پذیری بر حسب تابعی از ازدیاد طول شکست و یا کاهش سطح مقطع ممکن است، کم شود و در نهایت، رشد ترک ترد ممکن است، به شدت افزایش یابد. هیدروژنی که عامل تردی و در نتیجه، اثرهای یادشده می شود، ممکن است، در محیط خارج و در تماس با سطوح خارجی فولاد و یا داخل آن باشد. در حالت اخیر، هیدروژن ممکن است، در اثر عملیاتی مانند فولادسازی، اسیدشویی و پوشش دهی الکتریکی در فولاد نفوذ کرده باشد. هیدروژن ممکن است، شکست نرم را به شکست ترد تبدیل کند و یا این که بدون ایجاد تغییر در چگونگی شکست، انعطاف پذیری را کاهش دهد. از جمله موارد قابل توجه در ارتباط با ترد شدن هیدروژنی فولادها با استحکام بالا در شرایط سخت و بازگشت داده شده، ترک خوردن بین دانه های آنها در حضور هیدروژن است.

هیدروژن به شدت توسط مراکز نابجایی ها جذب می شود و ممکن است، توسط حرکت این نابجایی ها داخل فولاد جابه جا شود. هم چنین گفته شده است که هیدروژن، تحرک نابجایی های پیچی را افزایش، ولی توانایی آنها به لغزش متقاطع را کاهش می دهد. بنابراین، هیدروژن موجب می شود تا لغزش، تنها روی صفحه های محدود لغزشی انجام شود.

هرچه مقدار هیدروژن موجود در فولاد بیش‌تر باشد، تنش لازم برای شکست، کم‌تر و زمان لازم برای شکست در تنش ثابت نیز کوتاه‌تر است.

همانطور که در شکل ۸-۳۳ دیده می‌شود، افزایش زمان پخت، زمان شکست و تنشی که فولاد می‌تواند تحمل کند را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش زمان پخت و در نتیجه کاهش هیدروژن فولاد، حد خستگی ایستایی فولاد نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۸-۳۳ منحنی‌های خستگی ایستایی برای فولاد ۴۳۴۰ در شرایط سخت و بازگشت داده شده. نمونه‌ها پس از هیدروژن‌دار شدن توسط جریان کاتدی، در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شده‌اند [۱].

فولادهای سخت شونده، بطور معمول فولادهای کم آلیاژ با حداکثر و درمجموع دارای چند درصد منگنز، نیکل، کروم و مولیبدن هستند.

در این فولادها با بازگشت در دمای کم می توان به استحکامهای زیاد، مقاومت خستگی عالی و چقرمگی خوب دست یافت. با بازگشت دادن در دماهای بالاتر می توان چقرمگی بسیار زیاد همراه با استحکام متوسط را ایجاد نمود.