فصل هفتم

بازپخت Tempering

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

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

دمای Ae_1، نگه داشتن برای مدت زمان مشخص و سپس سرد کردن آهسته تا دمای اتاق. دما و زمان حرارت دادن به ترکیب شیمیایی فولاد، ابعاد قطعه و خواص مکانیکی مورد نظر بستگی دارد. در اثر بازپخت تنشهای داخلی کاهش یافته و یا حذف می‌شوند و بنابراین استحکام ضربه‌ای افزایش می‌یابد (شکنندگی کم می‌شود). در عوض سختی و استحکام قطعه سخت شده تا حدودی کاهش خواهد یافت. .

تغییرات میکروساختار

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

بررسیهای سیستماتیک که به کمک پراش پرتوی ایکس[1] بر روی میکروساختار فولادهای سریع سرد و بازپخت شده انجام شده است، سه مرحلهٔ کاملاً مشخص و مجزا از یکدیگر را در رابطه با تغییر میکروساختار مارتنزیت در ضمن بازپخت نشان می‌دهد. این سه مرحله عبارت‌اند از:

مرحله اول: تشکیل کاربیدهای انتقالی نظیر کاربید اپسیلن[2] (ε) و یا کاربید اتا[3] (η) و در نتیجه کاهش درصد کربن زمینه مارتنزیتی تا حدود ۰/۲۵ درصد.

مرحله دوم: تبدیل آستنیت باقیمانده به فریت و سمنتیت.

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

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

در اینجا تذکر این نکته ضروری است که بجز موارد اشاره شده در مراحل سه‌گانه فوق تغییرات ساختاری دیگری نیز در ضمن بازپخت فولادهای سریع سرد شده گزارش شده است. از آن جمله تشکیل کاربیدهای آلیاژی و ایجاد سختی ثانویه است، که می‌توان آن را مرحله چهارم بازپخت نامید.

درصد کربن در هر دو نوع کاربید اپسیلن (با فرمول $Fe_{2/4}C$) و اتا (با فرمول Fe_2C) از درصد کربن سمنتیت (با فرمول Fe_3C) که در دماهای بالاتر تشکیل می‌شود به مراتب بیشتر است.

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

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

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

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

مرحله سوم بازپخت شامل تشکیل مخلوط فریت و سمنتیت براساس نمودار تعادلی آهن – کربن است. شواهدی در دست است که قبل از تشکیل سمنتیت (مخصوصاً در فولادهای پرکربن) کاربید کای[1] با شبکه بلوری منوکلینیک[2] و فرمول Fe_5C_2 به وجود می‌آید. گرچه بین سمنتیت و کاربید کای تفاوتهایی وجود دارد، لیکن شبکه‌های بلوری و موقعیت اتمها در دو نوع کاربید آنقدر به یکدیگر شبیه‌اند که تشخیص آنها از یکدیگر به کمک پرتوی ایکس و یا روشهای مشابه به سادگی امکانپذیر نیست.

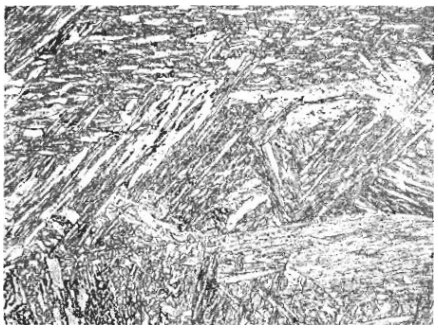
اگر فولادهای الیاژی با ساختار مارتنزیتی که دارای عناصر الیاژی کاربیدساز نظیر وانادیم، مولیبدن، تنگستن، کرم و یا تیتانیم به صورت محلول باشند، درگسترهٔ دمایی تشکیل کاربیدهای آلیاژی (۵۰۰–۶۵۰ درجهٔ سانتیگراد) بازپخت شوند، کاهش سختی در آنها نسبت به فولاد کربنی ساده به تعویق افتاده و یا حتی سختی آنها افزایش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

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

یکی تشکیل مستقیم کاربیدها از سمنتیت و دیگری انحلال سمنتیت در زمینهٔ فریتی و سپس جوانه زدن و رشد کاربیدهای آلیاژی به طور مستقل.

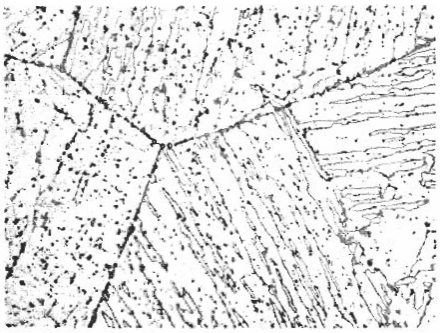
عملیات بازپخت در تشکیل انواع مختلف کاربیدها خلاصه نشده و برای حصول ساختار کاملاً بازپخت شده که عبارت از سمنتیت کروی در زمینهٔ فریت هم‌محور است، تغییرات مهمی نیز در شبکه بلوری و ساختار زمینه مارتنزیتی انجام می‌شود. در حقیقت ابتدا با تشکیل کاربیدهای انتقالی از درصد کربن مارتنزیت کاسته شده و بنابراین تتراگونالیتی شبکهٔ بلوری آن کاهش می‌یابد.

به عبارت دیگر شبکهٔ بلوری ناتعادلی bct مارتنزیت به سمت شبکهٔ بلوری تعادلی bcc فریت متمایل می‌شود و درنهایت با خروج کربن بیشتر از شبکهٔ بلوری مارتنزیت، صفحات فریتی جایگزین صفحات مارتنزیت در ساختار می‌شوند. با ادامه عملیات بازپخت، صفحات فریتی رشد کرده و زمینه یکنواخت فریت هم‌محور به وجود می‌آید.



شکل ۸-۷ میکروساختار مارتنزیت لایه‌ای در آلیاژ Fe-٪۱٫۲۲C بعد از بازپخت به مدت ۱۵ دقیقه در ۴۰۰ درجهٔ سانتیگراد (۷۵۲ درجهٔ فارنهایت). میکروساختار نوری. محلول حکاکی نایتال. بزرگنمایی × ۵۰۰ [۱].

در گسترهٔ تشخیص میکروسکوپ نوری تغییرات حاصل در ظاهر ساختار این فولاد هنگامی که پس از مارتنزیت شدن به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۴۰۰ درجهٔ سانتیگراد بازپخت شده باشد، بسیار جزیی است



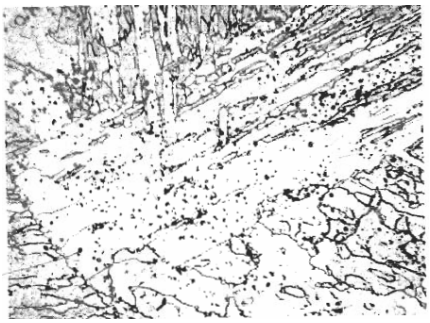
شکل ۸-۸ میکروساختار مارتنزیت لایه‌ای در آلیاژ Fe-٪۱٫۲۲C بعد از بازپخت به مدت ۲ ساعت در ۷۰۰ درجهٔ سانتیگراد (۱۲۹۲ درجهٔ فارنهایت) میکروساختار نوری. محلول حکاکی، نایتال. بزرگنمایی × [۱].

تغییرات بسیار برجسته و
مشخصتر در میکروساختار نمونه‌هایی که به مدت ۲ ساعت در ۷۰۰ درجهٔ سانتیگراد بازپخت شده‌اند ملاحظه می‌شود

شکل ۸-۸ نشان می‌دهد که حتی پس از بازپخت نسبتاً
زیاد، شکل اولیهٔ بسته‌های مارتنزیت و واحدهای منفرد موازی در آنها هنوز به طور کامل مشخص است.

تا این مرحله مهمترین اثرات بازپخت بر روی میکروساختار عبارت از حذف
صفحات کوچک مارتنزیتی و تشکیل کاربیدهای کروی بر روی مرز دانه‌های آستنیت اولیه (و در نتیجه نمایان شدن آنها) در داخل بسته‌های مارتنزیت است.

بازپخت بیشتر (۱۲ ساعت در ۷۰۰
درجهٔ سانتیگراد) موجب می‌شود که بلورهای صفحه‌ای شکل فریت باقیمانده در داخل بسته‌های مارتنزیتی از بین رفته و به جای آنها دانه‌های هم‌محور فریتی بیشتری تشکیل شود



شکل ۸-۹ میکروساختار مارتنزیت لایه‌ای در آلیاژ Fe-٪۱٫۲۲C بعد از بازپخت به مدت ۱۲ ساعت در ۷۰۰ درجهٔ سانتیگراد (۱۲۹۲ درجهٔ فارنهایت). میکروساختار نوری. محلول حکاکی نایتال. بزرگنمایی × ۵۰۰ [۱].

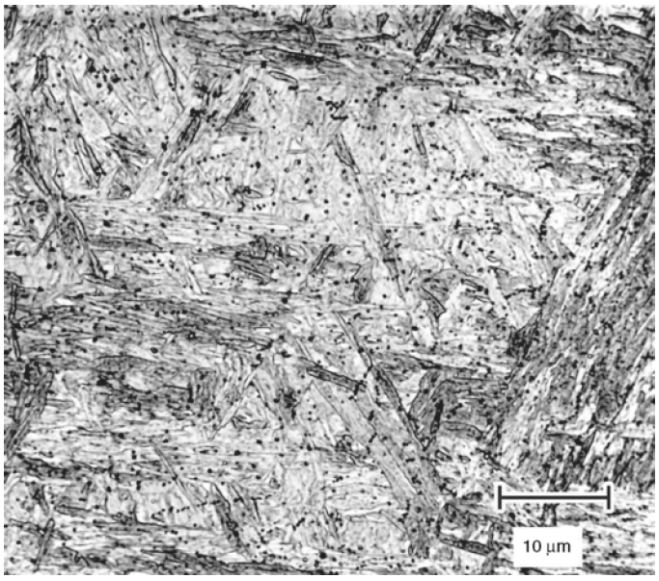


Fig. 22 Microstructure of tempered plate martensite showing small, rounded carbides that precipitated during the tempering treatment. 4% picral + 2% nital etch. Original magnification 1000×

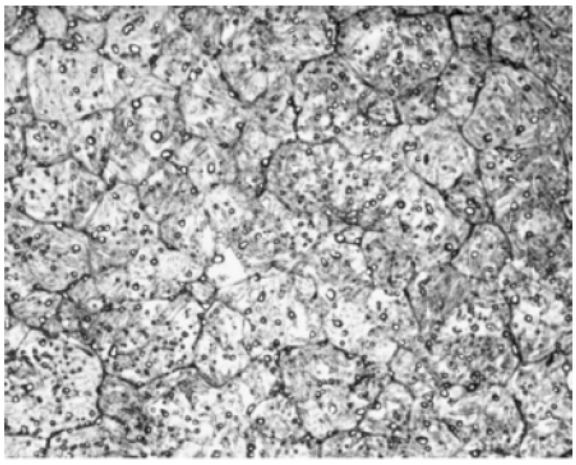


Fig. 49 Microstructure of quenched and tempered low-alloy steel showing delineation of the prior-austenite grain boundaries. The individual carbides are also delineated. Modified Winsteard's reagent. Original magnification 1000×

تغییرات خواص مکانیکی

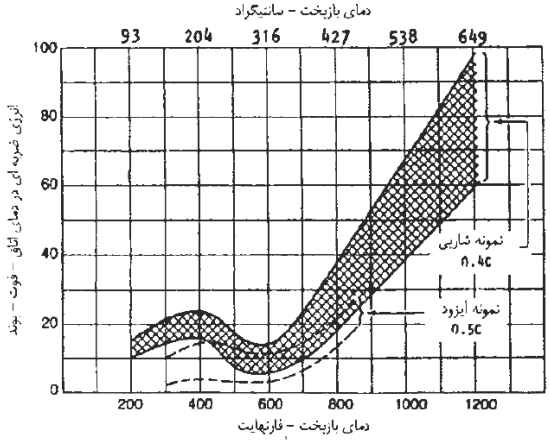
مارتنزیت که میکروساختار مورد نظر در عملیات سرد کردن سریع فولادهاست، کاملاً سخت و در عین حال بسیار ترد و شکننده است. برخی از پارامترها که منجر به ترد و شکننده شدن مارتنزیت می‌شوند عبارت‌اند از: خارج شدن شبکهٔ بلوری فولاد از شکل طبیعی خود در اثر محبوس شدن کربن اضافی در فضاهای هشت‌وجهی (به شکل ۶-۴ مراجعه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

هدف اصلی از عملیات حرارتی بازپخت کاهش تردی و

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

از آنجایی که

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



شکل ۸-۱۱ اثر دمای بازپخت بر روی انرژی ضربه‌ای فولادهای کم‌الیاژ با کربن متوسط

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

$$T = ۳۰(H_c - H_a)$$

در این فرمول:

T : دمای بازپخت برحسب فارنهایت

H_c : سختی محاسبه شده از ترکیب شیمیایی

H_a : سختی مورد نظر پس از بازپخت است.

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

$$T = ۱۶/۶۷(H_c - H_a) - ۱۷/۸$$