بهینه‌سازی ریزساختار فولاد DIN 1.6580 در کاربردهای استحکام بالا با عملیات حرارتی و پیرسازی مصنوعی

رشید بیابانی طویل
کارشناس ارشد مهندسی مواد و متالورژی، شرکت صنایع پمپیران
محمد حسن ذریه بهروزی‌وند
مدیر کنترل کیفیت و آزمایشگاه، شرکت صنایع پمپیران

چکیده
در این پژوهش از یک میلگرد فولادی با استحکام نهایی 837MPa و سختی 22HRC که به روش هاترولد تولید شده است استفاده گردید. عملیات حرارتی اولیه در دمای 840°C مطابق با نمودار TTT مربوط به این گرید از فولاد جهت آستنیته کردن انجام شد و پس از نگهداری به مدت 1 ساعت در این دما ساختار آستنیتی یکنواخت حاصل شده و جهت تشکیل ساختار بینیتی مطابق نمودار CCT در حمام نمک مذاب با دمای 220°C سریعا کوئنچ شد و سپس جهت دستیابی به ساختار یکنواخت و عاری از تنش در دمای 540°C عملیات تمپر و یا برگشت انجام گردید. هدف از انجام این سیکل دستیابی به ریزساختار غالب بینیتی و دانه‌بندی یکنواخت با عدد اندازه دانه 6 یا بیشتر جهت کاربرد در سرویس استحکام بالا با تافنس و چقرمکی شکست مناسب می‌باشد. به همین منظور بررسی‌های مکانیکی با یک مرحله برگشت، استحکام نهایی 1928MPa و تافنس شکست 8 درصد و سختی 52HRC را نشان می‌دهد. این میزان از افزایش استحکام بسبب انحلال و نفوذ اتم‌های بین‌نشین نیتروژن و کربن و در نتیجه قفل شدن نابجایی‌ها در حضور عنصر نیتروژن با حلالیتی بیش از حد مجاز و ساختار مارتنزیتی ناپایدار می‌باشد. لذا جهت افزایش تافنس و چقرمگی شکست یک مرتبه نیز تمپر در دمای 530°C و به مدت 1 ساعت انجام شد که با بررسی نتایج حاصل از تست‌های مکانیکی و سختی سنجی، استحکام نهایی به 1452MPa و الانگیشن 11 درصد تقلیل یافت. نقطه حائز اهمیت در این فولاد پدیده پیرسختی می‌باشد که با انجام یک مرتبه سیکل عملیات حرارتی تمپر، این پدیده در پروسه زمانی محدودی به صورت طبیعی اتفاق افتاده، سختی و استحکام نهایی فولاد را افزایش می‌دهد. لذا جهت جلوگیری از عواقب ناخوشایند این پدیده در محیط سرویس در سیکل دوم عملیات حرارتی تمپر به صورت مصنوعی پدیده پیرسختی اتفاق افتاده و از شکست‌های ترد در محیط‌های سرویس ممانعت بعمل می‌آید.

واژگان کلیدی: DIN 1.6580، فولاد VCN200، 30CrNiMo8، عملیات حرارتی، پیرسازی مصنوعی

مقدمه

فولاد DIN1.6580 یا 30CrNiMo8 معروف به VCN 200 جزء فولادهای آلیاژی عملیات حرارتی پذیر با استحکام بالا و مقاوم به خستگی برتر نسبت به سایر گریدهای فولادی از این نوع می‌باشد. این نوع فولاد جهت ساخت شفت‌ها و محورها با استحکام بالا در صنایع خودروسازی و سیمانی، اتصالات با مقاومت بالا و برخی قطعات در صنایع هوایی استفاده می‌شود. افزودنی‌هایی به فولاد اضافه می‌شوند تا تشکیل فریت را در طول فرآیند کوئنچ به تأخیر بیندازند و همچنین تبدیل به مارتنزیت را در سراسر قطعه فولادی حتی در سرعت‌های خنک‌سازی پایین‌تر تضمین کنند، که این امر باعث کاهش تنش پسماند و اعوجاج در طول عملیات حرارتی می‌شود. درجه سختی‌پذیری با درصد کربن و عناصر آلیاژی متفاوت است.(Dossett, 2006) به طور خاص، نرخ کرنش بر استحکام نهایی و شکل‌پذیری پیچ تأثیر می‌گذارد.(Bull, 2015) در حالی که زمان گرمایش و نگهداری بر تغییر فاز ماده تأثیر می‌گذارد.(Myers, 2009) نرخ گرمایش تأثیر قابل توجهی بر شروع سمنتیت دارد.

در این پژوهش جهت بررسی تمیزی فولاد و همچنین بررسی عیوبی که در فرایند عملیات حرارتی احتمال وقوع آنها از جمله ترک وجود داشت از تست التراسونیک استفاده شده است که سرعت‌های صوتی به‌دست‌آمده در مورد فولاد با استحکام بالای 30CrNiMo8 حدود 100 تا 150 متر بر ثانیه بیشتر بود و به طور قابل توجهی تحت تأثیر شرایط عملیات حرارتی قرار گرفت. بالاترین سرعت صوت (5875 متر بر ثانیه) در تمام شرایط مواد مورد تجزیه و تحلیل 30CrNiMo8 برای شرایط کوئنچ و تمپر شده (Q+T) تعیین شد، در حالی که کمترین سرعت صوت (5725 متر بر ثانیه) در مورد شرایط کوئنچ شده در هوا (AQ) اندازه‌گیری شد. هرچه سختی ویکرز بالاتر باشد، سرعت صوت پایین‌تر است.(Prohaska, 2012)

تأثیر قابل توجه ساختار کریستالی بر سرعت صوت در فولادها مشخص شد. هر چه میزان بینیت در ریزساختار یک فولاد با استحکام بالا بیشتر باشد، سرعت صوت نیز بیشتر خواهد بود و برعکس، درصد بالاتر مارتنزیت (مثلاً پس از کوئنچ) سرعت صوت را در این فولاد کاهش می‌دهد..(Prohaska, 2012)

هیدروژن گازی خواص مکانیکی اکثر مواد سازه‌ای از جمله فولادها را کاهش می‌دهد. در مورد فولادها، چندین بار گزارش شده است که حساسیت به اثرات هیدروژن با افزایش استحکام، به ویژه برای فولادهای مارتنزیتی کوئنچ و تمپر شده افزایشی بوده است. جدا از استحاله مارتنزیتی، استحکام فولادها را می‌توان با سایر مکانیسم‌های استحکام‌بخشی از جمله سخت‌شوندگی رسوبی، اعمال فازهای ثانویه (مثلاً پرلیت)، استحاله بینیتی، کار سرد، اصلاح دانه یا ترکیبی از آنها افزایش داد.(Thorsten, 2025)

بررسی مقاطع شکست در نمونه‌های کششی نشان داد که سرعت رشد ترک در مارتنزیت QT حدود پنج برابر سریع‌تر از پرلیت سرد شکل گرفته است که نشان‌دهنده مقاومت برتر ریزساختار پرلیتی در برابر اثرات هیدروژن است.(T. Michler,2024)

پیرسازی کرنشی رفتاری است که معمولا با پدیده نقطه تسلیم همراه است. به علت گرما دادن در دمای نسبتا پایین پس از کارد سرد استحکام فلز زیاد و شکل‌پذیری آن کم می‌شود . ظهور نقطه تسلیم به علت نفوذ اتم‌های کربن و نیتروژن به نابجایی‌ها در حین دوره پیر سازی برای تشکیل فضای جدید بین‌نشینی است که نابجایی‌ها را محکم نگه می‌دارد. تایید این مکانیسم ناشی از این واقعیت است که انرژی فعال‌سازی برای برگرداندن نقطعه تسلیم در پیرسازی با انرژی فعال‌سازی برای نفوذ کربن در اهن آلفا کاملا مطابقت دارد.

نیتروژن در پیرسازی کرنشی آهن نقش مهمتری از کربن دارد، چون ضریب پخش و حلالیت آن بالاتر است و در هنگام سرد کردن آهسته رسوبی ایجاد می‌کند که کامل نیست. از دیدگاه تجربی حذف پیرسازی کرنشی در کشش عمیق فولاد مم است زیرا ظهور مجدد نقطه تسلیم ممکن است به بروز اشکالاتی چون علایم سطحی یا کرنش‌های کشیدنی حاصل از تغییر شکل ناهمگن موضعی منجر شود. اغلب برای کنترل پیرسازی کرنشی، کم کردن مقدار کربن و نیتروژن موجود در محلول با افزودن عناصری که در خارج از محلول با بین‌نشین‌ها، به شکل کاربیدها یا نیترید پایدار مشارکت می‌کنند، ضروری است. پیرسازی کرنشی تا حد ویژه‌ای قبل کنترل است، اما هیچ فولاد کم کربن تجارتی وجود ندارد که به طور کامل قابل پیرسازی کرنشی نباشد.

باید بین پدیده پیرسازی کرنشی با فرایندی که به پیرسازی بر اثر آبدادن موسوم است و در فولادهای کم کربن رخ می‌دهد، فرق گذاشت. پیرسازی بر اثر آبدادن نوعی سخت‌گردانی رسوبی واقعی است که با آبدان از حداکثر حمای حلالیت کربن و نیتروژن در فریت رخ می‌دهد. پیر سازی بعدی در دمای اتاق یا کمی بیشتر، سختی و تنش تسلیم را افزایش می‌دهد. (جورج ای . دیتر،1391)

روش تحقیق

در این پژوهش از فولاد کم آلیاژ DIN1.6580 با ترکیب شیمیایی جدول 1 که آنالیز آن توسط دستگاه کوانتومتری پایه آهنی spectro اندازه‌گیری گریده بود به شکل میلگرد با قطر 50 میلیمتر به منظور بهینه‌سازی ساختار میکروسکوپی جهت دستیابی به استحکام بالا توام با تافنس و چقرمگی مناسب با استفاده از عملیات حرارتی ویژه در کاربردهای استحکام بالا، استفاده شده است. بدین منظور میلگردها به طول‌های یکسان 1700 میلیمتر برشکاری شده و سطح آنها نیز جهت یکنواختی ماشینکاری گردید و سپس جهت اعمال سیکل عملیات حرارتی در دمای 840°C به مدت 1 ساعت آستنیته شده و پس از آن در حمام نمک مذاب با دمای 220°C کوئنچ گردید. بعد از اینکه استحاله غالب بینیتی در آن دما انجام شد نمونه‌ها از محیط حمام نمک خارج شده و در شرایط محیطی قرار داده شدند. سپس به جهت افزایش تافنس و چقرمگی میلگردها در دمای 540°C برگشت داده شدند. جهت بررسی تاثیر سیکل اعمالی بر استحکام نهایی فولاد، نمونه‌ای از میلگرد برشکاری شده و نمونه دمبیلی شکل مطابق استاندارد به روش ماشینکاری تهیه گردید. با استفاده از دستگاه کشش 25 تنی Shimadzu تحت تنش کششی قرار داده شده و نمودار تنش و کرنش جهت بررسی ترسیم گردید.
بررسی‌های ریز ساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری Olympus PMG3 انجام شده است.
خواص مکانیکی شامل سختی، استحکام تسلیم، استحکام نهایی، الانگیشن و ... می‌باشد که تعیین کننده رفتار مواد در برابر نیروهای وارده هستند. این خواص پیش از آنکه یک قطعه در شرایط سرویس مورد استفاده قرار بگیرد، بایستی به طور کامل از نظر متالورژیکی بررسی شوند. پس از بررسی خواص مکانیکی میلگرد از طریق انجام آزمایش‌های مربوطه و بدست آمدن نتایج، مناسب بودن قطعه برای کاربرد مورد نظر در شرایط سرویس مشخص می‌گردد.
برای بررسی ماکرو سختی نمونه متالوگرافی شده و میلگردهای عملیات حرارتی شده از دستگاه KOOPA model UV1 استفاده شده است. آزمون سختی سنجی به روش راکول HRC با بار 150 کیلوگرم با مخروط الماسه 120° انجام گردید به گونه‌ای که میانگین پنج عدد سختی بر روی هر میلگرد به عنوان عدد سختی گزارش شده است.

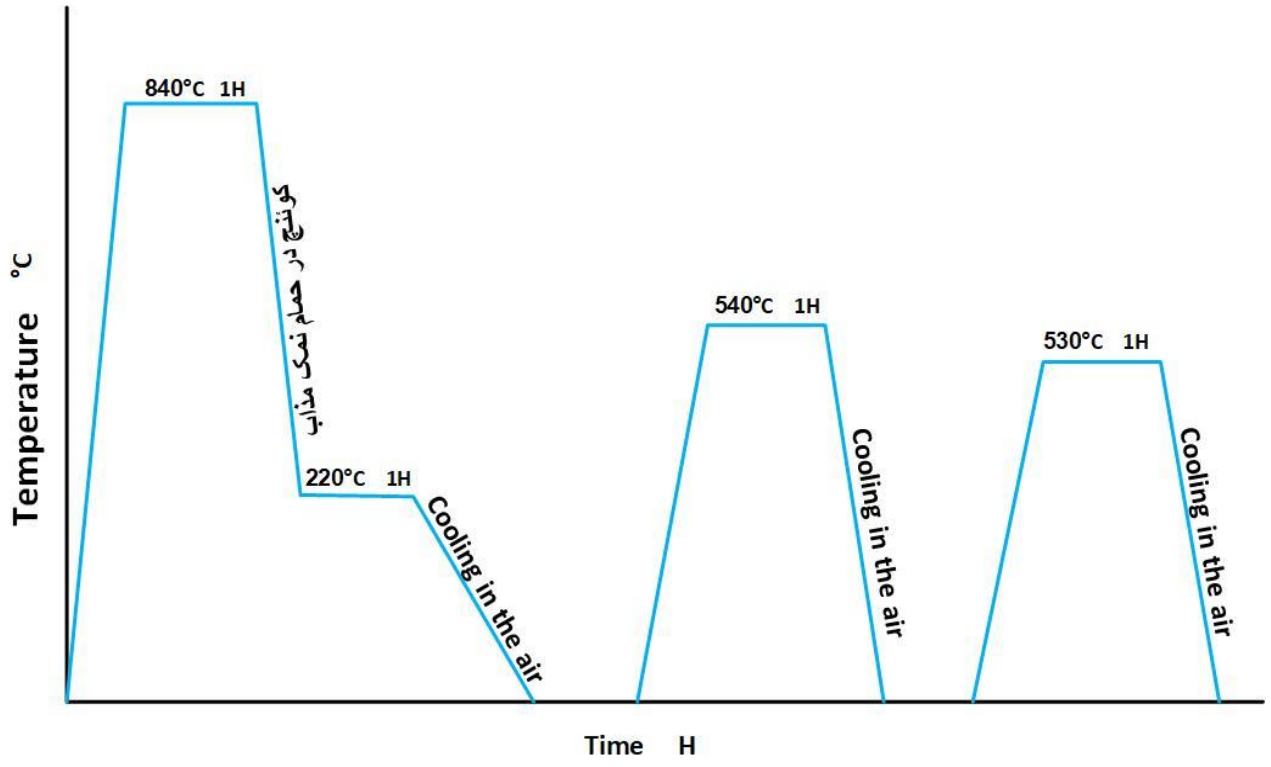
جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد کم آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش

%Fe	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
Base	0.321	0.314	0.527	0.0191	0.0135	1.84	1.87	0.306

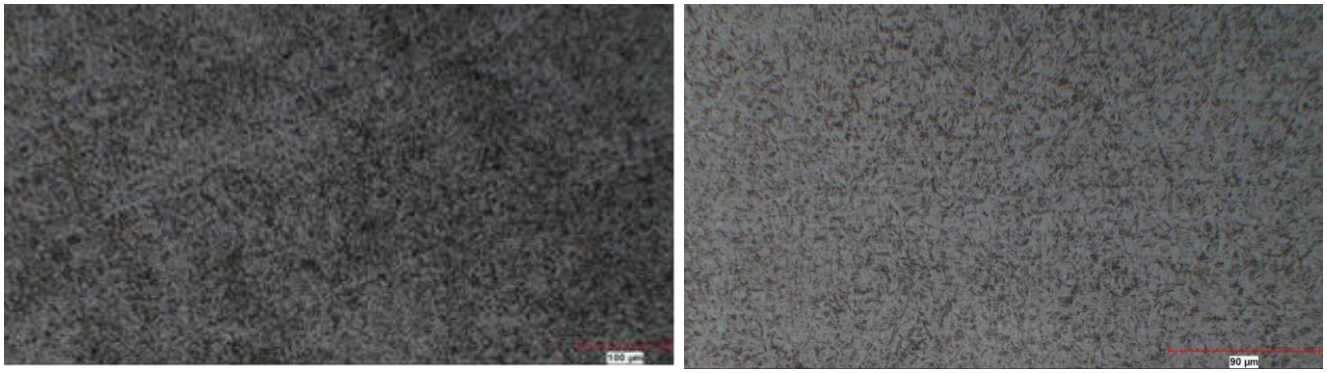
یافته ها

با توجه به اهمیت کیفیت متریال مورد استفاده در بخش‌های صنعتی از جمله صنایع نفت،گاز و نیروگاهی لازم است قبل از بکارگیری متریال، بررسی‌های شیمیایی و مکانیکی لازم جهت تعیین عملکرد مناسب متریال در محیط سرویس صورت پذیرد لذا با توجه به اهمیت این موضوع در این پژوهش میلگرد مورد استفاده در شرایطی که نیاز به استحکام بالا توام با تافنس و چقرمگی مد نظر باشد مورد مطالعه قرار گرفته است. در این پژوهش با توجه به مطالعات اولیه و موجودی بازار از میلگرد با جنس 1.6580 با قطر 50 میلیمتر استفاده گردید. بررسی‌های اولیه متریال که به روش هاترولد تولید شده بود دارای استحکام نهایی 837MPa و سختی 22HRC را نشان می‌دهد که مطالعات ریزساختاری زمینه فریتی - پرلیت و سمنتیت اسفرودایزینگ شده با توزیع غیر یکنواخت را نشان می‌دهد. که این مسئله با سختی متفاوت در قسمت‌های مختلف میلگرد همخوانی دارد. لذا جهت یکنواختی ساختار و قابلیت استفاده از این فولاد در کاربردهای استحکام بالا لازم است سیکل عملیات حرارتی مناسبی جهت بهینه سازی خواص مکانیکی بکار گرفته شود. سیکل عملیات حرارتی مورد

استفاده در این پژوهش در شکل 1 آورده شده است. ابتدا میلگردهای برشکاری شده در بسکت مناسب به صورت عمودی چیده شده و مهار می‌شوند به گونه‌ای که در اثر حرارت بالا دچار انحنا و تاب نگردند و سپس در کوره عملیات حرارتی با دمای حدودی 700-750°C آویز می‌گردند تا با وزن خود به حالت تعادل برسند. جهت یکنواختی ساختار و حذف تنش‌های باقیمانده از فرایندهای ساخت قبلی میلگردها به مدت 1 ساعت در دمای 840°C نگهداری شدند و سپس مطابق سیکل عملیات حرارتی شکل 1 در حمام نمک مذاب کوئنچ گردیدند. نقطه حائز اهمیت در این سیکل شیب افزایش دمای اولیه میلگردها می‌باشد به گونه‌ای که ابتدا دمای کوره عملیات حرارتی به حدود 800°C افزایش یافته و میلگردها سریعا داخل آن قرار داده می‌شوند این عمل باعث می‌شود که ساختار اولیه در فرایند کوئنچ ریز دانه شده و از تجریه دانه‌های آستنیت در دمای بالا ممانعت بعمل آید. به علت وجود ناهمسانگردی ذاتی در دانه‌های فلزات پر بلور، توزیع تنش در یک جسم با مقیاس ماکروسکوپی کاملا یکنواخت نیست. لذا وجود بیش از یک فاز نیز باعث نایکنواختی تنش در مقیاس میکروسکوپی می‌شود. علاوه بر این اگر میلگردها کاملا مستقیم نباشند، یا بارگذاری در مرکز میله در شرایط سرویس انجام نشود، کرنش‌های مربوط به اجزای طولی با همدیگر فرق می‌کند و در نتیجه توزیع تنش نیز یکنواخت نمی‌شود. لذا با توجه به این موضوع سیکل عملیات حرارتی به گونه‌ای طراحی و اجرا گردید که ساختار غالب در میلگردها بینیت و مقداری نیز مارتنزیت باشد. این ساختار با کوئنچ میلگردها از دمای 840°C در محیط حمام نمک مذاب با ترکیب نیتریت سدیم و نیترات پتاسیم با نسبت مساوی در دمای 220°C و نگهداری این فولاد زیر ناحیه M_s و در نتیجه کند شدن روند سرمایش قطعه به نسبت نزدیکی دمای میلگردها و دمای حمام نمک مذاب، اغلب ساختار (حدود80٪) بینیت و الباقی به واسطه خنک شدن در هوا مارتنزیت خواهد بود. بعد از انجام استحاله بینیتی میلکردها از محفظه حمام نمک مذاب خارج می‌گردند و در مجاوت هوا تا دمای محیط قرار داده می‌شوند. با توجه به اینکه در این شرایط تنش‌های در داخل میلگردها باقی می‌ماند لازم است یک مرحله تمپر نیز جهت برقراری تعادل بین استحکام و تافنس انجام گردد لذا مجددا میلگردها در کوره عملیات حرارتی با دمای 540°C قرار داده شده و به مدت یک ساعت تمپر انجام شد که نتیجه آن ساختاری با زمینه بینیتی مطابق شکل 2 و توزیع یکنواخت مارتنزیت می‌باشد. که نتیجه آن استحصال سختی به میزان 42HRC می‌باشد.



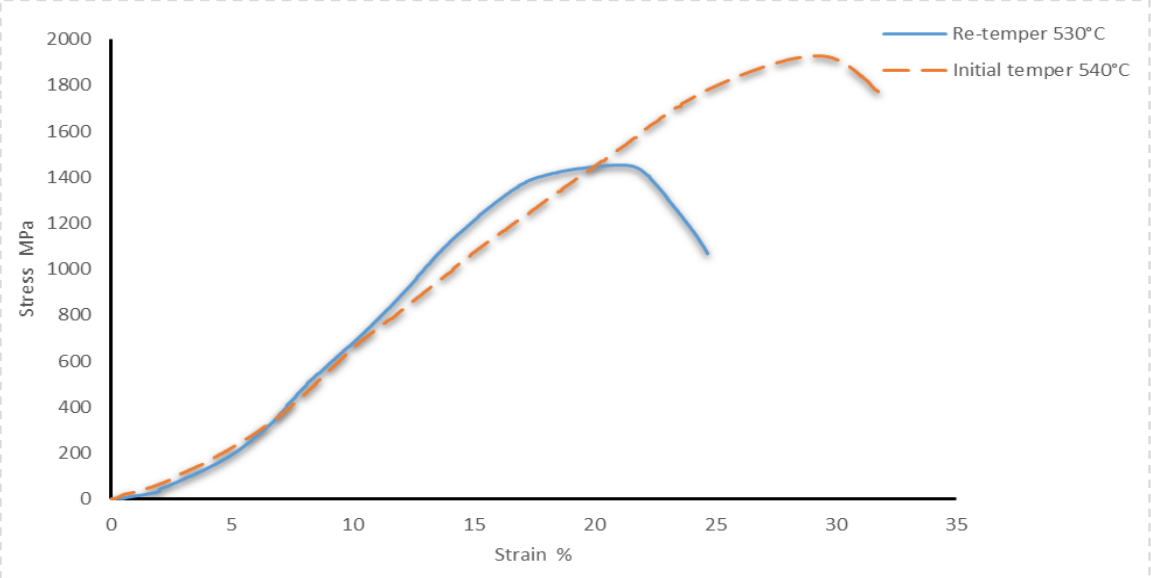
شکل 1 سیکل عملیات حرارتی مورد استفاده در این پژوهش



شکل 2 تصویر میکروسکوپی با بزرگنمایی 100X , 200X محلول اچانت نایتال 3٪ زمینه بینیتی با توزیع مارتنزیت

جهت بررسی تاثیر ریز ساختار بر خواص مکانیکی میلگردها نمونه‌ای از آن جهت انجام آزمون تست کشش نمونه‌سازی شده و تحت آزمون تست کشش قرار گرفت و نمودار تنش و کرنش آن با توجه به طرح ریزی انجام شده و نیاز به تافنس و چقرمگی در این گرید فولادی بررسی شد. استحکام نهایی در آزمون کشش 1928 MPa با الانگیشن 8 درصد حاصل گردید. دلایلی که موجب افزایش استحکام بعد از تمپر و حصول سختی 42HRC می‌شود عناصر بین نشین کربن و نیتروژن می‌باشد که با تشکیل محلول جامد بین نشین و نفوذ در نابجایی‌ها می‌توانند موجب قفل شدن نابجایی‌ها شده و از حرکت آنها در صفحات لغزش جلوگیری نمایند. لازم است یک مرحله برگشت یا تمپر جهت کاهش سختی و استحکام نهایی اولیه توام با افزایش تافنس و چقرمگی انجام شود (OVER AGEING) لذا میلگردهای مورد پژوهش مجددا در کوره عملیات حرارتی عمودی با دمای 530°C قرار داده شده و به مدت یک ساعت تمپر انجام گردید که در این فرایند کربن از ساختار ناپایدار BCT مارتنزیتی خارج شده و در زمینه رسوب می‌نماید.

با انجام یک مرتبه تمپر مجدد در دمای 530°C به مدت یک ساعت تاثیر نیتروژن بر پدیده پیرکرنشی مهار شده و ساختار نیز با over age شدن نیتروژن و کاهش سختی به حالت تعادل نزدیک‌تر می‌شود. نتایج حاصل از آزمون تست کشش برای میلگردهای دو مرتبه تمپر شده با استحکام نهایی 1452MPa و الانگیشن 11 درصد مطابق شکل 3 این مورد را تایید می‌نماید. وقتی خطوط نابجایی‌ها از تاثیر اتم‌های محلول بین‌نشین آزاد شود، لغزش در تنش‌های کمتر می‌تواند به وجود آید. به عبارت دیگر در جایی که نابجایی‌ها خیلی محکم شده‌اند، مثلا توسط کربن و نیتروژن در آهن نابجایی‌های جدیدی باید تولید شوند تا تنش جریان افت کند.



شکل 3 نتایج آزمون تست کشش میلگرد تمپر شده در دمای 530°C , 540°C

بحث و نتیجه‌گیری (فونت B Nazanin – اندازه 12 – پررنگ)

نتایج حاصل از این پژوهش نشانگر اهمیت طراحی و اجرای صحیح سیکل عملیات حرارتی جهت دستیابی به یک محصول با استحکام و تافنس شکست مناسب می‌باشد. همچنین اهمیت ساخت میلگرد با کیفیت و تمیزی ذوب به عنوان مواد اولیه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. لذا لازم است از تکنولورژی‌های بروز جهت انجام متالورژی ثانویه بر روی ذوب استفاده گردد. که در این خصوص تاثیر نیتروژن محلول مازاد در ذوب که بیش از 28 ppm آن منجر به پدیده پیرسختی زود هنگام در محصول نهایی به عنوان میلگرد می‌باشد که می‌تواند منجر به شکست ترد مطابق شکل 4 در محیط سرویس گردد.

شکل 4 تصویر مربوط به مقطع شکست ترد در فولاد 1.6580

پیشنهاد می‌شود جهت استفاده از این گرید فولاد تمیزی آن مد نظر قرار گیرد تا در کاربردهای ویژه و در فرایند عملیات حرارتی ایجاد مشکل ننماید..

منابع

جورج ای . دیتر، ترجمه شهره شهیدی، 1391، متالورژی مکانیکی، چاپ چهارم، تهران، انتشارات مرکز نشر دانشگاهی

J. L. Dossett and H. E. Boyer, Practical Heat Treating. ASM International, 2006.

L. Bull, E. Palmier, R. Thackeray, I. Burgess, and B. Davison, “Tensile behavior of grade 8.8 galvanized bolt assemblies in fire” Journal of Structural Fire Engineering, vol. 6, no. 3, pp. 197–212, 2015.

M. A. Myers and K. K. Chawla, Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University Press, New York, 2009.

M. Prohaska ،M. Panzenboeck ،H. Anderl ،W. Kordasch “Effect of chemical composition and microstructural parameters on the sound velocity of various materials used for high pressure applications” 18th World Conference on Non-Destructive Testing, 16-20 April 2012, Durban, South Africa

Thorsten Mischler, Lisa Cleese, Sabine Ozer, Tom DePover “Comparison of gaseous hydrogen effects in 1200 MPa high strength martensitic and pearlitic steels” Materials Science & Engineering A 924 (2025)

T. Michler, F. Ebling, C. Fischer, S. Oeser, K. Wackermann, Tensile testing in high pressure gaseous hydrogen using conventional and tubular specimens: ferritic steels, Int. J. Hydrogen Energy 70 (2024) 262–275,

Microstructure optimization of DIN 1.6580 steel in high strength applications by heat treatment and artificial aging

Rashid biyabani tavil
Master of Science in Materials and Metallurgy Engineering, Pompiran Industries Company
Mohammad hassn zryeh Behrouzivand
Quality Control and Laboratory Manager, Pompiran Industries Company

Abstract
In this study, a steel rebar with an ultimate strength of 837 MPa and a hardness of 22 HRC, produced by hot-rolling, was used. Initial heat treatment was performed at 840 °C according to the TTT chart for this grade of steel to austenitize it, and after holding for 1 hour at this temperature, a uniform austenitic structure was obtained, and to form a bainite structure according to the CCT chart, it was quickly quenched in a molten salt bath at 220 °C, and then a tempering or annealing operation was performed at 540 °C to achieve a uniform and stress-free structure. The purpose of this cycle is to achieve a predominantly bainite microstructure and uniform grain size with a grain size of 6 or more for use in high-strength service with appropriate toughness and fracture toughness. For this purpose, mechanical tests with one annealing step show an ultimate strength of 1928 MPa, a fracture toughness of 8%, and a hardness of 52 HRC. This increase in strength is due to the dissolution and penetration of interstitial atoms of nitrogen and carbon, resulting in the locking of dislocations in the presence of nitrogen with a solubility exceeding the permissible limit and an unstable martensitic structure. Therefore, in order to increase toughness and fracture toughness, tempering was performed once at 530°C for 1 hour, which, according to the results of mechanical and hardness tests, reduced the ultimate strength to 1452MPa and the elongation to 11%. An important point in this steel is the phenomenon of age hardening, which occurs naturally in a limited time process by performing a single temper heat treatment cycle, increasing the hardness and ultimate strength of the steel. Therefore, in order to prevent the unpleasant consequences of this phenomenon in the service environment, in the second temper heat treatment cycle, age hardening occurs artificially and brittle fractures in service environments are prevented.

Keywords: : DIN 1.6580, VCN200 steel, 30CrNiMo8, heat treatment, artificial aging