تأثیر دمای تمپر بر سختی و خواص کششی فولاد API 5CT T95

محمد علی سلطانی*[1]، کامران امینی[1]، علی نقیان[2] و کرامت رفیعی[2]
۱- مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی
۲- کارشناس ارشد، مجتمع فولاد آلیاژی اصفهان
*ma.soltani47@iaumajlesi.ac.ir
(تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۱۰/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۱/۲۸)

چکیده
فولاد API 5CT T95 محدوده وسیعی از کاربرد را در صنایع نفت دارد. ساخت تجهیزاتی که قبلاً در شرکت‌های فولادسازی خارجی انجام می‌گرفت، اخیراً در شرکت‌های فولادسازی داخل کشور شروع شده است و با توجه به کاربرد بسیار حساس و بحرانی این فولاد، مطالعه و تحقیق در زمینه موضوع مورد بحث از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. این فولاد پس از ذوب، شمش‌ریزی و شکل‌دهی جهت حصول خواص مکانیکی عالی تحت عملیات حرارتی سخت‌کاری و بازپخت قرار می‌گیرد. رسم نمودار بازپخت فولاد مذکور (تأثیر دمای بازپخت بر سختی، استحکام کششی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول نسبی ودرصد کاهش سطح مقطع نسبی) که در منابع مختلف موجود نیست، هدف این تحقیق است. بدین‌منظور تعدادی نمونه کشش از جنس فولاد فوق‌الذکر تهیه گردید. تمام نمونه‌ها در دمای ۸۹۰ درجه سانتی‌گراد آستنیته و پس از کوئنچ در آب، هر نمونه در یک دمای ثابت (شامل ۵۷۰، ۶۰۰، ۶۲۰، ۶۳۵، ۶۵۰، ۶۶۰، ۶۷۰، ۶۸۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد) بازپخت شد. آنگاه نمونه‌های مذکور تحت تست کشش قرار گرفتند و سختی آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج منجر به رسم نمودار تمپر فولاد که راهنمای اصلی عملیات حرارتی است، گردید.

واژه‌های کلیدی:
فولاد API 5CT T95، خواص مکانیکی، دمای بازپخت.

۱- مقدمه
فولاد API 5CT T95 یکی از فولادهای API (انجمن نفت امریکا) است که معادل AISI یا DIN ندارد. این فولاد جزء فولادهای کم آلیاژ با کربن متوسط و از خانواده فولادهای با استحکام بالا است. همچنین با توجه به خواص استحکامی بالا، محدوده وسیعی از کاربرد را پس از سخت‌کاری و تمپر در صنایع نفت دارد که می‌توان به کاربرد آن در قطعات سر چاهی نفت شامل اسپول، والو و ... اشاره کرد. این فولاد حاوی مقادیر کمی از عناصر آلیاژی شامل منگنز، مولیبدن، کروم، نیکل و سیلیسیم است. بازپخت کردن معمولاً منجر به کاهش سختی نهائی فولاد می‌شود لیکن حضور عناصر آلیاژی در به تعویق انداختن افت سختی و استحکام بسیار مؤثر است [۱ و ۲]. عناصر Mo و Mn که دو عنصر اصلی فولاد API 5CT T95 را تشکیل می‌دهند، چنین نقشی ایفا می‌کنند. منگنز و سیلیسیم به

مقدار زیاد در کاربید حل نمی‌شود بلکه عمدتاً در فریت حل شده و استحکام و سختی فولاد را بالا می‌برد [۲]. با افزایش مقدار عنصر Ni، سختی فولادها پس از بازپخت افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه این عنصر در فاز کاربید قرار نمی‌گیرد، باعث استحکام فریت (حاوی ذرات درشت و پخش شده کاربید) می‌شود [۱ و ۳]. عنصر Mn نیز که در فریت بیشتر از کاربید محلول است، مشابه Si عمل می‌کند با این تفاوت که قدرت آن در به تعویق‌اندازی نرم شدن در ضمن بازپخت، کمتر از Si می‌باشد [۱ و ۲]. عنصر Cr نیز می‌تواند مقاومت فولاد را در برابر نرم شدن در هنگام بازپخت افزایش دهد [۲]. این عنصر که کاربیدزای قوی می‌باشد به دلیل تشکیل کاربید، حتی می‌تواند باعث افزایش سختی در حین بازپخت (سختی ثانویه) نیز گردد [۱]. برای مقاومت در برابر نرم شدن مخصوصاً در دماهای بازپخت بالاتر، حتی ۰/۵٪ Cr نیز کافی است. بنابراین فولاد API 5CT T95 که دارای حدود ۱٪ Cr به همراه عناصر Ni و Mn می‌باشد قاعدتاً باید افت سختی ناچیزی را در حین عملیات بازپخت از خود نشان دهد. چنانچه مشاهده می‌شود عناصر کاربیدزا در دماهای بازپخت پایین نقش زیادی ندارند. عنصر Si چنانکه قبلاً هم اشاره شد به طور مؤثر و قابل ملاحظه‌ای، مقاومت به نرم شدن در حین بازپخت را افزایش می‌دهد. مطالعات ریزساختاری نشان داده که علت این امر، جلوگیری از استحاله کاربید انتقالی به سمانتیت است [۱ و ۲]. عنصر Mn در دماهای پایین بازپخت، اثر ناچیزی بر مقاومت به نرم شدن دارد، اما در دماهای بالاتر، اثر آن تشدید می‌شود. دلیل این موضوع، مشارکت Mn درتشکیل کاربیدها در دماهای بالای بازپخت می‌باشد. این عنصر دارای ضریب نفوذ کم بوده و بنابراین درشت شدن کاربید را به تعویق می‌اندازد [۱ و ۲]. وجود Cr در این فولاد باعث تمایل به تردی آن در حین بازپخت می‌گردد. حضور توأم عناصر Mn و Cr در فولاد نیز (در حد ۱/۲- ۰/۹٪ موجود در آن)، قابلیت تردی بازپخت را افزایش می‌دهد [۴]. نتایج نشان داده است که اگر مقدار Mn در فولاد کمتر از ۰/۵٪ باشد فولاد نسبت به تردی حرارتی حساس نخواهد بود [۲]. با توجه به اثرات فوق، فولاد API 5CT T95 از قابلیت ترد شدن در حین عملیات بازپخت برخوردار می‌باشد که برای حذف یا کاهش آن خصوصاً در قطعات بزرگ که در آنها سرد کردن سریع پس از بازپخت کردن، اثر کمتری دارد، می‌توان از Mo استفاده کرد. بنابراین به نظر می‌رسد علت اصلی وجود مقادیر جزئی Mo (کمتر از ۰/۳٪) در ترکیب شیمیائی فولاد API 5CT T95، همین مطلب باشد [۵]. تردی حرارتی در محدوده دمایی ۵۷۵ - ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. علاوه بر عناصر آلیاژی، ناخالصی‌ها نیز در بروز این نوع تردی نقش مؤثری دارند. در فولاد API 5CT T95 حضور عناصر آلیاژی Ni، Mn، Cr و Si، تجمع ناخالصی‌ها در مرزدانه‌های آستنیت را تقویت می‌کند. این تجمع به صورت نوار باریک و پیوسته در امتداد مرز دانه خواهد بود که باعث افت تافنس می‌گردد [۶].

برای فولاد API 5CT T95، با توجه به کاربرد آن خواص مکانیکی مطلوب (استحکام، انعطاف‌پذیری) زمانی حاصل می‌شود که سختی فولاد پس از کوئنچ و بازپخت حدود ۴۰-۳۰ راکول‌سی باشد. محدوده دمای بازپخت توصیه شده برای فولاد API 5CT T95، ۷۰۰-۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و دمای بازپخت متداول ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۷ و ۸].

۲- روش تحقیق

برای انجام آزمایشات ابتدا تعداد ۲۰ عدد نمونه استوانه‌ای با قطر ۱۸ میلی‌متر و طول ۱۲۰ میلی‌متر از جنس فولاد فوق‌الذکر با ترکیب شیمیائی مطابق جدول (۱) تهیه گردید و تحت مراحل ذیل قرار گرفت. نمونه‌ها پس از آماده شدن ابتدا در دمای ۹۳۰ درجه سانتی‌گراد نرماله گردید، آنگاه در دمای ۸۹۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت در کوره الکتریکی مجهز به اتمسفر محافظت‌شونده با گاز آرگن آستنیته شده و بلافاصله در محیط آب با دمای حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد کوئنچ گردید. سپس نمونه‌ها به ۸ گروه ۲ تایی تقسیم شدند. گروه‌های هشت‌گانه در دماهای مختلف شامل ۵۷۰، ۶۰۰، ۶۳۵، ۶۵۰، ۶۶۰، ۶۸۰، ۶۷۰ و ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد API 5CT T95 مورد آزمایش.

%C	%Si	٪Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%V	%Al	%Cu
۰/۳۲	۰/۲۹	۰/۹۷	۰/۰۱۸	۰/۰۰۷	۱/۱۱	۰/۲۹	۰/۳۵	۰/۰۲	۰/۰۲۱	۰/۱۱

جدول (۲): خواص کششی فولاد API 5CT T95 پس از سخت‌کاری و بازپخت.

دمای بازپخت (°C)	سختی (HB)	استحکام نهایی (UTS) (N/mm^2)	استحکام تسلیم (YP) (N/mm^2)	درصد افزایش طول (EL)	درصد کاهش سطح مقطع (Z)
۵۷۰	۲۶۵	۸۹۸	۸۰۰	۱۷	۶۷
۶۰۰	۲۵۵	۸۶۱	۷۵۹	۱۸	۶۵
۶۳۵	۲۴۰	۸۱۸	۷۰۵	۲۲	۶۹
۶۵۰	۲۳۰	۷۸۰	۶۶۰	۲۳	۷۱
۶۶۰	۲۲۵	۷۶۱	۶۳۷	۲۴	۷۲
۶۷۰	۲۲۰	۷۵۳	۶۲۸	۲۵	۷۳
۶۸۰	۲۲۰	۷۳۹	۶۱۰	۲۵	۷۳
۷۰۰	۲۱۰	۶۹۵	۵۶۶	۲۴	۷۲

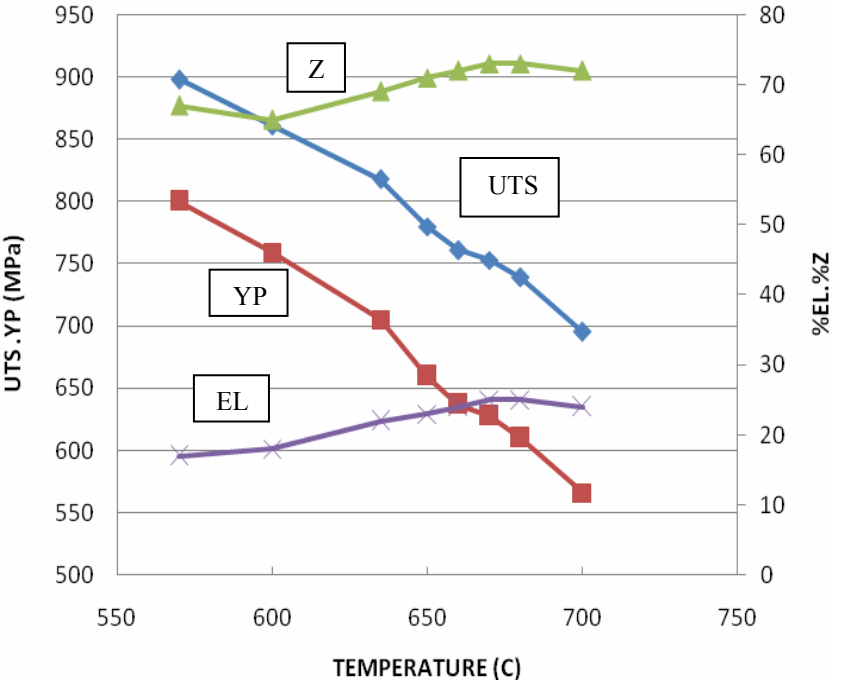
بازپخت گردیدند و آنگاه در هوا سرد شدند. از هر نمونه استوانه‌ای یک عدد نمونه کشش طبق استاندارد (EN 10002) تهیه و تست کشش و سختی با روش راکول‌سی انجام گردید.

به منظور تعیین ریزساختار نمونه‌ها و بررسی‌های متالوگرافی از هر گروه یک عدد نمونه (جمعاً ۸ عدد) پس از سمباده‌زنی و پولیش با خمیر آلومینا، توسط محلول اچ نایتال ۲ درصد حکاکی گردید و توسط میکروسکوپ نوری مطالعه و نهایتاً تصویربرداری شد.

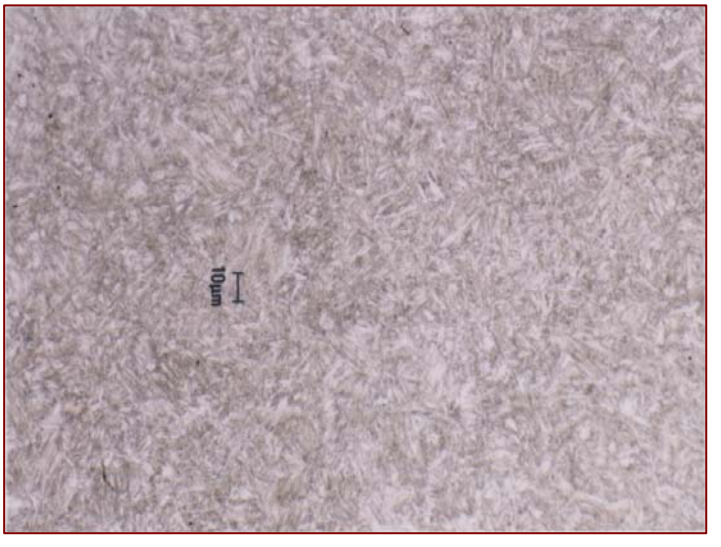
۳- نتایج و مباحث

متوسط نتایج تست دو نمونه کشش شامل استحکام کششی، استحکام تسلیم، درصد ازدیاد طول نسبی و درصد کاهش سطح مقطع نسبی در دماهای مختلف بازپخت در جدول (۲) آورده شده است. نمودار تغییرات خواص کششی فولاد API 5CT T95 بر حسب دمای بازپخت که در منابع مختلف موجود نیست و در حقیقت هدف اصلی پروژه حاضر است، در شکل (۱) ترسیم شده است. متوسط نتایج تست سختی برای دماهای مختلف بازپخت نیز در جدول (۲) ارائه شده است. در این جدول دیده می‌شود سختی کاملاً وابسته به دمای بازپخت است. ریزساختار در تمام نمونه‌ها مارتنزیت بازپخت شده است، اما با افزایش دمای بازپخت مورفولوژی مارتنزیت بازپخت شده خشن‌تر شده است. در شکل (۲) ساختار میکروسکوپی یکی از نمونه‌ها (نمونه‌ای که در درجه حرارت ۶۵۰ درجه سانتی‌گراد بازپخت شده است)، برای نمونه آورده شده است.

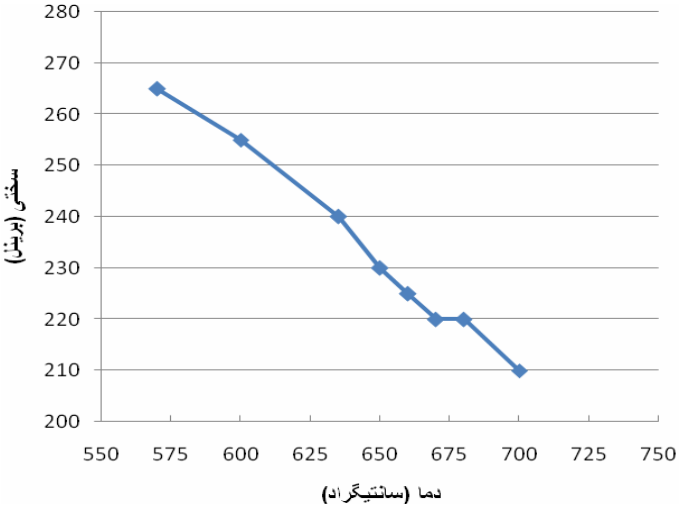
در شکل (۱) ملاحظه می‌شود که با افزایش درجه حرارت بازپخت استحکام کششی و استحکام تسلیم به تدریج کاهش می‌یابد اما درصد ازدیاد طول نسبی و درصد کاهش سطح مقطع نسبی به تدریج افزایش می‌یابد. این موضوع در اکثر منابع تحقیق شده و به اثبات رسیده است [۲ و ۳]. در شکل (۳) ملاحظه می‌شود که با افزایش درجه حرارت بازپخت، سختی به تدریج



شکل (۱): نمودار تغییرات خواص مکانیکی فولاد API 5CT T95 بر حسب دمای بازپخت.



شکل (۲): ریزساختار فولاد API 5CT T95 برای نمونه‌ای که بعد از آستنیته شدن در دمای ۸۹۰ درجه سانتی گراد در آب کوئنچ گردیده و سپس در دمای ۶۵۰ درجه سانتی گراد بازپخت شده است.



شکل (۳): نمودار تغییرات سختی فولاد API 5CT T95 بر حسب دمای بازپخت.

کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر این فولاد مستعد گرفتن سختی ثانویه نمی‌باشد. این نتیجه با توجه به درصدهای نسبتاً کم عناصر آلیاژی کاربیدزا قابل پیش‌بینی است [۲].

به طور خلاصه می‌توان گفت با افزایش درجه حرارت بازپخت، مورفولوژی مارتنزیت بازپخت شده خشن‌تر گردیده و ساختار به حالت تعادلی (ساختار آنیل شده) نزدیک‌تر می‌شود، بنابراین سختی، استحکام کششی و استحکام تسلیم کاهش می‌یابد.

٤- نتیجه‌گیری

۱- تغییرات خواص مکانیکی بر حسب درجه حرارت بازپخت فولاد API 5CT T95 (محدوده دمایی توصیه شده در استاندارد) که در حقیقت راهنمای عملیات سخت‌کاری فولاد است، به دست آمد. با استفاده از این راهنما می‌توان سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی را طراحی و اجراء نمود و خواص قابل حصول را پیش‌بینی کرد.

۲- با افزایش درجه حرارت بازپخت، سختی کاهش می‌یابد. در این فولاد سختی ثانویه مشاهده نمی‌شود. این نتیجه با توجه به درصدهای نسبتاً کم عناصر آلیاژی کاربیدزا قابل پیش‌بینی است.

۳- با افزایش درجه حرارت بازپخت، استحکام کششی و استحکام تسلیم به تدریج کاهش می‌یابد اما درصد ازدیاد طول نسبی و درصد کاهش سطح مقطع نسبی به تدریج افزایش می‌یابد.

٥- مراجع

[۱] ع. ا. اکرامی، عناصر آلیاژی در فولاد، مرکز نشر دانشگاهی، چاپ اول، ۱۳۷۵.

[۲] م. ع. گلعذار، "اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها"، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.

[3] G. Krauss, Principles of Heat Treatment of Steel, American Society For Metals, 1980.

[4] R. D. K. Mishra, R. T. V. Balasub and P. Ram Rao, "On Intraction Amongest Trace and Alloying Elements at the Grain Boundaries of a Low Alloy Steel", Acta Metall, Vol. 35, No. 12, pp. 2995-3000, 1987.

[5] C. R. Brooks, Principles Of The Heat Treatment Of Plain Carbon And Low Alloy Steels, ASM, 1996.

[6] Y. I. Ustinovschikov, I. N. Shabanova, V. A. Sapukin, And V. A. Trapeznikov, Embrittlement Of Alloy Steels During Tempering, Phys. Met. Metall. Vol. 44, No. 2, pp. 91-99, 1978.

[7] Specification For Casing And Tubing (U. S. Customary Units), API Specification 5CT Fifth Edition. April, 1, 1995.

[8] L. Li, Q. Li, E. Guo, "Study on Temper Embrittlement on Phosphorus in Steel 12CrMoV", Engineering Materials Vols. 1183-1188, pp. 297-300, 2005.