تأثیر عملیات تمپر بر مقاومت به ضربه فولاد 30CrMnSi

کامران امینی[۱]، محمدعلی سلطانی[۲]، علی نقیان[۳]، مهدی بشیری[۴]
۱- عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی
۲ و ۳ و ۴- مجتمع فولاد آلیاژی
Kamran_amini1978@hotmail.com

چکیده
در این پژوهش تأثیر عملیات تمپر بر فولاد 30CrMnSi که یک فولاد متوسط کربن پر مصرف برای ساخت مخازن جداره ضخیم و جداره فوق ضخیم است، بررسی شده است. بدین منظور تعدادی نمونه ضربه مطابق استاندارد EN 10045 تهیه شد و در دمای ۸۹۰ درجه سانتیگراد آستنیته گردید. تمام نمونه‌ها در محیط کوئنچ روغن سرد شدند و سپس در دماهای مختلف شامل ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۵۰، ۴۵۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت تمپر گردیدند و آنگاه در هوا سرد شدند. نمونه‌ها در دمای محیط و دماهای ۱۰ و ۴۰ درجه سانتیگراد زیر صفر تحت آزمایش ضربه قرار گرفت و نمودار انرژی ضربه بر حسب دمای تمپر ترسیم گردید. تمام نمونه‌ها متالوگرافی، عکس‌برداری و همچنین سختی‌سنجی شدند. نتایج نشان داد درمحدوده دمائی تمپر ۴۰۰ - ۲۵۰ درجه سانتیگراد انرژی ضربه در هر سه درجه حرارت تست شده تا حدودی کاهش یافته است، یعنی فولاد مذکور به تردی تمپر در این محدوده دمائی حساس است.

واژه‌های کلیدی:
مقاومت به ضربه، فولاد 30CrMnSi، عملیات حرارتی

۱- مقدمه
تمپر کردن معمولاً منجر به کاهش سختی نهائی فولاد می‌شود لیکن حضور عناصر آلیاژی در به تعویق انداختن افت سختی و استحکام بسیار مؤثر است[۲ و ۱]. عناصرSi و Mn که عناصر اصلی فولاد 30CrMnSi را تشکیل می‌دهند چنین نقشی ایفا می‌کنند. این عناصر به مقدار زیاد در کاربید حل نمی‌شوند بلکه عمدتاً در فریت حل شده و استحکام و سختی فولاد را بالا می‌برند[۲].
دیده شده‌است که با افزایش مقدار عنصر Si سختی فولادها پس از تمپر افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه این عنصر در فاز کاربید قرار نمی‌گیرد، باعث استحکام فریت (حاوی ذرات درشت و پخش شده کاربید) می‌شود[۳ و ۱].
عنصر Mn نیز که در فریت بیشتر از کاربید محلولند، مشابه Si عمل می‌کند با این تفاوت که قدرت آن در به تعویق اندازی نرم شدن در ضمن تمپر، کمتر از Si می‌باشد[۲ و ۱].

جدول (۱): ترکیب شیمیائی فولاد 30CrMnSi

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	Cu
۰/۳۵	۰/۹۵	۰/۸۴	۰/۰۰۸	۰/۰۰۴	۰/۸۸	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۰۳	۰/۰۱۸	۰/۰۷

عنصر Cr نیز می‌تواند مقاومت فولاد را در برابر نرم شدن در هنگام تمپر افزایش دهد[۲]. این عنصر که کاربیدزای قوی می‌باشد به دلیل تشکیل کاربید، حتی می‌تواند باعث افزایش سختی در حین تمپر (سختی ثانویه) نیز گردد[۱]. برای مقاومت در برابر نرم شدن مخصوصاً در دماهای تمپر بالاتر، حتی ۰/۵٪Cr نیز کافی است.

بنابراین فولاد 30CrMnSi که دارای ۱٪Cr به همراه عناصر Si، Mn می‌باشد، قاعدتاً باید افت سختی ناچیزی را در حین عملیات تمپر از خود نشان دهد.

چنانچه مشاهده می‌شود عناصر کاربیدزا در دماهای تمپر پایین نقش زیادی ندارند. عنصر Si چنانکه قبلاً هم اشاره شد به طور مؤثر و قابل ملاحظه‌ای، مقاومت به نرم‌شدن در حین تمپر را افزایش می‌دهد. مطالعات ریزساختاری نشان داده که علت این امر، جلوگیری از استحاله کاربید انتقالی به سمانتیت است[۲ و ۱].

عنصر Mn در دماهای پایین تمپر اثر ناچیزی بر مقاومت به نرم‌شدن دارد، اما در دماهای بالاتر، اثر آن تشدید می‌شود. دلیل این موضوع، مشارکت Mn درتشکیل کاربیدها در دماهای بالای تمپر می‌باشد. این عنصر دارای ضریب نفوذ کم بوده و بنابراین درشت شدن کاربید را به تعویق می‌اندازد[۲ و ۱].

وجود Cr در فولاد 30CrMnSi باعث تمایل به تردی آن در حین تمپر می‌گردد. حضور توأم عناصر Mn و Cr در فولاد نیز (در حد ۱/۲ـ۰/۹٪ موجود در فولاد 30CrMnSi)، قابلیت تردی تمپر را افزایش می‌دهد[۴]. گفته شده در صورتی‌که مقدار Mn در فولاد کمتر از ۰/۵٪ باشد فولاد نسبت به تردی حرارتی حساس نخواهد بود[۲].

با توجه به اثرات فوق، فولاد 30CrMnSi از قابلیت ترد شدن در حین عملیات تمپر برخوردار می‌باشد که برای حذف یا کاهش آن خصوصاً در قطعات بزرگ که در آنها سردکردن سریع پس از تمپر 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 بعضی استانداردهای معادل و مشابه فولاد 30CrMnSi، همین مطلب باشد[۵].

تردی حرارتی در محدوده دمائی ۵۷۵ °C ـ ۳۷۵ رخ می‌دهد. علاوه بر عناصر آلیاژی، ناخالصی‌ها نیز در بروز این نوع تردی نقش مؤثری دارند. در فولاد 30CrMnSi حضور عناصر آلیاژی Cr, Mn, Ni و Si، تجمع ناخالصی‌ها در مرزدانه‌های آستنیت را تقویت می‌کند. این تجمع به‌صورت نوار باریک و پیوسته در امتداد مرز دانه خواهد بود که باعث افت تافنس می‌گردد[۶].

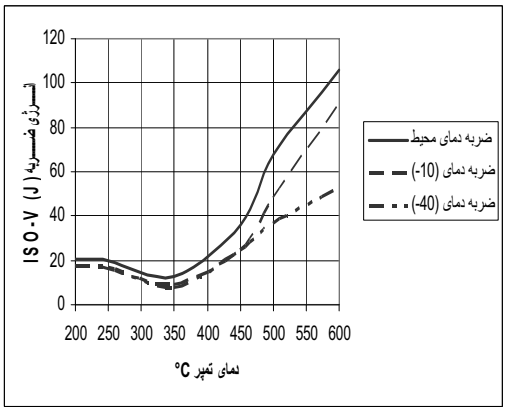
برای فولاد 30CrMnSi، با توجه به کاربرد آن خواص مکانیکی مطلوب (استحکام، انعطاف پذیری) زمانی حاصل می‌شود که سختی فولاد پس از کوینچ و تمپر حدود RC ۴۰ – ۳۰ باشد. محدوده دمای تمپر توصیه شده برای فولاد 30CrMnSi، ۵۰۰ – ۵۵۰ درجه سانتیگراد و دمای تمپر متداول آنها درجه سانتیگراد ۵۴۰ می‌باشد[۷].

۲- روش تحقیق

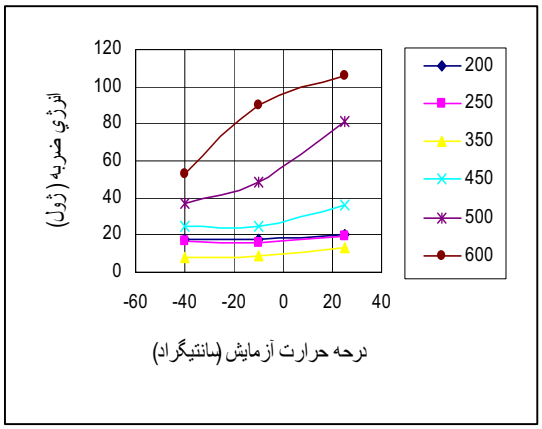
در این بخش تحقیق انجام شده در مورد موضوع آزمایش به اختصار گزارش شده‌است. ابتدا تعداد ۵۴ عدد نمونه ضربه مطابق استاندارد EN 10045 از فولاد 30CrMnSi با ترکیب شیمیائی مطابق جدول (1) استخراج گردید. نمونه‌ها به‌صورت طولی با شیار V -ISO شکل ساخته شدند.

جدول (۲): نتایج تست‌های ضربه و سختی

دمای تمپر(^{0}C)	سختی	انرژی ضربه در دمای محیط(j)	انرژی ضربه در دمای(۱۰-)(j)	انرژی ضربه در دمای (۴۰-)(j)
۲۰۰	۵۴	۲۰/۵	۱۷/۷	۱۷/۶
۲۵۰	۵۱	۱۹/۵	۱۶/۳	۱۷/۱
۳۵۰	۵۰	۱۳	۹/۲	۸/۱
۴۵۰	۴۳	۳۶/۱	۲۴/۹	۲۴/۵
۵۰۰	۳۷	۸۱/۴	۴۸/۲	۳۶/۹



شکل (۱): مقدار انرژی ضربه فولاد 30CrMnSi برحسب درجه حرارت تمپر در دماهای محیط و زیر صفر

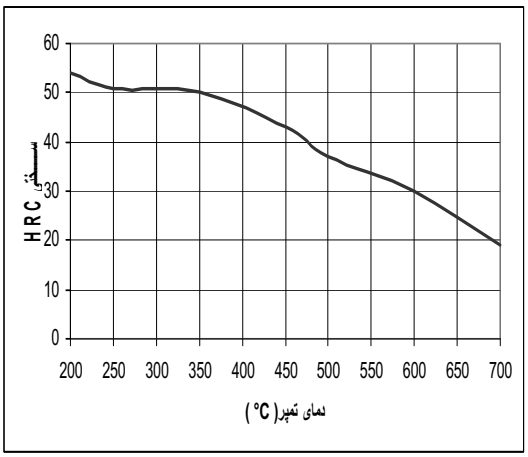


شکل (۲): مقدار انرژی ضربه فولاد بر حسب درجه حرارت آزمایش در دماهای مختلف تمپر (سانتیگراد)

تمام نمونه‌ها در دمای ۸۹۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت در کوره الکتریکی مجهز به اتمسفر محافظت شونده با گاز آرگن آستنیته شد و بلافاصله در محیط روغن با دمای حدود 40 درجه سانتیگراد کوئنچ گردید. نمونه‌ها به ۶ گروه ۹ تائی تقسیم گردید. گروه‌های شش‌گانه در دماهای مختلف شامل ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۵۰، ۴۵۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد به مدت ۳ ساعت تمپر گردیدند و آنگاه در هوا سرد شدند.

۳ عدد نمونه از هر گروه در دمای محیط، ۳ عدد در دمای ۴۰- و۳ عدد دیگر در دمای۱۰ - درجه سانتیگراد تحت آزمایش ضربه قرار گرفت. برای حصول دمای منفی ازمخلوط الکل و نیتروژن مایع استفاده شد. به این صورت که بعد از اضافه کردن الکل به نیتروژن مایع، دمای مخلوط حدود ۴۰- یا ۱۰- درجه سانتیگراد ثابت بماند. پس از تثبیت دما در ۴۰- یا ۱۰- درجه سانتیگراد نمونه‌ها به داخل محلول وارد شدند و به مدت 8 دقیقه در آن محلول مانده و سریعاً به دستگاه تست ضربه منتقل شدند و تست ضربه انجام گرفت.

از هر ۶ گروه یک عدد نمونه پس از سمباده‌زنی با روش راکول سی سختی‌سنجی گردید. به منظور تعیین ریز ساختار نمونه‌ها و بررسی‌های متالوگرافی از هر گروه یک عدد نمونه (جمعاً ۶ 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.



شکل (۳): میزان سختی فولاد 30CrMnSi بر حسب دمای تمپر

شکل (۴): تصویر متالوگرافی فولاد 30CrMnSi در حالت سخت‌کاری و تمپر شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد (بزرگنمایی ۵۰۰X)

۳- نتایج و مباحث

در این بخش ابتدا نتایج آزمایش‌های انجام شده به‌صورت جدول و نمودار ارائه و سپس مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. متوسط نتایج تست ضربه در دماهای محیط و زیر صفر(۴۰- و ۱۰- درجه سانتیگراد) برای هر ۶ گروه در جدول (۲) ارائه شده‌است. منحنی انرژی ضربه برحسب دمای تمپر در شکل (۱) ترسیم شده‌است. همچنین نمودار انرژی ضربه برحسب درجه حرارت آزمایش در شکل (۲) آمده است.

در این نمودار شکل (۱) مشاهده می‌شود با افزایش درجه حرارت تمپر تغییرات انرژی ضربه نرمال نیست. به عبارت دیگر در یک محدوده‌ای انرژی ضربه هم در دمای محیط و هم در دماهای زیر صفر کاهش یافته است. در شکل (۲) ملاحظه می‌شود منحنی انرژی ضربه مربوط به درجه حرارت تمپر ۳۵۰ درجه سانتیگراد زیر منحنی انرژی ضربه مربوط به سایر درجه حرارت‌های تمپر و حتی دماهای تمپر ۲۰۰ و۲۵۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد.

متوسط نتایج تست‌سختی برای هر ۶ گروه نیز در جدول (۲) ارائه شده‌است. در این جدول دیده می‌شود سختی کاملاً وابسته به دمای تمپر است. منحنی سختی برحسب دمای تمپر در شکل (۳) ترسیم شده‌است. ریزساختار میکروسکوپی در تمام نمونه‌ها مارتنزیت تمپر شده‌است، اما با افزایش دمای تمپر مورفولوژی ریزساختار مارتنزیت تمپر شده خشن‌تر شده‌است. در شکل (۴) ساختار میکروسکپی یکی از نمونه‌ها (نمونه‌ای که در درجه حرارت ۴۵۰ درجه سانتیگراد تمپر شده‌است) برای نمونه آورده شده‌است.

در شکل (۱) مشاهده می‌شود انرژی ضربه در هر سه درجه حرارت اندازه‌گیری شده تا دمای تمپر ۳۵۰°C کاهش و سپس افزایش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که این فولاد به تردی تمپر درمحدوده دمایی۴۵۰°C - ۲۵۰ حساس است. شکل (۲) به‌طور مشخص تردی در دمای تمپر ۳۵۰°C را نشان می‌دهد. وجود عناصر آلیاژی کرم و منگنز در فولاد 30CrMnSi، قابلیت تردی تمپر را افزایش داده‌است[۴]. بعضی از تئوری‌ها کاهش انرژی ضربه یا چقرمگی ضربه را عمدتاً ناشی از تشکیل یک فاز ثانویه نظیر فسفیدها و یا افزایش غلظت ناخالصی‌ها به‌صورت نوار باریک و پیوسته‌ای در مرزدانه‌های آستنیت اولیه می‌دانند[۸]. وجود مولیبدن به مقدار کم و نزدیک ۰/۳ درصد می‌تواند از تردی تمپر جلوگیری کند اما چون مقدارآن در فولاد مورد

آزمایش بسیار کم بوده‌است (۰/۰۲ درصد) لذا از وقوع تردی ممانعت نکرده است.

در شکل (۳) ملاحظه می‌شود که با افزایش درجه حرارت تمپر سختی به‌تدریج کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر مستعد گرفتن سختی ثانویه نمی‌باشد.

در حقیقت با افزایش درجه حرارت تمپر، مورفولوژی مارتنزیت تمپر شده خشن‌تر شده و ساختار به حالت تعادلی (ساختار آنیل شده) نزدیک‌تر می‌شود بنابراین سختی کاهش و انرژی ضربه به شدت افزایش می‌یابد.

ساختار میکروسکوپی نمونه‌ای که پس از سخت‌کاری در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد تمپر شده‌است در شکل (۴) نشان داده شده‌است. در این تصویر ریزساختار مارتنزیت تمپر شده همراه با آستنیت باقیمانده دیده می‌شود.

٤- نتیجه‌گیری

۱-فولادSi30CrMn مستعد تردی تمپر حرارتی است و محدوده دمائی تردی حرارتی در این فولاد ۲۵۰ تا ۴۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.

۲-با افزایش درجه حرارت تمپر انرژی ضربه افزایش و سختی کاهش می‌یابد.این فولاد سختی ثانویه نمی‌گیرد.

۳-با افزایش درجه حرارت آزمایش ضربه، انرژی ضربه دماهای تمپر بالاتر با شدت زیادتری افزایش می‌یابد.

۴-در درجه حرارت‌های تمپر بالاتر (سختی کمتر) اختلاف میزان انرژی ضربه در دماهای محیط و زیر صفر زیادتر می‌شود، درحالیکه در درجه حرارت‌های تمپر پایین‌تر (سختی زیادتر) اختلاف مذکور بسیارکم شده و تقریباً قابل اغماض است.

٥- مراجع

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

[۲] محمـدعلی گلـعذار. "اصـول وکاربرد 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, 91-99, 1978.

[7] GOST 4543-71 Standard

[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.