

تأثیر عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و رفتار سایشی فولاد کربنی 65Mn

امیرعباس مجاهدی، سید عبدالکریم سجادی، فاطمه سادات سیدان*

گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده:

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی از جمله رفتار سایشی فولاد کربنی 65Mn می‌باشد. پنج سیکل متفاوت عملیات حرارتی شامل نرماله، آستنیت و کوئنچ – تمپر طراحی و تأثیر دمای آستنیت و زمان تمپر بر استحکام کششی، چقرمگی، سختی و مقاومت به سایش نمونه‌های عملیات حرارتی شده بررسی شد. از آزمون پراش پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنجی انرژی پرتو ایکس به ترتیب به منظور فازبندی نمونه‌های عملیات حرارتی شده و مطالعه مورفولوژی سطح نمونه‌ها پس از آزمون سایش پین روی دیسک استفاده شد. مجموعه نتایج نشان داد بهترین خواص مکانیکی شامل سختی ۷۲۳ ویکرز، استحکام کششی ۱۰۶۲ مگاپاسکال، چقرمگی تقریبی ۱۴/۷ ژول بر سانتی‌متر مربع و کاهش وزن ۰/۰۰۱ گرم پس از سیکل عملیات حرارتی نرماله کردن در دمای ۸۵۰ °C به مدت ۳۰ دقیقه، آستنیت در دمای ۷۸۰ °C به مدت ۳۰ دقیقه، سرد کردن سریع در روغن و سپس تمپر در دمای ۲۰۰ °C به مدت ۶۰ دقیقه حاصل شد. این نتایج به دلیل دست یافتن به ساختار مارتنزیتی همراه با رگه‌های فریتی بوده که دارای کمترین اندازه دانه آستنیت اولیه در بین دماهای مختلف آستنیت بوده.

واژه‌های کلیدی: فولاد کربنی 65Mn، استحکام کششی، سختی، چقرمگی، سایش.

*Corresponding author. Tel.: +98 (51) 3880-5106; Fax: +98 (51) 3880-7182.

E-mail address: sayyedana@um.ac.ir (F.S. Sayyedana).

مقدمه:

فولاد، فلزی مصرفی در بسیاری از صنایع به‌شمار می‌رود و طبیعی است که قطعات فولادی در معرض تماس و در نتیجه ساییده شدن قرار می‌گیرند. از این رو باید از فولادهایی بهره برد که دارای ترکیب شیمیایی باشند که با انجام عملیات حرارتی مناسب به خواص مکانیکی مدنظر از جمله سختی، استحکام، مقاومت به سایش و چقرمگی دست پیدا کنند [۱].

فولاد فنر 65Mn یک ماده با استحکام، سختی و مقاومت به سایش بالا است که می‌تواند در عرصه‌های گوناگون نقش آفرینی کند. این فولاد شامل 0/65 کربن، 0/96 درصد منگنز و 0/21 درصد سیلیسیم است که به علت داشتن درصد بالایی از منگنز، چنین خواصی از سختی و مقاومت سایش از آن دور از انتظار نیست. از آنجا که منگنز از طریق تشکیل کاربیدها، ساختارهای سخت‌تر و استحکام بخشی از طریق محلول جامد می‌تواند باعث افزایش سختی شود، در فولاد 65Mn نیز با وجود درصد منگنز بالا، سختی و سایش فوق‌العاده بهتری نسبت به فولاد ساده کربنی حاصل می‌شود [۲].

از جمله قسمت‌هایی که از فولاد فنر 65Mn بهره برده می‌شود می‌توان به فنرهای ساعت و فنر سیم‌پیچ‌های سخت اشاره نمود [۳]. از فولاد 65Mn به علت چقرمگی بالا و مقاومت سایشی خوب در صنعت خودروسازی می‌توان به عنوان بولبرینگ، فنرهای میل سوپاپ، فنرهای کلاچ و فنر ترمز بهره برد [۴]. از آنجایی که می‌توان این فولاد را به راحتی شکل داد و پردازش کرد، بسته به نیازهای خاص کاربردی، می‌تواند تحت عملیات نورد گرم یا نورد سرد قرار گیرد و به همین دلیل است که ورقه‌ها و رول‌های فولاد 65Mn دارای معروفیت خاصی هستند [۵]. از دلایل کاربرد زیاد این فولاد می‌توان به قابلیت جوشکاری خوب، قابلیت عملیات حرارتی کوئنچ - تمپر، سختی جوش خوب و تمایل کم به حذف کربن و قابلیت برش خوب اشاره نمود. در بهره جستن از قابلیت‌های فولاد 65Mn نمی‌توان از قابلیت کار آن در سیستم تعلیق تراکتور و تجهیزات آن صرف نظر کرد [۶].

فولاد 65Mn علاوه بر استفاده در ساخت محصولات فنری به عنوان ابزار که در شرایط تنش متناوب زیاد، بار سنگین و سایش شدید کار می‌کند نیز می‌تواند ایفای نقش نماید، مانند تیغه‌های برش و دوار [۷]. همچنین به استفاده از این فولاد در ادوات کشاورزی و ابزارهای دستی و ساخت کلاچ‌های اصطکاکی و ترمز ماشین‌آلات مهندسی بزرگ مانند لودر و جرثقیل‌ها می‌توان اشاره نمود [۶]. Dalai و همکاران [۸] گزارش کردند که فولادهای دارای منگنز متوسط را می‌توان در مکان‌هایی که تحت سایش زیاد هستند مانند ریل‌های قطار به کار برد. Ge و همکاران [۲] به این نتیجه رسیدند که وزن کاهش یافته در اثر سایش در فولاد آستنیتی منگنز متوسط اصلاح شده (MMAS) در مقایسه با فولاد مارتنزیتی حدود ۳۰ درصد کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده مقاومت سایشی بالاتر فولاد آستنیتی منگنز متوسط نسبت به فولاد مارتنزیتی است.

جهت دستیابی به خواص مطلوب لازم است توسط عملیات حرارتی ریزساختاری را ایجاد نمود که دارای خواص مذکور باشد و بهترین ریزساختاری که همزمان از سختی و استحکام و چقرمگی بالا برخوردار باشد، ساختاری دو فازی شامل مارتنزیت و فريت است [۹]. طی دو دهه اخیر، پژوهشگران متعددی به بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر بهبود خواص مکانیکی فولاد 65Mn پرداختند. به عنوان مثال، Li و همکاران [۱]، تاثیر عملیات حرارتی کوئنچ تمپر را بر سختی و استحکام کششی فولاد 65Mn بررسی نموده و نتیجه گرفتند سیکل بهینه عملیات حرارتی شامل آستنیت کردن در دمای °C ۷۸۰ و سپس تمپر در دمای °C ۲۰۰ باعث بدست آمدن سختی ۶۱/۱ HVC و استحکام کششی به میزان ۱۱۹۷/۹ MPa شد.

در پژوهش حاضر، جهت دستیابی به خواص مکانیکی مناسب فولاد 65Mn، ۱۲ سیکل متفاوت عملیات حرارتی شامل نرماله، آستنیت و کوئنچ - تمپر در دما و زمان‌های مختلف طراحی و انجام شد. سختی، استحکام کششی و مقاومت به سایش نمونه‌های عملیات حرارتی شده اندازه‌گیری و با یکدیگر مقایسه شد و در نهایت، سیکل بهینه عملیات حرارتی شامل زمان بهینه تمپر و دمای بهینه آستنیت جهت دستیابی به حداکثر میزان سختی و استحکام، چقرمگی و مقاومت در برابر سایش معرفی شد.

مواد و روش تحقیق:

به منظور حصول ریزساختار یکنواخت شامل پرلیت ظریف، عملیات حرارتی نرماله روی نمونه‌های فولاد کربنی 65Mn با ابعاد ۱۰×۱۰×۳ میلی‌متر مکعب با ترکیب شیمیایی حاوی ۰/۶۵ درصد وزنی کربن، ۰/۹۶ درصد وزنی منگنز، ۰/۲۱ درصد وزنی سیلیسیم، ۰/۰۴ درصد وزنی کروم، ۰/۰۳ درصد وزنی نیکل و ۰/۰۲۱ درصد وزنی فسفر انجام شد. در ادامه، عملیات آستنیت کردن در بازه دمایی ۷۸۰ تا °C ۸۵۰ به مدت ۳۰ دقیقه انجام و بلافاصله در روغن کوئنچ شد تا فاز مارتنزیت حاصل شود. به منظور اجتناب از تردی و شکنندگی و حصول چقرمگی مناسب، نمونه‌ها در دمای °C ۲۰۰ به مدت زمان‌های ۱ ساعت، ۳ ساعت و ۶ ساعت تمپر شدند تا تاثیر زمان تمپر بر ریزساختار و خواص مکانیکی مشخص شود. سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی روی فولاد 65Mn در جدول ۱ ارائه شده است.

از آنجایی که خواص منحصر به فرد مکانیکی ارتباط معناداری با اندازه دانه آستنیت اولیه دارد، به منظور تخمین اندازه دانه‌ها و آشکار شدن مرزدانه‌های آستنیت اولیه، آنیل در دمای آستنیت انجام شد. ابتدا نرماله در دمای °C ۸۵۰ به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد. سپس نمونه‌ها در دماهای ۷۸۰، ۸۰۰ و °C ۸۳۰ به مدت ۳۰ دقیقه در کوره آنیل شده و سپس در هوا سرد شدند. دلیل دماهای آنیل گفته

شده این بود که در پنج سیکل گفته شده تنها سه دمای آستنیته داشتیم. نمونه‌ها متالوگرافی شده و پس از عکس‌برداری از ریزساختار، با استفاده از نرم افزار ImageJ، اندازه دانه‌های آستنیته اولیه اندازه‌گیری شد.

جدول ۱- سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی اعمال شده روی فولاد کربنی 65Mn

سیکل	نرماله		آستنیته		کوئنچ	تمپر	
	دمای (°C)	زمان (دقیقه)	دمای (°C)	زمان (دقیقه)		دمای (ساعت)	زمان (ساعت)
M1	۸۵۰	۳۰	۸۳۰	۳۰	روغن	۲۰۰	۶
M3	۸۵۰	۳۰	۷۸۰	۳۰	روغن	۲۰۰	۱
M5	۸۵۰	۳۰	۸۰۰	۳۰	روغن	۲۰۰	۱
M6	۸۵۰	۳۰	۸۳۰	۳۰	روغن	۲۰۰	۱
M9	۸۵۰	۳۰	۸۳۰	۳۰	روغن	-	-

پس از عملیات حرارتی، به منظور مشاهده ریزساختار نمونه‌ها، مراحل آماده‌سازی متالوگرافی آنها انجام شد. برای صیقلی کردن نمونه‌ها با کاغذ سنباده شماره ۶۰ تا ۲۰۰۰ سنباده‌زنی شده و سپس توسط ذرات اکسید آلومینیم پولیش شد. در ادامه، نمونه‌ها با اتانول شستشو شده و در محلول اچانت نایتال ۲ درصد به مدت زمان ۱۰ ثانیه اچ شدند. ریزساختارهای حاصله به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (MIRA3, Czech Republic, TESCAN) مورد مطالعه قرار گرفت.

سختی سنجی به کمک دستگاه سختی سنج ویکرز (COOPA-VH1, Iran) با بار ۳۰ کیلوگرم و زمان توقف ۱۰ ثانیه انجام شد. سختی سنجی در شش نقطه مختلف از سطح نمونه انجام و نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف از معیار گزارش شد. آزمون کشش تک محوری به کمک دستگاه (Zwick-Z250, Germany) با نرخ 0.02 s^{-1} بر روی نمونه M9 (بدون تمپر)، نمونه‌های M1 و M6 (برای بررسی تاثیر زمان تمپر) و نمونه‌های M3 و M5 و M6 (برای بررسی تاثیر دمای آستنیته) انجام شد. در هر سیکل ۳ نمونه تحت آزمون کشش قرار گرفت و نتایج به صورت میانگین $\pm$ انحراف از معیار گزارش شد.

نمونه‌های M9-M6-M5-M3-M1 به صورت دیسکی شکل به قطر ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر تهیه و تحت آزمون سایش پین روی دیسک (TSN-WTC03) مطابق با استاندارد ASTM G99 با بار ۵۰ نیوتون، مسافت لغزش ۵۰۰ متر و سرعت چرخش دیسک ۵۰۰ دور بر دقیقه قرار گرفت. وزن نمونه‌ها قبل و پس از آزمون سایش به کمک ترازوی ۴ رقم اعشار (DLS-100-6)

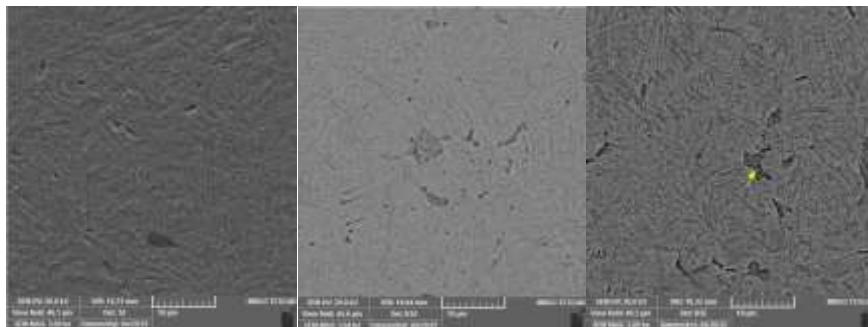
اندازه‌گیری و ثبت شد. تغییرات ضریب اصطکاک نمونه‌ها حین آزمون سایش ثبت شد. همچنین موفولوژی سطح نمونه‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور مطالعه مکانیزم سایش بررسی شد.

بحث و نتایج:

برای مشاهده اثر دمای آستنیت‌زدن و زمان تمپر کردن روی سختی، مقاومت سایشی و خواص مکانیکی، ۵ سری نمونه (M9، M6، M5، M3، M1) انتخاب شد که مشخصات آنها در جدول ۱ آورده شده است.

ریز ساختار

هدف این تحقیق این است که می‌خواهد سیکل‌های عملیات حرارتی نرماله، آستنیت‌زدن، کوئنچ و تمپر را بر روی فولاد 65Mn انجام دهد و سیکلی که بهترین خواص مکانیکی و سایشی را به وجود می‌آورد را پیدا کند. نحوه انجام این سیکل‌ها اعم از دما و زمان نگهداری و محیط کوئنچ کاملاً در بخش مواد و روش تحقیق و در جدول ۱ آورده شده است. برای شروع بررسی تاثیر عوامل موثر در ابتدا باید به ریزساختار نمونه‌ها پرداخت. به همین خاطر ابتدا ریزساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری و سپس با SEM بررسی شدند. با توجه به بررسی‌های سایر محققین از جمله Li و Hu و Wange [9] که روی فولاد 65Mn کار کردند آنها ریزساختار مارتنزیتی را گزارش دادند. در این مقاله نیز با بررسی ریزساختار همین نتیجه به دست آمد. با دقت به شکل ۱- این ریزساختار، واضح و روشن است. در این تصویر که توسط میکروسکوپ الکترونی گرفته شده تیغچه‌های مارتنزیتی کاملاً مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد که این ریزساختار دارای سختی و استحکام بالاتری باشد که در ادامه با انجام تست‌های کشش، سختی و سایش به این موضوعات پرداخته خواهد شد.



شکل ۱- تصویر SEM از ساختار نمونه M3 (تصویر سمت چپ)، M5 (تصویر وسط)، M6 (تصویر سمت راست).

تست سختی

Li and Hu و همکاران [7] گزارش دادند که ریزساختار فولاد 65Mn ترکیبی از مارتنزیت و نوارهای فریتی می‌باشد که بیشترین سختی و بهترین نتایج چقرمگی از نمونه‌های آستنیت شده در دمای 780°C حاصل شد. با فراتر رفتن دما از 780°C ، اندازه دانه آستنیت افزایش یافته که حاصل آن مارتنزیت درشت با سختی و چقرمگی کمتر است. این نتیجه نیز در داده‌های این مقاله (جدول-۲) قابل دیدن است. فولاد 65Mn بیشترین سختی را در سیکل عملیات حرارتی M3 که در دمای 780°C آستنیت شده بود داشت. Li and Hu and Wange و همکاران [1] در مقاله‌ای دیگر، دلایل اندازه دانه نمونه‌های فولادی در دمای آستنیت 780°C و تمپر در دمای 200°C به مدت ۶۰ دقیقه را عوامل زیر بیان کردند: ۱- رشد دانه‌های آستنیت عمدتاً از طریق مهاجرت مرزدانه‌ای صورت می‌گیرد، ۲- فریت مانع از حرکت مرزی جهت تبلور و در نتیجه مهار رشد دانه آستنیت است و ۳- به علت اینکه دمای پایین کوئنچ برای نفوذ اتمی مناسب نیست بنابراین مهاجرت مرزی کند است.

اندازه دانه‌های آستنیت اولیه با بالاتر رفتن دما رشد بیشتری پیدا می‌کنند و نسبت به دماهای آستنیت اولیه دارای اندازه بیشتری هستند، این مطلب در اکثر کتب متالورژی آورده شده است که با درشت شدن دانه آستنیت اولیه سختی کاهش پیدا می‌کند.

وقتی به نتایج جدول-۲ دقت شود مشخص می‌شود در بین پنج نمونه، نمونه M9 دارای سختی بیشتری از نمونه M3 می‌باشد، از سیکل‌های عملیات حرارتی آن پیدا است که بر روی این نمونه عملیات تمپر صورت نگرفته است، بنابراین دلیل سختی و تردی بالای این نمونه انجام نشدن عملیات تمپر می‌باشد، با مقایسه نمونه M3 و M9 تاثیر تمپر بر روی فولادها مشخص می‌شود، به همین علت در صنعت هیچگاه نمونه‌های فولادی مارتنزیتی را بدون انجام یک یا دو مرحله تمپر مورد استفاده قرار نمی‌دهند.

Commented [f1]: مقاله را بازبینی کنید. منظور از چقرمگی چه بوده؟ مقاومت در برابر ضربه؟ انتظار می‌رود با افزایش اندازه دانه، مقاومت به ضربه افزایش یابد. در حالی که شما خلاف این مطلب را گزارش کرده اید.

Commented [f2]: فقط فامیل نویسنده اول را ذکر کنید

Commented [f3]: دلایل اندازه دانه یعنی چی؟ رشد دانه؟

Commented [f4]: این مطلب را از مقاله برای من در ایتا کپی کنید تا ترجمه درست را بیاورم.

جدول ۲: نتایج بدست آمده از سختی سنجی ویکرز

	1	2	3	4	5	6	AVERAGE
M1	۶۳۷	۶۴۱	۶۵۹	۶۲۱	۶۶۳	۶۵۰	۶۴۵
M3	۷۰۵	۷۴۰	۷۲۵	۷۱۰	۷۲۵	۷۳۵	۷۲۳
M5	۵۹۰	۶۸۶	۶۵۹	۷۲۵	۷۲۵	۶۸۱	۶۷۸
M6	۶۵۹	۷۲۰	۷۳۵	۷۴۶	۷۲۵	۶۶۳	۷۰۸
M9	۸۲۸	۷۹۰	۸۵۸	۸۶۵			۸۳۵

تست کشش

با مشاهده نتایج تست کشش در شکل ۲ و جدول ۳- مشخص می‌شود که بیشترین چقرمگی و استحکام شکست در دمای 780°C رخ می‌دهد. همچنین Wang و همکاران [9] در مورد فولاد 65Mn گزارش دادند که ریزترین اندازه دانه در دمای آستنیتیزه کردن 780°C به دست می‌آید. دلیل آن را هم وجود اثر سنجاقی می‌دانند که در این اثر مرزدانه‌های آستنیت اولیه به کاربیدهای باقیمانده متصل می‌شوند که این اثر در دماهای بالاتر از دمای 780°C به علت حل شدن کاربیدها کاهش و از بین می‌رود.

این اثر را حتی می‌توان با میکروسکوپ‌های نوری نیز مشاهده کرد. در نمونه M3 یکسری رگه‌هایی در سطح نمونه مشاهده می‌شود که با میکروسکوپ نوری واضح نبود به چه شکلی هستند. برای اطمینان بیشتر از تصویر برداری با SEM استفاده شد (شکل ۳-). همانطور که در شکل ۳- مشاهده می‌شود، در این تصویر بر روی یکی از این رگه‌ها با بزرگنمایی بیشتری نسبت به میکروسکوپ نوری فوکوس و مشخص شد که این فاز متفاوت از زمینه مارتنزیتی است که در اثر آماده‌سازی نمونه از جای خود کنده شده و سپس در اثر اچ کردن خورده و تغییر رنگ داده و به صورت حفره در آمده است. از آنجا که عناصر کاربیدزای زیادی غیر از خود کربن در ترکیب شیمیایی فولاد 65Mn وجود ندارد باعث شده که احتمال داده شود این حفرات جای کنده شده سمیتیت هستند که در طول آماده‌سازی نمونه‌ها از سر جای خودشان کنده شده اند.

همچنین Wange و همکاران [9] گزارش دادند که مرزها به دلیل اثر سنجاقی، درشت شدن دانه آستنیتی را به تاخیر می‌اندازند. بنابراین ریزترین دانه‌ها هنگام آستنیتیزه شدن در دمای 780°C به دست می‌آید، اما دانه‌های آستنیتیزه با دمای بالا به دلیل بالا رفتن دما اثر سنجاقی از بین رفته است و دانه‌ها آستنیت به مرور رشد می‌کنند. از آنجایی که اندازه و مقدار کاربیدهای حل نشده تأثیر زیادی بر شکل پذیری دارند، در نمونه‌های آستنیتیزه شده در دمای 780°C که دارای رگه‌های بیشتری از فریت نسبت به دمای 780°C

۸۰۰ می‌باشد، دارای چقرمگی و انعطاف پذیری بیشتری هستند. با توجه به جدول ۳- متوجه مشخص است که نمونه M3 دارای چقرمگی و انعطاف‌پذیری کمی نسبت به نمونه M5 می‌باشد. با دقت به نتایج این مقاله و نتایج سایر محققان به این نتیجه می‌رسیم که کاربیدها منجر به ایجاد اثر سنجاقی می‌شوند که در ادامه اثر ریزدانه‌گی به وجود می‌آید. این کاربیدها علاوه بر ایجاد ریزدانه‌گی به علت اینکه دارای سختی و تردی می‌باشند، عامل کاهش انعطاف‌پذیری و کمی چقرمگی نیز می‌باشند.

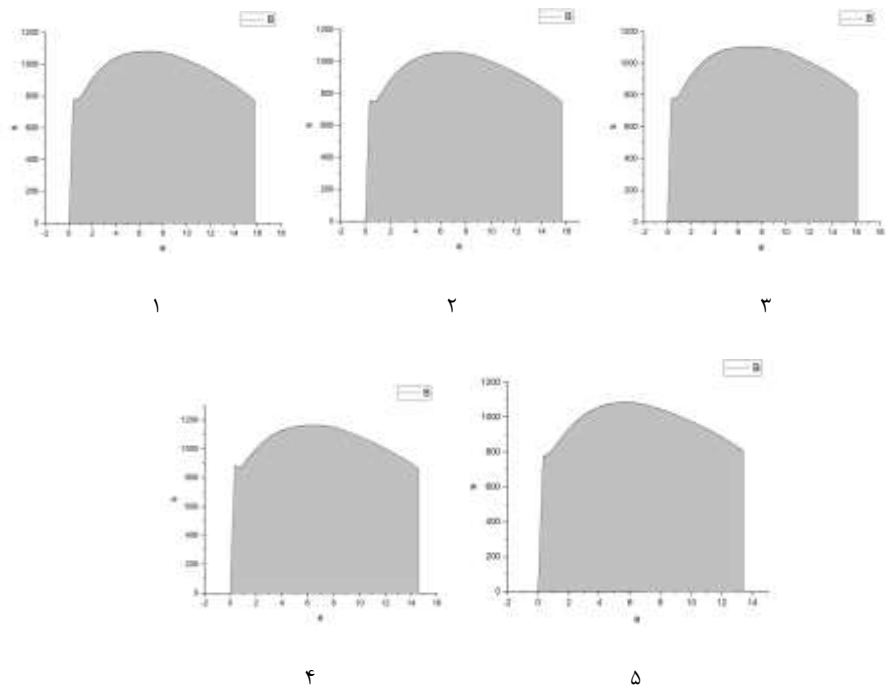
با توجه به داده‌های تست کشش به همراه سختی‌سنجی یکسری نتایج به دست می‌آید که عبارتند از :

۱- تاثیر و قدرت ریزدانه‌گی بسیار بیشتر از تاثیر تردی و سختی کاربیدها بر روی خواص مکانیکی از جمله چقرمگی و انعطاف‌پذیری است .

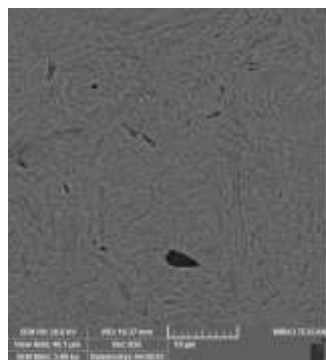
۲- با دقت در سختی‌های نمونه M5 به این موضوع دست می‌یابیم که این نمونه دارای ترکیب یکسان و یکنواختی نیست زیرا دارای پراکندگی زیادی در داده‌های سختی‌سنجی هست. به همین علت می‌توان نتیجه گرفت که بعد از دمای آستنیت‌ه کردن 780°C کاربیدها شروع به بوجود آوردن محلول جامد هستند که باعث غیریکنواختی شدن نمونه می‌شود.

جدول- ۳ : نتایج بدست آمده از انجام تست کشش

انعطاف پذیری	چقرمگی J/CM^2	تنش شکست	استحکام کششی	تنش تسلیم	نمونه‌ها	سیکل‌ها
۱۵.۶	۱۵/۱	۷۷۸	۱۰۸۴	۷۷۷.۸۹	A	M1
۸.۴	۸/۲	۹۲۷	۱۰۹۴	۷۵۲.۱۵	B	
۱۵.۵	۱۴/۷	۷۵۳	۱۰۶۲	۷۵۴.۲۷	A	M3
۱۵.۷	۱۴/۷	۷۴۳	۱۰۵۳	۷۳۸.۱۱	B	
۱۶	۱۵/۹	۸۲۰	۱۱۰۷	۷۷۴.۷۷	A	M5
۱۵.۳	۱۵/۲	۸۲۲	۱۱۰۷	۷۶۹.۲۹	B	
۱۴.۲۵	۱۴	۸۱۷	۱۱۰۰	۷۹۰.۴۶	A	M6
۱۲.۷	۱۲/۶	۸۶۰	۱۱۰۵	۷۷۱.۶۷	B	
					A	M9
۱۳.۳	۱۲/۹	۸۱۱	۱۰۸۷	۷۷۸.۵۸	B	



شکل ۲- نمودار تنش - کرنش نمونه‌های M1 و M3 و M5 و M6 و M9 که به ترتیب نمودارهای ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ می‌باشد.



شکل ۳- تصویر SEM از نمونه M3. این تصویر نشان‌دهنده حفره‌ای بزرگ در زمینه ماتریزیت تمپر شده.

تست سایش

با توجه به مطالب ذکرشده در بخش مواد و روش تحقیق، پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، تست سایش در مسافت ۵۰۰ متر انجام شد. نتایج تست سایش که در جدول ۴ آمده است مشخص می‌کند که نمونه M3 بیشترین مقاومت به سایش را از خود نشان داده است. Jha and Prasad و همکاران [10] گزارش دادند که رفتار سایش نمونه‌ها به شدت به شرایط عملیات حرارتی بستگی دارد و بهترین عملکرد در سایش در یک بازه سختی مشخصی به دست می‌آید. سختی کمتر از حد مطلوب منجر به نرخ سایش بالاتر به دلیل نرم شدن زیادی نمونه‌ها و سختی بزرگتر از سختی بحرانی باعث عملکرد سایش پایین به دلیل ترد شدن و شکننده شدن مواد می‌شود. همچنین Chenje و همکاران [11] دریافتند که مقاومت به سایش و سختی را می‌توان با عملیات حرارتی بهبود بخشید. با مقایسه بین نمونه‌های M6 و M9 به وضوح تاثیر عملیات حرارتی تمپر مشخص و مبین است. همچنین با مقایسه بین M6 و M1 تاثیر زمان تمپر روی مقاومت سایشی را می‌توان مشاهده نمود.

Enayati و Sayyedan [13] نیز ارائه دادند که سختی در یک بازه زمانی مشخص در یک دمای تمپر، مقاومت به سایش را افزایش می‌دهد ولی بعد از مدتی به علت ایجاد تردی زیاد باعث سایش بیشتر می‌شود. Xu و همکارانش [12] گزارش دادند که ریزدانه کردن روشی موثر برای افزایش استحکام تسلیم بدون آسیب رساندن به شکل‌پذیری است، بنابراین ریزدانه کردن را می‌توان به عنوان یک راه حل موثر برای بهبود مقاومت در برابر سایش انتظار داشت. تعدادی از مطالعات نشان دادند که با کاهش اندازه دانه مقاومت به سایش بطور مداوم افزایش می‌یابد. از آن جا که بهترین اندازه دانه طبق گزارش Wange و همکاران [9] در آستنیتنه کردن در دمای 780°C می‌باشد، داده‌های تحقیق ما نیز همین را تایید می‌کند، پس می‌توان گفت که دمای آستنیتنه یکی از عوامل موثر بر مقاومت به سایش می‌باشد.

Jha and Prasad [10] در تجزیه و مشاهداتشان نشان دادند که سختی رابطه مستقیمی با خواص مکانیکی مانند استحکام کششی و انعطاف‌پذیری فولاد دارد. اما تا آنجا که به مقاومت در برابر سایش مربوط می‌شود در این مورد صادق نیست. از آنجا که ساختار فولاد مورد در این تحقیق یک ساختار مارتنزیتی می‌باشد، دارای سختی بیشتری نسبت به دیگر ریزساختارها از جمله پرلیت و فریت و ... است. در تحقیق Jha and Prasad گفته شده است که ذرات سخت می‌توانند بار را به اشتراک بگذارند و در برابر عملکرد مخرب ذرات ساینده بطور موثری نسبت به ذراتی که در یک زمینه نرم‌تر قرار دارند مقاومت کنند. مارتنزیت، سختی نمونه‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند اما در عین حال در صورت وجود مقادیر زیاد تمایل به ترد شدن نمونه دارد و این منجر به نرخ سایش بالاتر می‌شود.

Xu و همکاران [12] گزارش دادند مشاهدات تجربی نشان می‌دهد سختی بالای مارتنزیت در فولادهایی با سختی نسبی کمتر اما با شکل‌پذیری بهتر مقاومت سایشی بالا را تضمین می‌کند. ماهیت شکننده بودن مارتنزیت اغلب منجر به ماشین کاری نامطلوب و سایر خواص پایین‌تر در هنگام استفاده می‌شود. با بررسی روند سختی و کاهش وزن در این پژوهش مشخص می‌شود که سختی عامل اصلی و تعیین‌کننده در مقاومت سایشی نمی‌باشد و برای اینکه بالاترین مقاومت به سایش و کمترین کاهش وزن را داشته باشیم باید همراه با سختی بالا، خواص مکانیکی مطلوبی از جمله چقرمگی و انعطاف‌پذیری و استحکام را هم داشته باشیم.

جدول - ۴ : نتایج تست سایش

شماره نمونه	وزن اولیه نمونه (گرم)	وزن نهایی نمونه (گرم)	کاهش وزن نمونه (گرم)
1W-70N	۵۹/۲۹۳۷	۵۹/۲۸۰۶	۰/۰۰۳۱
3W-70N	۵۵/۵۱۷۱	۵۵/۵۱۶۱	۰/۰۰۱۰
5W-70N	۵۹/۱۰۹۹	۵۹/۱۰۸۷	۰/۰۰۱۲
6W-70N	۵۹/۷۳۰۰	۵۹/۷۲۷۸	۰/۰۰۲۲
9W-70N	۵۹/۵۶۶۷	۵۹/۵۵۵۳	۰/۰۰۱۴

نتیجه گیری

در این مقاله با انجام سیکل‌های مختلف عملیات حرارتی مانند نرماله کردن، آستنیت و کوئنچ و تمپر بر روی فولاد 65Mn برای دستیابی به بهترین خواص بررسی‌هایی صورت گرفت که نتایج زیر به دست آمد:

۱. با آستنیت کردن در دمای °C ۷۸۰ کمترین اندازه دانه نسبت به دیگر دماهای آستنیت به دست آمد که در ادامه با ایجاد ریزدانه‌گی با بهره‌مندی از اثر سنجاقی، بالاترین میزان سختی در این دما به دست آمد.
۲. در این پژوهش مشخص شد که سختی با مقاومت به سایش همواره رابطه مستقیم ندارد و بعد از بازه سختی مشخصی، کاهش وزن بیشتری نسبت به افزایش سختی خواهیم داشت.
۳. اگر سختی همراه با چقرمگی، انعطاف‌پذیری و استحکام مناسب باشد دارای بیشترین مقاومت به سختی خواهد بود.
۴. با انجام سیکل‌های گوناگون عملیات حرارتی بر روی فولاد 65Mn، موضوع تاثیر زمان تمپر بر روی سختی و مقاومت سایش هویدا می‌شود.

۵. یکی از عوامل اصلی موثر بر مقاومت سایشی اندازه دانه آستنیت اولیه می باشد .
۶. تاثیر و قدرت ریزدانه‌گی بسیار بیشتر از تاثیر تردی و سختی کاربیده‌ها بر روی خواص مکانیکی از جمله چقرمگی و انعطاف پذیری است .
۷. سختی و اندازه دانه از جمله عوامل تاثیرگذار بر روی مقاومت سایشی می باشند.
- ۸.

مراجع

- [1] A .Li , M .Hu , X .Wang: Influence of sub-temperature quenching temperature on microstructure and property of 65Mn steel. Trans Tech Publications, Ltd., 102–104, (2010) 460–464 <https://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.102-104.460>
- [2] S .Ge , Q .Wang , J .Wang: The impact wear-resistance enhancement of medium manganese steel and its application in mining machines. Wear 376-377 (2017) 1097-1104 <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.015>
- [3] G .Huang , G .Jiao , D .Wen , Ch .Zhou , K .Wu: Mechanical properties of heat treated 65Mn steel produced by compact strip production. Advanced materials research, 168-170 (2011) 832-836. <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.832>
- [4] M.A. Hafeez, Microstructural and mechanical properties of one-step quenched and partitioned 65Mn steel, Arab J Sci Eng, 46 (2021) 2261–2267 <http://doi.org/10.1007/s13369-020-05075-4>
- [5] S.N.Ghali, M.K.El-Fawkhry, Simulation of cooling process effect on mechanical properties of 65Mn strip, 2015.
- [6] Y. Huang G. Zhang, Microstructure and property of 65Mn steel preheated by laser strengthening, [Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2015.01.008), 1 (2015) 53-57 <http:// 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.01.008>
- [7] A .Li, M .Hu :Microstructure and properties of 65Mn steel after austenite inverse phase transformation by sub-temperature quenching. Advanced materials research 194-196 (2011) 89-94. <http://doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.194-196.89>
- [8] R .Dalai, S .Das, K .Das: Effect of thermos-mechanical processing on the low impact abrasion and low stress sliding wear resistance of austenitic high manganese steels, Wear, 420–421 (2019) 176-183. <http://doi.org/10.1016/j.wear.2018.10.013>
- [9] Y .Wang, J .Sun, T .Jiang, C .Yang, Q .Tan, S .Guo, Y .Liu: Super strength of 65Mn spring steel obtained by appropriate quenching and tempering in an ultrafine grain condition. Materials Science and Engineering A 754 (2019) 1-8. <http://doi.org/10.1016/j.msea.2019.03.059>

- [10] A.K.Jha , B.K.Prasad, O.P.Modi, S.Das, A.H.Yegneswaran : Correlating microstructural features and mechanical properties with abrasion resistance of a high strength low alloy steel, Wear 254 (2003) 120 -128. [http://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00309-5](http://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00309-5)
- [11] T.W. Chenje, D.J .Simbi, E. Navara :Relationship between microstructure, hardness, impact toughness and wear performance of selected grinding media for mineral ore milling operations, Materials and Design 25 (2004) 11-18 .doi : [10.1016/S0261-3069\(03\)00168-7](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(03)00168-7)
- [12] X .Xu, W .Xu, F .Hipgrave, S ,Zwaag :Design of low hardness abrasion resistant steels. Wear 301 (2013) 89-93. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.002>
- [13] K .Enayati, F .Sayyedani :Study of dry sliding wear behavior of Ti-48Al-2Nb-2Cr alloy , Tribology - Materials, Surface and Interfaces. <https://doi.org/10.1080/17515831.2021.1881876>