

بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند نورد گرم بر روی ریز ساختار فولاد CK45

چکیده: با توجه به استفاده گسترده فولادهای فریت-پرلیتی در کاربردهای صنعتی، بهینه سازی خواص آن ها یکی از موضوعات مهم تحقیقات در این حوزه است. بر این اساس بهبود ریزساختار نهایی آن ها که منجر به بهبود خواص مکانیکی می گردد، ضروری است. استفاده از بعضی فرآیندهای تولید همچون نورد می تواند سبب بهبود ریز ساختار و در نتیجه خواص مکانیکی محصولات گردد. در این تحقیق عملیات نورد گرم و کوئنچ در دو محیط مختلف بر روی CK45 انجام شد. نمونه ها در دماهای مختلف و در سرعت های غلتک متفاوت، تحت کرنش های یکسان قرار گرفته و سپس در دو محیط مختلف آب یخ و هوا تا دمای هوای اتاق به سرعت سرد شدند. در نهایت ریزساختار نهایی آن ها با استفاده از میکروسکوپ نوری، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که در فرآیندهای نورد گرم در دماهای بالای ۸۵۰ درجه سانتی گراد، ریزساختار پس از نورد و خنک شدن در آب یخ همواره به صورت مارتنزیتی بوده که با افزایش دما این ساختار ریزتر می شود. در نمونه های هوا سرد شده در سرعت ثابت، با افزایش دما، مدت زمان کافی برای رشد و تشکیل شبکه پیوسته از فاز فریت در قطعه وجود داشته و بنابراین نمونه در دماهای بالاتر به حالت قبل از نورد بر می گردد. اما در دماهای پایین و سرعت بالاتر، به دلیل نرخ کرنش بالا، ماده مدت زمان کافی برای بازیابی و تشکیل فاز شبکه -ای فریت نداشته و تنها فریت در جهات نورد تشکیل می گردد.

واژه های راهنما: نورد گرم، ریزساختار، پارامترهای نورد، CK45، فولادهای فریتی - پرلیتی

آیدین سلیمی اصل*

استادیار،
بخش فنی و مهندسی،
دانشگاه پیام نور

اسماعیل صیدی

استادیار،
بخش کشاورزی،
دانشگاه پیام نور

بهنام فرج پور

دانشجوی کارشناسی ارشد،
بخش فنی و مهندسی،
دانشگاه پیام نور

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴

Aydin Salimiasl*
Assistant Professor of
Mechanical Engineering
Department, Peyame
Noor University

Esmail Seidy
Assistant Professor of
Agriculture Department,
Peyame Noor University

Behnam Farajpoor
M.Sc. Student of
Mechanical Engineering
Department, Peyame
Noor University

Investigation of the influence of hot rolling parameters on CK45 microstructures

Abstract: Optimization of Ferritic-pearlitic steel properties is one of the most important aims of the researchers in this study branch due to increasing use of these steels in industry applications. Therefore, improving their final microstructure is necessary to enhance the level of the mechanical properties. On the other hand, employing some manufacturing methods such as rolling can improve the microstructure and the mechanical properties in turn. In this research, the hot rolling operation and quenching in two different environments was carried out on CK45 steel. The samples were rolled in different temperatures and different rotational speeds of work-rolls under the same reduction percentage. They were then quickly cooled down in room atmosphere and cold water and the final microstructure was examined using of optical microscope. The results show that in hot rolling process, over 850°C temperatures, the microstructure is always in the form of martensite phase after rolling and cooling in cold water and the microstructure gets smaller even with increasing the temperatures. About the samples which are cooled in room atmosphere and with increasing the temperature, there is enough time for growth and forming continuous background of ferrite phase's in the sample, so the samples return to their before rolling state. However, in low temperatures and high speeds, because of high strain rate, material has not enough time for retrieving and forming ferrite phase and the ferrite phase is formed only in rolling direction.

Keywords: Hot rolling, Microstructure, Rolling parameters, CK45, Ferritic-pearlitic steels

۱- مقدمه

هر دو در مقایسه با روش نورد جزو روش‌های گران قیمت و زمان‌بر محسوب می‌شوند. لذا انتخاب نورد گرم برای کنترل پارامترهای ذکر شده می‌تواند عملیاتی کم‌هزینه‌تر و با سرعت بیشتری ارائه دهد [۴، ۵].

بررسی‌های انجام گرفته در منابع علمی موجود نشان می‌دهد که در حوزه فولادها از حیث شکل‌دهی و نورد آنها، تحقیقات گسترده‌ای در سطح دنیا و در داخل کشور انجام شده است که از جمله آن می‌توان به کارگیری عملیات ترمومکانیکی در این حوزه اشاره کرد، ولی آنچه قابل اذعان است، این است که عمده این تحقیقات بر روی گریدهای مخلف فولادهای آلیاژی که عموماً نیز از قیمت بالایی برخوردار می‌باشند، اجرا شده است اما بطور خاص در ارتباط با نورد گرم فولاد CK45، تقریباً می‌توان اظهار داشت که تا به امروز راجع به بهبود خواص مکانیکی آنها به روش شکل‌دهی با نورد گرم، اطلاعات علمی موثقی در دسترس نیست.

نیکان و همکارانش [۶] در پژوهش خود تأثیر پارامترهای مختلف نورد گرم را بر روی فولادهای دو فازه با و بدون عنصر نیوبیوم بررسی کرده‌اند. بر اساس این تحقیق دمای نورد و نرخ کرنش تأثیر محسوسی بر روی خواص مکانیکی و ریز ساختار دارند. یونس فاخر و همکارانش [۷] در تحقیق خود تأثیر جهت نوردکاری و نرخ کرنش نوردکاری سرد را بر روی خواص مکانیکی فولاد CK45 بررسی کرده‌اند. بر اساس نتایج تحقیق با افزایش زاویه نورد کاری از ۰ تا ۹۰ درجه، استحکام کششی فولاد افزایش پیدا کرده و همچنین سختی فولاد با انحراف زاویه در عملیات نورد سرد افزایش محسوسی از خود نشان داده است. ماندانا و همکارانش [۸] در تحقیقی که در آن تأثیر نورد گرم بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای با کربن کم و کربن بالا انجام دادند به این نتیجه رسیدند که نورد گرم یک روش عالی برای از بین بردن پیر سختی، لوله‌ای شدن و طولانی شدن نقطه تسلیم در این فولادها می‌شود. پیتر و همکارانش [۹] در تحقیقی تأثیر پارامترهای نورد گرم مثل نرخ کرنش و دمای نورد را بر روی فولاد St60Mn بررسی کرده‌اند. در این تحقیق استحکام کششی، استحکام تسلیم، سختی، مدول الاستیسیته، چقرمگی، خمش و درصد کاهش مساحت محصولات نورد اندازه‌گیری شدند. تحقیق نشان داد که پارامترهایی مثل نرخ کرنش و دمای نورد تأثیر مستقیمی بر خواص مکانیکی این فولاد دارد. هونگ بین لی و همکارانش [۱۰] در پژوهش خود تأثیر دماهای مختلف را در ریز ساختار و خواص مکانیکی فولادهای ساده کربنی در تغییر شکل دادن گرم بررسی کردند. نتایج نشان دادند که در دمای

فرآیند نورد، یکی از متداول‌ترین فرآیندها برای تولید فرآورده‌های فلزی به ویژه فولادها با شکل‌ها و ابعاد مختلف است، به طوری که بیش از ۸۰٪ از فرآورده‌های فلزی در جهان با این روش تولید می‌شود [۱]. از میان انواع مختلف فرآیندهای نورد، نورد تخت از پرکاربردترین فرآیندها است، به طوری که در کشورهای صنعتی ۴۰ تا ۶۰ درصد محصولات حاصل از فرآیندهای مختلف نورد، به وسیله نورد تخت ایجاد می‌شود [۱، ۲].

ظرفیت و سرعت تولید فرآیند نورد آن را به یکی از مهم‌ترین فرآیندهای شکل‌دهی فلزات تبدیل کرده است، به طوری که این فرآیند از اهمیت زیادی در صنعت به ویژه صنایع فلزی برخوردار است. فرآیند نورد ممکن است به صورت گرم یا سرد انجام پذیرد، که برگزیدن روش به نوع، اندازه، ویژگی‌های ماده و شکل پایانی و انتظارات تولید کنندگان از فرآورده بستگی دارد. در روش نورد گرم شکل‌دهی در دمایی بالاتر از دمای تبلور مجدد انجام می‌پذیرد، که از مزایای آن نسبت به روش سرد می‌توان به ایجاد تغییر شکل‌های بالا، توان و نیروی اعمالی کمتر، اخذ خواص همسانگرد در ریزساختار محصول نهایی و عدم وقوع پدیده کار سختی در محصول نهایی اشاره کرد [۲].

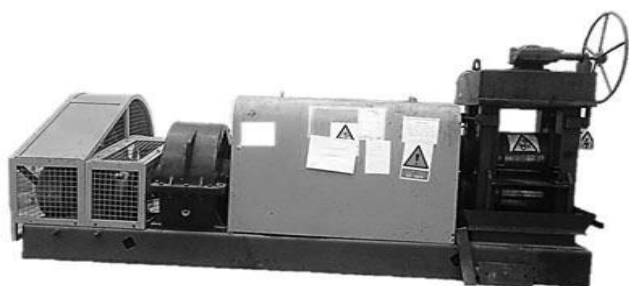
یکی دیگر از مزایای بسیار مهم عملیات نورد گرم بهبود خواص مکانیکی قطعه تولیدی به این روش است، برای ایجاد کیفیت مناسب فرآورده، پارامترهای مختلف مکانیکی، سطحی، دمایی و متالورژیکی می‌بایست تحت کنترل دقیق باشند، این کنترل‌ها برای فولادهای مختلف متفاوت بوده و برای هر کدام از آن‌ها برنامه‌ی کنترل جداگانه‌ای می‌بایست در نظر گرفته شود. از این رو می‌توان گفت که یکی از مؤثرترین روش‌ها برای ارتقاء خواص مکانیکی فولادها انجام کنترل‌های لازم حین نورد آن‌ها است. اگر بتوان پارامترهای حاکم در فرآیند نورد را که عبارتند از: دمای تغییر شکل، میزان کرنش اعمالی و نرخ کرنش را به خوبی کنترل کرد، آنگاه محصول به دست آمده دارای خواص مکانیکی بهتری خواهد بود که این خواص نیز به نوبه خود متأثر از ریزساختار آن فلز است [۳]. بنابراین فرآیند نورد یک روش استحکام بخشی هم به حساب می‌آید که این استحکام بخشی از طریق مواردی همچون ریز کردن دانه‌ها اتفاق می‌افتد. در بین روش‌های ریز کردن دانه‌ها، فرآیندهای تغییر فرم پلاستیکی شدید و عملیات ترمومکانیکی توسعه پیدا کرده و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است [۴] که

شکل ۱ نمونه آماده شده برای عملیات کوره به کار برده شده در این پژوهش یک کوره مقاومتی شرکت Azar Furnace با مدل F11L و با دمای اسمی 1250°C است (شکل ۲).



شکل ۲ کوره مورد استفاده برای آستینیته کردن نمونه

با توجه به اهداف پژوهش از دستگاه نورد موجود در دانشگاه صنعتی سهند استفاده شده است. نمایی از دستگاه نورد در شکل (۳) ارائه شده است. قطر هر غلتک 34 سانتی متر بوده و سرعت حرکت دستگاه در سرعت‌های مختلف 10 ، 15 و 20 دور بر دقیقه است.



شکل ۳ دستگاه نورد مورد استفاده برای عملیات

۲-۱- روش انجام آزمایش

پس از آماده کردن نمونه‌ها و برش پلاسمایی و سیمی آنها، زواید مربوط به برش پلاسمایی توسط سنگ‌زن برقی زدوده شد تا نمونه به شکل منظم و به سطح مناسب برسد. قبل از انجام هرگونه عملیاتی روی نمونه آماده شده، ابتدا عملیات متالوگرافی جهت بدست آوردن ریزساختار اولیه انجام می‌گیرد.

650°C درجه تشکیل ساختارهای ریز دانه به آسانی اتفاق می‌افتد. و در بین دمای 700°C – 600°C درجه ساختارهای همگن ریز دانه تشکیل می‌شود.

در این پژوهش تأثیر عملیات نورد گرم بر رویکی از پرکاربردترین فولادها یعنی فولاد CK45 مورد بررسی قرار گرفته است. برای این عملیات نورد گرم بر روی فولاد تحت پارامترهای مختلف نورد کاری انجام می‌گیرد. قبل از عملیات نورد، فولاد تحت عملیات حرارتی قرار گرفته و ریز ساختار آن بررسی می‌گردد. سپس با اعمال پارامترهای سرعت چرخشی و دما در مقدار کرنش ثابت عملیات نورد انجام شده و در نهایت پس از عملیات حرارتی ریز ساختار فولاد مورد بررسی قرار می‌گیرد.

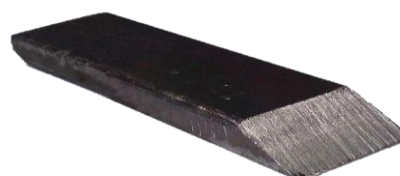
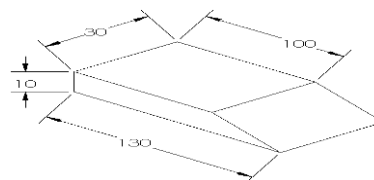
۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق جهت انجام عملیات تغییر شکل گرم، فولاد ساده کربنی CK45 به عنوان ماده اصلی همراه با پودر آلومینای $0/3$ و $0/05$ میکرون، نمد و محلول نایتال 2% مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترکیب شیمیایی فولاد CK45 مورد استفاده در پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد CK45

Element	Fe	S	P	Si	Mn	C
%wt	بالانس	$0/035$	$0/01$	$0/25$	$0/65$	$0/45$

نمونه مورد استفاده ابتدا توسط دستگاه برش پلازما به شکل مکعب مستطیل در آمده و سپس توسط برش سیمی به شکل دوزنقه با زاویه راس 30° درجه، طول 100 میلی‌متر، عرض 30 و ارتفاع 10 میلی‌متر تهیه شد. نمای شماتیک و واقعی از نمونه و مراحل آن در شکل (۱) ارائه شده است.





شکل ۴ نمونه پس از نورد گرم و محیط آب یخ مورد استفاده



شکل ۵ فلوچارت روش انجام آزمایش

۳- نتایج و بحث

قبل از هر گونه بررسی و انجام آزمایشی، نمونه خام تهیه شده توسط دستگاه کوانتومتری آزمایش شده و ترکیب شیمیایی آن بدست آمد. ترکیب بدست آمده در نرم افزار ترمودینامیکی JmatPro وارد شده و بر اساس نمودار، فازهای تعادلی آن مشخص می شود. در شکل (۶) نمودار تعادلی سرمایش نمونه شمش ارائه شده است. مطابق شکل مشاهده می شود که ساختار نهایی در دمای محیط شامل فریت و سمنتیت خواهد بود.

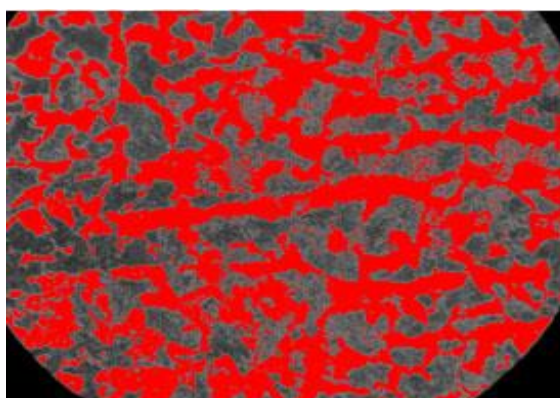
درصد هر کدام از فازهای مربوطه توسط همین نرم افزار Jmatpro محاسبه شده و به ترتیب برابر ۹۳٪ فریت و ۷٪ سمنتیت است، که بخشی از فریت مربوط به فریت پرویوتکتوئید بوده و به صورت جداگانه تشکیل می شود و مابقی آن به صورت لایه های متناوبی از فریت و سمنتیت در قالب فاز پرلیت تشکیل می شوند.

پس از آماده کردن نمونه ها و برش پلاسمایی و سیمی آنها، زواید مربوط به برش پلاسمایی توسط سنگزن برقی زدوده شد تا نمونه به شکل منظم و به سطح مناسب برسد. قبل از انجام هرگونه عملیاتی روی نمونه آماده شده، ابتدا عملیات متالوگرافی جهت بدست آوردن ریزساختار اولیه انجام می گیرد. سپس نمونه ها جهت عملیات آستنیتیزه کردن به مدت ۱ ساعت درون کوره با دماهای مختلف قرار داده شدند. قبل از قراردادن نمونه در کوره، ابتدا کوره با نرخ گرمایش آرام تا دمای ۶۵۰ درجه بالا برده شده و به مدت ۱ ساعت در این دما نگه داشته می شود. با رسیدن دمای کوره به ۶۵۰ درجه، نمونه به آرامی درون کوره قرار داده می شود. افزایش دمای کوره تا رسیدن به دمای مذکور با همان نرخ گرمایش انجام شده و با رسیدن به دمای مورد نظر جهت توزیع یکنواخت دما در قطعه، کوره ۱ ساعت در این دما نگه داشته می شود. سپس نمونه جهت انجام فرآیند نورد از آن خارج شده و جهت جلوگیری از کاهش دمای نمونه، به سرعت تحت عملیات نورد قرار می گیرد. در مرحله نورد، نمونه توسط میله ی فولادی به آرامی به داخل غلتک هل داده می شود، تا فرآیند نورد تنها یک پاس بر روی نمونه انجام گیرد. دستگاه نورد در این حالت با سرعت های مختلف و با فاصله ۳/۸ میلی متری بین غلتک ها در حال چرخش است. در نتیجه با ورود نمونه به فاصله میان غلتک ها، عملیات نورد گرم در دماهای و سرعت های مختلف و با ۶۲٪ تغییر شکل پلاستیک انجام گرفته و نمونه از طرف دیگر خارج می شود. پس از خروج نمونه از دستگاه نورد، اجازه داده می شود تا نمونه در دو محیط هوا و آب یخ سرد شده و به دمای محیط برسد. با رسیدن به دمای محیط، نمونه از مقطع طولی مورد برش قرار می گیرد و سطح مقطع ایجاد شده مورد عملیات متالوگرافی قرار می گیرد. در شکل (۴) نمونه پس از نورد گرم و محیط آب یخ نشان داده شده است.

جهت متالوگرافی ابتدا سنباده زنی های دقیقی از سنباده با مش ۸۰ تا ۵۰۰۰ و با تعویض ۹۰ درجه ای جهت سنباده زنی صورت گرفت. سپس با پودر آلومینای ۰/۳ و ۰/۰۵ میکرون عملیات صیقل کاری نهایی انجام گرفت. پس از حصول سطح آینه ای و براق نمونه، نمونه ها ابتدا با آب و سپس با الکل تمیز شسته شده و توسط سشوار سطح آن ها خشک شدند. برای نمایان سازی ریزساختار عملیات حکاکی توسط محلول ۲٪ نایتال انجام گرفت. پس از آن تصاویر میکروسکوپی از بزرگنمایی ۵۰ تا ۱۰۰۰ توسط میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS PMG3 تهیه شد. شکل (۵) فلوچارت روش انجام آزمایش ها را بصورت گرافیکی نشان می دهد.

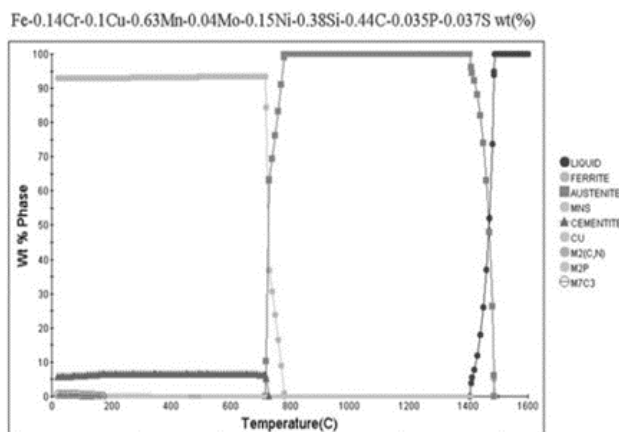


ریزساختار نمونه خام CK45 پس از متالوگرافی در دو بزرگنمایی مختلف در شکل (۷) ارائه شده است. مطابق تصویر مشاهده می‌شود که ریزساختار شامل دو فاز فریت (به رنگ سفید) و پرلیت (به رنگ تیره) است. آنالیز تصویر از نمونه فوق توسط نرم‌افزار Image J صورت گرفته و در شکل (۸) نشان می‌دهد که حدود ۴۸٪ زمینه را فاز سفید رنگ فریت تشکیل می‌دهد و مابقی ریزساختار پرلیت است.



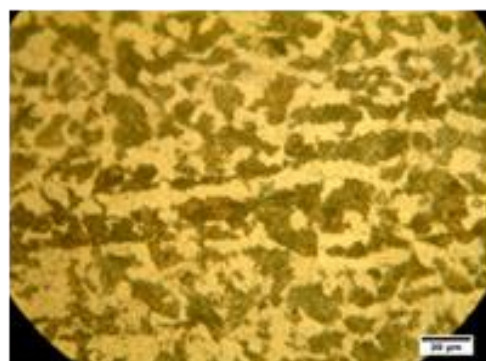
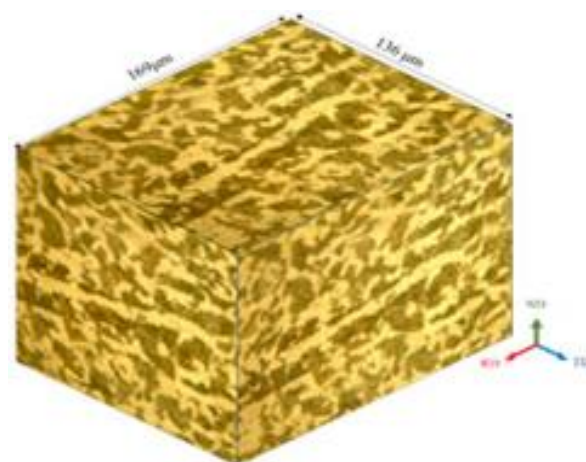
شکل ۷ ریز ساختار نمونه خام فولاد CK45

شکل ۸ آنالیز تصویر ریز ساختار نمونه خام فولاد CK45

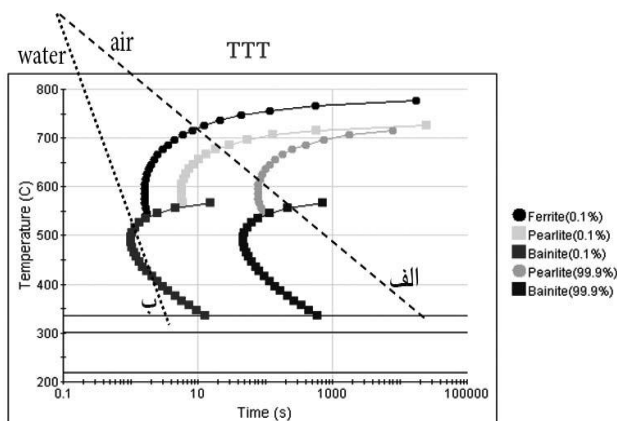


شکل ۶ نمودار سرمایش فولاد CK45 در حالت تعادل

برای انجام عملیات حرارتی، ابتدا نمونه را در منطقه آستنیت (850°C) گرم نموده و سپس عملیات مورد نظر بر روی آن انجام می‌شود. دمای آستنیت در ناحیه 850°C تا دمای نزدیک به 1400°C پایدار است. از این رو آستنیت کردن در این محدوده دمایی شروع می‌شود. جهت حصول اطمینان از دمای آستنیت شدن نمونه، تعداد دو نمونه در این دما به مدت ۶۰ دقیقه مورد گرمایش قرار گرفته و سپس این نمونه‌ها یکی در آب یخ و دیگری در محیط هوا تا دمای محیط خنک گردید. پس از خنک شدن نمونه‌ها، نمونه‌هایی جهت متالوگرافی تهیه و ریزساختار آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۹) ریزساختار این نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بعبارت دیگر، شکل (۹) ریز ساختار فولاد CK45 را بعد از عملیات آستنیت شدن در محیط‌های هوا و یخ نشان می‌دهد.



توجه به ریزساختارهای بدست آمده و نمودار TTT مشاهده می شود که نمونه در دمای 850°C کاملاً آستنیت شده است.



شکل ۱۰ ریز ساختار فولاد CK45 پس از عملیات حرارتی با نرم افزار JmatPro (الف) خنک کردن در هوا (ب) خنک کردن در آب

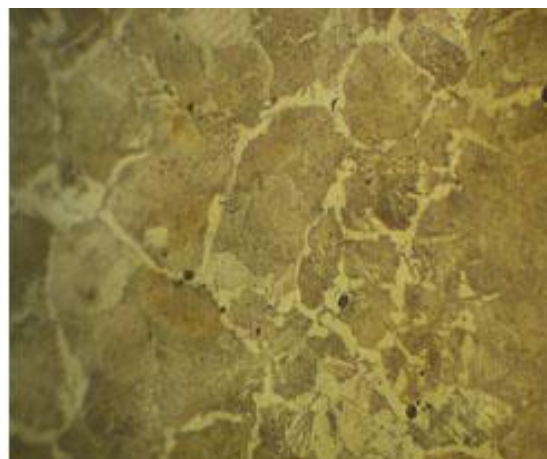
۳-۱- ریزساختار نمونه نورد شده در سرعت ۱۰ دور بر دقیقه

عملیات نورد سپس در سرعت ۱۰ دور بر دقیقه انجام شده و ریز ساختار بررسی می گردد. در بررسی ریزساختاری نمونه های نورد شده در دماهای مختلف، نمونه ها با ۶۲٪ تغییر شکل از دستگاه خارج شده و در دو محیط آب و هوا خنک می گردند. شکل (۱۱) ریزساختار نمونه های مختلف را نشان می دهد.

با توجه به تصاویر ریزساختاری مشاهده می شود که زمانی که نمونه پس از نورد در هوا سرد شود، با توجه به نرخ سرمایش پایین نمونه، ریزساختار نهایی شامل شبکه پیوسته فاز فریت و مابقی آن پرلیت است. البته با افزایش دمای فرآیند نورد، نوع پرلیت از حالت خشن به حالت ریز تبدیل می شود. از طرفی

سرد کردن نمونه در آب یخ، منجر به ایجاد فاز مارتنزیت در نمونه شده و در هر سه ریزساختار تیغه های مارتنزیتی به راحتی قابل مشاهده است. در این شرایط نیز با افزایش دمای فرآیند نورد، تیغه های مارتنزیتی تیزتر و ریزتر شده و انتظار می رود سختی و استحکام بالایی در قطعه مشاهده شود.

شکل (۱۲) ریزساختار نمونه های نورد شده در سرعت ۱۵ دور بر دقیقه و در دماهای مختلف و محیط سرمایش مختلف نشان می دهد. مطابق ریزساختارهای ارائه شده مشاهده می شود که در سرعت ۱۵ دور بر دقیقه به دلیل اعمال سرعت کرنش بالا، ماده به سرعت تغییر شکل داده و در دماهای پایین امکان بازیابی کمتر می شود. همانطور که در شکل (۱۲-الف) مشاهده می شود، جهت گیری ترجیحی دانه های فریت به وضوح مشخص

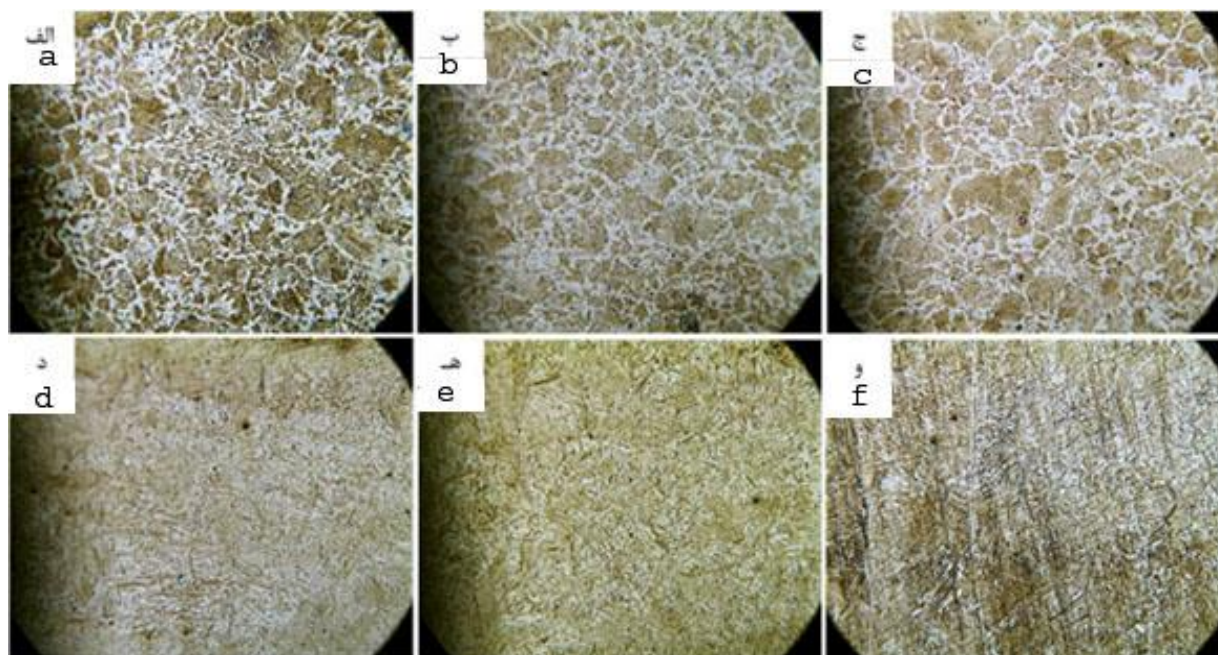


شکل ۹ ریز ساختار فولاد CK45 پس از عملیات حرارتی (الف) خنک کردن در هوا (ب) خنک کردن در آب

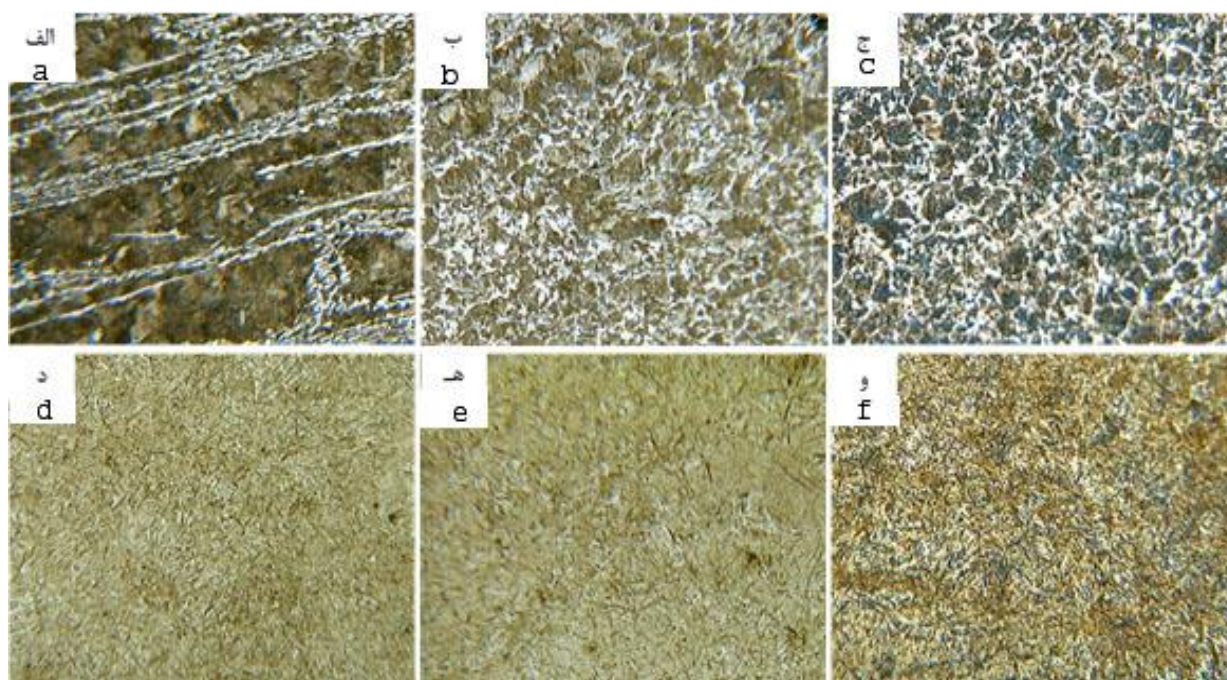
در شکل مشاهده می شود که نمونه پس از عملیات حرارتی در دمای 850°C اگر در هوا خنک شود در این صورت ساختار نهایی شامل فازهای بهم پیوسته فریت بوده و مابقی به صورت پرلیت ریز خواهد بود. اما اگر نمونه در آب یخ خنک شود در این صورت تمام ریزساختار به صورت مارتنزیتی خواهد بود. علت تغییر ریزساختار نمونه در رژیم های عملیات حرارتی با سرعت های سرد کردن متفاوت با پدیده های نفوذ و برش هنگام تحولات فازی توجیه نمود. با استفاده از این نمودارها می توان به ریزساختارهای نهایی نمونه در هر رژیم عملیات حرارتی پی برد. این نمودارها وابسته به عناصر آلیاژی بوده و برای هر ترکیب شیمیایی منحصر بفرد است. نمودارهای TTT برای فولاد CK45 توسط نرم افزار JmatPro رسم و در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با توجه به اینکه نمونه ای که در هوا سرد می شود مدت زمان بالای یک ساعت طول می کشد تا به دمای محیط برسد، از این رو با فرض یک ساعت مدت زمان خنک شونده، در این حالت با رسم خط نرخ سرمایش، نوع فازهای حاصل پس از سرمایش مشخص می شود. با رسم خط مربوطه و بررسی نحوه تشکیل فازها، مشاهده می شود که نمونه در ابتدا با منحنی تشکیل فریت برخورد نموده و سپس با منحنی شروع پرلیت برخورد می نماید، از این رو در این نوع سرمایش، ساختار نهایی شامل فریت بعلاوه پرلیت ریز است. برای نمونه خنک شونده در آب یخ نیز با توجه به اینکه نرخ سرمایش بسیار بالاست و در مدت کمتر از ۷ ثانیه دمای نمونه به دمای محیط می رسد از این رو با رسم خط مربوط به سرمایش آن مشاهده می شود که نمونه قبل از تشکیل فازهای فریت، پرلیت و یا بینیت با خط تشکیل مارتنزیت برخورد کرده و در نتیجه تمام ساختار را فاز مارتنزیت تشکیل می دهد. با

در شکل (۱۲-ج) نیز همین ساختار دیده می‌شود با این تفاوت که در این شکل فاز فریت مدت زمان بیشتری برای بازیابی و تشکیل داشته و به صورت نسبتاً درشت و پیوسته تشکیل شده است. برای نمونه‌هایی که بعد از فرآیند در آب یخ سرد شده‌اند، ریزساختار کاملاً مارتنزیتی بوده و با افزایش دمای نورد نمونه‌ها، ریزساختار مارتنزیتی کامل بوده و ریز می‌شود.

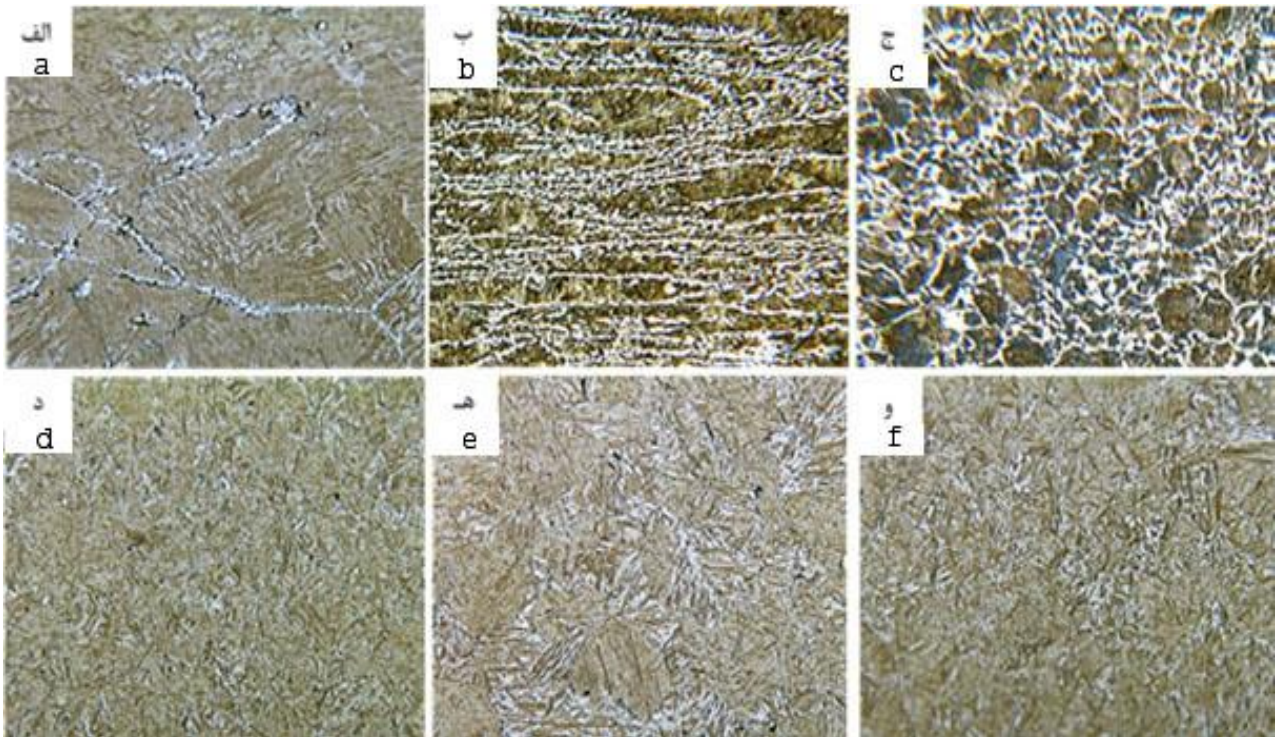
بوده و قابل مشاهده است. این جهت‌گیری در راستای جهت نورد بوده و دانه‌های سفید معرف فاز فریت بوده که در زمینه پرلیت توزیع شده است. ریزساختار نمونه‌های هوا سرد شده در دماهای ۹۵۰ و ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً مشابه هم بوده و تنها نوع فریت در آن‌ها متفاوت است. در شکل (۱۲-ب) دانه‌های ریز فریت دیده می‌شود که در زمینه پرلیت توزیع شده است.



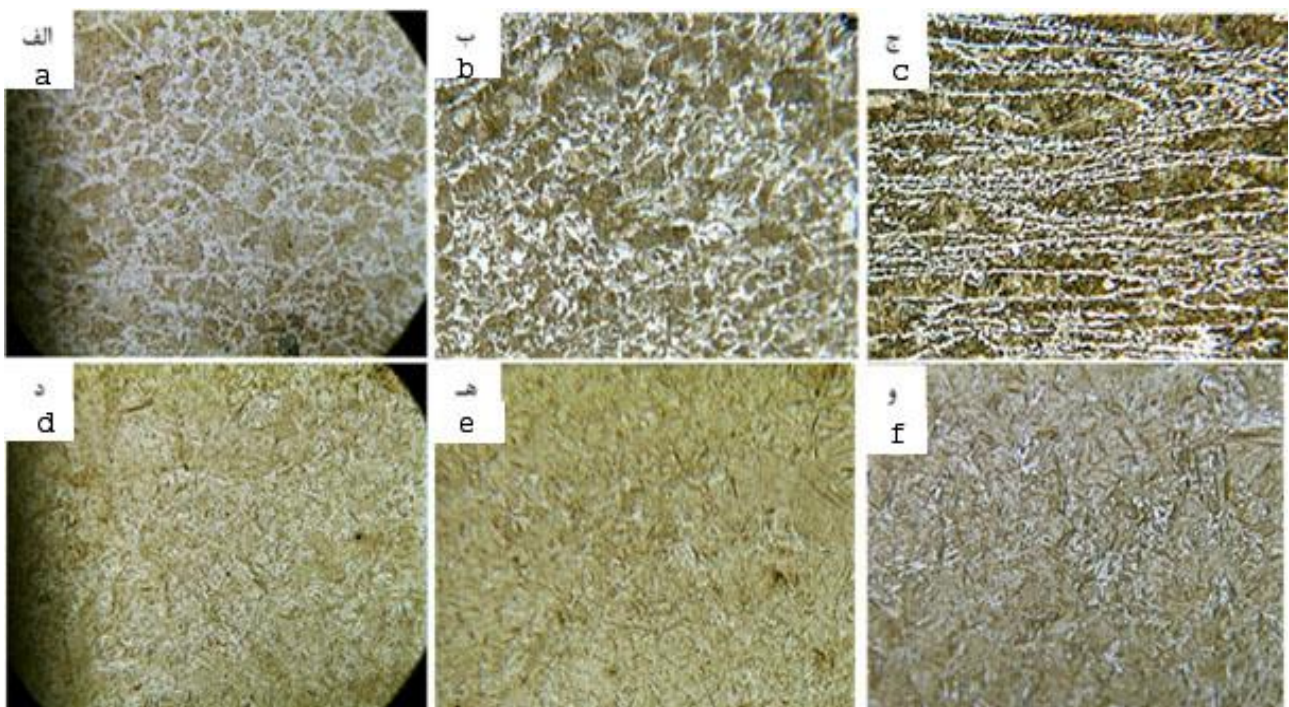
شکل ۱۱ ریزساختار نمونه در سرعت ۱۰ دور بر دقیقه (الف) 850°C - هوا، (ب) 950°C - هوا، (ج) 1050°C - هوا، (د) 850°C - آب، (ه) 950°C - آب، (و) 1050°C - آب



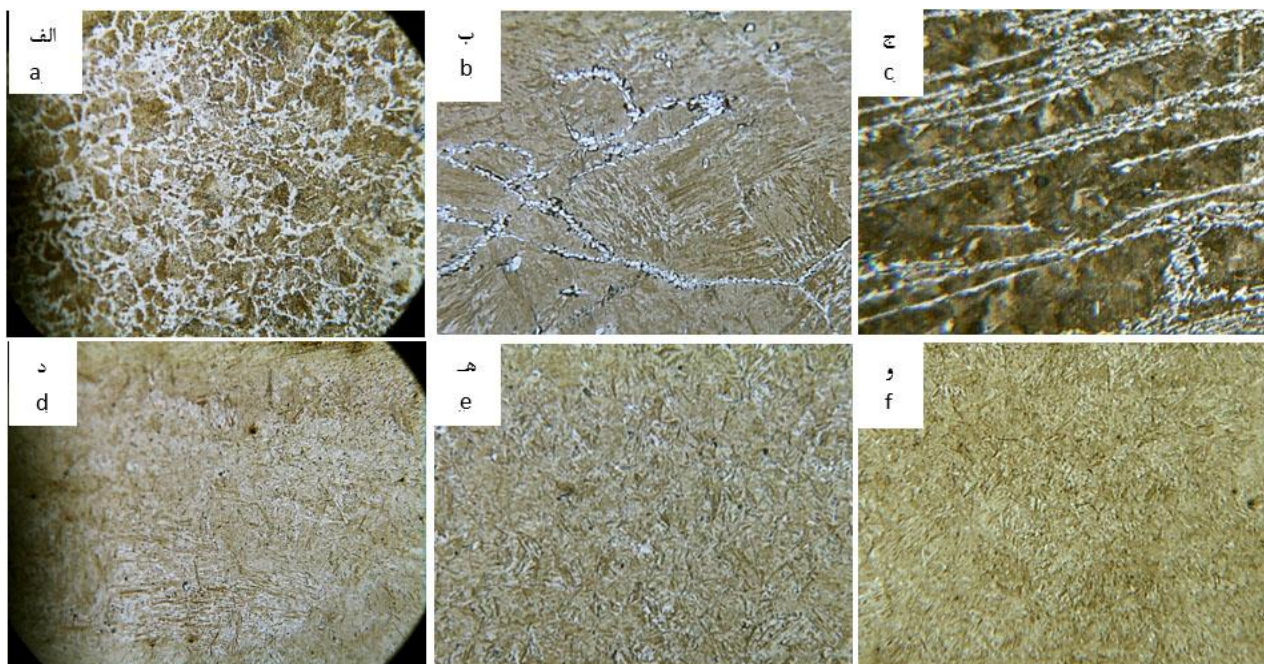
شکل ۱۲ ریزساختار نمونه در سرعت ۱۵ دور بر دقیقه (الف) 850°C - هوا، (ب) 950°C - هوا، (ج) 1050°C - هوا، (د) 850°C - آب، (ه) 950°C - آب، (و) 1050°C - آب



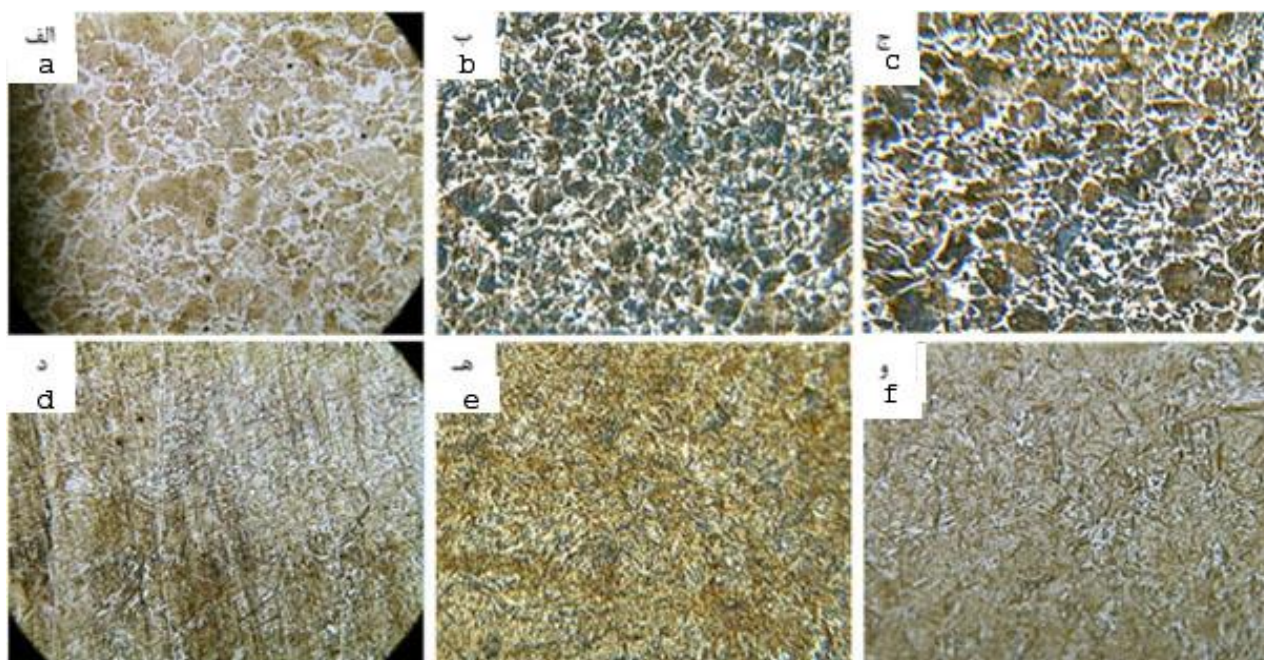
شکل ۱۳ ریزساختار نمونه در سرعت ۲۰ دور بر دقیقه (الف) 85°C - هوا، (ب) 95°C - هوا، (ج) 105°C - هوا، (د) 85°C - آب، (ه) 95°C - آب، (و) 105°C - آب



شکل ۱۴ ریزساختار نمونه در دمای 85°C (الف) 10rpm - هوا، (ب) 15rpm - هوا، (ج) 20rpm - هوا، (د) 10rpm - آب، (ه) 15rpm - آب، (و) 20rpm - آب



شکل ۱۵ ریزساختار نمونه در دمای 950°C (الف) 10rpm (هوا، آب) (ب) 15rpm (هوا، آب) (ج) 20rpm (هوا، آب) (د) 10rpm (آب، هوا) (ه) 15rpm (آب، هوا) (و) 20rpm



شکل ۱۶ ریزساختار نمونه در دمای 1050°C (الف) 10rpm (هوا، آب) (ب) 15rpm (هوا، آب) (ج) 20rpm (هوا، آب) (د) 10rpm (آب، هوا) (ه) 15rpm (آب، هوا) (و) 20rpm

متفاوت است. ریزساختار میکروسکوپ نوری این نمونه‌ها در شکل (۱۳) و در بزرگنمایی ۵۰۰ برابر ارائه شده است. در این شرایط، برای نمونه‌های هوا سرد شده، به دلیل بالا بودن سرعت کرنش اعمالی به نمونه، برای نمونه 850°C در هوا ساختار بینیتی به همراه فریت‌های ریز تشکیل شده است.

۳-۲- ریزساختار نمونه نورد شده در سرعت ۲۰ دور بر دقیقه

در این مرحله از نورد گرم، با افزایش سرعت دورانی غلتک‌ها و تنظیم آن در ۲۰ دور بر دقیقه، تغییرات ریزساختاری نمونه‌ها

برای دمای 950°C و در سرعت نورد 20 rpm ریزساختار نمونه با بقیه ریزساختارهای هوا سرد متفاوت است. علت این امر را می‌توان نرخ کرنش بالای اعمال و عدم وجود فرصت کافی برای بازیابی در نمونه عنوان نمود. برای نمونه‌های آب سرد نیز مشاهده می‌شود که ساختار حاصل کاملاً مارتنزیتی بوده و بتدریج ریزتر می‌گردد و علت آنرا نیز در کاهش زمان سرمایش و عدم فرصت کافی برای تبدیل فاز مارتنزیت باید دانست، زمینه مارتنزیتی به وضوح در ریز ساختارها قابل رویت می‌باشد که با افزایش سرعت نورد تغییرات همانند نمونه‌های سرد شده در هوا واضح نمی‌باشد، زیرا فاز مارتنزیت در مقایسه با فازهای فریت و پرلیت از سختی زیادی برخوردار می‌باشد که این خود مانعی برای تشکیل صفحات فازی در راستای فرآیند نورد می‌باشد.

برای نمونه با 950°C درجه دمای نورد، فاز فریت ریز تقریباً به طور یکنواخت و در جهت‌گیری مرجح توزیع شده است. زمینه در این نمونه پرلیت ریز است. برای نمونه نورد گرم شده در دمای 1050°C درجه، ریزساختار شامل شبکه بهم پیوسته‌ای از فاز فریت به همراه پرلیت خشن است. برای نمونه‌های آب سرد شده، هر چقدر دمای نورد نمونه افزایش یابد، به دلیل افزایش نرخ سرمایش از یک طرف و از طرف دیگر به دلیل سرعت کرنش اعمالی بیشتر در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های قبلی، مارتنزیت تشکیل شده بسیار ریزدانه شده و این ریز دانه بودن مارتنزیت باعث افزایش بیش از پیش سختی نمونه خواهد بود.

۳-۳- ریزساختار نمونه نورد شده در دمای 850°C

در این مرحله از نورد داغ، با ثابت نگه‌داشتن دمای فرآیند، نورد در 850°C و با تغییر سرعت حرکت غلتک‌ها، تغییرات ریزساختاری نمونه‌ها متفاوت است. ریزساختار میکروسکوپ نوری این نمونه‌ها در شکل (۱۴) و در بزرگنمایی $500\times$ برابر ارائه شده است. در این شرایط، برای نمونه‌های هوا سرد شده، به دلیل بالا بودن سرعت کرنش اعمالی به نمونه، در سرعت 10 دور بر دقیقه با توجه به تصاویر ریزساختاری مشاهده می‌شود که زمانی که نمونه پس از نورد در هوا سرد شود، با توجه به نرخ سرمایش پایین نمونه، ریزساختار نهایی شامل شبکه پیوسته فاز فریت و مابقی آن پرلیت است. در سرعت 15 دور بر دقیقه به دلیل افزایش اعمال سرعت نرخ کرنش، ماده به سرعت تغییر شکل داده و در دماهای پایین امکان بازیابی کمتر می‌شود. همانطور که در شکل (۱۴-الف) مشاهده می‌شود جهت‌گیری ترجیحی دانه‌های فریت به وضوح مشخص بوده و قابل مشاهده است. این جهت‌گیری در راستای جهت نورد بوده و دانه‌های سفید معرف فاز فریت بوده که در زمینه پرلیت توزیع شده است. برای نمونه در 20 دور بر دقیقه به دلیل سرعت بالای تغییر شکل، ساختار بینیتی به همراه فریت‌های ریز تشکیل شده است. برای نمونه‌هایی که بعد از فرآیند در آب یخ سرد شده‌اند، ریزساختار کاملاً مارتنزیتی بوده و با افزایش سرعت نورد نمونه‌ها، ریزساختار مارتنزیتی کامل بوده و ریز می‌شود.

۳-۵- ریزساختار نمونه نورد شده در دمای 1050°C

ریزساختار نمونه‌های نورد شده در دمای 1050°C در شکل (۱۶) آمده است. مشاهده می‌شود برای این نمونه در محیط سرد کننده هوا، همواره ریزساختار شامل فریت و پرلیت است، که با افزایش دمای فرآیند توزیع فاز فریت یکنواخت‌تر شده و انتظار می‌رود انعطاف‌پذیری نمونه در سرعت‌های بالا بیشتر باشد. برای نمونه‌های آب سرد شده مشاهده می‌شود که مارتنزیت با ریز شدن و ریز شدن همراه بوده و همانطور که در قسمت قبلی نیز توضیح داده شد سختی بیش از حد فاز مارتنزیت در مقایسه با فاز فریت و پرلیت و مقاومتی که در مقابل تغییر شکل از خود نشان می‌دهد مانعی برای تغییر ریز ساختار حاصله می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر از میان پارامترهای موثر عملیات نورد بر روی ریز ساختار فولاد CK45 سرعت غلتک (نرخ کرنش اعمالی) و دمای عملیات بررسی گردید. ریز ساختار فولاد مورد پژوهش تحت سرعت‌های 10 ، 15 و 20 دور بر دقیقه و دماهای 850 ، 950 و 1050 درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و پس از انجام عملیات حرارتی ریز ساختار بررسی گردید. بررسی‌ها نشان می‌دهد که تغییر پارامترهای عملیات نورد تأثیر محسوسی بر روی ریزساختار می‌گذارد که تغییر ریز ساختار هم به نوبه خود ارتباط مستقیمی با خواص مکانیکی فولاد دارد. با افزایش دمای فرآیند نورد گرم در سرعت نورد ثابت و محیط خنک

۳-۴- ریزساختار نمونه نورد شده در دمای 950°C

ریزساختار نمونه‌های نورد شده در دمای ثابت 950°C و در سرعت‌های مختلف نورد در شکل $15\times$ در بزرگنمایی $200\times$ برابر ارائه شده است. با توجه به ریزساختارها مشاهده می‌شود که

[5] Ueji, R., Tsuji, N., Minamino, Y., Koizumi, Y., Effect of rolling reduction on ultrafine grained structure and mechanical properties of low-carbon steel thermomechanically processed from martensite starting structure, *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 5, No. 1-2, pp. 153-162, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stam.2003.10.017>, (2004).

[6] Niakan, H., Najafizadeh, A., Effect of niobium and rolling parameters on the mechanical properties and microstructure of dual phase steels, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 21, pp. 5410-5414, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.05.078>, (2010).

[7] Younis, F.A., Lattif, S. J. Effect of the Rolling Direction and Draft on Some of the Mechanical Properties for the Medium Carbon Steel, *International Journal of Science and Research*, Vol. 3, No. 12, pp. 2425-2431, Paper ID: SUB14673, (2014).

[8] Zebarjadi Sar, M., Barella, S., Gruttadauria, A., Mombelli, D., Mapelli, C., Impact of Warm Rolling Process Parameters on Crystallographic Textures, Microstructure and Mechanical Properties of Low-Carbon Boron-Bearing Steels, *Metals*, Vol. 8, No. 11, pp. 927, DOI: <https://doi.org/10.3390/met8110927>, (2018).

[9] Nwachukwu, P.U., Oluwole, O.O., Effects of rolling process parameters on the mechanical properties of hot-rolled St60Mn steel, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 6, pp. 134-146, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.006>, (2017).

[10] Li, H.-B., Fan, L., Chen, L.-S., Effect of Temperature Scheme on Microstructure and Mechanical Properties during Medium Carbon Steel Warm Processing, *Metals*, Vol. 9, No. 1, pp. 77, DOI: <https://doi.org/10.3390/met9010077>, (2019).

کننده هوا، مدت زمان کافی برای تشکیل شبکه فریت پیوسته افزایش یافته و ماده به حالت قبل از نورد برمی‌گردد. با افزایش دمای فرآیند نورد گرم در سرعت ثابت و محیط خنک‌کننده آب، تمام ریزساختار پس از سرمایش به صورت مارتنزیتی بوده و با افزایش دما مارتنزیت ریزتر می‌شود. با افزایش سرعت نورد در دمای ثابت، مدت زمان اعمال کرنش کاهش یافته و نرخ کرنش افزایش می‌یابد که باعث تغییر در نحوه ریزساختار می‌شود.

۵- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

rpm دور در دقیقه

T دما

TTT دما-زمان-دگرگونی

CCT تبدیل سرد کردن مداوم

۶- مراجع

[1] Ray, S., *Introduction to Rolling Process*, In: Principles and Applications of Metal Rolling, Eds., pp. 1-29, Cambridge: Cambridge University Press, ISBN 978-1-107-07609-9 Hardback, (2016).

[2] Wang, S.-F. Peng, Y. A., Zhi-Jie, L., Work-Hardening and Deformation Mechanism of Cold Rolled Low Carbon Steel, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 3, pp. 823-828, DOI:10.19026/rjaset.5.5028, (2013).

[3] Zhang, X., Wang, H., Scattergood, R. O., Narayan, J., Koch, C.C., Modulated oscillatory hardening and dynamic recrystallization in cryomilled nanocrystalline Zn, *Acta Materialia*, Vol. 50, No. 16, pp. 3995-4004, DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00199-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00199-4), (2002).

[4] Sun, J.-J., Lian, F.-L., Liu, H.-J., Jiang, T., Guo, S.-W., Du, L.-X., Liu, Y.-N., E-mail: ynliu@mail.xjtu.edu.cn, Microstructure of warm rolling and pearlitic transformation of ultrafine-grained GCr15 steel, *Materials Characterization*, pp. Medium: X; Size: pp. 291-298, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.07.011>, (2014).