

بررسی تاثیر فرآیند عملیات حرارتی بر روی میکروساختارهای نفوذی و غیرنفوذی و استحکام کششی و سختی میلگردهای تولید شده به روش نورد گرم

محمد مهدی باقری زاده^۱، محمد مهدی زیدآبادی نژاد، ابراهیم یوسفی

کرمان، بردسیر، شرکت صنایع فولاد مشیز بردسیر، کنترل کیفیت

چکیده

میلگرد، یکی از متداول‌ترین مقاطع فولادی است که در صنعت ساختمان برای جبران استحکام کششی پایین بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش به بررسی تاثیر سه میکروساختار فریت، فریت-پرلیت و مارتنزیت تمپر شده بر خواص مکانیکی میلگردها با استفاده از آزمون‌های کشش، سختی و اندازه‌گیری ازدیاد طول نمونه‌ها پرداخته شده است. در این پژوهش به طور کلی ابتدا نمونه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ را به مدت زمان ۱ ساعت در ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد داخل کوره قرار داده تا کاملاً آستنیت‌ه شوند و سپس نمونه‌ها را به ترتیب داخل کوره (میلگرد ۱)، مجاورت هوا (میلگرد ۲)، مجاورت جریان هوای سرد (میلگرد ۳) و در آب (میلگرد ۴)، سرد شده است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهد میلگرد سرد شده در آب بیشترین مقدار سختی HV ۳۳۷ را نسبت به دیگر میلگردها دارا است اما از طرف دیگر مقدار ازدیاد طول این نمونه برابر با ۴ درصد می‌باشد و در مقایسه با دیگر نمونه‌ها کمترین مقدار است که به دلیل ساختار بسیار سخت و ترد مارتنزیتی آن می‌باشد. بهترین نتایج به دست آمده مربوط به میلگرد شماره ۳ است که مقدار تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی آن به ترتیب ۳۵۲ MPa و ۶۱۴ MPa می‌باشد و مقدار ازدیاد طول به دست آمده برابر ۲۰ درصد است.

کلمات کلیدی: میلگرد، عملیات حرارتی، آستنیت، میکروساختار، خواص مکانیکی.

¹ mahdibagheri74@gmail.com

مقدمه

برای رسیدن به استحکام مورد نظر در میلگردها، از دو روش آلیاژسازی و عملیات حرارتی^۱ برای تولید آن استفاده می‌شود. در استانداردهای معتبر دنیا برحسب شرایط اقلیمی هر کشور فرآیندهای تولید بطور کاملاً روشن و با لحاظ پارامترهای مختلف تحت کنترل قرار می‌گیرند. در کشور ژاپن که از نظر شرایط اقلیمی کشوری زلزله خیز است، آنالیز شیمیایی را متناسب با روش آلیاژسازی تعریف کرده و استاندارد ملی آن کشور هیچگونه اشارهای به فرآیند تولید از طریق عملیات حرارتی ننموده است. به عبارت دیگر مصرف میلگردهای ترمکسی در آن کشور توصیه نمی‌شود. در کشورهای اروپایی که از نظر زلزله خیزی در رده کشورهای امن می‌باشند و نسبت به کشور ژاپن خطر زلزله در آن‌ها بسیار پایین‌تر می‌باشد روش ترمکس را مدنظر قرار داده و آنالیز شیمیایی را متناسب با این روش در نظر گرفته‌اند. در استاندارد ملی ایران به شماره ۳۱۳۲ که برگرفته از چندین استاندارد مرجع ANSO, JIS, EN, DIN و ISO می‌باشد هر دو روش فوق الذکر در نظر گرفته شده است. میلگردهای تولید شده به روش ترمکس اینگونه است که شمش فولادی مورد استفاده دارای آنالیز شیمیایی پایین‌تر از محدوده آلیاژی بوده و برای رسیدن به استحکام مورد نیاز مطابق استاندارد، میلگرد تولیدی را که دارای دمای بالایی است را از داخل لوله‌های آب عبور داده و با سرعت زیادی از سطح خنک می‌شود که با تشکیل ساختارهای کریستالی متفاوت در سطح و مرکز، باعث ایجاد استحکام و سختی میلگرد^۲ تولیدی می‌گردد. دمای میلگرد بعد از طی کردن آخرین مرحله نورد، با عبور از داخل محفظه آب به سرعت کاهش می‌یابد [۱]. درچنین شرایطی سطح بیرونی میلگرد تغییر فاز داده و به مارتنزیت تبدیل می‌شود. پس از اینکه روی بستر خنک کننده قرار می‌گیرد فاز مارتنزیت بازپخت می‌شود، اما در این حالت مرکز میلگرد دارای ریزساختار فریت-پرلیت^۳ خواهد بود که باعث انعطاف پذیری میلگرد گردیده است که در نتیجه، این تغییرات ساختاری موجب بالا رفتن استحکام میلگرد تولیدی می‌گردد. کاربرد ترمکس در تولید میلگرد، نسبت به روش افزودن عناصر آلیاژی، علاوه بر افزایش استحکام، موجب کاهش بهای تمام شده محصول نهایی نیز می‌شود. ویژگی مهم دیگر این روش، امکان تولید میلگرد با سایزهای بالا می‌باشد [۲]. در این پژوهش از میلگردهای سایز ۲۵ میلیمتر با آج ۴۰۰ تولید شده توسط شمش فولادی 5sp استفاده شده و تاثیر میکروساختارهای متفاوت بر خواص مکانیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

^۲ Heat treatment

^۳ Rebar

^۴ Ferrite-perlite

روش تحقیق

ترکیب شیمیایی میلگرد استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است. میلگردهای سایز ۲۵ را به طول ۴۰۰ میلیمتر برای انجام عملیات حرارتی برش داده شده‌اند. نمونه‌ها را به مدت ۳۰ دقیقه و در دمای ۹۵۰ سانتی‌گراد به منظوره آستنیت‌ه کردن داخل کوره قرار داده و سپس در محیط‌های متفاوت میلگرد (۱) سرد کردن در کوره، میلگرد (۲) در هوا آزاد، میلگرد (۳) به وسیله جریان هوای زیاد سرد و میلگرد (۴) داخل آب، سرد شده است. نمودار TTT^۱ مربوط به عملیات حرارتی انجام شده روی نمونه‌ها به صورت شماتیک در شکل ۱ آورده شده است [۳]. پس از انجام عملیات حرارتی برای مشاهده فازهای مختلف تشکیل شده از میکروسکوپ نوری استفاده شده است. بدین منظور براساس استاندارد مرجع (ASTM E3-11) مربوط به آماده سازی نمونه‌های متالوگرافی میلگردها آماده سازی شده است و در ادامه به منظور بررسی خواص مکانیکی میلگردها ابتدا به وسیله دستگاه تست کشش ۱۰۰ تن ستام مقدار تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی هر یک از نمونه‌ها به دست آمد و میزان کرنش آن‌ها محاسبه شد. در ادامه برای به دست آوردن سختی نمونه‌ها، سختی ویکرز^۲ اندازه‌گیری شده است.

نتایج و بحث

بررسی میکروساختار کریستالی

فرآیندهای عملیات حرارتی، ریز ساختارهای و مقادیر سختی مربوط به هر یک از نمونه‌های میلگرد فولادی در جدول ۲ آورده شده است.

عملیات حرارتی انجام شده مستقیماً روی ریزساختار و فازهای تشکیل دهنده تأثیرگذار می‌باشد. در شکل ۲ تصاویر مربوط به سطح و مرکز میلگردهای سرد شده در هوا و جریان هوای سرد را نشان می‌دهد. در تصاویر (الف) و (ج) مربوط به هر دو نمونه، نواحی روشن نشان دهنده ساختار فریت و نواحی تیره نشان دهنده ساختار پرلیت می‌باشد و همانطور که در تصاویر (ب) و (د) مشخص است در بعضی از نواحی فریت سوزنی و فریت ویدمن اشتاتن نیز در زمینه مشاهده شده است [۴]. شکل ۳ تصاویر (الف) و (ب) میکروساختار نمونه سرد شده در آب را نشان می‌دهد که در تصویر (الف) ساختار مارتنزیت تمپر شده به عمق ۷۴۷ میکرون از سطح آن قابل مشاهده است. در تصویر (ب) نواحی سفید ساختار مارتنزیت^۳ خود تمپر شده در زمینه و نواحی خاکستری کاربید آهن (Fe₃C)^۴ تشکیل شده است. میلگرد پس از سرد شدن در آب

^۵ Time Temperature Transformation

^۶ Vickers

^۷ Martensite

^۸ Cementite

به دلیل دمای بالاتر مرکز آن نسبت به سطح، عمل خودتمپری رخ می‌دهد و به دلیل آنکه مارتنزیت یک فاز ناپایدار است، مقداری از کربن به دام افتاده در فاز مارتنزیت آزاد شده و تشکیل کاربید آهن (Fe_3C) می‌دهد و در مرز دانه‌ها رسوب می‌کند. در تصویر (ج) با بزرگنمایی بالاتر (۵۰۰ برابر) مقادیری نواحی بینیتی هم در زمینه مشاهده شده است. شکل ۳ تصویر (د) مربوط به نمونه سرد شده در کوره می‌باشد که ریزساختار سطح و مرکز آن ساختار فریتی-پرلیتی می‌باشد و به دلیل آن که میلگرد داخل کوره به آرامی سرد شده و زمان کافی برای نفوذ وجود داشته است باعث جوانه زنی، رشد و تشکیل ساختار فریت-پرلیت شده است.

تأثیر میکروساختار روی خواص مکانیکی میلگردها

نمودار ۴ تأثیر محیط‌های مختلف سرد کننده بر استحکام کششی و نمودار ۵ میزان ازدیاد طول نمونه‌ها را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود رابطه مستقیمی بین سرعت سرد کنندگی محیط‌ها و تنش تسلیم و استحکام کششی نهایی وجود دارد. در نتیجه با توجه به شکل قبل، هرچه سرعت سرد کنندگی محیط بالاتر باشد مقدار استحکام کششی نمونه‌ها افزایش می‌یابد که آن هم به دلیل تشکیل میکروساختار سخت مارتنزیت است که با سریع سرد کردن میلگرد از تشکیل مخلوط فریت و سمنتیت جلوگیری شده است. استحکام کششی نهایی (UTS) برای همه نمونه‌ها با افزایش سرعت سرد کنندگی محیط، افزایش یافته است [۲]. از طرف دیگر، استحکام با ازدیاد طول (کرنش) رابطه عکس داشته دارد به طوری که هرچه سختی افزایش پیدا کرده است نمونه تردتر شده و ازدیاد طول کاهش پیدا کرده است [۵]. بنابراین، نمونه سرد شده در آب از ازدیاد طول کمتری برخوردار است که نشان می‌دهد سختی میلگرد افزایش پیدا کرده است. بیشترین مقدار ازدیاد طول مربوط به نمونه سرد شده در کوره می‌باشد که به دلیل تشکیل میکروساختار تعادلی فریت-پرلیت می‌باشد. به طور کلی، خواص مکانیکی میلگردها تحت تأثیر ریزساختار کریستالی و اندازه دانه قرار دارد.

نتیجه‌گیری

- ۱) کمترین و بیشترین استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی به ترتیب برای دو نمونه سرد شده در آب و سرد شده در کوره برابر 280 MPa ، 525 MPa و 399 MPa ، 798 MPa مشاهده شد و نشان دهنده آن است که هرچه سرعت سرد کنندگی محیط بیشتر باشد استحکام کششی میلگرد افزایش می‌یابد.
- ۲) کمترین میزان ازدیاد طول برای نمونه سرد شده در آب ۴ درصد می‌باشد و بیشترین میزان ازدیاد طول برای نمونه سرد شده در کوره ۲۵ درصد می‌باشد در نتیجه با افزایش سرعت سرد کنندگی محیط ساختار

مارتنزیت که بسیار سخت و شکننده است ایجاد شده و در نهایت باعث کاهش درصد ازدیاد طول در میلگرد می‌شود.

۳) با مقایسه میلگرد سرد شده در آب با دیگر نمونه‌ها می‌توان دریافت که ساختار فریت-پرلیت باعث افزایش درصد ازدیاد طول می‌شود و بدین منظور اگر بخواهیم استحکام کششی و درصد ازدیاد طول میلگرد به طور همزمان مقدار مطلوبی داشته باشد، باید میکروساختار را به گونه‌ای ایجاد کنیم که هر دوساختار فریت-پرلیت و مارتنزیت تمپر شده را در میکروساختار میلگرد کنار هم باشد.

۴) بیشترین مقدار سختی برای میلگرد سرد شده در آب HV ۳۳۷ و کمترین مقدار سختی برای میلگرد سرد شده در کوره HV ۱۷۰ می‌باشد در نتیجه می‌توان گفت افزایش سرعت سرد کردن باعث افزایش سختی میلگرد می‌گردد.

مراجع

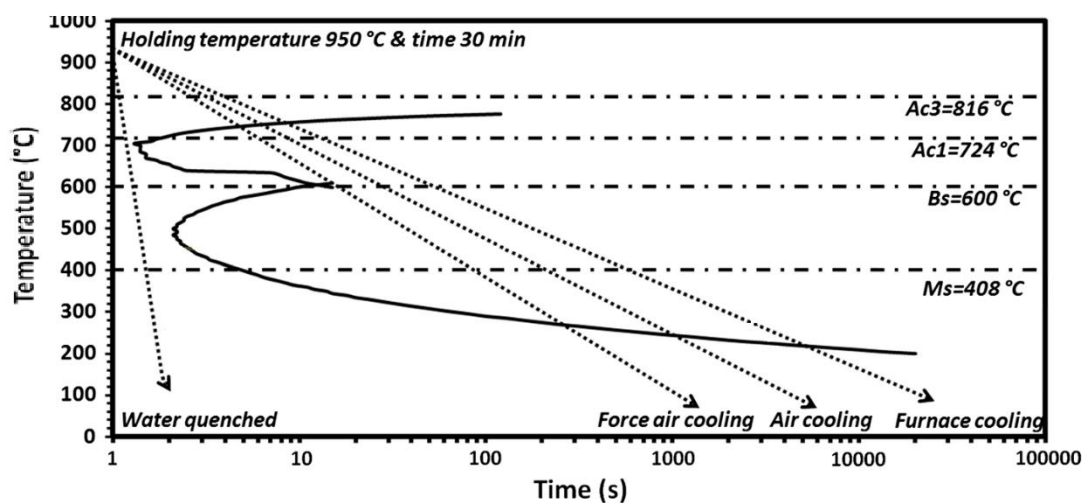
- [۱] ص. محمدجواد، "بررسی تأثیر دبی آب و اندازه میلگرد در عملیات حرارتی فولادهای ساده کم کربن به روش ترمکس"، دانشگاه شهرکرد، دانشکده فنی و مهندسی، ۱۳۹۷.
- [2] M. S. Kabir, M. M. Islam, and M. M. A. Bepari, "Impact Toughness of Concrete Reinforcement Bars Produced by the THERMEX Process and Ordinary Rolling Process," Int. J. Innov. Tech. Explor. Eng, 2014, vol. 4, pp. 53-59.
- [3] P. K. Katiyar, P. K. Behera, S. Misra, and K. Mondal, "Comparative corrosion behavior of five different microstructures of rebar steels in simulated concrete pore solution with and without chloride addition," Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, vol. 28, no. 10, pp. 6275-6286.
- [4] H. Jespersen, "Influence of the cooling rate during quenching on the toughness at typical working temperatures of die-casting dies," la metallurgia italiana, 2009.
- [5] M. Yunan Hasbi, M. Budiman, and B. Adjiantoro, "Developing of Mechanical Properties for Reinforcing Bar Steel through Heat Treating with Various Cooling Media," Solid State Phenomena, 2017, vol. 266, pp. 267-271.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی میلگردهای مورد استفاده.

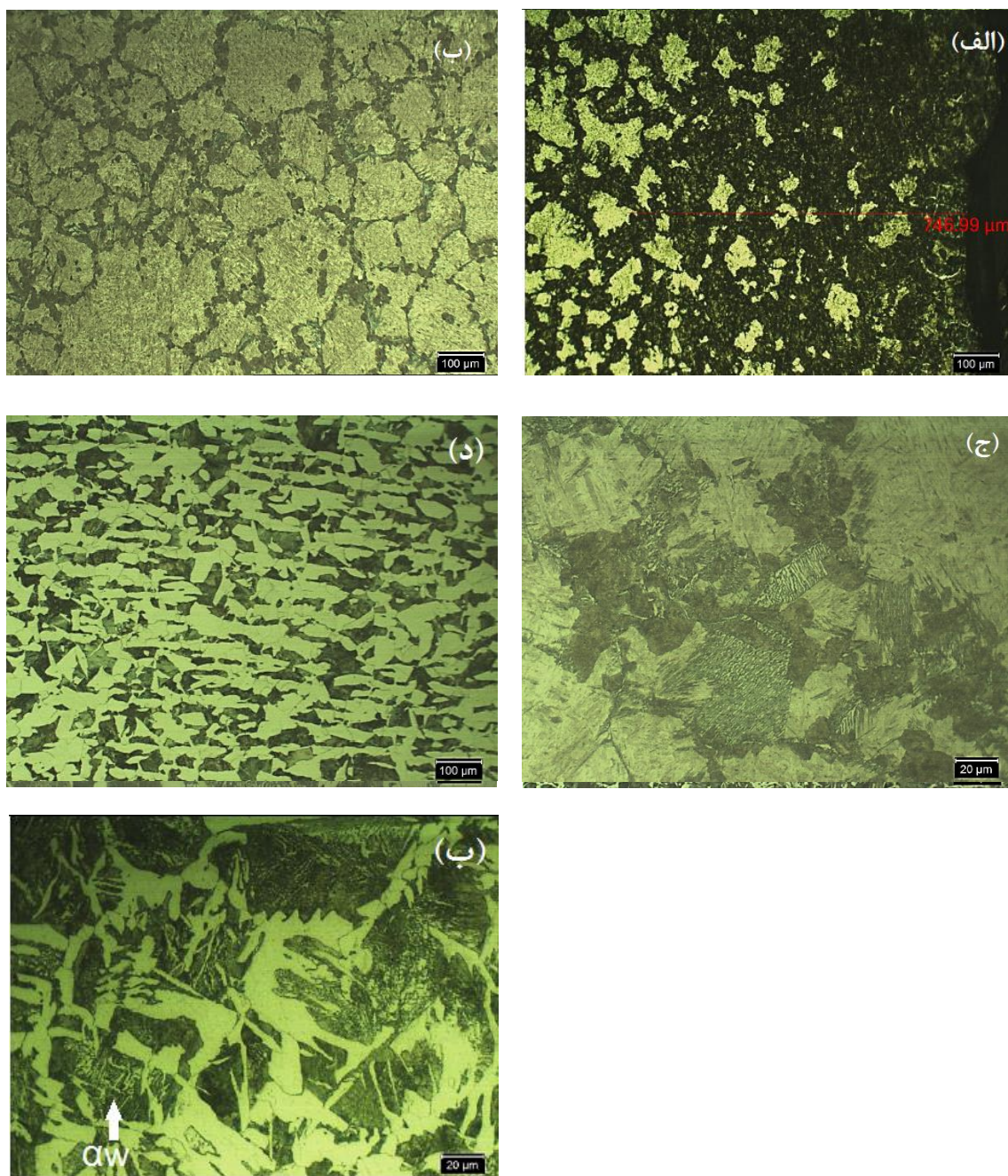
Fe	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
98.3	0.363	0.782	0.32	0.016	0.009	0.016	0.017	0.005

جدول ۲- عملیات حرارت انجام گرفته روی میلگردها، ساختار کریستالی و سختی ویکرز.

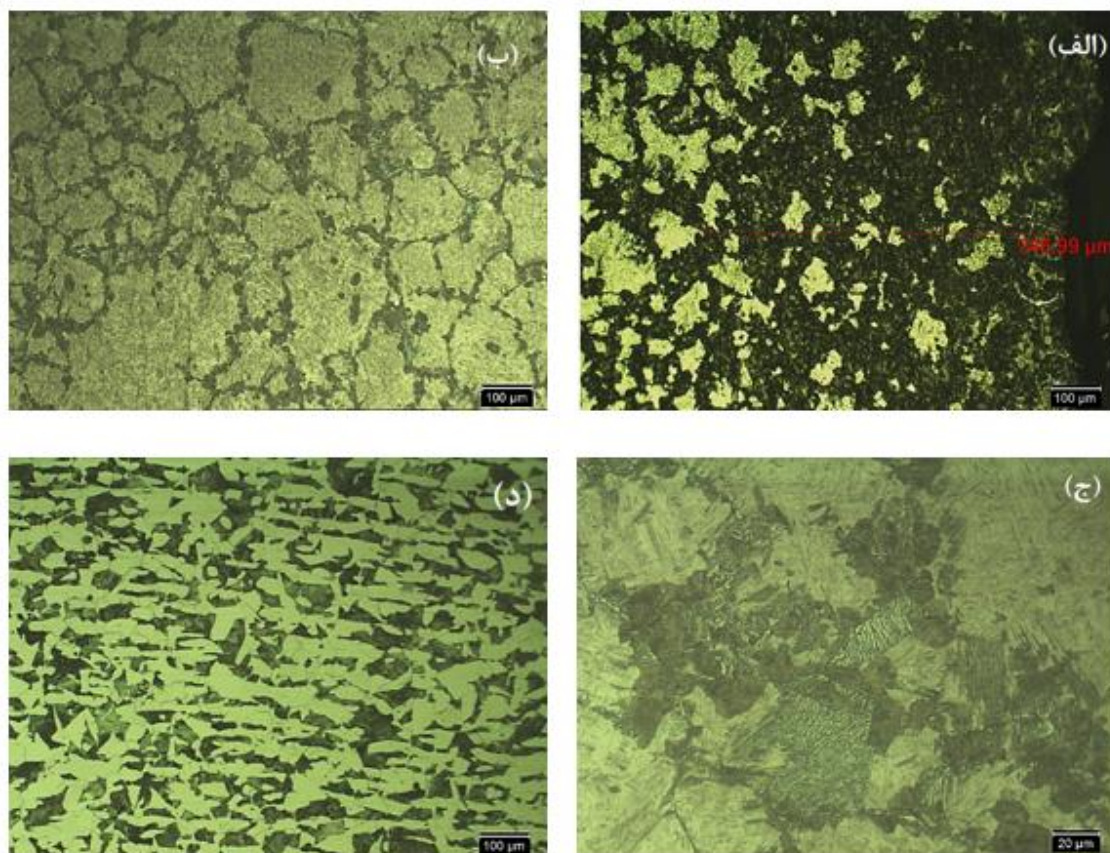
میلگرد	عملیات حرارتی	ریزساختار	سختی (ویکرز)
۱	سرد شده در کوره	فریت-پرلیت دانه درشت در زمینه	۱۶۷-۱۷۳
۲	سرد شده در هوای آزاد	ساختار پرلیتی به همراه نواحی فریت، فریت سوزنی و فریت ویدمن اشتاتن در زمینه	۱۸۹-۱۹۴
۳	سرد شده به وسیله جریان هوا	ساختار پرلیتی به همراه نواحی فریت، فریت سوزنی و فریت ویدمن اشتاتن در زمینه	۲۲۷-۲۴۲
۴	میلگرد سرد شده در آب	مرکز: ساختار مارتنزیت خودتمبر، بینیتی و کاربید آهن رسوب کرده در مرز دانه‌ها در زمینه. سطح: ساختار مارتنزیت تمبر شده در زمینه و مرزدانه‌ها مقادیری نواحی بینیتی در زمینه.	۳۲۸-۳۴۶



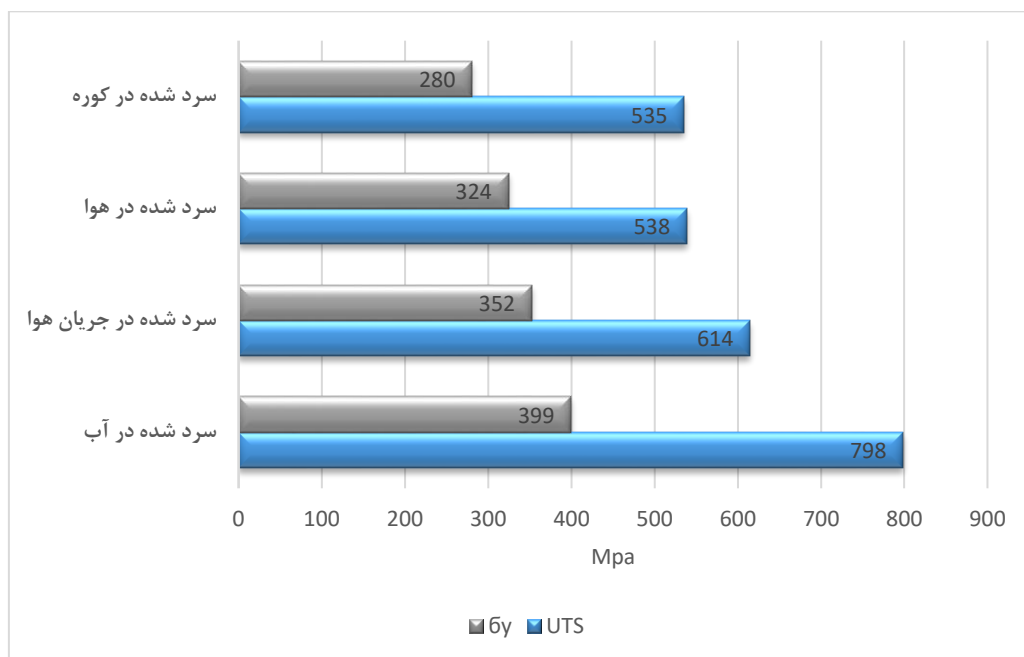
شکل ۱- نمودار TTT مربوط به میلگردها که به صورت شماتیک عملیات حرارتی انجام گرفته را نشان می دهد [۳].



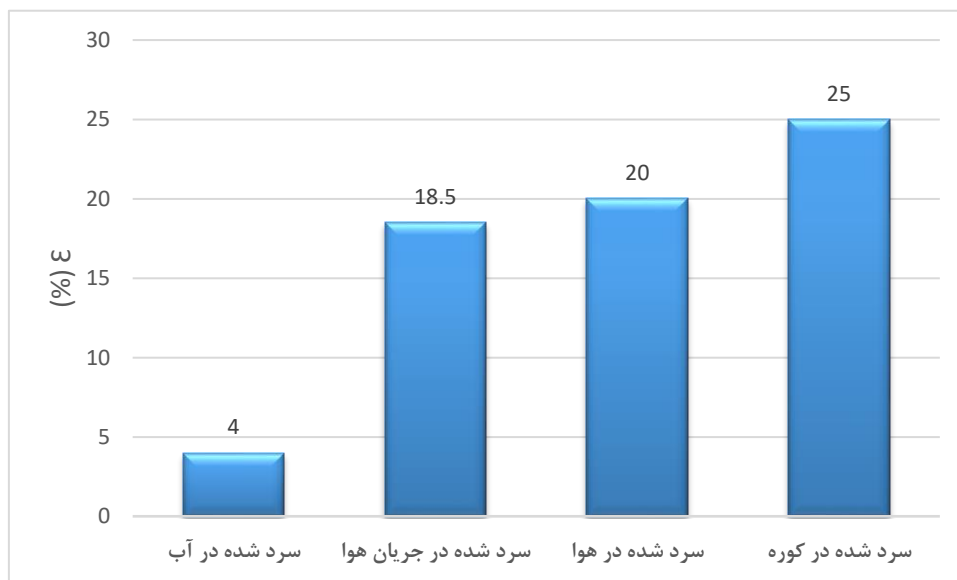
شکل ۲- (الف و ب) تصویر از زمینه میلگرد سرد شده در هوا می باشد که نواحی تیره فاز پرلیت و نواحی روشن مربوط به فاز فریت ، فریت سوزنی و فریت ویدمن اشتاتن می باشد. (ب) و (د) به ترتیب تصاویر از سطح نمونه سرد شده در هوا و جریان هوای سرد می باشد که شاهد هستیم در بعضی از نواحی فریت ویدمن اشتاتن هم تشکیل شده است.



شکل ۳- (الف و ب) تصویر از سطح و زمینه میلگرد سرد شده در آب را می‌باشد و عمق مارتنزیت تمپر شده در سطح تشکیل شده و تشکیل ساختار مارتنزیت تمپر شده در زمینه و تشکیل و رسوب کاربید آهن در مرزخانه‌ها. (ج) تصویر ساختار بینیت می‌باشد که در برخی از نواحی زمینه تشکیل شده است. (د) تصویر از زمینه میلگرد سرد شده در کوره می‌باشد که دارای ریزساختار فریت-پرلیت می‌باشد.



شکل ۴- نمودار مقدار تنش تسلیم و UTS در چهار میلگرد با عملیات حرارتی مختلف.



شکل ۵- نمودار میزان کرنش در چهار میلگرد با عملیات حرارتی مختلف.

