نحوه استناد به این مقاله: طالبی، امیر؛ قبیتی حسب، مهدی (۱۳۹۵). تاثیر شرایط عملیات حرارتی بر خواص کششی فولاد سه فازی. تبدیل انرژی، ۱(۴)، ۱۱-۱۵.

تاثیر شرایط عملیات حرارتی بر خواص کششی فولاد سه فازی

امیر طالبی[۱] و مهدی قبیتی حسب [۲و*]

[۱] آموزشکده فنی و حرفه ای سما، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، دزفول، ایران.
[۲] استادیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، دزفول، ایران.

دریافت: خرداد ۹۵، بازنگری: تیر ۹۵، پذیرش: تیر ۹۵

چکیده

در این تحقیق، ابتدا نمونه های فولاد ۴۱۴۰ در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت حرارت داده شدند. سپس در دمای ۷۲۰ درجه سانتی گراد به مدت سه دقیقه نگهداری و به حمام نمک با دماهای متفاوت ۳۸۰، ۴۰۰، ۴۲۰ و ۴۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴ دقیقه منتقل و در نهایت در آب کوئنچ گردیدند. بر اساس نتایج تست کشش با افزایش دمای حمام نمک (دمای آستمپرینگ) مقادیر استحکام تسلیم، استحکام کششی و ازدیاد طول کاهش می یابد. شکست نگاری نمونه های تست کشش با میکروسکوپ استریو نشان داد که با افزایش دمای حمام نمک، سطح شکست از نرم به ترد تغییر می کند.

* **عهده‌دار مکاتبات:** ghobeiti@iaud.ac.ir

کلمات کلیدی: بینیت، مارتنزیت، استحکام تسلیم، استحکام کششی، سطح شکست.

۱- مقدمه

فولادهای سه فازی شامل کسر حجمی مشخصی از فازهای با استحکام بالا مانند مارتنزیت و بینیت بوده که در زمینه نرم فریتی توزیع شده اند [۱]. زمینه نرم فریتی در این فولادها منجر به انعطاف پذیری بالا می شود؛ در حالی که استحکام و چقرمگی آنها به حضور جزایر سخت مارتنزیت و بینیت در زمینه یاد شده بر می گردد [۲]. ترکیب استحکام و چقرمگی مناسب به همراه فرآیند تولید ساده این دسته از فولادها آنها را به عنوان گزینه ای مناسب برای کاربرد در صنایع خودرو سازی و هوافضا مطرح کرده است [۳]. علاوه بر این، برخی دیگر از خواص مکانیکی مانند رفتار تسلیم پیوسته و نرخ کارسختی بالا، این فولادها را نسبت به سایر فولادها متمایز می نماید [۴].

اگر چه فولادهای کم آلیاژ استحکام بالا (HSLA) دارای استحکامی بالاتر از فولادهای فریتی - پرلیتی هستند اما شکل پذیری آنها با مشکلات فراوانی رو به رو است؛ لذا انعطاف پذیری مورد نیاز در طراحی قطعات با اشکال پیچیده، استفاده از این فولادها را شدیدا با محدودیت مواجه می کند. نتیجه این امر افزایش روز افزون کاربردهای فولادهای دو و سه فازی است [۵].

بختیاری و اکرامی [۶] طی تحقیقی تاثیر مورفولوژی بینیت را بر خواص مکانیکی فولاد ۴۳۴۰ دوفازی فریتی- بینیتی بررسی و گزارش کردند مورفولوژی بینیت تابعی از دمای آستمپرینگ است. در دماهای بالای آستمپرینگ و نزدیک به دمای تشکیل پرلیت، ریزساختار بینیت شامل بینیت بالا و توفال شکل است و در دماهای پایین و نزدیک به دمای تشکیل مارتنزیت، ریزساختار بینیت شامل بینیت پایین و سوزنی شکل است که ترکیبی از بهترین خواص (استحکام تسلیم، استحکام کششی، ازدیاد طول، چقرمگی شکست و سختی) با مورفولوژی بینیت پایین در دمای آستمپرینگ ۳۵۰ درجه سانتی گراد حاصل می شود.

زارع و اکرامی [۷] با بررسی اثر کسر حجمی مارتنزیت بر خواص کششی فولادهای سه فازی در دماهای پایین آستمپرینگ، نتیجه گرفتند که افزایش کسر حجمی مارتنزیت استحکام را افزایش می دهد.

وارشنی و همکارانش [۸] انعطاف پذیری و استحکام فولادهای سه فازی شامل فریت، بینیت و آستنیت باقی مانده را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که با افزایش دمای آستمپرینگ و همچنین افزایش سرعت کوئنچ کردن، استحکام تسلیم و استحکام کششی کاهش می یابد.

هاوران و همکارانش [۹] رابطه بین ریز ساختار بینیت و خواص مکانیکی فولادهای سه فازی کم آلیاژ را بررسی کردند و

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.2.3]

گزارش دادند که با افزایش دمای کوئنچ، از حجم فازهای بینیت و مارتنزیت کاسته و در نتیجه استحکام تسلیم و استحکام کششی کاهش می یابد.

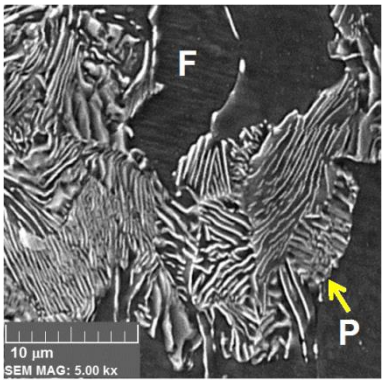
تحقیق حاضر تاثیر دمای آستمپرینگ بر خواص کششی فولاد سه فازی فریت- بینیت- مارتنزیت از جنس ۴۱۴۰ را مورد بررسی قرار می دهد.

۲- مواد و روش انجام آزمایش

ماده اولیه مورد استفاده در این تحقیق بصورت میل گرد فولادی با قطر ۱۰ میلی متر بود. آنالیز کوانتومتری این فولاد ارائه شده در جدول(۱) نشان می دهد که ترکیب آن مطابق با فولاد AISI 4140 است. بررسی های متالوگرافی این فولاد با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (مدل Mira 3-XMU، ساخت آلمان) و اچ شده با محلول نایتال ۲ درصد نشان داد که ریزساختار آن فریتی- پرلیتی می باشد (شکل(۱)).

جدول(۱): آنالیز کوانتومتری فولاد مورد بررسی در این تحقیق (مقادیر بر حسب درصد وزنی می باشند)

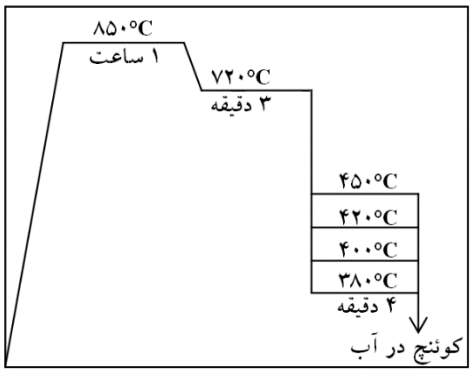
Fe	C	Cr	Mo	Mn	Si
Base	0.416	1.13	0.221	0.741	0.342
P	**S**	**Ni**	**Al**	**Co**	**Cu**
0.015	0.0214	0.0273	0.0311	0.0041	0.0119
Nb	**Ti**	**V**	**W**	**Pb**	**Sn**
0.00067	0.0018	0.0034	0.0016	0.0024	0.00075



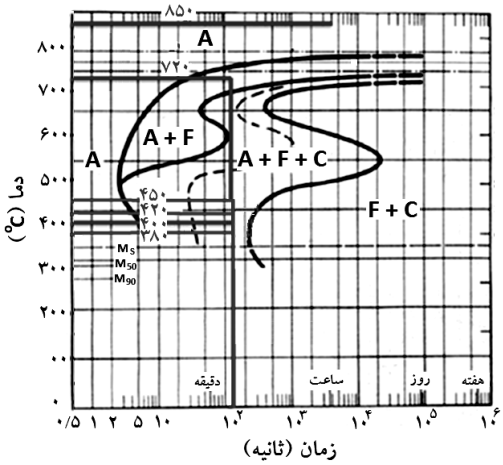
شکل(۱): ریزساختار اولیه فولاد مورد بررسی در این تحقیق (فریت: F، پرلیت: P).

برای ایجاد ریزساختار فریت- بینیت- مارتنزیت، ابتدا نمونه ها در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶۰ دقیقه نرماله و سپس در ۷۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳ دقیقه نگهداری شدند. پس از آن برای تشکیل مورفولوژی های مختلف بینیت، در حمام نمک با دماهای متفاوت ۳۸۰، ۴۰۰، ۴۲۰ و ۴۵۰ درجه سانتی گراد به مدت ۴ دقیقه نگهداری و در آب کوئنچ شدند (شکل(۲)).

دماها و زمان های مذکور بر اساس نمودار دما- زمان- استحاله (T-T-T) فولاد ۴۱۴۰ (شکل(۳)) انتخاب گردیده است. برای مثال در دماهای بالاتر از ۷۲۰ درجه سانتی گراد، زمان اتمام استحاله در منطقه دوفازی فریت- آستنیت بسیار طولانی است. در دماهای کمتر از آن زمان استحاله خیلی کوتاه است و امکان تشکیل ریزساختار کاملا فریتی وجود دارد. در نتیجه بهترین دما برای دو فازی کردن، دمای ۷۲۰ درجه سانتی گراد می باشد که در این دما طبق نمودار T-T-T (شکل(۳)) با گذشت زمان ۳ دقیقه، در منطقه دوفازی هستیم. انتخاب محدوده دمایی ۳۸۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی گراد به این دلیل است که این محدوده دمایی، پایین تر از دمای تشکیل پرلیت و بالاتر از دمای تشکیل مارتنزیت می باشد. انتخاب زمان ۴ دقیقه در این دما برای اطمینان از تشکیل بینیت است. در این تحقیق، از کوره عملیات حرارتی الکتریکی (مدل AZAR 1250، ساخت ایران) و کوره حمام نمک (مدل SAMIM 1250، ساخت ایران) و نمک مذاب AS140 استفاده گردید. با انتخاب نمک مناسب از تغییر ترکیب شیمیایی قطعه در حمام نمک جلوگیری می شود. حمام نمک موجب تغییر دمای کل قطعه با سرعت یکسان می گردد. نمونه های تست کشش با استاندارد ASTM E8/E8M آماده سازی و توسط دستگاه یونیورسال با سرعت ۱ میلی متر بر دقیقه تحت آزمون قرار گرفتند.



شکل(۲)- شماتیک سیکل عملیات حرارتی مورد استفاده در تحقیق.

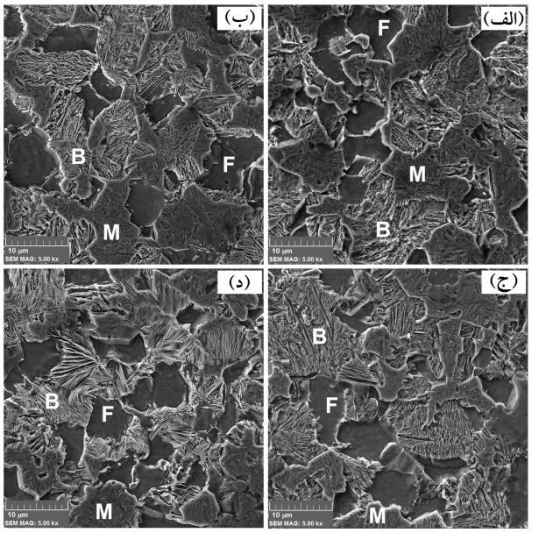


شکل(۳)- نمودار T-T-T فولاد ۴۱۴۰ [۱۰].

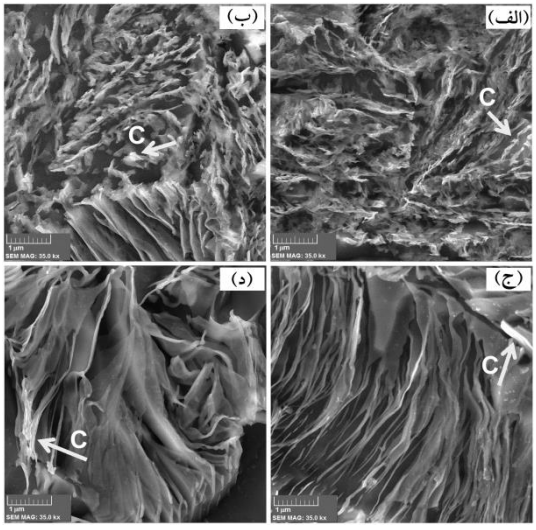
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.2.3]

۳- نتایج و بحث

مطالعه ریز ساختار نمونه های عملیات حرارتی شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی (تصویر برداری توسط الکترون های ثانویه) نشان داد با توجه به انتخاب دماهای مختلف آستمپرینگ (۳۸۰، ۴۰۰، ۴۲۰ و ۴۵۰ درجه سانتی گراد)، بینیت تشکیل شده در ساختار سه فازی، مورفولوژی های مختلفی دارد. دو فاز مارتنزیت و بینیت به صورت تیغه های روشن و فاز فریت (فاز زمینه) به رنگ تیره دیده می شود (شکل(۴)).



شکل(۴)- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه آستمپرینگ شده در دمای الف)۳۸۰، ب)۴۰۰، ج)۴۲۰ و د)۴۵۰ درجه سانتی گراد (فریت: F ، بینیت: B، مارتنزیت: M).



شکل(۵)- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از مورفولوژی فاز بینیت نمونه آستمپرینگ شده در دمای الف)۳۸۰، ب)۴۰۰، ج)۴۲۰ و د)۴۵۰ درجه سانتی گراد (کاربید موجود در بینیت: C).

مشاهده ریزساختار نمونه های عملیات حرارتی شده و استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری MIP 4 Student نشان داد که حجم فریت در تمامی آنها مقدار ثابت ۳۳٫۴ درصد است؛ در نتیجه حجم فازهای سخت مارتنزیت و بینیت ۶۶٫۶ درصد می باشد.

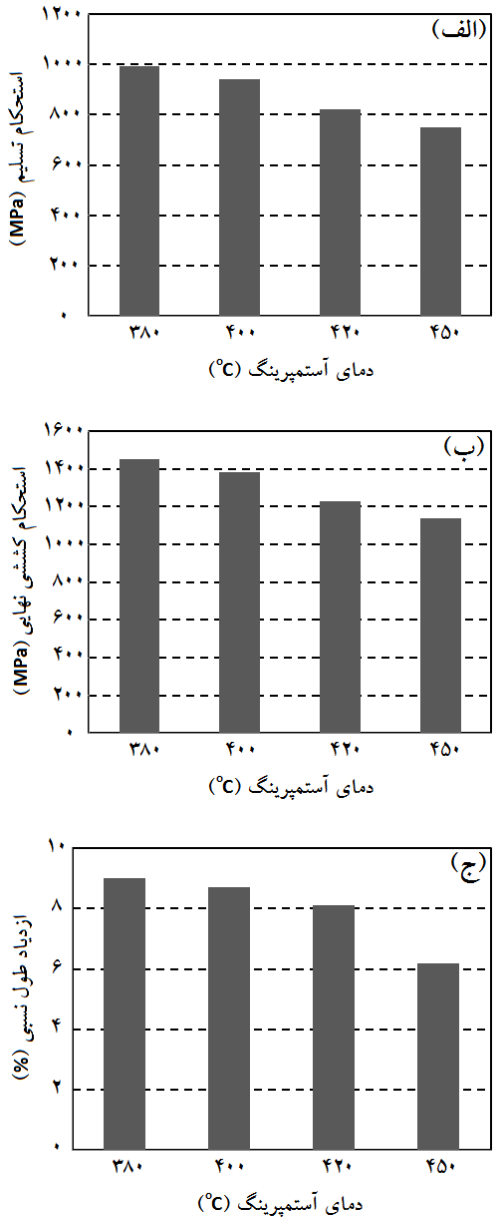
شکل(۵) تصاویر میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی یکسان از فاز بینیت در نمونه های آستمپرینگ شده در دماهای مختلف را نشان می دهد. در شکل(۵)-الف وجود تیغه های موازی سوزنی شکل بینیت در نمونه آستمپرینگ شده در دمای۳۸۰ درجه سانتی‌گراد قابل مشاهده است. این ساختار با توجه به دمای آستمپرینگ نزدیک به Ms، ساختار بینیت پایین است. شکل(۵)-ب، تیغه های موازی سوزنی شکل به همراه صفحات ضخیم از سمنتیت و فریت را نشان می دهد که نشانگر مخلوط بینیت بالا و بینیت پایین در نمونه عملیات حرارتی شده در دمای آستمپرینگ ۴۰۰ درجه سانتی گراد است. شکل(۵)-ج مورفولوژی بینیت در دمای آستمپرینگ ۴۲۰ درجه سانتی گراد را نشان می دهد. در این تصویر فقط بینیت بالایی که متشکل از لایه های ضخیم سمنتیت و فریت می باشد قابل مشاهده است. شکل(۵)-د نشان می دهد که مورفولوژی بینیت در دمای آستمپرینگ ۴۵۰ درجه سانتی گراد همانند دمای ۴۲۰ درجه سانتی گراد است با این تفاوت که صفحات سمنتیت موجود در بینیت بالایی در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد، ضخیم تر می باشند.

مقادیر استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول نسبی نمونه ها در شکل(۶) ارائه شده است. شکل(۶)-الف و ب نشان می دهد که استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی با افزایش دمای آستمپرینگ در اثر تغییر مورفولوژی از بینیت پایین با مورفولوژی سوزنی شکل به بینیت بالا با مورفولوژی توفال شکل شامل لایه های ضخیم سمنتیت، کاهش می یابد. با توجه به شکل(۶)-ج افزایش دمای آستمپرینگ، درصد ازدیاد طول نسبی را کاهش می دهد که این مطلب در توافق با تغییر مورفولوژی بینیت از بینیت پایین به بینیت بالا می باشد. در واقع یکی از ویژگی های خوب مورفولوژی بینیت پایین، علاوه بر استحکام بالای آن، بالا بودن چقرمگی آن است.سطح زیر نمودار تنش- کرنش معیار خوبی برای مقایسه چقرمگی مواد از طریق تست کشش می باشد. افزایش سطح زیر منحنی تنش- کرنش، گویای چقرمگی بالاتر و رفتار نرم تر ماده در مقابل شکست است. شکل(۷) نمودار تنش- کرنش نمونه های آستمپرینگ شده در دماهای مختلف را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، مساحت زیر نمودار با افزایش دمای آستمپرینگ کاهش می یابد؛ لذا می توان نتیجه گرفت که بینیت پایین علاوه بر استحکام بالا دارای چقرمگی بالاتری نیز است.

شکل(۸) تصاویر میکروسکوپ استریو از سطوح شکست نمونه های تست کشش آستمپرینگ شده در دماهای مختلف را نشان می دهد. سطح شکست نمونه آستمپرینگ شده در دمای ۳۸۰ درجه سانتی گراد (شکل(۸)-الف) دارای علائم شعاعی با الگوی ستاره ای شکل به همراه لبه برشی می باشد که مشخصه سطح

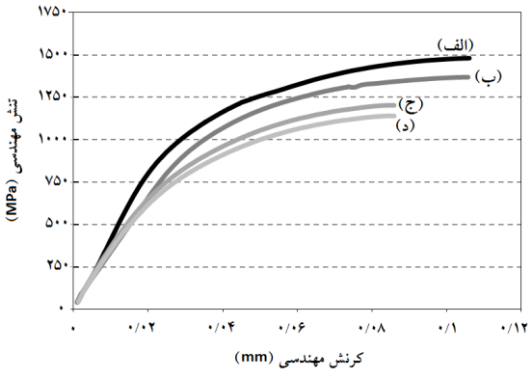
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.2.3]

شکست نرم است. این شکل دارای بزرگترین لبه برشی می باشد که نشان دهنده آن است که در این نمونه بیشترین باریک شدگی (حالت گلویی در تست کشش) و در نتیجه بیشترین تغییر شکل پلاستیک قبل از شکست رخ داده است. هرچقدر عمق و ضخامت علائم شعاعی زیادتر باشد، رفتار شکست، نرم تر خواهد بود [۱۱].

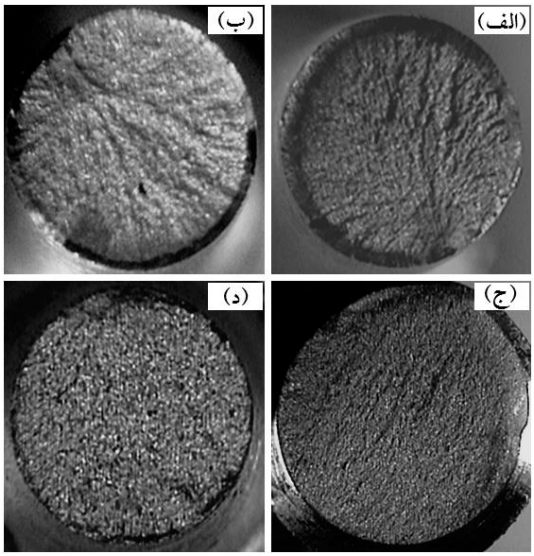


شکل(۶)- نمودار تغییرات (الف) استحکام تسلیم، (ب) استحکام کششی نهایی و (ج) ازدیاد طول نسبی در نمونه های آستمپرینگ شده در دماهای مختلف.

حجم برآمدگی الگوهای ستاره ای در شکل(۸)-ب در مقایسه با شکل(۸)-الف کمتر شده و منطقه لبه برشی آن نیز کوچکتر شده است که نشان از رفتار ترد تر نمونه آستمپرینگ شده در دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد نسبت به دمای ۳۸۰ درجه سانتی گراد دارد. در شکل(۸)-ج و د، الگوی ستاره ای شکل و همچنین مناطق لبه برشی حذف شده است که گویای وقوع شکست ترد و عدم گلویی شدن این نمونه ها است. این مشاهده ها با نتایج ازدیاد طول نسبی به دست آمده از تست کشش (شکل(۶)-ج) مطابقت دارند.



شکل(۷)- نمودار تنش- کرنش نمونه آستمپرینگ شده در دمای (الف) ۳۸۰، (ب) ۴۰۰، (ج) ۴۲۰ و (د) ۴۵۰ درجه سانتی گراد.



شکل(۸)- تصویر استریوگرافی از سطح شکست نمونه تست کشش، آستمپرینگ شده در دمای الف)۳۸۰، ب)۴۰۰، ج)۴۲۰ و د)۴۵۰ درجه سانتی گراد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، چند سیکل عملیات حرارتی با دمای آستمپرینگ مختلف ۳۸۰، ۴۰۰، ۴۲۰ و ۴۵۰ درجه سانتی گراد بر روی نمونه فولاد ۴۱۴۰ برای ایجاد ساختار سه فازی فریت- بینیت- مارتنزیت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مشاهده ریزساختاری و تست کشش نشان دادند که:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.2.3]

۱- در بازه دمایی ۳۸۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی گراد، مورفولوژی بینیت از بینیت پایین (سوزنی شکل) به بینیت بالا (لایه ای و توفال شکل) تغییر می یابد.

۲- با افزایش دمای آستمپرینگ، مقادیر استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی و ازدیاد طول نسبی کاهش می یابند که متاثر از تغییر مورفولوژی بینیت است.

۳- سطح زیر منحنی تنش- کرنش نمونه آستمپرینگ شده در دمای ۳۸۰ درجه سانتی گراد بیش از سایر نمونه ها است که نشان از چقرمگی بالاتر این نمونه دارد و بررسی های شکست نگاری نیز رفتار شکست نرم تر این نمونه نسبت به سایر نمونه ها را تایید کرد.

مراجع:

[1] M. Pouranvari, Work hardening behavior of Fe-0.1C dual phase steel, BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, 157(1) (2012) 44-47.

[2] G.A. Cingara, Y. Ososkov, M.K. Jain, D.S. Wilkinson, Effect of martensite distribution on damage behaviour in DP600 dual phase steels, Journal of Materials Science and Engineering A, 516 (2009) 7-16.

[3] M. Akbarpour, High temperature mechanical properties of triple phase steels, Journal of Materials Letters, 61 (2007) 1023-1026.

[4] M. Akbarpour, A. Ekrami, Effect of ferrite volume fraction on work hardening behavior of high bainite dual phase (DP) steels, Journal of Materials Science and Engineering A, 477 (2008) 306-310.

[5] A. Itami, M. Takahashi, K. Ushioda, plastic stability of retained austenite in the cold-rolled 0.14%C-1.9%Si-1.7%Mn sheet steel, ISU International, 35 (1995) 1121-1127.

[6] R. Bakhtiari, A. Ekrami, The effect of bainite morphology on the mechanical properties of a high bainite dual phase (HBDP) steel, Journal of Materials Science and Engineering A, 525 (2009) 159-165, 2009.

[7] A. Zare, A. Ekrami, Influence of martensite volume fraction on tensile properties of triple phase ferrite–bainite–martensite steels, Journal of Materials Science and Engineering, 530 (2011) 440-445.

[8] A. Varshney, S. Sangal, S. Kundu, K. Mondal, Super strong and highly ductile low alloy multiphase steels consisting of bainite, ferrite and retained austenite, Materials and Design, 95 (2016) 75-88.

[9] G. Haoran, G. Guhui, G. Xiaolu, R.D.K. Misra, B. Bingzhe, Structure-property relation in a quenched-partitioned low alloy steel involving bainite transformation, Journal of Materials Science and Engineering A, 667 (2016) 224-231.

[10] M. Samler, Jominy End Quenching of 4140 Steel: The effect of time and temperature on austenitic grain growth, Worcester Polytechnic Institute, Bachelor thesis, p.8 (2010).

[11] H. Kim, L. Lee, F. Barlat, D. Kim, M. Lee, Experiment and modeling to investigate the effect of stress state, strain and temperature on martensitic phase transformation in TRIP-assisted steel, Joural of Acta Materialia, 97 (2015) 435-444.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.2.3]