

تأثیر فرآیند عملیات حرارتی بر رفتار خستگی فولاد AISI 1060

محسن مهدی نیا^۱، امیر مره صدیقی^۲، سید احمد جنابعلی جهرمی^۳

^۱ گره ملی صنعتی فولاد ایران

^۲ کارشناس ارشد مهندسی مواد - دانشگاه شیراز

^۳ استاد دانشکده مهندسی مواد - دانشگاه شیراز

چکیده

در پژوهش حاضر تأثیر عملیات حرارتی کوئنچ و بازپخت بر رفتار خستگی فولاد AISI 1060 با هدف بررسی تأثیر دما و مدت زمان بازپخت مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا نمونه های مورد نظر در دمای 800°C به مدت ۱ ساعت آستینته کامل شده سپس در حمام آب 25°C کوئنچ شدند سپس در دماهای 250°C ، 450°C و 650°C در مدت زمان های ۱ و ۲ ساعت عملیات بازپخت انجام شد. نتایج خواص مکانیکی نمونه های مورد آزمایش نشان داد که سختی، استحکام و حد خستگی با افزایش مدت زمان و دمای بازپخت کاهش می یابد. مطالعات میکروسکوپی (SEM) سطوح شکست خستگی نشان داد رشد ترک در نمونه بازپخت شده در دمای 250°C در مدت ۱ ساعت کندتر از نمونه بازپخت شده در دماهای بالاتر و مدت زمان بیشتر است. همچنین با افزایش دمای بازپخت مناطق جوانه زنی ترک خستگی افزایش یافته و رشد ترک سریعتر اتفاق می افتد.

کلمات کلیدی: فولاد AISI 1060، کوئنچ و بازپخت، رفتار خستگی، سختی،

امروزه عملیات حرارتی در صنایع فولاد سازی به عنوان یکی از فرآیندهای اصلی تولید برای ایجاد خواص بهینه مورد نظر در ساخت قطعات است [۱]. یکی از روش های بهبود خواص مکانیکی فولادها اعم از سختی، استحکام کششی و استحکام خستگی، انجام عملیات حرارتی بر روی آنهاست. همچنین تغییر در شرایط کوئنچ و تمپر در خواص مکانیکی تاثیر گذار است که این مسئله با تغییر در ریزساختار امکان پذیر است [۲]. شکست ناشی از خستگی، عامل اصلی در شکست های ناشی از بارگذاری دینامیکی است، به همین جهت تحقیقات زیادی جهت بهبود عمر این اجزا انجام گرفته است [۳-۴]. در آغاز دهه ۱۹۵۰ با انجام تحقیقاتی در زمینه خستگی مشخص شد که بدون درک اساسی فرآیند خستگی در سطح زیر میکروسکوپی، و بدون مطالعه سیستماتیک ماهیت کل فرآیند خستگی و مراحل وقوع آن، پیشرفت بیشتری در زمینه طراحی ایمن در مقابل خستگی امکان پذیر نیست. مسئله قابلیت اعتماد و دوام بیشتر ماشین ها و سازه ها هم که پیچیدگیشان هر روز افزوده می شد این روند را تقویت کرد. فرآیند خستگی بر اثر تغییر شکل مومسان چرخه ای بوجود می آید. در واقع بدون تغییر شکل مومسان تکراری خستگی ایجاد نمی شود. مثلا دامنه کرنش مومسان همه مواد، در حد خستگی از مرتبه 10^{-5} است. اگر این کرنش مومسان فقط یکبار تکرار شود تغییر چشمگیری در ساختار ماده ایجاد نمی کند، اما همین کرنش مومسان بسیار کم، در صورت تکرار زیاد منجر به آسیب دیدگی افزایشی و در نهایت شکست ماده می شود. اما تغییر شکل مومسان منجر به تغییرات برگشت ناپذیر در ریزساختار ماده، و بخصوص در ریزساختار نابعجایی ها می شود. بنابراین فقط تغییر شکل مومسان چرخه ایی به عنوان تعیین کننده در فرآیند خستگی است [۵]. هفتیرمن و همکارانش نیز اثر دمای تمپر بر استحکام خستگی فولاد تاینس ۶۵۸۲ را بررسی کردند. در این پژوهش خصوصیات مکانیکی در چند دمای مختلف تمپر کردن مقایسه شد. آنها بهترین استحکام خستگی را در 300°C بدست آوردند. نتایج آنها نشان داد که در این دما، اندازه میکروترک ها کمترین است [۴]. شاین لی و همکارانش خواص مکانیکی و ریز ساختار فولاد ۴۳۴۰ در دماهای مختلف بازپخت را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که دمای بازپخت و زمان نگهداری نمونه ها در آن دما تاثیر آشکاری بر روی خواص مکانیکی و سختی کرنش دارد. همچنین مورفولوژی شکست نمونه ها در دمای 200°C تا 300°C به صورت ورقی شکل بود [۶]. در این تحقیق تاثیر دما و زمان عملیات حرارتی بر رفتار خستگی فولاد AISI 1060 بررسی شده است.

روش تحقیق

در این پژوهش برای تهیه نمونه ها از فولاد AISI 1060 استفاده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد توسط

دستگاه کوانتومتری اندازه گیری شده است (جدول ۱). به منظور انجام عملیات حرارتی، نمونه های مورد آزمایش در داخل کوره در دمای ۸۰۰ درجه سانتی به مدت ۱ ساعت نگه داشته شدند، تا ریزساختاری کاملاً آستنیتی بدست آید. سپس نمونه ها از کوره خارج و در حمام آب 25°C سریع سرد شدند. نمونه ها تحت عملیات بازپخت در دماهای 250°C ، 450°C ، 650°C به مدت ۱ و ۲ ساعت در داخل کوره قرار گرفتند و سپس در دمای محیط سرد شدند. برای مشاهده ریزساختار، نمونه های متالوگرافی ابتدا پولیش شده و در محلول حکاکی نایتال ۲٪ اچ شدند. نمونه های بدست آمده از سیکل های مختلف عملیات حرارتی از نظر خواص کششی و خستگی مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمون کشش بر اساس استاندارد ASTM- E 8M تهیه و آزمون در دمای اتاق با سرعت 1mm/min و آزمون خستگی بر اساس استاندارد ASTM- E466 با استفاده از دستگاه تست خستگی از نوع خمشی-چرخشی با فرکانس 5800rpm و نسبت تنش $R=-1$ بر روی نمونه های ساخته شده انجام گرفت. شکل ۱ نقشه نمونه های خستگی از میله عملیات حرارتی شده را نشان می دهد. تنش در 10^7 سیکل به عنوان حد خستگی در نظر گرفته شد. جهت بررسی ریزساختار و سطوح شکست از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Leica Cambridge با ولتاژ 20KV استفاده شد. سختی نمونه ها بعد از انجام عملیات حرارتی در مقیاس HRC اندازه گیری شد.

نتایج و بحث

شکل ۲ تصاویر (SEM) مربوط به ریزساختار نمونه های مورد آزمایش در دمای 250°C و 650°C نشان داده است. همانطور که مشاهده می شود ساختار کاملاً مارتنزیتی است بنابراین در مدت عملیات آستنیت شدن فرصت کافی جهت استحاله فراهم شده است. ابتدا عملیات بازپخت در سه دمای 250°C ، 450°C و 650°C به مدت ۱ و ۲ ساعت انجام شد. نتایج نشان داد زمان بازپخت و دمای بازپخت تاثیر زیادی بر خواص مکانیکی دارد. تصاویر (الف) و (ب) به ترتیب نمونه های حاصل از بازپخت در دمای 250°C و 650°C را نشان می دهد. نمونه بازپخت شده در دمای 250°C تیغه های مارتنزیت ریز و با افزایش دمای بازپخت به دمای 650°C تیغه های مارتنزیت درشت تر می شود. زیرا با افزایش دمای بازپخت کاربیدها درشت تر شده که سبب بزرگتر شدن تیغه های مارتنزیتی خواهند شد.

نتایج آزمون های مکانیکی بر روی نمونه های انجام شده در جدول ۲ ذکر شده است. تغییرات این پارامترهای مکانیکی را می توان از روی منحنی های شکل ۳ تفسیر نمود همانطور که مشاهده می شود تغییرات استحکام کششی با افزایش دمای بازپخت، از ۱ به ۲ ساعت به صورت نزولی است که نتیجه آن درشت تر شدن تیغه های مارتنزیت است. دمای بازپخت تنش های داخلی را از طریق آرایش اتم ها در

سراسر مرزها کاهش می دهد. اگر بازپخت زیر دمای 300°C انجام شود تنش های داخلی به طور کامل حذف نمی شوند. با افزایش دمای بازپخت بالای دمای 300°C درجه سانتی گراد، تنش تسلیم و استحکام نهایی به دلیل حرکت بهتر نابجایی ها، رسوب فاز سمنتیت و درشت تر شدن تیغه های مارتنزیت کاهش می یابد [۶]. نتایج آزمون سختی سنجی به ازای تغییرات درجه حرارت بازپخت در شکل ۴ نشان داده شده است. با افزایش درجه حرارت بازپخت طبق منحنی کاهش عدد سختی مشاهده می شود زیرا با افزایش درجه حرارت بازپخت کربن از شبکه مارتنزیت خارج شده و کاربیدهای تشکیل شده سبب از بین رفتن ساختار فرعی نابجایی ها می شود. شکل ۵ نمودارهای S-N نمونه های بازپخت شده در 3°C دما را نشان می دهد. حد خستگی در 10^7 سیکل فرض شده است. طبق این نمودارها با افزایش زمان بازپخت در مدت زمان های ۱ و ۲ ساعت استحکام خستگی کاهش می یابد. در آزمون های کشش نشان داده شد که بیشترین سختی و استحکام کششی مربوط به دمای بازپخت 250°C در مدت ۱ ساعت است پس با افزایش استحکام ماده حد خستگی افزایش می یابد (جدول ۲). زیرا ماده نسبت به تغییر شکل پلاستیک مقاومت بیشتری از خود نشان داده و به عنوان مانعی در برابر رشد ترک عمل می کند [۷]. از دیگر عوامل تعیین کننده بر رفتار خستگی اندازه و شکل رسوبات سمنتیت، مقدار آستنیت باقی مانده و چگالی نابجایی ها است [۸]. رسوبات ریز و کروی سمنتیت به عنوان مانعی در برابر لغزش نابجایی ها عمل کرده همچنین توزیع یکنواخت آستنیت باقی مانده به گسترده شدن لغزش کمک می کند و چگالی بالای نابجایی ها در نمونه بازپخت شده در دمای 250°C باعث افزایش عمر خستگی می شود. در نمونه های بازپخت شده در دمای 450°C و 650°C به دلیل وجود رسوبات درشت تر سمنتیت که سبب موضعی شدن سمنتیت شده و همچنین چگالی کمتر نابجایی ها باعث کاهش استحکام خستگی می شود [۹].

شکل ۶ تصاویر (SEM) از سطح شکست خستگی نمونه های بازپخت شده در 3°C دما را نشان می دهد. شکل (الف) شکست نهایی نمونه بازپخت شده در دمای 250°C در مدت ۱ ساعت را نشان می دهد که به صورت مخلوطی از نرم - ترد (شبه کلیواژ) است که علاوه بر دیپل ها، صفحات مسطح که مشخصه اصلی شکست ترد است دیده می شود. نمونه های بازپخت شده در این دما سطح شکست مسطح تری نسبت به دو دمای دیگر دارد. این امر ناشی از وجود ذرات ریز و کروی کاربیدها بوده که به عنوان مانع در برابر رشد ترک خستگی عمل می کنند. ذرات ریز و کروی کاربیدها دارای استحکام و سختی بالایی هستند که ترک توانایی برش این ذرات و عبور از آنها را ندارد بنابراین ترک مدام تغییر جهت داده و دارای سرعت کمتری است. شکل (ب) سطح شکست خستگی از نوع نرم را نشان می دهد. وجود دیپل ها در سطح شکست و آخال ها یا ناخالصی ها که در مرکز سطح تجمع یافته اند دیده می شود البته در قسمت هایی، اندکی شکست بصورت ترد است. شکل (ج) پستی و بلندی ها و حفره هایی دیده

می شود که این حفره ها سبب تسهیل جوانه زنی ترک خستگی شده اند در بعضی از قسمت های سطح شکست در نزدیکی جوانه زنی حفره هایی مشاهده نمی شود که نشان می دهد جوانه زنی در بین لایه ها اتفاق افتاده است. در این نمونه ها ترک توانایی عبور از ذرات سمیتیت را ندارد و بصورت مستقیم رشد می کند و به علت مسیر کوتاه ترک، سرعت اشاعه ترک بالا است.

نتیجه گیری

- ۱- استحکام و سختی به زمان و دمای بازپخت وابسته بوده و با افزایش زمان و دمای بازپخت در تمام حالت ها استحکام کششی، حد خستگی و سختی نمونه ها کاهش می یابد.
- ۲- نتایج آزمایش های مکانیکی نشان داد که فولاد بازپخت شده در دمای 250°C در مدت ۱ ساعت استحکام کششی (۹۸۹ MPa)، حد خستگی (۵۶۱ MPa) و سختی (۶۴ RC) بالاتری نسبت به دیگر فولادهای مورد آزمایش دارد. که ناشی از اصلاح ریزساختار مارتنزیت بوده و در نهایت باعث تغییر مواضع تشکیل ترک خستگی می شود.
- ۳- شکست خستگی نمونه بازپخت شده در دمای 250°C به صورت نیمه ترد (شبه کلیواژ) و مسطح است در حالیکه شکست خستگی در نمونه های بازپخت شده در دمای بالاتر بصورت نرم است.
- ۴- با افزایش دمای بازپخت مناطق جوانه زنی ترک خستگی افزایش یافته و رشد ترک در نمونه بازپخت شده در دمای 250°C در مدت ۱ ساعت کندتر از نمونه بازپخت شده در دماهای بالاتر است.

مراجع

- [1] G.E.Totten, C.E.Bates and N.A.Cinton "Handbook of Quench ant and quenching technology" 2nd ed, 1993, ASM, PP.189-367.
- [2] M.E. Said, Y.A.M. Badawy "Behavior of an alloy steel under different tempering condition" [Current Advances in Mechanical Design](#), Conference, Cairo, December 1988.pp13-19.
- [3] S. Y. Sirin, K. Sirin, E. Kaluc, " Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel" , Materials Characterization, 2008, Vol.59, pp. 351-358.
- [4] Haftirman, A.S.Abdul, M.A.Mat, F.Sutrisno, "Effect of tempering temperature on fatigue strength of THYSEN 6582 steel" conference on Applications and Design in Mechanical Engineering, October 2007, Kangar, Perlis, Malaysia.
- [5] علی اکبر اکرامی، " خستگی فلزات "، ۱۳۸۰، تهران، مرکز نشر دانشگاهی.
- [6] W. Sh. Lee, T. T. Su, "Mechanical properties and microstructure features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered condition" , J. mater. Process . Tech. 87,1999,pp.198-206.
- [7] Z. G. Yang, G. Yao, G.Y. Le, S.X. Li, Z.M. Chu and W.J. Hui. "the effect of inclusions on the fatigue behavior of fine grained high strength 42CrMoVNb steel" Int J Fatigue, 2004, Vol.26, pp. 959-966.

- [8] K. A. Lee and W. J. Nam, The effect of tempering temperature on the high cycle fatigue properties of high strength spring steel, proceeding Ninth international conference on fracture, Sydney-Australia, April 1997,1587-1594.
- [9] J. Schijve, "Fatigue of Structures and Materials" , Springer,2009.

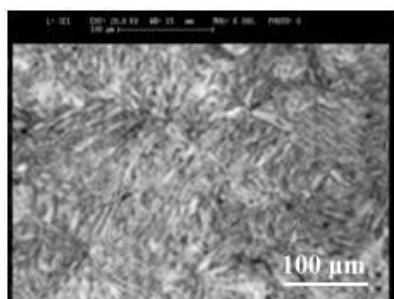
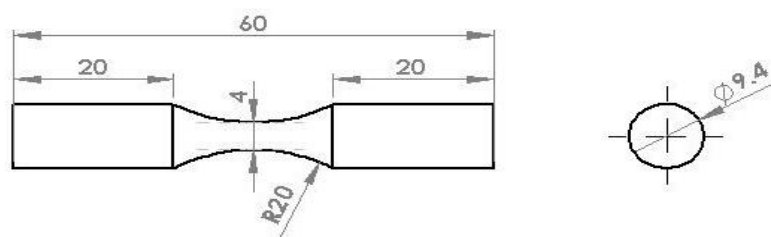
جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد AISI 1060 مورد استفاده

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo
Wt%	۰/۶۲	۰/۳۴	۰/۷۸	۰/۰۲	۰/۰۱۷	۰/۱	۰/۰۲

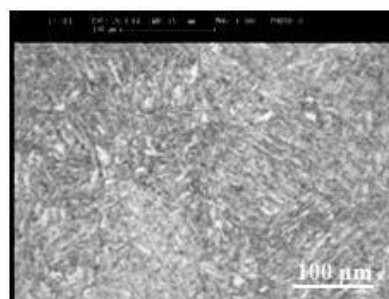
جدول ۲. خواص مکانیکی فولاد AISI 1060 تحت سیکل های مختلف عملیات حرارتی

عملیات حرارتی نمونه ها	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ازدیاد طول (%)	استحکام خستگی (MPa)	سختی (HRC)
Q.T/ 1h- 250°C	۹۸۹	۸۴۳	۱۲/۳	۵۶۱	۶۴
Q.T/ 1h- 450°C	۸۸۷	۷۳۰	۲۲	۵۴۲	۶۱
Q.T/ 1h- 650°C	۸۴۵	۶۱۸	۲۴	۵۲۳	۵۷
Q.T/ 2h- 250°C	۹۴۵	۸۲۰	۱۸/۵	۴۹۳	۶۲
Q.T/ 2h- 450°C	۷۲۶	۵۰۴	۲۴/۴	۴۰۲	۵۹
Q.T/ 2h- 650°C	۷۸۰	۶۱۰	۲۵/۳	۴۲۵	۵۵

شکل ۱. نقشه نمونه های خستگی از میله عملیات حرارتی شده

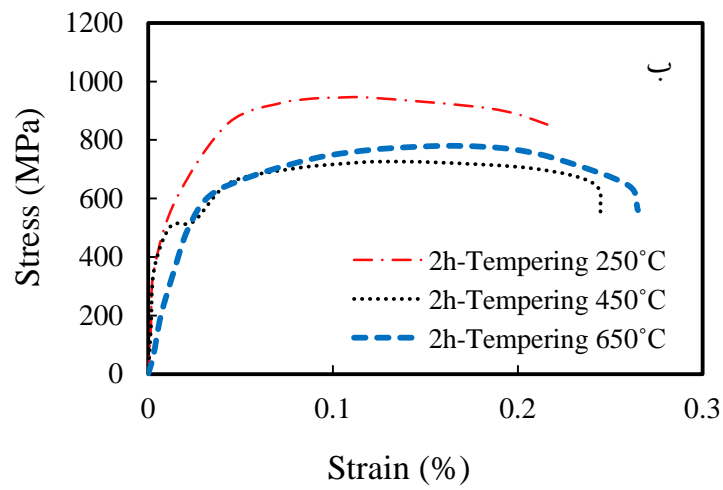
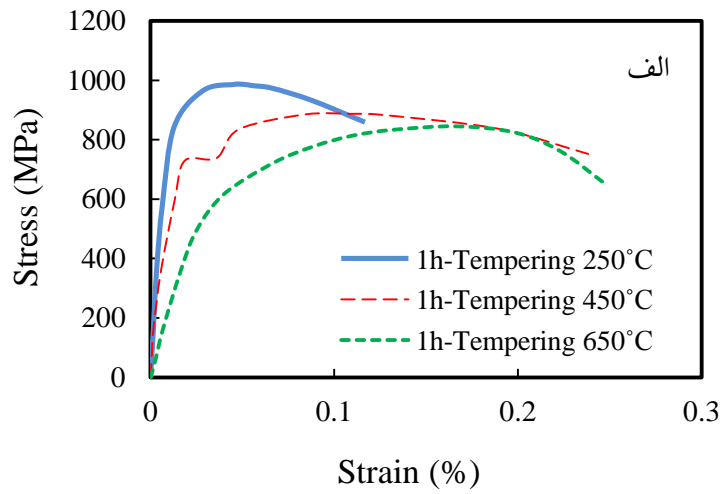


(ب)

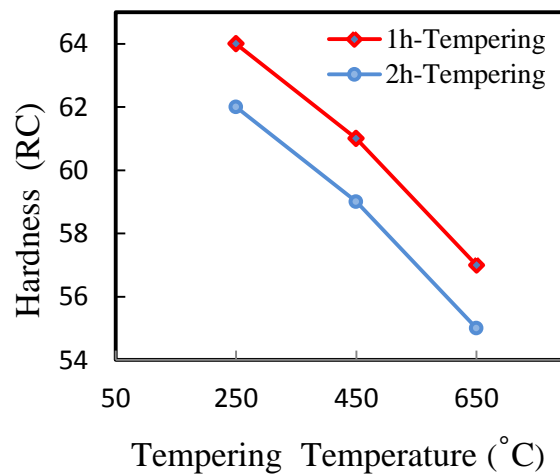


(الف)

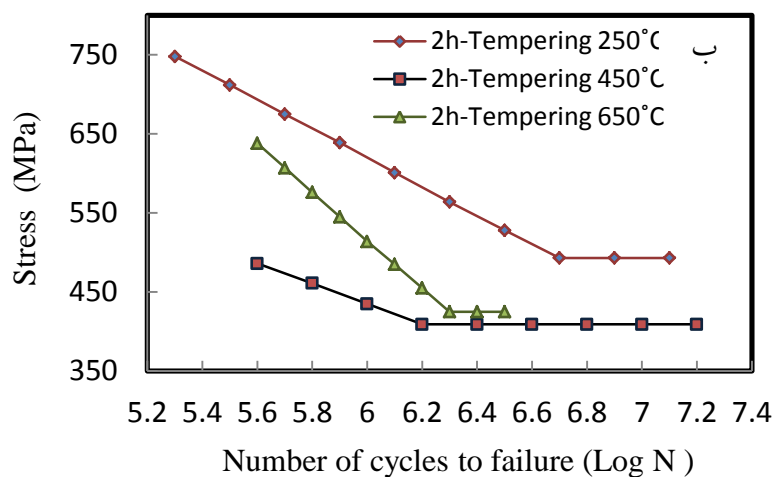
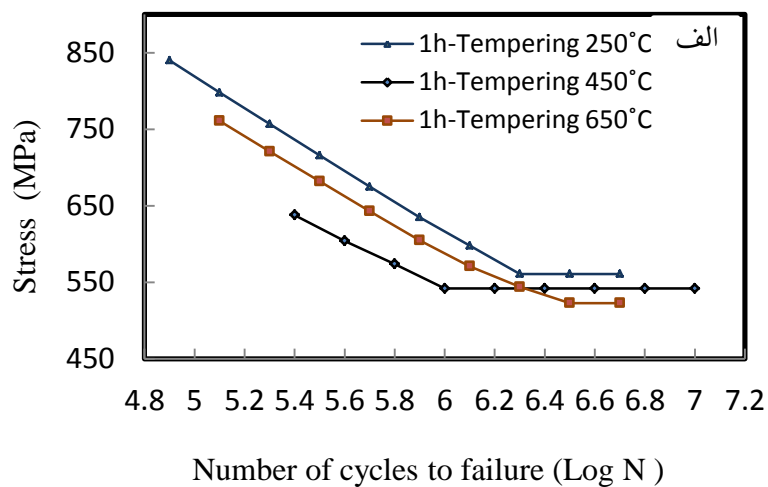
شکل ۲. ریزساختار (SEM) نمونه های بازیخت شده به مدت ۱ ساعت (الف) دمای ۲۵۰°C (ب) دمای ۶۵۰°C



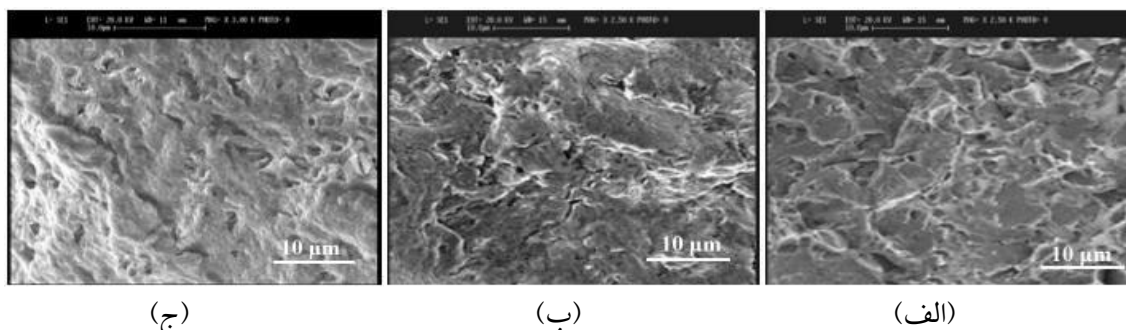
شکل ۳. نمودارهای تنش- کرنش نمونه های بازپخت شده در مدت زمان های ۱ و ۲ ساعت



شکل ۴. نمودار سختی ویکرز نمونه های بازپخت شده در مدت زمان های ۱ و ۲ ساعت



شکل ۵. نمودارهای S-N نمونه های بازپخت شده تحت سیکل های مختلف حرارتی



شکل ۶. سطوح شکست (SEM) نمونه های تست خستگی بازپخت شده به مدت ۱ ساعت (الف) دمای ۲۵۰°C

(ب) دمای ۴۵۰°C (ج) دمای ۶۵۰°C

