

تأثیر پارامترهای عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی فولاد D6AC

پرویز رهنما^۱، امیر عبدالله زاده^{۲*}، محمدعمار مفید^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد متالورژی، بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد متالورژی، بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی دکتری متالورژی، بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

zadeh@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: آبان ۱۳۸۵، پذیرش مقاله: خرداد ۱۳۸۷)

چکیده - در این تحقیق ضمن مطالعه شکلدهی لوله فولادی جنس D6AC به روش فلوفرمینگ مستقیم، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف عملیات حرارتی بر خواص قطعه، چرخه‌های مختلف عملیات حرارتی طراحی شده و خواص مکانیکی و تغییرات ریزساختار پوسته فلوفرم شده، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور از دماهای آستنیت ۸۵۰، ۹۰۰ و ۹۵۰°C برای زمانهای ۱۵ و ۳۰ دقیقه و سرد کردن در ۵۱۰°C به مدت ۱۰ دقیقه و سپس سرد کردن در روغن ۶۰°C استفاده شده است. بازگشت اولیه به مدت ۲ ساعت در ۲۵۰°C و بازگشت نهایی به مدت ۲ ساعت در دماهای ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۵۰°C انجام شد. بررسیها نشان می‌دهد که چرخه عملیات حرارتی بهینه، آستنیت کردن در ۸۵۰°C به مدت ۳۰ دقیقه و بازگشت نهایی در ۳۰۰°C است، زیرا علاوه بر ایجاد استحکام بالا و چقرمگی شکست مناسب، به دلیل ریزدانه بودن آستنیت اولیه، ویژگیهای نرمی آن نیز مطلوب است.

کلید واژگان: عملیات حرارتی، فولاد، فلوفرمینگ، اسپینینگ، D6AC، سرد کردن^۱.

۱- مقدمه

به طور کلی فولادهای ساختمانی تجاری که استحکام حداقل ۱۳۸۰ MPa را داشته باشند، فولادهای فوق مستحکم نامیده می‌شوند. به دلیل استحکام فوق العاده و بنابراین توان کاهش وزن قطعات، این فولادها در صنایع هوا فضا کاربرد ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. فولادهای فوق مستحکم را می‌توان به صورت ذیل دسته‌بندی کرد: [۱-۴].

۱. فولادهای کم‌آلیاژ کربن متوسط

(D6AC, ۳۰۰M, ۴۳۴۰)

فولاد ۴۳۴۰ شاخص‌ترین فولاد کم‌آلیاژ کربن متوسط است که اصلاحات چندی بر پایه آن صورت گرفته است. به عنوان مثال فولاد D6AC شامل ریزکننده دانه وانادیم با مختصری کربن، کروم، مولیبدن بیشتر و نیکل کمتر از ۴۳۴۰ است [۳].

۲. فولادهای میان‌آلیاژ هواسخت

(H۱۳, H۱۱)

1. Aus-Bay

این فولادها به صورت لایه نازکی در مرز تراشه‌های مارتنزیت یا به صورت ذرات بلوکی شکلی وجود دارد که در صورت پایداری مکانیکی و حرارتی (به‌ویژه لایه نازک، میان تراشه‌های مارتنزیت) موجب بهبود چقرمگی می‌شود [5]. هدف اصلی از این تحقیق، بررسی امکان‌پذیری ساخت پوسته جدار نازک به روش فلوفرمینگ، از جنس فولاد D6AC و سپس یافتن چرخه عملیات حرارتی مناسب برای سخت کردن و حصول استحکام نهایی بیش از 1800 MPa با نرمی خوب، است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق پس از انجام محاسبات لازم، طراحی پریفرم برای عملیات فلوفرمینگ انجام شد. سپس از میل‌گرد فولادی D6AC با ترکیب شیمیایی (جدول ۱)، پری‌فرم مذکور به روش ماشینکاری تهیه شد. در پایان عملیات شکلدهی سرد پوسته نهایی با انجام اسپینینگ به روش مستقیم بر روی پری‌فرم تهیه شده صورت گرفت. در طی این عملیات، پری‌فرم با ضخامت ۳/۵ و طول ۱۴۵mm به پوسته‌ای با ضخامت ۰/۷ و طول حدود ۷۵۰mm تبدیل می‌شود. این پوسته به مدت ۲ ساعت در 350°C تنش‌زدایی شد. سپس نمونه‌هایی از پوسته تهیه و در چرخه‌های عملیات حرارتی جدول ۲ قرار داده شد. بر روی نمونه‌ها، آزمون‌های سختی سنجی و کشش انجام و همچنین ریزساختار آنها پس از حکاکی با محلول نایتال + پیکرال (با نسبت مساوی) بررسی شد. علاوه بر این با استفاده از محلول اسید پیکریک فوق اشباع داغ + کلرید مس و عامل ترکننده مناسب، مرز دانه‌های آستنیت اولیه نمونه‌ها آشکار و عدد اندازه دانه آنها تعیین شد. سطح شکست نمونه‌های کشش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مطالعه شد.

فولادهای پرایاز شامل الف) فولادهای ماریچینگ (۱۸Ni(۲۰۰) و ۱۸Ni(۳۰۰)؛ ب) فولادهای با چقرمگی شکست بالا ۱۰۰ Aermet و ۱۴۱۰ AF؛ و ج) فولادهای زنگ‌نزن مارتنزیتی، سختی رسوبی و آستنیتی کار سرد شده.

فولادهای کم‌آلیاژ کرین متوسط از جمله فولاد D6AC، خواص مطلوب خود را در عملیات تبرید و بازگشت به دست می‌آورند. بدین ترتیب با تغییر پارامترهای عملیات حرارتی مانند درجه حرارت و زمان آستنیت‌کردن، سرعت سرد کردن، درجه حرارت و زمان بازگشت، می‌توان انواع تغییرات را در ساختار ایجاد کرد. مشخصه‌های ساختار میکروسکوپی که خواص مکانیکی را کنترل می‌کنند عبارتند از: ساختار زمینه (مارتنزیت، بینیت، فریت)، آستنیت باقی‌مانده، کاربید، آخال و اندازه دانه. به‌استثنای آخال، سایر مشخصه‌ها و بنابراین خواص مکانیکی را می‌توان با استفاده از عملیات حرارتی کنترل کرد [5].

تحقیقات اخیر روشن ساخته است که اگر در ساختارهای مختلط (که در آن هر جزء مسؤول برآورده ساختن نیاز خاصی است)، فاز نرم در مورفولوژی مناسب همراه با مارتنزیت کمی بازگشت شده همراه شود، می‌تواند خواص مکانیکی را به‌طور مؤثری بهبود بخشد [6]. بر اساس این تحقیقات، عملیات استحاله هم‌دما در زمان کوتاه^۱ (STIT) و عملیات حرارتی اصلاح شده^۲ (MHT) - که خواص مطلوب ساختار مختلط را به‌دنبال دارند - پیشنهاد شده است.

آستنیت باقی‌مانده در فولادهای UHS می‌تواند موجب بهبود یا تضعیف استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی، خواص شکل‌پذیری و چقرمگی شود که این تابع مقدار، مورفولوژی و به‌ویژه پایداری آن است. آستنیت باقی‌مانده در

1. Short Time Isothermal Transformation
2. Modified Heat Treatment

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده

C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Fe
۰/۴۵۳	۰/۲۹۵	۰/۰۰۶	۰/۰۱۱	۰/۷۸۶	۰/۵۵۱	۱/۰۵	۰/۹۶۲	۰/۱۰۳	۰/۰۸۴	Base

جدول ۲ شرایط عملیات حرارتی نمونه‌ها

دمای بازگشت نهایی به مدت ۲ ساعت (°C)	بازگشت اولیه	تبرید نهایی	تبرید Aus-Bay	زمان آستنیته کردن (min)	دمای آستنیته کردن (°C)	کد نمونه	ردیف			
۲۵۰	۲۵۰ °C به مدت ۲ ساعت	روغن ۶۰ °C	۵۲۰ °C به مدت ۱۰ دقیقه	۱۵	۸۵۰	۸۵۰۱۵۲۵۰	۱			
۳۰۰						۸۵۰۱۵۳۰۰	۲			
۳۵۰						۸۵۰۱۵۳۵۰	۳			
۴۵۰						۸۵۰۱۵۴۵۰	۴			
۲۵۰						۸۵۰۳۰۲۵۰	۵			
۳۰۰						۸۵۰۳۰۳۰۰	۶			
۳۵۰				۸۵۰۳۰۳۵۰	۷					
۴۵۰				۸۵۰۳۰۴۵۰	۸					
۲۵۰				۲۵۰ °C به مدت ۲ ساعت	روغن ۶۰ °C	۵۲۰ °C به مدت ۱۰ دقیقه	۱۵	۹۰۰	۹۰۰۱۵۲۵۰	۹
۳۰۰									۹۰۰۱۵۳۵۰	۱۰
۳۵۰									۹۰۰۱۵۳۵۰	۱۱
۴۵۰									۹۰۰۱۵۴۵۰	۱۲
۲۵۰									۹۰۰۳۰۲۵۰	۱۳
۳۵۰									۹۰۰۳۰۳۰۰	۱۴
۴۵۰				۹۰۰۳۰۴۵۰	۱۵					
۲۵۰				۲۵۰ °C به مدت ۲ ساعت	روغن ۶۰ °C	۵۲۰ °C به مدت ۱۰ دقیقه	۱۵	۹۵۰	۹۵۰۱۵۲۵۰	۱۶
۳۵۰									۹۵۰۱۵۳۵۰	۱۷
۴۵۰									۹۵۰۱۵۴۵۰	۱۸
۲۵۰									۹۵۰۳۰۲۵۰	۱۹
۳۵۰									۹۵۰۳۰۳۵۰	۲۰
۴۵۰									۹۵۰۳۰۴۵۰	۲۱

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر عملیات فلورمینگ بر ریزساختار و

خواص مکانیکی

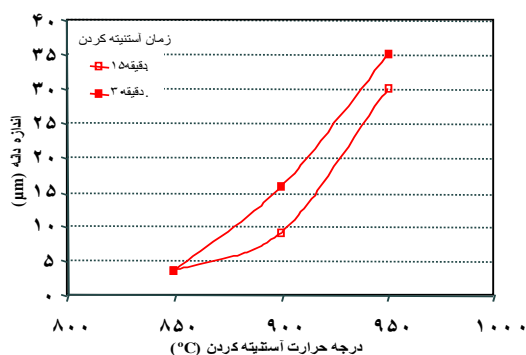
ریزساختار مواد اولیه و پوسته شکل داده شده، در شکل ۱ آورده شده است. ریزساختار مواد اولیه، شامل جزایر کوچک فریت در زمینه مارتنزیت تمپر شده در دمای بالا است. همچنین اختلاف رنگ زمینه که در بعضی مناطق به صورت نواری دیده می‌شود، به دلیل جدایش شیمیایی عناصر است. ریزساختار پوسته فلورم شده، نشان‌دهنده

کشیدگی زیاد دانه‌ها در جهت فلورمینگ بوده و اختلاف

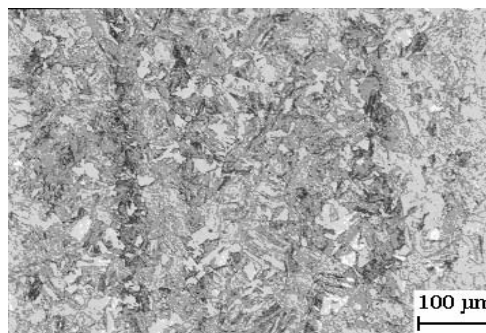
رنگ زمینه تقریباً از بین رفته است.

خواص مکانیکی مواد اولیه و پوسته فلورم شده در جدول ۳ نشان داده شده است. با عملیات فلورمینگ، استحکام تسلیم و نهایی و نیز عدد سختی افزایش می‌یابد و درصد ازدیاد طول، به شدت کم می‌شود؛ زیرا به دلیل انجام کار مکانیکی در دمای محیط، ریزساختار در جهت انجام کار سرد کشیده شده و قابلیت انجام تغییر شکل پلاستیک بعدی بر روی آن کاهش می‌یابد.

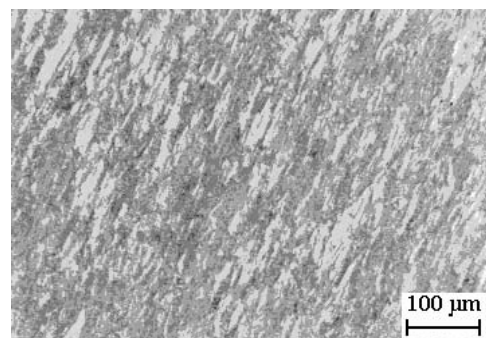
افزایش شیب منحنی پس از دمای 900°C به ویژه برای زمان ۱۵ دقیقه است. این موضوع را می توان به انحلال ذرات کاربید وانادیم پس از این دما نسبت داد؛ زیرا این کاربیدها در دماهای پایین تر مانعی برای رشد دانه ها بوده اند. با انحلال آنها و از بین رفتن این مانع، سرعت رشد دانه ها افزایش می یابد [۷]. در واقع نحوه رشد دانه های آستنیت، به پایداری حرارتی رسوب های موجود در ریزساختار بستگی دارد. بر طبق تحقیقات انجام شده [۳]، این رسوبها تا محدوده دمایی مشخصی از رشد دانه آستنیت ممانعت می کنند و از آن درجه حرارت به بعد، دانه ها به طور ناگهانی درشت می شوند. در حقیقت مهمترین عامل کنترل کننده سرعت رشد دانه ها، ذرات فاز دوم است. کاربید وانادیم نمونه ای از این ذرات است که با قفل کردن مرزدانه ها، به عنوان ریزکننده دانه ها عمل می کند. قدرت عمل این ذرات به شدت به دما بستگی دارد به طوری که افزایش دما تا درجه حرارت های بالاتر از دمای درشت شدن دانه، به حل شدن این ذرات منجر می شود. در نتیجه از تعداد آنها کاسته شده و مرزدانه ها با سرعت بیشتری می توانند حرکت کنند. در این حالت دانه ها رشد غیرعادی خواهند داشت. بنابراین با افزودن عناصر کاربیدزای مناسبی مانند وانادیم، تیتانیم و نیوبیم که در دماهای بالا پایدارند، رشد دانه ها کاهش می یابد [۸، ۹].



شکل ۲ تغییرات اندازه دانه به ازای تغییرات درجه حرارت آستنیت کردن در زمانهای مختلف



(الف)



(ب)

شکل ۱ ریزساختار الف) مواد اولیه ب) قطعه فلوپرم شده

جدول ۳ متوسط خواص کششی و سختی نمونه های مواد اولیه و قطعه فلوپرم شده

نام نمونه	استحکام تسلیم (MPa) / ۰.۰۲	استحکام نهایی (MPa)	درصد ازدیاد طول G.L.=۱۲/۵mm	عدد سختی HV
مواد اولیه	۷۰۱	۸۹۰	۳۵/۶	۳۲۰
قطعه فلوپرم شده	۱۰۷۰	۱۲۲۱	۹/۴	۳۴۱

۲-۳- تأثیر درجه حرارت و زمان آستنیت کردن بر ریزساختار و اندازه دانه آستنیت اولیه

تأثیر درجه حرارت و زمان آستنیت کردن بر اندازه دانه آستنیت اولیه در شکل ۲ نشان داده شده است. همان طور که انتظار داریم با افزایش دمای آستنیت کردن (و با تأثیر کمتر زمان) اندازه دانه ها بزرگتر می شود. نکته قابل توجه در شکل ۲

به نظر می‌رسد که این شرایط عملیات حرارتی برای استحاله کامل آستنیت و یکنواخت شدن ترکیب شیمیایی آن کافی نبوده است. لذا سختی‌پذیری در نقاط مختلف ساختار یکسان نبوده و موجب تشکیل فریت در ریزساختار شده است.

۳-۳- تأثیر درجه حرارت و زمان آستنیت کردن بر خواص مکانیکی

روند تغییرات عدد سختی بر حسب تغییرات دمای آستنیت کردن (شکل ۴) برای زمان ۳۰ دقیقه کاملاً نزولی است. اما برای زمان ۱۵ دقیقه این رفتار تکرار نشده و عدد سختی نمونه‌هایی که در دمای 850°C به مدت ۱۵ دقیقه آستنیت شده‌اند به صورت دور از انتظاری کم بوده است. دو عامل مهم و تأثیرگذار بر خواص مکانیکی نمونه‌ها - که اندرکنش آنها روند تغییرات این خواص را تعیین می‌کند- عبارتند از:

۱- انحلال کامل کربن و عناصر آلیاژی در آستنیت

۲- اندازه دانه آستنیت اولیه

با افزایش درجه حرارت و زمان آستنیت کردن، اندازه دانه‌های آستنیت اولیه بزرگتر خواهد شد. بزرگ شدن اندازه دانه آستنیت اولیه و بنابراین بسته‌ها و تیغه‌های مارتنزیتی با افزایش دمای آستنیت کردن، موجب کاهش استحکام و عدد سختی می‌شود [۱۰، ۱۱]. یعنی عدد سختی نمونه‌های 850°C و 850°C می‌باید بیشتر از نمونه‌های متناظر آستنیت شده در 900°C باشد. در توضیح کم بودن عدد سختی نمونه‌های آستنیت شده در 850°C می‌توان گفت که به دلیل پایین بودن دما و کم بودن زمان آستنیت کردن، این فرایند به‌طور کامل انجام نشده است. یعنی آستنیت کاملاً همگن تشکیل نشده و به همین دلیل سختی‌پذیری در نقاط مختلف ساختار

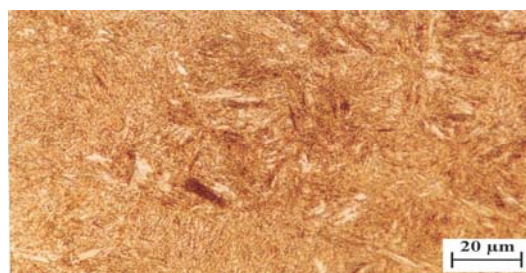
در شکل ۳ تأثیر افزایش درجه حرارت آستنیت کردن بر ریزساختار نشان داده شده است. با افزایش دمای آستنیت کردن، اندازه دانه‌های آستنیت اولیه و در نتیجه اندازه بسته‌های مارتنزیتی - که ارتباطی مستقیم با اندازه دانه‌های آستنیت اولیه دارند - بزرگتر می‌شود. به این ترتیب تیغه‌های مارتنزیتی هم بزرگتر خواهند شد [۹]. یکی دیگر از نکات قابل توجه، وجود نواحی فریتی در امتدادهای خاص در ساختار میکروسکوپی نمونه‌هایی است که در دمای 850°C به مدت ۱۵ دقیقه آستنیت شده‌اند (شکل ۳-الف).



(الف)



(ب)



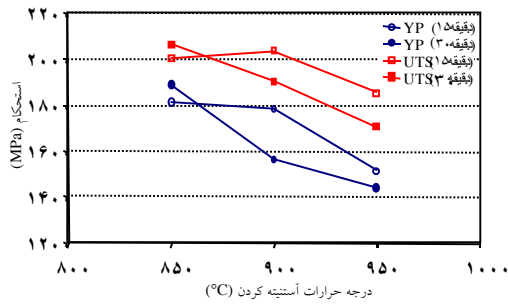
(ج)

شکل ۳ تغییرات ریزساختار با درجه حرارت آستنیت کردن

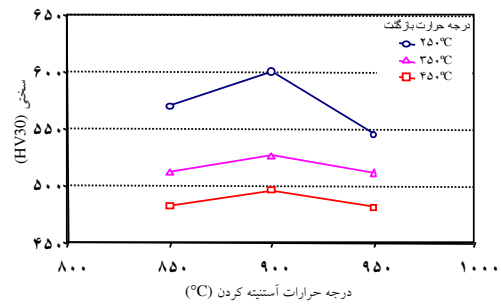
الف) 850°C (ب) 900°C و (ج) 950°C

کاهش استحکام تا 950°C دیده می‌شود. از آنجاکه در دمای 850°C افزایش زمان آستنیته کردن از ۱۵ به ۳۰ دقیقه تغییر چندانی را در اندازه دانه را ایجاد نمی‌کند،

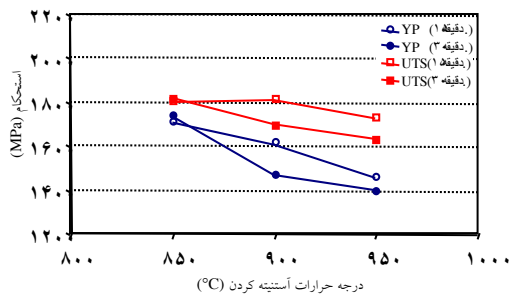
یکسان نبوده است. بنابراین در هنگام سرد کردن در ساختار فریت پرویوتکتوئید تشکیل شده است. ساختار میکروسکوپی یکی از این نمونه‌ها در شکل ۳-الف نشان داده شده است.



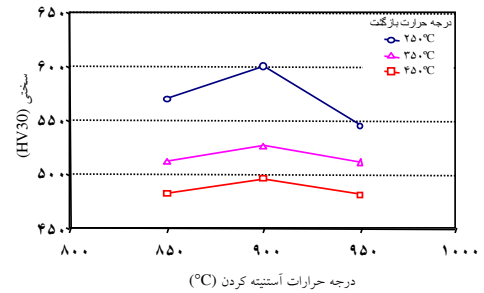
(الف)



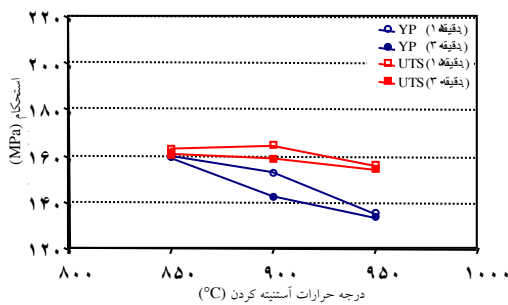
(الف)



(ب)



(ب)



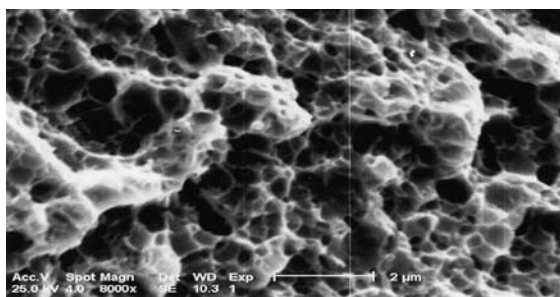
(ج)

شکل ۴ تغییرات عدد سختی به‌ازای تغییرات درجه حرارت آستنیته کردن برای دماهای بازگشت (الف) زمان ۱۵ دقیقه (ب) زمان ۳۰ دقیقه

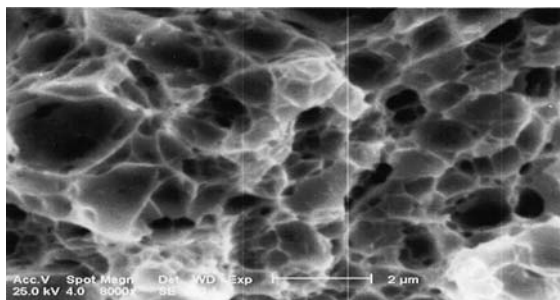
اثر شرایط آستنیته کردن بر خواص کششی در شکل ۵ نشان داده شده است. روند غالب و عمومی در این شکل‌ها کاهش استحکام با افزایش درجه حرارت و زمان آستنیته کردن به‌ویژه برای زمان ۳۰ دقیقه است. یعنی افزایش دمای آستنیته کردن از 850°C تا 950°C در زمان ۳۰ دقیقه، به کاهش استحکام منجر می‌شود. اما برای زمان ۱۵ دقیقه، ابتدا افزایش استحکام تا 900°C و سپس

شکل ۵ اثر شرایط مختلف دما و زمان آستنیته بر استحکام تسلیم و کششی در دماهای بازگشت (الف) 250°C ، (ب) 350°C و (ج) 450°C

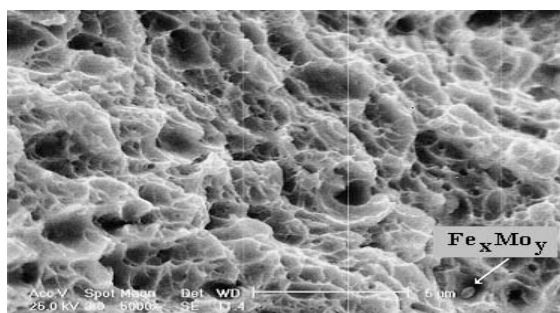
اندازه دانه آستنیت اولیه و بنابراین تیغه‌ها و بسته‌های مارتنزیتی، اندازه حفره‌ها نیز بزرگتر می‌شود. همچنین با توجه به تمیز بودن فولاد مورد استفاده، ذرات ناخالصی کمی در مقاطع شکست دیده شد. تجزیه یکی از این ناخالصی‌ها به روش EDS نشان‌دهنده وجود عناصر Fe و Mo در آن است (تصویر ج شکل ۶).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶ تأثیر درجه حرارت آستنیت کردن در زمان ۳۰ دقیقه بر شکست نمونه‌های بازگشت شده در 350°C (الف) 850°C (ب) و 900°C (ج) 950°C

لذا غلبه عامل انحلال کربن و عناصر آلیاژی بر عامل اندازه دانه می‌تواند دلیل بیشتر بودن استحکام باشد. این رفتار برای آستنیت کردن در زمان ۱۵ دقیقه با افزایش دما از 850°C به 900°C در تمامی منحنی‌ها وجود دارد و دلایل پیش گفته در اینجا نیز معتبر است. نکته دیگری که برای این شرایط آستنیت کردن مشاهده می‌شود، کاهش استحکام تسلیم علی‌رغم افزایش استحکام نهایی است. این موضوع را می‌توان با استفاده از رابطه هال - پیچ توضیح داد. بیشترین تأثیر رابطه هال - پیچ بر حد الاستیک و حد تسلیم است؛ یعنی با ریز شدن دانه‌ها استحکام تسلیم بیشتر از استحکام نهایی متأثر می‌شود [۱۲]. لذا با افزایش دمای آستنیت از 850°C به 900°C از یک سو اندازه دانه آستنیت اولیه اندکی بزرگتر می‌شود (کاهش استحکام) و از طرف دیگر انحلال عناصر آلیاژی کامل‌تر انجام می‌شود (افزایش استحکام). اما اندرکنش این دو عامل سبب غلبه اثر اندازه دانه و لذا کاهش مختصر استحکام تسلیم، علی‌رغم افزایش استحکام نهایی در شرایط فوق می‌شود. با افزایش دمای آستنیت کردن به 950°C نیز رفتار کاهش استحکام تسلیم و نهایی کمتر می‌شود که دلیل آن نبود اختلافی مشهود بین اندازه دانه‌ها با یکدیگر است.

۳-۴- تأثیر درجه حرارت و زمان آستنیت کردن بر رفتار شکست

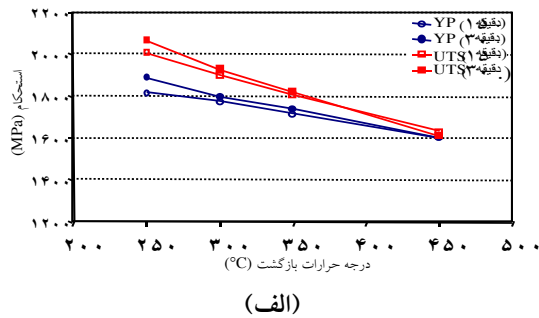
تصاویر سطوح شکست نمونه‌های آستنیت شده در دماهای مختلف به مدت ۳۰ دقیقه و بازگشت شده در 350°C در شکل ۶ نشان داده شده است. شکست نرم - به دلیل وجود حفره‌ها^۱ به مقدار زیاد در اندازه‌های مختلف - نوع غالب شکست در نمونه‌ها است و فقط تغییر اندازه حفره‌ها با تغییر دمای آستنیت، از روی تصاویر قابل تشخیص است. یعنی با افزایش درجه حرارت آستنیت کردن، به دلیل بزرگتر شدن

1. Dimples

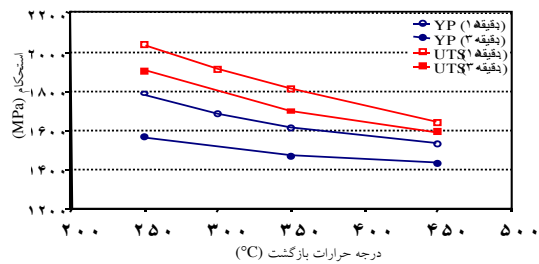
۳-۵- تأثیر دمای بازگشت بر خواص مکانیکی

تغییرات عدد سختی به‌ازای تغییرات درجه حرارت بازگشت در شکل ۷ نشان داده شده است. با افزایش درجه حرارت بازگشت، مطابق انتظار ما، در تمامی منحنی‌ها کاهش عدد سختی مشاهده می‌شود؛ زیرا با افزایش درجه حرارت بازگشت، کربن از شبکه bcc و نیز ساختار فرعی نابه‌جایی‌ها از بین می‌رود.

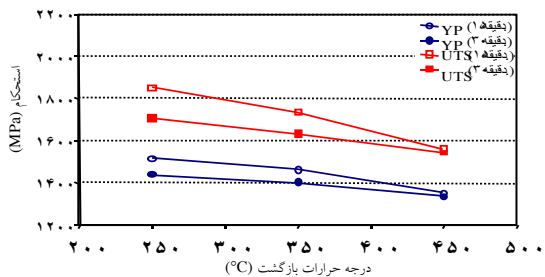
درجه حرارت آستنیت‌زدن، انتظار داریم که دانه‌ها ریزتر بوده و مارتزیت حاصل از عملیات تبرید و بازگشت نیز دارای تیغه‌های ظریف‌تر و بنابراین سختی و استحکام بالاتری باشد. اما نمودار سختی مربوط به این دما، پایین‌تر از نمودار دمای ۹۰۰ °C قرار گرفته، که علت آن ایجاد فازها و ساختارهای ناخواسته در نتیجه کافی نبودن شرایط مذکور برای انجام آستنیت‌زدن کامل است.



(الف)

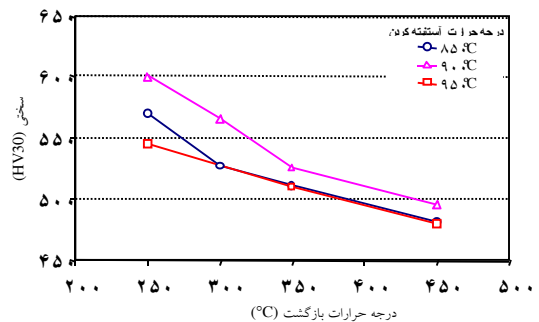


(ب)

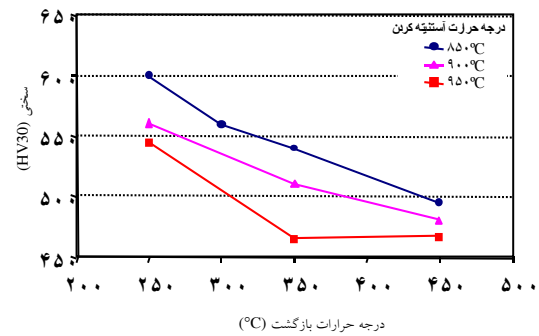


(ج)

شکل ۸ تغییرات استحکام تسلیم و نهایی با دمای بازگشت برای آستنیت‌زدن در دماهای (الف) ۸۵۰ °C (ب) ۹۰۰ °C (ج) ۹۵۰ °C برای زمان‌های ۱۵ و ۳۰ دقیقه



(الف)



(ب)

شکل ۷ تغییرات عدد سختی نمونه‌ها به‌ازای تغییرات درجه حرارت بازگشت برای زمان‌های آستنیت‌زدن (الف) ۱۵ دقیقه (ب) ۳۰ دقیقه

نکته قابل تأمل در این نتایج مربوط به دمای ۸۵۰ °C و زمان ۱۵ دقیقه آستنیت‌زدن است. زیرا به دلیل پایین بودن

۳- نسبت استحکام تسلیم به نهایی با کاهش دمای آستنیته کردن به دلیل کاهش اندازه دانه، بزرگتر می شود.

۴- با افزایش دمای بازگشت در تمامی حالتها استحکام و سختی نمونه ها کاهش می یابد.

۵- بهترین شرایط عملیات حرارتی، آستنیته کردن در 850°C به مدت ۳۰ دقیقه و بازگشت دومرحله ای ابتدا در 250°C و سپس 300°C است که به استحکام نهایی 1925MPa و سختی $560\text{H}^{\circ}\text{CV}$ می انجامد.

۵- منابع

- [1] M. C. Sun, Y. H. Sun and R. K. Wang; Vibratory stress relieving of welded sheet steels of low alloy high strength steel; Materials Letters; Vol. 58, 2004, pp. 1396-1399.
- [2] T. L. Chang, L. W. Tsay and C. Chen; Influence of gaseous hydrogen on the notched tensile strength of D6ac steel; Materials Science and Engineering A, Vol. 316, 2001. pp. 153-160.
- [۳] رهنما، پرویز؛ انتخاب مواد جایگزین مناسب برای فولاد ماریچینگ مورد استفاده در لوله های جدار نازک با استحکام بالا؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.
- [4] Y. Tomita; Development of Fracture Toughness of Ultrahigh Strength, Medium Carbon, low Alloy Steels For Aerospace Application; Int. Materials Reviews, 2000, Vol. 45, No. 1, pp. 27-37.

استحکام نیز مانند سختی و به لایل بالا با افزایش دمای بازگشت کاهش می یابد (شکل ۸). اختلاف بین منحنی های استحکام تسلیم و نهایی متناظر در دمای پایین بازگشت زیاد است و با افزایش دمای بازگشت کمتر می شود. زیرا در ماه های پایین بازگشت ($200-300^{\circ}\text{C}$) هنوز نابه جایی های زیادی در ساختار فرعی حضور دارند. همچنین ذرات ریزکاری انتقالی در ریزساختار وجود دارند که اندرکنش نابه جایی ها با یکدیگر و با ذرات کاریب انتقالی در هنگام اعمال تنش سبب ایجاد کار سختی می شود. با افزایش میزان تغییر شکل، این پدیده شدت یافته و نرخ کار سختی افزایش می یابد. لذا در این محدوده دمایی اختلاف استحکام تسلیم و نهایی زیاد است. اما با افزایش دمای بازگشت ($300-450^{\circ}\text{C}$) و خروج کربن از شبکه کریستالی bcc مارتنزیت و کاهش تنش داخلی و نیز تبدیل کاریب های انتقالی ریز به ذرات درشت تر سمیتیت و علاوه بر آن کاهش چگالی نابه جایی ها، نرخ کارسختی کاهش یافته و استحکام تسلیم و نهایی به یکدیگر نزدیک خواهد شد [۱۰، ۱۳].

۴- نتیجه گیری

۱- به منظور ریزدانه نگاه داشتن آستنیت اولیه، باید از درجه حرارت های پایین (کمتر از 900°C) و زمان مناسب آستنیته کردن استفاده شود. اما آستنیته کردن در دمای 850°C به مدت ۱۵ دقیقه، شرایط مناسبی برای تشکیل کامل و یکنواخت آستنیت نیست. زیرا به دلیل غیریکنواختی ترکیب شیمیایی آستنیت ایجاد شده، در هنگام عملیات تبرید، فاز فریت پرویوتکتوئید در ریزساختار تشکیل شده است.

۲- با توجه به وجود حفره های زیادی در سطوح شکست نمونه ها، رفتار شکست آنها از نوع نرم تشخیص داده شد.

- [۵] ز. کشاورز، دهقان منشادی، ح. بلادی و ع. زارعی
هنزکی؛ بررسی توزیع و نحوه رشد دانه‌های آستنیت
در حین آستنیت‌شدن؛ سمپوزیوم فولاد ۷۸،
اردیبهشت ۷۸، دانشگاه صنعتی اصفهان، صفحه
۳۶۸-۳۸۵.
- [6] L. J. Cuddy and J. C Raley; Austenite
Grain Coarsening in Microalloyed Steels;
Metal. Trans. Vol. 14A, 1976, PP. 1889-
1895.
- [۷] گل‌عذار، محمدعلی؛ اصول و کاربرد عملیات
حرارتی فولادها و چدن‌ها؛ انتشارات دانشگاه
صنعتی اصفهان، چاپ اول، ۱۳۶۷.
- [۸] ا. سی. بین، ه. و. پکستون؛ عناصر آلیاژی در فولاد؛
ترجمه علی‌اکبر اکرامی، چاپ اول، ۱۳۷۵.
- [9] C. R. Brooks; Principles of the
Austenitization of Steels; Elsevier
Applied Science, 1992, pp. 40-50.
- [10] G. E. Dieter; Mechanical Metallurgy;
Second Edition, Mc. Graw- Hill, 1976,
PP. 193-199.
- [۱۱] و. اسمیت؛ ساختار، خواص و کاربرد آلیاژهای
مهندسی؛ ترجمه علی‌اکبر اکرامی، مرتضی
سیدریحانی، چاپ اول، ۱۳۸۰.