نشریه بین المللی علوم مهندسی، شماره ۱، جلد۱۷، بهار ۱۳۸۵، صفحه ۳۹- ۳۳
دانشگاه علم و صنعت ایران

تأثیر منگنز و مس برخواص مکانیکی یک فولاد کم آلیاژی استحکام بالا حاوی عناصر Ni، Cr، Mo و V

مجید بلباسی و امیر عبداله‌زاده

چکیده: فولادهای کم آلیاژی با مقادیر مختلف عناصر Ni، Cr، Mo و V، پس از آهنگری و عملیات حرارتی، دارای کاربردهای وسیعی در ساخت مخازن تحت فشار، لوله‌های تحت شوک و تنش بالا، روتورها، ژنراتورها، مته‌های حفاری طویل و غیره می‌باشند. در این فولادها میزان منگنز و مس نقش مهمی را بر خواص مکانیکی بخصوص داکتیلیتی ایفا می‌کنند. در این تحقیق جهت دستیابی به مقادیر بهینه استحکام و داکتیلیتی، تأثیر تغییر مقادیر منگنز و مس در یک نوع فولاد آزمایشگاهی کم آلیاژ حاوی عناصر Ni، Cr، Mo و V مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌هایی با درصدهای وزنی مختلف منگنز (۰/۸۵٪- ۰/۲۳٪) و همچنین مس (۰/۴۵٪- ۰/۱۵٪) ریخته‌گری شدند و پس از آهنگری، در دمای ۸۷۰ °C به‌مدت ۱ ساعت آستنیته و سپس آبدهی شدند. نهایتاً نمونه‌ها در دمای ۶۰۰ °C بمدت ۱ ساعت تحت عملیات بازگشت قرارگرفتند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش مقادیر منگنز و مس به‌ترتیب از ۰/۳۵٪ تا ۰/۸۵٪، و از ۰/۱۵٪تا ۰/۴۵٪ استحکام تسلیم و کششی افزایش می‌یابد و بیشترین مقدار انرژی ضربه در فولادهای شامل منگنز در ترکیب ۰/۳۵٪ منگنز و در فولادهای شامل مس در ترکیب ۰/۲۵٪ مس مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش مقدار منگنز تا ۰/۸۵٪ و مقدار مس تا ۰/۴۵٪ انرژی ضربه کاهش می‌یابد و تغییر درصد وزنی منگنز و مس باعث ایجاد تغییر محسوسی در ریزساختار مارتنزیت تمپر شده نمی‌شود. با توجه به نتایج حاصل از آزمایشها، بهترین ترکیب شیمیایی جهت حصول تلفیق مناسبی از استحکام و داکتیلیتی برای فولاد منگنزدار، مقدار منگنز ۰/۳۵٪ و برای فولاد مس‌دار، مقدار مس ۰/۲۵٪ تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: فولاد کم‌آلیاژی، منگنز، مس، استحکام کششی، داکتیلیتی

۱. مقدمه

فولادهای کم آلیاژی حاوی عناصر Ni، Cr، Mo و V یکی از پرمصرف ترین خانواده فولادهای کم آلیاژی می‌باشند. این فولادها از سختی پذیری بالایی برخوردار بوده و ساختار مارتنزیت تمپر شده آنها از استحکام تسلیم خوبی برخوردارمی‌باشد. این فولادها محدوده وسیعی از فولادهای آهنگری آبدهی و بازگشت شده استحکام بالا که جهت ساخت لوله‌ها و بویلرهای تحت فشار استفاده می‌شود را شامل می‌شود [1].

به منظور بهبود داکتیلیتی این فولادها سه روش پیشنهاد شده است: الف) کنترل ریزساختار توسط کنترل پارامترهای عملیات حرارتی، ب) کنترل‌آخالهای سولفیدی و ج) بهینه‌سازی ترکیب شیمیایی. در این میان بهینه‌کردن ترکیب شیمیایی آلیاژها از اهمیت شایانی برخوردار می‌باشد [2, 3]. منگنز بعنوان عنصر اصلی و همچنین بعنوان یک اکسیژن زدا و گوگردزدا در فولادها وجود دارد. این عنصر تأثیر استحکام‌دهی محلول جامد جزئی در آستنیت و یک تأثیر متوسط در فریت دارد. منگنز با جلوگیری از تشکیل سولفید آهن (FeS) با نقطه ذوب پایین، کارگرم پذیری را افزایش می‌دهد. فولادهای دارای منگنز، سرخ شکنندگی داغ[1] از خود نشان نمی‌دهند. این امر بعلت تشکیل MnS بجای FeS با نقطه ذوب بالا می‌باشد. در شمشها MnS بصورت گلوله‌های توزیع شده مجزا

نسخه اصلی مقاله در تاریخ ۱۳۸۲/۱۰/۲۱ واصل، و پس از بازنگریهای لازم، در تاریخ ۱۳۸۳/۱۲/۹ به تصویب نهایی رسیده است.
سرپرستی داوری‌ها توسط دبیر تخصصی، دکتر گلستانی‌فرد صورت گرفته و مقاله توسط ایشان برای چاپ توصیه شده است.
مجید بلباسی، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.
دکتر امیر عبداله‌زاده، دانشیار متالورژی، بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس. zadeh@modares.ac.ir

[1] Hotshortness

Archive of SID
www.SID.ir

می‌باشد. در دماهای کارگرم، آخالهای MnS به اندازه‌ای نرم هستند که در طول آهنگری یا نورد به نوارهای طویل تغییر شکل پیدا می‌کنند. وجود سولفیدهای منگنز در هر فولادی که نیاز به ماشینکاری داشتهباشد ضروری می‌باشد [4]. از طرفی سولفید منگنز نواری، برای خواص ضربه و داکتیلتی مضر می‌باشد. افزایش مقدار منگنز در مقادیر قابل توجه به فولاد انرژی ضربه آن را کاهش می‌دهد. البته این موضوع به مقدار آخال، نوع و توزیع آن بستگی دارد. مقدار منگنز موجود در فولاد بر نوع و توزیع سولفید و در نتیجه بر داکتیلیتی زمینه فریتی مؤثر می‌باشد [5]. مقدار کل آخالها در این فولادها بستگی به مقادیر Mn و S دارد [6].

مس بعنوان عنصری می‌باشد که اغلب بصورت ناخواسته یا باقیمانده در قراضه وارد فولاد می‌گردد. مکانیزمهای استحکام بخشی در ارتباط با فولادهای شامل مس، استحکام دهی محلول جامد و استحکام دهی رسوبی می‌باشد. استحکام دهی محلول جامد فریت در آلیاژهای شامل مس بخاطر اتمهای مس حل شده در آن می‌باشد[7]. حضور مس در فولادها بعلت نقطه ذوب پایین آن باعث نفوذ فلز مذاب بداخل ترکها در سطح و طول مرزدانه ها می‌گردد که به آن سرخ شکنندگی داغ می‌گویند. این پدیده باعث ایجاد ترکهایی روی سطح شمش در طول فرآیند کارگرم می‌گردد که تشکیل فاز ε-Cu در مرزدانه آستنیت یک دلیل اصلی برای تشکیل چنین ترکهایی می باشد [8]. امروزه سعی می‌کنند اساساً مس را در مرحله آماده سازی قراضه خارج کنند. کندن مس از فلزات آهنی روی این واقعیت بنا شده‌است که در دمای عملیات متالورژیکی، میل ترکیبی مس به گوگرد کمی بیشتر از میل ترکیبی مس به آهن است. لذا مس حل شده می‌تواند تشکیل یک فاز سولفید دهد و از فلز مذاب جدا شود [10]. در تحقیق حاضر تأثیر عناصر منگنز و مس بر خواص مکانیکی به‌ویژه داکتیلیتی یک فولاد کم آلیاژی حاوی عناصر Ni، Cr، Mo و V که در آزمایشگاه تهیه می‌شود، جهت رسیدن به یک استحکام و داکتیلیتی بهینه مورد بررسی قرار-می‌گیرد.

۲. روش تحقیق

در تهیه نمونه‌های آزمایش بترتیب از عملیات ذوب و ریخته‌گری، آهنگری، نمونه سازی اولیه، عملیات حرارتی آبدهی و بازگشت و نمونه سازی نهایی استفاده شد. محدوده تغییر درصد وزنی منگنز و مس به‌ترتیب در بازه ۰/۸۵-۰/۲۳ و ۰/۴۵-۰/۱۵ درنظرگرفته شد. در تمامی این فولادها سعی شده است که درصد وزنی سایر عناصر حتی المقدور ثابت بماند و تنها مقادیر منگنز و مس تغییر کند. هشت آلیاژ مطابق با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول ۱ در یک کوره القایی تحت گاز محافظ آرگون ریخته‌گری شدند. در این مرحله دو گروه آلیاژ ریختگی A و B به ترتیب تغییرات عناصر آلیاژی مس و منگنز در نظر گرفته شد. در هر گروه نیز چهار آلیاژ با درصدهای مختلف منگنز و مس تهیه گردید. در نهایت هشت شمش ریختگی بدست آمد. جهت افزایش درصد وزنی منگنز از فرومنگنز (۶۵٪) و جهت افزایش درصد وزنی مس از مفتولهای مس خالص استفاده گردید. همچنین بمنظور جبران تلفات عنصر سلیسیم، از سلیسیم خالص استفاده شد. پس از شارژ مواد اصلی در کوره و ذوب آنها تحت گاز محافظ آرگون، مقدار مواد افزودنی محاسبه گردید و به پاتیل اضافه شد. ریخته‌گری در دمای ۱۵۵۰°C در قالب چدنی پیش گرم شده انجام شد. ترکیب شیمیایی بطور همزمان توسط کوانتومتر کنترل گردید. پس از آهنگری نمونه‌ها در قالب باز با نسبت ۴ به ۱، به منظور بهبود خواص ماشینکاری، نمونه‌ها تحت عملیات حرارتی آنیل قرارگرفتند. عملیات آستنیته کردن در یک کوره عملیات حرارتی با دقت دمایی ۳ °C ± در دمای ۸۷۰ °C به مدت یک ساعت انجام شد و بعد از آن نمونه‌ها در روغن آبدهی شدند.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژهای مورد تحقیق برحسب درصد وزنی، گروه A مربوط به فولادهای حاوی مس و گروه B مربوط به فولادهای حاوی منگنز می‌باشد.

گروه	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	V	S
A	۰/۳۵	۰/۲۸	۰/۲۹	۲/۹	۱/۰۷	۰/۵۷	۰/۱۵	۰/۱۲	۰/۰۰۴
	۰/۳۳	۰/۳	۰/۲۶	۲/۹۳	۱/۰۴	۰/۵۷	۰/۲۵	۰/۱۲	۰/۰۰۴
	۰/۳۷	۰/۲۷	۰/۲۴	۲/۹	۱/۰۸	۰/۵۷	۰/۲۸	۰/۱۳	۰/۰۰۴
	۰/۳۵	۰/۲۸	۰/۲۲	۲/۹	۱/۰۷	۰/۵۷	۰/۴۵	۰/۱۳	۰/۰۰۴
B	۰/۳۴	۰/۲۳	۰/۲۳	۲/۹	۱/۰۸	۰/۵۷	۰/۱۸	۰/۱۳	۰/۰۰۴
	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۳۵	۲/۹	۱/۰۳	۰/۵۸	۰/۱۸	۰/۱۱	۰/۰۰۴
	۰/۳۵	۰/۲۷	۰/۶۹	۲/۹	۱/۰۶	۰/۵۷	۰/۱۷	۰/۱۲	۰/۰۰۴

Archive of SID

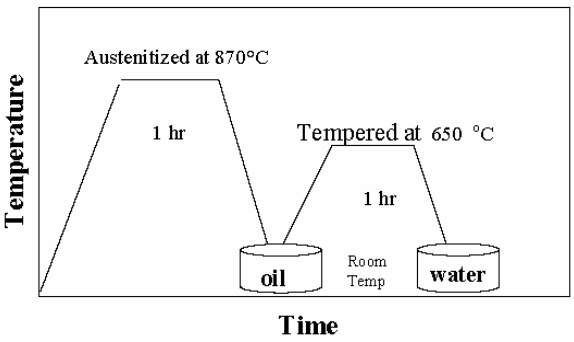
www.SID.ir

سپس عملیات بازگشت در دمای ۶۵۰ °C به مدت یک ساعت بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. سیکل عملیات حرارتی اعمال شده در شکل ۱ آورده شده است. بطورکلی در این تحقیق بررسی های متالوگرافی و شکست نگاری، آزمایشهای سختی سنجی، کشش و ضربه انجام گرفت. آزمایش‌های کشش و ضربه در دمای محیط و مطابق با استاندارد DIN 50125 انجام شدند. برای هر آلیاژ مورد بررسی حداقل از ۲ نمونه کشش و ۳ نمونه ضربه استفاده گردید. سختی‌سنجی مطابق با استاندارد ASTM E18-94 در مقیاس راکولC انجام گرفت. سختی‌سنجی بر روی هر آلیاژ مورد بررسی حداقل ۳ بار انجام شد. همچنین سطوح شکست نمونه‌های ضربه توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. آنالیز EDX جهت تشخیص نوع آخالهای موجود در فولاد نیز انجام شد.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. بررسیهای ریزساختاری

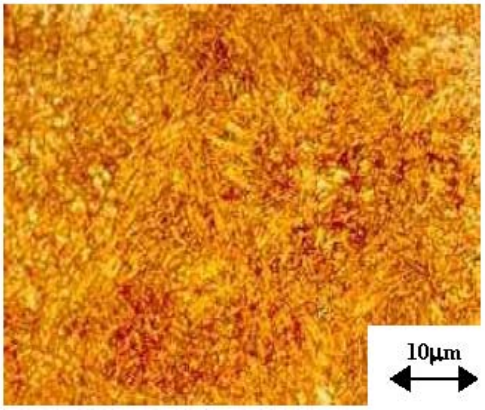
شکل ۲ الف ریزساختار نمونه شامل ۰/۲۸٪ منگنز و شکل ۲ ب ریزساختار نمونه شامل ۰/۸۵٪ منگنز را بوسیلهٔ میکروسکوپ نوری نشان می دهد که شامل مارتنزیت تمپرشده می‌باشند. بررسیهای انجام شده بر روی سایر نمونه‌ها نیز، ریزساختاری شامل مارتنزیت تمپرشده را نشان داد. این بررسیها نشان داد که با افزایش مقدار منگنز و مس، تغییر محسوسی در ریزساختار نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. بیان دقیق علت این رفتار، نیازمند بررسیهای بیشتر با میکروسکوپ الکترونی عبوری می باشد.



شکل ۱. شماتیک سیکل عملیات حرارتی اعمالی در تحقیق حاضر

۳-۲. آزمایش سختی

شکل ۳ الف تغیرات سختی را بر حسب افزایش درصد وزنی منگنز نشان می‌دهد. طبق این شکل، افزایش مقدار منگنز باعث ایجاد تغییر محسوسی در مقدار سختی نشده‌است. با افزایش مقدار منگنز از ۰/۲۳٪ به ۰/۸۵٪سختی از ۴۲RC به ۴۳RC می‌رسد. تحقیقات نشان داده است که منگنز سختی مارتنزیت تمپرشده را بوسیله کندکردن سرعت رشد کاربیدها، افزایش می‌دهد. نکته مهم این است که تأثیر منگنز در مقادیر بالای یک درصد، جهت افزایش سختی قابل توجه می‌باشد [10]. بنابراین افزایش ناچیز سختی با افزایش منگنز در این فولاد را می‌توان به دلیل پائین بودن مقدار منگنز به کمتر از یک درصد دانست.



الف

ب

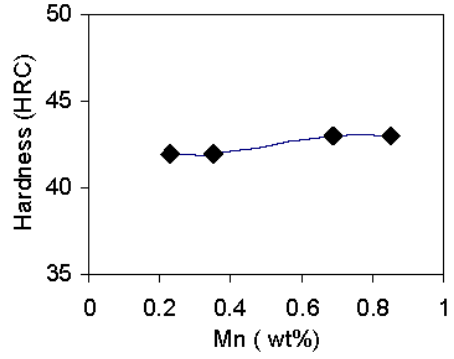
شکل ۲. ریزساختار نمونه‌های آستنیته شده در ۸۷۰°C به‌مدت یک ساعتو بازگشت داده شده در ۶۵۰°C حاوی الف: ۰/۲۸ ٪ Cu و ب: ۰/۸۵٪ Mn

شکل ۳ ب تغیرات سختی را بر حسب افزایش درصد وزنی مس نشان می‌دهد. طبق این شکل، با افزایش مقدار مس از ۰/۱۵٪به ۰/۲۸٪ ، سختی از ۳۷RC به ۴۳RCمی‌رسد. با افزایش مقدار مس تا۰/۴۵٪ تغییر محسوسی در سختی دیده نمی‌شود. مکانیزمهای استحکام بخشی در ارتباط با فولادهای شامل مس، استحکام دهی محلول جامد و استحکام دهی رسوبی می‌باشد. استحکام دهی رسوبی در مقادیر مس بالای ۰/۷۵٪ اتفاق می‌افتد[7]. لذا با توجه به حداکثر مقدار مس موجود در فولاد مورد آزمایش ۰/۴۵٪ مس، افزایش سختی تنها می‌تواند ناشی از مکانیزم

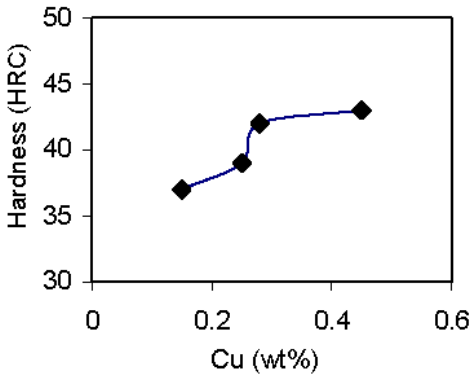
Archive of SID

www.SID.ir

استحکام‌دهی محلول جامد باشد. با توجه به شکل ۳ الف و ب، تأثیر افزایش مقدار مس در بالا بردن سختی بسیار چشمگیرتر از تأثیر منگنز بر افزایش سختی می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که مس نسبت به منگنز، عنصر مناسبتری جهت افزایش سختی می‌باشد.



الف



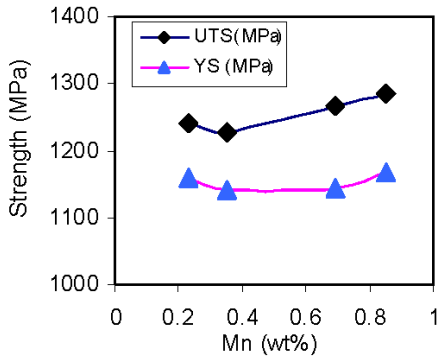
ب

شکل ۳. تغییرات سختی برحسب افزایش درصد وزنی الف: منگنز و ب: مس

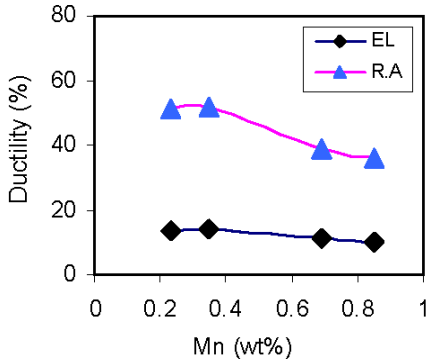
۳-۳. خواص مکانیکی

شکل ۴ تغییرات خواص مکانیکی را با افزایش درصد وزنی منگنز نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴ الف، با افزایش مقدار منگنز از ۰/۲۳٪ به ۰/۳۵٪ استحکام تسلیم و کششی کاهش می‌یابد. در حالیکه با افزایش مقدار منگنز از ۰/۳۵٪ تا ۰/۸۵٪ استحکام تسلیم و کششی افزایش است. همچنین طبق شکل ۴ ب میزان داکتیلیتی در مقدار منگنز ۰/۳۵٪ بیشترین مقدار می‌باشد. با افزایش مقدار منگنز تا ۰/۸۵٪ خواص داکتیلیتی بشدت کاهش می‌یابد. منگنز موجب تأخیر در استحاله آستنیت می‌گردد. این تأخیر باعث ایجاد فرصت برای استحاله‌های نفوذی و در نتیجه ایجاد آستنیت باقیمانده می شود [4].

با افزایش مقدار منگنز از ۰/۲۳٪ به ۰/۳۵٪ ، این اثر قابل مشاهده است. منگنز با مکانیزم استحکام دهی محلول جامد، باعث افزایش استحکام در فولاد می‌گردد [6]. با افزایش مقدار منگنز از ۰/۳۵٪ به ۰/۶۹٪، استحکام کششی از ۱۲۲۸به ۱۲۶۷ (MPa) افزایش می‌یابد که می‌تواند ناشی از پدیده استحکام دهی محلول جامد باشد.

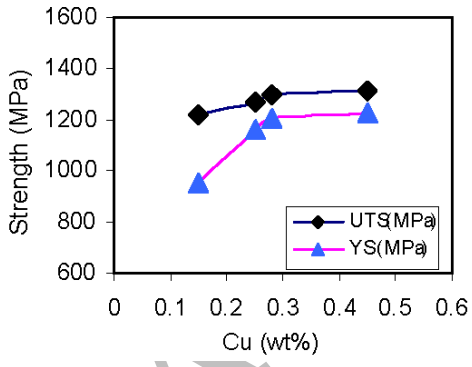


الف

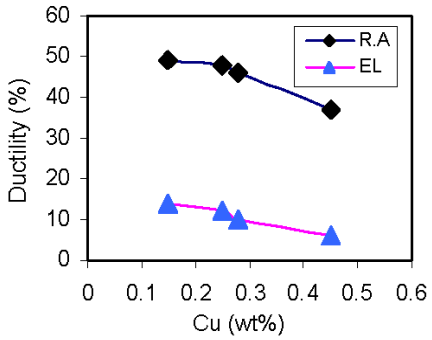


ب

شکل ۴. تغییرات الف: استحکام کششی و تسلیم و ب: داکتیلیتی نسبت به درصد وزنی منگنز



الف



ب

شکل ۵. تغییرات الف: استحکام کششی و تسلیم و ب: داکتیلیتی نسبت به درصد وزنی مس

www.SID.ir

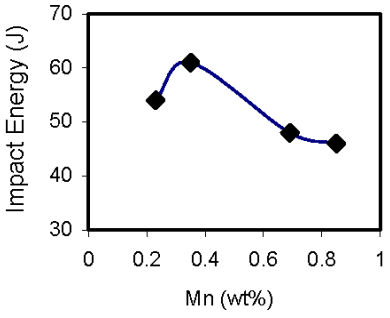
با افزایش مقدار منگنز از ۰/۶۹٪ تا ۰/۸۵٪، افزایش استحکام محسوس‌تر می‌باشد. این افزایش می‌تواند ناشی از غلبه پدیده استحکام دهی محلول جامد بر پدیده تأخیر در استحاله آستنیت باشد. شکل ۵ تغییرات خواص استحکامی را با افزایش درصد وزنی مس نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۵، با افزایش درصد وزنی مس از ۰/۱۵٪ تا ۰/۴۵٪، خواص استحکامی نظیر استحکام تسلیم و کششی افزایش و خواص داکتیلیتی کاهش می‌یابد. استحکام‌دهی رسوبی در مقادیر مس بالای ۰/۷۵٪ اتفاق می‌افتد [7]. با توجه به مقدار مس موجود در این فولاد که حداکثر ۰/۴۵٪ می‌باشد، مکانیزم استحکام‌دهی رسوبی نمی‌تواند در این فولاد اتفاق افتد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که افزایش استحکام در این فولاد ناشی از مکانیزم استحکام‌دهی محلول جامد می‌باشد. شکلهای ۴ و ۵، نشان می‌دهند که تأثیر منگنز و مس بر افزایش استحکام کششی به‌ترتیب در مقادیر حدود ۰/۳٪ و ۰/۲٪ اتفاق می‌افتد. هر چند نرخ این افزایش برای مس بیشتر می‌باشد.

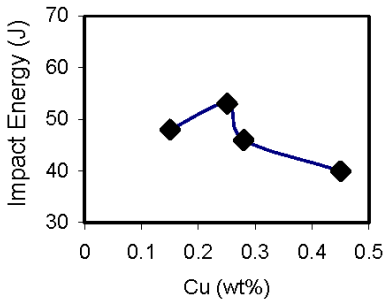
۴-۳. انرژی ضربه

شکل ۶ الف تغییرات انرژی ضربه را با افزایش درصد وزنی منگنز نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیشترین مقدار انرژی ضربه (۶۱J) در مقدار منگنز۰/۳۵٪ دیده می‌شود. با افزایش مقدار منگنز از۰/۳۵٪ تا ۰/۸۵٪ درصد، انرژی ضربه افت کرده و به ۴۶J می‌رسد. وجود منگنز در فولاد باعث تشکیل آخالهای MnS می‌شود. آخالهای MnS باعث کاهش انرژی ضربه در فولاد می‌شوند [11]. آزمایش EDX نشان داد که با افزایش مقدار منگنز از ۰/۳۵٪ تا ۰/۶۹٪ درصد، آخالهایMnS بیشتری در این فولاد تشکیل می‌گردند. بنابراین می‌توان یکی از دلایل کاهش انرژی ضربه در تحقیق حاضر را افزایش این آخالها همراه با افزایش درصد منگنز دانست. با توجه به مقدار کم گوگرد در این فولاد (حدود ۰/۰۰۴٪)، بنظر می‌رسد با افزایش مقدار منگنز از ۰/۶۹٪ به ۰/۸۵٪ درصد، مقدار گوگرد کافی جهت تشکیل آخالهای بیشتر وجود ندارد. لذا در مقدار منگنز ۰/۸۵٪، انرژی ضربه در مقایسه با مقدار منگنز ۰/۶۹٪کاهش نمی‌یابد.

شکل ۶ ب تغییرات انرژی ضربه را با افزایش درصد وزنی مس نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده‌است، انرژی ضربه در مقدار مس ۰/۲۵٪ بیشترین مقدار می‌باشد. تحقیقات نشان داده‌است که مس می‌تواند تأثیر ریزکنندگی بر اندازه دانه آستنیت داشته باشد [7]. نتایج تعیین اندازه دانه آستنیت نشان می‌دهد که اندازه دانه آستنیت برای نمونه‌های با مقادیر مس ۰/۱۵٪ و ۰/۲۵٪ به‌ترتیب ۶۰µm و ۴۴µm می‌باشد. لذا بالا بودن مقدار انرژی ضربه در مقدار مس ۰/۲۵٪، می‌تواند ناشی از اثر مس بر ریز کردن اندازه دانه آستنیت باشد. از طرفی حضور بیش از ۰/۲٪ مس در فولاد موجب ترک برداشتن جزئی روی سطح فولاد آهنگری شده می‌گردد. اکسیداسیون ترجیحی آهن نزدیک سطح فلز یک منطقه غنی از مس شامل فازی با نقطه ذوب پایین روی مرزدانه‌ها از خود بجای می‌گذارد. این پدیده موجب شکنندگی داغ شده و می‌تواند باعث افت انرژی ضربه در فولاد گردد [7]. لذا بنظر می‌رسد افت انرژی ضربه در مقادیر مس ۰/۲۸٪ و ۰/۴۵٪ در این فولاد ناشی از این همین اثر باشد. با توجه به شکل ۶، حضور مقادیر قابل توجهی منگنز باعث تشکیل آخالهای MnS می‌گردد که موجب افت انرژی ضربه در فولاد می‌گردد. مس نیز در مقادیر بالای ۰/۲۵٪ موجب پدیده شکنندگی داغ شده و باعث افت انرژی ضربه می‌گردد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که عناصر منگنز و مس در مقادیر بالای محدوده مورد مطالعه، موجب افت انرژی ضربه در فولاد می‌گردند.



الف



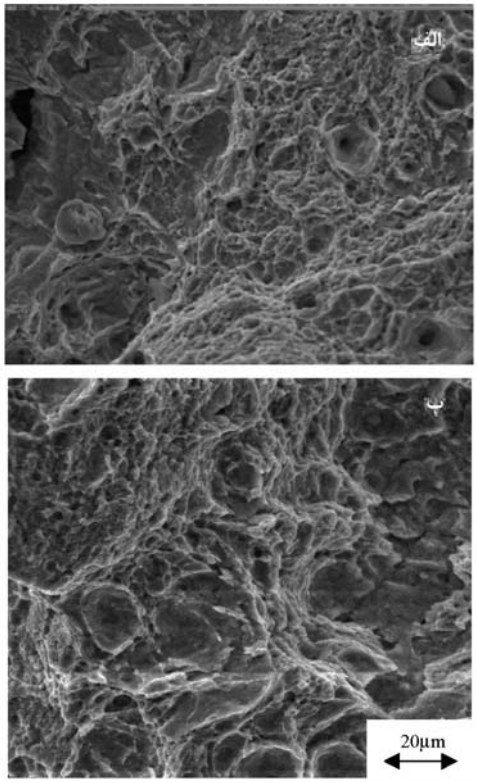
ب

شکل ۶. تغییرات انرژی ضربه برحسب میزان منگنز و مس

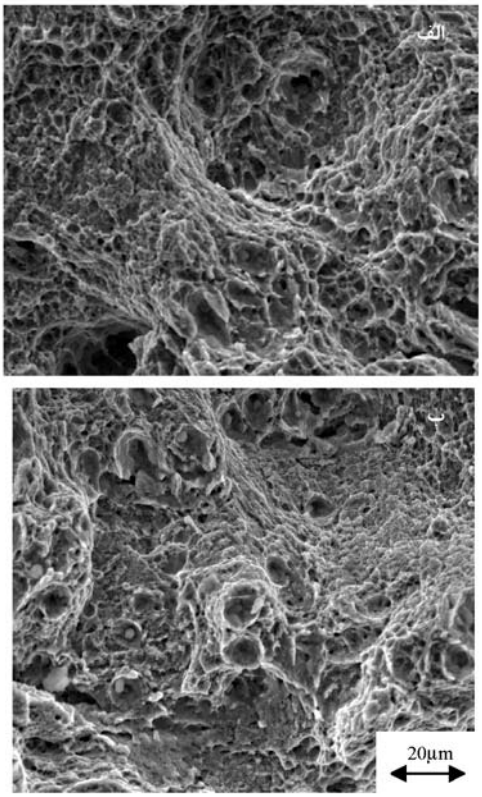
۵-۳. شکست نگاری نمونه‌های آزمایش ضربه

شکل ۷ الف و ب، به ترتیب سطوح شکست نمونه‌های ضربه فولادهای حاوی ۰/۲۵٪ و ۰/۴۵٪ مس را نشان می‌دهد. در فولاد حاوی ۰/۲۵٪ مس (شکل۷ الف) مکانیزم غالب شبه کلیواژی می‌باشد. اما در فولادهای حاوی ۰/۴۵٪ مس (شکل۷ ب) وجود حفره‌های متعدد برروی سطح شکست حاکی از غالب بودن مکانیزم اتصال حفره‌ها می‌باشد که نسبت به مکانیزم شبه کلیواژی مستلزم جذب انرژی بیشتری می‌باشد.

Archive of SID
www.SID.ir



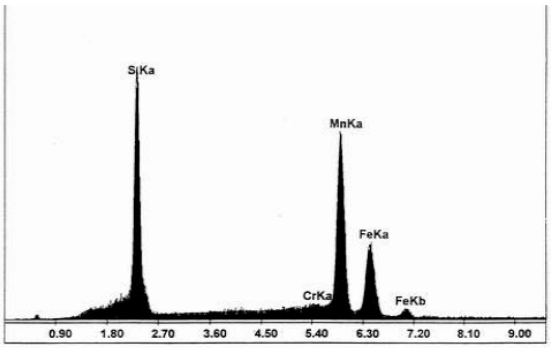
شکل ۷.تصاویر سطوح شکست نمونه‌های ضربه با مقادیر مس الف: ۰/۲۵٪و ب: ۰/۴۵٪



شکل ۸. تصاویر سطوح شکست نمونه‌های ضربه با مقادیر منگنز الف: ۰/۳۵٪و ب: ۰/۶۹٪، فلشها نشان دهنده آخالهای MnS می‌باشند.

شکل ۸ الف و ب، به ترتیب سطوح شکست نمونه‌های ضربه فولادهای حاوی ۰/۳۵٪ و ۰/۶۹٪ منگنز را نشان می‌دهد. فولاد حاوی ۰/۳۵٪ منگنز دارای بیشترین مقدار انرژی ضربه و فولاد حاوی ۰/۶۹٪ منگنز دارای کمترین مقدار انرژی ضربه می‌باشد. همانطور که در شکل ۸ ب، مشخص می‌باشد آخالهای MnS در سطح شکست بمقدار زیاد مشاهده می‌شود. وجود آخالهای MnS افت انرژی ضربه در این فولادها را باعث گردید. آنالیز EDX، سولفیدی بودن این آخالها را نشان داده است.

در شکل ۹، آنالیز EDX فولاد حاوی ۰/۶۹٪ منگنز آورده شده است. با توجه به این شکل مشخص می‌گردد که آخالهای مذکور، MnS می‌باشند. حضور آخالهای MnS، افت انرژی ضربه در این فولاد را توجیه می‌کند. شایان ذکر است که در نمونه‌های منگنزدار، آنالیز EDX آخالهای MnS در سطح شکست را نشان می‌دهد، ولی در نمونه‌های مس‌دار، بدلیل کم‌بودن مقدار منگنز، آخالهای MnS در سطح شکست مشاهده نمی شود.



Element	Wt %	At %	Z	A	F
S K	48.18	61.52	1.0655	0.4296	1.0019
CrK	0.65	0.51	0.9501	0.7288	1.0128
MnK	37.62	28.04	0.9332	0.7991	1.0000
FeK	13.55	9.93	0.9510	0.8509	1.0000
Total	100.00	100.00			

Element	Net Inte.	Bkgd Inte.	Inte. Error	P/B
S K	538.87	21.60	0.91	24.95
CrK	9.57	42.38	15.67	0.23
MnK	529.35	37.84	0.94	13.99
FeK	183.38	23.25	1.63	7.89

شکل ۹. آنالیز EDX از آخالهای موجود در سطح شکست نمونه ضربه حاوی ۰/۶۹٪منگنز نشان داده‌شده در شکل۸ (ب)

۴. نتیجه‌گیری

۱) افزایش درصد وزنی منگنز و مس به‌ترتیب در محدوده ۰/۸۵-۰/۳۵ و ۰/۴۵-۰/۱۵ باعث افزایش استحکام تسلیم و کششی می‌گردد. استحکام‌دهی محلول جامد احتمالا مکانیزم استحکام‌بخشی این فولاد می‌باشد.

۲) بررسی‌های ریزساختاری نوری نشان داد که با تغییر درصد وزنی منگنز، تغییر محسوسی در ریزساختار مارتنزیت تمپرشده نمونه‌ها ایجاد نمی‌شود.

Archive of SID
www.SID.ir

۳) نتایج انرژی ضربه نمونه‌ها نشان داد که در مقدار مس ۰/۲۵٪، انرژی ضربه بیشترین مقدار می‌باشد اما با افزایش مقدار مس تا ۰/۴۵٪، انرژی ضربه افت پیدا می‌کند.
۴) نتایج آنالیز EDX در نمونه حاوی ۰/۶۹٪ منگنز، وجود آخالهای MnS را نشان می‌دهد. حضور این آخالها افت انرژی ضربه در این فولاد را توجیه می‌کند.
۵) بهترین ترکیب شیمیایی جهت حصول تلفیق بهینه‌ای از استحکام و داکتیلیتی از لحاظ مقادیر عناصر منگنز و مس در فولادهای مورد تحقیق، به‌ترتیب مقادیر منگنز ۰/۳۵٪ در فولادهای منگنزدار و مس ۰/۲۵٪ در فولادهای مس‌دار می‌باشد.

مراجع

[1] DIN 1.6959, *Standard Specification for NiCrMoV Steels*, April 1979.

[2] Malakondian, G., "*Ultrahigh-strength Low-Alloy Steels with Enhanced Fracture Toughness*", Material Science, Vol. 42, 1997, pp. 209-242.

[3] Garrison, W. M., "*Ultrahigh-Strength Low-Alloy Steels For Aerospace Applications*", Met. Trans., Vol. 42, 1990, pp. 20-24.

[4] Manganese, *WWW. Ferroalloy & Alloying Additives Online Handbook.com.*

[5] Bandyopadhyay, N. and Momahon, C. J., "*The Micro Mechanism of Tempered Martensite Embrittlement in 4340-Type Steels*", Met. Trans., Vol. 14A, 1983, pp. 1313-1325.

[6] Bodnar, R. L. and Ohhashi, T., "*Effects of Mn, Si Purity on the Design of 3.5 NiCrMoV, 1CrMoV, 2.5CrMo Bainitic Alloy Steels*", Met. Trans, Vol. 20A, 1989, pp. 2197-2212.

[7] Mcdonaldschetky L., *Copper in Iron and Steel*, John Wiley, 1982, pp. 75-90.

[8] Khalid A., "*Copper Precipitation in M23C6 Grain Bondary Carbides in Alloy Steel*", Scripta Mater, Vol. 36, 2001, pp. 797-802.

[9] *Metals Handbook, Properties and Selection Iron and High-Performance Alloy*, ASM, 10th Ed, Vol. 1, 1990, pp. 395.

[10] Tomita, Y., "*Effect of Sulphide Inclusion Shape on Plane Strain Fracture Toughness of Heat-Treated Structural Low-Alloy Steels*", Mater. Sci., Vol. 25, 1990, pp. 950-956.

Archive of SID

www.SID.ir