

بررسی خواص و روش ساخت فولادهای میکروآلیاژی

خطیب‌الاسلام صدرنژاد (دانشیار)

دانشکده مهندسی متالورژی

چکیده

در این تحقیق بازدهی جذب عنصر Ti در فولاد در شرایط مختلف تلقیح تحت گاز خنثی، با همزدن و بدون همزدن، و همچنین تأثیر افزودن تیتانیوم بر ریز ساختار و خواص مکانیکی فولادهای کم آلیاژ کربن-منگنز از طریق عملیات حرارتی و مکانیکی بعد از انجماد بررسی شده است. دمای نورد در فاصله تعادل فازهای آستنیت و فریت قرار داشته و عملیات تبلور مجدد و رشد دانه‌ها به‌طور استاتیک و پس از نورد صورت می‌گیرد. متالوگرافی نمونه‌ها رسوبات بسیار ریز TiN و کمی هم TiCN را در ریز ساختار پرلایت حاصل از استحاله آستنیت و فریت تغییر فرم یافته نشان می‌دهد. این رسوبات باعث کند شدن حرکت نابجائی‌ها و در نتیجه کاهش سرعت بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه‌های فریت می‌شوند. ظریف شدن دانه‌های فریت و افزایش استحکام و سختی فولاد، حاصل این فرایند است. اما افزایش تیتانیوم بیش از مقدار استوکیومتری لازم برای ترکیب شدن با عناصر C، N و S که از رابطه $\%Ti = 4\%C + 3.5\%N + 1.5\%S$ قابل تعیین است، باعث افزایش ابعاد دانه‌ها و کاهش استحکام و سختی فولاد و در نتیجه افت کیفی خواص فولاد می‌شود.

مقدمه

بررسی قرار می‌گیرند. تحقیق در مورد نحوه آلیاژسازی و میزان اثر دو عنصر اول در گزارشها و مقالات قبلی مفصلاً بحث شده است [۵،۸]. در این مقاله به نتایج تحقیق در مورد بازدهی جذب و میزان Ti بر خواص فولاد می‌پردازیم.

آزمایشها

نمونه‌های فولاد با ترکیب شیمیایی ذکر شده در جدول ۱ از طریق ذوب در یک کوره الکتریکی مقاومتی با بوته‌ای از جنس آلومینا و ریخته‌گری در قالبهای پیش گرم شده فلزی ساخته شدند. از روش غوطه‌ورسازی برای افزودن Ti به فولاد استفاده شد. ترکیب شیمیایی Ti مورد استفاده، در جدول ۲ ذکر شده است. در هنگام افزودن Ti به عنوان محافظ از گاز آرگون استفاده شد. جزئیات روش آزمایش مشابه آن است که در گزارشهای قبلی ذکر شده است [۹،۸].

نمونه‌های فولادی در قالب فلزی ریخته شده و سپس در کوره سرد می‌شوند. از این قطعات شمشهای مکعب مستطیل شکل برای نورد تهیه می‌گردد. شمشها تا دمای $770^{\circ}C$ گرم شده و به مدت ۲۰ دقیقه در این دما نگه داشته می‌شوند. این دما بالاتر از دمای یوتکتوئید است ولی از حد اشباع فریت

عناصر ناخالصی مانند P، O، N، S بر خواص مکانیکی و فیزیکی فولاد اثرات سوئی دارند [۱، ۲، ۳، ۴]. اما وقتی عناصر میکرو آلیاژی مانند Ti و کنترل کننده سولفید مانند Ce به فولاد افزوده شوند، عناصر ناخالصی نه تنها اثرات مخرب خود را از دست می‌هند، بلکه بعضاً باعث بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد نیز می‌شوند. برای مثال ترکیب N با Ti باعث ایجاد رسوبات بسیار ریز TiN است که سبب افزایش دمای تبلور مجدد و افزایش استحکام و سختی فولاد می‌شود.

تحقیقات نشان می‌دهد که عناصر V، Nb، Ti و Co چهار عنصر عمده میکروآلیاژکننده فولاد و ریزکننده دانه [۵، ۶، ۷] هستند. اگرچه تحقیق در زمینه نحوه و میزان تأثیر این عناصر بر خواص فولاد از سالها قبل آغاز شده است، اما به علت پیچیدگی نحوه تأثیر این عناصر و اهمیت آنها، پژوهشهای علمی در این مورد همچنان ادامه دارد. برای مثال هنوز ابهامات زیادی در مورد مکانیزم تأثیر این عوامل و میزان نسبی اثر آنها تحت شرایط مختلف وجود دارد که باید مورد تحقیق و دقت نظر بیشتر قرار گیرد.

در این تحقیق، میزان نحوه تأثیر عوامل V، Nb و Ti به عنوان نمونه‌های بارزی از عناصر میکروآلیاژکننده فولاد مورد

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولادهای مورد استفاده در این تحقیق.

درصد عنصر									
* N	Al	P	S	Cr	Mn	Si	C	Ti	فولاد
۰٫۰۰۰۶	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۴	۰٫۱۲	۰٫۲۵	۰٫۱۴	۰٫۱۱	-	۱
۰٫۰۰۰۶	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۴	۰٫۱۱	۰٫۳۰	۰٫۱۵	۰٫۱۰	۰٫۰۱۵	۲
۰٫۰۰۰۶	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۳	۰٫۰۰۴	۰٫۱۲	۰٫۲۷	۰٫۱۶	۰٫۱۲	۰٫۰۰۳	۳

* تخمین زده شده است.

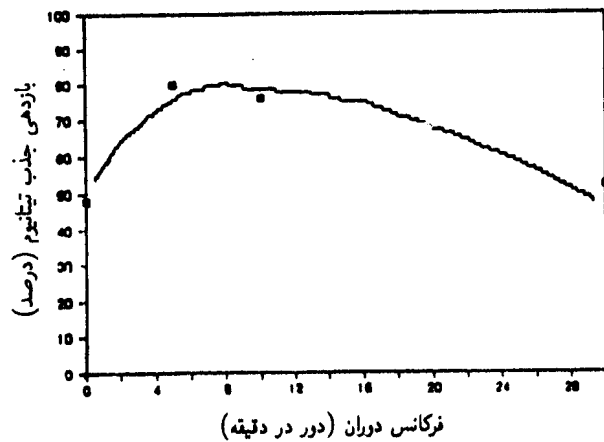
جدول ۲- ترکیب شیمیایی تیتانیوم مورد استفاده در این تحقیق.

درصد عنصر									
Cr	Cu	Ni	P	Al	S	Si	Mn	Fe	Ti
۰٫۰۳۱	۰٫۰۵۳	۰٫۰۴۹	۰٫۰۰۷	۰٫۰۶۵	۰٫۰۰۳	۰٫۳۸۸	۰٫۰۲۶	۰٫۱۸۲	۹۹٫۱۹۶

نتیجه‌گیری

بازدهی جذب تیتانیوم در فولاد برحسب فرکانس چرخش قوطی حامل فلز که به‌طور تقریبی مشخص شده، در شکل ۱ نشان داده شده است. با اینکه سطح فلز توسط گاز آرگون حفاظت گردیده، دیده می‌شود که افزایش فرکانس دوران به میزان بیش از حد از یک نقطه اپتیموم باعث کاهش بازدهی جذب می‌شود. این موضوع نشانگر افزایش میزان تماس فلز با هوا در صورت دوران بیش از حد لازم قوطی حاوی تیتانیوم است.

میانگین قطر دانه‌های فریت پس از ۶۰٪ نورد و آنیل کردن نمونه‌ها به مدت یک دقیقه، و ده دقیقه برحسب درصد Ti

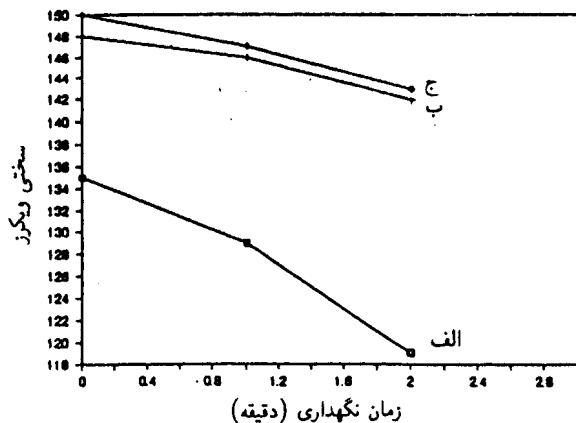


شکل ۱- بازدهی جذب تیتانیوم در عملیات تلقیح با قوطی حامل مواد.

از آستنیت پایین‌تر می‌باشد. عملیات نورد در دمای 770°C انجام می‌شد و سعی بر آن است که دمای قطعه ضمن نورد ثابت بماند. ولی به علت محدودیتهای دستگاه معمولاً حدود 50°C کاهش در دمای قطعه ضمن نورد ایجاد می‌شود که دمای قطعه را به‌زیر دمای تغییر حالت آستنیت به پرلیت می‌رساند. در عین حال پس از هر مرحله نورد، نمونه به‌داخل کوره منتقل شده و مجدداً حرارت داده می‌شود تا به‌دمای شروع نورد برسد.

انتخاب دمای نورد در محدوده پایداری فازهای آستنیت و فریت اولاً امکان عملی گرم نگه داشتن نمونه‌ها را با توجه به امکانات آزمایشگاهی موجود فراهم می‌سازد، ثانیاً مطالعه روی فرایندهای بازیابی، تبلور مجدد و رشد دانه‌های فریت تغییر فرم یافته را در جوار فاز آستنیت تغییر فرم یافته میسر می‌سازد.

درصد تغییر فرم در عملیات نورد ۱۰٪، ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ انتخاب می‌شود. پس از اتمام عملیات نورد، یا نمونه در آب سرد می‌شود و یا در کوره به مدت ۱ دقیقه، ۱۰ دقیقه و ۳۰ دقیقه نگهداری شده و سپس در آب سرد می‌شود. تمام نمونه‌ها بعد از سرد شدن در دمای 600°C به مدت ۱۵ دقیقه بازگشت داده می‌شوند. متالوگرافی با میکروسکوپیهای نوری و الکترونی به‌منظور تعیین تغییر حالت در ریز ساختار فازهای فریت و آستنیت تغییر شکل داده شده پس از نورد انجام می‌شود.



شکل ۳- تغییرات سختی نمونه‌ها برحسب زمان نگهداری در دمای 770°C پس از عملیات نورد. (الف) بدون Ti، (ب) 0.15% درصد Ti و (ج) 0.3% درصد Ti.

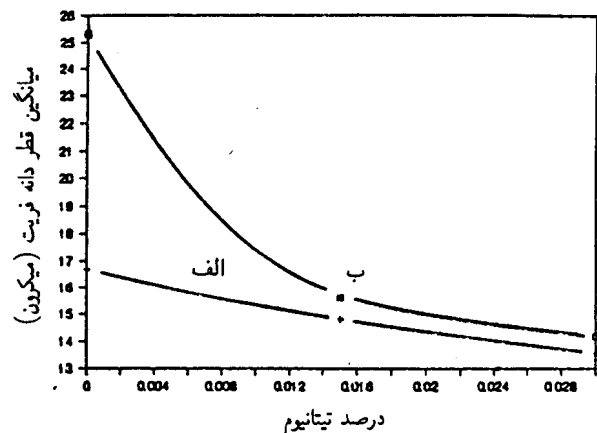
شکل ۲- میانگین تقریبی اندازه‌های دانه‌های فریت پس از 60% نورد و آنیل به مدت (الف) یک دقیقه و (ب) ده دقیقه.

فولاد در شکل ۲ نشان داده شده است. میانگین سختی نمونه‌ها برحسب زمان نگهداری در دمای 770°C پس از عملیات نورد در شکل ۳ رسم شده‌اند.

جدول ۳- نسبت تیتانیوم به نیتروژن در فولاد در مقایسه با مقدار استوکیومتری لازم برای تشکیل TiN.

نسبت ($\%N$ به $\%Ti$)			
در نمونه فولادی	استوکیومتری	قیاس	شرایط عمل
۰	۳٫۵	<	۰
۰٫۱۵	۳٫۵	<	۲٫۵
۰٫۳	۳٫۵	>	۵

از آنجا که نسبت $\%Ti$ به $\%N$ در نمونه دارای 0.15% درصد تیتانیوم کمتر از نسبت استوکیومتری برای تشکیل TiN است، لذا انتظار می‌رود تمام Ti به صورت رسوبات ریز TiN در نمونه پخش شود. برعکس در نمونه دارای 0.3% درصد Ti که نسبت $\%Ti$ به $\%N$ بیشتر از نسبت استوکیومتری برای تشکیل TiN است، انتظار می‌رود علاوه بر TiN مقداری (ولو اندک) TiCN بوجود آید. افزایش Ti بیش از حد استوکیومتری



شکل ۲- میانگین تقریبی اندازه‌های دانه‌های فریت پس از 60% نورد و آنیل به مدت (الف) یک دقیقه و (ب) ده دقیقه.

فولاد در شکل ۲ نشان داده شده است. میانگین سختی نمونه‌ها برحسب زمان نگهداری در دمای 770°C پس از عملیات نورد در شکل ۳ رسم شده‌اند.

بحث

آزمایشهای انجام شده برای تعیین میزان بازیابی جذب تیتانیوم در فولاد (شکل ۱) نشان می‌دهند که در شرایط دمش آرگون بر سطح فولاد، افزایش فرکانس به هم زدن فلز مذاب تا فرکانس ۱۰ دور در دقیقه بازدهی جذب را افزایش می‌دهد. ولی با افزایش بیشتر فرکانس، بازدهی جذب کاهش می‌یابد. این تأثیرات نشان‌دهنده کاهش درصد جذب در صورت افزایش تماس اکسیژن هوا با تیتانیوم افزوده شده به فلز مذاب قبل از انحلال کامل در فلز می‌باشد. این موضوع را می‌توان به کمک قانون عمل جرم در مورد سرعت واکنشهای شیمیایی و همچنین قوانین انتقال به طریق نفوذ و جابجائی تفسیر کرد.

کاهش ابعاد دانه‌های فولاد در اثر افزایش تیتانیوم به علت قفل شدن حرکت نابجائیه در دمای بازیابی و تبلور مجدد است. به علت میل ترکیبی شدید نیتروژن با تیتانیوم، انتظار می‌رود در فولاد دارای 0.15% درصد تیتانیوم ترکیب TiN و در فولاد محتوی 0.3% درصد تیتانیوم ترکیبات TiN و TiCN بوجود آید. متأسفانه تجهیزات آزمایشگاهی ما امکان تعیین میزان نیتروژن موجود در نمونه‌ها را نمی‌دهد تا بتوان مقایسه صحیحی از نسبت

ترکیب $TiCN$ و TiN می‌شود. میزان تبلور مجدد و رشد دانه در فولاد دارای ۰/۰۳ درصد Ti کمتر از فولاد بدون تیتانیوم و کمی کمتر از فولاد دارای ۰/۱۵ درصد تیتانیوم است. این موضوع نشان دهنده قدرت بیشتر TiN در جلوگیری از تبلور مجدد نسبت به TiC است. این تأثیرات بخصوص بعد از آنیل نمونه‌ها پس از نورد آشکار می‌شود.

سینتیک تبلور مجدد فریت تغییر فرم یافته نشان می‌دهد که استفاده از عنصر Ti نه تنها سرعت رشد را در تبلور مجدد دینامیک کاهش می‌دهد، بلکه امکان نگهداری نمونه در دمای آنیل پس از نورد را برای زمانی بیشتر، بدون رشد بیش از اندازه دانه‌ها، میسر می‌سازد. باید توجه داشت که افزایش زمان آنیل پس از نورد عموماً باعث کاهش سختی و استحکام تسلیم فولاد می‌شود، در حالی که در فولاد میکروآلیاژ شده با Ti این کاهش به مراتب کمتر از فولاد بدون Ti است. (شکل ۳).

جمع‌بندی و خاتمه

حداکثر بازدهی جذب تیتانیوم در فولاد مذاب تحت اتمسفر خنثی زمانی بدست می‌آید که جعبه حاوی Ti با فرکانس خاصی که مربوط به شرایط آزمایش است در فلز مذاب گردانده شود. تأثیر افزایش Ti به فولاد، کاهش ابعاد دانه و بهبود خواص مکانیکی مانند سختی فولاد است. مکانیزم تأثیر را می‌توان در تشکیل ترکیبات غیرمحلول مانند TiN و TiC در دماهای پایداری آستنیت و پراکنده شدن این ترکیبات در فازهای مختلف که به قفل شدن نابجائها منجر می‌شود، جستجو کرد. نتایج تحقیق، پاره‌ای از این تأثیرات را نشان می‌دهد. تکمیل مطلب نیاز به تحقیقات بیشتر دارد.

لازم برای ترکیب با عناصر N و C می‌تواند تأثیر معکوس بر خواص فیزیکی و مکانیکی فولاد داشته باشد. تأثیر درصد Ti بر خواص فولاد در شکلهای ۲ و ۳ نشان داده شده است.

در مورد تئوری تأثیر تیتانیوم بر موفولوژی و خواص فولادها مکانیزمهای مختلفی ذکر شده است. از جمله مهمترین این تأثیرات، ممانعت از حرکت نابجائها و کند شدن فرایندهای بازیابی و تبلور مجدد توسط رسوبات نامحلول TiN و $TiCN$ است. این رسوبات همچنین می‌توانند به عنوان محلهای جوانه‌زنی در فرایند انجماد آلیاژ عمل کرده و باعث تغییر ریز ساختار و خواص فولاد شوند.

از آنجا که دمای عملیات نورد و نگهداری بعدی در حدود دماهای تعادل دو فاز آستنیت و فریت انتخاب شده، لذا به نظر می‌رسد افزایش تیتانیوم باعث توقف کامل یا کند شدن حرکت نابجائها و جلوگیری از انجام فرایندهای بازیابی و تبلور مجدد و رشد دانه‌های تغییر فرم یافته فریت و آستنیت در حین عملیات نورد و پس از آن شود. این موضوع باعث می‌شود که دانه‌های فریت و آستنیت رشد چندانی نکنند و با ابعاد نهائی به صورت دو نوع فریت، یکی همراه آستنیت و دیگری حاصل از استحاله آستنیت، در مقاطع صیقلی و حکاکی شده نمونه‌ها در زیر میکروسکوپ مشاهده می‌شوند. دانه‌های فریتی که از آستنیت بوجود می‌آیند، دارای رسوبات TiN بوده و به سختی می‌توانند رشد کنند.

مقایسه ریز ساختار فولاد بدون Ti با فولاد دارای Ti نشان می‌دهد که ابعاد دانه در حالت اخیر به مراتب کوچکتر از اندازه دانه در حالت اول است (شکل ۲). این موضوع نشان دهنده این است که Ti باعث کاهش سرعت تبلور مجدد و رشد دانه‌ها پس از نورد و آنیل در فولاد دارای Ti از طریق تشکیل

مراجع

۱. صدرنژاد، «زمینه‌های نو برای تحقیق در فولاد»، امیرکبیر، سال ۳، شماره ۹، صفحات ۲۲ تا ۳۱، ۱۳۶۷.
۲. صدرنژاد، «تأثیر فسفر بر خواص فولاد»، نشریه دانشکده فنی، صفحات ۸۷ تا ۱۰۱، ۱۳۶۹.
۳. صدرنژاد، «نوع، شکل و تأثیر ترکیبات گوگرد در فولاد»، نشریه علمی فنی وزارت معادن و فلزات، شماره ۳، صفحات ۲۶ تا ۳۳، ۱۳۶۷.
۴. صدرنژاد، «تأثیر عوامل شیمیایی و فیزیکی در فسفرزدایی و گوگردزدایی از فولاد با افزایش سرباره آهنی و دمش گان»، مجله بین‌المللی مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، جلد ۱، شماره ۱، صفحات ۴۱ تا ۵۵، ۱۳۶۹.
۵. Sadranzhaad, "Effect of Inoculation on Micros-

- Microalloyed Steels”, **Recrystallization 90, Proceedcings of Conf., Australia, (1991), pp 237-244.**
۸. صدرنژاد، «تأثیر عناصر کنترل کننده شکل سولفید و ریزکننده دانه بر خواص فولاد پر استحکام»، کارنامه پژوهشی شریف، ۱۳۶۸، صفحات ۲۰۴ تا ۲۱۰، ۱۳۶۹.
۹. صدرنژاد، کاشانی بزرگ و حشمتی منش، «تولید فولاد میکروآلیاژی Nb و V دار به روش غوطه‌ورسازی و بررسی خواص آن»، نشریه دانشکده فنی. صفحات ۴۵ تا ۶۰، ۱۳۶۸.
- tracture and Properties of Low C-Mn and Low Alloy Steels”, **Journal of Engineering**, vol. 4, Nos. 1 & 2, (May 1991), pp 65-72.
6. Meyer, Heisterkamp and Mueschenborn, “Co, Ti and V in Normalized, Thermo-Mechanically Treated and Cold-Rolled Steels”, **Micro-Alloying 1975, Proceedings of Conf. Michigan, (1977), pp 153-167.**
7. Devaraj, Dake and chandra, “Effect of Cu on Gamma Recrystallisation in Ti and Ti-Nb

