

تأثیر رسب نیتریدی، کربونیتریدی و کربوسولفیدی تیتانیوم بر خواص فولادهای کم آلیاژی

دکتر خطیب الاسلام صدرنژاد

دانشکده مهندسی متالورژی، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسان اسدالله حراتی

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

میکروآلیاژ کردن فولاد کم کربن با عنصر تیتانیوم در مقیاس آزمایشگاهی بمنظور افزایش استحکام و چقرمگی^۱ انجام گرفت. برای ساختن فولاد میکروآلیاژی از دو روش پرتابی و تزریقی استفاده شد. بدین ترتیب فولادهای کم آلیاژی تیتانیوم دار با درصد های مختلف از ۰/۰۹ الی ۰/۰۲۳ درصد تیتانیوم ساخته شدند. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ (SEM) و میکروآنالیز با اشعه ایکس نشان داد که ذرات رسوب نیترید و کربونیترید تیتانیوم در زمینه فریت پراکنده می باشند و نتایج اثبات کردند که در تمامی حالات (ریخته شده، عملیات حرارتی شده، نورد شده) بعلت تشکیل رسوب نیترید و کربونیترید تیتانیوم در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم، اندازه دانه ریزنتری نسبت به فولاد ساده کربنی (بدون تیتانیوم) بدست می آید. همچنین نتایج ریز ساختارها نشان دادند که در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم، رشد دانه ها در دمای های بالاتر کمتر از فولادهای کربنی ساده است که این بعلت حلالیت خیلی کم رسوب نیترید تیتانیوم موجود در فولاد میکروآلیاژ شده با تیتانیوم است. نتایج نشان دادند که بعلت ریز شدن دانه ها و ایجاد سختی رسوبی فریت در فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار، استحکام کششی و تسلیم بالافزايش مقدار تیتانیوم تقریباً بطور خطی افزایش می یابد. ولی درصد ازدیاد طول نسبی نمونه ها در حد قابل قبولی کاهش می یابد. مطالعات میکروسکوپ الکترونی نشان داد که در فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار به جای سولفید منگنز، آخالهای کربوسولفید تیتانیوم $(\text{Ti}, \text{Fe}, \text{Mn})_4 \text{C}_2 \text{S}_2$ تشکیل می شود. مشاهده شد که حتی در تغییر شکل های بالا برخلاف سولفید منگنز، آخالهای کربوسولفید تیتانیوم تغییر شکل با ازدیاد طول نمی دهند و بصورت کروی باقی می مانند. در نتیجه افزایش انرژی شکست، چقرمگی و شکل پذیری سرد در جهت عرضی نورد، نسبت به جهت طولی نورد پدید می آید.

مقدمه

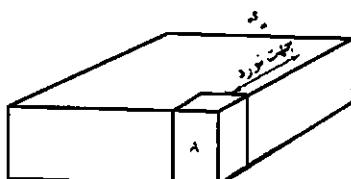
مکاپاسکال بدست آورند. اما بعلت کربن بالاتر، قابلیت چقرمگی و جوش پذیری آنها محدودتر است. از خواص ویژه فولادهای کم آلیاژی استحکام بالا این است که در حالت نورد شده ۱۲۱ بدون افزایش کربن، استحکام افزایش پیدا می کند. بدین ترتیب بهبود خواص در این فولادها بوسیله دانه های بسیار ریز [۲] و بوسیله مکانیزم های رسوب سختی بدست می آید [۳]. مهمترین عناصر میکروآلیاژی نایوبیوم، وانادیوم و تیتانیوم می باشند [۴ و ۵ و ۶ و ۷].

فولادهای کم آلیاژی استحکام بالا گروه ویژه ای از فولادها هستند که در مقایسه با فولادهای کم کربن دارای خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی برترند [۱]

فولادهای کم آلیاژی متداول که معمولاً عملیات حرارتی پذیر و دارای مقادیر متغیری نیکل یا مولیبدن هستند، می توانند استحکام تسلیم بیشتر از ۶۹۰

برای افزایش بازدهی جذب تیتانیوم، اضافه کردن فروتیتانیوم به بار مذاب هم به روش پرتابی و هم به روش تزریق توسط لوله ای به قطر ۶ میلیمتر صورت گرفت. در روش پرتابی مواد آلیاژ کننده به سطح مذاب پرتاب شد [۱۲ و ۱۴]. ولی در روش تزریقی مقدار مشخصی از فروتیتانیوم در داخل لوله قرار داده شده و دو طرف مکانی که فروتیتانیوم در آن قرار داشت توسط چکش کاری کاملاً بسته شد. برای افزایش بازدهی جذب، قبل از وارد کردن عنصر میکروآلیاژی، فولاد مذاب توسط آلومینیم تقریباً خالص اکسیژن زدایی شد. تجزیه شیمیایی فولاد حاصل با استفاده از دستگاه کوانتمتر مدل ۳۴۶۰ metal analyzer آورده شده است. ریخته گری در قالب‌های فلزی پیش‌گرم شده انجام شد. برای عملیات حرارتی (ترمالیزاسیون، کوئنچ و بازکشت) و متالوگرافی، قطعاتی از نمونه‌های ریخته شده مطابق شکل ۱ تهیه شد [۱۵].

برای انجام نورد از دستگاه نورد آزمایشگاهی با تناز ۷۰۰ مکاپاسکال که دارای قطر غلطک ۱۵۰ میلیمتر و سرعت نورد ثابت ۵۰ دور بر دقیقه (RPM) بود استفاده شد. برای جلوگیری از افت درجه حرارت در حین نورد، غلطک‌های دستگاه نورد تا حدود ۱۰۰°C پیش‌گرم شدند [۱۵].



شکل ۱: تهیه نمونه‌های متالوگرافی ریخته شده سطح A - سطحی که برای عملیات متالوگرافی جهت بررسی رشد دانها و مطالعه میکروسکوپی مورد بررسی قرار گرفته است.

پدیده است که مهمترین جاذبه این نوع فولادها نسبت به فولادهای آلیاژی دارای خواص مشابه، قیمت تمام شده کمتر آنها است. ساخت فولادهای میکروآلیاژی امروزه قسمت عمده تولید را در کارخانه‌های بزرگ فولادسازی تشکیل می‌دهد. بعلت سود حاصل از کاهش وزن در مقایسه با فولادهای کربنی، فولادهای میکروآلیاژی استحکام بالا برای ساخت وسایل نقلیه صنعتی ترجیح داده می‌شوند [۸]. مهمترین کاربرد فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار در صنایع اتومبیل، بدنه کشته، سازه‌های ساختمانی، خطوط راه آهن، خطوط لوله برای انتقال نفت و گاز، ساخت پلها، اجزاء یاتاقان و شاسی کامیونها، بدنه، قالب و پایه‌های موتور، دیسکهای چرخ، چرخ دنده‌ها، محورهای لوکوموتیوهای برقی، میل فرمانها، میل لنکها، میل گردان کامیونها، رینکها، مخازن تصفیه و تحت فشار، دیکهای بخار، بدنه کامیونهای بزرگ و دکلهای برق می‌باشد [۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲].

در این تحقیق برای افزایش راندمان جذب تیتانیوم، از دو روش تزریقی و پرتابی استفاده شده است. ساختارهای میکروسکوپی و خواص مکانیکی فولاد ساده کربنی و فولاد آلیاژ شده با تیتانیوم پس از عملیات حرارتی و ترمومکانیکی (نورد کنترل شده) بررسی و مطالعه شده است.

مواد و آزمایشها

ابتدا قطعات آهن جامد با ترکیب شیمیایی داده شده در جدول ۱ در یک بوته سرامیکی به ظرفیت ۵۵۰ گرم مذاب بار شده و سپس توسط یک کوره مقاومتی گرم و ذوب شدند.

جدول ۱ - درصد وزنی عناصر دربار (قبل از ذوب)

C	Si	S	P	Mn
۰/۰۵-۰/۰۷	۰/۰۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴۵	۰/۰۴۵

جدول ۲: ترکیب شیمیایی نمونه های ریخته شده بر حسب درصد وزنی، توجه کنید که تجزیه شیمیایی عنصر Ti تا C توسط دستگاه کوانتومتر میزان نیتروژن توسط دستگاه گاز کروماتوگراف تعیین شده است.

ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)								شماره ذوب
C	Si	S	P	Mn	Al	Ti	N (PPM)	
۰/۰۵۳	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۲۴	۰/۰۲	۰/۰۰۹۸	-	۱
۰/۰۵۹	۰/۰۰۴	۰/۰۲۸	۰/۰۲۸	۰/۱۵۲	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۱۶	-	۲
۰/۰۴۴	۰/۰۰۲	۰/۰۶۶	۰/۰۶۵	۰/۲۰	۰/۰۱	-	-	۳
۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۰۲۸	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲۶	-	۴
۰/۰۲۶	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۸۷	۰/۰۸	-	۷۵	۵
۰/۰۷	۰/۲۲	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۲۶	۰/۰۹	۰/۰۰۴	-	۶
۰/۰۶	۰/۲۷	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۲۶	۰/۱۱	۰/۱۲۸	-	۷
۰/۰۷	۰/۲۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۶	۰/۰۸	۰/۱۳۴	-	۸
۰/۰۴۵	۰/۱۰	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۲۲۵	۱۶۳	۹
۰/۰۷۵	۰/۰۶۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۸	۰/۰۵	۰/۱۳۱	۹۷	۱۰
۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۲۰	۰/۱۱	۰/۱۰۲	-	۱۱
۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۲۹	۰/۰۹	۰/۱۰۹	۱۰۴	۱۲
۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۴۶	۰/۰۸	۰/۱۱۳	-	۱۳
۰/۰۹۸	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۴۰	۰/۱۰	۰/۱۲۷	۱۰۸	۱۴
۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۴	۰/۱۳	۰/۰۹۴	۶۰	۱۵
۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۴	۰/۰۶	۰/۱۱	۱۲۰	۱۶

بررسی رشد دانه ها در فولاد ساده کربنی و فولادهای میکروآلیاژ شده در دماهای ۱۰۰۰، ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ سانتیگراد به مدت نیم ساعت آستینیه شده و سپس در آب کوئنچ شدند. برای اندازه گیری اندازه دانه ها از ۸۵ - ASTM E 112 استاندارد استفاده شد [۱۵].

نتایج و بحث

از بررسی ذرات رسوب موجود در نمونه شماره ۱۵ (Ti = ۰/۰۹٪) ترکیب شیمیایی کیفی یک رسوب بصورت شکل ۲ بدست آمد. شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی (SEM) رسوب موردنظر را نشان می دهد. با توجه به پیکهای حاصل از تجربه شیمیایی، میتوان اظهار نظر کرد که این رسوب نیترید تیتانیوم با ابعاد $1/۳۶ \times 1/۲۲$ میکرون بود.

برای انجام عملیات نورد، ابتدا تمامی نمونه ها در دمای ۱۲۰۰°C بمدت نیم ساعت در کوره آستینیه شدند. دمای نهائی نورد با استفاده از پیرومتر چشمی در ۸۰۰°C ثابت نکه داشته شد. افت دما حدود ۱۰ درجه بر ثانیه بود. بدین ترتیب زمان کل برای افت دما (از ۱۲۰۰ درجه به ۸۰۰ درجه سانتیگراد) حدود ۴۰ ثانیه بود. عملیات نورد نمونه ها نیز در مدت ۴۰ ثانیه انجام می شد، بطوریکه زمان تلف شده بین دوپاس متوالی نورد ۲ الی ۲ ثانیه بود. پس از اتمام نورد، نمونه ها در هوا سرد شده و عملیات حرارتی آبدھی و بازگشت بر تعدادی از نمونه ها انجام شد. سپس نمونه های کششی در جهت طولی تسمه های نورد شده تهیه شدند [۱۵].

برای بررسی شکل و ترکیب ذرات رسوب در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم از میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ و X-ray EDS استفاده شد. برای

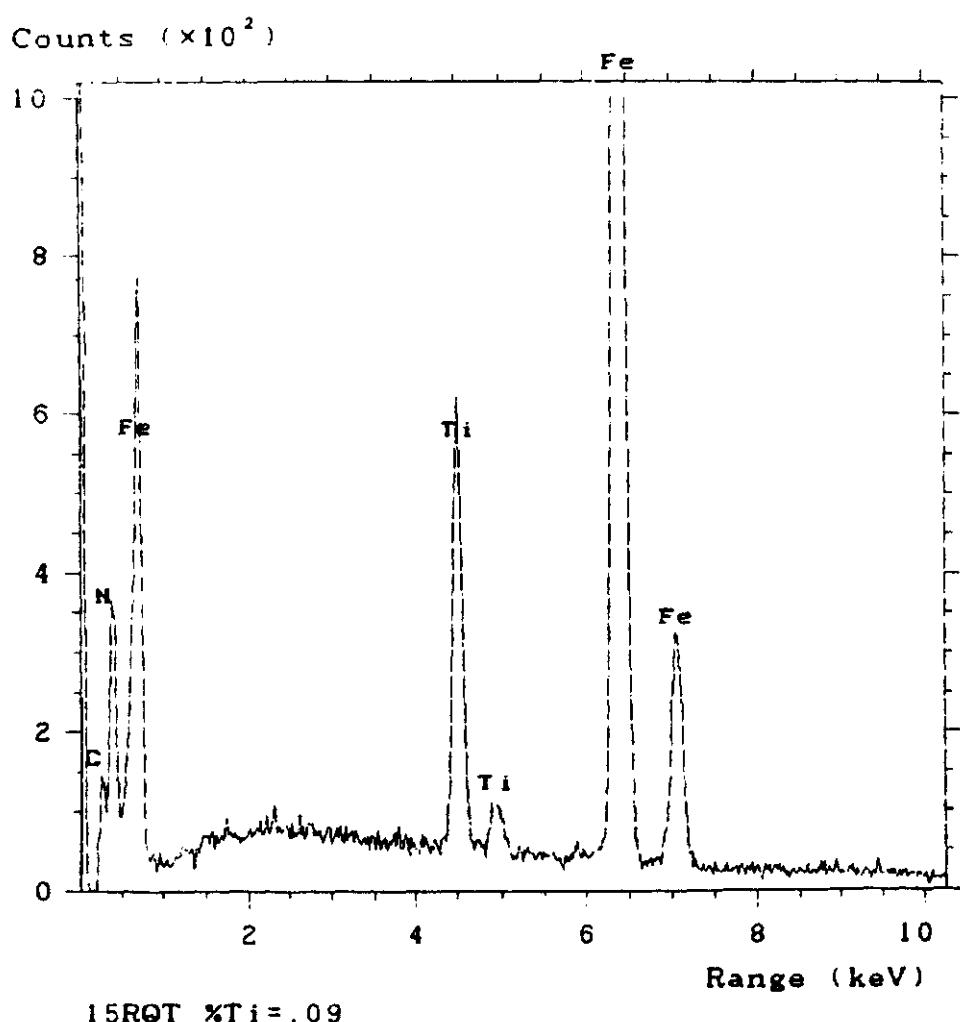
حاصل از شکل ۶ می توان گفت که رسوب موردنظر ترکیبی از رسوب کربوسولفید تیتانیوم (قسمت مرکزی) و سولفید منگنز (قسمت کناری) است (این موضوع در مرجع شماره ۱۵ مفصلانه توضیح داده شده و توسط تصاویر میکروسکوپی SEM dot-map مشاهده شده است).

تشکیل شدن این آخال به جای سولفید منگنز در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم باعث می شود که این آخال تغییر شکل ندهد. و باعث افزایش انرژی ضربه ای، چفرمکی و شکل پذیری سرد در جهت عرضی نورد، نسبت به جهت طولی نورد شود.

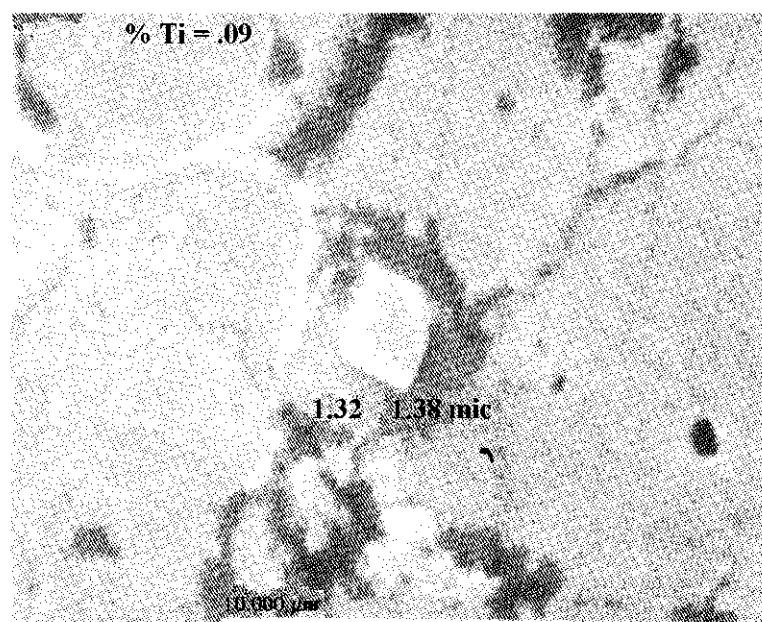
[۱۶ و ۱۷ و ۱۸].

برای بررسی ذرات رسوب موجود در نمونه شماره ۹ (Ti = ۰/۲۲٪)، ترکیب شیمیایی کیفی یک رسوب بصورت شکل ۴ بدست آمد. شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی رسوب موردنظر را نشان می دهد. با توجه به پیکهای حاصل از نتیجه آنالیز کیفی می توان ادعا کرد که رسوب نشان داده شده در شکل ۵ یک رسوب نیترید تیتانیوم خالص است که به شکل مکعب و با طول ۲/۷۵ میکرون می باشد.

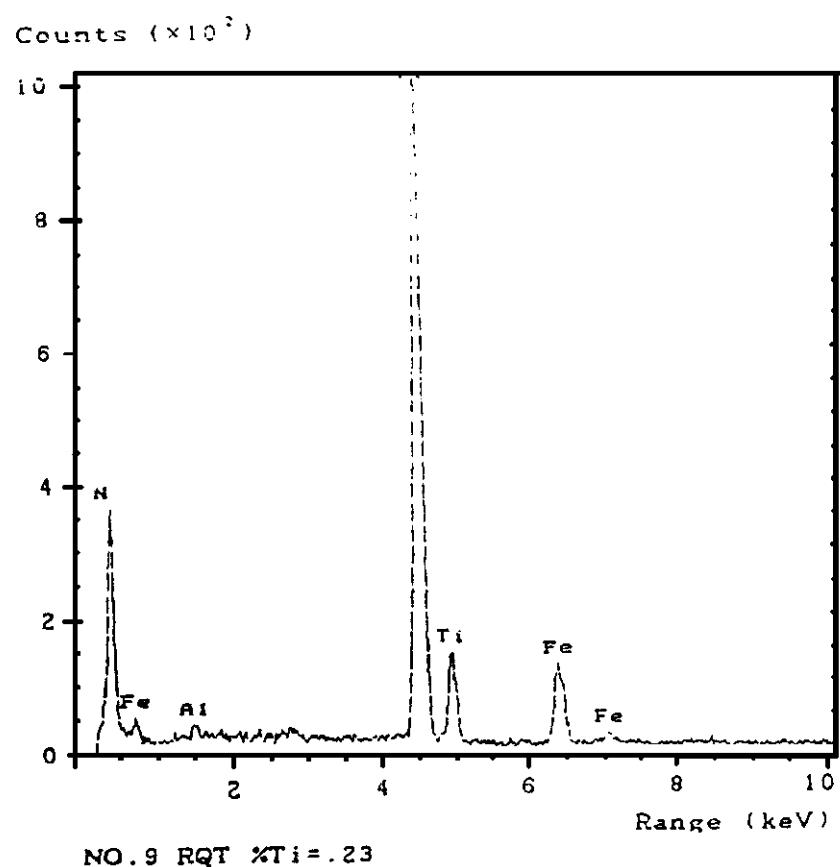
نتیجه تجزیه شیمیایی نمونه ای از یک رسوب، موجود در نمونه شماره ۱۶ (۰/۱۱٪Ti) بصورت شکل ۶ بدست آمد تصویر میکروسکوپ الکترونی رسوب در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به پیکهای



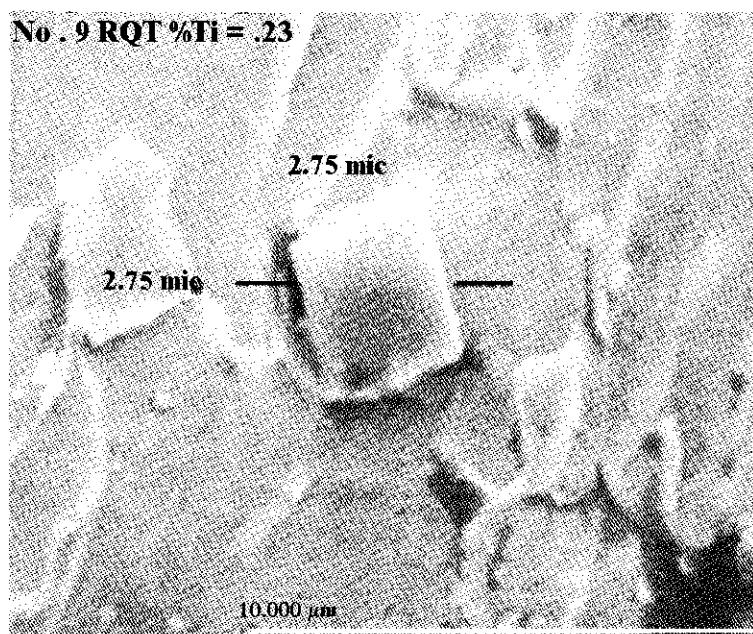
شکل ۲: ترکیب شیمیایی کیفی یک رسوب نیترید تیتانیوم (TiN) موجود در نمونه شماره ۱۵



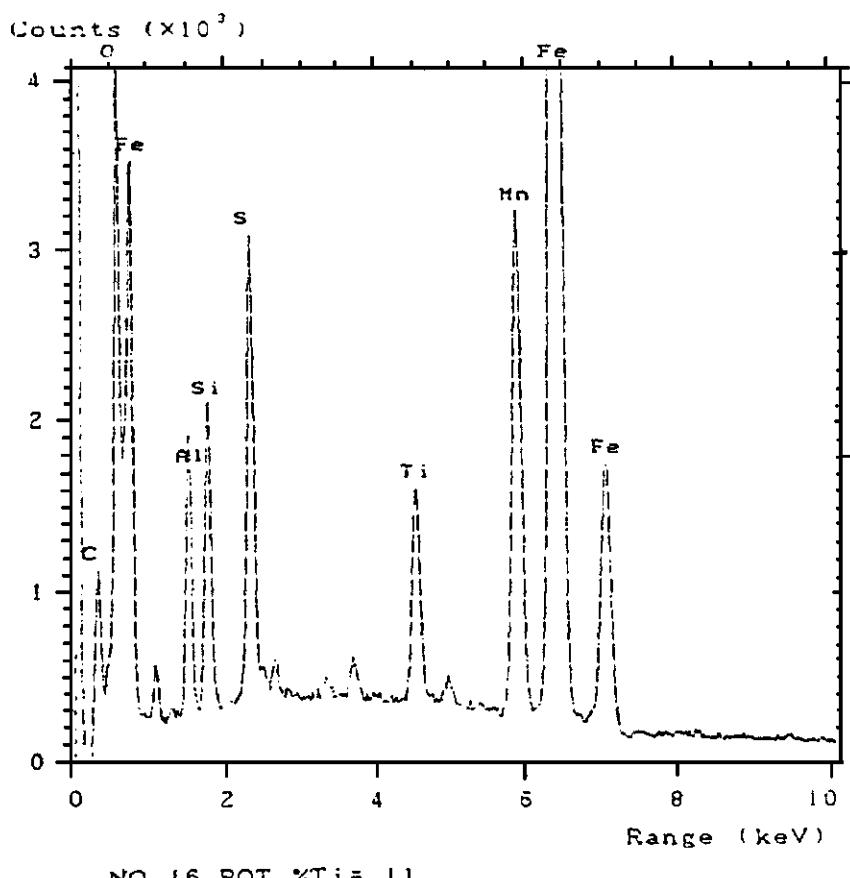
شکل ۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ از یک رسوب نیترید تیتانیوم (TiN) موجود در نمونه شماره ۱۵
(محلول لج: نایتال ۲ بر صد)



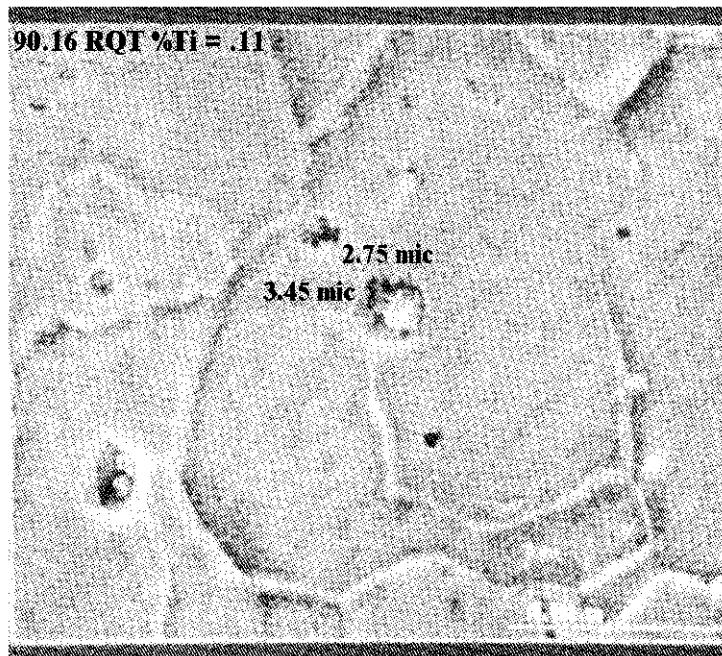
شکل ۴: ترکیب شیمیایی کیفی یک رسوب نیترید تیتانیوم (TiN) موجود در نمونه شماره ۹



شکل ۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی اسکننگ از یک رسوب نیترید تیتانیوم (TiN) موجود در نمونه شماره ۹
(محالول اچ: نایتال ۲ درصد)



شکل ۶: ترکیب شیمیایی کیفی یک رسوب کربوسولفید تیتانیوم موجود در نمونه شماره ۱۶

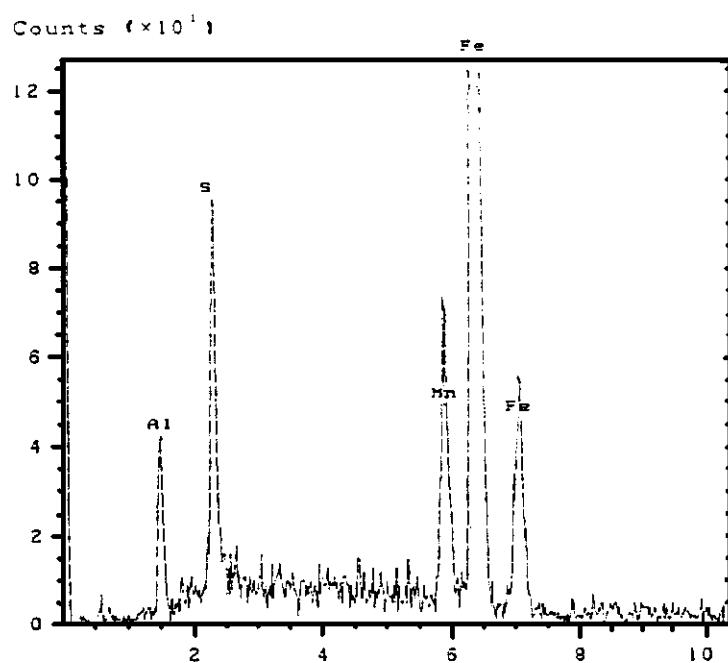


شکل ۷: تصویر میکروسکوب الکترونی اسکنینگ از یک رسوب کربوسولفید تیتانیوم موجود در نمونه شماره ۱۶
(محلول اج: نایتال ۲ درصد)

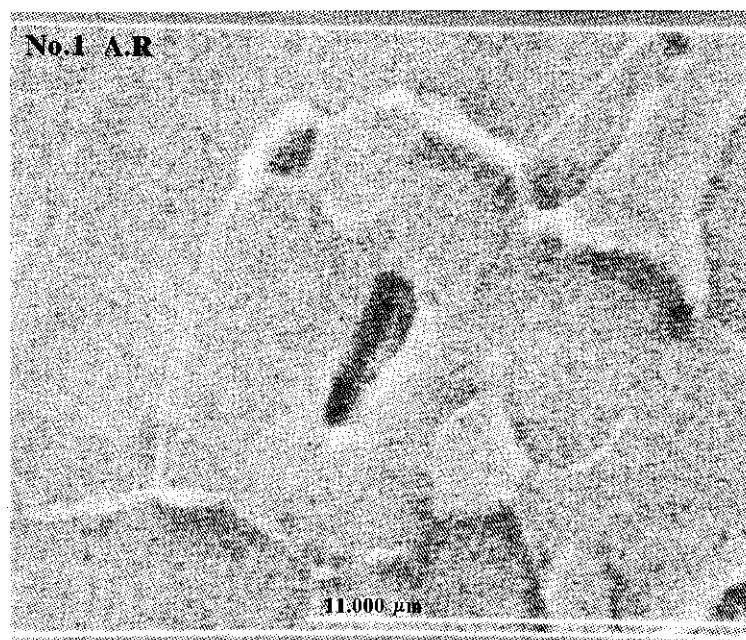
آخال (مطابق شکل ۷) مشاهده نمی شود که بعلت تشکیل رسوب کربوسولفید تیتانیوم به جای سولفید منکنز خالص می باشد که در قسمت مرکزی به عنوان جوانه برای آخال سولفید منکنز عمل می کند. بعلت اختلاف پتانسیل زیاد اشعه ایکس ($EHT = 20 \text{ KeV}$) و در نتیجه نفوذپذیری بالای آن، پیکهای Al ، Fe و در بعضی موارد Si مربوط به ترکیب شیمایی کلی نمونه هستند. حال آنکه اگر رسوب مورد بررسی به اندازه کافی بزرگ باشد، (همانطوریکه از شکل ۵ مشاهده می شود) بیکر این پیکها وجود نخواهد داشت.

برای بررسی دقیقتر اثر تیتانیوم بر شکل سولفید و تاثیر آن بر خواص مکانیکی در جهت عرضی نورد، نمونه های کششی در جهت طولی و عرضی نورد ساخته شدند و آزمایش کشش روی آنها انجام گرفت. نتایج آزمایش کشش در جهت طولی و عرضی در شکلهای ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

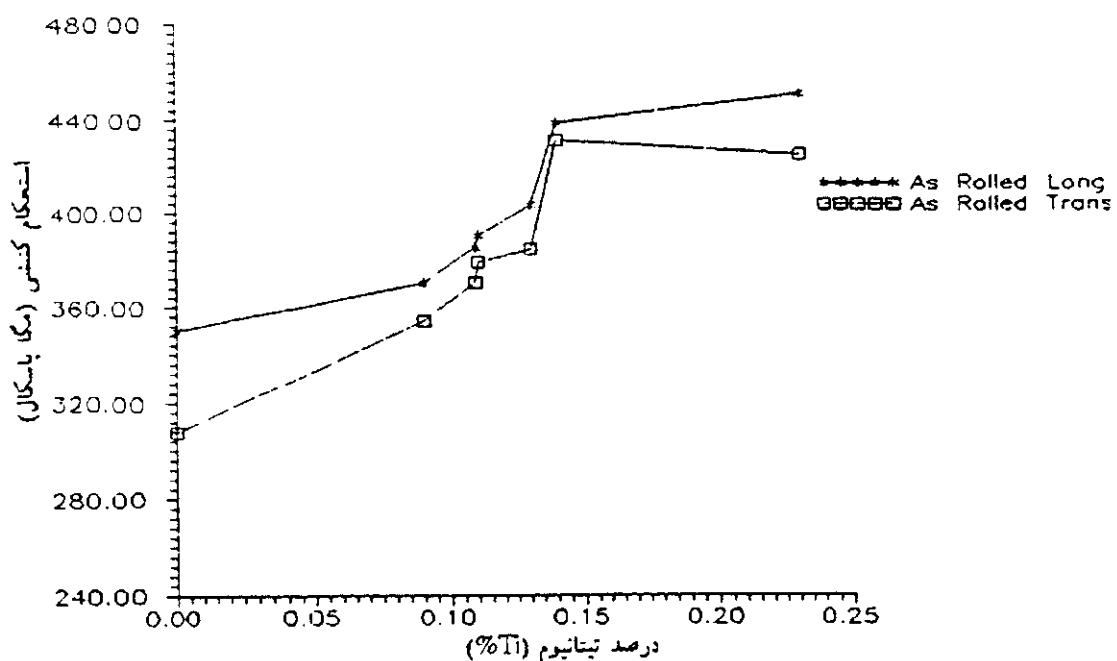
برای بررسی ذرات رسوب موجود در نمونه شماره ۵ (فولاد ساده کربنی) ترکیب شیمایی کیفی یک رسوب موردنظر EDS X-ray بصورت شکل ۸ بدست آمد (حداقل از سه نقطه آخال آزمایشها کیفی صورت گرفت). شکل ۹ تصویر میکروسکوب الکترونی آخال موردنظر را در فولاد کربنی ساده نورد شده (با مقدار کاهش ۷۷ درصد) نشان می دهد. براساس پیکهای شکل ۸ می توان اظهارنظر کرد که رسوب نشان داده شده در شکل ۹ یک آخال سولفید منکنز (MnS) می باشد که کشیدگی آن در جهت نورد بعلت کاهش ۷۷ درصد قابل توجه می باشد. کشیدگی این آخالها در حین نورد باعث بوجود آمدن جهت مندی و غیریکنواختی در خواص مکانیکی در جهت طولی نسبت به جهت عرضی نورد می شوند. با توجه به اینکه درصد کاهش در نمونه شماره ۱۶ ۷۷ درصد می باشد اما تغییر شکل قابل ملاحظه ای در



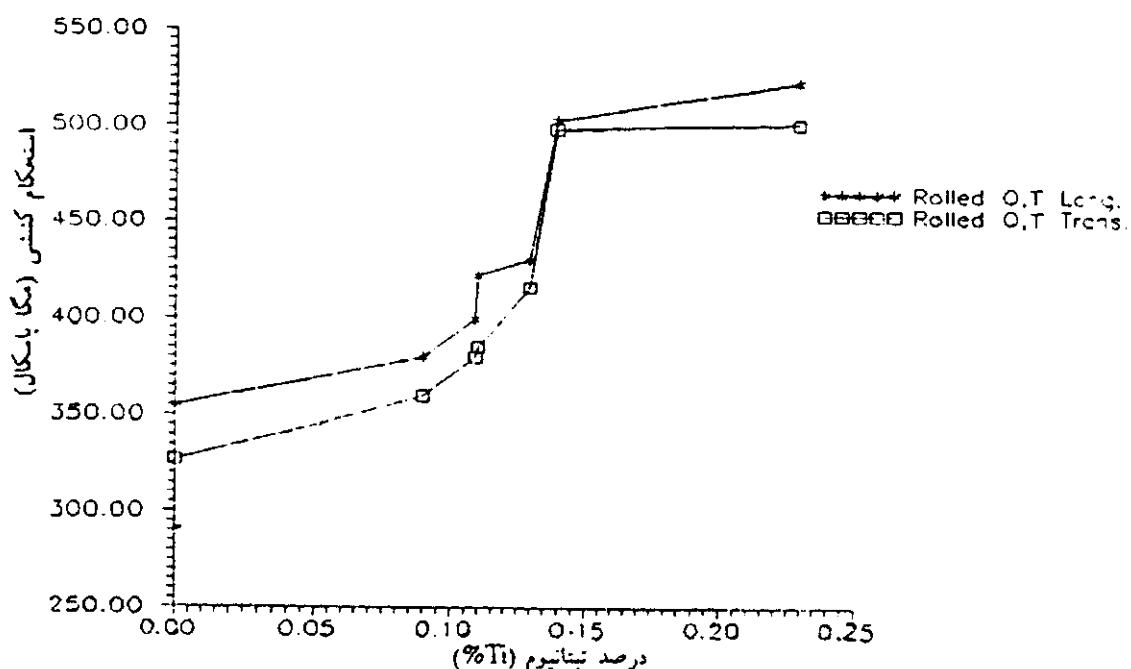
شکل ۸: ترکیب شیمیایی کیفی از یک رسب سولفید منکنز موجود در نمونه فولاد کربنی ساده (نمونه شماره ۵)



شکل ۹: تصویر میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ از یک رسب سولفید منکنز موجود در نمونه شماره ۵
(محلول اج: نایتال ۲ درصد)



شکل ۱۰: ارتباط بین استحکام کششی و درصد تیتانیوم در فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار نورد گرم شده در جهت عرضی و طولی نوره، ضخامت ۲ میلیمتر



شکل ۱۱: ارتباط بین استحکام کششی و درصد تیتانیوم در فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار نورد گرم شده آبداده و بازگشت داده شده در جهت عرضی و طولی نوره، ضخامت ۲ میلیمتر

شکل ۱۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی اسکینینگ از یک رسوب سولفید تیتانیوم ($Ti4C2S2$) موجود در نمونه شماره ۱۳
(محلول آج: نایپال ۲ درصد)

تیتانیوم می باشدند [۲۲].
بطور کی مشخص گردیده است که در مقادیر تیتانیوم بحدکافی زیاد، کربوسولفیدها بطور کامل جایگزین سولفید مخلوط می شوند [۲۲]. آخال (Ti₄C₂S₂) دارای سختی بسیار بالایی است و بطور بیوسته در فولادهای نورد کرم شده بصورت تغییر شکل ناپذیر وجود دارد. این سولفید در طی نورد کرم به قطعات کوچکتری شکسته شده اما از خود تغییر شکل نشان نمی دهد [۲۲ و ۲۴]. شکل ۱۲ نشان می دهد که آخالهای کربوسولفید تیتانیوم در طی نورد به چند تکه شکسته شده ، اما تغییر شکل و یا افزایاد طولی نمیدهد. از مشاهدات میکروسکوپ الکترونی اسکینینگ می توان نتیجه گرفت که رسوبات نیترید و کربوسولفید تیتانیوم در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم بصورت ریز و پراکنده در زمینه قرار دارند.

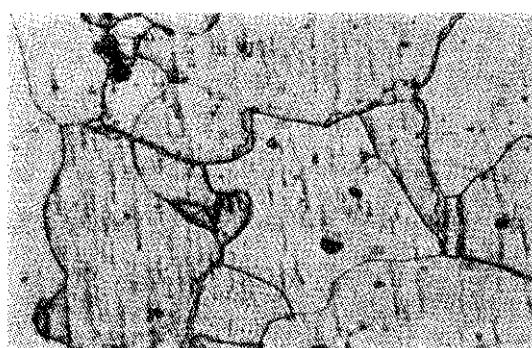
با مقایسه شکل های استحکام کششی (هم در حالت نورد شده آبداده شده و بازکشت داده شده) میتوان مشاهده نمود که در مقدار ۰/۱۴ درصد تیتانیوم ، اختلاف بین استحکام کششی در جهت طولی و عرضی نورد به کمترین مقدار ممکن می رسد. لذا به نظر می رسد که برای چنین فولاد کربنی ساده ای (با درصد منکنز و گوگرد مشخص) در مقدار ۰/۱۴ درصد تیتانیوم بینترین کنترل شکل سولفید (باتوجه به شکل ۱۲، تصویر میکروسکوپ الکترونی) انجام گرفته است .

اختلاف بین استحکام کششی در جهت طولی و عرضی نورد در مقادیر تیتانیوم بالا (۰/۲۲ درصد) به علت عدم کنترل کامل شکل سولفیدها (سولفید منکنز) و به علت تشکیل سولفیدهای تیتانیوم است که دارای شکل پذیری بیشتری نسبت به کربوسولفیدهای

شده در شکل‌های ۱۶ الی ۱۹ و ریز ساختارهای نمونه‌های نورد شده ، نورد شده و عملیات حرارتی شده در شکل‌های ۱۷ الی ۱۹ نشان داده شده است .

بعلت حلالیت خیلی کم رسوب نیترید تیتانیوم در دماهای بالا، این رسوب در جلوگیری از رشد دانه‌ها بسیار مؤثر می‌باشد [۲۶ و ۲۵ و ۷ و ۴] . ریز ساختار نمونه‌های ریخته شده و نرمالیزه

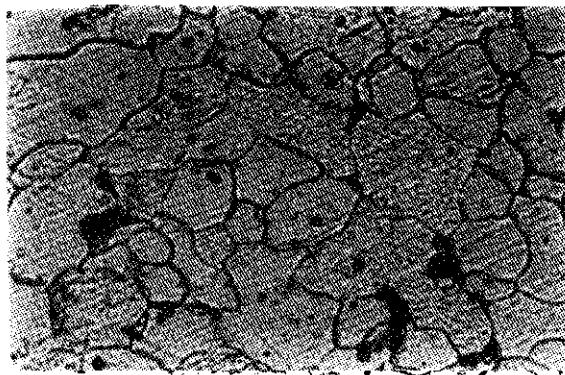
شکل ۱۲ : تصویر میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ از یک رسوب کربو سولفید تیتانیوم موجود در نمونه شماره ۱۶
(محلول اج : نایتال ۲ درصد)



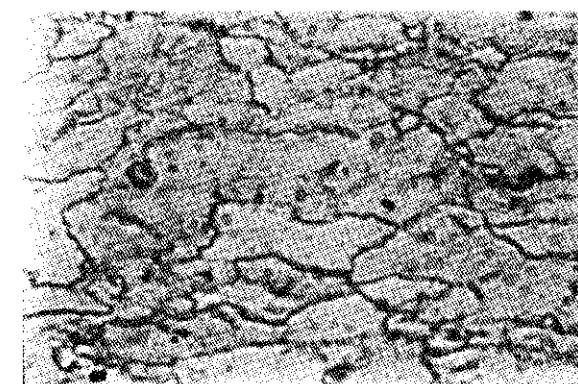
شکل ۱۳ : ساختار میکروسکوپی فولاد کربنی ساده، فولاد شماره ۵، ریخته شده و نرمالیزه شده
(محلول اج : نایتال ۲ درصد بزرگنمایی $\times 300$)



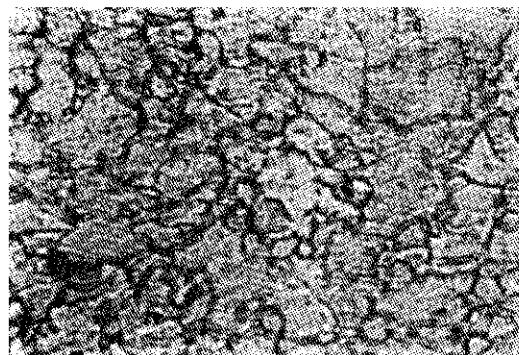
شکل ۱۵: ساختار میکروسکوپی فولاد میکروآلیاژ شده با تیتانیوم (۰/۱۴۷۶Ti) فولاد شماره ۱۴، ریخته شده و نرمالیزه شده
(محلول اج: نایتال ۲ درصد بزرگنمایی $400\times$)



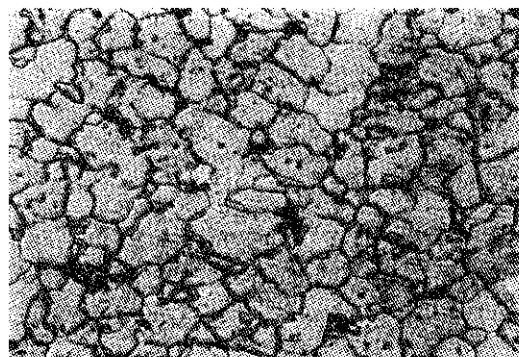
شکل ۱۶: ساختار میکروسکوپی فولاد میکروآلیاژ شده با تیتانیوم (۰/۰۹۴۶Ti) فولاد شماره ۱۵، ریخته شده و نرمالیزه شده
(محلول اج: نایتال ۲ درصد بزرگنمایی $400\times$)



شکل ۱۷: ساختار میکروسکوپی فولاد کربنی ساده، فولاد شماره ۵، نورد شده
(محلول اج: نایتال ۲ درصد بزرگنمایی $400\times$ با ۷۷ برصد کاهش)



شکل ۱۸: ساختار میکروسکوپی فولاد میکروآلیاژ شده با تیتانیوم (۰/۲۲۵%Ti) نمونه شماره ۹، نورد شده
(محلول اج: نایتال ۲ درصد بزرگنمایی $\times 400$) با ۷۰ درصد کاهش



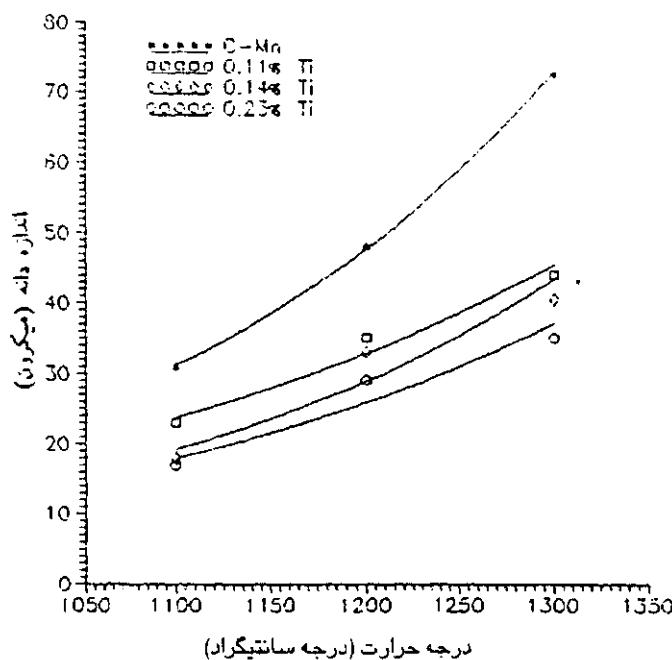
شکل ۱۹: ساختار میکروسکوپی فولاد میکروآلیاژ شده با تیتانیوم (۰/۰۹۴%Ti) فولاد شماره ۵، نورد شده آبداده و بازگشت داده شده
(محلول اج: نایتال ۲ درصد بزرگنمایی $\times 400$) با ۷۷ درصد کاهش

فصل مشترک فریت - آستینیت رسوب می کنند که در ریز کردن دانه ها بسیار موثر می باشند. علاوه بر این در حین نورد گرم رسوبات ناشی از کرش در آستینت بوجود می آید و باعث پین کردن مرزهای فرعی شده و از تبلور مجدد جلوگیری می کند [۲۶ و ۲۷].

منحنی رشد دانه بر حسب درجه حرارت برای فولاد ساده کربنی و فولادهای آلیاژ شده با تیتانیوم در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

از مقایسه ریزساختارها می توان نتیجه گرفت که در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم بعلت وجود رسوبات ریز نیترید و کربوسولفید و کربونیترید تیتانیوم ساختارها ظریفتر و دارای دانه های ریزتری است.

همانطوریکه از تصاویر مشخص است ساختارها در حالت نورد شده آبداده و بازگشت داده شده دارای کوچکترین اندازه دانه می باشند. علت ریزتر بودن را می توان اینطور توضیح داد که در مرحله نورد و عملیات حرارتی کوئنچ، رسوبات کاربید و کربونیتریدهای تیتانیوم بصورت رسوبات ریز در



شکل ۲۰: اثر دما روی اندازه دانه فریت برای فولاد میکروآلیاژ شده با تیتانیوم و فولاد ساده کربنی

تسليم و استحکام کششی افزایش پیدا می کنند. فولاد ساده کربنی بعلت داشتن دانه بزرگتر و عدم رسوب سختی دارای کمترین استحکام تسليم و کششی می باشد ولی فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم بعلت وجود رسوبات بسیار ریز و پراکنده که باعث سختی رسوبی فریت شده و همچنین بعلت اندازه دانه بسیار ریز، دارای بیشترین استحکام تسليم و کششی می باشد. در فولاد کربن منکری بعلت تشکیل رسوب پیوسته نیترید آلمینیوم (AlN) که در مرز دانه ها تشکیل می شود و همچنین بدلیل تشکیل سولفید منکری که خیلی بزرگتر از نیترید آلمینیوم می باشد، توسعه حفره ها در مرز دانه ها اجازه می دهد که فرایند حفره ای شدن رخ بدند و مسیر مناسبی برای انتشار و پیشرفت ترک مهیا می سازد. اما در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم، مشاهدات میکروسکوپ الکترونی نشان داده است که رسوبات کربونیترید و نیترید تیتانیوم بصورت اتفاقی در

از منحنی اندازه دانه - درجه حرارت می توان مشاهده نمود که در تمامی دمایان اندازه دانه در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم کمتر از فولاد ساده کربنی است همچنین می توان مشاهده نمود که به ازای یک دمای معین وقتی مقدار تیتانیوم افزایش می یابد اندازه دانه کوچکتر می شود. سرعت رشد کمتر دانه ها در فولادهای میکروآلیاژ تیتانیوم دار به خاطر رسوبات زیاد و ریز اما پایدار نیترید تیتانیوم (TiN) می باشد که بعلت حلایلت خیلی کم، رسوب نیترید تیتانیوم (حتی در دمایان بالا) از رشد دانه ها جلوگیری می کند. این رسوب بواسیله میکروسکوپ الکترونی در تمامی نمونه های ریخته شده مشاهده شده است.

تأثیر افزایش مقدار تیتانیوم و عملیات حرارتی و مکانیکی و خواص کششی فولادها با توجه به جدول ۲ در شکلها ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است. شکلها نشان می دهند که با افزایش مقدار تیتانیوم استحکام

و در نتیجه فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار بدون عملیات حرارتی می‌توانند استقاده شوند. منحنی درصد ازدیاد طول نسبی بر حسب مقدار تیتانیوم در شکل ۲۳ نشان داده شده است. شکل نشان می‌دهد که با افزایش مقدار تیتانیوم درصد ازدیاد طول نسبی در فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار بدليل افزایش استحکام ناشی از رسوب سختی می‌باشد. در تمامی فولادهای آلیاژ شده با تیتانیوم علاوه بر افزایش استحکام، درصد ازدیاد طول در حد قابل قبولی کاهش یافته است.

زمینه توزیع شده و هیچ نوع رسوب مرز دانه‌ای در این فولادها مشاهده نشده است. توزیع بسیار مناسب رسوبات ریز در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم باعث ریز شدن دانه هاو در نهایت باعث افزایش استحکام و چقرمگی نسبت به فولاد ساده کربنی می‌شود.

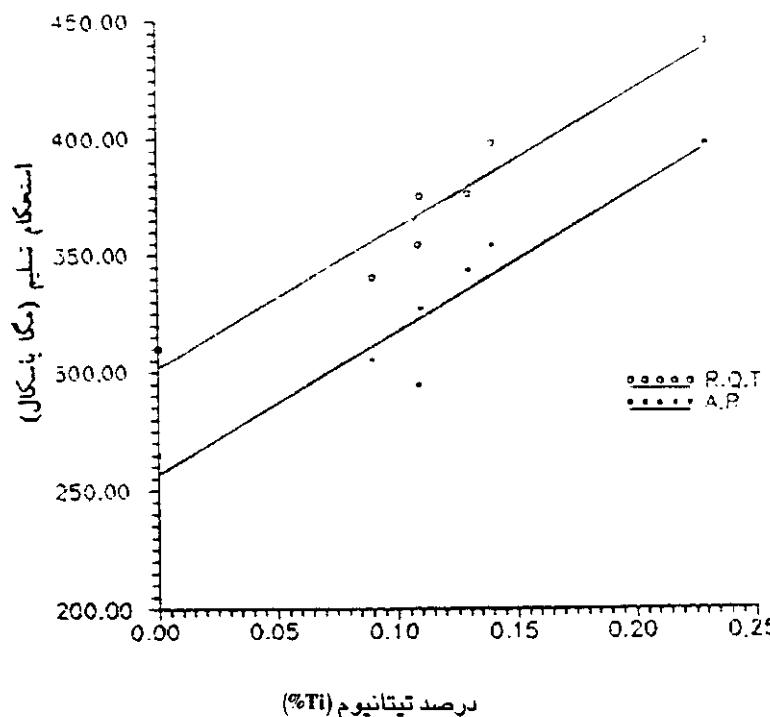
با توجه به نتایج استحکام کششی و تسلیم در نمونه های نورد شده و نمونه های نورد شده آبداده شده و بازگشت داده شده می‌توان مشاهده نمود که اختلاف بین استحکام کششی و تسلیم خیلی کم بوده

جدول ۳: خواص مکانیکی (بر جهت طولی نورد) فولاد کربنی ساده و فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم

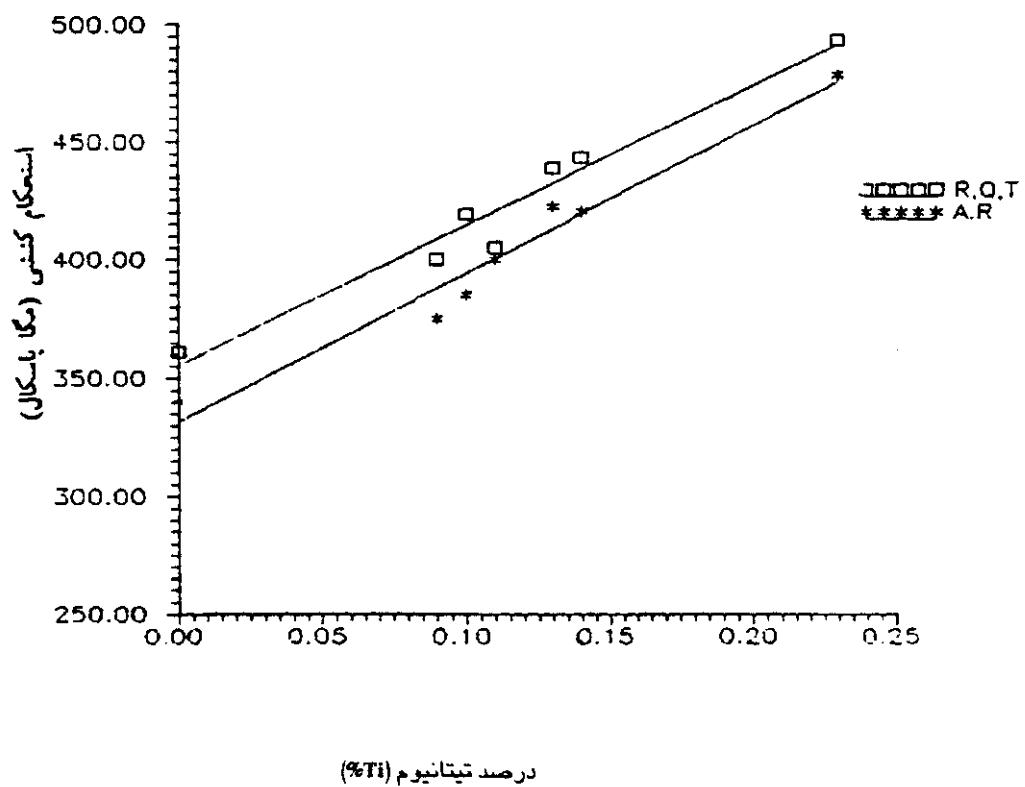
درصد کاهش در ضخامت % TI	درصد تیتانیوم	خواص کششی (مکاپاسکال)				نوع عملیات حرارتی	شماره نمونه (ذوب)
		استحکام کششی نهاشی	استحکام تسلیم درصد ازدیاد طول (در ۲۵ میلیمتر)				
۷۷	-	۲۸	۳۱۰	۳۶/۱۲	R,Q,T	۵	
		۲۴	۲۶۵	۳۴۰	A.R		
۷۷	۰/۰۹	۲۲	۳۴۰	۴۰۰	R,Q,T	۱۵	
		۲۸	۲۰۵	۳۷۵	A.R		
۷۸	۰/۱۰۹	۲۸	۲۵۴/۱	۴۱۹	R,Q,T	۱۲	
		۲۵	۲۹۴/۲	۲۸۵	A.R		
۷۷	۰/۱۱	۲۶	۳۷۵	۴۰۵	R,Q,T	۱۶	
		۲۲	۳۲۷	۴۰۰	A.R		
۷۹	۰/۱۲	۲۲	۳۷۶	۴۳۸/۶	R,Q,T	۱۰	
		۲۰	۲۸۴۳/۲	۴۲۲/۲	A.R		
۸۰	۰/۱۴	۱۹	۳۹۹۷/۷	۴۴۳	R,Q,T	۱۴	
		۱۸	۳۵۴	۴۲۰	A.T		
۷۰	۰/۲۲	۱۴	۴۴۱/۲	۴۹۳	R,Q,T	۹	
		۱۳	۳۹۷/۷	۴۷۸	A.R		

= نورد شده ، آبداده شده و بازگشت داده شده R,Q,T

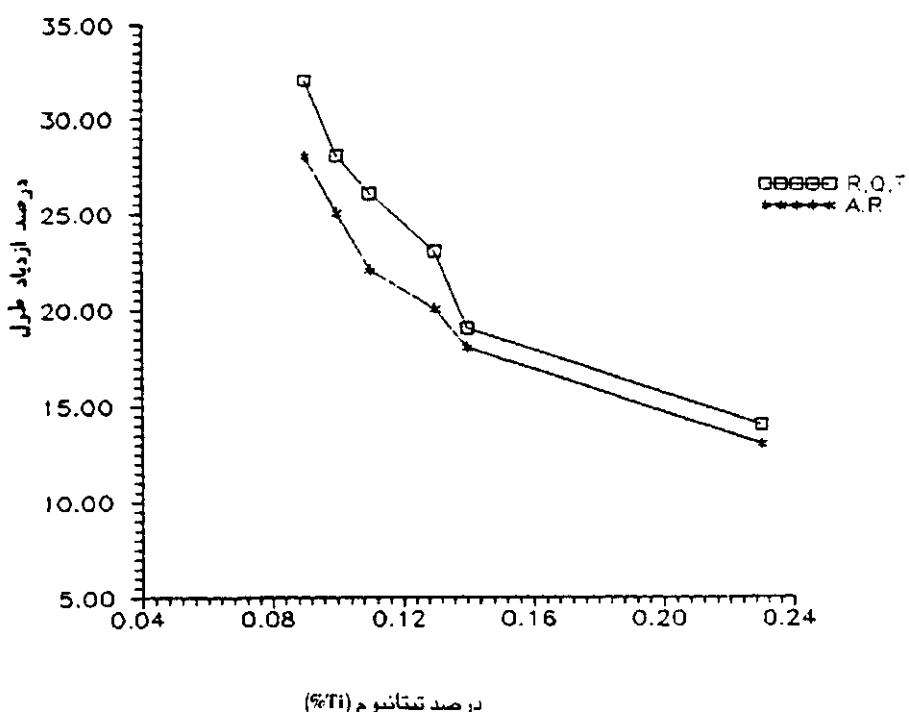
= نورد شده A.R



شکل ۲۱: رابطه بین استحکام تسلیم و مقدار تیتانیوم در فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار نورد گرم شده، ضخامت ۲ میلیمتر



شکل ۲۲: رابطه بین استحکام کششی و مقدار تیتانیوم در فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار نورد گرم شده، ضخامت ۲ میلیمتر



شکر ۲۲: رابطه بین استحکام کششی و مقدار تیتانیوم در فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار نورد گرم شده، ضخامت ۲ میلیمتر

جمع بندی

شده که در مقدار تیتانیوم ۱۴٪ درصد بهترین کنترل شکل سولفید انجام می‌گیرد بطوریکه اختلاف بین استحکام کششی در جهت طولی و عرضی نورد به کمترین مقدار ممکن می‌رسد.

تشکر و قدردانی

جا دارد از تکنیسینهای آزمایشگاه استخراجی، شکل دادن و عملیات حرارتی دانشکده مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی شریف برای همکاری در تهیه و ساخت نمونه‌ها و از اپراتور میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ مرکز تحقیقات جهادسازاندکی از بابت تهیه تصاویر میکروسکوپی و آنالیز کیفی رسوبات و از مستول آزمایشگاه جهاد خودکافی سپاه به خاطر انجام آزمایش‌های آنالیز کوانتمتری نمونه‌ها سپاسگزاری شود.

۱ - ریز شدن دانه‌های آستنیت و نهایتاً فریت در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم بواسطه وجود ذرات ریز نیترید و کربو نیترید تیتانیوم انجام می‌گیرد. این رسوبات در کنترل رشد دانه‌ها در مرحله حرارت دادن مجدد در دماهای بالا بسیار مناسب می‌باشند.

۲ - بعثت ریز شدن دانه‌ها و ایجاد رسوب سختی در فولادهای آلیاژ شده با تیتانیوم، استحکام کششی و استحکام تسلیم با افزایش مقدار تیتانیوم تقریباً بطور خطی افزایش پیدا می‌کنند.

۳ - آخالهای سولفید منکنز در فولاد ساده کربنی در اثر نورد گرم کشیده می‌شود ولی تیتانیوم باعث بهبود ترکیبی سولفید منکنز شده و تولید آخالهای سخت و کروی کربو سولفید تیتانیوم $(\text{Ti}, \text{Fe}, \text{Mn})_4\text{C}_2\text{S}_2$ می‌کند که در طی نورد گرم تغییر شکل یا ازدیاد طول نمی‌دهد. در تحقیق حاضر دیده

فهرست منابع

- 1 - J. H. Woodhead and S. R. Keown, "The history of microalloyed steels", Proc. of Inter. Conf. on HSLA Steels'85, 4-8, Nov. 1985, Beijing, PP. 15-28.
- 2 - R. B. G. Yeo and A. G. Melville, "Properties and Control of hot - rolled Steels", J. Metals, June 1968, PP. 33-43.
- 3 - K. J. Irvine, F. B. Pickering, and T. Gladman, "Grain - Refined C - Mn Steels", JISI, February 1967' PP. 161-182.
- 4 - R. W. K. Honeycombe, "Fundamental aspects of Precipitation in Microalloyed steel", Proc. of Inter. Conf. on HSLA steels'85, 4-8, Nov. 1985, Beijing, PP. 243-250
- 5 - H. Stuart and B. L. Jones, "A Perspective on microalloyed steels", J. Meals, April 1953, PP. 17-20.
- 6 - R. R. Perston, "A review of high Strength, Low alloy steel Metallurgy in Europe", British steel Corporation, PP. 9-41.
- 7 - A. T. Davenport, L. C. Brossard and R. E. Miner, "Precipitation in microalloyed HSLA steels", J. Metals, June 1975, PP. 21-27.
- 8 - Lutz Meyer, "Effect and present application of the microalloying elements Nb, V, Ti, Zr and B in HSLA steels" , Proc. of Inter. Conf. on HSLA steels'85, 4-8, Nov. 1985, Beijing, PP. 26-44.
- 9 - Liguang-Ying, Yuan Zheng, "Production, microstructure and Properties of Microalloyed high Strength 355 MN/m² Grade Ship Plate", Proc. of Inter. Conf. on HSLA steels'85, 4-8, Nov. 1985, Beijinhg, PP. 605-611.
- 10 - C. L. Magee, R. G. Davies and P. Beardmore, "Factors influencing Automotive application of HSLA steels", J. Metals, Nov. 1980, PP. 28-35.
- 11 - Isao Kozasu, "Recent development of microalloyed steel plate", Proc. of Inter. Conf. on Technology and application of HSLA steels, 3-6 October 1983, Philadelphia. PP. 593-607.
- 12 - A. P. Coldren and T. G. Oakwood, "A new economical X-70 Line Pipe steel", J. Metals, April 1983, PP. 28-34.
- ۱۳ - صدرنژاد - خطیب الاسلام ، کاشانی بزرگ - سید فرشید و حشمتی منش - سعید: تولید فولاد میکرو آلیاژی و انادیوم دار و نایوبیوم دار به روش غوطه ورسازی و بررسی خواص آن : نشریه دانشکده فنی، ۱۲۶۸، صفحات ۴۵ الی ۶۰.
- ۱۴ - صدرنژاد - خطیب الاسلام ، نیبرسی خواص و روش ساخت فولادهای میکروآلیاژی : کارنامه پژوهشی شریف ، سال ۱۳۷۱، صفحات ۴۶۰ تا ۴۶۴.
- ۱۵ - حرارتی - اسدالله ، تز کارشناسی ارشد، بررسی روش ساخت و خواص فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار، دانشکده مهندسی متالورژی ، دانشگاه صنعتی شریف ، ۱۳۷۲.
- 16 - L. Luyckx and J. R. Bell, "Sulfide shape control in high strength low alloy (HSLA) steels", Metall. Trans., Vol. 1, December 1970, PP. 3341-3350.

- 17 - W. G. Wilson, D. A. R. Kay and A. Vahed, "The use of thermodynamics and phase equilibria to predict the behavior of the rare earth elements in steel", J. Metals, May 1974, PP. 14-23.
- 18 - W. G. Wilson and R. G. Wells, "Identifying inclusions in rare earth treated steels", Metal Progress, Dec. 1973, PP. 75-77.
- 19 - A. D. Wilson, "Characterizing inclusion shape control in low sulfur C-Mn-Cb steels", Proc. of Inter. Conf. on Technology and applications of HSLA steels, 3-6 October 1983, Philadelphia, PP. 416-427.
- 20 - S. K. Saxena, "Improving inclusion morphology, cleanliness, and mechanical properties of Al-Killed steel by injection of lime-based powder", Ironmaking and steelmaking, Vol. 2, 1982, PP. 50-57
- 21 - J. V. Russell, "Rare earth additions effect surface quality of low carbon steel", J. Metals, April 1954, PP. 438-442.
- 22 - C. J. Ball, "X-ray Powder diffraction patterns of Titanium carbosulphide and τ Titanium sulphide", Metal Science, Vol. 18, Dec. 1984, PP. 577-579.
- 23 - He Yong-Kang, "Development and production of Titanium steels", Proc. of Inter. Conf. on HSLA Steels'85, 4-8, Nov. 1985, Beijing, PP. 627-631.
- 24 - J. G. Williams, "Titanium microalloyed hot rolled strip steels-production, properties and Application", Proc. of Inter. Conf. on Technology and applications of HSLA steels, 3-6 October 1983, Philadelphia, PP. 261-275.
- 25 - H. Gross and H. Krebs, "Investigation of the Titanium addition to the base material on toughness Properties of the HAZ", Steel research, 63 (1992), No. 12, PP. 554-557.
- 26 - J. Kunze, "Solubility product of Titanium Nitride in γ - Iron", Metal Science, Vol. 16, April 1982, PP. 217-218.
- 27 - C. Wenxuan, Y. Wangyueh, C. Tean, Recrystallization of austenite in Titanium treated HSLA Steels", Proc. of Inter. Conf. on HSLA steels'85, 4-8 Nov. Beijing, PP. 199-206.
- 28 - M. Kuhlmeier, "Relation between statistical grain size distribution and yield strength", Proc. of 5th. Inter. Conf. on Strength of metals and alloy, Aachen, August 27-31, 1979, Vol. 2, PP. 855-860.