

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

دکتر خطیب الاسلام صدرنژاد

دانشکده مهندسی متالورژی، دانشگاه صنعتی شریف

مهندس 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 چرمگی^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 ۰/۲۲٪ درصد تیتانیوم ساخته شدند. مشاهدات میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ (SEM) و میکرو آنالیز 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 ریزتری 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 دماهای 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 میکروآلیاژ تیتانیوم دار، استحکام کششی و تسلیم بالافزایش 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 میکروآلیاژ 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 بخلاف سولفید منگنز، آخالهای کربوسولفید تیتانیوم تغییر شکل یا ازدیاد طول نمی دهد و بصورت کروی باقی می مانند. در نتیجه افزایش انرژی شکست، چرمگی و شکل پذیری سرد در جهت عرضی نورد، نسبت به جهت طولی نورد پدید می آید.

مکاپاسکال بدست آورند. اما بعلت کربن بالاتر، قابلیت چرمگی و جوش پذیری آنها محدودتر است. از خواص ویژه فولادهای کم آلیاژی استحکام بالا این است که در حالت نورد شده ۱/۲۱ بدون افزایش کربن، استحکام افزایش پیدا می کند. بدین ترتیب بهبود خواص در این فولادها بوسیله دانه های بسیار ریز ۱/۲ و بوسیله مکانیزم های رسوب سختی بدست می آید^{۲۴}. مهمترین عناصر میکروآلیاژی نایوبیوم، واندیوم و تیتانیوم می باشند^{۲۶ و ۲۷}.

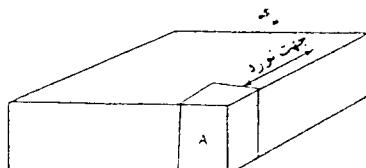
مقدمه

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^{۱۱}.

فولادهای کم آلیاژی متدائل که معمولاً^{۲۸} 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 [۱۴ و ۱۳] . 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 ۲۴۶۰ metal analyzer تعیین شد . نتیجه در جدول ۲ آورده شده است . ریخته گری در قالب های فلزی پیش گرم شده انجام شد . برای عملیات حرارتی (نرمالیزاسیون ، کوئنچ و بازگشت) و متالوگرافی ، قطعاتی از نمونه های 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 ، غلطک های دستگاه نورد تا حدود ۱۰۰°C پیش گرم شدند [۱۵] .



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

بدیهی 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 کارخانه های بزرگ فولادسازی تشکیل می دهد . بعلت سود حاصل از کاهش وزن در مقایسه با فولادهای کربنی ، فولادهای میکروآلیاژی استحکام بالا برای ساخت وسایل نقلیه صنعتی ترجیح داده می شوند [۸] . مهمترین کاربرد فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار در صنایع اتومبیل ، بدنه کشتی ، سازه های ساحلی ، خطوط راه آهن ، خطوط لوله برای انتقال نفت و گاز ، ساخت پلها ، اجزاء یاتاقان و شاسی کامیونها ، بدنه ، قالب و پایه های موتور ، دیسکهای چرخ ، چرخ دنده ها ، محورهای لوکوموتیوهای برقی ، میل فرمانها ، میل لنگها ، میل گردان کامیونها ، رینگها ، مخازن تصفیه و تحت فشار ، دیکهای بخار ، بدنه کامیونهای بزرگ و دکلهای برق می باشد [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°C مذاب بار شده و سپس توسط یک کوره مقاومتی کرم 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	۰/۵۴۵

جدول ۲: ترکیب شیمیایی نمونه های ریخته شده بر حسب درصد وزنی، توجه کنید که تجزیه شیمیایی عناصر Ti تا C توسط دستگاه کوانتمتر و 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	۰/۰۰۳	۰/۰۶۶	۰/۰۶۵	۰/۲۰	۰/۰۱	-	-	۳
۰/۰۱۳	۰/۰۰۳	۰/۰۲۸	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲۶	-	۴
۰/۰۲۶	۰/۱۱	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۱۸۷	۰/۰۸	-	۷۵	۵
۰/۰۷	۰/۲۳	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۲۶	۰/۰۹	۰/۱۰۴	-	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	۰/۱۴۴	-	۸
۰/۰۴۵	۰/۱۰	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۲۸	۰/۱۱	۰/۲۲۵	۱۶۲	۹
۰/۰۷۵	۰/۰۶۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۸	۰/۰۵	۰/۱۲۱	۹۷	۱۰
۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۳۰	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	۰/۰۴	۰/۴۶	۰/۰۸	۰/۱۱۳	-	۱۳
۰/۰۹۸	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۴۰	۰/۱۰	۰/۱۴۷	۱۰۸	۱۴
۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲۴	۰/۱۲	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، ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ سانتیگراد به مدت نیم ساعت آستینیه شده و سپس در آب کوئنچ شدند. برای اندازه گیری اندازه دانه ها از ۸۵ - ۱۱۲ 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 $۱/۳۲ \times ۱/۳۲$ میکرون بود.

برای انجام عملیات نورد، ابتدا تمامی نمونه ها در دمای ۱۲۰۰°C بمدت نیم ساعت در کوره آستینیت شدند. دمای نهائی نورد با استفاده از پیرومتر چشمی در ۸۰۰°C ثابت نگه 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 ۳ ثانیه بود. پس از اتمام نورد، نمونه ها در هوا سرد شده و عملیات حرارتی آبدهی و بازگشت بر تعدادی از نمونه ها انجام شد. سپس نمونه های کششی در جهت طولی تسمه های نورد شده تهیه شدند [۱۵].

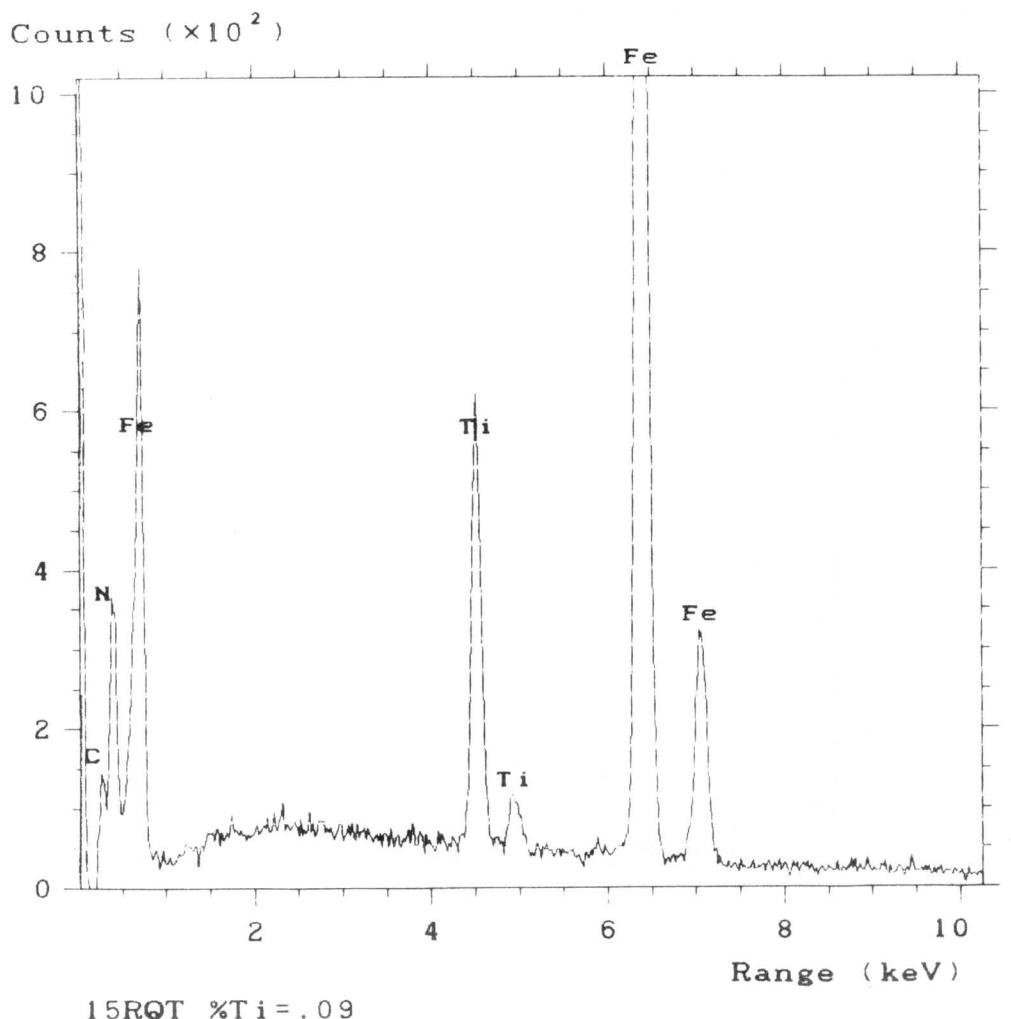
برای بررسی شکل و ترکیب ذرات رسوب در فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم از میکروسکوپ الکترونی اسکینگ X-ray EDS استفاده شد. برای

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 تعییر شکل ندهد. و باعث افزایش انرژی ضربه ای، چقرمگی و شکل پذیری سرد در جهت عرضی نورد، نسبت به جهت طولی نورد شود. [۱۶ و ۱۷].

برای بررسی ذرات رسوب موجود در نمونه شماره ۹ (Ti = ۰/۲۳٪)، 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 در شکل ۵ یک رسوب نیترید تیتانیوم خالص است که به شکل مکعب و با طول ۲/۷۵ میکرون می باشد.

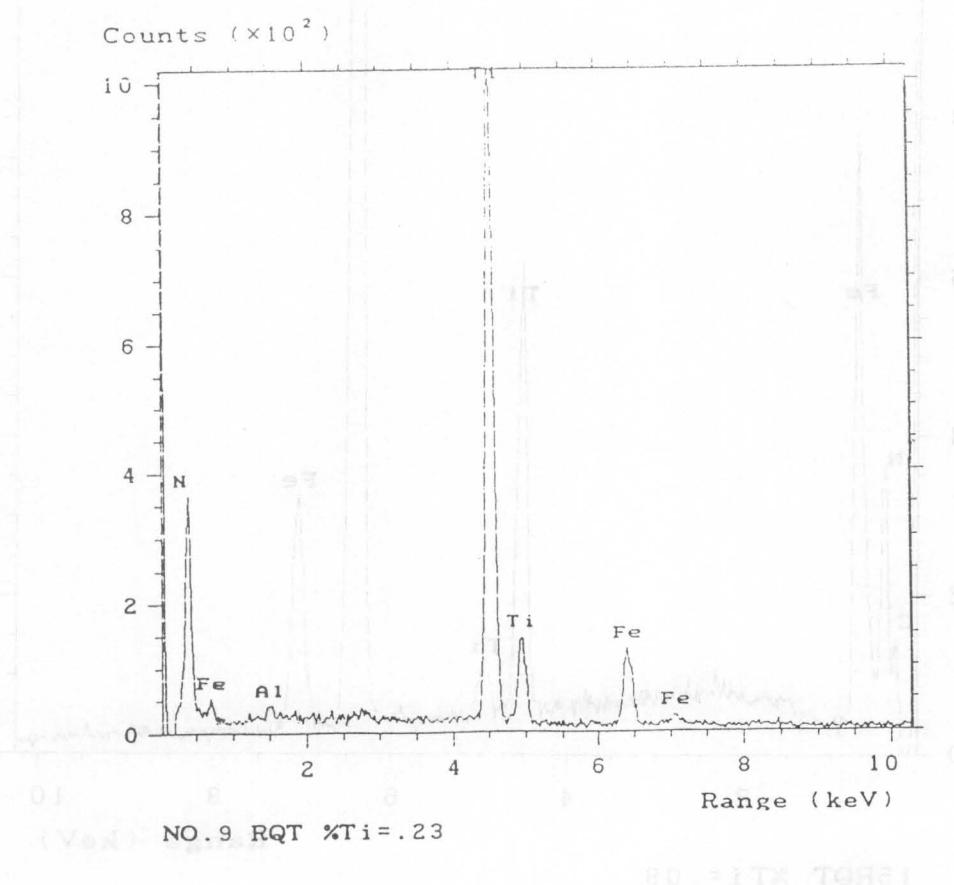
نتیجه تجزیه شیمیایی نمونه ای از یک رسوب، موجود در نمونه شماره ۱۶ (Ti = ۰/۱۱٪) بصورت شکل ۶ بدست آمد تصویر میکروسکوپ الکترونی رسوب در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به پیکهای



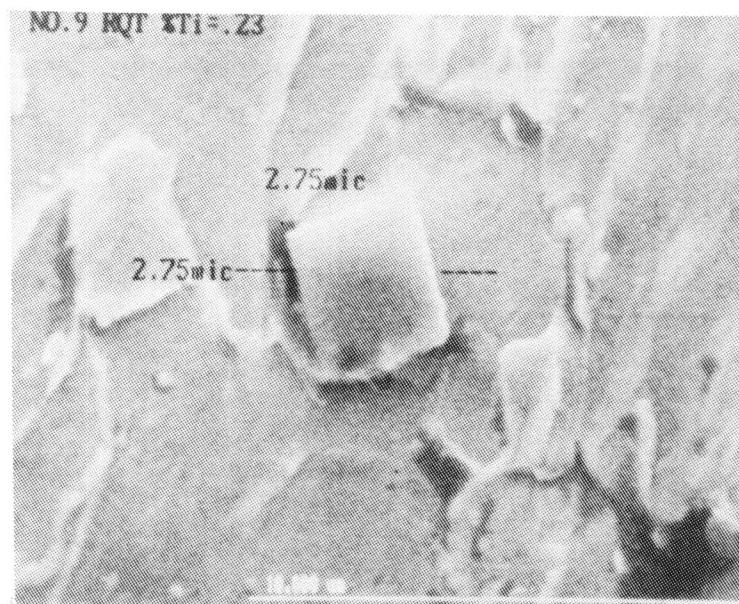
شکل ۲: ترکیب شیمیایی کیفی یک رسوب نیترید تیتانیوم (TiN) موجود در نمونه شماره ۱۵



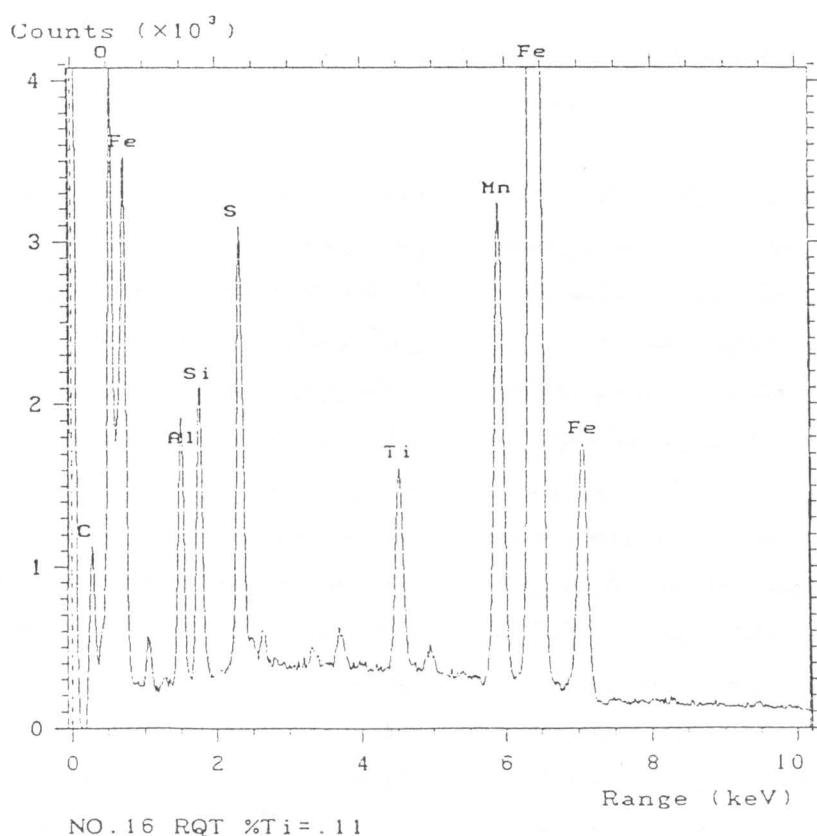
شکل ۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ از یک رسوب نیترید تیتانیوم (TiN) موجود در نمونه شماره ۱۵
(محلول اج : نایتال ۲ درصد)



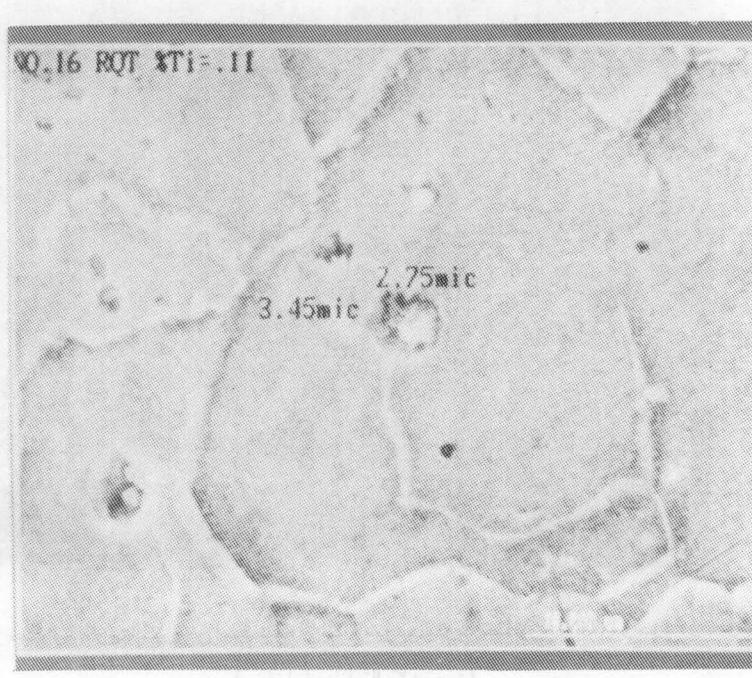
شکل ۴: ترکیب شیمیایی کیفی یک رسوب نیترید تیتانیوم (TiN) موجود در نمونه شماره ۹



شکل ۵: تصویر میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ از یک رسوب نیترید تیتانیوم (TiN) موجود در نمونه شماره ۹
(محلول اج : نایتال ۲ درصد)



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

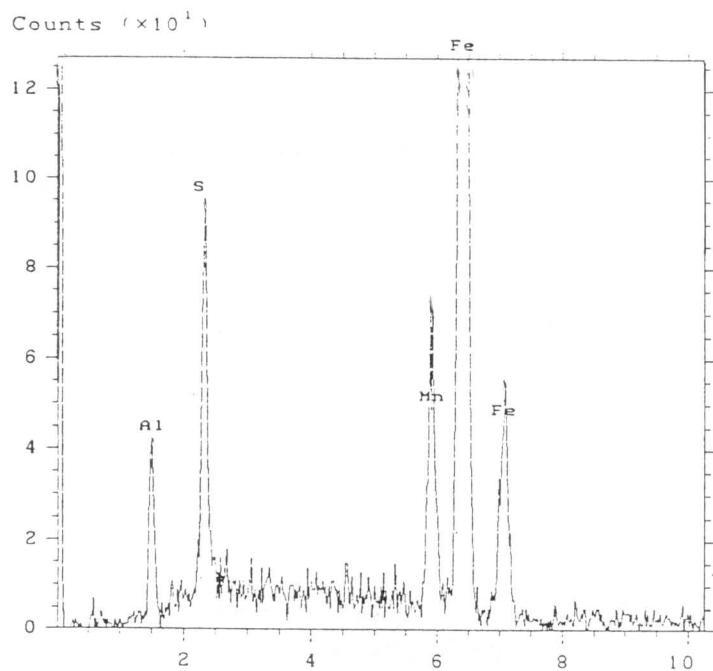


شکل ۷: تصویر میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ از یک رسوب کربوسولفید تیتانیوم موجود در نمونه شماره ۱۶
(محلول اج: نایتال ۲ درصد)

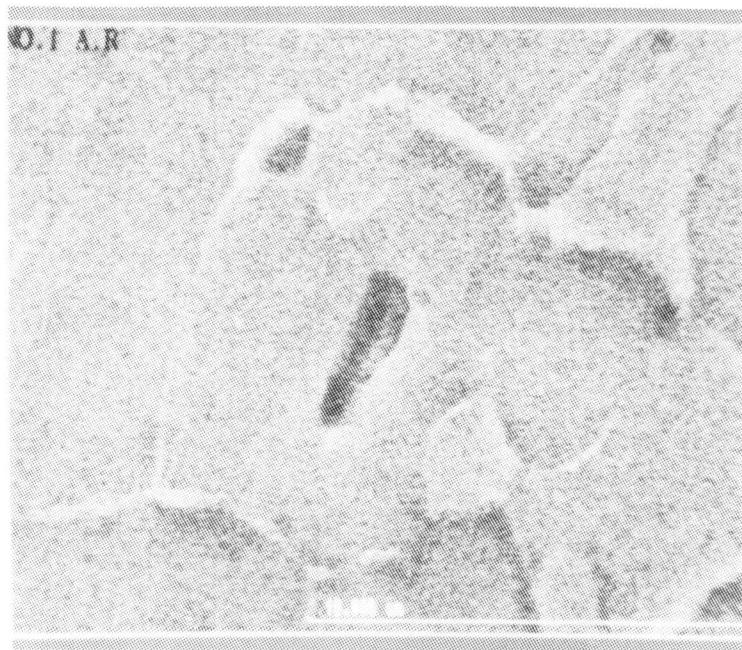
آحال (مطابق شکل ۷) مشاهده نمی شود که بعلت تشکیل رسوب کربوسولفید تیتانیوم به جای سولفید منگنز خالص می باشد که در قسمت مرکزی به عنوان جوانه برای آحال سولفید منگنز عمل می کند. بعلت اختلاف پتانسیل زیاد اشعه ایکس ($EHT = 20$ Kev) و در نتیجه نفوذپذیری بالای آن، پیکهای Fe, Al و در بعضی مواد Si مربوط به ترکیب شیمیائی کلی نمونه هستند. حال آنکه اگر رسوب مورد بررسی به اندازه کافی بزرگ باشد، (همانطوریکه از شکل ۵ مشاهده می شود) دیگر 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.

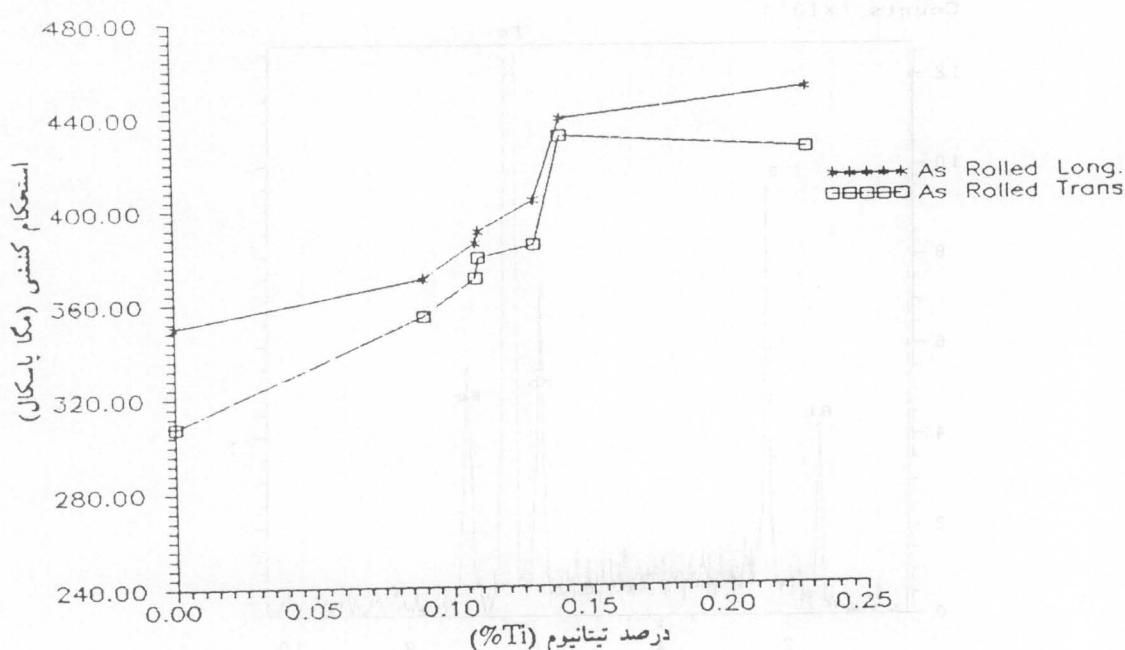
برای بررسی ذرات رسوب موجود در نمونه شماره ۵ (فولاد ساده کربنی) ترکیب شیمیائی کیفی یک رسوب موردنظر EDS X-ray بصورت شکل ۸ بدست آمد (حداقل از سه نقطه آحال آزمایشهای کیفی صورت گرفت). شکل ۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی آحال مورد نظر را در فولاد کربنی ساده نورد شده (با مقدار کاهش ۷۷ درصد) نشان می دهد. براساس پیکهای شکل ۸ می توان اظهارنظر کرد که رسوب نشان داده شده در شکل ۹ یک آحال سولفید منگنز (MnS) می باشد که کشیدگی آن در جهت نورد بعلت کاهش ۷۷ درصد قابل توجه می باشد. کشیدگی این آحالها 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



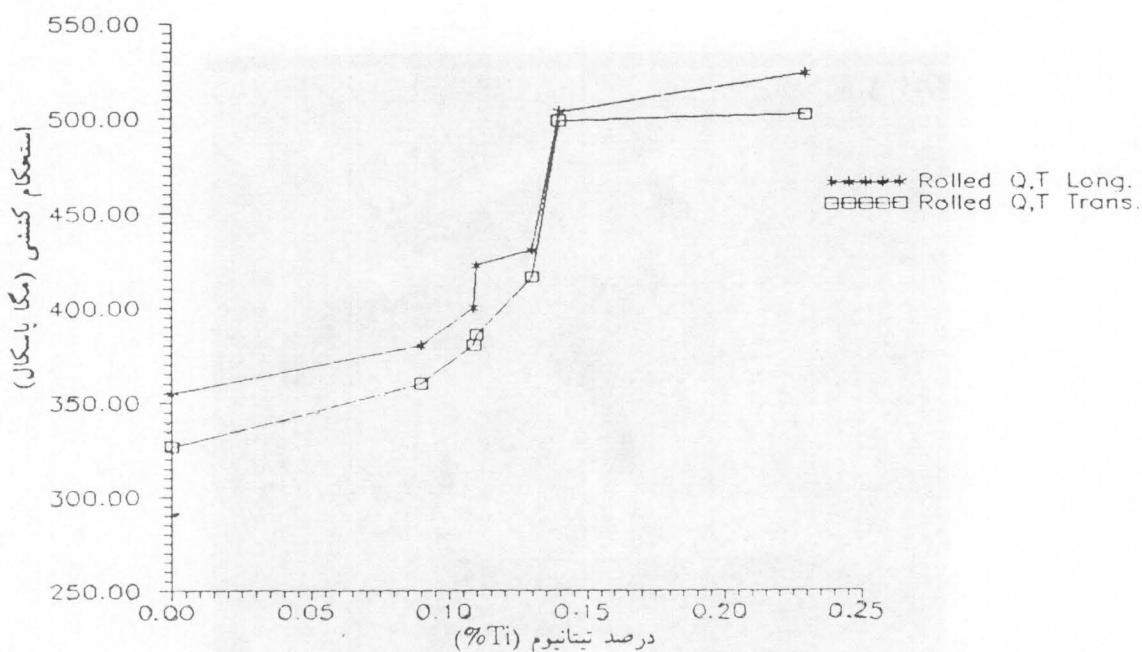
شکل ۸: ترکیب شیمیایی کیفی از یک رسب سولفید منگنز موجود در نمونه فولاد کربنی ساده (نمونه شماره ۵)



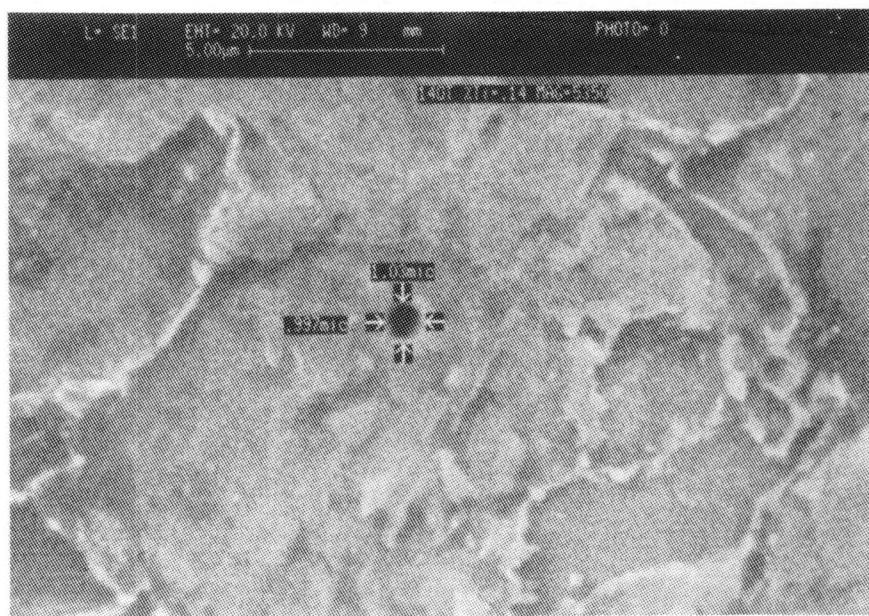
شکل ۹: تصویر میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ از یک رسب سولفید منگنز موجود در نمونه شماره ۵
(محلول اچ : نایتال ۲ درصد)



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 اسکنینگ از یک رسب سولفید تیتانیوم (Ti₄C₂S₂) موجود در نمونه شماره ۱۴
(محلول اج : نایتال ۲ درصد)

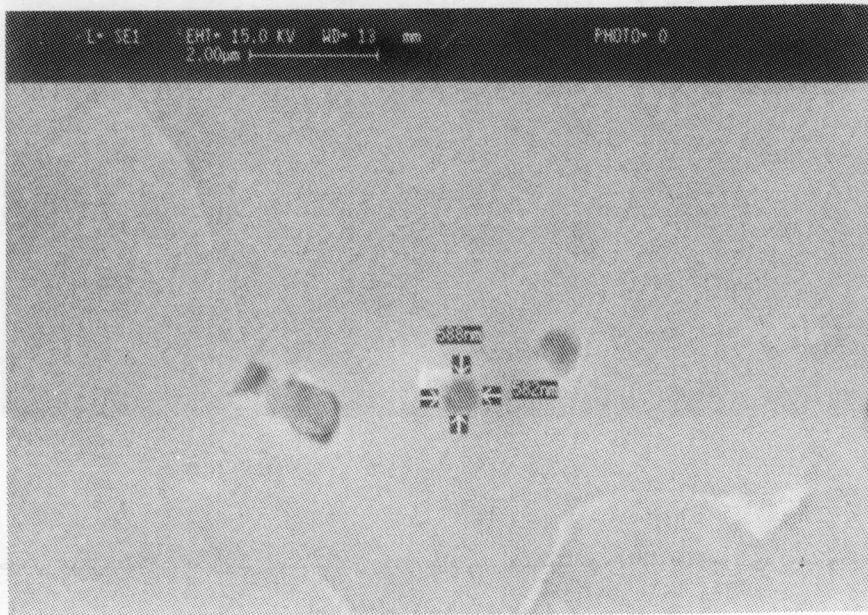
تیتانیوم می باشدند [۲۲].
بطور کلی مشخص گردیده است که در مقادیر تیتانیوم بحدکافی زیاد، کربوسولفیدها بطور کامل جایگزین سولفید مختلط می شوند [۲۲]. آخال [Ti₄C₂S₂] دارای سختی بسیار بالایی است و بطور پیوسته در فولادهای نورد گرم شده بصورت تغییر شکل ناپذیر وجود دارد. این سولفید در طی نورد گرم به قطعات کوچکتری شکسته شده اما از خود تغییر شکل نشان نمی دهد [۲۳ و ۲۴]. شکل ۱۳ نشان می دهد که آخالهای کربوسولفید تیتانیوم در طی نورد به چند تکه شکسته شده، اما تغییر شکل و یا ازدیاد طولی نمیدهند. از مشاهدات میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ 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 شکلهای استحکام کششی (هم در حالت نورد شده آبداده شده و بازکشت داده شده) میتوان مشاهده نمود که در مقدار 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 ۱۴٪ درصد تیتانیوم بهترین 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 (۲۳٪ 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

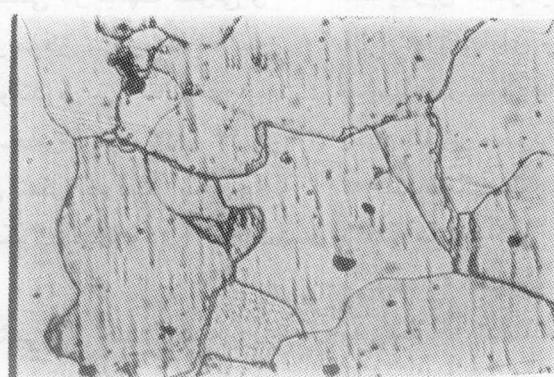
شده در شکل‌های ۱۴ الی ۱۶ و ریز ساختارهای نمونه‌های نورد شده، نورد شده و عملیات حرارتی شده در شکل‌های ۱۷ الی ۱۹ نشان داده شده است.

بعثت 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



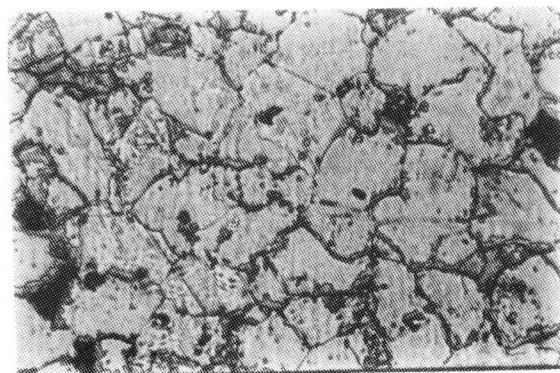
شکل ۱۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی اسکنینگ از یک رسوب کربو سولفید تیتانیوم موجود در نمونه شماره ۱۶

(محلول اچ: نایتال ۲ درصد)

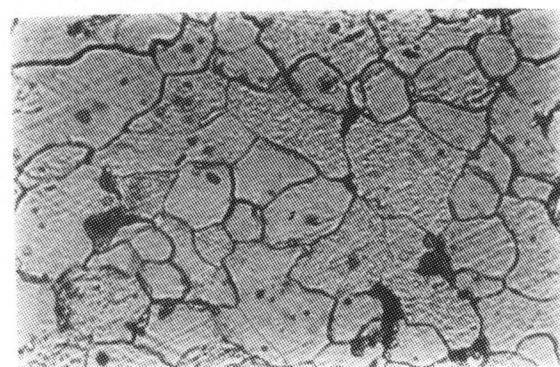


شکل ۱۴: ساختار میکروسکوپی فولاد کربنی ساده، فولاد شماره ۵، ریخته شده و نرمالیزه شده

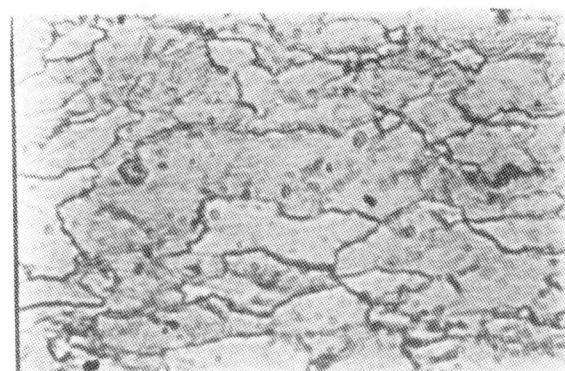
(محلول اچ: نایتال ۲ درصد بزرگنمایی $\times 400$)



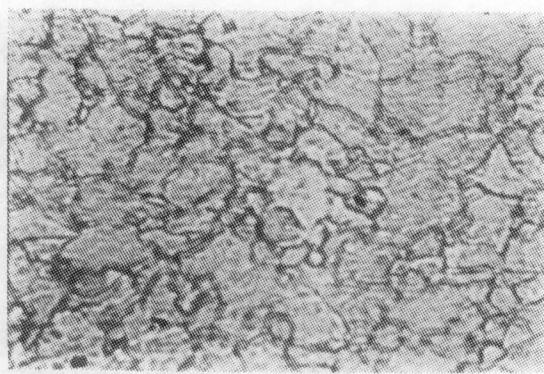
شکل ۱۵: ساختار میکروسکوپی فولاد میکروآلیاژ شده با تیتانیوم (۰/۱۴٪Ti) فولاد شماره ۱۴، ریخته شده و نرمالیزه شده
(محلول اج: نایتال ۲ درصد بزرگنمایی $\times 400$)



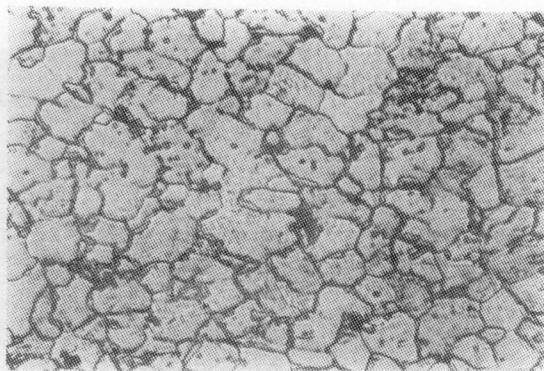
شکل ۱۶: ساختار میکروسکوپی فولاد میکروآلیاژ شده با تیتانیوم (۰/۰۹٪Ti) فولاد شماره ۱۵، ریخته شده و نرمالیزه شده
(محلول اج: نایتال ۲ درصد بزرگنمایی $\times 400$)



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



شکل ۱۸: ساختار میکروسکوپی فولاد میکروآلیاژ شده با تیتانیوم (۰/۰۲۲۵٪Ti) نمونه شماره ۹، نورد شده
(محلول اج: نایتال ۲ درصد بزرگنمایی $\times 400$) با 70° درصد کاهش



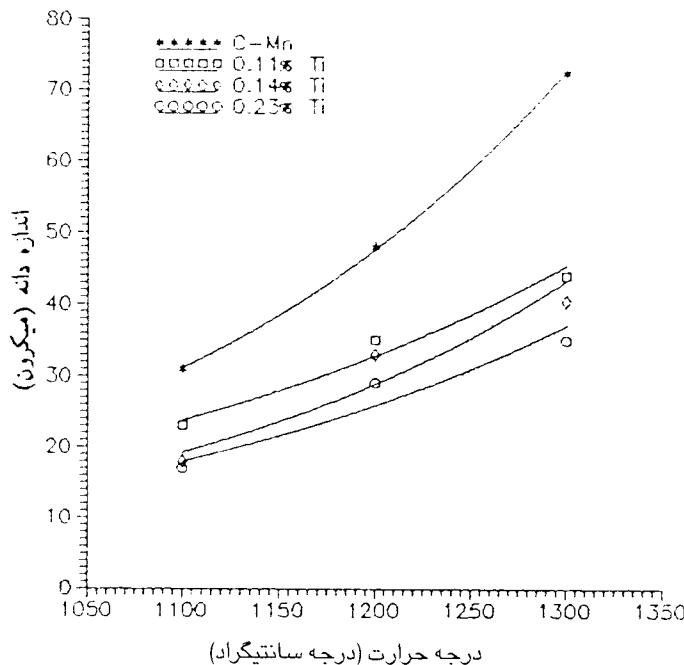
شکل ۱۹: ساختار میکروسکوپی فولاد میکروآلیاژ شده با تیتانیوم (۰/۰۹۴٪Ti) فولاد شماره ۵، نورد شده آبداده و بازگشت داده شده
(محلول اج: نایتال ۲ درصد بزرگنمایی $\times 400$) با 77° درصد کاهش

فصل مشترک فریت - آستینیت رسوب می کند که در ریز کردن دانه ها بسیار موثر می باشد. علاوه بر این در حین نورد گرم رسوبات ناشی از کرنش در آستینت بوجود می آید و باعث پین کردن مرزهای فرعی شده و از تبلور مجدد جلوگیری می کند [۲۷ و ۲۸].

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 ظرفیتر 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 کوئنج، 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

تسلیم و استحکام کششی افزایش پیدا می کند. فولاد ساده کربنی بعلت داشتن دانه بزرگتر و عدم رسوب سختی دارای کمترین استحکام تسلیم 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 تسلیم و کششی می باشد. در فولاد کربن منگنزی بعلت تشکیل رسوب پیوسته نیترید آلومینیوم (AlN) که در مرز دانه ها تشکیل می شود و همچنین بدلیل تشکیل سولفید منگنز که خیلی بزرگتر از نیترید آلومینیوم می باشد، توسعه حفره ها در مرز دانه ها اجازه می دهد که فرایند حفره ای شدن رخ بدهد 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 دماها 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 حلالیت خیلی کم، رسوب نیترید تیتانیوم (حتی در دماهای بالا) از رشد دانه ها جلوگیری می کند. این رسوب بوسیله 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 شکل های ۲۱ و ۲۲ نشان داده شده است. شکل های نشان می دهند که با افزایش مقدار تیتانیوم استحکام

و در نتیجه فولادهای میکروآلیاژی تیتانیوم دار بدون عملیات حرارتی می‌توانند استفاده 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 بدلیل 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.

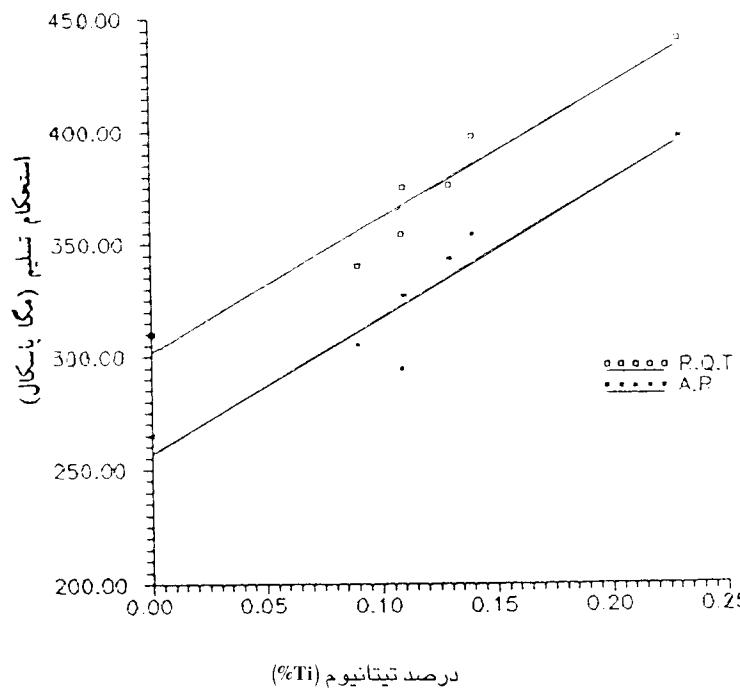
با توجه به نتایج استحکام کششی و تسليم در نمونه‌های نورد شده و نمونه‌های نورد شده آبداده شده و بازگشت داده شده می‌توان مشاهده نمود که اختلاف بین استحکام کششی و تسليم خیلی کم بوده

جدول ۲: خواص مکانیکی (در جهت طولی نورد) فولاد کربنی ساده و فولادهای میکروآلیاژ شده با تیتانیوم

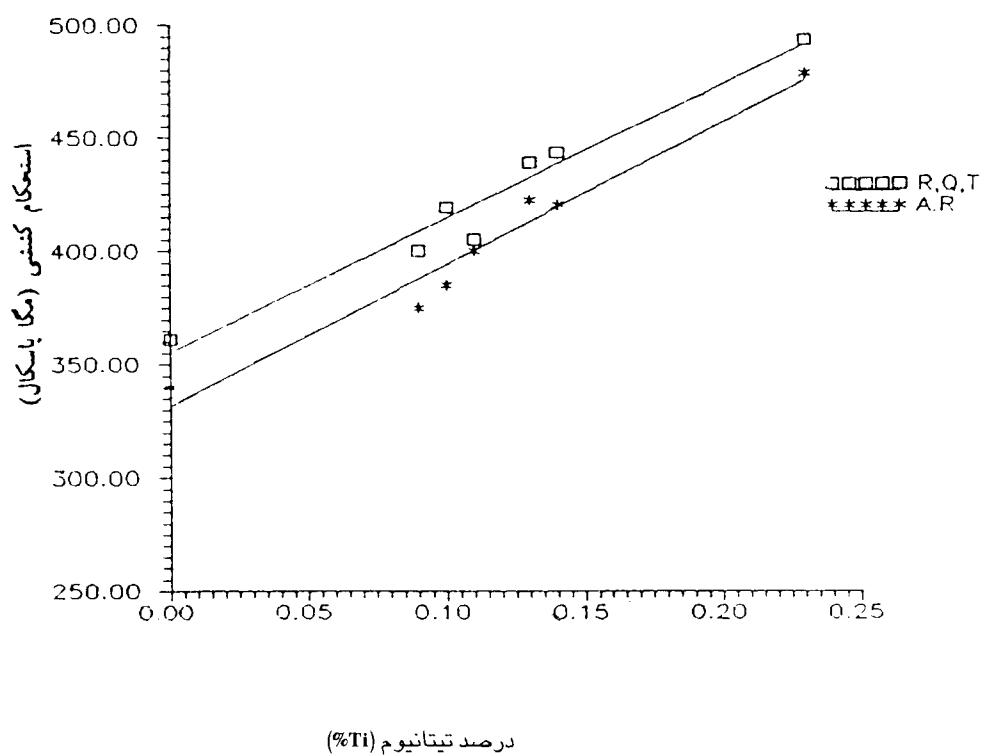
درصد کاهش در ضخامت % Ti	درصد تیتانیوم	خواص کششی (مگاپاسکال)			نوع عملیات حرارتی	شماره نمونه (ذوب)
		استحکام کششی نهانی	استحکام تسليم	درصد ازدیاد طول (در ۲۵ میلیمتر)		
۷۷	-	۲۸	۲۱۰	۲۶/۱۲	R,Q,T	۵
		۲۴	۲۶۵	۳۴۰	A.R	
۷۷	۰/۰۹	۲۲	۲۴۰	۴۰۰	R,Q,T	۱۵
		۲۸	۳۰۵	۳۷۵	A.R	
۷۸	۰/۱۰۹	۲۸	۲۵۴/۱	۴۱۹	R,Q,T	۱۲
		۲۵	۲۹۴/۲	۲۸۵	A.R	
۷۷	۰/۱۱	۲۶	۲۷۵	۴۰۵	R,Q,T	۱۶
		۲۲	۲۲۷	۴۰۰	A.R	
۷۹	۰/۱۳	۲۲	۳۷۶	۴۳۸/۶	R,Q,T	۱۰
		۲۰	۲۸۴۲/۲	۴۲۲/۲	A.R	
۸۰	۰/۱۴	۱۹	۳۹۹۷/۷	۴۴۳	R,Q,T	۱۴
		۱۸	۲۵۴	۴۲۰	A.T	
۷۰	۰/۲۳	۱۴	۴۴۱/۲	۴۹۲	R,Q,T	۹
		۱۲	۲۹۷/۷	۴۷۸	A.R	

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

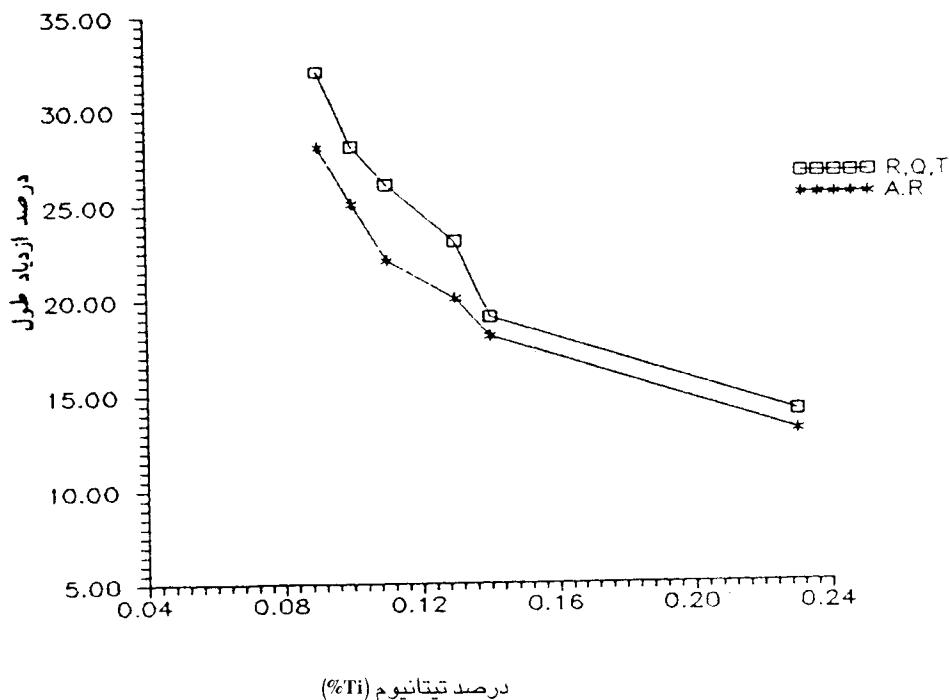
= نورد شده A.R



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



شکل 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 می‌کشد 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 جهادسازندگی از بابت تهیه تصاویر میکروسکوپی و آنالیز کیفی رسوبات و از مسئول آزمایشگاه جهاد خودکفایی سپاه به خاطر انجام آزمایش‌های آنالیز کوانتمتری نمونه‌ها سپاسگزاری شود.

۱- ریز شدن دانه‌های آستینیت 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- بعلت 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 می‌کند.

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 seel Metallurgy in Europe", British steel Corporation, PP. 9-41.
- 7 - A. T. Davenport, L. C. Brossard and R. E. Miner, "Precipition 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 anf 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 applicaion 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 اتادیوم دار و نایوپیوم دار به روش غوطه ورسازی و بررسی خواص آن : نشریه دانشکده فنی، ۱۳۶۸، صفحات ۴۵ الی ۶۰
- ۱۴ - صدرنژاد - خطیب الاسلام ، بررسی 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. Wenzuan, 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.