

تولید فولاد میکروآلیاژی وانادیوم و نایوبیوم دار به روش غوطه ور سازی
و بررسی خواص آن

خطیب الاسلام صدر نژاد
دانشیار دانشکده مهندسی متالورژی دانشگاه صنعتی شریف

سید فرشید کاشانی بزرگ
عضو هیات علمی وزارت فرهنگ و آموزش عالی در مرکز تحقیقات علمی کشور

و
سعید حشمتی منیش
عضو هیات علمی دانشکده فنی دانشگاه تهران

چکیده

میکروآلیاژ کردن فولاد کربن - منگنز با دو عنصر وانادیوم و نایوبیوم با استفاده از مواد فلزی موجود در داخل کشور در مقیاس آزمایشگاهی به منظور افزایش استحکام در مقابل وزن انجام گرفته است. برای ساختن فولاد میکروآلیاژی از روش غوطه ور سازی استفاده شده است و تأثیری که عواملی همچون همزدن فلز مذاب هنگام افزایش عناصر میکروآلیاژی و آنالیز شیمیایی فولاد مذاب بر بازدهی جذب عناصر افزوده شده داشته اند بررسی شده است. در باب تأثیر مقدار درصد عناصر میکروآلیاژی جذب شده بر بافت سطوح مقاطع فلز پس از انجماد و همچنین تأثیر عملیات حرارتی و مکانیکی بر خواص فولاد ریخته ای، مطالعات نسبتاً مفصلی انجام و نتایج حاصل بررسی شده است. بر اساس متالوگرافی با میکروسکوپ الکترونی و میکروآنالیز با اشعه ایکس، توزیع ترکیبات عناصر میکروآلیاژی در زمینه فولاد به صورت رسوبات بسیار ریز پراکنده در مقاطع فازهای آستنیت و فریت دیده می شوند. این رسوبات نقش نقاط شروع جوانه زنی را در تبدیل آستنیت به فریت در حین سرد شدن نهایی از دمای نرمالیزاسیون ایفا کرده و باعث ریز شدن دانه های فولاد می شوند. میزان استحکام و سختی نمونه ها با افزایش محتوای عناصر میکروآلیاژی به میزان قابل ملاحظه ای افزایش می یابد و در عین حال کاهش درصد طویل شدن نمونه ها با افزایش عناصر میکروآلیاژی، حدی درخور پذیرش دارد.

مقدمه

۸. فولادهای میکروآلیاژی اگرچه هزینه تولیدی بیشتر از فولادهای کربن - منگنز عادی دارند ۱۰، ۹، ۴، اما به دلیل برتری خواص مکانیکی، بر فولادهای کربن - منگنز ترجیح داده می شوند.

تنش تسلیم بالای فولاد های میکروآلیاژی، امکان کاهش ضخامت و در نتیجه کاهش وزن قطعات را فراهم می آورد ۹، ۴-۱۲. کاهش وزن سبب تقلیل هزینه های تولید،

کاربرد فولاد میکروآلیاژی طی دو دهه اخیر رشد فزاینده ای یافته است ۱. این رشد به علت امکان برگزیدن این فولاد به جای فولاد کربن - منگنز ۲-۵ و فولاد های آبداده و بازگشت داده شده Quench and Tempered است ۶-۸. برگزیدن فولاد میکروآلیاژی به جای فولاد کربن منگنز سبب کاهش مصرف ۲-۴ و به جای فولاد کم آلیاژ آبداده و بازگشت داده شده باعث تقلیل هزینه می شود

و منگنز طی عملیات ذوب به علت میل ترکیبی زیاد ایسن عناصر با اکسیژن هوا در جدول ۱ آمده است. برای میکرو-آلیاژ کردن فولادها، فرووانادیوم ۷۵ درصد و فروناپوبیوم ۶۰ درصد به کار رفته است. با توجه به میل ترکیبی شدید عناصر میکروآلیاژی با اکسیژن و امکان اکسید شدن آنها در دمای فولادسازی، مواد فروآلیاژی خرد شده است و در قوطیهای فولادی از جنس ورق فولاد کم کربن ریخته شده. با غوطه ورسازی این قوطیها در فلز مذاب، محتوایشان به فولاد مذاب افزوده شده است. قبل از غوطه ور ساختن قوطیها، فولاد مذاب را آلومینیوم خالص اکسیژن زدایی می‌کند. همزدن فولاد مذاب از طریق حرکت دادن قوطیهای غوطه ور را میله آهنی متصل به آنها انجام می‌دهد. عناصر میکروآلیاژی را پس از جذب شدن در فولاد، با آلومینیوم خالصی که مجدداً به فولاد افزوده می‌شود، حفاظت می‌کنند. آنالیز شیمیایی فولادهای میکروآلیاژی حاصل با استفاده از دستگاه کوانتومتر به شرح جدول ۲ تعیین می‌شود.

ریخته‌گری فولاد مذاب در قالب های فلزی پیش گرم شده انجام می‌شود. نمونه های آزمایشی برای انجام عملیات حرارتی، نورد، آنالیز شیمیایی، متالوگرافی و سختی سنجی از طریق بریدن قطعات ریخته شده فولادی تهیه می‌شوند. عملیات حرارتی نرمالیزاسیون به مدت ۱۵ دقیقه در دمای 910°C بر تعدادی از قطعات انجام می‌شود. این قطعات سپس در هوا سرد می‌شوند. برای انجام عملیات آبدهی، نمونه ها در دمای 910°C به مدت ۱۵ دقیقه نگهداری شده و آنگاه در آب می‌شوند که نمونه‌ها سپس به مدت ۱۵ دقیقه در دمای 600°C بازگشت داده می‌شوند. نورد گرم نمونه ها در دمای 950°C - 900°C انجام می‌شود. دمای نورد در مراحل نهائی حدود 600°C است. پس از نورد، نمونه ها در هوا سرد می‌شوند. عملیات آبدهی و بازگشت سپس بر تعدادی از تسمه های حاصل از نورد انجام و نمونه های کششی از آنها تهیه می‌شود.

بررسی چگونگی توزیع عناصر میکروآلیاژی در زمینه فولادی از طریق متالوگرافی با میکروسکوپ الکترونی و میکروآنالیز با اشعه ایکس انجام می‌شود. نتیجه بررسیها نشان دهنده یکنواختی توزیع عناصر در زمینه فولاد به صورت رسوبات بسیار ریز احتمالاً " کاربید، نیتريد یا کاربونیتريد است. مقایسه سطوح مقاطع متالوگرافی شده نمونه ها نشان می‌دهد که حداقل یکی از این ترکیبات می‌باید با توجه به

حمل و نقل و عملیات حرارتی و مکانیکی می‌شود. لذا استفاده از فولادهای میکروآلیاژی در ساخت بدنه و شاسی اتومبیلها [۹-۱۱ و ۱۳]، قطعات کامیونها و ماشین آلات ساختمانی ۱۲-۱۴، بدنه مخازن تحت فشار ۱۵، بدنه کشتیها و سازه‌های دریایی ۱۶، آرماتورهای بتن مسلح ۱۷، خطوط لوله نفت و گاز ۱۸-۳۶ و چرخانک بخش چرخان آلترناتورها ۱۰ و ۲ گزارش شده است.

مشکل اصلی در ساختن فولادهای میکروآلیاژی، بازدهی پائین جذب عناصر میکروآلیاژ کننده است. این عناصر به دلیل میل ترکیبی شدیدشان، با اکسیژن هوا ترکیب شده و از محیط عمل خارج می‌شوند. مقدار محدود جذب شده در فولاد، با عناصر ناخالصی موجود در فاز مذاب همچون اکسیژن، گوگرد، نیتروژن و کربن وارد واکنش شده و ترکیبات بسیار سختی تولید می‌کنند که در نهایت در درون و مرز فازها رسوب می‌کند و باعث ریز شدن دانه ها و بالا رفتن استحکام فولاد می‌شود. در صورتی که میزان عناصر ناخالصی در فولاد مذاب بیش از حد لازم باشد و یا این عناصر در هنگام ریختن فولاد به سهولت بتوانند وارد محیط عمل شوند، با عناصر میکرو-آلیاژی، ترکیب شده و آنها را از محیط خارج می‌سازند. لذا لازم است در هنگام ریختن فولاد مذاب دقت بسیاری برای جلوگیری از ورود عناصر ناخالصی به داخل فلز مذاب به عمل آید.

نتایج آزمایشهای انجام شده برای تولید فولاد میکروآلیاژی با استفاده از مواد و امکانات موجود در داخل کشور در این مقاله شرح داده شده است. برای بالا بردن بازدهی جذب عناصر میکروآلیاژی، از روش نسبتاً " جدیدی که مشابه روش غوطه ورسازی محققین چینی ۳۷ است، استفاده شده. خواص مکانیکی و ساختار میکروسکوپی فولادهای حاصل، پس از انجام عملیات حرارتی و مکانیکی بررسی و مطالعه شده است.

آزمایشها و نتایج

دو نوع فولاد شمع اتومبیل بوش و خطوط لوله شرکت نفت با ترکیبهای شیمیایی داده شده در جدول ۱ برای تهیه فولاد مذاب به کار رفته است. قطعات فولاد را پس از بار شدن در بوتله دیرگدازی از جنس آلومینا به ظرفیت ۷۰ سانتی متر مکعب، یک کوره الکتریکی مقاومتی گرم و ذوب می‌کند (شکل ۱). کاهش میزان تعدادی از عناصر مانند سیلیسیوم، کربن

جدول ۱- آنالیز شیمیائی فولادهای شمع اتومبیل و خطوط لوله شرکت نفت قبل و بعد از ذوب در بوته دیرگداز

| آنالیز شیمیائی (درصد) | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------|----------|---------|------|------|---------|----------|-------|---------------------|------|
| فسفر | گوگرد | آلمینیوم | مولیبدن | نیکل | کروم | منگنز | سیلیسیوم | کربن | نوع فولاد | ردیف |
| ۰/۰۳ | ۰/۰۴ | تا ۰/۰۲ | - | - | ۰/۱۲ | تا ۰/۲۱ | ۰/۱۳ | ۰/۱ | شمع بوش قبل از ذوب | ۱ |
| ۰/۰۱۶ | ۰/۰۳۱ | ۰/۰۸ | - | ۰/۱۵ | ۰/۱۲ | ۰/۲۶ | - | ۰/۰۴۲ | شمع بوش بعد از ذوب | ۲ |
| ۰/۰۱۱ | ۰/۰۱۸ | - | ۰/۰۱۳ | ۰/۰۲ | ۰/۰۴ | ۱/۳۵ | ۰/۰۴ | ۰/۲۵ | لوله نفت قبل از ذوب | ۳ |
| ۰/۰۱ | ۰/۰۲۳ | - | - | ۰/۰۲ | ۰/۰۴ | ۰/۷۲ | - | ۰/۱۲ | لوله نفت بعد از ذوب | ۴ |

جدول ۲- نتیجه تجزیه شیمیایی نمونه های فولاد میکروآلیاژی با دستگاه کوآنتومستر

| میانگین آنالیز شیمیایی نمونه ها در سه نقطه (درصد وزنی) | | فولاد اولیه | |
|--|-------|-------------|-------|
| سفر | گورد | تایپسوم | گورد |
| ۰/۰۱۵ | ۰/۰۲۴ | — | ۰/۰۴ |
| ۰/۰۱۵ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲۵ | ۰/۱۲ |
| ۰/۰۱ | ۰/۰۲۳ | — | ۰/۱۴ |
| ۰/۰۱۱ | ۰/۰۲ | ۰/۱۴ | ۰/۱۸ |
| ۰/۰۱۱ | ۰/۰۱۹ | ۰/۲۲ | ۰/۲۲ |
| ۰/۰۱۵ | ۰/۰۲۴ | — | ۰/۰۶ |
| ۰/۰۱۵ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲۵ | ۰/۱۱ |
| ۰/۰۱ | ۰/۰۲۳ | — | ۰/۱۴ |
| ۰/۰۱۱ | ۰/۰۲ | ۰/۱۴ | ۰/۱۸ |
| ۰/۰۱۱ | ۰/۰۱۹ | ۰/۲۲ | ۰/۲۲ |
| ۰/۰۱۵ | ۰/۰۲۴ | — | ۰/۱۲ |
| ۰/۰۱۵ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲۵ | ۰/۱۱ |
| ۰/۰۱ | ۰/۰۲۳ | — | ۰/۰۴ |
| ۰/۰۱۱ | ۰/۰۲ | ۰/۱۴ | ۰/۰۴ |
| ۰/۰۱۱ | ۰/۰۱۹ | ۰/۲۲ | ۰/۰۲۹ |
| ۰/۰۱۵ | ۰/۰۲۴ | — | ۰/۱۲ |
| ۰/۰۱۵ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲۵ | ۰/۱۱ |
| ۰/۰۱ | ۰/۰۲۳ | — | ۰/۰۴ |
| ۰/۰۱۱ | ۰/۰۲ | ۰/۱۴ | ۰/۰۴ |
| ۰/۰۱۱ | ۰/۰۱۹ | ۰/۲۲ | ۰/۰۲۹ |

سفر گورد
تایپسوم گورد
گورد

۱ شمع اتومبیل
۲ شمع اتومبیل
۳ لوله نفت
۴ لوله نفت
۵ لوله نفت

نمی‌شود. بافت بسیار ظریف مارتنزیت به خصوص در مورد فولادهای نایوبیوم دار در این حالت قابل تشخیص است

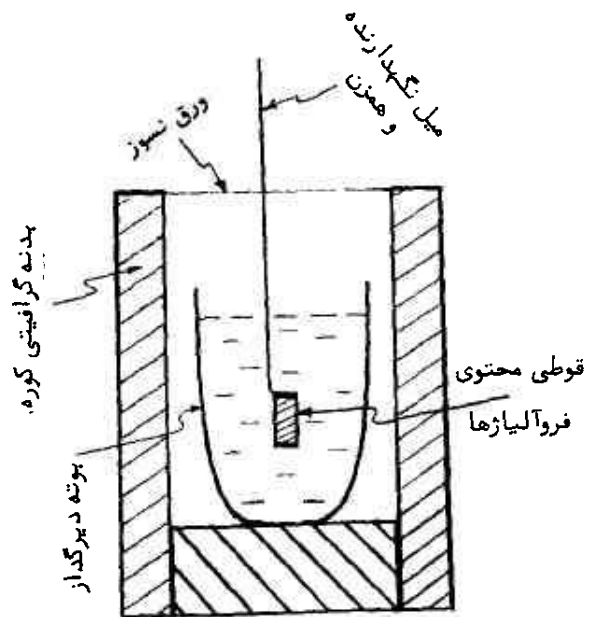
بحث

نتایج آزمایشهای انجام شده برای تولید فولاد میکروآلیاژی و بازدهی جذب عناصر افزوده شده به فلز مذاب در جدول ۳ خلاصه شده است. همان گونه که از اطلاعات به دست آمده برمی‌آید، میزان جذب عناصر میکروآلیاژی به روش افزودن عناصر، تعداد دورهای همزدن مذاب و مدت نگهداری فلز مذاب پس از آلیاژ سازی بستگی دارد، به طوری که بیشترین بازدهی جذب برای نمونه پنجم (لوله شرکت نفت با ۱۴/۵ درصد کربن) به ترتیب ۹۲ درصد برای وانادیوم و ۸۵ درصد برای نایوبیوم به دست آمده است. مقایسه اطلاعات جدولهای ۲ و ۳ نشان می‌دهد که راندمان جذب عناصر میکرو-آلیاژی به میزان کربن فولاد مذاب نیز بستگی دارد به طوری که میزان جذب در مورد لوله های شرکت نفت با کربن حدود ۱۴/۵ درصد (نمونه های ۳، ۴ و ۵) بیشتر از بازدهی جذب برای فولادهای شمع اتومبیل با کربن حدود ۵/۳۶ درصد (نمونه های ۱ و ۲) است. مقایسه درصد جذب شده دو عنصر وانادیوم و نایوبیوم در نمونه های ۲، ۴ و ۵ نیز نشان می‌دهد که بازدهی جذب وانادیوم بیشتر از بازدهی جذب نایوبیوم است.

به علت ترکیبی شدید عناصر میکروآلیاژی با اکسیژن و نیتروژن، همزدن بیش از اندازه فلز مذاب می‌تواند باعث افزایش میزان هوای محلول در فلز و اتلاف عناصر میکروآلیاژی شود. وجود درصد بالاتر کربن در فلز می‌تواند به کاهش پتانسیل اکسیژن و حفاظت عناصر میکروآلیاژی از حمله اکسیژن محلول یا غیر محلول بینجامد. اما باید توجه داشت که به علت میل ترکیبی شدید کربن با عناصر میکرو-آلیاژی، درصد کربن موجود در فلز مذاب نباید از ۳/۵ درصد تجاوز کند. اطلاعات جدول ۳ نشان می‌دهد که افزایش توأم عناصر میکروآلیاژی نیز می‌تواند باعث افزایش بازدهی جذب از طریق حفاظت متقابل شود.

تاثیر درصد عناصر میکروآلیاژی و عملیات حرارتی و مکانیکی بر میزان سختی در مقاطع عمود بر جهت انجماد یانورد را جدول ۴ نشان می‌دهد. براساس این اطلاعات، میزان سختی با افزایش میزان عناصر میکروآلیاژی بیشتر می‌شود. این موضوع با افزایش استحکام فولاد در اثر افزودن

میل ترکیبی شدید وانادیوم با کربن و نیتروژن در فولادهای وانادیوم دار به وجود آمده و به صورت رسوبات ریز با عث کنترل رشد دانه های استنیت طی عملیات نرمالیزاسیون شده باشد. ایجاد شرایط جوانه زنی برای تبدیل استنیت به فریت نیز حین سرد شدن نهایی از دمای نرمالیزاسیون در اثر این رسوبات، عامل اصلی ریز شدن دانه های فریت تلقی می‌شود. این موضوع با نتایج تحقیقات قبلی نیز سازگار است ۳۸.



شکل ۱- وسیله به کار رفته برای تولید فولاد مذاب میکرو-آلیاژی

تصاویر ریز ساختار نمونه ها را پس از پولیش و حکاکی با محلول دو درصد نیتال، میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۵۰۰ برابر (نمونه های ۳ و ۲) و میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر بررسی می‌کند. توزیع نقاط بسیار ریز و کاملاً پراکنده بر صفحه تلویزیونی میکروسکوپ الکترونی حاکی از پخش شدن ترکیبات عناصر میکروآلیاژی در کل زمینه فولاد است. اندازه دانه هادر فولادهای ریخته شده بزرگتر از سایر حالات است. در حالت ریخته شده، آبداده و بازگشت داده شده، دانه های فریت ریزتر و همگن تر شده اند. در حالت نورد شده، اثر عملیات نورد بر طویل شدن دانه هابه خوبی مشاهده می‌شود. در این حالت ساختار قطعات، فریتی - پرلیتی است. در حالت نورد شده، آبداده و بازگشت داده شده به علت سرعت زیاد سرد شدن، فاز پرلیت در ساختار قطعات دیده

جدول ۴ - تاثیر عناصر میکروآلیاژی و عملیات حرارتی و مکانیکی بر سختی نمونه های فولادی.

| نمونه | درصد عناصر میکروآلیاژی | | سختی و یکسوز | | | | شماره نمونه |
|----------|------------------------|---------|-------------------------------|----------|--|----------|----------------|
| | وانادیم | تایوریم | ریخته شده با زگشت داده شده | نورد شده | ریخته شده آبداده و با زگشت داده شده | نورد شده | |
| شمع بوش | - | - | ۱۲۱ | ۱۵۹ | ۲۰۰ | ۱۳۷ | ۵ |
| ۱ | ۰/۰۶ | - | ۱۴۸ | ۱۶۹ | ۱۹۵ | ۱۴۸ | ۴ |
| ۲ | ۰/۱۲ | ۰/۰۲۵ | ۱۳۷ | ۱۸۴ | ۲۱۰ | ۱۷۱ | ۳ |
| لوله نفت | - | - | ۱۶۸ | ۱۹۱ | - | ۱۷۰ | ۳ |
| ۳ | ۰/۱۴ | - | ۲۵۲ | ۲۶۳ | - | ۲۰۱ | ۴ |
| ۴ | ۰/۱۸ | ۰/۱۴ | ۲۸۳ | ۲۹۰ | - | ۲۶۴ | ۴ |
| ۵ | ۰/۲۲ | ۰/۲۲ | ۲۷۹ | ۳۰۴ | - | ۲۸۰ | ۵ |

جدول ۳- بازدهی جذب عناصر میکروآلیاژی

| نمونه | دمای فلز مذاب هنگام افزودن عناصر میکروآلیاژی (سانتیگراد) | نحوه افزودن عناصر میکروآلیاژی | زمان نگهداری فولاد مذاب بعد از افزودن عناصر میکروآلیاژی (دقیقه) | بازدهی جذب عناصر میکروآلیاژی (درصد) | وآنادیوم | نایوبیوم |
|-------|--|---|---|-------------------------------------|----------|----------|
| ۱ | ۱۶۵۰ | غوطه‌ورسازی قوطی فرووانادیوم و هم زدن ۲۰ دور در ۲۰ ثانیه | ۱۰ | ۴۶ | - | - |
| ۲ | ۱۶۵۰ | غوطه‌ورسازی قوطی فرو و آنادیوم و هم زدن ۱۰ دور در ۲۰ ثانیه و سپس غوطه‌ورسازی قوطی فرو نایوبیوم و یکبار هم زدن | ۶ و ۴ بعد از افزایش نایوبیوم | ۶۰ | ۲۱ | ۲۱ |
| ۳ | ۱۶۵۰ | غوطه‌ورسازی قوطی فرو و آنادیوم و هم زدن ۱۵ دور در ۲۰ ثانیه | ۶ | ۷۰ | - | - |
| ۴ | ۱۶۵۰ | غوطه‌ورسازی قوطی فروآلیاژ و هم زدن ۱۰ دور در ۲۰ ثانیه | ۳ | ۸۲ | ۷۰ | ۷۰ |
| ۵ | ۱۶۵۰ | غوطه‌ورسازی جعبه فروآلیاژ و هم زدن ۶ دور در ۲۰ ثانیه | ۳ | ۹۲ | ۸۵ | ۸۵ |

نشان داده شده است. این اطلاعات نشان می‌دهد که با افزایش درصد عناصر میکروآلیاژی، تنش تسلیم و حد نهایی کشش فولاد افزایش می‌یابد. علت این موضوع ریز شدن کریستالهاست که با رابطه معروف Hall و Petch توجیه می‌شود. دلیل دیگر، پخش ذرات ریز کاربونیترید در زمینه فولاد است. ریز شدن دانه ها علاوه بر افزایش تنش تسلیم، چقرمگی فولاد را نیز بهبود می‌بخشد. مقاوم شدن در اثر تشکیل محلول جامد، ایجاد زیرساختمان نابجاییها و پیدایش جهات برتر نیز بسته به ترکیب شیمیایی و نحوه عملیات انجام شده حین تولید، روی استحکام نهایی فولادهای میکرو-آلیاژی تأثیر دارد [۵، ۴۲ و ۴۳]. از آنجاکه در فولادهای مورد آزمایش، دو حد بالا و پائین تسلیم وجود دارد، لذا حد خستگی تقریباً "نصف حد نهایی کشش است و با افزایش میزان عناصر میکروآلیاژی می‌باید افزوده شود. منحنيهای کششی همچنین نشان می‌دهند که مدول کشسانی نمونه ها با افزایش محتوای عناصر میکروآلیاژی، چندان تغییر نمی‌کند. علت این موضوع بستگی مدول کشسانی به انرژی اتصالات بین اتمی است که عمدتاً "به ترکیب شیمیایی کلی آلیاژ وابسته است و با افزایش مقادیر بسیار جزئی عناصر میکرو-آلیاژی و نیز عملیات حرارتی و مکانیکی نمونه ها تغییر قابل ملاحظه‌ای نشان نمی‌دهد. خلاصه اطلاعات حاصل از آزمایشهای کشش در جدول ۵ آمده است.

عناصر آلیاژی مطابقت دارد. فزونی سختی فولادها در حالت ریخته شده، آبداده و بازگشت داده شده - Cast Quench ed and Tempered نسبت به حالت نورد شده، آبداده و بازگشت داده شده به واسطه طولانی تر بودن مدت اعمال حرارتی و درشت تر شدن رسوبات در حالت اخیر است رسوبات درشت هماهنگی خود را با زمینه از دست می‌دهند و میزان تنشهای کشسان اطراف خود می‌کاهند. نتیجتاً این فرایند کاهش، سختی نمونه است.

در نمونه های نورد شده AS Rolled، به علت انجام مراحل نهایی نورد در دمای 600°C و اینکه در این دما امکان تبلور مجدد وجود نداشته، میزان سختی بسیار زیاد است. در حالت ریخته شده نرمالیزه Cast Normalized به علت متعادل تر بودن دانه ها، کمترین میزان سختی نسبت به سایر حالات ملاحظه می‌شود. اطلاعات جدول ۴ نشان می‌دهد که سختی در همه حالات حرارتی و مکانیکی برای فولادهای وانادیوم - نایوبیوم دار بیشتر از فولادهای - ساده است. علت این پدیده اولاً "ریزتر بودن دانه ها در فولادهای دارای عناصر میکروآلیاژی بیشتر (شکلهای ۳و۲) و ثانیاً "تشکیل رسوبات مربوط به عناصر میکروآلیاژی در فاز فریت است. این ترکیبات که می‌توانند از نوع نیتريدی، کاربیدی یا کاربونیتریدی باشند، سختی بسیار بالایی دارند و باعث افزایش سختی رسوبی Precipitation Hardening فاز فریت می‌شوند.

ریز شدن دانه ها در اثر افزایش عناصر میکروآلیاژی (نمودارهای ۳و۲) به علت تشکیل ترکیبات عناصر میکرو-آلیاژی با ناخالصیها و کربن موجود در فولاد است. این ترکیبات چنانچه از نظر ابعاد و جهت شبکه کریستالی با ساختار فولاد هماهنگی داشته و در دمای انجماد به حالت جامد باشند، به صورت مراکز جوانه زنی عمل می‌کنند و باعث ریز شدن دانه ها می‌شوند. این مراکز که از نظر ابعاد در حدود چند برابر شبکه کریستالی هستند، در فاز آستنیت پراکنده اند و در هنگام تغییر حالت آستنیت به فریت، مانع حرکت نابجاییها و پیشرفت فرایند تبلور مجدد می‌شوند. قفل شدن مرز دانه ها در اثر رسوبات میکروآلیاژی هنگام تغییر حالت آستنیت به فریت سبب ریز شدن دانه های فریت ۳۹-۴۱ و افزایش میزان استحکام فولاد می‌شود.

تأثیر عناصر میکروآلیاژی و عملیات حرارتی و مکانیکی بر خواص کششی فولادها در شکلهای ۵و۴ به طور مقایسه ای

جدول ۵- تاثیر عناصر میکروآلیاژی بر خواص مکانیکی نمونه های فولاد میکروآلیاژی نورد گرم شده، آب داده و بازگشت داده شده.

| درصد طویل شدن نمونه | درصد طویل شدن در نقطه تسلیم | حد نهایی کشش (مگا پاسکال) | تنش تسلیم (مگا پاسکال) | سطح مقطع اولیه نمونه (میلی متر مربع) | نایبویوم | درصد عناصر میکروآلیاژی وانادیوم | نمونه |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|--|----------|---------------------------------|----------|
| ۲۴/۷ | ۱/۷۲ | ۳۵۰ | ۲۶۱ | ۱۸ | - | - | شمع پوش |
| ۲۲/۶ | ۱/۸۳ | ۴۰۶ | ۳۰۶ | ۱۶ | - | ۰/۰۶ | ۱ |
| ۱۹/۶ | ۲/۲۲ | ۴۷۷ | ۴۰۶ | ۱۴/۰۴ | ۰/۰۲۵ | ۰/۱۲ | ۲ |
| ۱۴/۹ | ۲/۱ | ۴۴۸ | ۳۷۵ | ۲۴ | - | - | لوله نفت |
| ۱۴/۱ | ۳/۹ | ۵۱۳ | ۴۳۸ | ۳۲ | - | ۰/۱۴ | ۳ |
| ۱۳/۹ | ۴/۴ | ۶۲۵ | ۵۴۳ | ۳۰/۴ | ۰/۱۴ | ۰/۱۸ | ۴ |
| ۱۳/۶ | ۴/۸ | ۷۶۶ | ۶۸۰ | ۲۵/۶ | ۰/۲۲ | ۰/۲۲ | ۵ |

جمع بندی

عناصر میکروآلیاژی، حتی در مقادیر بسیار کم، می‌توانند خواص فیزیکی و مکانیکی فولادها را بهبود بخشند. نحوه عمل این عناصر، به این ترتیب است که با بسیاری از عناصر موجود در فولاد مانند اکسیژن، نیتروژن، گوگرد، هیدروژن و کربن ترکیب می‌شوند و آنها را به ترکیبات اکسیدی، نیتریدی، سولفیدی و یا کربیدی دیرگدازی تبدیل می‌کنند که بعضی همراه سرباره دفع می‌شوند و بعضی دیگر به صورت مراکز جوانه زنی عمل می‌کنند و سبب ریز شدن دانه‌ها در هنگام انجماد فولاد می‌شوند. این ترکیبات بسیار سخت‌اند و با تشکیل رسوبات بسیار ریز (حدود چند برابر ثابت شبکه کریستالی) در ساختار فولاد جامد سبب مقاوم شدن آن می‌شوند. ترکیبات عناصر میکروآلیاژی همچنین می‌توانند در فاز آستنیت پراکنده شوند و در هنگام تغییر حالت آستنیت به فریت، جلو حرکت نابجاییها و پیشرفت فرایند تبلور مجدد را بگیرند. برای انجام این مقصد، لازم است مقدار عناصر میکروآلیاژی افزوده شده به فلز مذاب درست به میزان لازم باشد تا هماهنگی بین ساختمان شبکه کریستالی ترکیبات میکروآلیاژی و فولاد از بین نرود و همچنین تمرکز مقادیر اضافی مواد میکروآلیاژی در مرز دانه‌ها سبب سست شدن و انقطاع مرز کریستالها نشود.

مشکل اصلی در تولید فولادهای میکروآلیاژی، کم بودن بازدهی جذب این عناصر به دلیل میل ترکیبی شدید آنها با عوامل ناخالصی موجود در محیط عمل است که ضرورت حفاظت فلز مذاب در مقابل ورود عوامل خارجی مانند اکسیژن و نیتروژن را به خصوص در هنگام افزودن عناصر میکروآلیاژی ایجاد می‌کند. برای کاهش میزان مصرف این عناصر، برای مثال، لازم است عملیات اکسیژن زدایی و گوگرد زدایی پیش از افزودن عناصر میکروآلیاژی در پاتیل فولاد مذاب انجام شود. وانگهی لازم است نسبت به انتخاب ترکیب شیمیایی مناسب فولاد به خصوص میزان کربن موجود در آن قبل از افزودن عناصر میکروآلیاژی دقت لازم بشود.

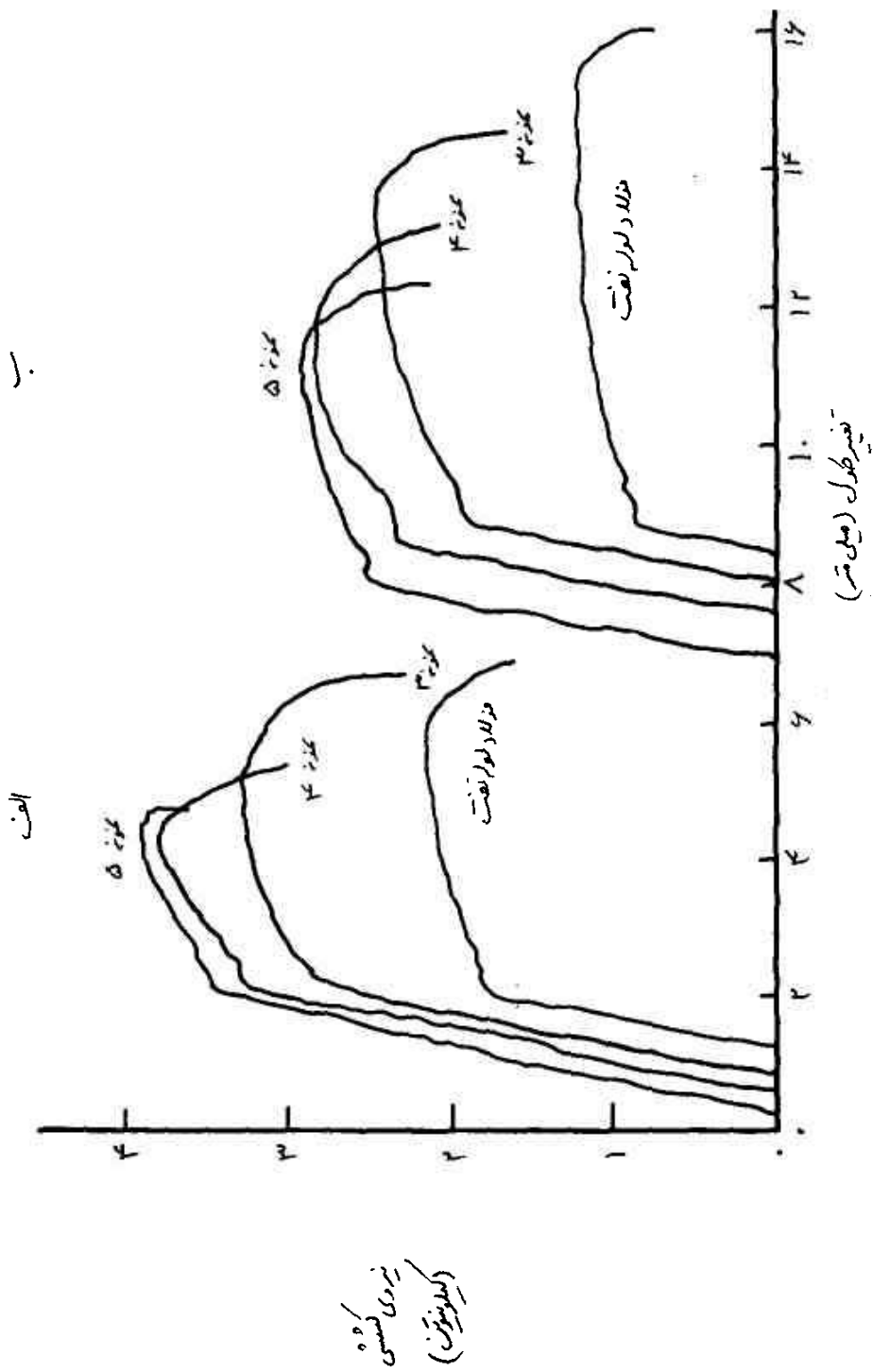
برای افزایش بازدهی جذب عناصر میکروآلیاژی طی این بررسیها، روش ابتکاری تازه‌ای به کار رفته که با کمک آن بازدهی جذب دو عنصر وانادیوم و نایوبیوم مطالعه و تحقیق شده است. در اجرای این روش، تنها از تکنولوژی و وسائل عادی موجود در کشور استفاده شده و برای محافظت از فلز

مذاب حین انجام عملیات نیز هیچ اقدام حفاظتی ویژه‌ای بر سیستم اعمال نشده است. با این همه، بازدهی جذب وانادیوم به بالاتر از ۹۰ درصد و از آن نایوبیوم به بالاتر از ۸۰ درصد توسعه یافته است. نتیجه آزمایشهای انجام شده نشان می‌دهد که بازدهی جذب وانادیوم از بازدهی جذب نایوبیوم بیشتر است. به علاوه با افزایش درصد کربن موجود در فولاد، بازدهی هر دو عنصر اضافه می‌شود. اگر چه همزدن ملایم فلز مذاب می‌تواند به انحلال و جذب عناصر میکروآلیاژی کمک کند، اما همزدن شدید باعث کاهش بازدهی جذب می‌شود.

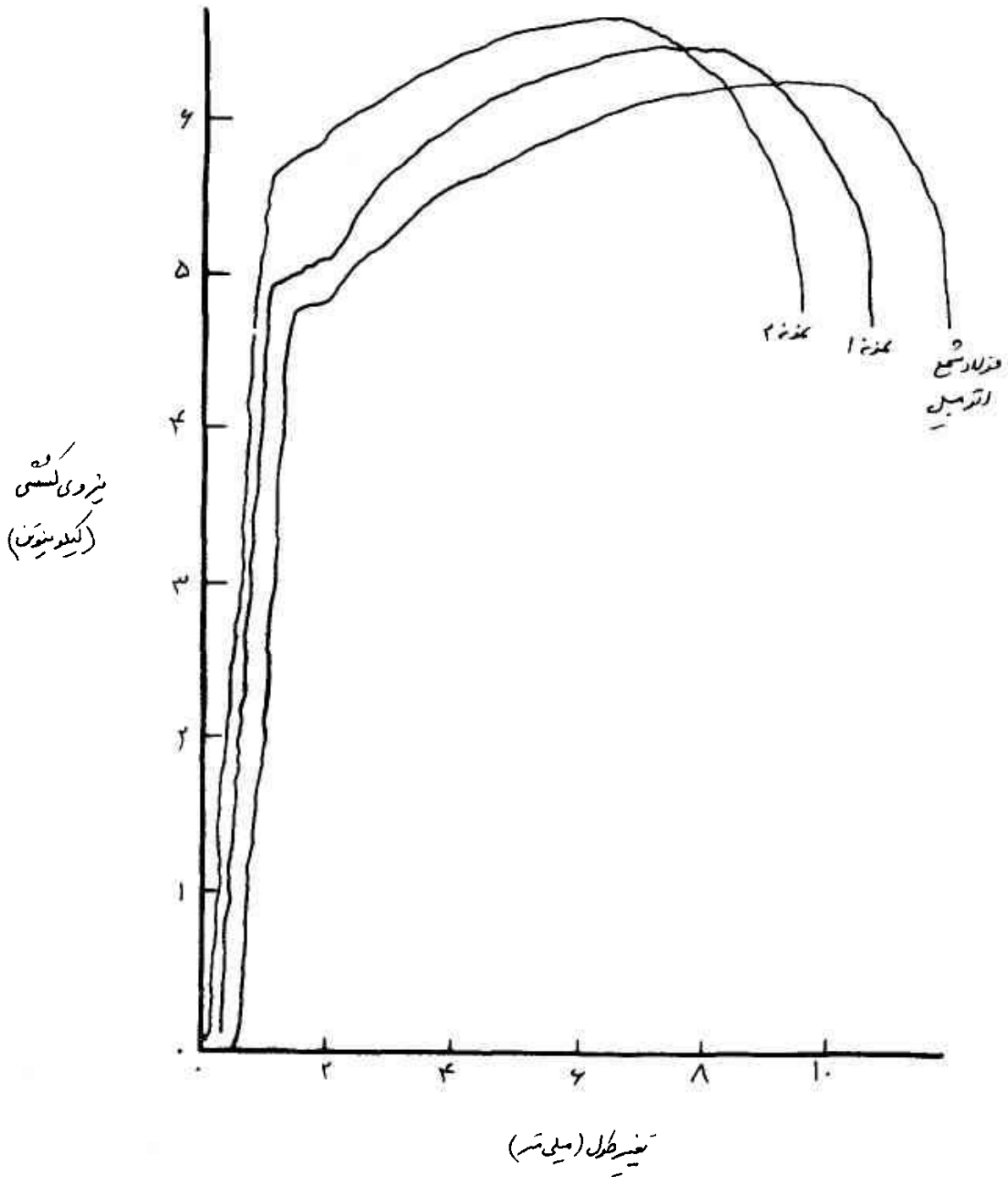
در ادامه مطالعات، بر فولادهای میکروآلیاژی حاصل چند عمل نرمالیزاسیون، نورد گرم و آبدادن انجام شده و خواص فیزیکی و مکانیکی قطعات حاصل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتیجه آزمایشها نشان دهنده ریز شدن دانه‌های فریت در اثر افزایش عناصر میکروآلیاژی و نتیجتاً افزایش استحکام، چقرمگی و سختی فولادهای حاصل بوده است.

سپاسگزاری

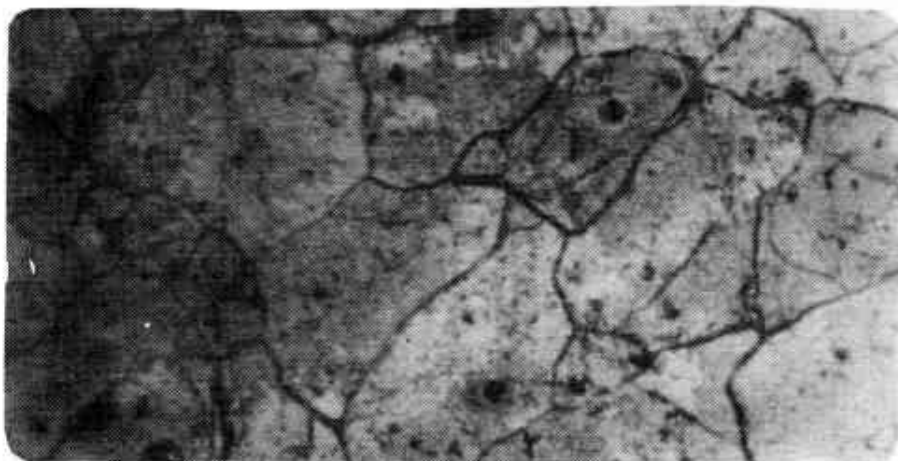
بدین وسیله از تکنیسینهای آزمایشگاههای متالورژی استخراجی، عملیات حرارتی و شکل دادن فلزات دانشگاه صنعتی شریف برای همکاری در تهیه نمونه‌ها، از مسئول آزمایشگاه کارخانه نورد و تولید قطعات فولادی برای تهیه آنالیز شیمیایی فولادهای تهیه شده، از تکنیسینهای آزمایشگاههای عملیات حرارتی و متالوگرافی دانشکده فنی دانشگاه تهران برای همکاری در تهیه و متالوگرافی نمونه‌ها و از مسئول آزمایشگاه میکروسکوپ الکترونی مرکز پژوهشهای خواص و کاربرد مواد و نیرو از بابت همکاری در مطالعه سطوح و مقاطع قطعه‌های فولادی سپاسگزاری و تشکر می‌شود.



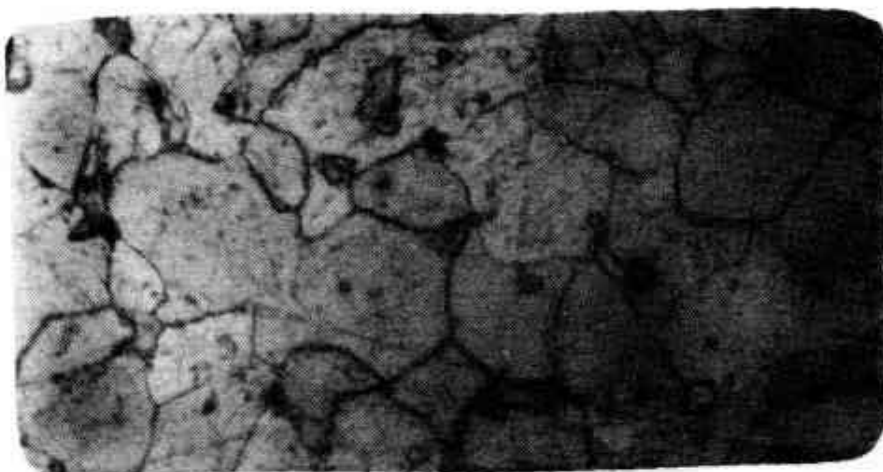
شکل ۵ - منحنی های کششی فولادهای الف - نورد شده، آبداده و بازگشت داده شده و ب - نورد شده (توجه: مبدأ منحنی ها روی محور افقی نسبت به هم تغییر مکان یافته اند) .



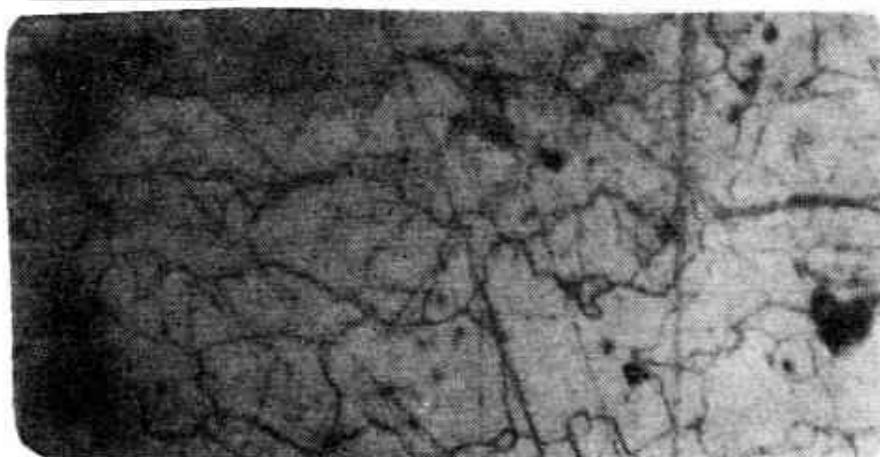
شکل ۴- منحنی های کششی فولادهای نورد شده، آبداده و بازگشت داده شده (توجه: مبدا منحنی ها روی محور افقی نسبت به هم تغییر مکان یافته اند).



شکل ۲ (الف)

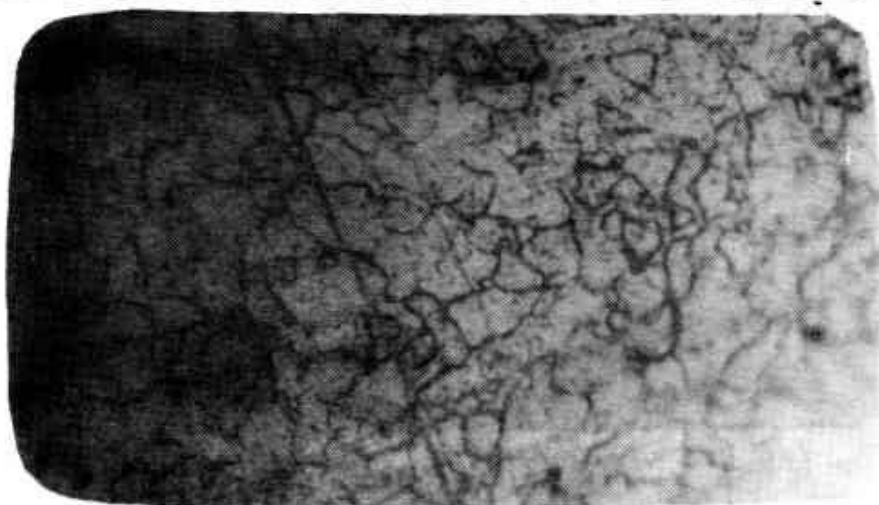


شکل ۲ (ب)

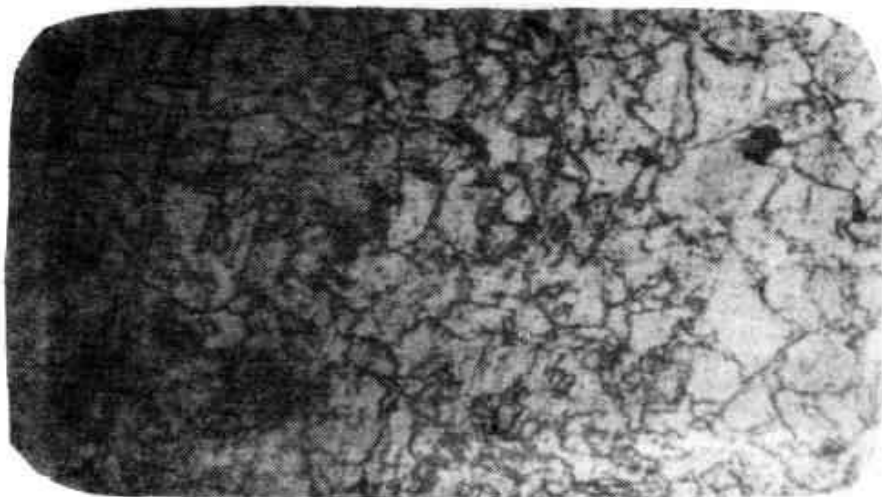


شکل ۲ (ج)

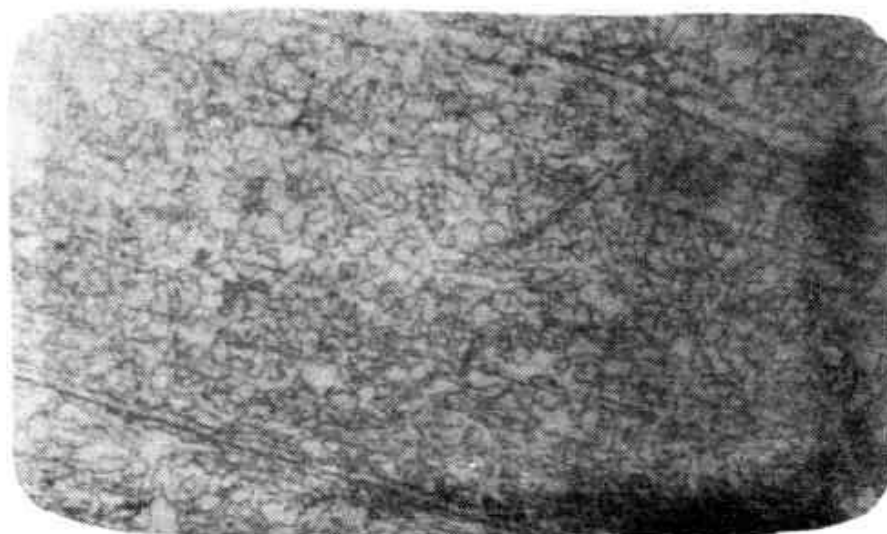
شکل ۲- ریز ساختار فولادهای ریخته شده نرمالیزه الف - شمع بوش، ب - نمونه ۱ و ج - نمونه ۲ (بزرگنمایی ۵۰۰).



شکل



شکل ۳



شکل ۳ (ج)

شکل ۳- ریز ساختار فولادهای نورد شده، آبداده و بازگشت داده شده الف - شمع بوش ب - نمونه ۱ و ج - نمونه ۲ (بزرگنمایی ۵۰۰).

- 1- Stuart and Jones: Journal of Metals, April 1983, 17-20.
- 2- Green: Micro Alloy 75, Proceedings of the conference, Mashhad, 1977, 634-642.
- 3- Mitchell and Chan: Micro Alloy 75, Proceedings of the Conference, 1977, 1977, 599-605.
- 4- Walter,: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 622-63.
- 5- Gladman, Dulieu and Melvor: Micro Alloy 75, Proc., 1977, 32-55.
- 6- Held: Metal Progress, Dec. 1985, 17-23.
- 7- Hertzberg and Goodenow: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 503-516.
- 8- Parrini, Pizziment and Pozzi: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 288-302.
- 9- Younger: Metal Progress, May 1975, 43-47.
- 10- Dinda and Kasper: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 531-539.
- 11- Younger: Metal Progress, Feb. 1976, 16-27.
- 12- Troker, Dunn, Deere and Company: Micro Alloy 75, Proceedings Chicago, 1977, 648-653.
- 13- Milsen, Mine and Hanson: Micro Alloy 75, Proceedings, Chicago, 1977, 674-681.
- 14- Johnson: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 643, 644.
- 15- Carter: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 711-723.
- 16- Kampschaefer and Jossen: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 694-704.
- 17- Weise: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 676-683.
- 18- Litvinenko: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 470-473.
- 19- Tanaka, Funakoshi, Ueda and Tsuboi: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 399-409.
- 20- Paeffner, Gorges, Haneke and Rehnagel: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 425-434.
- 21- Civalero: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 451-469.
- 22- McCutcheon: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 382-386.
- 23- Repas: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 387-396.
- 24- Yamaguchi, Taira, Osuka and Iwasaki: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 415-424.
- 25- Jones: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 397-398.
- 26- Fisher: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 410-414.
- 27- Suzuki, Hishirawa and Asai: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 442-450.
- 28- Harre and Gilroy-Scott: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 375-381.
- 29- Lafrance, Garon, Lemant and Ledere: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 367-374.
- 30- Irvine, Hickeney and Hindman: Journal of Iran and Steel Institute, Vol. 205, 1967, 161-182.
- 31- Orton: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 354-357.

- 32- Grumbach: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 348.
- 33- Oberhauser and Wallner: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 349.
- 34- Tanaka: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 350-352.
- 35- Yamaguch: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 352-353.
- 36- Somerville: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 354-358.
- 37- Sheng and Chen, "Recent Progress of Rar Earth Treated Steel in China": Journal of Metals, March 1985, 55-58.
- 38- Meyer, Heisterkamp and Mueschenborn: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 153- 167.
- 39- Wilber, Bell, Bucher and Childs: Transactions of Metallurgical Society of AIME Vol. 242, 1968, 2305-2308.
- 40- Lamberigts, Pelerin' and Greday: Center for Research in Metallurgy (CRM), Vol. 40, 1974, 31-41.
- 41- Honeycombe: Specialty Steel and Hard Materials, Pergamon Press, 1983.
- 42- Tanaka, Tabata, Hatomura and Shiga: Micro Alloy 75, Proceedings, 1977, 107-119.
- 43- Cohen and Owen: Micro Alloy 75, Proceedings, Chicago, 1977, 2-8.