



**تدوین دانش فنی تولید فولادهای زنگ نزن گرید 316LVM
(گزارش مقطع پنجم)**

**گروه پژوهشی مواد نوین
سازمان جهاددانشگاهی استان خراسان رضوی**

تابستان ۱۴۰۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

شناسنامه گزارش

عنوان گزارش: گزارش مقطع پنجم

شماره ویرایش: اول

عنوان فارسی طرح پژوهشی: تدوین دانش فنی تولید فولادهای زنگ نزن گرید 316LVM

عنوان انگلیسی طرح: Development of technical knowledge for the production of 316LVM stainless steels

تالیف کننده‌ها: احمد مولودی - حسین نوروزی - اکرم صالحی - فائزه برزگر

ویرایش علمی: اکرم صالحی - احمد مولودی - مسعود گلستانی پور

ویرایش ادبی: حسین امینی مشهدی - حسین نوروزی

سطح دسترسی به سند: محرمانه (بدون موافقت کتبی، نسخه‌برداری یا تکثیر ممنوع است)

نام مسئول یا همکار	محل استخدام	تخصص	عناوین فعالیت‌ها
احمد مولودی	جهاددانشگاهی مشهد	مواد پیشرفته	همکاری در جمع آوری و تدوین گزارش مقطع اول، همکاری در طراحی آزمون‌ها، در خرید مواد اولیه و تجهیزات
اکرم صالحی	جهاددانشگاهی مشهد	مواد پیشرفته	همکاری در جمع آوری و تدوین گزارش مقطع اول، همکاری در طراحی آزمون‌ها، در خرید مواد اولیه و تجهیزات
مسعود گلستانی پور	جهاددانشگاهی مشهد	مواد پیشرفته	همکاری در طراحی آزمون‌ها و مشاور طرح
فائزه برزگر	جهاددانشگاهی مشهد	خوردگی	همکاری در جمع آوری و تدوین گزارش مقطع اول، همکاری در طراحی آزمون‌ها
حسین امینی مشهدی	جهاددانشگاهی مشهد	نانومواد	همکاری در طراحی آزمون‌ها و مشاور طرح
حسین نوروزی	جهاددانشگاهی مشهد	خوردگی	همکاری در طراحی آزمون‌ها

سازمان مجری: سازمان جهاددانشگاهی استان خراسان رضوی

گروه مجری: گروه پژوهشی مواد نوین

نشانی: مشهد، پردیس دانشگاه، گروه پژوهشی مواد جهاددانشگاهی مشهد

تلفن محل کار تالیف‌کننده اصلی: ۰۵۱-۳۱۹۹۷۴۷۱

نشانی پست الکترونیک تالیف‌کننده اصلی: ahmad_moloodi@yahoo.com

این سند به همه همکارانی که برای انجام کارهای پژوهشی در کشور بی دریغ کوشش می نمایند، تقدیم می شود.

چکیده

فولاد زنگ زن آستنیتی 316 LVM یکی از مواد زیستی پرمصرف برای ساخت ایمپلنت‌های تثبیت خارجی یا داخلی بدن است؛ زیرا ترکیب خوبی از خواص مکانیکی، زیست سازگاری و مقرون به صرفه بودن را دارد. علاوه بر این، امکان خم شدن و شکل دادن به ایمپلنت، آن را به یک کلاس مطلوب از مواد ایمپلنتی برای ایجاد بیشترین تناسب مورد نیاز در اتاق عمل تبدیل می‌کند. در این گزارش ابتدا معرفی این فولاد و همچنین خواص و نحوه ارزیابی آن آورده شده است. سپس نقشه راه برای رسیدن به دانش فنی تولید این فولاد ترسیم شده است. در ادامه به مواد و روش کار و اقداماتی مانند تهیه قراضه خام، تهیه اسناد مربوط به مشخصات فولادهای مشابه خارجی و ... که تا کنون انجام شده است، اشاره گردیده است. در بخش بعدی گزارش، مشخصات فنی فولاد مشابه خارجی شامل آنالیز شیمیایی، خواص مکانیکی، ریزساختار متالوگرافی، سختی و خواص خوردگی و همچنین نتایج ذوب اولیه قراضه فولادی به عنوان نمونه شاهد با هدف ارزیابی آورده شده است. پس از آن مراحل و نحوه ذوب مواد و مشخصه یابی آنها در مقیاس آزمایشگاهی و پایلوت آورده شده است. در ادامه نتایج شبیه سازی مراحل فرآیند کارمکانیکی سرد آورده شده است. در پایان نتایج انجام کار مکانیکی سرد بر روی نمونه آزمایشی گزارش شده است و در ادامه فعالیت های آتی پروژه بیان شده است.

فهرست

۸	۱- فصل اول: مقدمه
۹	۱-۱- مقدمه
۱۱	۲- فصل دوم: مروری بر منابع
۱۲	۲-۱- فولادهای زنگ نزن
۱۳	۲-۲- فولادهای زنگ نزن آستنیتی
۱۵	۲-۳- فولاد زنگ نزن آستنیتی 316LVM
۱۶	۲-۴- تأثیر عناصری آلیاژی
۱۷	۲-۵- ریزساختار فولادهای آستنیتی
۱۹	۲-۶- فرایند انجماد فولادهای زنگ نزن آستنیتی
۱۹	۲-۶-۱- انواع مکانیزم های انجماد
۲۲	۲-۷- خواص مکانیکی فولادهای آستنیتی
۲۳	۲-۸- روش های استحکامدهی فولادها
۲۴	۲-۹- تغییر شکل سرد و آنیل فولاد زنگ نزن آستنیتی
۲۵	۲-۱۰- استانداردهای کاربردی در راستای تولید فولاد 316LVM
۲۶	1- 10- 2- بررسی استاندارد F138
۲۶	۲-۱۰-۱- مواد و روند ساخت
۲۶	۲-۱۰-۲- الزامات ترکیب شیمیایی
۲۷	۲-۱۰-۳- الزامات متالورژیکی
۲۸	۲-۱۰-۴- خواص مکانیکی
۲۸	۲-۱۰-۵- آزمون های ویژه

۲-۱۱- روش پیشنهادی جهت انجام ذوب و ریخته گری فولاد.....	۲۹
۲-۱۱-۱- ذوب در کوره القایی	۲۹
۲-۱۱-۱-۱- مقدمه و اهمیت فرآیند	۲۹
۲-۱۱-۱-۲- روش انجام فرآیند ذوب فولاد 316LVM	۳۱
۲-۱۱-۳- ذوب در کوره تحت اتمسفر خلاء یا گاز خنثی.....	۳۹
۳- فصل سوم: مواد و روش ساخت	۶۴
۳-۱- روند کلی تولید	۶۵
۳-۲- لیست مراکز و شرکت های خدمات دهنده	۶۶
۳-۳- مشخصات فنی فولاد 316LVM	۶۷
۳-۳-۱- آنالیز شیمیایی و خواص مکانیکی	۶۷
۳-۴- ریزساختار متالوگرافی	۷۲
۳-۵- سختی سنجی	۷۶
۳-۶- رفتار خوردگی	۷۷
۳-۷- نتایج ذوب در کوره خلاء	۸۱
۴- منابع و مراجع	۸۴

۱- فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه

در حالت کلی زیست ماده به کار رفته در محیط بدن بایستی از زیست سازگاری مطلوبی به خصوص در زمان‌های طولانی برخوردار باشد. زیست مواد بکار رفته در بدن در معرض محیط خورنده یعنی مایعات بدن حاوی یون‌های کلر، آمینواسیدها و پروتئین‌های مختلف قرار دارند. زیست سازگاری مواد کاشتنی در بدن بسته به مقاومت آنها در برابر واکنش‌های بیولوژیکی مضر مانند خورده شدن کاشتنی فلزی در محیط پلاسمای خون ارزیابی می‌شود.

در ساخت کاشتنی‌های ارتوپدی، فلزات نقش انکار نشدنی دارند. در این میان فولادهای زنگ نزن بدلیل تاریخچه مصرف طولانی و در نتیجه رفتار شناخته شده و همچنین هزینه کمتر در مقایسه با دیگر بیومواد فلزی و در عین حال زیست سازگاری مناسب در کاربردهای کوتاه مدت، موقعیت خود را در بین بیومواد فلزی تثبیت کرده است. اولین مواد فلزی که به طور موثر در زمینه پزشکی مورد استفاده قرار گرفته است، فولاد زنگ نزن است. فولاد زنگ نزن یک نام مرسوم برای برخی از فولادهای مقاوم به خوردگی است.

فولادهای زنگ نزن آستنیتی به دلیل مقاومت به خوردگی خوب و انعطاف پذیری مناسب از جمله مواد مهندسی می‌باشند که کاربرد پزشکی بالایی دارند اما خواص مکانیکی پایین، استفاده آنها را در صنعت محدود ساخته است. از جمله خصوصیات این گروه از فولادهای زنگ نزن، تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت در حین عملیات تغییر شکل در زیر دمای M_d (دمای استحاله مارتنزیتی در تغییر شکل پلاستیکی سرد) می‌باشد. به عبارت دیگر فاز آستنیت یک فاز نیمه پایدار می‌باشد که در اثر این تبدیل می‌توان استحکام مکانیکی را تا ۲ GPa نیز افزایش داد، ضمن اینکه انعطاف پذیری قابل قبولی نیز از خود نشان می‌دهد. نکته مهم این است که با تشکیل فاز مارتنزیت در ساختار، خواص خوردگی فولاد

کاهش خواهد یافت. بنابر این افزایش استحکام این فولادها از طریق حضور فاز مارتنزیت چندان مناسب نمی‌باشد.

فولادهای زنگ نزن آستنیتی، یا آلیاژهای فلزی به خصوص نوع 316LVM با دارا بودن خواص مکانیکی مناسب، به عنوان ماده زیستی کاربردهای متعددی در مواد کاشتنی و ارتوپدی در بدن پیدا کرده است. فولادهای زنگ نزن آستنیتی در کاشتنی‌های مورد استفاده در بدن همچون جایگزین بافت‌های سخت مانند مفاصل مصنوعی، ترمیم شکستگی‌های استخوان، وسایل تثبیت ستون فقرات و ... کاربرد پیدا کرده است.

۲- فصل دوم: مروری بر منابع

۲-۱- فولادهای زنگ نزن

فولادهای زنگ نزن، آلیاژهای پایه آهن می‌باشند که دارای حداقل ۵/۱۰٪ کرم می‌باشند. مقاومت به خوردگی مناسب این فولادها به دلیل تشکیل لایه اکسید کرم بر روی سطح آنها است و شامل گروه‌های مختلفی با خواص گوناگون می‌باشند که انواع آنها در زیر آمده است:

- **فولادهای زنگ نزن فریتی:** فولادهای زنگ نزن فریتی ساختاری مشابه آهن خالص در دمای محیط داشته و انعطاف پذیری و خواص خوردگی متوسطی دارند و در صنایع خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- **فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی:** فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی دارای کربن نسبتاً بالا، استحکام و سختی بالا همراه با خواص خوردگی متوسط می‌باشند و در وسایل جراحی و تیغه چاقو بکار می‌روند.
- **فولادهای زنگ نزن آستنیتی:** فولادهای زنگ نزن آستنیتی دارای خواص خوردگی و چقرمگی بسیار بالایی می‌باشند و پر کاربردترین دسته از فولادهای زنگ نزن را تشکیل می‌دهند و در صنایع شیمیایی، پزشکی و خودروسازی بکار می‌روند.
- **فولادهای زنگ نزن دو فازی (آستنیت+فریت):** فولادهای زنگ نزن دو فازی خواص بینابین گروه فریتی و آستنیتی داشته و دارای استحکام بالایی می‌باشند و بیشتر در صنایع پتروشیمی مصرف می‌شوند.
- **فولادهای زنگ نزن رسوب سختی:** فولادهای زنگ نزن رسوب سختی دارای استحکام بالا همراه با خواص خوردگی متوسطی می‌باشند و بر اساس ساختارشان به سه دسته آستنیتی، نیمه آستنیتی و مارتنزیتی تقسیم می‌شوند. این دسته از فولادها به دلیل استحکام بالای آنها در صنایع هوا فضا و پیشرفته مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱].

۲-۲- فولادهای زنگ زن آستنیتی

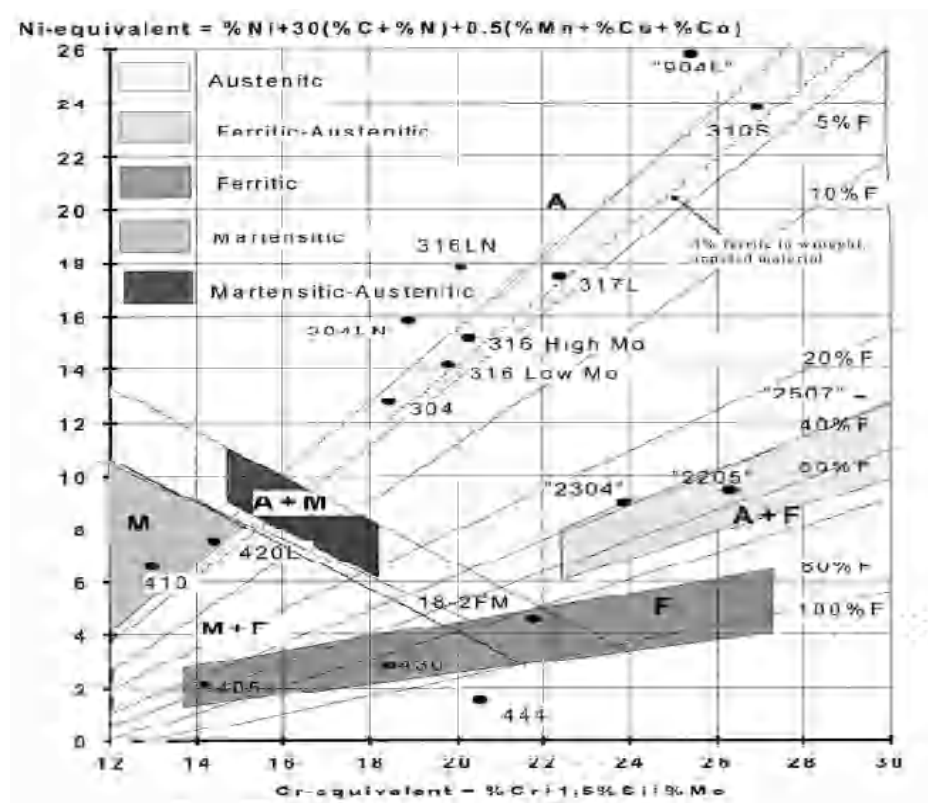
در نمودار شفلر (شکل ۱) فولادهای آستنیتی کم آلیاژ در گوشه چپ نمودار نزدیک به ناحیه فولادهای مارتنزیتی قرار گرفته‌اند که فولادهای زنگ زن آستنیتی نیمه پایدار نامیده می‌شوند. در این دسته از فولادها آستنیت در اثر تغییر شکل به مارتنزیت تبدیل می‌شود. آستنیت در فولادهای آستنیتی پرآلیاژ، پایدارتر بوده و در اثر تغییر شکل به مارتنزیت کمتری تبدیل می‌شود. فولادهای آستنیتی نیمه پایدار نظیر ۳۰۱ دارای انعطاف پذیری بسیار بالایی بوده و در کاربردهایی که نیازمند شکل‌پذیری بالایی باشند، استفاده می‌شوند. از جمله خواص دیگر این فولادها، کرنش سختی بسیار بالا و استحکام مکانیکی نسبتاً پایین آنها است. فولادهای ۳۰۲ و ۳۰۴ به دلیل مقاومت به خوردگی بالا بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. با اضافه نمودن مولیبدن، فولاد ۳۱۶ با خواص خوردگی بالاتر و استحکام دمایی بالا تولید می‌شود. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی تعدادی از فولادهای زنگ زن آستنیتی آمده است.

فولاد ضد زنگ ۳۱۶ دارای کربن بیشتری نسبت به ۳۱۶L است. به یاد داشته باشید، کاراکتر L در آلیاژ ۳۱۶L مخفف کلمه "کم" (Low) است اما با وجودی که کربن کمتری دارد، از نظر ظاهری ۳۱۶L بسیار شبیه به ۳۱۶ بوده و تشخیص آن از ظاهر آلیاژ کار سختی است. هزینه تولید و فروش این آلیاژ تقریباً یکسان است و هر دو مقاومت در برابر خوردگی بالایی دارند.

در تفاوت استیل ۳۱۶ و ۳۱۶L باید گفت استیل ۳۱۶L یک انتخاب بهتر برای مصارفی است که نیاز به جوشکاری دارد. در واقع جوش‌پذیری استیل ۳۱۶L بهتر از جوش‌پذیری فولاد ۳۱۶ است زیرا برای پیوند آلیاژی نیاز به ذوب کمتری دارد، همچنین آلیاژ ۳۱۶L انتخاب مناسب‌تری برای کاربرد در دمای بالا می‌باشد. به همین دلیل است که برای استفاده در ساخت و ساز و پروژه‌های دریایی بسیار محبوب است.

فولاد ضد زنگ آستنیتی 316LVM کاربرد گسترده‌ای به عنوان یک ماده زیستی دارد زیرا خواص مکانیکی خوب را با زیست سازگاری معقول ترکیب می‌کند. علاوه بر این، هزینه پایین و فرایند ساخت

آسان آن، در مقایسه با سایر مواد کاشت فلزی، فولاد 316LVM را به کلاس مطلوبی از مواد ایمپلنت برای کاربردهای ارتوپدی تبدیل می‌کند. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تثبیت بهبود یافته ایمپلنت‌های کوتاه مدت مورد استفاده برای ترمیم شکستگی استخوان ممکن است در مراحل اولیه کاشت بسیار مهم باشد [۱ و ۲].



شکل ۱. نمودار شفلر به منظور پیش بینی ساختار فولادهای زنگ نزن از روی ترکیبات شیمیایی [۲].

جدول ۱. ترکیب شیمیایی تعدادی از فولادهای زنگ نزن آستنیتی [۱].

عنصر	AISI 304	AISI 302	AISI 301	AISI 310	AISI 316	AISI 316L	AISI 316LVM
C	<۰/۰۷	<۰/۱۵	۰/۰۵-۰/۱۵	<۰/۱	<۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۳
Si	-	<۰/۷۵	<۲	<۱/۵	<۱	۱	۰/۷۵
Mn	۲-۱	<۲	<۲	<۲	<۲	۲	۲
Cr	۱۹-۱۷/۵	۱۹-۱۷	۱۹-۱۶	۲۶-۲۴	۱۶/۱۸-۵/۵	۱۶/۱۸-۵/۵	۱۹-۱۷
Mo	-	-	<۰/۸	-	۲-۲/۵	۲-۲/۵	۲/۳-۲/۵
Ni	۱۰-۸/۵	۱۸-۸	۹-۶/۵	۲۲-۱۹	۱۳-۱۰	۱۳-۱۰	۱۵-۱۳
N	<۰/۱۱	<۰/۱	<۰/۱۱	<۰/۱۱	<۰/۱۱	۰/۱	۰/۱
Fe	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده

۲-۳- فولاد زنگ نزن آستنیتی 316LVM

فولاد ضد زنگ 316LVM یک فولاد زنگ نزن آستنیتی است که توسط ذوب در خلاء تولید می‌شود. مقاومت در برابر خوردگی به طور قابل توجهی در مقایسه با مدل قبلی خود، یعنی ۳۱۶L به دلیل تمیزی عالی و همگنی ساختاری افزایش می‌یابد. این فولاد ضد زنگ برای تولید ایمپلنت‌های موقت و دائمی مناسب است.

مانند سایر بیومواد فلزی، فولاد 316LVM در مقایسه با تیتانیوم و آلیاژ تیتانیوم، مستعد به خوردگی زیر مایع بدن است. ایمپلنت‌های فولادی ضد زنگ به روش‌های مختلفی مانند خوردگی حفره‌ای (pitting)، شیار (crevice) و فرتینگ (fretting) خورده می‌شوند. محصولات خوردگی برای بدن مضر بوده و باعث ایجاد حساسیت، تحریک، التهاب و عفونت می‌شوند.

روش‌های مختلفی برای افزایش مقاومت در برابر خوردگی و افزایش خواص مکانیکی فولاد 316LVM مانند عملیات سطحی و اصلاح ترکیبات شیمیایی، پیشنهاد شده است. عملیات سطحی شناخته شده که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل پسیو کردن سطح، سندبلاست، پاشش یون، نیتريد کردن، کربونیتريدینگ می‌باشد. غیرفعال (پسیو) سازی سطحی تنها قادر به بهبود مقاومت در برابر خوردگی آن است. سند بلاست قادر به افزایش سختی آن است اما مقاومت در برابر خوردگی آن را کاهش می‌دهد. نیتريدینگ و کربونیتريداسیون به دلیل تشکیل لایه نازکی در حدود چند میکرومتر روی فاز آستنیتی منبسط شده، می‌توانند هم مقاومت به خوردگی و هم سختی آن را بهبود بخشند.

فاز آستنیت منبسط شده خواص فرومغناطیسی ضعیفی را ایجاد می‌کند. به دلیل نیاز به محیط‌های تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI) باید از حضور مواد فرومغناطیسی اجتناب شود. از آنجایی که MRI به طور گسترده به عنوان ابزار تصویربرداری بالینی استفاده می‌شود، بیومواد فلزی بایستی جهت سازگاری با دستگاه MRI، دارای خواص غیرمغناطیسی باشند.

نشان داده شده است که انجام عملیات سندبلاست منجر به تشکیل کسر حجمی بسیار کوچکی از مارتنزیت α' در زیر سطح می‌شود که خواص فرومغناطیسی دارد. علیرغم اینکه حضور آن در هنگام استفاده از تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI) یک عامل محدود کننده می‌باشد، می‌تواند نقش مضر برای مقاومت به خوردگی و آزادسازی یون نیز ایفا کند [۳ و ۴].

۲-۴- تأثیر عناصری آلیاژی

کرم به عنوان یکی از عناصر اصلی آلیاژی وظیفه ایجاد مقاومت به خوردگی را دارد. کرم با اکسیژن واکنش داده و سبب تشکیل اکسید کرم به ضخامت ۱-۲ nm بر روی سطح می‌شود. حداقل کرم مورد نیاز برای تشکیل لایه یکنواخت در حدود ۱۱٪ می‌باشد.

نیکل به منظور حصول خواص خوردگی مناسب به خصوص در محیط اسید سولفوریک اضافه می‌گردد. زمانی که لایه مقاوم تخریب و یا از بین رود حضور نیکل به منظور حفظ مقاومت به خوردگی ضروری است. نیکل همچنین از طریق استحکام دهی محلول جامد سبب افزایش استحکام فولاد می‌شود.

مولیبدن به منظور مقاومت به خوردگی شیار در محیط‌های کلریدی و مقاومت به خوردگی حفره‌ای به فولاد اضافه می‌شود. همچنین تمایل لایه اکسیدی به تجزیه را نیز کاهش می‌دهد.

منگنز به دلیل تمایل به تشکیل ترکیبات اکسیدی و سولفیدی به منظور بهبود مقاومت به اکسیداسیون و جلوگیری از تشکیل ناخالصی‌های سولفیدی که عامل پارگی داغ می‌باشند به فولاد اضافه می‌شود.

کربن پایدار کننده قوی فاز آستنیت محسوب می‌شود و از طریق استحکام‌دهی محلول جامد سبب افزایش استحکام فولاد می‌شود. اما به دلیل تمایل به تشکیل کاربید کرم و کاهش مقاومت به خوردگی، به میزان کمی به فولادهای ۳۱۶L و 316LVM که کاربرد پزشکی دارند، اضافه می‌شود.

نیترژن سبب افزایش مقاومت به خوردگی موضعی فولاد از جمله حفره‌دار شدن و خوردگی بین دانه‌ای، به دلیل تشکیل Cr_2N به جای Cr_{23}C_6 می‌شود. نیترژن همچنین از طریق استحکام‌دهی محلول جامد سبب افزایش استحکام مخصوصاً در فولادهای کم‌کردن می‌شود. همچنین به دلیل قیمت ارزان تر آن نسبت به نیکل، جایگزین مناسبی برای نیکل می‌باشد. تیتانیوم و دیگر عناصر پایدار کننده نظیر Nb به منظور جلوگیری از تشکیل Cr_{23}C_6 و پایدار شدن فولاد ممکن است اضافه شوند [۷-۵].

۲-۵- ریزساختار فولادهای آستنیتی

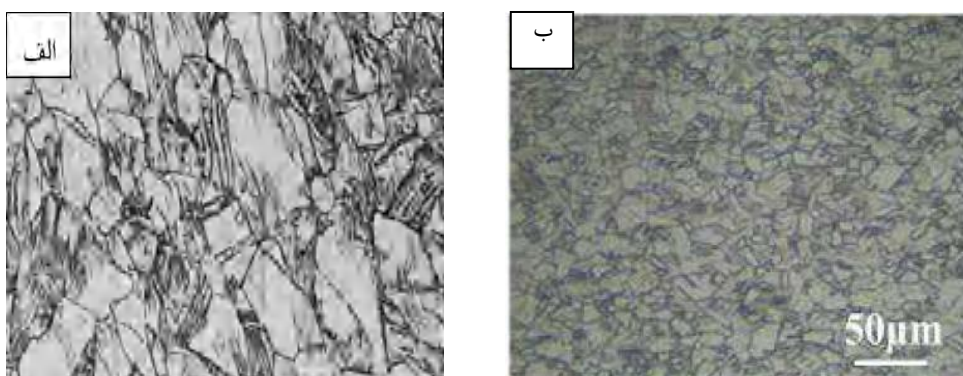
ریزساختار ایده آل فولادهای زنگ نزن آستنیتی فقط شامل آستنیت است اما به علت جدایش در ضمن انجماد، فریت تمایل دارد که تشکیل شود که در فولادهای زنگ نزن آستنیتی ریخته‌گری و جوشکاری شده اغلب دیده می‌شود.

حضور فریت در فولادهای زنگ نزن آستنیتی ممکن است منجر به تشکیل فاز سیگما (σ) شود. این فاز اثرات سوء بر انعطاف‌پذیری و مقاومت به خوردگی فولادهای زنگ نزن آستنیتی دارد. تشکیل فاز سیگما از فریت دلتا می‌تواند توسط اعمال کرنش تشدید شود. در فولادهای زنگ نزن به جز فازهای فریت، سیگما و M_{23}C_6 ، فازهای دیگری نیز ممکن است تشکیل شوند. این فازها شامل انواع مختلف کاربیدها و فازهای بین فلزی اند. تشکیل این فازها بستگی به ترکیب شیمیایی فولاد، فرایند ساخت و شرایط کاری آن دارد.

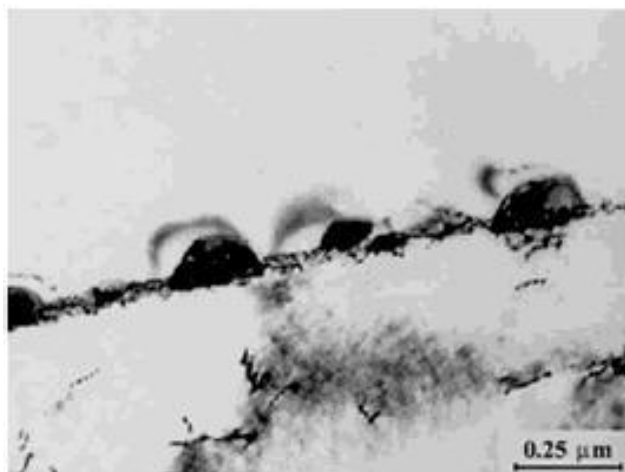
در شکل ۲ ریزساختار نوری این فولادها که علاوه بر فاز آستنیت حاوی باندهای برشی و مارتنزیت نیز است، نشان داده شده است. در شکل ۲-ب، ساختار ریزدانه فولادهای 316LVM که اندازه دانه متوسط ۱۰ میکرومتر دارد، نشان داده شده است.

چنانچه فولادهای آستنیتی در محدوده دمایی 950°C - 500°C حرارت داده شوند، کربن نفوذ می‌کند و سبب تشکیل رسوبات کاربیدی می‌شود. در دماهای بالای آنیل در صورت دادن زمان مناسب، این

کاربیدها حل شده و چنانچه فولاد سریع کوئنچ شود از تشکیل مجدد کاربیدها جلوگیری می‌شود. اغلب رسوبات کاربیدی به صورت $M_{23}C_6$ تشکیل می‌شوند (شکل ۳)، اما کاربیدهای دیگری نظیر M_7C_3 و M_6C_9 نیز ممکن است تشکیل شوند. نکته مهم آنکه تشکیل کاربیدها مخصوصاً کاربید کرم سبب کاهش شدید مقاومت به خوردگی فولاد خواهد شد [۲، ۳، ۵-۷].



شکل ۲. (الف) ساختار فولاد آستنیتی حاوی مقادیر زیاد باندهای برشی در آستنیت، (ب) ساختار فولاد 316LVM [۳] و [۵].



شکل ۳. مورفولوژی $M_{23}C_6$ در مرزدانه فولاد زنگ نزن آستنیتی [۲].

فازهای سیگما^۱، چی^۲ و لاوه^۳ سه فاز مختلف و متداول در فولادهای آستنیتی محسوب می‌شوند. تمامی این فازها سخت و ترد می‌باشند. فولادهای آستنیتی پر کرم حساس به تشکیل فاز سیگما می‌باشند. ساختار این فاز به صورت تتراگونال بوده و در محل برخورد سه دانه و یا مرزدانه معمولاً تشکیل می‌شوند. فاز چی نیز مشابه فاز سیگما تشکیل می‌شود، با این تفاوت که ساختار متفاوتی دارد و فولادهایی با مولیبدن بالا نسبت به تشکیل این فاز مستعد می‌باشند.

تبدیل مارتنزیت α' به آستنیت در فولادهای ناپایدار (مثلاً ۳۰۱، ۳۰۲، ۳۰۴، ۳۰۴L، ۳۱۶ و ۳۱۶L) معمولاً با تغییر دمای شروع و نهایی برگشت از ۴۳۳ درجه سانتیگراد به ۴۴۵ درجه سانتیگراد و از ۷۰۵ درجه سانتیگراد تا ۷۲۴ درجه سانتیگراد، بسته به میزان تغییر شکل و نرخ گرمایش، امکان پذیر است. با این حال، کاربرد این عملیات حرارتی برای فولاد 316LVM سنبلاست شده می‌تواند با آزاد شدن همزمان تنش‌های پسماند فشاری زیرسطحی محدود شود، بعلاوه اینکه احتمال تشکیل ترک‌های خستگی در این مناطق نیز وجود دارد [۸-۱۰].

۲-۶- فرایند انجماد فولادهای زنگ نزن آستنیتی

۲-۶-۱- انواع مکانیزم‌های انجماد

نمودار سه تایی آهن-کروم-نیکل، به عنوان سه عنصر اصلی در فولادهای زنگ نزن آستنیتی در شکل ۴ نشان داده شده است که بیانگر چگونگی شرایط انجماد تعادلی در این سیستم سه تایی است. با توجه به درصد عناصر آلیاژی در چنین فولادهایی و نیز طبق نمودار تعادلی، فولاد پس از انجماد دارای زمینه آستنیتی و یا آستنیتی-فریتی می‌باشد. البته عدم وجود شرایط تعادلی انجماد یا به عبارتی سرعت تبرید

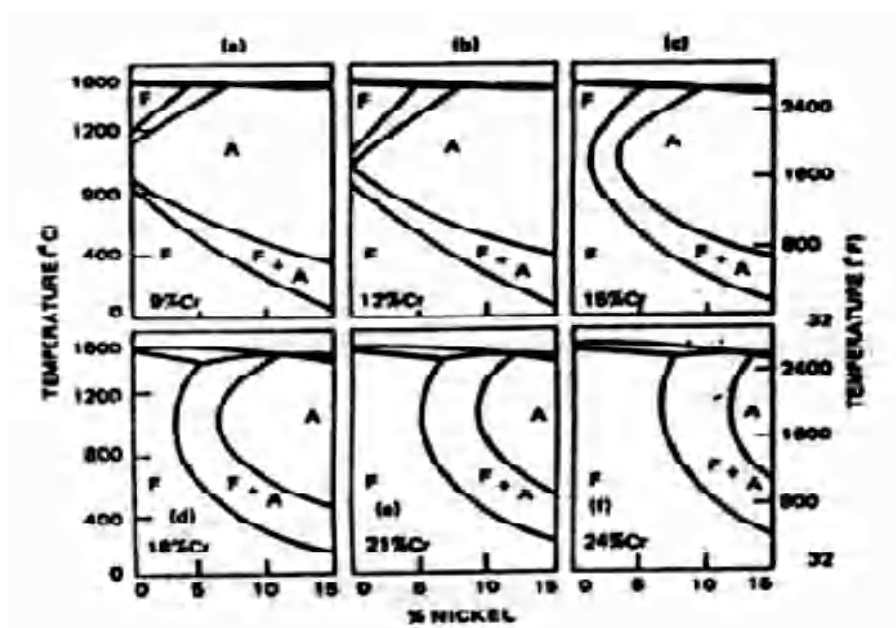
^۱sigma

^۲chi

^۳laves

زیاد، در فرایندهای مختلف مانند ریخته‌گری شمش ریزی و جوشکاری مزیتی است که بواسطه آن در دمای محیط، زمینه این فولادها آستنیتی شود.

عناصر آلیاژی دیگر و ناخالصی‌های موجود در فولاد و سرعت نفوذ محدود هر عنصر آلیاژی در فازهای مختلف، منجر به تغییر در چگونگی انجماد چنین فولادهایی می‌شود. تحت چنین شرایطی، استفاده از نمودارهای تعادلی، برای پیش بینی انجماد مناسب نبوده و نیاز است تا توسط روش‌های مختلف و مناسب، فرایند انجماد تعادلی را مرحله به مرحله دنبال نمود.



شکل ۴. نمودار سه تایی آهن-کرم-نیکل [۱۱].

طبق نتایج تحقیقات برخی از محققان، نحوه انجماد فولادهای زنگ نزن آستنیتی، با توجه به تغییر شرایط ترکیبی و تبریدی، به چهار گروه عمده تقسیم بندی می‌گردد:

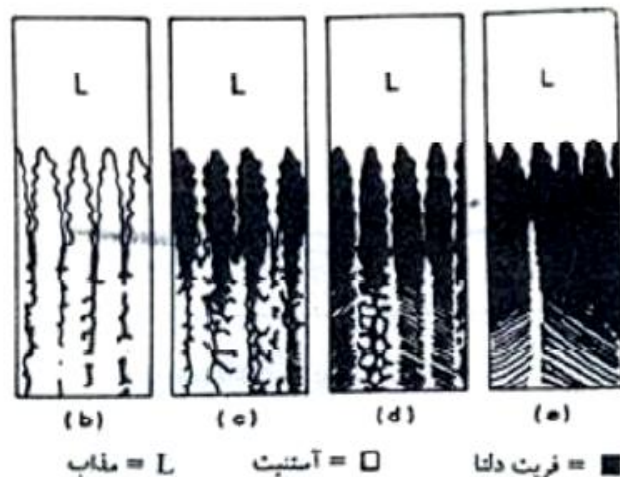
۱- انجماد تکفازی آستنیتی: مذاب صرفاً تبدیل به آستنیت شده و در دماهای بالا هیچ استحاله دیگری صورت نمی‌گیرد.

۲- انجماد دو فازي آستينيتي- فریتی: فاز رسوبي اوليه آستينيت بوده و قبل از تکميل انجماد مابقي مذاب تبديل به فریت می گردد.

۳- انجماد دو فازي فریتی-آستينيتي: فریت، فاز رسوبي اوليه از مذاب بوده (فریت اسکلتی) بواسطه واکنش پريتکتیکی و يا يوتکتیکی میان سه فاز مذاب، فریت و آستينيت، فاز آستينيت در میان دندريت های فریت رسوب نموده و در ادامه انجماد، آستينيت موجود ضمن پيشروی در مذاب، به داخل فریت دلتا نیز رشد می نماید. در این حالت کاهش شديد درصد حجمی فریت دلتا حاصل خواهد شد. البته در اثر بروز جدایش عناصر آلياژی فریت زا، همواره مقادیری کمی فریت در آخرين مراحل انجمادی در میان دندريت ها باقی خواهد ماند.

۴- انجماد تک فازي فریتی: فریت تنها فاز در حین انجماد بوده و پس از اتمام انجماد، آستينيت بطور ترجیحی در مرزخانه ها جوانه زده و توسط مکانیزم ويدمنشتاتن در داخل فریت رشد می نماید.

شکل ۵ الگوی انجمادی هر یک از گونه های فوق را نشان می دهد. البته در تقسیم بندی فوق دو مشکل وجود دارد و آن تفکیک دقیق میان گونه های مختلف انجمادی است. به نحوی که برخی معتقدند در انجماد نوع اول بواسطه بروز جدایش تا حدودی فریت دلتا تشکیل می گردد. دیگر اینکه گاهی انجماد نوع دوم و سوم در کنار یکدیگر و بطور همزمان بوقوع می پیوندند. طبق مطالب فوق، زمینه اصلی در فولادهای زنگ نزن آستينيتي، فاز آستينيت است که مقادیر جزئی فاز فریت دلتا نیز در کنار آن وجود دارد. فاز فریت دلتا بواسطه جدایش کروم موجود به داخل مذاب پسماند و يا جامد موجود در زمینه فولاد و در لابلای دندريت های آستينيتي رسوب کرده و تا دمای محیط پایدار می ماند [۱۱-۱۴].



شکل ۵. شماتیک مدل انجمادی فولادهای زنگ نزن آستنیتی: a- آستنیتی، b- آستنیتی- فریتی، c- فریتی- آستنیتی، d- فریتی [۱۱].

۲-۷- خواص مکانیکی فولادهای آستنیتی

فولادهای آستنیتی در شرایط آنیل انعطاف پذیری در حدود ۵۰٪ از خود نشان می‌دهند. این گروه از فولادها خواص مکانیکی نسبتاً پائینی دارند و به همین دلیل استفاده از آنها را محدود ساخته است. خواص مکانیکی تعدادی از فولادهای آستنیتی در جدول ۲ آمده است. تشکیل مارتنزیت سبب افزایش چشمگیر استحکام مکانیکی فولاد می‌شود اما انعطاف پذیری و مقاومت به خوردگی فولاد را که هدف اصلی استفاده از فولادهاست تخریب می‌سازد. بهبود خواص مکانیکی بدون تخریب خواص خوردگی همراه انعطاف‌پذیری مناسب سبب افزایش چشمگیر در قابلیت‌های این گروه از فولادهای پر مصرف زنگ‌نزن خواهد شد [۱].

جدول ۲. خواص مکانیکی برخی از فولادهای زنگ نزن آستنیتی [۱].

خواص	AISI304	AISI301	AISI316L	AISI302
استحکام کششی (MPa)	۵۸۰	۷۲۵	۴۸۵	۶۲۰
استحکام تسلیم	۲۹۰	۲۷۵	۱۷۰	۲۷۵
انعطاف پذیری	۵۵	۶۰	۴۰	۵۵

۲-۸- روش‌های استحکام‌دهی فولادها

روش‌های زیر برای بهبود خواص مکانیکی فولادها ارائه شده‌اند که به طور مختصر توضیح داده خواهند شد:

- استحکام بخشی محلول جامد

برای فولادهای زنگ نزن فریتی و آستنیتی که در معرض هیچ استحاله‌ای نیستند، استحکام بخشی از طریق محلول جامد می‌تواند موثر باشد.

- استحکام بخشی استحاله‌ای

در حین نورد سرد فولاد زنگ نزن آستنیتی نیمه پایدار، مارتنزیت ناشی از کرنش در آنها تولید می‌شود و باعث افزایش استحکام آنها می‌شود.

- کار سختی

در حین نورد سرد فولاد زنگ نزن آستنیتی و در دماهای بالاتر از M_d به دلیل پدیده کار سختی استحکام افزایش می‌یابد. اما به دلیل افزایش انرژی درونی ماده مقاومت فولاد در برابر خوردگی کاهش خواهد یافت.

- پیرسازی کرنشی

پدیده پیرسازی کرنشی، پدیده متداولی در فلزات است. در پیرسازی کرنشی علاوه بر برگشت نقطه تسلیم و افزایش تنش تسلیم پس از پیرسازی، انعطاف پذیری کم می‌شود. پیرسازی کرنشی با وقوع پدیده نقطه تسلیم در منحنی تنش-کرنش (تسلیم مکرر یا منقطع) همراه است. چنانچه فولاد زنگ نزن آستنیتی نورد سرد شده و سپس در دمای پایین آنیل شود، ممکن است در خلال پیرسازی کرنشی استحکامشان افزایش یابد. میزان افزایش به پایداری آستنیت، ترکیب شیمیایی، دمای نورد سرد، میزان کاهش و دمای آنیل بستگی دارد.

– استحکام بخشی رسوبی

رسوباتی به صورت ترکیبات بین فلزی که با زمینه همبسته هستند چنانچه در عملیات پیرسازی رسوب کنند، می توانند استحکام مواد را بهبود بخشند.

– ریز کردن دانه

به طور کلی، اندازه دانه ریزتر باعث افزایش استحکام فلز می شود. حال - پیچ نشان دادند که رابطه بین تنش تسلیم و اندازه دانه (رابطه ۱-۲) و همچنین سختی با اندازه دانه (رابطه ۲-۲) به صورت زیر می باشد [۱ و ۱۵]:

$$\sigma = \sigma_0 + Kd^{-0.5} \quad (۲-۱)$$

$$HV = HV_0 + K'd^{-0.5} \quad (۲-۲)$$

d = اندازه دانه

σ و HV : تنش تسلیم و سختی

HV_0 : سختی زمانی که اندازه دانه بی نهایت است

σ_0 : تنش اصطکاکی

K و K' : شیب نمودار σ بر حسب $d^{-0.5}$ و HV بر حسب $d^{-0.5}$

۲-۹- تغییر شکل سرد و آنیل فولاد زنگ نزن آستنیتی

آستنیت در فولادهای زنگ نزن آستنیتی به صورت یک فاز نیمه پایدار است و در اثر تغییر شکل در زیر دمای M_d به فاز مارتنزیت تبدیل می شود. در ادامه فرایند تغییر شکل سرد، مارتنزیت تشکیل شده خرد می شود و مکان های مناسب جوانه زنی را برای برگشت مارتنزیت به آستنیت در حین عملیات آنیل بعدی

فراهم می‌کند و در نهایت منجر به ریزدانه‌گی آستنیت می‌شود. این عملیات، فرایند مارتنزیت نامیده می‌شود.

دو نوع مارتنزیت α' و ε در این فولادها تشکیل می‌گردد. مارتنزیت α' ترجیحا در محل برخورد بین صفحه‌های مارتنزیت ε با دوقلویی‌ها و مرزهای دانه تشکیل می‌شود. مارتنزیت ε همچنین می‌تواند حین سرد شدن تا دماهای پایین بدون تغییر شکل پلاستیکی شکل گیرد، در حالیکه برای تشکیل مارتنزیت α' تغییر شکل لازم است. حین تغییر شکل در دماهای کم، مارتنزیت ε زودتر از α' تشکیل می‌شود. مقدار ε با افزایش میزان تغییر شکل زیاد می‌شود و پس از رسیدن به یک ماکزیمم کاهش می‌یابد اما مقدار α' به طور مداوم با تغییر شکل افزایش می‌یابد [۳ و ۴].

۲-۱۰- استانداردهای کاربردی در راستای تولید فولاد 316LVM

فولاد زنگ‌نزن 316LVM برای ساخت کاشتنی‌های ارتوپدی به کار می‌رود و کاربردهایی از قبیل پروتز استخوان لگن و پیچ دارد. کاربرد گسترده این فولاد بیشتر به دلیل مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی مناسب آن برای کاربردهای پزشکی می‌باشد. با توجه به حساسیت‌های موجود در این زمینه کاری، استانداردهایی برای تولید و کاربرد این فولاد تدوین شده است که در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که در این جدول مشخص است، دو استاندارد مختلف برای مقاطع گرد و تخت این فولاد وجود دارد. در ادامه استاندارد مربوط به مقاطع گرد این فولاد (F138) مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۶ و ۱۷].

جدول ۳. نام و عنوان استانداردهای مرتبط با تولید و کاربرد فولاد 316LVM در حوزه تجهیزات پزشکی [۱۶ و ۱۷]

ردیف	استاندارد	عنوان
۱	ASTM F138	Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673)
۲	ASTM F139	Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Sheet and Strip for Surgical Implants (UNS S31673)

۲-۱۰-۱- بررسی استاندارد F138

۲-۱۰-۱-۱- مواد و روند ساخت

روند ساخت مقاطع گرد این فولاد پس از ریختگری شامل کار گرم، آنیل، کار سرد می‌باشد. در جدول ۴ خواص مکانیکی مورد نیاز برای این مقاطع پس از هر مرحله آورده شده است. محصول نهایی باید کار سرد شده است. کیفیت سطح نیز می‌تواند پس از سنگ‌زنی، پولیش شده یا ... بنا به سفارش مشتری باشد.

جدول ۴. خواص مکانیکی مورد نیاز مقاطع گرد فولاد 316LVM پس از مراحل مختلف تولید [۱۶]

شرایط	قطر (mm)	استحکام نهایی (MPa) (حداقل)	استحکام تسلیم (MPa) (حداقل)	ازدیاد طول* (%) (حداقل)	سختی** (HRC) (حداکثر)
کار گرم		-	-	-	۲۵۰
آنیل	۱/۶	۴۹۰	۱۹۰	۴۰	-
کار سرد	۱/۶ تا ۳۸/۱	۸۶۰	۶۹۰	۱۲	-
کار سرد مازاد	۱/۶ تا ۶/۳۵	۱۳۵۰	-	-	-
کار سرد برای سیم‌های نازک	کمتر از ۱/۶	۸۶۰ تا ۱۰۳۵	-	۵	-

* طول سنج (Gage length) باید حتما در نتیجه آزمون ذکر شود ($4D = 4 \times \text{diameter}$; $4W = 4 \times \text{width}$). همچنین در صورت توافق بین خریدار و تامین کننده می‌توان طول سنج را مطابق استانداردهای E8/E8M یا ISO6892 در نظر گرفت (۵/۶ برابر مساحت سطح مقطع نمونه).
** سختی سنجی برینل با بار ۳۰۰۰ Kgf

۲-۱۰-۱-۲- الزامات ترکیب شیمیایی

ترکیب شیمیایی مورد نیاز این فولاد که حاصل آنالیز حرارتی می‌باشد در جدول ۵ آورده شده است. آنالیز حرارتی باید مطابق با استاندارد A751 انجام شود. ترکیب شیمیایی فولاد 316LVM باید مطابق با استاندارد E354 اندازه‌گیری شود. محدوده مجاز اختلاف هر عنصر از میزان استاندارد ارائه شده توسط آنالیز حرارتی، مطابق با استاندارد E354 نیز در جدول ۵ گزارش شده است.

جدول ۵. ترکیب شیمیایی مورد نیاز مقاطع گرد و تخت به همراه محدوده مجاز اختلاف هر محصول نسبت به استاندارد [۱۶ و ۱۷]

عنصر	درصد وزنی	محدوده مجاز اختلاف	توضیحات
C	حداکثر ۰/۰۳	۰/۰۰۵	*مقادیر کروم و مولیبدن باید مطابق زیر باشد: $\% \text{Cr} + 3.3 \times \% \text{Mo} \geq 26.0$ ** نیاز به ارائه مقدار آهن نمی‌باشد.
Mn	حداکثر ۲	۰/۰۴	
P	حداکثر ۰/۰۲۵	۰/۰۰۵	
S	حداکثر ۰/۰۱۰	۰/۰۰۵	
Si	حداکثر ۰/۷۵	۰/۰۵	
Cr*	۱۷-۱۹	۰/۲۰	
Ni	۱۳-۱۵	۰/۱۵	
Mo*	۳ - ۲/۲۵	۰/۱۰	
N	حداکثر ۰/۱۰	۰/۰۱	
Co	حداکثر ۰/۵۰	۰/۰۳	
Fe**	باقیمانده	-	

۲-۱۰-۱-۳ - الزامات متالورژیکی

- در ریزساختار این فولاد با بزرگنمایی $100\times$ ، نباید فازهای دلتا فریت، چلی و سیگما^۱ مشاهده شود. متالوگرافی و حکاکی^۲ این فولاد باید مطابق با استاندارد E407 انجام شود.
- ساختار فولاد از نظر تمیزی^۳ باید توسط روش A استاندارد E45، بدون استفاده از صفحه I-r، بررسی گردد و میزان ناخالصی نباید از مقادیر ارائه شده در جدول ۶ تجاوز کند.

جدول ۶. مقادیر مجاز ناخالصی در ساختار فولاد اندازه‌گیری مطابق با استاندارد E45 [۱۶]

نوع ناخالصی	A - سولفید	B - آلومینا	C - سلیکات	D - اکسیدهای کروی
نازک (Thin)	۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱/۵
ضخیم (Heavy)	۱	۱	۱	۱

^۱Chi

^۲Sigma

^۳Etch

^۴Microcleanliness

۲-۱۰-۱-۴ - خواص مکانیکی

- خواص کششی

خواص کششی باید توسط آزمون کشش و مطابق استاندارد E8/E8M اندازه‌گیری شود. نتیجه باید با الزامات مطرح از نظر خواص مکانیکی مشخص شده در جدول ۴ مطابقت داشته باشد. میله و سیم در شرایط کار سرد شده می‌تواند با استحکام کششی بالاتر و ازدیاد طول کمتری مطابق با سفارش خرید عرضه شود.

حداقل یک تست کشش از هر محصول باید انجام شود. اگر الزامات مشخص شده برآورده نشد، برای هر قطعه آزمایشی ناموفق، باید دو قطعه دیگر که نماینده همان محصول هستند، به همان روش تحت آزمون قرار گیرد. در صورتی که نتیجه تمام آزمون‌ها الزامات مشخص شده را تأمین نماید، محصول مورد تأیید است. در آزمایش کشش، برای هر گونه شکست نمونه خارج از طول سنج در صورتی که حداقل ازدیاد طول مورد نظر حاصل شود، نتیجه آزمون قابل قبول در نظر گرفته می‌شود (مطابق استاندارد E8/E8M). اگر ازدیاد طول کمتر از حداقل نیاز باشد، آزمایش باید دوباره تکرار گردد.

- سختی

سختی‌سنجی باید مطابق استاندارد E10 یا E18 انجام شود. در صورتی که سطح مقطع نمونه کافی باشد، سختی‌سنجی باید در سطح مقطع نمونه و میان مرکز و سطح قطعه انجام شود. مقدار سختی فقط برای اطلاع است و نباید به عنوان مبنایی برای رد محصول استفاده شود.

۲-۱۰-۱-۵ - آزمون‌های ویژه

- محصولات با مقطع گرد و سیم‌ها باید مطابق با استاندارد A262 آزمون حساسیت خوردگی بین دانه‌ای را پشت سر بگذارند.

- نمونه‌ها در شرایط گرم کار باید قبل از آزمون مطابق با استاندارد A262، تحت عملیات حرارتی حساس‌سازی^۱ قرار گیرند.

- محصول باید دارای اندازه دانه ASTM ۵ یا ریزتر باشد. اندازه‌گیری اندازه دانه باید بعد از کار گرم یا بعد از آنیل نهایی و قبل از کارد سر نهایی باشد. اندازه‌گیری اندازه دانه پس از کار سرد نهایی باید یا با توافق با مشتری یا مطابق استاندارد E112 انجام شود [۱۲].

۲-۱۱- روش پیشنهادی جهت انجام ذوب و ریخته‌گری فولاد

۲-۱۱-۱- ذوب در کوره القایی

۲-۱۱-۱-۱- مقدمه و اهمیت فرآیند

گرید پزشکی از فولادهای زنگ‌زن مانند 316LVM، به طور گسترده‌ای برای تولید ایمپلنت‌های ارتوپدی و پروتزها استفاده می‌شود. این نوع از فولادهای زنگ‌زن در دسته «فولادهای بشدت تمیز» قرار می‌گیرد که با برخی از فرآیندهای خاص مانند ذوب القایی خلاء (VIM)، ذوب مجدد قوس خلاء (VAR) و تصفیه سرباره الکتریکی (ESR)، با کنترل بسیار بالای ترکیب شیمیایی تولید می‌شوند. استفاده از این فرآیندها و طراحی تکنیک مناسب ذوب و ریخته‌گری منجر به کاهش عناصر ناخالصی (یعنی S، O و H) و اجزاء غیرفلزی که حضورشان عامل افت مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی است، می‌شود [۱۸-۲۰].

در حین ذوب به روش ESR، در صورت کنترل و کاهش جدایش‌های میکروساختاری، آخال‌های اکسیدی و سولفیدی می‌توان عیوب ریخته‌گری، مانند حفره‌های انقباض و جدایش در مقیاس ماکرو حذف کرد. بر این اساس، جهت تولید فولاد 316 LVM و بمنظور جلوگیری از ایجاد عیوب فوق و یا کاهش آنها از فرآیندهایی مانند VAR و ESR استفاده می‌شود [۲۱-۲۳].

^۱Sensitization heat treatment

در مقایسه با فولاد 316L بعنوان گرید صنعتی فولادهای زنگ‌زن، مقدار درصد عناصر کروم و نیکل در فولادهای 316LVM به ترتیب تا رنج ۱۷-۱۹ درصد وزنی و ۱۳-۱۵ درصد وزنی و با هدف افزایش مقاومت به خوردگی، افزایش دارد. از طرفی این تفاوت احتمال جدایش ماکرو در شمش ریخته‌گری شده را افزایش می‌دهد [۲۴-۲۶].

فرآیند انجماد در شمش‌های ریخته‌گری شده که مذاب‌شان به روش ESR تولید می‌شود بصورت الگوهای ستونی و هم‌محور صورت می‌گیرد. آنالیز چنین ریزساختارهایی با اندازه‌گیری فاصله بازوی ثانویه آنها (SAS) انجام می‌شود. SAS مقداری است وابسته به پارامتر زمان انجماد موضعی Δt_s یا زمان مورد نیاز برای کاهش دما از دمای لیکوئیدوس به سالییدوس است. رابطه بین SAS یا d (در فرمول زیر) و Δt_s به صورت زیر آورده شده است [۲۷]:

$$\log d = k_1 + k_2 \log \Delta t_s$$

که در آن k_1 و k_2 عرض از مبدا و شیب منحنی هستند. Δt_s نیز با اندازه‌گیری نرخ انجماد تعیین می‌شود. این پارامتر مهم‌ترین عامل جهت پیش‌بینی ماکروساختار شمش پس از ذوب به روش تصفیه سرباره الکتریکی است [۲۸].

برخی از پارامترهای دیگر موثر بر فرآیند ذوب مجدد سرباره الکتریکی، مانند سرعت ذوب، ترکیب شیمیایی شمش، ترکیب شیمیایی سرباره و الگوی هدایت حرارتی تأثیر قابل توجهی بر میزان اکسیدزدایی شمش‌ها دارد. فرآیند حذف آخال‌های اکسیدی در نمک و حمام مذاب را به ترتیب با احیای شیمیایی و واکنش‌های شناورساز فیزیکی می‌توان انجام داد.

حمام نمک در روش ESR معمولاً از مقادیر مختلف Al_2O_3 ، CaO و CaF_2 تشکیل می‌شود.

۲- ۱۱-۱- ۲ - روش انجام فرآیند ذوب فولاد 316LVM

جهت ساخت شمش‌های اولیه، از آهن خالص، نیکل، فروکروم کم کربن و فرومولیبدن کم کربن بعنوان شارژ اولیه کوره القایی استفاده می‌شود. فرآیند آلیاژسازی تحت اتمسفر گاز خنثی (آرگون با خلوص بالا) انجام می‌شود. برای این منظور ابتدا مواد اولیه در کوره تحت گاز آرگون ذوب شدند و شمش‌هایی مطابق با ترکیب نشان داده شده در جدول ۷، بدست آمد. پس از آماده شدن شمش‌ها تحت گاز آرگون، همه آن‌ها تحت فرایند خلا در کوره VIM قرار گرفتند (جدول ۸). همان طور که دیده می‌شود تمامی نمونه‌ها پس از قرار گیری در کوره ذوب خلا، از مقدار اکسیژن و کربن آن‌ها کاسته شده است اما همچنان از مقدار استاندارد فولادهای 316LVM بیشتر است. بعلاوه اثر خاصی نیز در کاهش گوگرد و فسفر نیز ندارد. در کوره VIM، حذف اکسیژن از طریق تشکیل مونواکسید کربن صورت می‌گیرد و محصول ایجاد شده (CO) توسط پمپ خلا خارج می‌شود.

جدول ۷. ترکیب شیمیایی شمش‌های اولیه قبل از اکسیداسیون خلاء [۱۳].

	C	S	P	Ni	Cr	Mo	Al	O(ppm)
N1	0.095	0.015	0.01	13.12	17.83	2.38	0	428
N2	0.091	0.018	0.01	13.83	17.55	2.45	0	395
N3	0.087	0.011	0.01	13.05	18.22	2.44	0.02	78
N4	0.09	0.015	0.01	14.11	18.16	2.39	0.03	81
N5	0.081	0.017	0.01	14.26	17.74	2.53	0	388
N6	0.085	0.013	0.01	13.94	17.68	2.48	0	435

جدول ۸. ترکیب شیمیایی شمش های اکسید زدایی شده در خلاء [۱۳].

	C	S	P	Ni	Cr	Mo	Al	O(ppm)
N1	0.038	0.014	0.01	13.21	17.8	2.35	0	203
N2	0.022	0.017	0.01	13.74	17.54	2.41	0	195
N3	0.059	0.013	0.01	13.13	18.33	2.47	0.02	62
N4	0.063	0.015	0.01	14.2	18.3	2.43	0.03	68
N5	0.036	0.019	0.01	14.32	17.81	2.5	0	229
N6	0.031	0.012	0.01	13.88	17.59	2.41	0	276

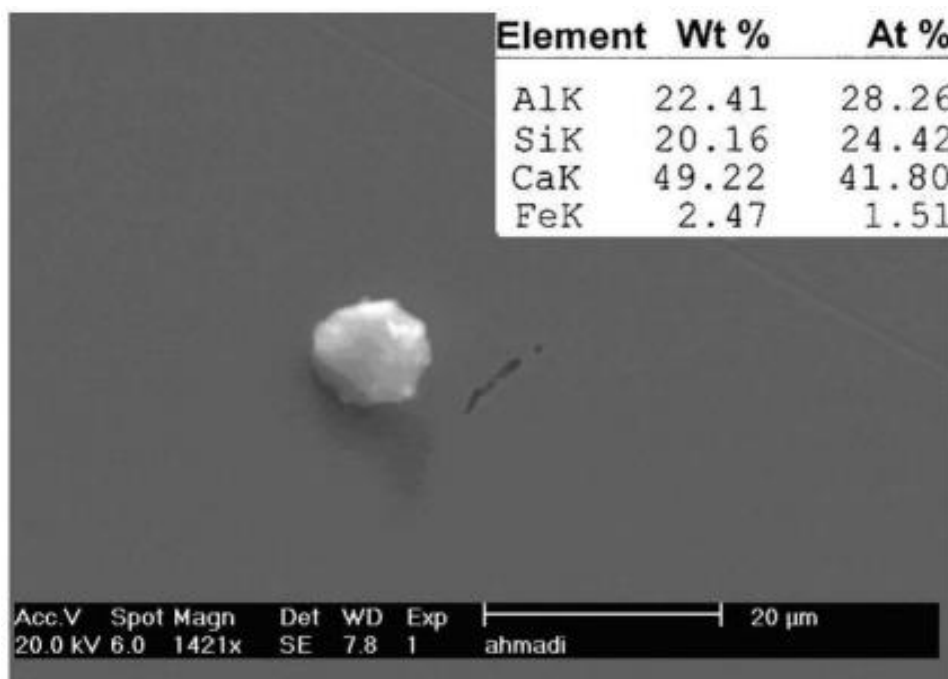
اکسیژن زدایی در خلاء برای فولاد زنگ نزن 316LVM کمتر از آهن خالص است زیرا عناصر آلیاژی مانند آلومینیوم، سیلیکون و کروم باعث کاهش اکسیداسیون در شرایط ذوب القایی خلاء می شوند. نتایج نشان می دهد که برای حصول بهترین نتیجه جهت اکسیژن زدایی، آلومینیوم نباید در شمش های اولیه (قبل از عملیات خلاء) وجود داشته باشد تا مانع واکنش C-O در مراحل اولیه اکسیداسیون نشود.

به منظور کاهش هرچه بیشتر اکسیژن و رساندن مقدار اکسیژن به مقادیر گفته شده در استاندارد، روش های مختلفی پیشنهاد می شود که در کار تحقیقاتی احمدی و همکاران [۱۳] از سه ماده مختلف: سیلیکون، آلومینیوم، آلومینیوم و سپس کلسیوم/سیلیکون استفاده گردید. برای این منظور ۵ شمش مختلف تست شد به گونه ای که، شمش N1 و N2 با سیلیکون، N3 و N4 با آلومینیوم و N5 و N6 با آلومینیوم و سپس کلسیوم/سیلیکون اکسیژن زدایی شدند. پس از عملیات اکسیژن زدایی، ترکیب شیمیایی شمش ها به صورتی که در جدول ۹ نشان داده شده است، تغییر کرد.

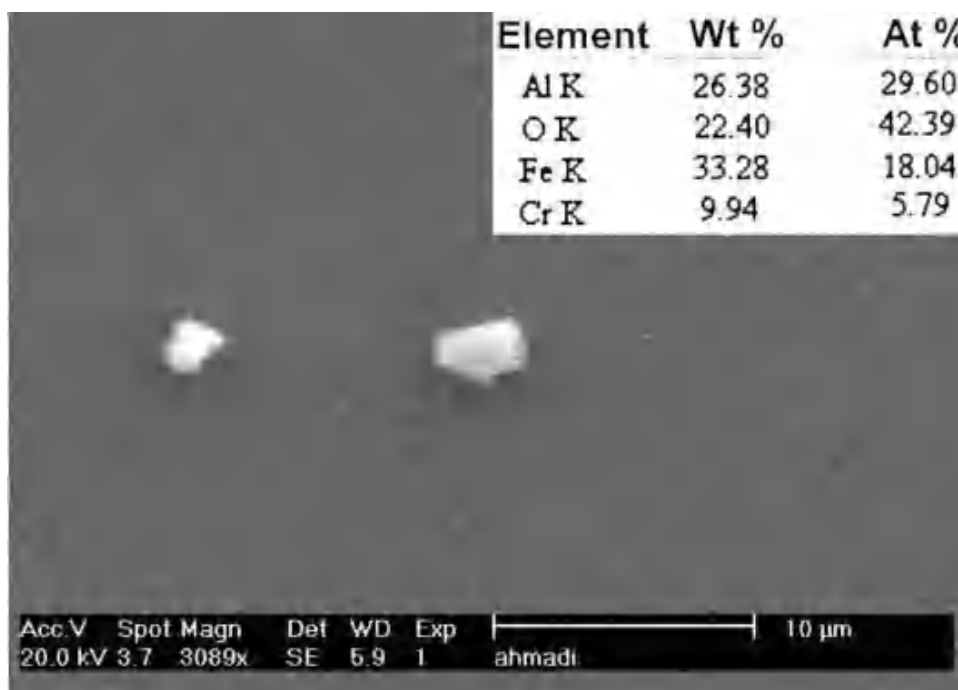
جدول ۹. ترکیب شیمیایی شمش ها پس از اکسیژن زدایی با Al, Si, Al-Ca/Si [۱۳].

	C	S	P	Ni	Cr	Mo	Al	O(ppm)	Ca	Si	Deoxidizer elements
N1	0.33	0.012	0.01	13.15	17.88	2.35	0	80	0	0.63	Deoxidized by Si
N2	0.23	0.015	0.01	13.8	17.59	2.43	0	51	0	0.59	
N3	0.052	0.014	0.01	13.1	18.35	2.41	0.02	13	0	0.09	Deoxidized by Al
N4	0.055	0.014	0.01	14.22	18.35	2.44	0.03	15	0	0.11	
N5	0.038	0.01	0.01	14.29	17.73	2.56	0	12	0.013	0.71	Deoxidized by Al, Ca/Si
N6	0.035	0.007	0.01	13.81	17.76	2.43	0	10	0.011	0.69	

استفاده از وایرهای آلومینیومی و سپس کلسیم-سیلیکونی منجر به کاهش اکسیژن تا ۱۰ ppm می شود که بهترین نتیجه را با خود به همراه داشته است. همچنین نقطه ذوب و اندازه کمپلکس های آلومینا-کلسیا-سیلیس بیشتر از آخال های آلومینا است که باعث جدا شدن راحت تر این ذرات توسط مکانیسم های شناورسازی مانند ذوب ESR می شود (شکل ۶ و ۷) [۲۹].



شکل ۶. تصویر SEM ناخالصی آلومینا-سیلیکا [۲۹].



شکل ۷. تصویر SEM ناخالصی آلومینا [۲۹].

مقادیر عناصر فلزی با استفاده از اسپکترومتر و عناصر غیرفلزی مانند اکسیژن، کربن و سولفید با استفاده از آنالیزور کربن-سولفید-گاز (CHONS) تعیین می‌شود. این عناصر را می‌توان با کمک روش CHONS پس از انجام عملیات در خلا و محیط گاز آرگون بدست آورد. روش کارآمد دیگر، فعال‌سازی و به دنبال آن طیف‌سنجی پرتوی γ است. تجزیه و تحلیل فعال‌سازی، بر اساس تابش با اشعه‌های γ ، نوترون‌ها یا ذرات باردار یک روش تحلیلی حساس است که برای عناصر غیر فلزی استفاده می‌شود. نوترون‌ها که با کمک راکتورهای هسته‌ای بدست می‌آیند، اغلب برای اهداف فعال‌سازی استفاده می‌شوند. برای تجزیه و تحلیل عناصر سبک (C, N, O) تابش فوتون نیز می‌تواند استفاده شود [۳۰، ۳۱].

سپس شمش وارد کوره ESR با سرباره‌ای حاوی CaO ، Al_2O_3 و CaF_2 که هر کدام یک سوم درصد وزنی سرباره را تشکیل می‌دهند، می‌شود. پیش از فرآیند ESR رطوبت زدایی در دمای 800°C انجام می‌شود. سپس شمش‌های اولیه با نرخ ذوب‌های مختلف ذوب می‌شوند (جدول ۴) تا اثر نرخ ذوب ریزی بررسی شود [۲۹].

استفاده از سرباره با مقادیر مساوی CaO ، Al_2O_3 و CaF_2 (یعنی هر یک دارای $\frac{1}{3}$ وزن کل سرباره) منجر به کاهش ۶۰ درصدی اکسیژن و ۷۰ درصدی گوگرد می شود درحالیکه سایر اجزای تشکیل دهنده آلیاژ (نیکل، کروم، مولیبدن و منگنز) ثابت باقی می ماند.

کاهش گوگرد در حین فرایند ESR با دو مکانیسم اتفاق می افتد: ۱. واکنش بین سرباره (به ویژه CaF_2) و آخال های سولفوریک و ۲. واکنش گوگرد با اکسیژن جو.

فرآیند یک یا دو مرحله ای اکسیژن زدایی با کمک فرایند ESR، اثرات قابل توجهی بر اندازه و تعداد آخال ها دارد. روش حذف آخال ها در فرایند ESR شامل شناور کردن آخال ها روی حمام مذاب، چسبیدن آخال ها به سرباره و واکنش شیمیایی بین سرباره و آخال ها می باشد. با توجه به این واقعیت که آخال های آلومینا دارای نقطه ذوب بالاتر، اندازه کوچکتر و پایداری بیشتری نسبت به آخال های آلومینا-کلسیا هستند، همیشه توصیه می شود قبل از انجام روش ESR، شمش های اولیه توسط افزودنی آلومینیوم به همراه کلسیوم/سیلیسیوم اکسیژن زدایی شوند و سپس وارد کوره ESR شوند زیرا از بین بردن این نوع آخال ها به مراتب راحت تر و امکان پذیرتر از آخال های آلومینایی می باشد (به خاطر نقطه ذوب بالا و اندازه کوچکشان) (جدول ۱۰) [۲۹].

جدول ۱۰. ابعاد ناخالصی ها در شمش 316LVM قبل و بعد از عملیات ESR [۲۹].

سطح ناخالصی / سطح نمونه	قطر میانگین (μm)	قطر کمینه (μm)	قطر بیشینه (μm)	ناخالصی شمش
۰٪/۲۵	۱۶	۶	۴۷	قبل از ESR
۰٪/۱۵	۱۳	۵	۳۶	بعد از ESR

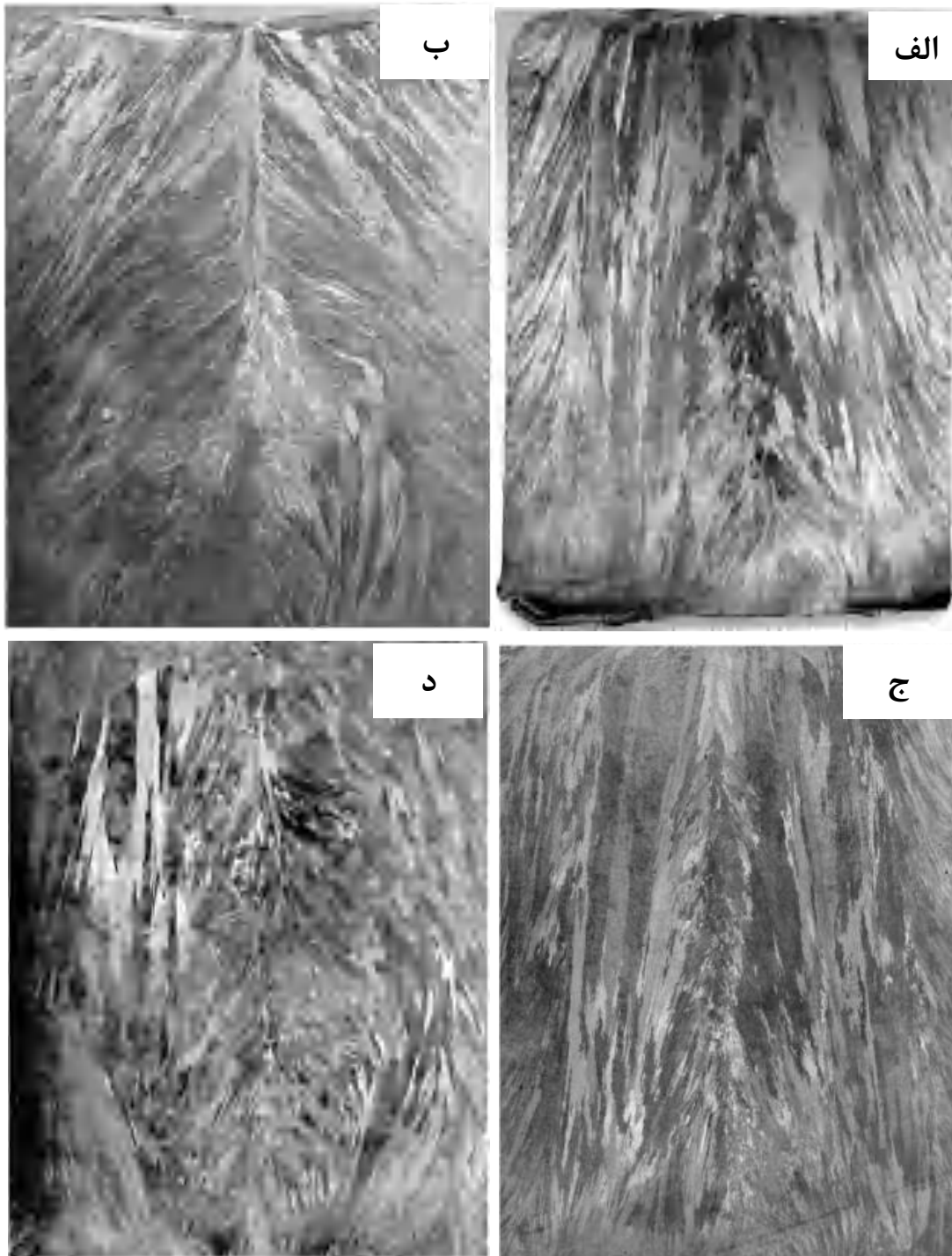
پارامتر موثر دیگر بر حذف آخال ها در نمونه های تحت ESR، نرخ ذوب می باشد. کاهش سرعت ریخته گری به تمیزی بیشتر شمش های فولادی 316LVM بعد از ESR کمک می کند. افزایش سرعت ریخته گری باعث عبور سریع قطرات مذاب از داخل حمام سرباره می شود و در نتیجه باعث کاهش قدرت حذف آخال ها می شود (شمش ES103 بهترین نتیجه را نشان می دهد) [۲۹].

جدول ۱۱. شرایط ذوب شمش ها در کوره ESR [۲۹].

نرخ ریخته گری (kg/min)	زمان ذوب شدن (min)	وزن (kg)	کد شمش
0.9	27.8	26.12	ES101
1.2	20	25	ES102
0.7	33.3	25	ES103
0.9	27	24.5	ES104

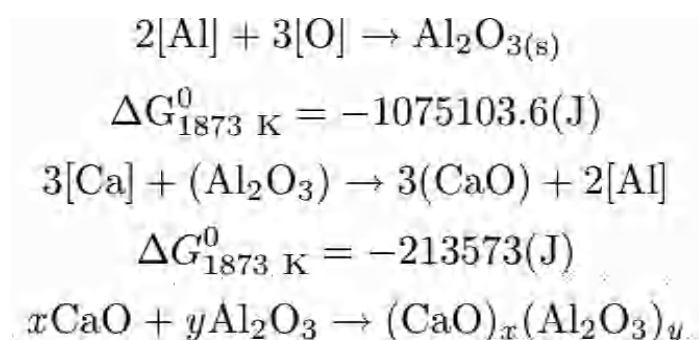
بررسی شمش های ریخته گری شده با نرخ ذوب ریزی مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. به طور کلی با افزایش سرعت ذوب کردن، دانه ها در جهت شعاعی رشد می کنند (۸ ب) در حالی که با کاهش سرعت ذوب، دانه ها در جهت عمودی رشد خواهند کرد (۸ ج).

تصاویر نشان می دهند که شکل کلی دانه ها در شمش های ES101، ES102 و ES103 ستونی است در حالی که شمش ES104 (۸ د) دارای دانه های کروی نزدیک به مرکز است. شمش ES104 از چهار الکتروود اولیه تشکیل شده بود که به یکدیگر جوش داده شده بودند و حفرات زیادی داشتند که در طی ریخته گری معمولی نقص ایجاد می کردند. پیش بینی می شود وجود این حفرات ممکن است باعث ایجاد نوساناتی در جریان و ولتاژ مورد استفاده در فرآیند ESR شده باشد که این می تواند دلیل اصلی توسعه برخی از مناطق دانه کروی در ساختار ستونی شمش ES104 باشد. در واقع، نوسان در جریان و ولتاژ می تواند باعث نوسان در سرعت ذوب شود که مهمترین پارامتر برای تغییر ماهیت الگوی دانه ها از عمودی به شعاعی و بالعکس می باشد [۲۹].

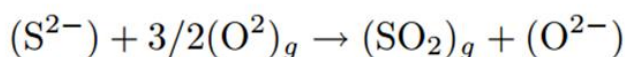
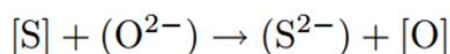


شکل ۸. تصاویر میکروسکوپی شمش های تولید شده تحت فرایند ESR [۲۹].

کنترل مقادیر گوگرد، فسفر و اکسیژن (با شرط رطوبت‌زدایی و چربی‌زدایی شارژ) بعنوان عوامل موثر بر کاهش خواص خوردگی و مکانیکی این دسته از فولادها نیازمند اعمال تکنیک‌های مناسب حین فرآیندهای ذوب است. حین اکسیژن‌زدایی از شمش‌های اولیه با وایر آلومینیوم یا کلسیم-سیلیکون، آخال‌هایی طبق واکنش‌های ۲-۴ ایجاد می‌شوند. طبعاً تعداد مراحل اکسیژن‌زدایی و نوع وایر اکسیژن‌زدا بر تعداد و مورفولوژی آخال‌های ایجادی موثر است.



اثر ترکیب سرباره الکتریکی در روش ESR بر میزان اکسیژن‌زدایی و گوگردزدایی از مقایسه آنالیز شمش قبل و پس از فرآیند تعیین می‌شود. کاهش گوگرد حین فرآیند ESR با دو مکانیسم صورت می‌گیرد: ۱- واکنش بین سرباره (بخصوص CaF_2) با آخال‌های سولفیدی و ۲- واکنش بین گوگرد با



اکسیژن موجود در اتمسفر ذوب. این واکنش‌ها بصورت زیر انجام می‌شوند:

حذف آخال‌ها در فرآیند ESR توسط حرکت چرخشی مذاب در زیر حمام سرباره تحت تاثیر قرار می‌گیرد. مکانیسم‌های اصلی برای کاهش آخال‌ها در حمام مذاب و سرباره شامل شناورسازی آخال‌ها روی حمام مذاب، چسبیدن آخال‌ها به سرباره و واکنش شیمیایی بین سرباره و آخال است.

علاوه بر گوگرد و اکسیژن، فسفر نیز عمدتاً یک ماده ناخواسته در فولاد ضدزنگ است. فسفر باعث کاهش انعطاف پذیری و چقرمگی فولاد در صورت زیاد بودن مقدار آن می‌شود. در حین انجماد، جدایش فسفر در مرزهای دانه منجر به تردی سرد می‌شود. دردهماهای پایین‌تر این پدیده حتی جدی‌تر است. در فولادسازی معمولی، فسفر با اکسید کردن آن به سرباره رفته و سپس با حذف سرباره، حذف می‌شود. در

تولید فولاد ضد رنگ این عمل به راحتی و بدون اکسیداسیون کروم قابل انجام نیست. امروزه مقدار کم فسفر در فولادهای تولیدی شرکت Sandvik با خرید قراضه فلزی تمیز به دست می‌آید. بمنظور دستیابی به حداکثر میزان فسفرزدایی کنترل عواملی چون دمای ماکزیمم فرآیند، ترکیب و بازیسیته سرباره در فرآیند ESR و ... موثر است [۳۲، ۳۳].

۲-۱۱-۱-۳ - ذوب در کوره تحت اتمسفر خلاء یا گاز خنثی

بسیاری از آلیاژها با حساسیت ویژه در ترکیب شیمیایی و سوپرآلیاژهای پیچیده مانند تیتانیوم و نیکل که در صنعت هوافضا استفاده می‌شوند با اکسیژن یا نیتروژن اتمسفر واکنش نشان می‌دهند. ذوب این آلیاژها در خلاء، در فضای بدون اکسیژن، تشکیل اکسیدهای غیرفلزی و نیتrideها را در فلز محدود می‌کند.

بدون این فرآیند، تولید و ریخته‌گری بسیاری از قطعات پیچیده‌ی آلیاژی و سوپرآلیاژی بسیار دشوار یا غیرممکن خواهد بود. آلیاژهای ذوب شده در خلاء معمولاً در قالب‌های ریخته‌گری دقیق که در داخل محفظه خلاء یا در محفظه‌ای مجاور کوره خلاء قرار می‌گیرند، ریخته می‌شوند.

مزایای ذوب خلاء عبارتند از:

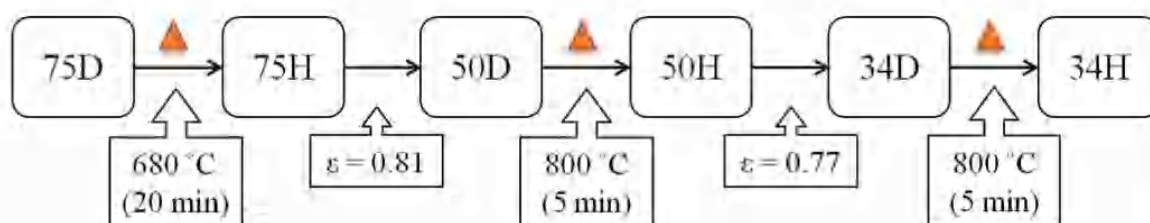
- تلفات کم عناصر آلیاژی در اثر اکسیداسیون؛
- تحمل ترکیبی بسیار نزدیک؛
- کنترل دقیق دما؛
- سطح پایین آلودگی محیط زیست؛
- حذف عناصر کمیاب ناخواسته با فشار بخار بالا؛
- حذف گازهای محلول مانند هیدروژن و نیتروژن.

۱۲-۲- شکل دهی گرم فولاد زنگ نزن 316LVM

برای شکل پذیری گرم فولاد 316 و 316L، دمای کاری ۹۲۷ – ۱۲۰۴ درجه سانتیگراد توصیه شده است. برای رسیدن به حداکثر مقاومت به خوردگی، دمای آنیل حداقل ۱۰۳۸ درجه سانتیگراد و سپس کویینچ در آب یا سرد کردن سریع با سایر روش‌ها پس از کار گرم [34].

Huang و همکارانش در سال ۲۰۱۸ فایبرهایی از جنس 316L با قطر چند ده میکرون (۳۴-۷۵ میکرومتر) به روش کشش چند پاسه همراه با عملیات حرارتی‌هایی در میان پاس‌ها تولید و خواص مکانیکی و خوردگی آنها را بررسی نمودند. یکنواختی توزیع بافت در جهت شعاعی فایبرها مهم است. در مورد این فولاد، استحاله مارتنزیتی، تشکیل دوقلوبی‌ها و لغزش نابجایی‌ها در طول تغییر فرم نقش مهمی را در خواص ایفا می‌کند. دوقلوبی‌ها و استحاله مارتنزیتی بستگی به SFE دارند. در SFE متوسط یعنی ۴۰-۶۰ mJ/m^2 دوقلوبی محتمل‌تر از استحاله مارتنزیتی است. اگرچه در تغییر فرم‌های شدید این فولاد، هر دو مشاهده شده‌اند. فعال سازی دوقلوبی تغییر فرم یک روش بسیار کارآمد برای اصلاح ریزساختارها و افزایش استحکام و انعطاف پذیری است.

شکل ۹ شماتیک فرآیند کشش انجام شده را نشان می‌دهد. اعداد قطر فایبر را بیان می‌کند و حروف D و H عملیات کشش و عملیات حرارتی را نشان می‌دهد.

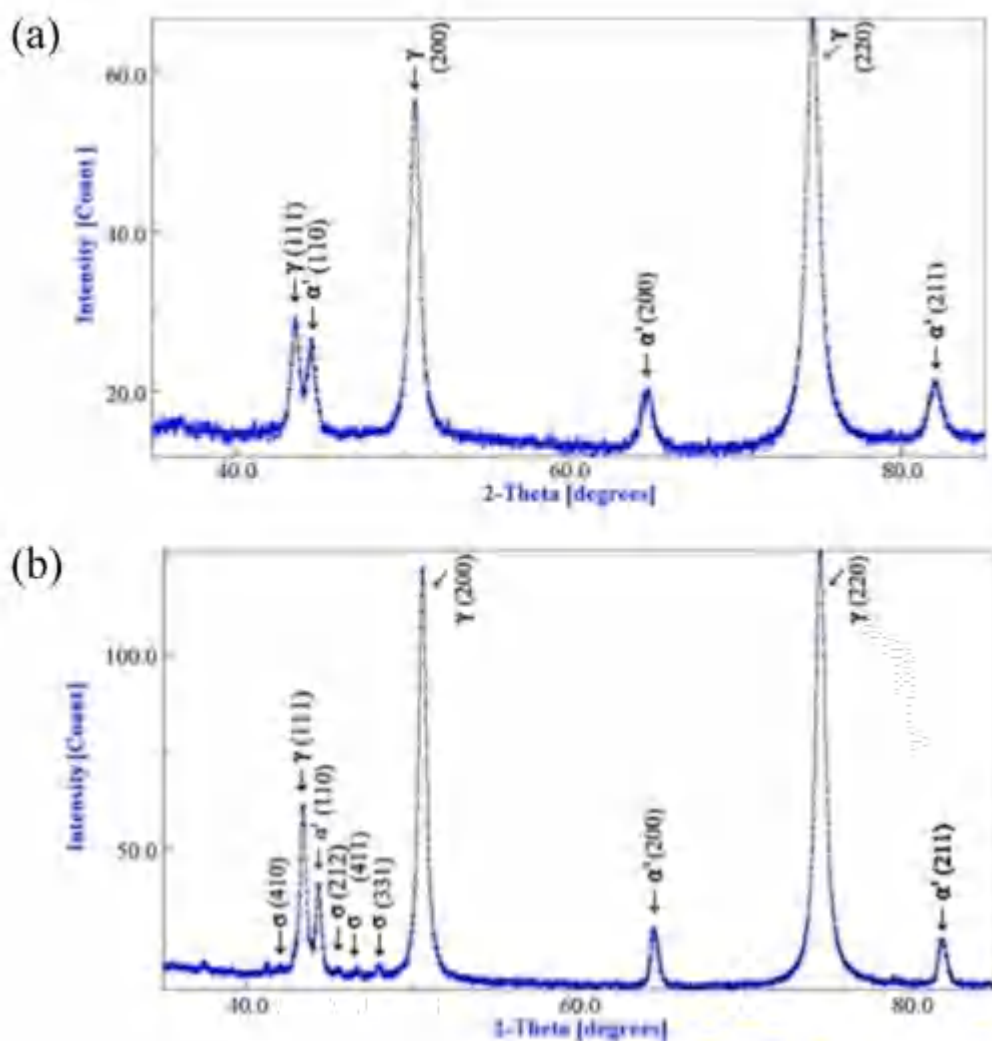


شکل ۹: مراحل فرآیند کشش سیم.

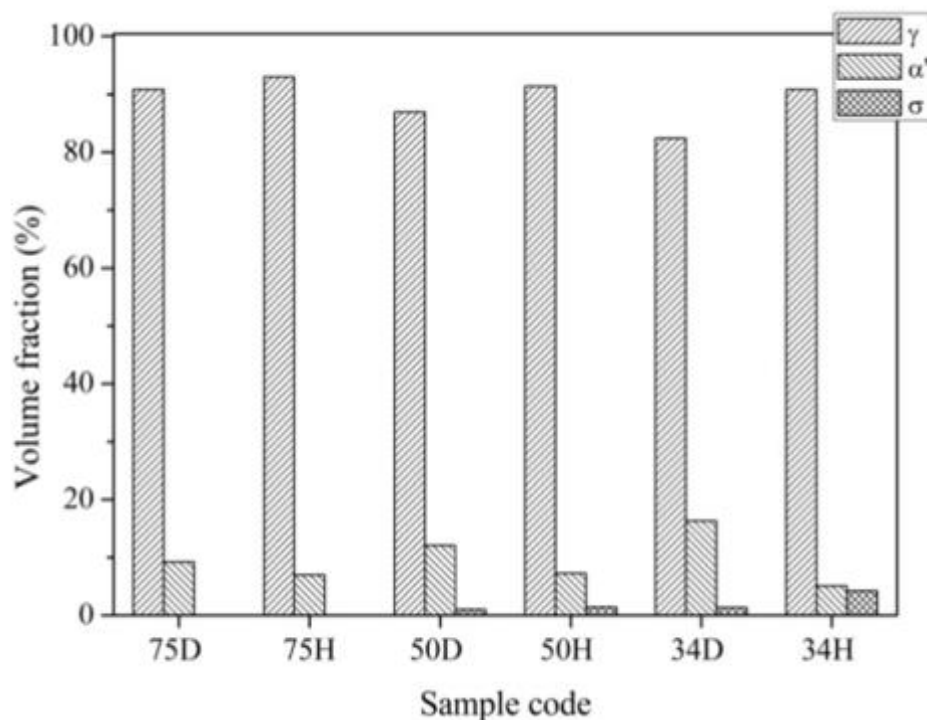
آنالیز XRD فایبرهای 75D/H در شکل ۲ نشان داده شده است. برای 75D پیک‌های فاز آستنیت γ و مارتنزیت α' قابل تشخیص است. پس از عملیات حرارتی کماکان پیک‌های آستنیت و α نشان داده می‌شود. همچنین چهار پیک فاز سیگمای بین فلزی نیز در شکل ۱۰-b دیده می‌شود.

شکل ۱۱ کسر حجمی هر سه فاز را برای شش نمونه نشان می‌دهد. کسر حجمی مارتنزیت نمونه‌ای از قبل کشیده شده با کاهش قطر فایبر افزایش یافته است. پس از عملیات حرارتی کسر حجمی فاز سیگما با کاهش قطر فایبر به آرامی افزایش یافته است. مطابق مطالعات پیشین، رسوب فاز سیگما نیازمند صدها یا حتی هزاران ساعت است و کسر حجمی آن کمتر از ۵ درصد می‌باشد. این فاز پیوستگی کمی با

آستنیت دارد و در نتیجه مقاومت به خوردگی را با حذف کروم و مولیبدن از زمینه آستنیت کاهش می‌دهد. بنابراین فاز سیگما یک فاز نامطلوب برای این نوع فولادهاست.



شکل ۱۰: آنالیز فازی xrd برای (a) 75D و (b) 75H



شکل ۱۱: کسر حجمی فازهای موجود در فایبرهای 316L (کسر حجمی فاز سیگما در نمونه 75H بسیار کوچک است).

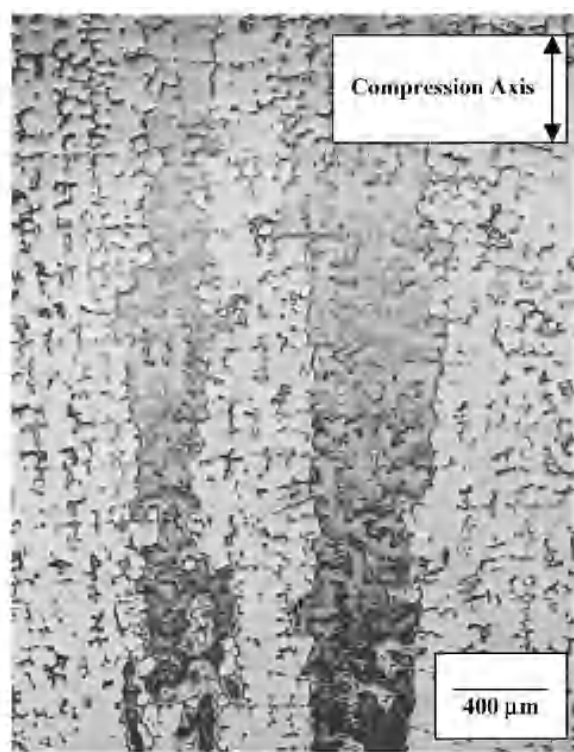
Nakada و همکارانش گزارش کرده‌اند که مقدار مارتنزیت ناشی از تغییر فرم در سیم کشش سرد شده بیشتر از ورق نورد شده تحت کرنش یکسان می‌باشد. این پدیده به ریزساختارهای تغییر شکل متفاوت ناشی از مسیرهای تغییر شکل متفاوت نسبت داده شد. با این حال، اندازه دانه اولیه نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. مقادیر کمتری از مارتنزیت ناشی از تغییر شکل در فولادهای زنگ نزن آستنیتی ریزدانه تشکیل شد که به کاهش تعداد مکان‌های هسته‌زایی در تقاطع‌های نوار برشی نسبت داده شد. در این شرایط، اعتقاد بر این بود که تشکیل مارتنزیت توسط دوقلوسازی تسهیل می‌شود. بر این اساس، دوقلوها در حین تشکیل بر روی انطباق کرنش، اصلاح ریزساختار، تکامل بافت و هسته‌زایی مارتنزیت در فایبرهای 316L تأثیر مهمی می‌گذارند.

مارتین و همکارانش رفتار فشار گرم فولاد 316L ریخته‌گری شده را بررسی کردند. شکل ۱۲ ریزساختار نمونه ریخته‌گری شده را با میکروسکوپ نوری نشان می‌دهد. جهت آزمون فشار در جهت دانه‌های ستونی است. شکل ۱۲-a مورفولوژی ورمیکولار فریت دلتا (فاز تیره در شکل) در این نمونه نشان می‌دهد. شکل ۱۲-b ماهیت وجه دار بودن فاز دلتا را نشان می‌دهد که فصل مشترک شبه همدوس با آستنیت زمینه دارد.

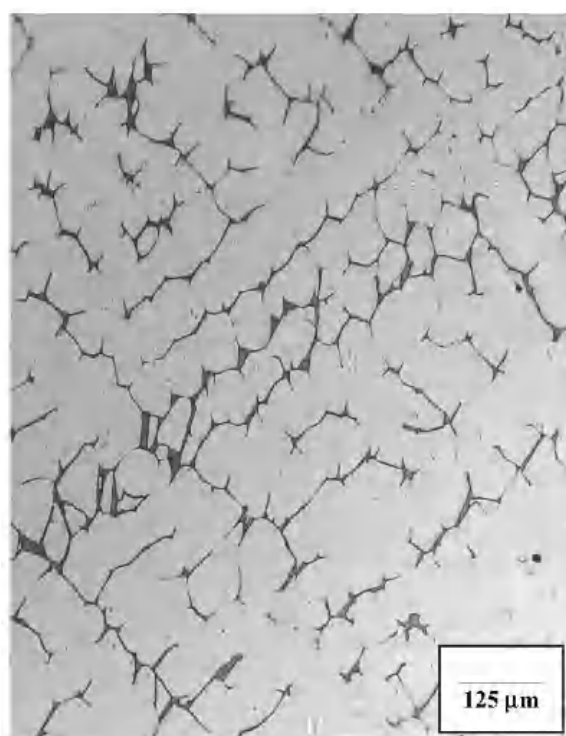
نمونه‌های تست فشار برای دستیابی به فریت پایدار، به مدت یک ساعت تحت عملیات حرارتی بین ۹۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند و سپس در آب کوئینچ شدند. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که

گرمایش مجدد تأثیری بر مقدار سیگما نداشته است و در بالاترین دمای عملیات حرارتی کروی شدن رخ داده است. از این رو، نمونه‌های آزمون فشار در زمان تقریبی ۵ دقیقه به دمای آزمون رسیده‌اند و در چهار دمای 1000 °C, 1050 °C, 1100 °C, 1150 °C آزمون انجام شده است (تا از تغییر شکل فاز سیگما جلوگیری شود).

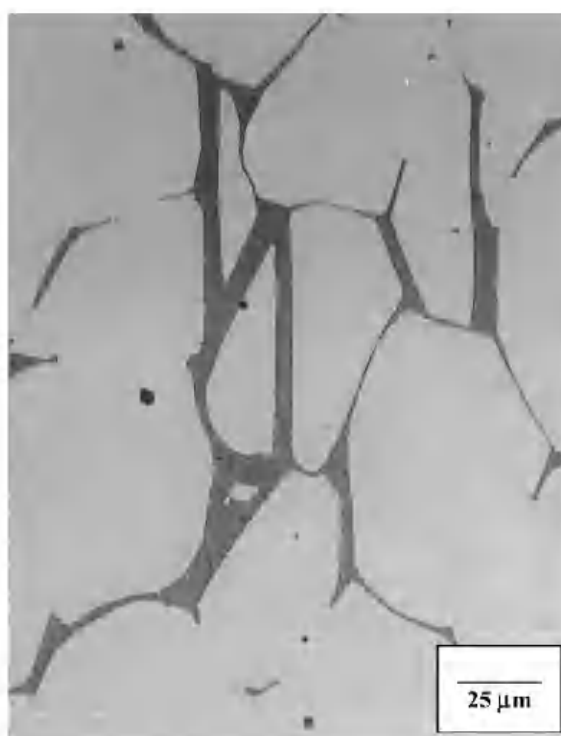
شکل ۱۳ پیشرفت تبلور مجدد را با گذشت زمان برای 316L ریخته‌گری شده که تحت آزمون فشار تا کرنش 0.5 در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد قرار گرفته است، نشان می‌دهد. تبلور مجدد در عرض ۲ ثانیه پس از تغییر فرم در مرزدانه‌ها شکل گرفته است. همانطور که مشخص می‌باشد جوانه زنی تبلور مجدد در سیگما از تصویر a تا d کروی شدن این فاز را با زمان نشان می‌دهد. و شکل c و d سنجاق شدن مرزدانه‌های تبلور مجدد را توسط فاز سیگما مشخص می‌کند.



شکل ۱۲: تصویر میکروسکوپ نوری از دانه‌های ستونی نمونه 316L ریخته‌گری شده.



(a)



(b)

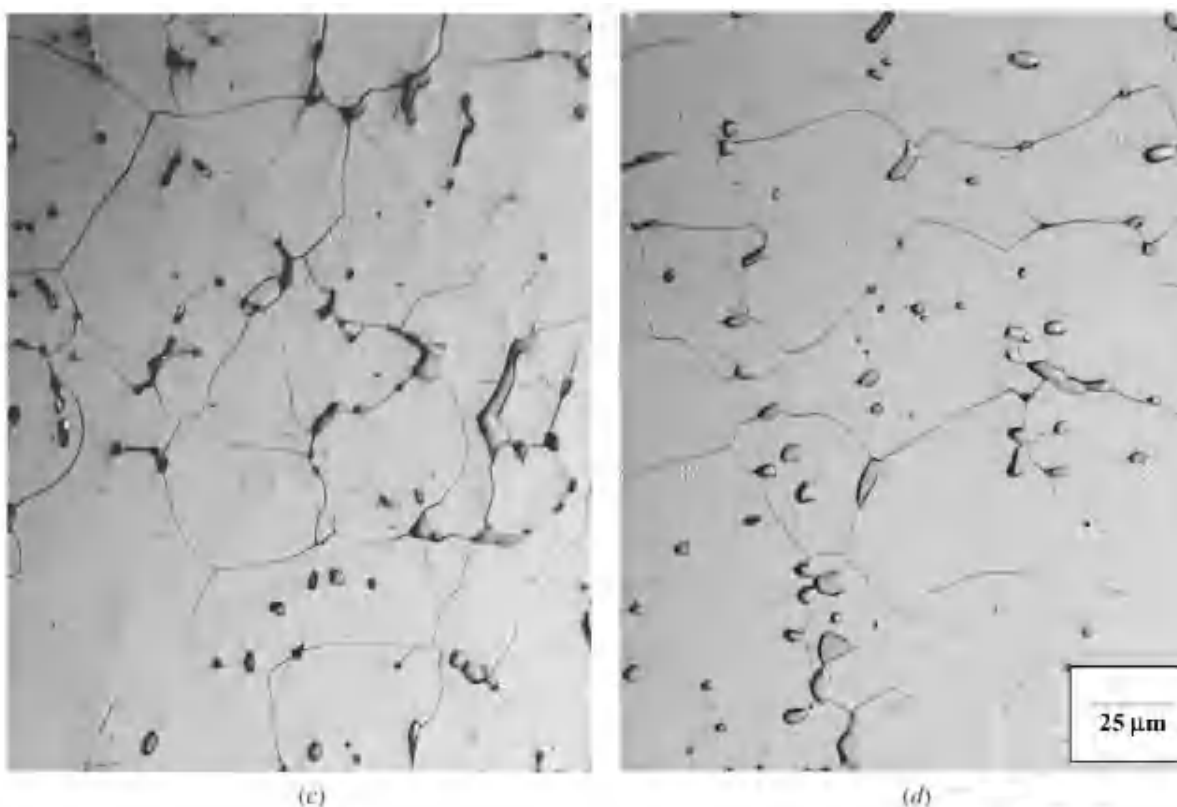
شکل ۱۳: ریزساختار 316L (a) فاز ورمیکولار δ و (b) وجوه صاف سگمنتهای سیگما که دلالت بر وجود یک رابطه آرایشی بین دلتا و آستنیت دارد.



(a)



(b)

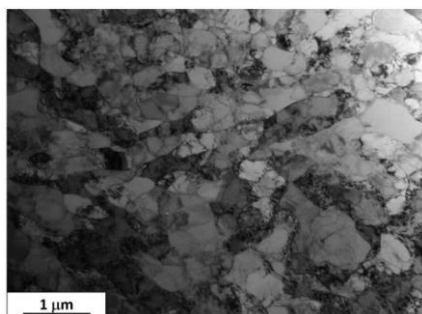


شکل ۱۴: تبلور مجدد پس از کرنش 0.5 در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتیگراد برای مدت زمان ماندگاری (a) ۲ ثانیه، (b) ۳۶ ثانیه، (c) ۳۶۰ ثانیه و (d) ۳۶۰۰ ثانیه.

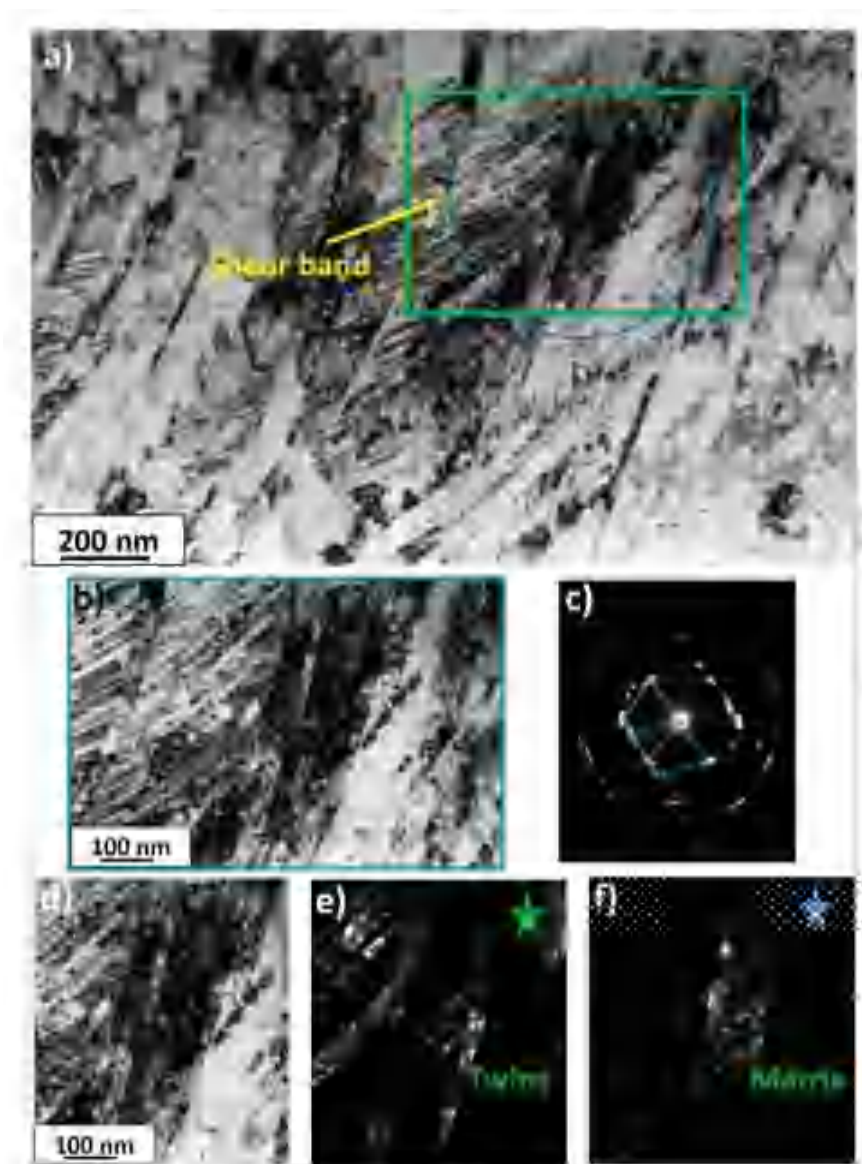
Krawczynska و همکارانش خواص مکانیکی و خوردگی فولاد 316LVM که با فرآیند اکستروژن هیدرواستاتیک ریزدانه شده مورد بررسی قرار دادند. از فولاد تجاری 316LVM آنیل شده با اندازه دانه اولیه ۳۰ میکرون استفاده شده است. برای ریزدانه کردن تا مقیاس نانو، فرایند اکستروژن هیدرواستاتیک در دو حالت گرم و در دمای اتاق انجام شده است.

نتایج نشان می دهد که پس از اکستروژن گرم، دیواره های از جنگلهای نابجایی تشکیل شده است در حالیکه در اکستروژن دمای محیط، دوقلویی هایی با عرض های مختلف و باندهای برشی ایجاد گردیده است.

شکل ۱۵ ریزساختار نمونه کار گرم را نشان می دهد که شامل دانه های فرعی است. مشاهدات TEM این نمونه ثابت می کند دانه های فرعی قطری معادل ۴۵۰ میکرون دارند. شکل ۱۶، نانودوقلویی ها و باندهای برشی با عرض تقریبی ۲۰-۵۰ نانومتر را برای نمونه کار سرد شده نشان می دهد.

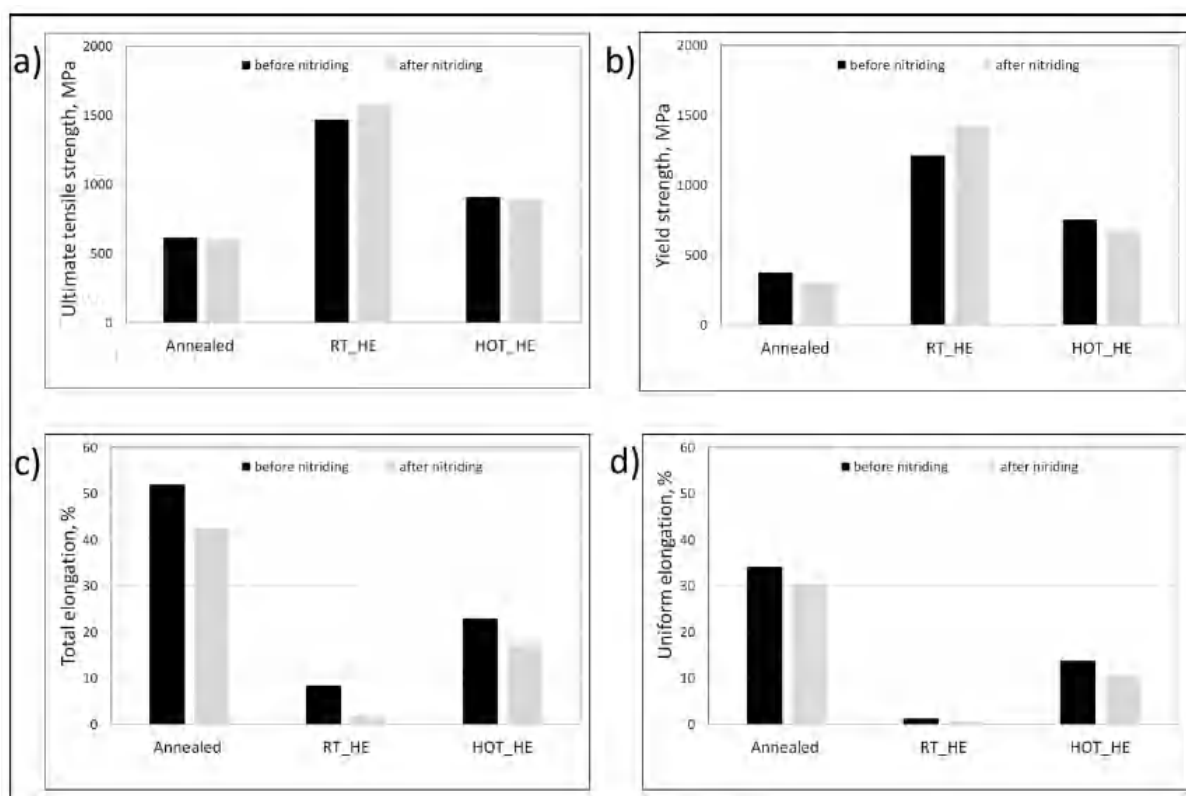


شکل ۱۵: ریزساختار نمونه اکسترود در حالت گرم که شامل دانه های فرعی می شود.



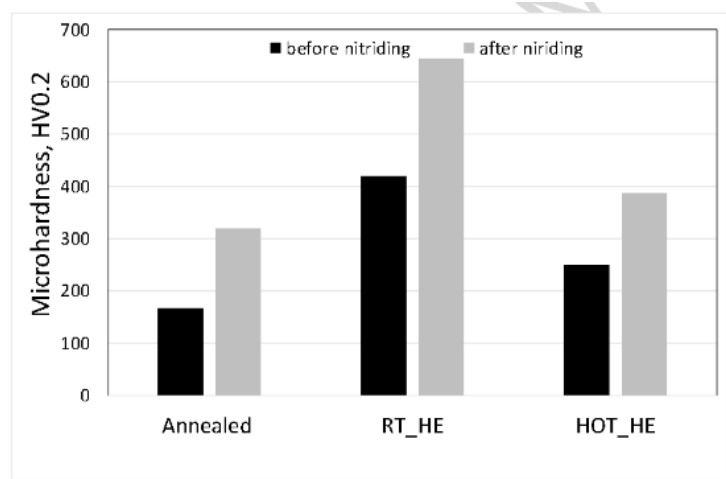
شکل ۱۶: (a) ریزساختار نمونه اکسترود شده در دمای اتاق شامل نانو دوقلویی ها و باندهای برشی. (b) نواحی نانودوقلویی ها در بزرگنمایی بالا، (c) الگوی تفرق متناظر با ناحیه دایره ای تصویر (a, d) تصویر میدان روشن از نانو دوقلویی ها و زمینه، (e) تصویر میدان تیره در جهت $[011]$ نانودوقلویی ها و (f) تصویر میدان تیره در جهت $[011]$ زمینه.

مطابق این کار، اکستروژن هیدرواستاتیک همچنین یک روش کارآمد برای ایجاد مقاومت در برابر خوردگی و خواص مکانیکی فولاد ضد زنگ ۳۱۶ LVM معرفی شده است. اکستروژن هیدرواستاتیک در دمای اتاق منجر به یک ماده فوق العاده با مقاومت با شکل پذیری محدود اما کافی شد. اکستروژن هیدرواستاتیکی که در دمای بالا انجام شد، به ماده ای با ترکیب بسیار خوبی از استحکام (تقریباً ۹۰۰ مگاپاسکال) و شکل پذیری (ازدیاد طول تا شکست بیش از ۲۰ درصد) منجر شد (شکل ۱۷).



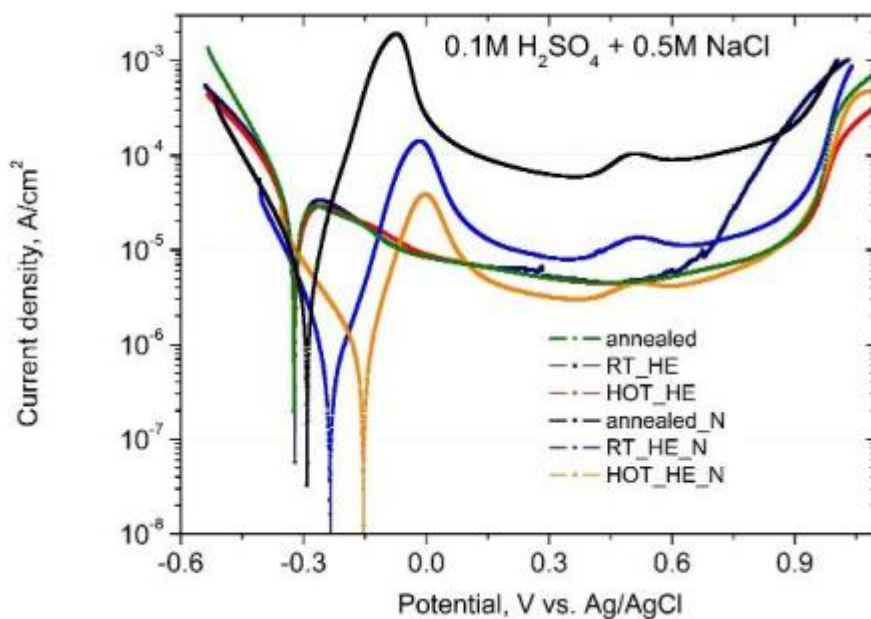
شکل ۱۷: خواص مکانیکی: (a) استحکام کششی نهایی، (b) استحکام تسلیم، (c) ازدیاد طول کلی، (d) ازدیاد طول یکنواخت. برای نمونه های آنیل شده، اکستروژن گرم و اکستروژن سرد شده قبل و بعد از فرآیند نیتريدینگ.

شکل ۱۸ نتایج سختی نمونه ها را گزارش می دهد. نمونه اکستروود سرد بیشترین سختی را داراست.



شکل ۱۸: میکروسختی نمونه ها.

هر دو فولاد اکستروود شده هیدرواستاتیک رفتار پسیو خوبی در محلول 0.1 مولار اسید سولفوریک حفظ کردند. در حضور یون های کلرید، حساسیت به حمله موضعی برای فولاد اکستروود شده در دمای اتاق افزایش یافت، اما برای فولاد اکستروود شده گرم تغییری نکرد (شکل ۱۹).



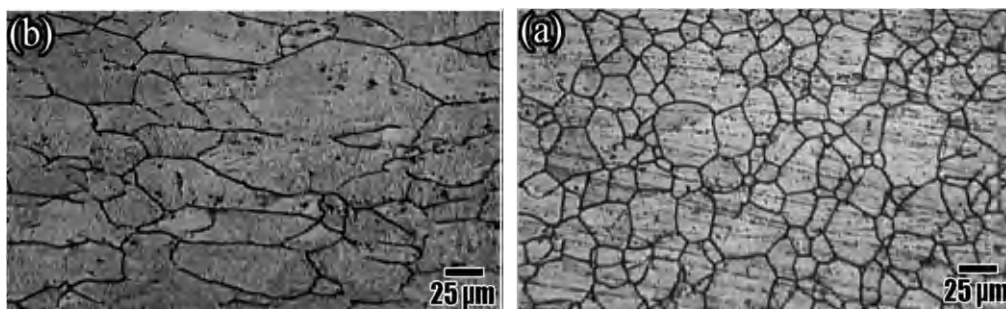
شکل ۱۹: منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک برای نمونه 316LVM آنیل شده و پس از اکستروود در دمای اتاق و اکستروود در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد.

۱۳-۲- استحکام بخشی به روش کار سرد فولاد 316LVM

فولادهای زنگ نزن آستنیتی به طور گسترده‌ای در کاربردهای مختلف استفاده می‌شوند که کارپذیری خوب و مقاومت در برابر خوردگی مطلوبی را دارا می‌باشند. با این حال، فولادهای زنگ نزن آستنیتی کار گرم شده با ریزساختارهای تبلور مجدد یافته دارای یک نقطه ضعف مشترک یعنی استحکام تسلیم می‌باشند. استحکام تسلیم این فولادها را می‌توان به طور قابل توجهی با کار سرد، به عنوان مثال، تغییر شکل پلاستیک در دمای محیط، افزایش داد. در میان روش‌های مختلف تغییر شکل سرد، نورد سرد کارآمدترین روش برای تولید محصولات فولادهای زنگ نزن آستنیتی است. تاکنون بکارگیری نورد سرد منجر به توسعه فولادهای زنگ نزن با استحکام تسلیم بالای ۱۵۰۰ مگاپاسکال شده است. فولادهای زنگ نزن آستنیتی معمولاً دارای انرژی خطای چیدمان نسبتاً کم (SFE) می‌باشند. بنابراین، در حین کار سرد دوقلویی‌های تغییر شکل در این مواد تشکیل می‌شود [۳۵].

مطالعات زیادی در مورد تاثیر کار سرد بر رفتار ساختاری و مکانیکی فولادهای زنگ نزن آستنیتی انجام شده است. باوسینگ^۱ و همکاران [۳۶] گزارش کردند که افزایش درصد کار سرد، استحکام و سختی را با کاهش شکل‌پذیری افزایش می‌دهد. تشکیل مارتنزیت ناشی از کرنش (α') در فولادهای زنگ نزن آستنیتی ناپایدار در طی نورد سرد، منجر به افزایش قابل توجهی در استحکام آنها می‌شود. تشکیل و مقدار این مارتنزیت تشکیل شده ناشی از کرنش به پایداری آستنیت (ترکیب شیمیایی و اندازه دانه اولیه آستنیت) و شرایط نورد (مقدار تغییر شکل، دما و سرعت نورد) بستگی دارد. هنگامی که پایداری آستنیت و دمای تغییر شکل پایین است، یا مقدار تغییر شکل زیاد باشد، میزان مارتنزیت تشکیل شده افزایش می‌یابد [۳۷].

در پژوهش نقی‌زاده و همکاران [۳۸]، قطعاتی از فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ تجاری پس از آماده سازی به ابعاد مدنظر با اندازه دانه حدودی ۱۴ میکرومتر، پس از چند ساعت غوطه‌وری در آب و یخ، تحت نورد سرد به صورت چند پاسی به میزان ۵، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد کاهش سطح مقطع، قرار گرفتند. به منظور مطالعه تاثیر عملیات حرارتی بر ساختار پس از کار مکانیکی، قطعات با ۷۰ درصد کاهش سطح مقطع پس از نورد سرد در دماهای 750°C و 1000°C با زمان‌های مخلف تحت عملیات آنیل قرار گرفتند. شکل ۲۰-الف، ریزساختار نمونه دریافتی، که در آن دانه‌های آستنیت قابل مشاهده است را نشان می‌دهد. کشیدگی دانه‌های آستنیت به دلیل تغییر شکل پلاستیک در ریزساختار نمونه‌ها پس از ۷۰ درصد نورد سرد، در شکل ۲۰-ب مشاهده می‌شود. با استفاده از محلول حکاکی (اچ) مناسب (0.1 g Na₂S₂O₅—10 ml) ، وجود مارتنزیت را به عنوان یک فاز تیره در ریزساختار نمونه‌ها پس از ۷۰ درصد نورد سرد می‌توان مشاهده کرد (شکل ۲۰-ج) [۳۹].



ب

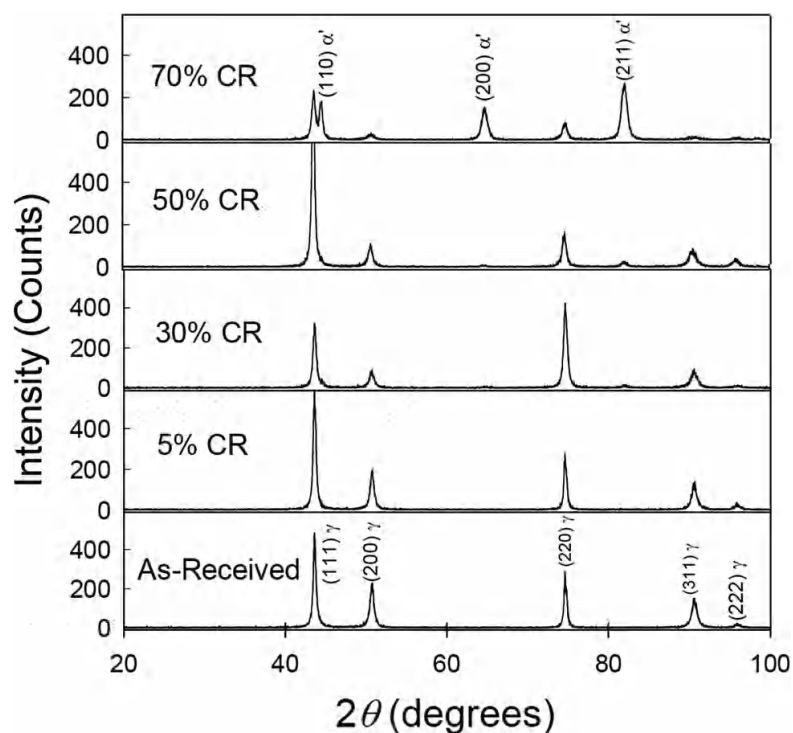
الف



ج

شکل ۲۰- الف) ریزساختار فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ دریافتی، ب) ریزساختار فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ پس از ۷۰ درصد کار سرد و ج) ریزساختار فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ پس از ۷۰ درصد کار سرد که مناطق تیره فاز مارتنزیت را نشان می‌دهد [۳۹].

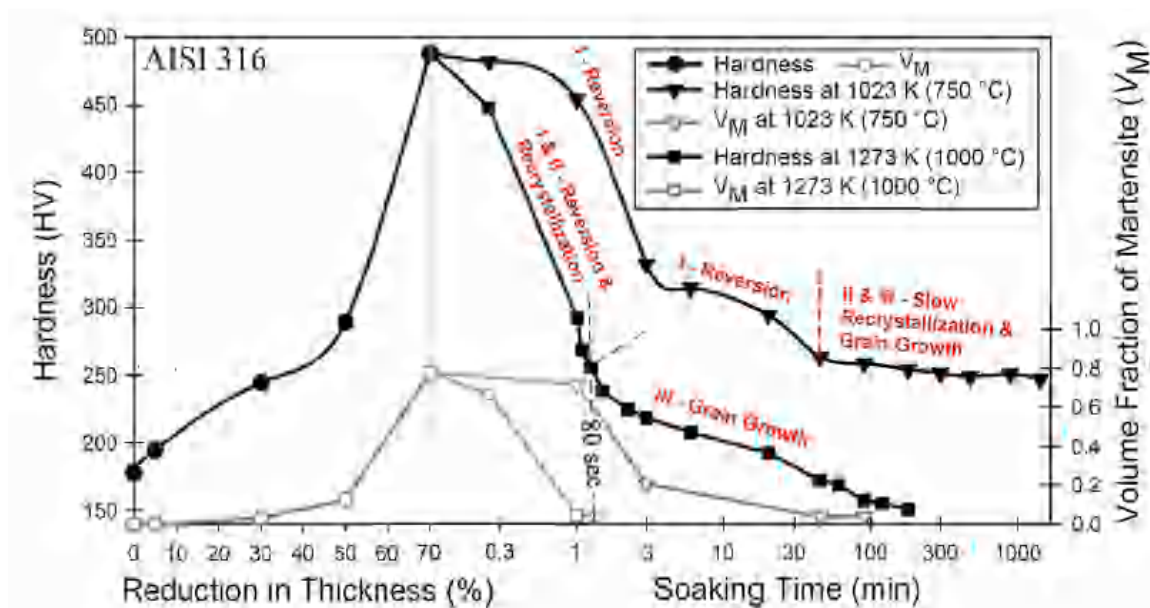
به منظور بررسی بیشتر و دنبال کردن فاز مارتنزیت در ساختار، آزمون XRD انجام شد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نمونه دریافتی و نمونه‌های کار سرد شده تا میزان ۳۰٪ به صورت تک فاز آستنیتی می‌باشند. افزایش میزان کار سرد از ۳۰ به ۷۰ درصد، به صورت کلی منجر به کاهش شدت پیک‌های مربوط به فاز آستنیت و افزایش شدت پیک‌های مربوط به فاز مارتنزیت به طور مثال پیک (۲۱۱) می‌شود. تغییر شکل پلاستیک آستنیت انرژی لازم برای جوانه‌زایی فاز مارتنزیت را تامین خواهد کرد. این موضوع در کنار تاثیر کرنش در تشکیل مارتنزیت عوامل اصلی تشکیل این فاز در حین کار سرد می‌باشد. البته به نظر می‌رسد که یک حداقل میزان کرنش (به طور مثال کرنش معادل ۳۰ درصد کار سرد بر روی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶) برای تشکیل مارتنزیت در حین تغییر شکل لازم است [۳۹].



شکل ۲۱- الگوی پراش نمونه‌های فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ برای نمونه دریافتی و نمونه‌های کار سرد شده [۳۹].

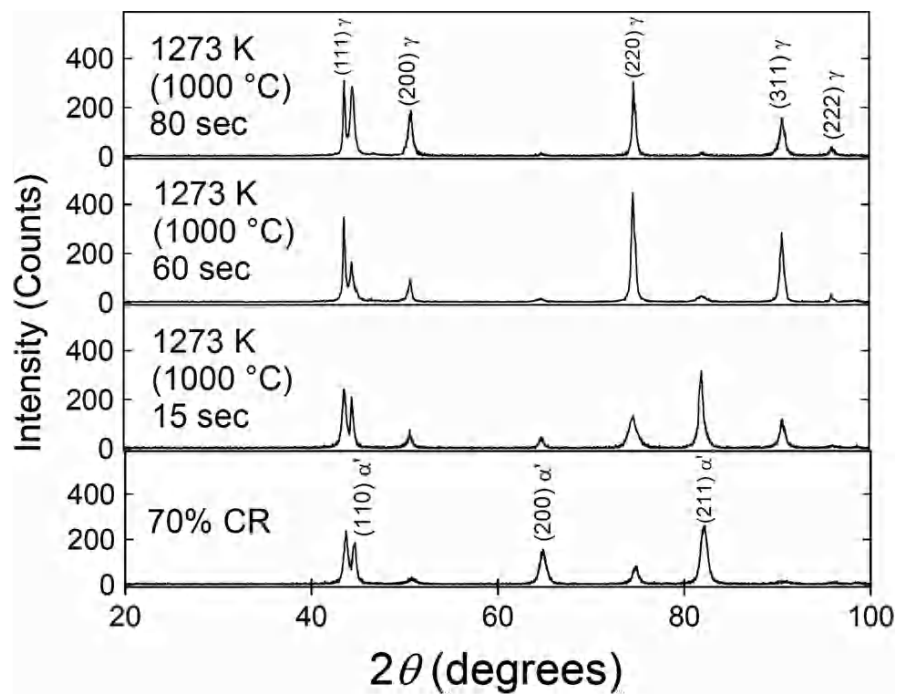
پس از اندازه‌گیری کمی میزان فاز مارتنزیت با توجه به الگوی پراش حاصل شده و مطابق با فرمول ۱، مشاهده می‌شود که افزایش در میزان کار سرد، افزایش در میزان فاز مارتنزیت را تا ۰/۸ کسر حجمی را به دنبال دارد. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، شیب افزایش سختی در اثر افزایش کار سرد ابتدا کم و سپس با تشکیل مارتنزیت در حین تغییر شکل افزایش می‌یابد [۳۹].

$$f_{\alpha'} = \frac{I_{(211)\alpha'}}{I_{(211)\alpha'} + 0.65\{I_{(311)\gamma} + I_{(220)\gamma}\}} \quad [۱]$$

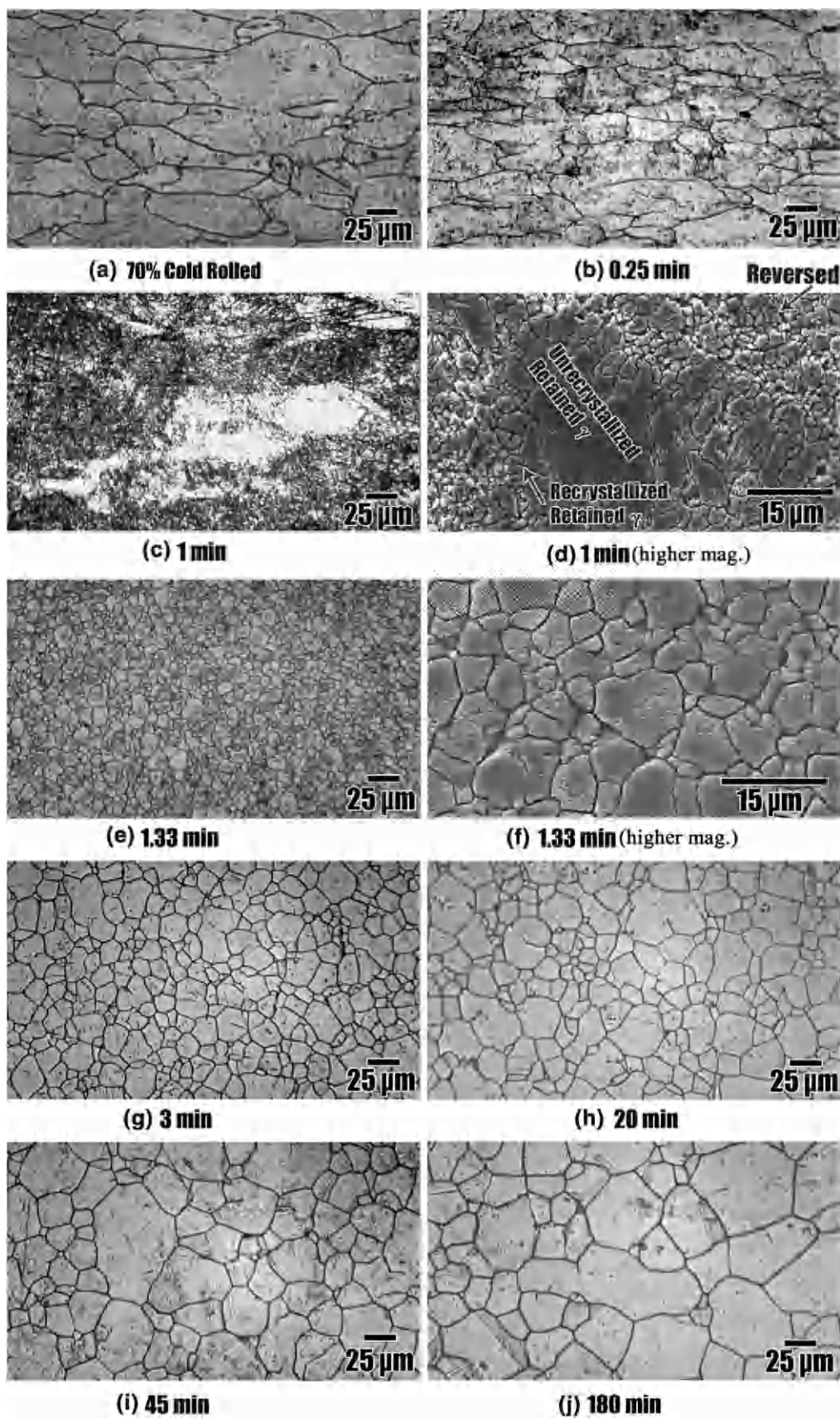


شکل ۲۲- تغییرات سختی و کسر حجمی مارتنزیت در حین کار سرد و عملیات حرارتی آنیل پس از آن [۳۹].

با دنبال کردن تغییرات ریزساختاری و سختی‌سنجی قطعات پس از آنیل در دما و زمان‌های مختلف مشخص گردید که در فرآیند آنیل پس از کار سرد سه مرحله مجزا وجود دارد. مطابق با الگوی پراش ثبت شده برای نمونه‌ها پس از آنیل در دمای 1000°C (شکل ۲۳)، با افزایش زمان آنیل، شدت پیک‌های مربوط به فاز مارتنزیت کم خواهد شد و پیک‌های فاز آستنیت رشد خواهند کرد. این موضوع، کاهش فاز مارتنزیت و تبدیل آن به آستنیت را در حین آنیل پس از کار سرد نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۳، کاهش شدید سختی تا زمان ۱ دقیقه در آنیل، نشان دهنده بازگشت کامل مارتنزیت پس از گذشت زمان ۱ دقیقه از آنیل در 1000°C می‌باشد. بررسی ریزساختار قطعات این فولاد پس از کار سرد به میزان ۷۰٪ و آنیل (شکل ۵) نشان می‌دهد که تا زمان ۱ دقیقه برخی از دانه‌های تبلور یافته آستنیت در کنار دانه‌های آستنیتی بزرگ مشاهده می‌شود. اما پس از ۸۰ ثانیه (۱/۳۳ دقیقه) تبلور مجدد کامل شده است که این موضوع در شکل ۵ قابل مشاهده است. به این ترتیب، یک ریزساختار آستنیتی هم محور حاصل شده است که از دانه‌های تبلور مجدد یافته تشکیل شده است. این ساختار نشان دهنده پایان تغییرات ریزساختاری ناشی از تغییر شکل پلاستیک قبلی است. فرآیند تبلور مجدد و رشد دانه‌های ریز، منجر به کاهش سختی در زمان ۱ دقیقه تا ۱/۳۳ دقیقه است. همانطور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، پس از زمان ۱/۳۳ دقیقه، درشت شدن دانه‌های آستنیتی تبلور یافته مسئولیت کاهش سختی را به دنبال دارد. تاثیر تغییرات ریزساختاری بر سختی در شکل ۲۳ نیز با افزایش زمان آنیل قابل مشاهده است. بنابراین و به طور کلی سه مرحله در فرآیند آنیل این فولاد پس از کار سرد وجود دارد: بازگشت (تبدیل) مارتنزیت ناشی از کرنش به آستنیت، تبلور مجدد آستنیت باقی‌مانده و فرآیند رشد دانه [۳۹].



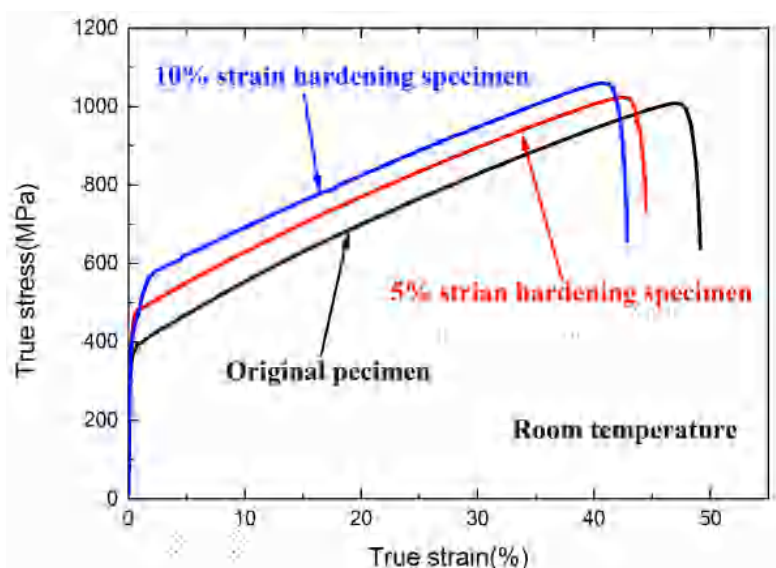
شکل ۲۳- الگوی پراش فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ پس از ۷۰٪ کار سرد و آنیل در دمای 1000°C با زمان‌های مختلف [۳۹].



شکل ۲۴- تحولات ریزساختاری فولاد زنگ‌زن ۳۱۶ پس از ۷۰٪ کار سرد و آنیل در دمای 1000°C با زمان‌های مختلف [۳۹].

نتایج این پژوهش نشان داد که در صورتی فرآیند آنیل در دمای 750°C انجام شود، سنتیک آهسته تبلور مجدد و رشد دانه در این دما منجر به عدم تشکیل ساختار هم محور دانه‌های آستنیت خواهد شد. این موضوع عملیات پالایش دانه را مختل خواهد کرد، لذا انتخاب دمای آنیل پس از کار سرد این فولاد اهمیت دارد [۳۹].

کایشنگ^۱ و همکاران [۴۰] رفتار مکانیکی فولاد زنگ‌زن ۳۱۶L را پس از کرنش سختی بررسی کردند. در این پژوهش نمونه‌های تخت استاندارد آزمون کشش از فولاد مدنظر تهیه و به میزان ۵٪ و ۱۰٪ تحت تغییر شکل قرار گرفت. سپس آزمون کشش در دمای اتاق برای نمونه بدون تغییر شکل و دو نمونه دارای تغییر شکل انجام شد. منحنی تنش-کرنش حاصل در شکل ۶ و خواص مکانیکی استخراج شده از منحنی در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که در منحنی‌های تنش-کرنش و جدول ۸ آورده شده است، کار سخت شده نمونه‌ها قبل از آزمون کشش افزایش در استحکام تسلیم را از ۳۳۹ MPa تا ۳۷۰ MPa به دنبال داشته است اما تاثیر چندانی بر استحکام نهایی ندارد.

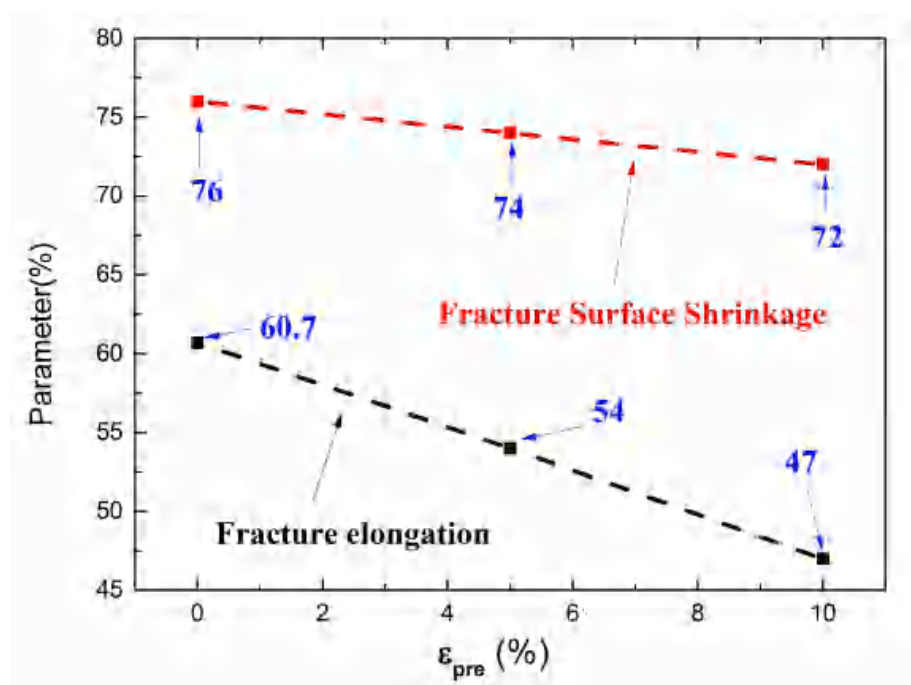


شکل ۲۵- منحنی تنش-کرنش نمونه اصلی و نمونه‌های دارای ۵ و ۱۰ درصد کارسختی در دمای اتاق [۴۰].

جدول ۸- خواص مکانیکی استخراج شده از منحنی تنش- کرنش نمونه‌های مختلف [۴۰].

نمونه اصلی	نمونه با ۵ درصد کارسختی	نمونه با ۱۰ درصد کارسختی	
۳۳۹	۳۵۳	۳۷۰	استحکام تسلیم (MPa)
۱۰۰۸	۱۰۱۸	۱۰۲۴	استحکام نهایی (MPa)

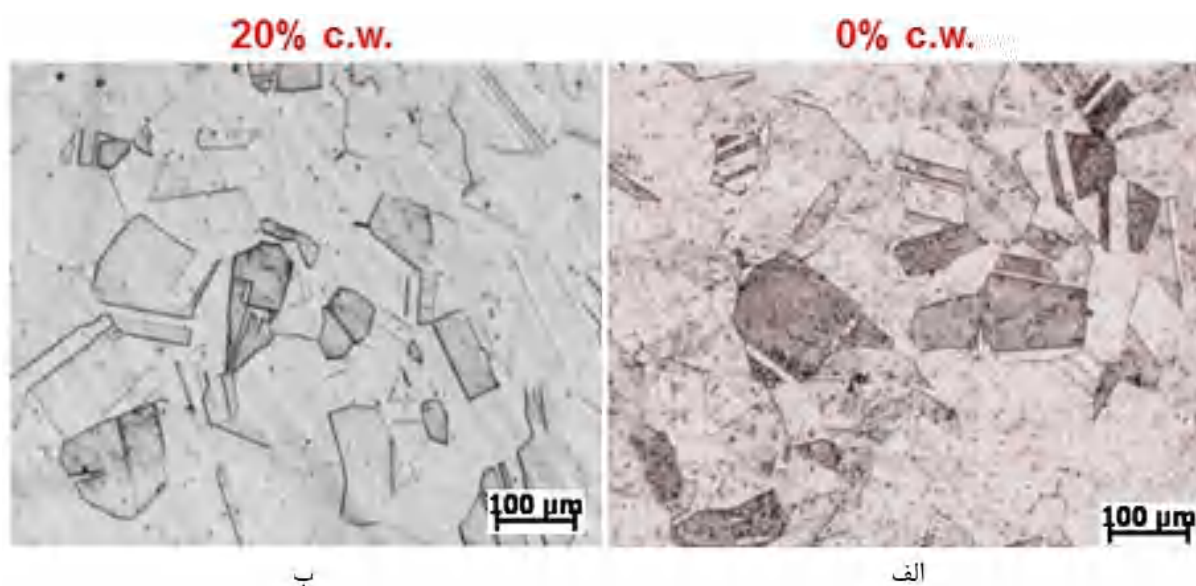
شکل ۲۶ تغییرات پارامترها پلاستیکی فولاد ۳۱۶L از جمله ازدیاد طول شکست و انقباض سطح شکست را بر حسب میزان کرنش سختی نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد هر دو پارامتر با افزایش کرنش سختی کاهش می‌یابند. این موضوع نشان می‌دهد که کرنش سختی می‌تواند استحکام تسلیم را افزایش دهد، اما پارامترهای پلاستیک فولاد ۳۱۶L را کاهش می‌دهد.



شکل ۲۶- تغییرات انقباض سطح شکست و ازدیاد طول شکست بر حسب کرنش سختی قبل از آزمون کشش [۴۰].

در پژوهش محد^۱ و همکاران [۴۱]، تاثیر کار سرد بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد زنگ‌زن آستنیتی ۳۱۶L و ۳۱۶LVM بررسی شده است. نمونه‌های این فولادها پس از عملیات حرارتی آنیل به ابعاد ۸۰×۱۲×۲ میلی‌متر آماده‌سازی و سپس تحت نورد سرد به میزان ۱۰٪ و ۲۰٪ کاهش در مقادیر ضخامت انجام شد. در ادامه و به منظور بررسی تاثیر کار سرد، متالوگرافی، سختی‌سنجی، آزمون کشش و آزمون XRD بر روی نمونه‌ها انجام گردید. ریزساختار نمونه ۳۱۶LVM قبل و بعد از ۲۰٪ کار سرد در

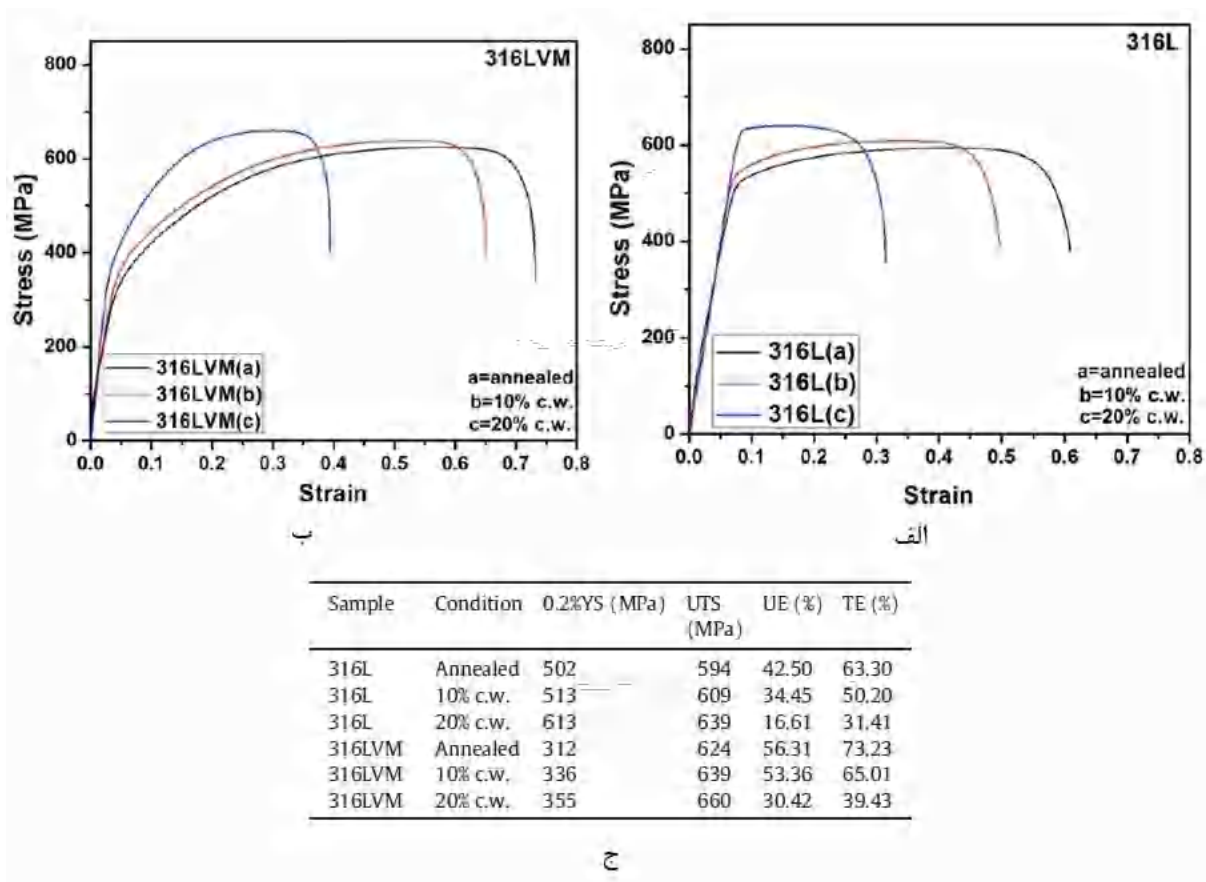
شکل ۲۷ نشان داده شده است. دانه‌های آستنیتی هم‌محور و حضور دوقلوبی‌های آنیل در ریزساختار نمونه قبل از کارسرد قابل مشاهده است. کشیدگی دانه‌های هم‌محور اولیه پس از نورد سرد در شکل ۸- ب نشان داده شده است. متوسط اندازه دانه نمونه آنیل شده حدود ۱۵ میکرومتر و متوسط اندازه دانه نمونه پس از ۲۰ درصد کار سرد حدود ۱۴ میکرومتر می‌باشد. همچنین مشاهده شد که طول دوقلوبی‌های پس از کار سرد افزایش یافته است. اثری از باندهای لغزش قابل در نمونه پس از ۲۰٪ کار سرد مشاهده نشد. نتایج سختی‌سنجی نشان می‌دهد که با انجام کار سرد و افزایش میزان آن، سختی هر دو نمونه فولاد ۳۱۶L و ۳۱۶LVM به دلیل وقوع کارسختی افزایش می‌یابد. مطالعه فازی نمونه‌ها توسط آنالیز XRD نیز نشان می‌دهد که تنها فاز موجود پس از ۲۰ درصد کار سرد آستنیت می‌باشد و اثری از فازهای ثانویه و مارتزیت نمی‌باشد [۴۱].



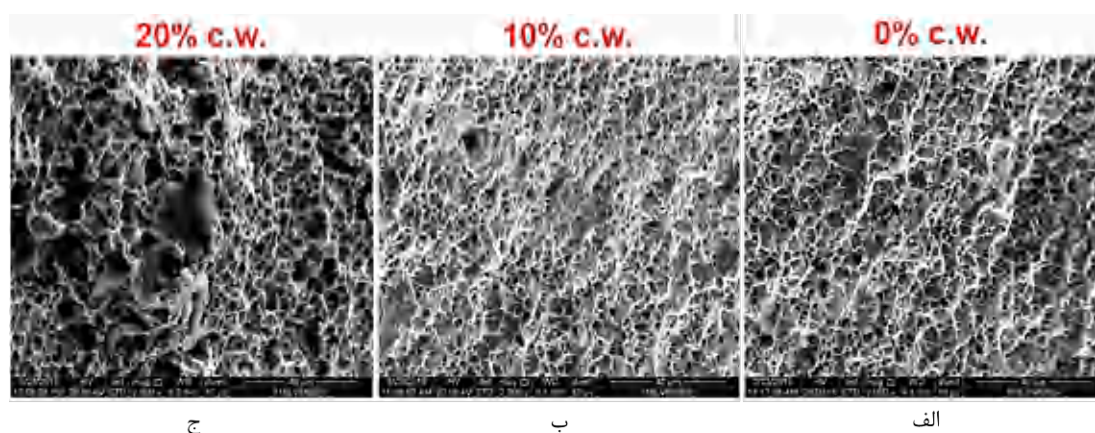
شکل ۲۷- ریزساختار فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶LVM (الف) در حالت آنیل شده و بدون کار سرد و (ب) پس از ۲۰٪ کار سرد [۴۱].

منحنی تنش- کرنش مربوط به فولاد ۳۱۶L و ۳۱۶LVM در حالت‌های آنیل، ۱۰٪ کار سرد و ۲۰٪ کار سرد در شکل ۲۸ به همراه مقادیر کمی خروجی‌های منحنی تنش-کرنش (شکل ۲۸-ج) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود استحکام تسلیم و استحکام کششی با افزایش کار سرد افزایش و ازدیاد طول کاهش یافته است. بیشترین کرنش تا شکست و سطح زیر منحنی مربوط به نمونه‌های آنیل شده می‌باشد که ظرفیت بالای آن‌ها را برای جذب انرژی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۲۸-ج مشاهده می‌شود در کنار افزایش استحکام تسلیم و کششی، مقدار ازدیاد طول کل (TE) و ازدیاد طول یکنواخت (UE) با افزایش کار سرد برای هر دو فولاد کاهش یافته است. سطح شکست فولاد ۳۱۶LVM پس از انجام آزمون کشش توسط میکروسکوپ SEM مورد مطالعه قرار گرفت که در شکل ۲۹ قابل

مشاهده است. وجود فرورفتگی‌های بزرگ و کوچک هم محور بر روی سطوح شکست حتی در نمونه کار سرد شده نشان دهنده ماهیت شکل‌پذیر بودن (نرم) بودن شکست می‌باشد [۴۳].



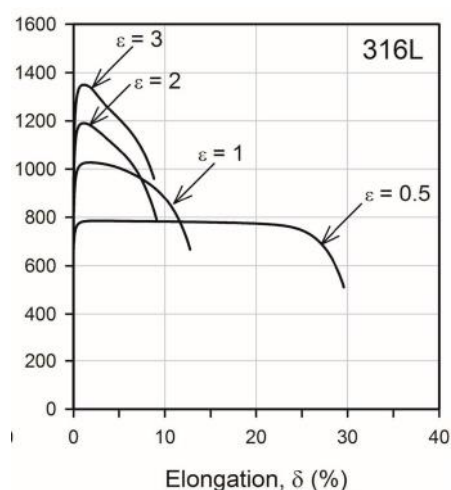
شکل ۲۸- منحنی تنش- کرنش در حالت‌های آنیل، ۱۰٪ کار سرد و ۲۰٪ کار سرد برای، الف) ۳۱۶L، ب) ۳۱۶LVM و ج) مقادیر کمی خروجی‌های منحنی تنش- کرنش برای نمونه‌های مختلف [۴۲].



شکل ۲۹- تصویر سطح شکست نمونه‌های فولاد ۳۱۶LVM پس از انجام آزمون کشش در حالت‌های، الف) آنیل شده، ب) ۱۰٪ کار سرد و ج) ۲۰٪ کار سرد [۴۲].

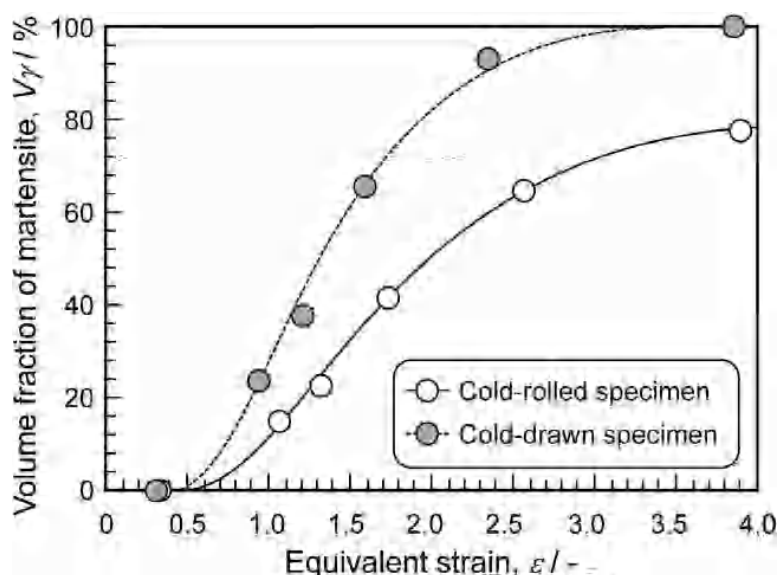
در این پژوهش، تاثیر افزودن نیتروژن بر ساختار و خواص مکانیکی این فولاد بررسی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزایش نیتروژن، دانه‌بندی نسبت به فولادهای ۳۱۶L و ۳۱۶LVM کاهش یافته است. همچنین حضور نیتروژن، استحکام کششی و استحکام تسلیم را بهبود می‌بخشد و شکل پذیری را کاهش می‌دهد. استحکام بیشتر فولادهای زنگ نزن آستنیتی با مقادیر نیتروژن بالاتر، به دلیل حضور نیتروژن بصورت بین‌نشیتن در ساختار است که بیشترین اثر تقویتی محلول جامد را دارد. برهمکنش نابجایی‌ها و اتم نیتروژن نیز دلیل دیگر استحکام بخشی نیتروژن می‌باشد [۴۲].

در پژوهش دیگری، استحکام بخشی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L در اثر نورد در دمای 200°C مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش قطعات فولاد ۳۱۶L با سطح مقطع $30 \times 30 \text{ mm}^2$ در دمای 200°C سانتیگراد به کرنش‌های حقیقی ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ تحت نورد قرار گرفتند [۴۳]. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد که در حین نورد دوقلوئی‌های تغییر شکل، باندهای برشی در ساختار ایجاد می‌شود و مارتنزیت به صورت جزئی تشکیل خواهد شد. فولاد ۳۱۶L در برابر استحاله مارتنزیتی تا حد بسیار خوبی پایدار است و تنها ۰/۳ درصد مارتنزیت در این فولاد تا کرنش کلی ۳ تشکیل شده است. منحنی تنش-کرنش نمونه‌ها پس از انجام نورد در شکل ۳۰ آورده شده است. توجه به شکل ۳۰ و بررسی نتایج کمی استخراج شده از منحنی تنش-کرنش مشخص است که نورد این فولاد تا کرنش ۰/۵ در مرحله‌ای از ازدیاد طول یکنواخت، بدون سخت شدن کرنشی قابل توجه قرار دارد. ازدیاد طول کل این فولاد پس از نورد تا کرنش‌های ۲-۳، به ۸-۹٪ کاهش می‌یابد. بر خلاف شکل‌پذیری، استحکام کششی با افزایش کرنش کل از ۲ به ۳ افزایش می‌یابد. استحکام تسلیم از ۱۱۱۰ مگاپاسکال به ۱۲۴۰ مگاپاسکال پس از کرنش ۲ به مگاپاسکال افزایش می‌یابد. استحکام تسلیم بالای ۱۰۰۰ مگاپاسکال پس از نورد در کرنش‌های بزرگ با توجه به اینکه انعطاف پذیری را محدود می‌نماید، نیاز با انجام عملیات حرارتی بازیابی بعد از نورد را برای کاربردهای ساختاری خاص اجتناب ناپذیر خواهد کرد [۴۳].



شکل ۳۰- منحنی تنش-کرنش قطعات با میزان کرنش‌های مختلف پس از نورد در دمای 200°C [۴۳].

یکی دیگر از روش‌های استحکام‌دهی فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، روش کشش سیم یا روزن‌رانی است. محقق گزارش کرده‌اند که رفتار تغییر شکل این فولادها به طور مثال میزان مارتنزیت ایجاد شده حین تغییر شکل به نوع روش استحکام‌دهی بستگی دارد. در پژوهش ناکادا^۱ و همکاران [۴۴]، تشکیل مارتنزیت القایی در حین تغییر شکل فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ در دو فرآیند تغییر شکل نورد سرد و کشش سرد مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور قطعاتی از فولاد ۳۱۶ تجاری به صورت تخت به ضخامت ۳ و ۱۰ میلیمتر و بصورت سیم به قطر ۳ میلیمتر تهیه و به ابعاد مورد نظر آماده شد. به منظور حذف اثرات عملیات‌های قبلی، عملیات آنیل در ۱۱۵۰ °C انجام گردید. نمونه‌های تخت، تحت نورد سرد قرار گرفته تا تا ضخامت آنها ۹۸٪ کاهش یابد (کرنش معادل ۳/۹٪)، و نمونه‌های سیمی برای کاهش سطح مقطع تا ۹۷ درصد (کرنش معادل ۳/۸٪) به صورت سرد کشیده شدند. سپس کسر حجمی مارتنزیت القایی ایجاد شده توسط تغییر شکل توسط آنالیز XRD نمونه‌ها اندازه‌گیری شد که نتیجه آن در شکل ۳۱ آورده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، در یک کرنش یکسان همواره کسر حجمی مارتنزیت بیشتری در تغییر شکل به روش کشش سیم نسبت به نورد سرد تشکیل شده است. این تفاوت ناشی از تغییرات ریزساختاری متفاوت ایجاد شده طی این دو فرآیند با یکدیگر می‌باشد.



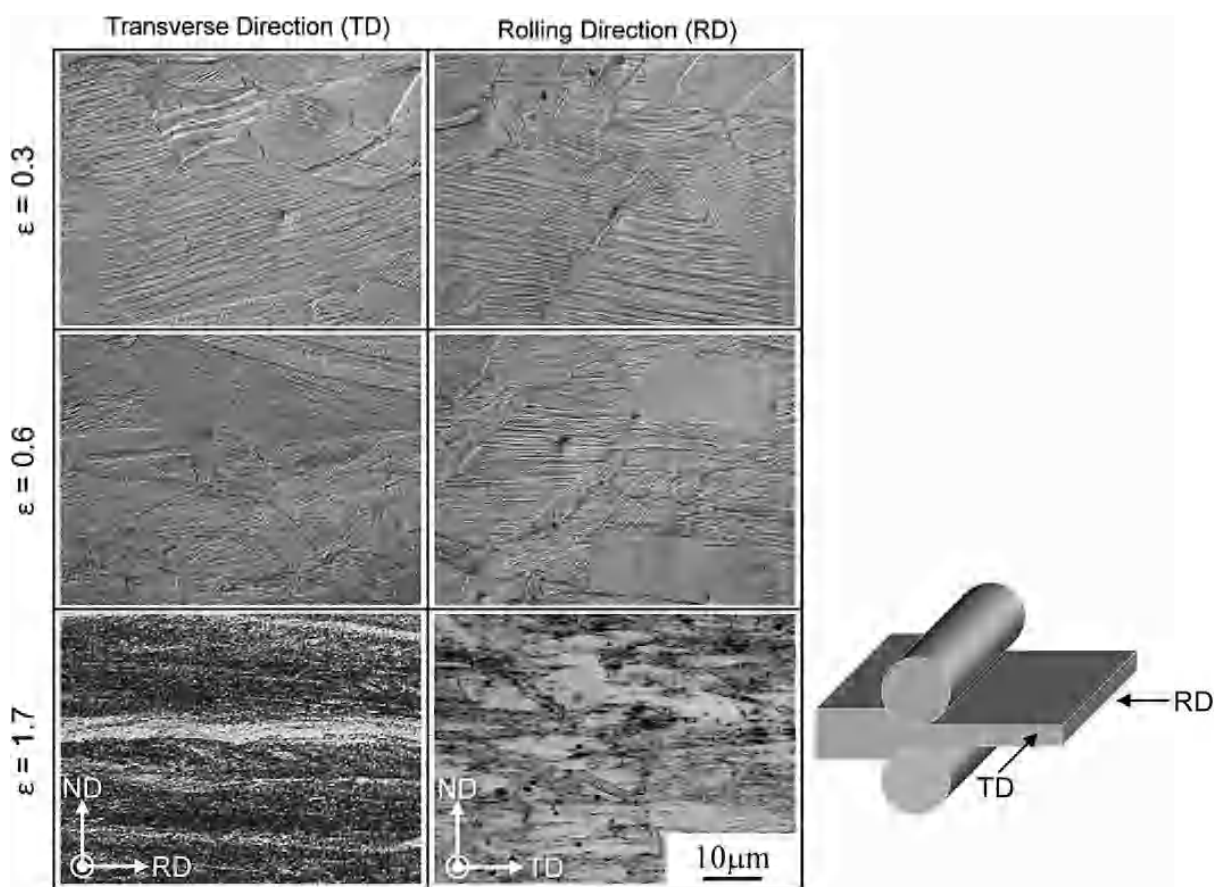
شکل ۳۱- تغییرات کسر حجمی مارتنزیت ناشی از تغییر شکل به روش نورد سرد و کشش سرد [۴۴].

شکل ۳۲ تغییرات ریزساختاری قطعات پس از تغییر شکل به روش نورد سرد را نشان می‌دهد. ریزساختارها در دو جهت عرضی (TD) و نورد (RD) بررسی شده است. تصاویر نشان می‌دهد که دانه‌های آستنیت در هر دو جهت TD و RD به صورت افقی کشیده می‌شوند و طی نورد سرد ساختاری شبیه به پنکیک^۲ را تشکیل می‌دهند. از آنجایی که باندهای تغییر شکل یک جهته در هر دانه مشاهده می‌شود، به نظر می‌رسد که عمدتاً سیستم لغزش اولیه در حالت نورد سرد فعال می‌شود. تغییرات ریزساختاری

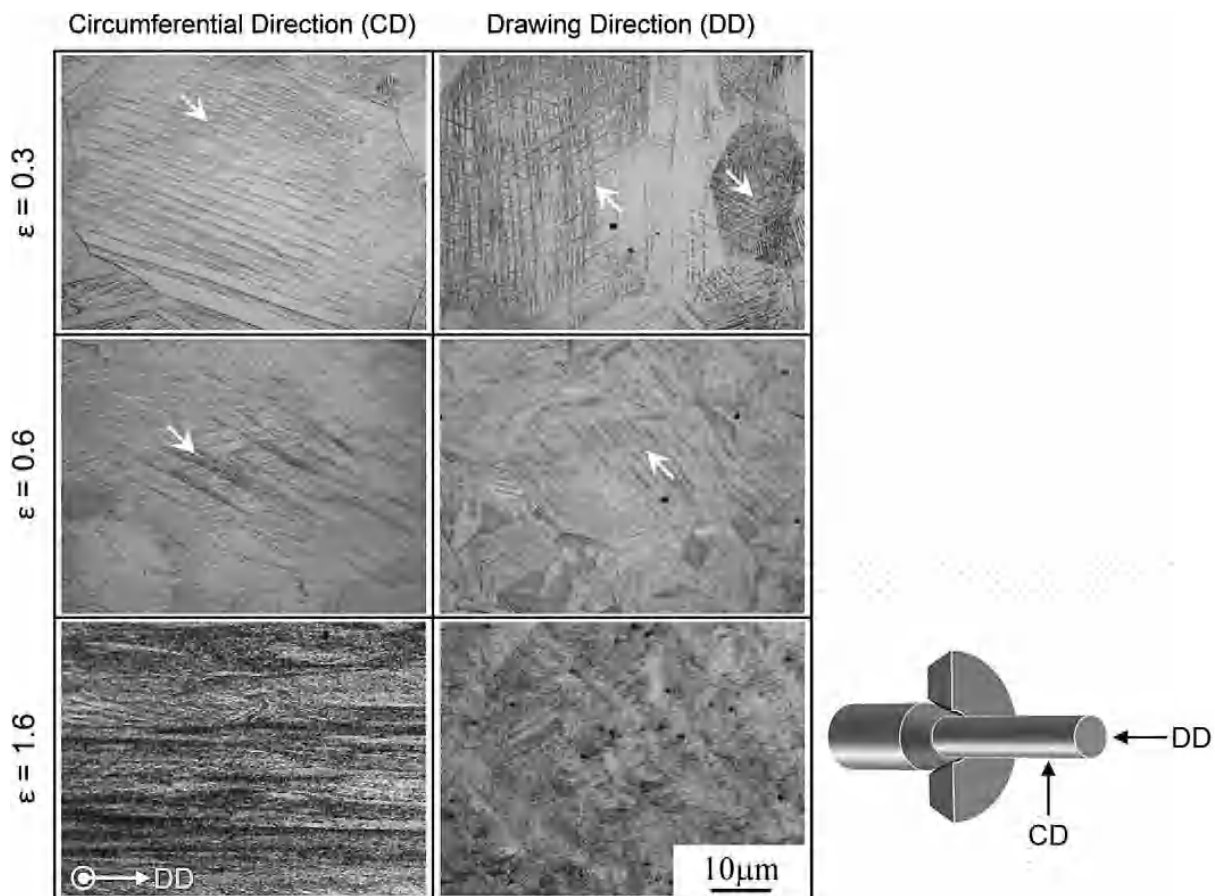
^۱Nakada

^۲Pancake-like structure

نمونه‌ها پس از کشش سرد در دو جهت محیطی (CD) و کشش (DD) در شکل ۳۳ آورده شده است. در این تصویر مشاهده می‌شود که دانه‌های آستنیت دراز مشاهده شده در بخش CD مشابه دانه‌های مشاهده شده در بخش TD است. با این حال، همانطور که توسط فلش‌های سفید در شکل نشان داده شده است، چند باند تغییر شکل متفاوت بر روی سایر سیستم‌های لغزش مشاهده می‌شود. در بخش DD، دو باند تغییر شکل متفاوت به وضوح مشاهده می‌شوند، و اغلب در داخل یک دانه آستنیت، حتی در مراحل اولیه کشیدن سرد، قطع می‌شوند. در نتیجه دانه‌های آستنیت مشاهده شده در این فرآیند هم محور هستند [۴۴].



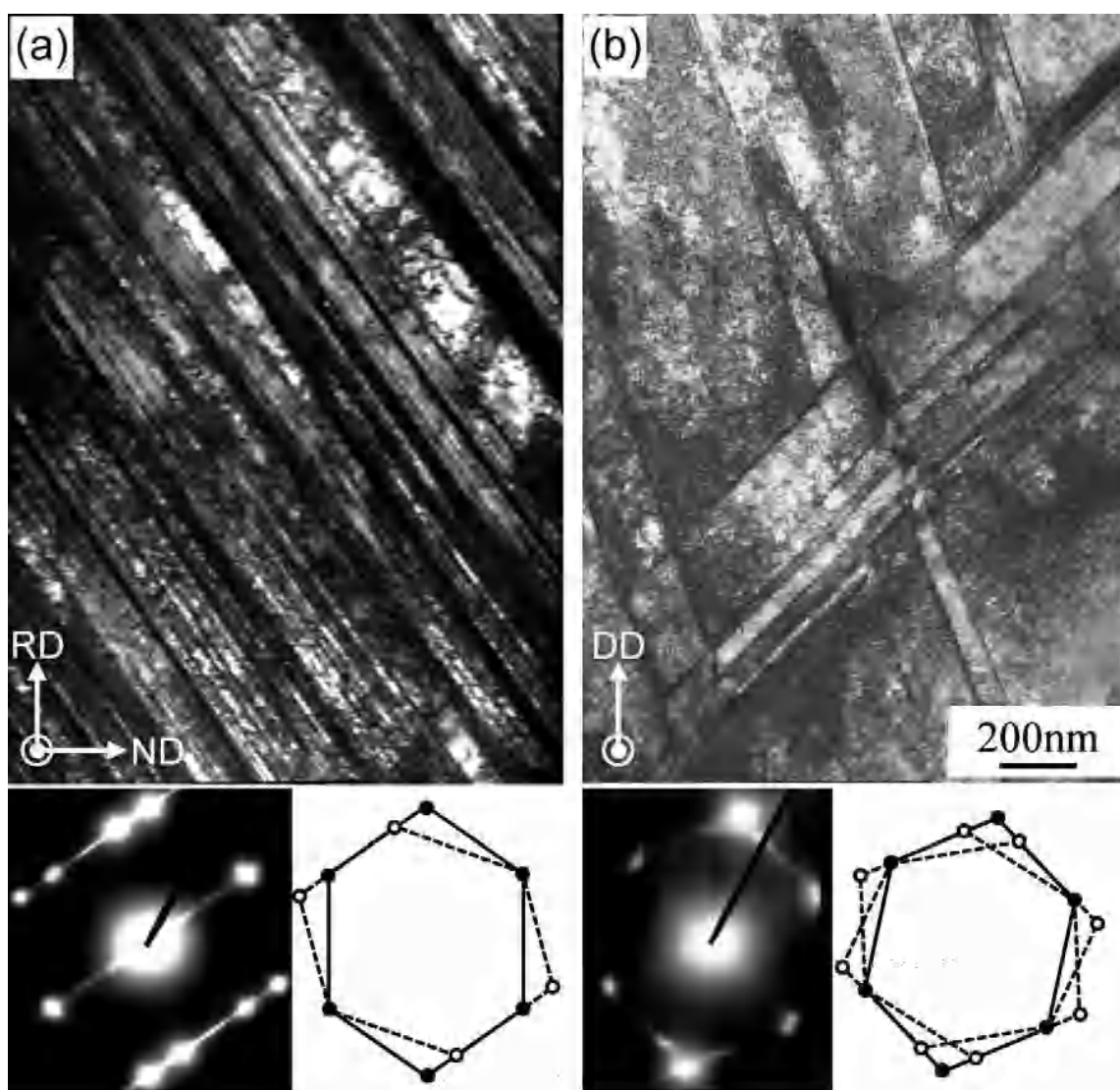
شکل ۳۳- تصاویر میکروسکوپ نوری نشان دهنده تغییرات ریزساختاری در جهت‌های مختلف برای فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ نورد سرد شده با میزان کرنش‌های مختلف [۴۴].



شکل ۳۴- تصاویر میکروسکوپ نوری نشان دهنده تغییرات ریزساختاری در جهت‌های مختلف برای فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ کشش سرد شده با میزان کرنش‌های مختلف [۴۴].

برای بررسی بیشتر، شکل ۳۵ تصاویر TEM و الگوهای پراش نمونه‌های نورد سرد شده (شکل ۳۵-الف) و کشش سرد شده (شکل ۳۵-ب) را با کرنش معادل ۰/۳ نشان می‌دهد. نمونه نورد سرد دارای ساختار لایه‌ای ظریف با چگالی نابجایی بالا است. الگوی پراش این نمونه نشان می‌دهد که این ساختار لایه‌ای از ماتریس آستنیت اصلی و یک دوقلویی تغییر شکل تشکیل شده است. در مقابل، ساختار لایه‌ای مشاهده شده در مورد نمونه کشش سرد شده در امتداد دو جهت توسعه می‌یابد. الگوی پراش این نمونه نشان می‌دهد که دو نوع دوقلویی تغییر شکل مختلف در ماتریس آستنیت تشکیل می‌شوند. بررسی‌های انجام شده توسط TEM نشان می‌دهد که نوارهای تغییر شکل مشاهده شده در تصاویر نوری شکل‌های ۳۵ و ۳۶، مربوط به یک دسته از دوقلوئی‌های تغییر شکل ظریف می‌باشد [۴۴]. در ادامه این پژوهش و برای بررسی جهت کریستالوگرافی مارتنزیت‌های ایجاد شده ناشی از تغییر شکل و توزیع آنها در یک دانه آستنیت، از آنالیز EBSD استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که رفتار دوقلوئی‌های ناشی از تغییر شکل به طور قابل توجه تحت تأثیر فرآیند تغییر شکل می‌باشد. در نمونه‌های نورد سرد شده، دوقلوئی‌های تغییر شکل عمدتاً بصورت یک جهته در داخل یک دانه تشکیل می‌شوند، در حالی که در نمونه‌های کشش سرد شده، دو نوع دوقلوئی تغییر شکل با صفحات دوقلوئی متفاوت تشکیل می‌شوند.

مارتنزیت ناشی از تغییر شکل ترجیحاً در مرز دوقلویی بین زمینه آستنیت و دوقلویی تغییر شکل هسته گذاری می‌کند. بنابراین، مرز دوقلویی در نزدیکی مرز دانه آستنیت می‌تواند که یک مکان هسته‌زایی ترجیحی برای مارتنزیت در نمونه نورد سرد شده باشد. در نمونه کشش سرد شده نیز، مارتنزیت ناشی از تغییر شکل در تقاطع دو نوع دوقلویی‌های تغییر شکل با جهات مختلف تشکیل می‌شود. از آنجایی که تلاقی مرزهای دوقلویی تعداد زیادی محل هسته‌زایی را برای تشکیل مارتنزیت ناشی از تغییر شکل ایجاد می‌کند، ایجاد مارتنزیت در فرآیند کشش سرد بیشتر از نورد سرد اتفاق خواهد افتاد [۴۴].

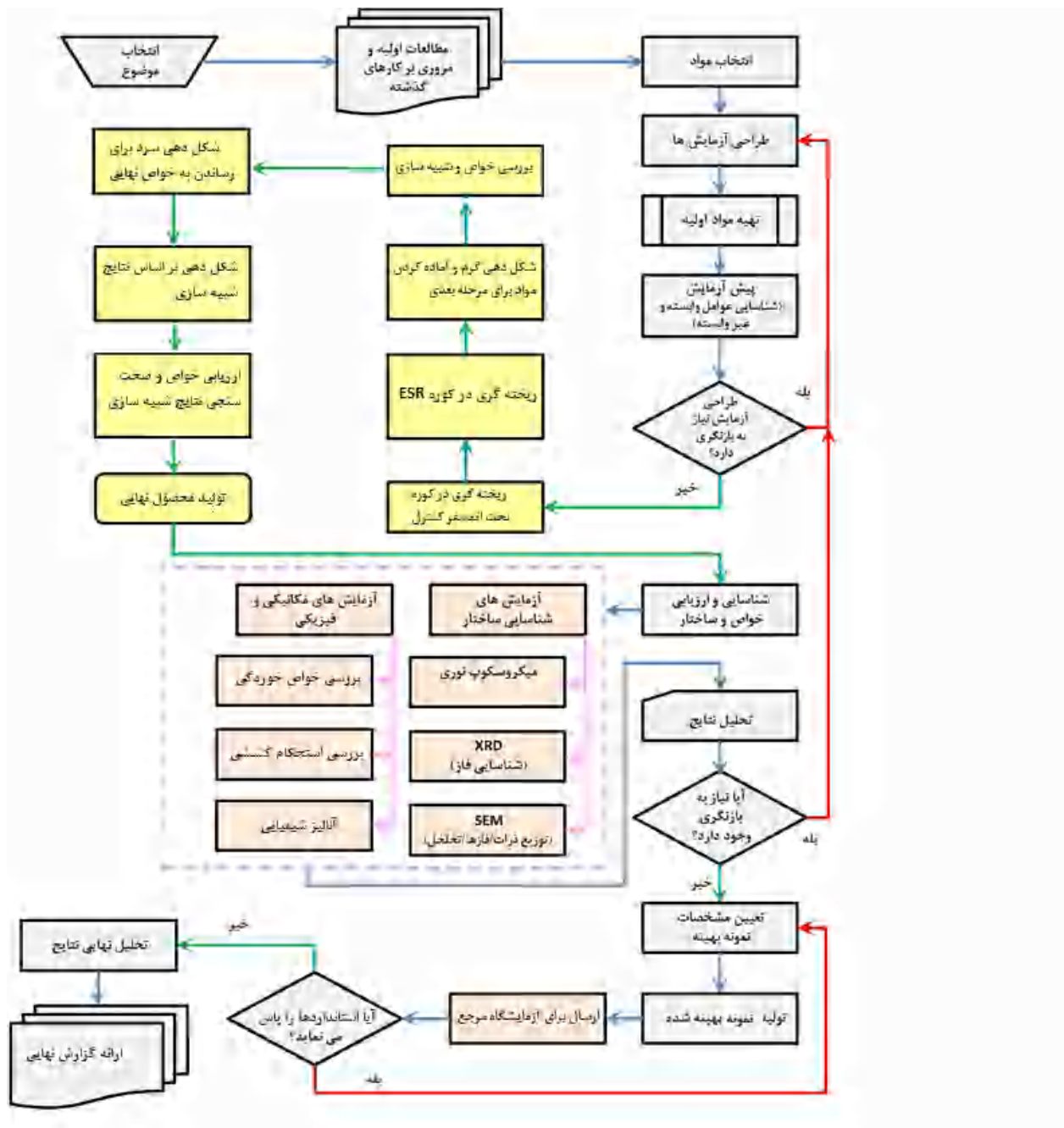


شکل ۳۵- تصاویر TEM و الگوهای پراش به دست آمده از نمونه‌های (الف) نورد سرد شده و (ب) کشش سرد شده، در یک کرنش معادل ۰/۳ [۴۴].

۳- فصل سوم: مواد و روش ساخت

۳-۱- روند کلی تولید

روند کلی تولید این فولاد به طور خلاصه در شکل ۳-۱ آورده شده است.



شکل ۳-۱- نمودار روند کلی تولید فولاد 316LVM در این طرح.

۳-۲- لیست مراکز و شرکت های خدمات دهنده

تامین کننده/پیمانکار		
شرکت ابزار پزشکی اسوه آسیا	قراضه LVM 316	مواد اولیه
آزمایشگاه انرژی های تجدیدپذیر، مغناطیس و نانوتکنولوژی گروه فیزیک دانشکده علوم فردوسی	کوره ذوب خلا	ساخت
آزمایشگاه متالورژی رازی		
شرکت پایدار فلز ویرا		
گروه صنعتی صبا	کشش سرد	بررسی و آنالیز نمونه
گروه صنعتی آتروپارت		
آزمایشگاه متالورژی رازی	آزمون کشش	
آزمایشگاه خواص مکانیکی فردوسی		بررسی و آنالیز نمونه
آزمایشگاه خواص مکانیکی پارک علم و فناوری خراسان		
آزمایشگاه متالوگرافی مجتمع فنی مهندسی جهاددانشگاهی مشهد	سختی سنجی	
آزمایشگاه متالوگرافی مجتمع فنی مهندسی جهاددانشگاهی مشهد	متالوگرافی و بررسی ریزساختار	بررسی و آنالیز نمونه
شرکت آلومینیوم رضا	کوانتومتری	
آزمایشگاه مرکزی فردوسی	ICP	
آزمایشگاه متالورژی رازی		بررسی و آنالیز نمونه
ریحان آزما	شیمی تر	
دانشگاه امیرکبیر	CHONS	
آزمایشگاه خوردگی دانشگاه فردوسی	آزمون حساسیت به خوردگی بین دانه ای	بررسی و آنالیز نمونه
آزمایشگاه انرژی های تجدیدپذیر، مغناطیس و نانوتکنولوژی گروه فیزیک دانشکده علوم فردوسی		

۳-۳- مشخصات فنی فولاد 316LVM

با توجه به اهمیت خواص و حساسیت این نوع فولاد، نمونه‌ای از مشخصات فنی فولاد زنگ نزن 316LVM (تولید شرکت EZM آلمان) که مورد تأیید اداره تجهیزات پزشکی می‌باشد و مجوز واردات برای کاربرد در ساخت پیچ و پلاک اورتوپدی را دارا می‌باشد، از شرکت ابزار پزشکی اسوه تهیه گردید. در ادامه مشخصات فنی آن آورده شده است.

۳-۳-۱- آنالیز شیمیایی و خواص مکانیکی

در جداول زیر ۴ نمونه از مشخصات فنی محموله‌های مختلف از فولاد 316LVM که در آن آنالیز شیمیایی و خواص مکانیکی مشخص شده است، آورده شده است.

EZM Edelstahlzieherei Mark GmbH - Nordstraße 14 - 58300 Wetter		Abnahmezeugnis																																																																					
Osveh Asia Medical Instrument Co.		INSPECTION CERTIFICATE																																																																					
No:139, 2nd Sanat St., Sanat Blv,		CERTIFICAT DE RECEPTION																																																																					
IR- Mashhad		3.1 nach DIN EN 10204																																																																					
E-mail: 09.08.2018		m: Wilk, Nadine +49 2335/977-415																																																																					
bricht stainless steel bars grade X 2 CrNiMo 18153 (1.4441 ESU-remelt) acc. in ISO 5832-1:2007 and ASTM F 138-08 cold drawn, ground and polished tolerance h8 tensile strength min. 1100 N/mm ² test certificate EN 10204/3.1		Herr R. Naumann, Tel.: +49 (0)2335/ 977-474																																																																					
		EZM - Auftragsnummer : CA-00119464 / 10 Supplier reference / N° d'ordre fournisseur : Lieferschein / Prod.-Nr. : CL-00232876-10 / FA-00028588 Dicke : 5,000 Tol. : + 0,000 / -0,018 mm Breite : Tol. : Profil : 0 Länge : 3000,000 - 3100,000 mm																																																																					
		Versanddatum / Shipping date : 28.02.2019 Liefergewicht / Weight of Delivery / Poids Livré : 150,00 kg																																																																					
Item-No.: / No de cote / Chargenr.: 074-61234-18 Beschreibung: ESU Blockguss Schmelzanalyse [Angaben in Gewichtsprozent [%]] <table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>SI</th> <th>MN</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>CR</th> <th>MO</th> <th>NI</th> <th>CU</th> <th>N</th> <th>C-Wert</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,0200</td> <td>0,5300</td> <td>1,8500</td> <td>0,0160</td> <td>0,0010</td> <td>17,7300</td> <td>2,7700</td> <td>13,8000</td> <td>0,0600</td> <td>0,0880</td> <td>26,8710</td> </tr> </tbody> </table> Zugversuch gemäß DIN EN ISO 6892 <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Abmessung</th> <th>RP 0,2</th> <th>RM</th> <th>A4</th> <th>A5</th> </tr> <tr> <th colspan="2">mm</th> <th>[N/mm²]-MPa</th> <th>[N/mm²]-MPa</th> <th>[%]</th> <th>[%]</th> </tr> <tr> <th>Stärke</th> <th></th> <th>min 862</th> <th>min 1100</th> <th>min 12</th> <th>min 12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>4,992</td> <td>1084</td> <td>1271</td> <td>27</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>4,993</td> <td>1089</td> <td>1269</td> <td>29</td> <td>23</td> </tr> </tbody> </table> Das Material ist frei von Delta - Ferrit, Chi und Sigma-phase. Prüfung bei 100-facher Vergrößerung gemäß Practice E407. IK-Beständigkeit gemäß DIN EN ISO 3651-2 / ASTM A 262. The material is free from delta-ferrite, chi and sigma-phases, examined metallographically at 100x magnification in acc. with Practice E407. Resistant to intergranular corrosion in acc. with DIN EN ISO 3651-2 / ASTM A262. Die Lieferung wurde auf Identität geprüft (Spektro), US- oder äquivalentes Verfahren auf Lunker im Vormaterial geprüft, Stauboberfläche visuell kontrolliert, auf Maß kontrolliert, für gut befunden und freigegeben. Identity checked (spectrometry). Ultrasonic or equivalent test for voids in billets. Inspections carried out: Crack test (visuell) and control of dimension accuracy. Fe = Balance Korngröße gemäß DIN-EN ISO 643 / ASTM E 112: 10,0 und feiner. Grain size in accordance with DIN-EN ISO 643 / ASTM E 112: 10.0 and finer. Mikroreinheitsgrad nach ISO 4967 / ASTM E 45, Methode A: Microscopic cleanliness in acc. with ISO 4967 / ASTM E 45, Methode A: <table border="1"> <tbody> <tr> <td>A dünn / thin</td> <td>= 0,0</td> </tr> <tr> <td>A dick / heavy</td> <td>= 0,0</td> </tr> <tr> <td>B dünn / thin</td> <td>= 0,5</td> </tr> <tr> <td>B dick / heavy</td> <td>= 0,0</td> </tr> <tr> <td>C dünn / thin</td> <td>= 0,0</td> </tr> <tr> <td>C dick / heavy</td> <td>= 0,0</td> </tr> <tr> <td>D dünn / thin</td> <td>= 1,5</td> </tr> <tr> <td>D dick / heavy</td> <td>= 0,0</td> </tr> </tbody> </table>				C	SI	MN	P	S	CR	MO	NI	CU	N	C-Wert	0,0200	0,5300	1,8500	0,0160	0,0010	17,7300	2,7700	13,8000	0,0600	0,0880	26,8710	Abmessung		RP 0,2	RM	A4	A5	mm		[N/mm ²]-MPa	[N/mm ²]-MPa	[%]	[%]	Stärke		min 862	min 1100	min 12	min 12	1	4,992	1084	1271	27	23	2	4,993	1089	1269	29	23	A dünn / thin	= 0,0	A dick / heavy	= 0,0	B dünn / thin	= 0,5	B dick / heavy	= 0,0	C dünn / thin	= 0,0	C dick / heavy	= 0,0	D dünn / thin	= 1,5	D dick / heavy	= 0,0
C	SI	MN	P	S	CR	MO	NI	CU	N	C-Wert																																																													
0,0200	0,5300	1,8500	0,0160	0,0010	17,7300	2,7700	13,8000	0,0600	0,0880	26,8710																																																													
Abmessung		RP 0,2	RM	A4	A5																																																																		
mm		[N/mm ²]-MPa	[N/mm ²]-MPa	[%]	[%]																																																																		
Stärke		min 862	min 1100	min 12	min 12																																																																		
1	4,992	1084	1271	27	23																																																																		
2	4,993	1089	1269	29	23																																																																		
A dünn / thin	= 0,0																																																																						
A dick / heavy	= 0,0																																																																						
B dünn / thin	= 0,5																																																																						
B dick / heavy	= 0,0																																																																						
C dünn / thin	= 0,0																																																																						
C dick / heavy	= 0,0																																																																						
D dünn / thin	= 1,5																																																																						
D dick / heavy	= 0,0																																																																						

**EZM Edelstahlzieherei
Mark GmbH**
Nordstraße 14 - 58300 Wetter
Postfach 41 63 - 58294 Wetter

2.6.18

EZM Edelstahlzieherei Mark GmbH Werkstoffverfertiger: r. Weber

Zeichen des Lieferanten / Prüfstempel: **EZM QA**

Es wird bestätigt, daß die Ergebnisse der Prüfungen
den vereinbarten Lieferbedingungen entsprechen

This is to certify, that the results are
in agreement with the specifications

Nous confirmons que les résultats des essais sont
Conformes aux conditions convenues de vente.

Werkstoffbescheinigungen die durch ein Datenverarbeitungssystem erstellt werden sind gem. EN 10204 Abschnitt 5 ohne Unterschrift gültig

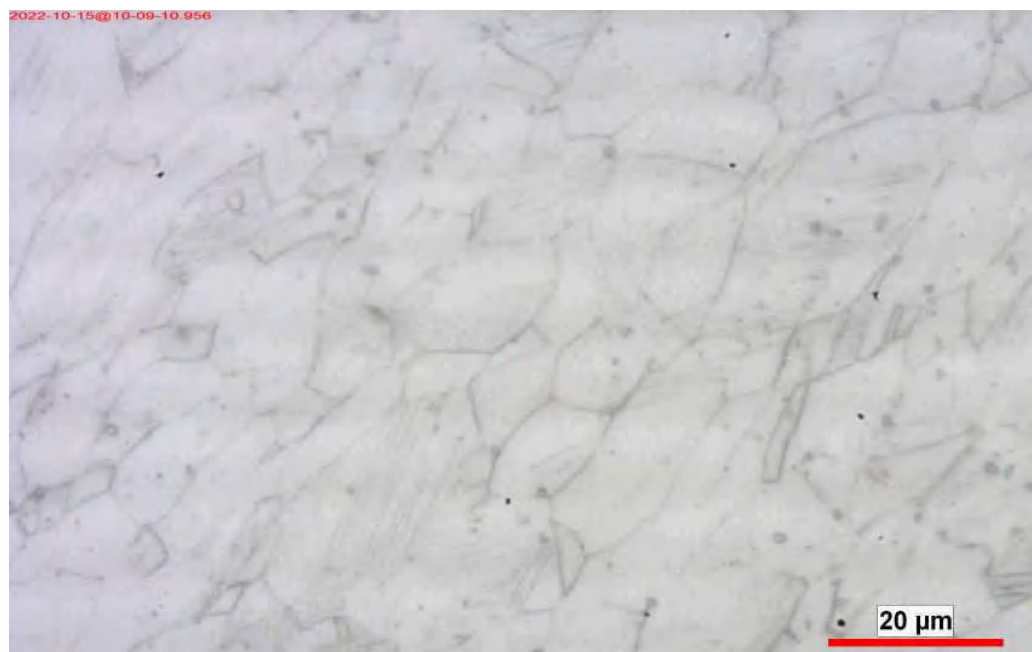
EZM Edelstahlzieherei Mark GmbH - Nordstraße 14 - 58300 Wetter Osvel, A&O Medical Instrument Co. No:139, 2nd Sanat St., Sanat Biv, IR- Mashhad	Abnahmezeugnis INSPECTION CERTIFICATE CERTIFICAT DE RECEPTION 3.1 nach DIN EN 10204																																																																		
E-mail : 09.08.2018 highlight stainless steel bars grade X2 CrNiMo 18131 (1.4444) (316L) (austenitic) acc. to EN 10088-3:2007 and ASTM F 158-08 cold drawn, ground and polished tubulars 47 tensile strength 950-1080 N/mm² test certificate ICH 10204/3.1	Willk, Nadine +49 2335/977-415 Heir R. Neumann, Tel.: +49 (0)2335/ 977-474 EZM - Auftragsnummer : LA-00119464 / 20 Lieferschein / Proc. Nr : CL-00232874-20 / FA-00029915 Stärke : 6,000 Tol. : + 0,000 / -0,012 mm Bräite : Tol. : Profil : 0 Länge : 3000,000 - 3050,000 mm Verwendungsbezeichnung : 38.02.2019 Erzeugniscode : 495,00 kg																																																																		
Best.Nr. (Materiale) : Chromen (039-960362/463-1) Bezeichnung : E31 1000 guss Seitenanalyse (Kugeln in Gefügeproben) : 10-1 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>CT</th> <th>SE</th> <th>MA</th> <th>R</th> <th>CT</th> <th>SE</th> <th>MA</th> <th>R</th> <th>CT</th> <th>SE</th> <th>MA</th> <th>R</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,0170</td> <td>0,0750</td> <td>1,7400</td> <td>0,0140</td> <td>0,0010</td> <td>17,2000</td> <td>2,7400</td> <td>13,0700</td> <td>0,0900</td> <td>0,0940</td> <td>26,3020</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> Vergleichsmaßstab : DIN EN ISO 6502 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>mm</th> <th>RP 0.2</th> <th>RP 0.1</th> <th>A4</th> <th>A5</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th>(N/mm²) MPa</th> <th>(N/mm²) MPa</th> <th>(%)</th> <th>(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Stärke</td> <td>6</td> <td>991</td> <td>991</td> <td>18</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>Bräite</td> <td>3</td> <td>998</td> <td>998</td> <td>27</td> <td>27</td> </tr> </tbody> </table> Das Material ist frei von Cracks - Porosity, Pits and Signatures Polished to 100-finish. Vergleichsmaßstab Practice 6407 Microstructural analysis acc. with EN 10088-3 / ASTM A 262 The material is free from defects, pits and signs of aging standard metallographically at 100x magnification in acc. with Practice 6407 Metallurgie intergranular corrosion in acc. with EN 10088-3 / ASTM A 262 The delivery meets all technical specifications 100% acc. to applicable standards and standards for materials certified by our own laboratory Identify checked (spectrometry) Chemical analysis test for validity by 100% Inspection carried out Check test and content of document accuracy By : Balance Kernprobe gemäß DIN EN ISO 651 / ASTM E 812 : 0.0 - 10.0 Größe des Kerns gemäß DIN EN ISO 651 / ASTM E 812 : 0.0 - 10.0 Microstructural analysis acc. with EN 10088-3 / ASTM A 262, Method A Microscopic examination acc. with EN 10088-3 / ASTM A 262, Method A <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>A diam / dia</th> <th>mm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A diam / dia</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>A diam / dia</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>B diam / dia</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>B diam / dia</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>C diam / dia</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>C diam / dia</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>D diam / dia</td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td>D diam / dia</td> <td>0.0</td> </tr> </tbody> </table>		CT	SE	MA	R	CT	SE	MA	R	CT	SE	MA	R	0,0170	0,0750	1,7400	0,0140	0,0010	17,2000	2,7400	13,0700	0,0900	0,0940	26,3020		Material	mm	RP 0.2	RP 0.1	A4	A5			(N/mm²) MPa	(N/mm²) MPa	(%)	(%)	Stärke	6	991	991	18	18	Bräite	3	998	998	27	27	A diam / dia	mm	A diam / dia	0.0	A diam / dia	0.0	B diam / dia	0.0	B diam / dia	0.0	C diam / dia	0.0	C diam / dia	0.0	D diam / dia	0.0	D diam / dia	0.0
CT	SE	MA	R	CT	SE	MA	R	CT	SE	MA	R																																																								
0,0170	0,0750	1,7400	0,0140	0,0010	17,2000	2,7400	13,0700	0,0900	0,0940	26,3020																																																									
Material	mm	RP 0.2	RP 0.1	A4	A5																																																														
		(N/mm²) MPa	(N/mm²) MPa	(%)	(%)																																																														
Stärke	6	991	991	18	18																																																														
Bräite	3	998	998	27	27																																																														
A diam / dia	mm																																																																		
A diam / dia	0.0																																																																		
A diam / dia	0.0																																																																		
B diam / dia	0.0																																																																		
B diam / dia	0.0																																																																		
C diam / dia	0.0																																																																		
C diam / dia	0.0																																																																		
D diam / dia	0.0																																																																		
D diam / dia	0.0																																																																		

EZM Edelstahlzieherei Mark GmbH
 Nordstraße 14 - 58300 Wetter
 Postfach 41 53 - 58294 Wetter

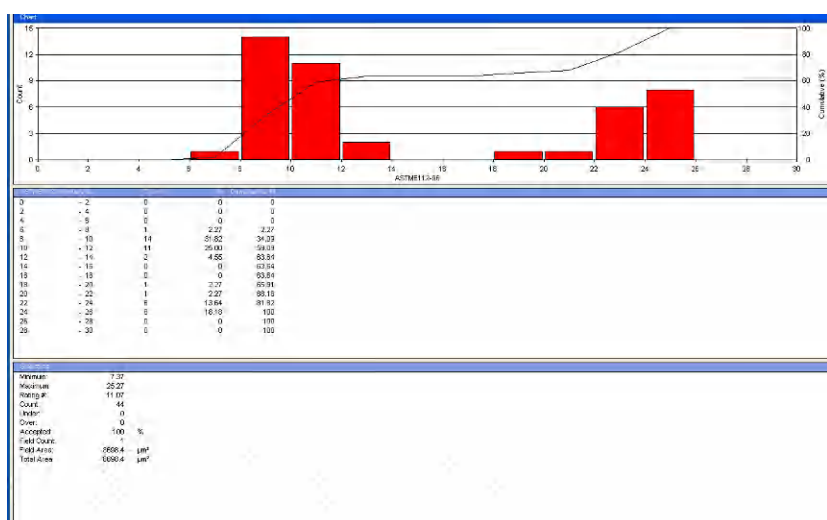
[Handwritten signature]

۳-۴- ریزساختار متالوگرافی

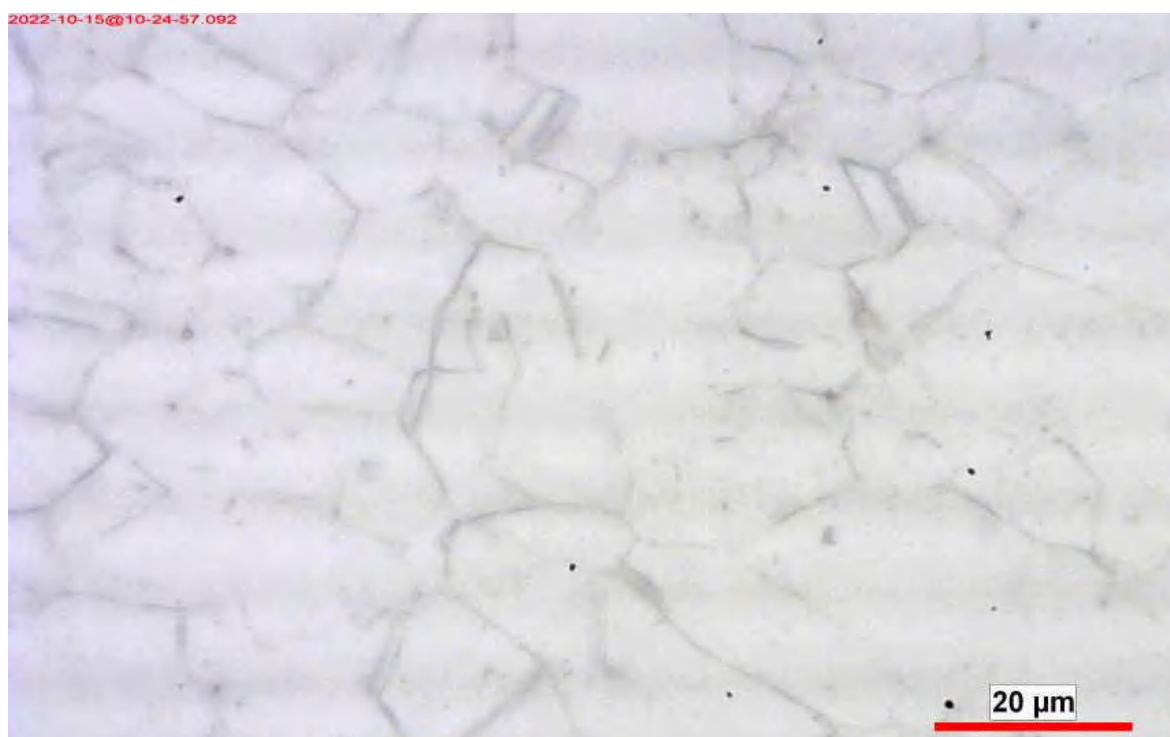
برای بررسی ریز ساختار و تعیین اندازه دانه، نمونه‌های ورق 316LVM در دو راستای عرضی (سطح مقطع) و طولی برش خورده و پس از آماده سازی متالوگرافی، مورد بررسی قرار گرفتند. در تصاویر شماره ۲-۳ تا ۵-۳ ریزساختار متالوگرافی به همراه تعیین عدد اندازه دانه برای دو مقطع برش آورده شده است.



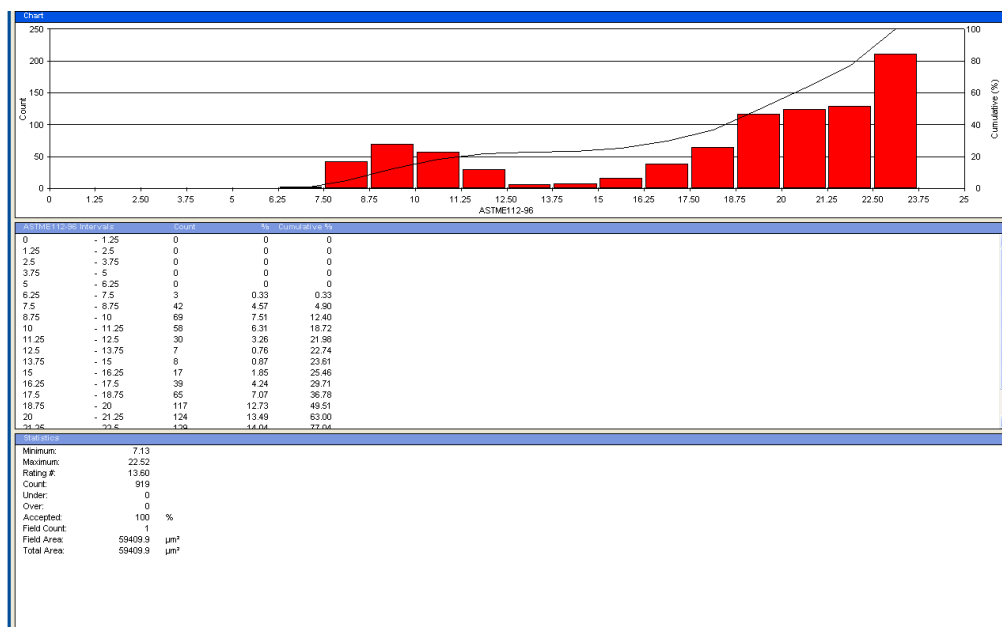
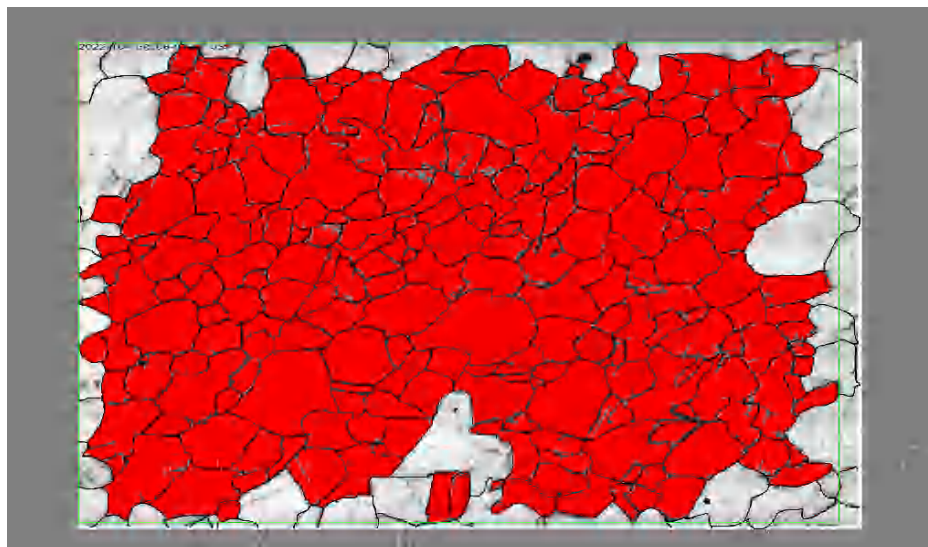
شکل ۲-۳. ریز ساختارهای مربوط به سطح مقطع عرضی در دو بزرگنمایی مختلف.



شکل ۳-۳. اندازه‌گیری اندازه دانه مربوط به سطح مقطع عرضی.



شکل ۳-۴. ریز ساختارهای مربوط به سطح مقطع طولی در دو بزرگنمایی مختلف.



شکل ۳-۵. اندازه‌گیری اندازه دانه مربوط به سطح مقطع طولی.

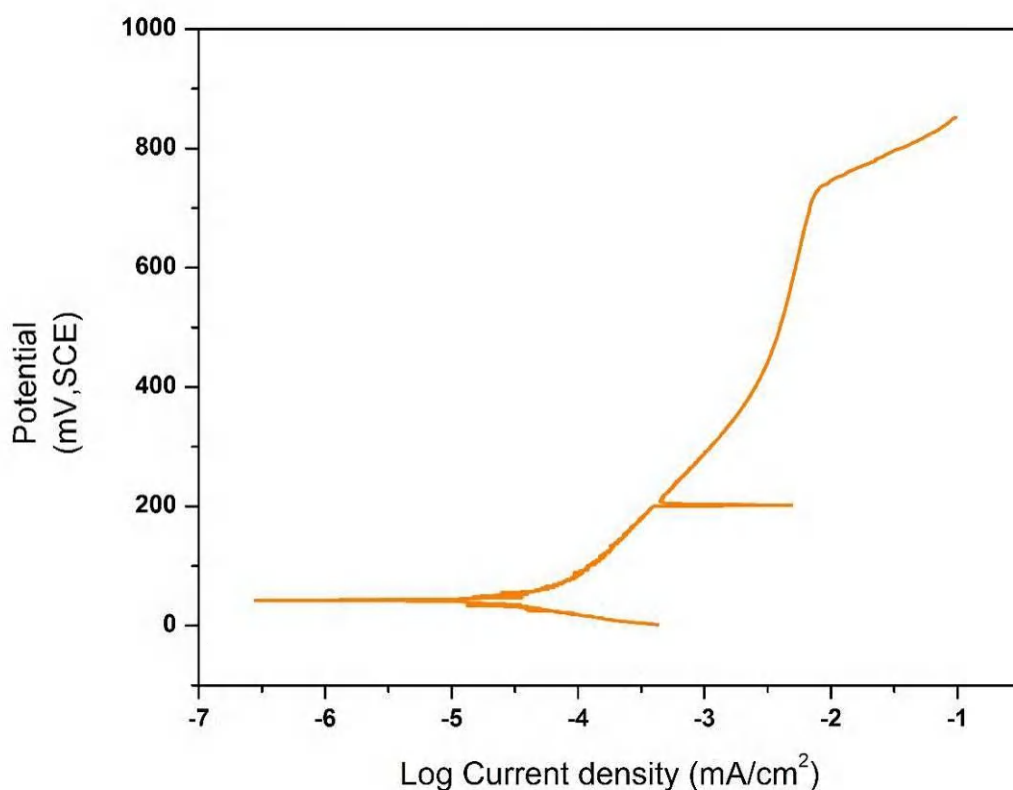
۳-۵- سختی سنجی

برای بررسی سختی، نمونه‌ها پس از آماده سازی تحت آزمون سختی سنجی به روش ویکرز و راکول C قرار گرفتند که گزارش آن به شرح ذیل می‌باشد.

شماره شناسایی: FO-LB-004/00 تاریخ بازنگري: - تاریخ صدور: ۱۳۹۹/۱۰/۰۱		گواهی آزمون سختی سنجی		 جهاد دانشگاهی خراسان رضوی																																				
UNIVERSAL HARDNESS TEST KOOPA		دستگاه:		درخواست کننده:																																				
مدل: UV1		رطوبت کمتر از ۶۰ درصد 25±5c° دما		شرایط محیطی:																																				
جنس قطعه: فولادی		نام قطعه: فولاد 316lvn		تاریخ درخواست: 1401/07/01																																				
تاریخ صدور: 1401/07/01																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">ردیف</th> <th rowspan="2">موقعیت سختی سنجی</th> <th rowspan="2">نیروی اعمالی</th> <th rowspan="2">واحد سختی</th> <th colspan="5">عدد سختی</th> <th rowspan="2">متوسط عدد سختی</th> </tr> <tr> <th>تست ۱</th> <th>تست ۲</th> <th>تست ۳</th> <th>تست ۴</th> <th>تست ۵</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>۱</td> <td>سطح نمونه</td> <td>30kg</td> <td>HV</td> <td>291</td> <td>295</td> <td>289</td> <td></td> <td></td> <td>291</td> </tr> <tr> <td>۲</td> <td>سطح نمونه</td> <td>150kg</td> <td>HRC</td> <td>31.4</td> <td>31.4</td> <td>31</td> <td></td> <td></td> <td>31.2</td> </tr> </tbody> </table>						ردیف	موقعیت سختی سنجی	نیروی اعمالی	واحد سختی	عدد سختی					متوسط عدد سختی	تست ۱	تست ۲	تست ۳	تست ۴	تست ۵	۱	سطح نمونه	30kg	HV	291	295	289			291	۲	سطح نمونه	150kg	HRC	31.4	31.4	31			31.2
ردیف	موقعیت سختی سنجی	نیروی اعمالی	واحد سختی	عدد سختی						متوسط عدد سختی																														
				تست ۱	تست ۲	تست ۳	تست ۴	تست ۵																																
۱	سطح نمونه	30kg	HV	291	295	289			291																															
۲	سطح نمونه	150kg	HRC	31.4	31.4	31			31.2																															
نام و امضا آزمون کننده:		نام و امضا مدیر آزمایشگاه:		مهر آزمایشگاه																																				
فاطمه ارجمند		منصوره جعفری اسفاد																																						
آدرس: مشهد - میدان آزادی، پردیس دانشگاه فردوسی تلفن: ۳۱۹۹۷۴۸۴ تلفاکس: ۳۱۹۹۷ ص پ: ۱۳۷۱ - ۹۱۷۷۵																																								

۳-۶- رفتار خوردگی

آزمون پلاریزاسیون برای بررسی رفتار خوردگی نمونه 316LVM با استفاده از سل سه الکترودی انجام شد. آزمون در الکترولیت $0.1 \text{ M H}_2\text{SO}_4 + 0.5 \text{ M NaCl}$ در دمای محیط صورت گرفت. الکترود صفحه‌ای پلاتین بعنوان، الکترود شمارنده و الکترود مرجع کالومل مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا به مدت یک ساعت نمونه در پتانسیل مدار باز به منظور رسیدن به شرایط پایدار غوطه ور در محلول بود و سپس از پتانسیل ۱۵۰ میلی ولت در جهت کاتدی تا دانسیته جریان ۰.۱ میلی آمپر بر سانتیمتر مربع پلاریزه شد. شکل زیر نمودار پلاریزاسیون نمونه را نشان می‌دهد.



همانطور که از شکل مشخص می‌باشد شرایط پسیویتی نمونه تا پتانسیل حدود ۸۰۰ میلی ولت حفظ شده و سپس با تشکیل حفرات پایدار ناشی از خوردگی حفره‌ای، شکست لایه پسیو رخ داده است.

همچنین برای بررسی و ثبت رفتار خوردگی نمونه ی شاهد در آزمایشگاه ثالث، نمونه ها برای آزمایشگاه آپکا (آزما پژوهان کامیاب صنعت) ارسال گردید که نتایج آن در ادامه آورده شده است.

کد فرم: APT.F.16/02

تعداد صفحات: ۱ از ۲

کد ردیابی آزمایشگاه: ۴۰۱۰۷۰۸۴

APKA
آزما پژوهان کامیاب صنعت
شماره ثبت: ۴۷۶۷۸۹ (مسئولیت محدود)

شماره پروانه: ۸۷۰۴۰۱۱۵
سازمان پژوهش های علمی و تحقیقاتی ایران

نام آزمون: خوردگی

نام درخواست کننده	سازمان جهاد دانشگاهی استان خراسان رضوی
نام مشتری	سازمان جهاد دانشگاهی استان خراسان رضوی
آدرس مشتری	مشهد، میدان آزادی، پردیس دانشگاه فردوسی
تاریخ نامه درخواست	۱۴۰۱/۰۷/۱۲
تاریخ دریافت نمونه	۱۴۰۱/۰۷/۳۰
تاریخ ارسال به آزمایشگاه	۱۴۰۱/۰۷/۳۰
گ پ م	۱۴-۱۲-۱۴
شماره نامه درخواست	۱۴۰۱/۰۸/۱۵
تاریخ تایید مالی	۱۴۰۱/۰۹/۰۱
تاریخ ارائه گزارش	

شرایط محیطی	دمای آزمایش	۲۴ °C	میزان رطوبت محیط	۲۵٪
-------------	-------------	-------	------------------	-----

مشخصات قطعه*				
نوع قطعه	ورق	استاندارد	ASTM A262-15 (2021)	
جنس قطعه	Stainless Steel 316LVM			
مبدأ تامین مواد اولیه	استیل تایمز، مشهد	گد ردیابی تولید کننده	سایز	---

* کلیه مشخصات ذکر شده در جدول، توسط مشتری اعلام شده است. / این آزمایشگاه هیچگونه مسئولیتی در رابطه با تطبیق نام نمونه با قطعه آزمون شده ندارد. / نمونه گیری توسط مشتری انجام شده است و نتایج ارائه شده فقط برای نمونه های ارسالی معتبر است. / نمونه باقیمانده از آزمون فوق فقط برای دو ماه نگهداری می شود. اطلاعات مربوط به نمونه های آزمون شامل مشخصات مشتری و نمونه، روش آزمون، گزارش و ...، محرمانه نگه داشته می شوند.

کد نمونه	40107084	حد استاندارد	مطابقت با استاندارد		روش آزمون
			منطبق	نامنطبق	
خوردگی	وجود ساختار پلهای	وجود ساختار پلهای	✓	---	ASTM A262

تصویر زیر نمونه ارسالی به آزمایشگاه را نشان می دهد.



پایان خلاصه گزارش



ناظر فنی
مهدیه بنی سعید

معاونت آزمایشگاه ها
آوش رضایی

تنها اصل گزارش با مهر و امضا معتبر می باشد. تکثیر گزارش نتایج آزمون تنها با اجازه آزما پژوهان کامیاب صنعت و به صورت کامل امکان پذیر خواهد بود. بازنگری و ویرایش گزارش حداکثر تا یک ماه پس از تاریخ صدور گزارش امکان پذیر می باشد.

تهران - بزرگراه شهید بابایی - خروجی حکیمیه - خیابان شهید صدوقی - بلوار وفادار - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال - پژوهشگاه - طبقه منفی ۱ - واحد ۲-۱۲۶
کدپستی: ۱۶۵۱۱۵۳۵۱۱ | تلفن: ۰۹۳۰ ۳۳۳۰۴۶۳ | Email: apkamed.co@gmail.com | Website: www.apkaco.ir

شرح آزمون

این آزمون براساس استاندارد ASTM A262 جهت بررسی خوردگی فولاد مورد استفاده در صنایع پزشکی انجام می‌گیرد. در این آزمون ۱ نمونه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

برای انجام تست به روش استرایگر، بعد از پرداخت کردن یک نمونه کوچک یا قسمتی از یک نمونه (حدود 5 cm^2 - ۷)، مرحله اچ کردن آن در محلول اگزالیک اسید ۱۰٪ به مدت $1/5\text{ min}$ دقیقه با چگالی جریان خروجی 1 A/cm^2 انجام شد و مشاهده سطح خورده شده بوسیله میکروسکوپ متالوگرافی در بزرگنمایی ۲۵۰ تا ۵۰۰ انجام پذیرفت. نمونه تست یک ورق استیل ۳۱۶ است که به وسیله یک نسیم مسی متصل، جریان دریافت می‌کند و به قطب مثبت الکتریفایر متصل است. به غیر از ناحیه تست نمونه، بقیه سطوح به وسیله لاک و چسب پوشانده شد. لازم به توضیح است در این تست از کاتدی از جنس فولاد زنگ‌نزن با مساحتی سه برابر مساحت سطح نمونه در فاصله ۱ cm ورق نمونه (بعنوان آنده) استفاده شد. ساختار میکروسکوپی نمونه در شکل ۱ و الگوی ساختار میکروسکوپی مطابق با استاندارد ASTM 262 در شکل ۲ نشان داده شده است. نمونه مورد آزمایش بر اساس مقایسه شکل ۱ و شکل ۲ دارای ساختار پله‌ای می‌باشد. لذا با توجه به این استاندارد، از نظر مقاومت در برابر حساسیت به حمله بین دانه ای، نمونه مورد پذیرش می‌باشد.



شکل ۱ - ساختار میکروسکوپی نمونه



شکل ۲ - الگوی ساختار میکروسکوپی مطابق با استاندارد ASTM 262

پایان گزارش

تنها اصل گزارش با مهر و امضا معتبر می‌باشد. تکثیر گزارش نتایج آزمون تنها با اجازه آزمایشگاه کامیاب صنعت و به صورت کامل امکان پذیر خواهد بود. بازنگری و ویرایش گزارش حداکثر تا یک ماه پس از تاریخ صدور گزارش امکان پذیر می‌باشد.

نام آزمون: کوانتومتری و آنالیز گاز

شرایط محیطی	دمای آزمایش	۲۴ °C	میزان رطوبت محیط	۲۵ %
-------------	-------------	-------	------------------	------

نام درخواست کننده	سازمان جهاد دانشگاهی استان خراسان رضوی		
نام مشتری	سازمان جهاد دانشگاهی استان خراسان رضوی		
آدرس مشتری	مشهد، میدان آزادی، پردیس دانشگاه فردوسی		
تاریخ نامه درخواست	۱۴۰۱/۰۷/۱۳	شماره نامه درخواست	گ پ م ۱۳-۱۴۰۱
تاریخ دریافت نمونه	۱۴۰۱/۰۷/۳۰	تاریخ تایید مالی	۱۴۰۱/۰۸/۱۵
تاریخ ارسال به آزمایشگاه	۱۴۰۱/۰۷/۳۰	تاریخ ارائه گزارش	۱۴۰۱/۰۸/۱۸

مشخصات قطعه*				
نوع قطعه	جنس قطعه	ورق	استاندارد	ASTM F138-19 & ISO 5832-1:2016 & ASTM A751-21
میدان تامین مواد اولیه	استیل تایمز، مشهد	گد ردیابی تولید کننده	سایز	---
* کلیه مشخصات ذکر شده در جدول، توسط مشتری اعلام شده است. / این آزمایشگاه هیچگونه مسئولیتی در رابطه با تطبیق نام نمونه با قطعه آزمون شده ندارد. / نمونه گیری توسط مشتری انجام شده است و نتایج ارائه شده فقط برای نمونه های ارسالی معتبر است. / نمونه باقیمانده از آزمون فوق فقط برای دو ماه نگهداری می شود. / اطلاعات مربوط به نمونه های آزمون شامل مشخصات مشتری و نمونه، روش آزمون، گزارش و ... محرمانه نگه داشته می شوند.				

کد نمونه	40107084	حد استاندارد	مطابقت با استاندارد		روش آزمون
			منطبق	نامنطبق	
کوانتومتری و آنالیز گاز	آلیاژ 316 LVM	آلیاژ 316 LVM	✓	---	ASTM A751

تصویر زیر نمونه ارسالی به آزمایشگاه را نشان می دهد.



پایان خلاصه گزارش



ناظر فنی
مهدیه بنی سعید

معاونت آزمایشگاه ها
آرش رضایی

تنها اصل گزارش با مهر و امضا معتبر می باشد. تکثیر گزارش نتایج آزمون تنها با اجازه آزما پژوهان کامیاب صنعت و به صورت کامل امکان پذیر خواهد بود. بازنگری و ویرایش گزارش حداکثر تا یک ماه پس از تاریخ صدور گزارش امکان پذیر می باشد.

نام آزمون: کوانتومتری و آنالیز گاز

شرایط محیطی		
دمای آزمایش	۲۴ °C	میزان رطوبت محیط
		۲۵ %

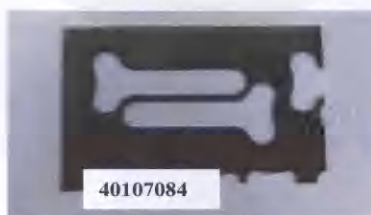
نام درخواست کننده	سازمان جهاد دانشگاهی استان خراسان رضوی
نام مشتری	سازمان جهاد دانشگاهی استان خراسان رضوی
آدرس مشتری	مشهد، میدان آزادی، پردیس دانشگاه فردوسی
تاریخ نامه درخواست	۱۴۰۱/۰۷/۱۲
شماره نامه درخواست	گ پ م ۱۲-۱۴۰۱
تاریخ دریافت نمونه	۱۴۰۱/۰۷/۲۰
تاریخ تایید مالی	۱۴۰۱/۰۸/۱۵
تاریخ ارائه گزارش	۱۴۰۱/۰۸/۱۸

مشخصات قطعه			
نوع قطعه	ورق	استاندارد	ASTM F138-19 & ISO 5832-1:2016 & ASTM A751-21
جنس قطعه	Stainless Steel 316LVM	گد ردیابی تولید کننده	---
میدان تامین مواد اولیه	استیل تایمز، مشهد	سایز	---

* کلیه مشخصات ذکر شده در جدول، توسط مشتری اعلام شده است. / این آزمایشگاه هیچگونه مسئولیتی در رابطه با تطبیق نام نمونه با قطعه آزمون شده ندارد. / نمونه گیری توسط مشتری انجام شده است و نتایج ارائه شده فقط برای نمونه های ارسالی معتبر است. / نمونه باقیمانده از آزمون فوق فقط برای دو ماه نگهداری می شود. اطلاعات مربوط به نمونه های آزمون شامل مشخصات مشتری و نمونه، روش آزمون، گزارش و ... محرمانه نگه داشته می شوند.

کد نمونه	40107084	حد استاندارد	مطابقت یا استاندارد		روش آزمون
			منطبق	نامنطبق	
کوانتومتری و آنالیز گاز	آلیاژ 316 LVM	آلیاژ 316 LVM	✓	--	ASTM A751

تصویر زیر نمونه ارسالی به آزمایشگاه را نشان می دهد.



پایان خلاصه گزارش



ناظر فنی
مهديه بنی سعید

معاونت آزمایشگاه ها
آرش رضایی

تنها اصل گزارش با مهر و امضا معتبر می باشد. تکثیر گزارش نتایج آزمون تنها با اجازه آزمایشگاه کامیاب صنعت و به صورت کامل امکان پذیر خواهد بود. بازنگری و ویرایش گزارش حداکثر تا یک ماه پس از تاریخ صدور گزارش امکان پذیر می باشد.

تهران - بزرگراه شهید بابایی - خروجی حکیمیه - خیابان شهید صدوقی - بلوار وفادار - دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال - پژوهشگاه - طبقه منفی ۱ - واحد ۱۲۶-۲
کدپستی: ۱۶۵۱۱۵۳۵۱۱ | تلفن: ۰۹۳۰ ۳۳۳۰ ۴۶۳ | Email: apkamed.co@gmail.com | Website: www.apkaco.ir

۳-۷- نتایج ذوب در کوره خلاء

تصاویر شمش های ریخته گری شده در کوره خلاء نتایج آنالیز ذوب نمونه های قراضه فولاد زنگ نزن در کوره خلاء که توسط مرکز متالورژی رازی انجام شده است، در جداول زیر آورده شده است. همانطور که در جداول مشخص شده است، ترکیب آلیاژ در هر دو حالت قبل و بعد از ذوب در رنج استاندارد می باشد.



(آنالیز نمونه اصلی)

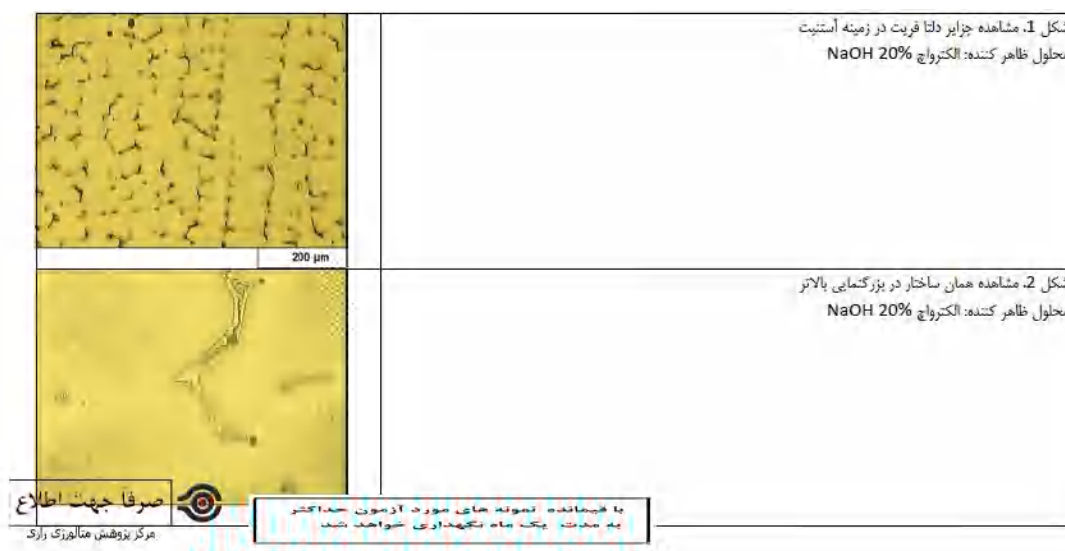
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
0.018	0.47	1.60	0.023	0.003	17.8	2.67	14.1	0.036	0.06	0.05
Nb	Ti	V	W	N	Fe					
0.006	0.004	0.069	0.008	0.06	Base					

(آنالیز ذوب مجدد)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu
0.015	0.53	1.42	0.019	0.004	17.0	2.70	14.05	0.007	0.06	0.04
Nb	Ti	V	W	N	Fe					
Trace	0.005	0.062	0.006	0.04	Base					

۳-۸ عملیات حرارتی و بهبود ریزساختار

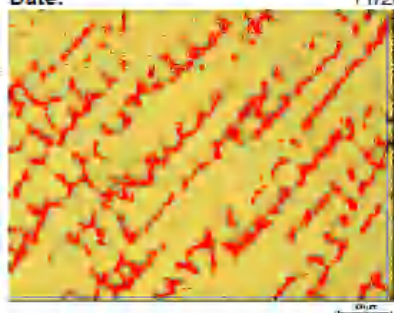
پس از ذوب نمونه ها در خلا، ریز ساختار نمونه ها مورد بررسی قرار گرفت. شکل زیر ریزساختار نمونه ها بعد از ریخته گری را نشان می دهد.



همانطور که در این تصویر مشاهده می شود، ریز ساختار بعد از ریخته گری، دارای فریت باقیمانده بوده که درصد آن در شکل زیر مشخص شده است.

Determination of the area percentage

Number of fields: 1
Total area: 361655 μm^2
Date: 11/20/2022



Mean value

Standard deviation

F:

12.5 %

0.0

صرفاً جهت اطلاع

مرکز پژوهش فناوری رازی



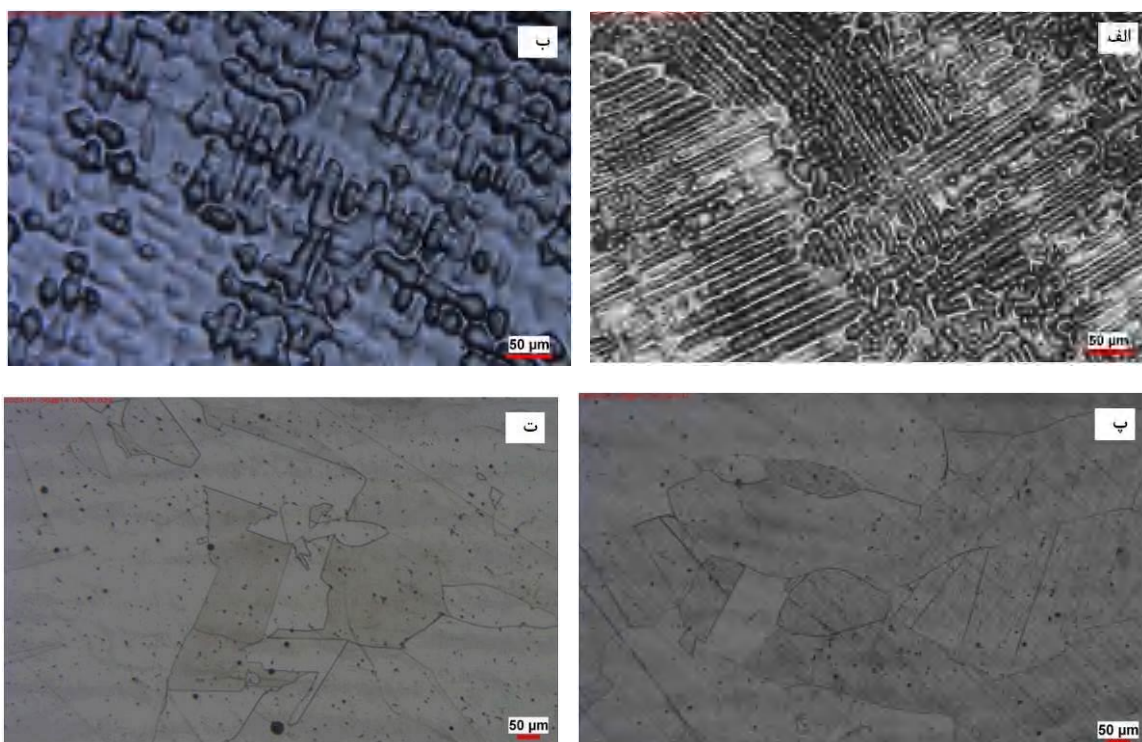
باقیمانده نمونه های مورد آزمون حداکثر به مدت یک ماه نگهداری خواهد شد

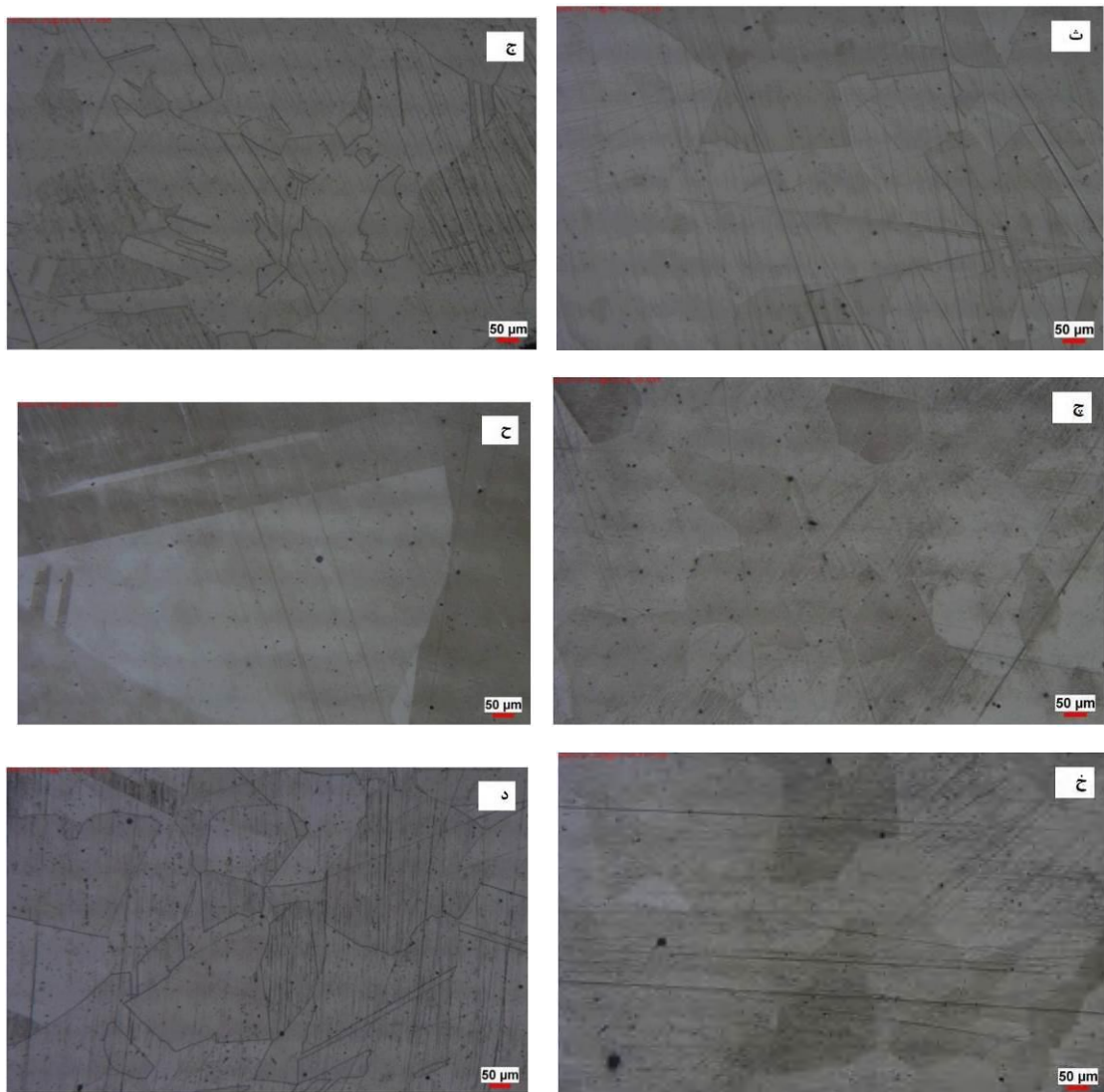
برای از بین بردن فریت باقیمانده قبل از شروع عملیات کار مکانیکی، مطابق با پیشنهاد مقالات و منابع عملیات حرارتی آنیل انجام گردید که روش انجام و نتایج در ادامه آورده شده است.

حداقل دمای آنیل برای فولاد 316 LVM در منابع ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد ذکر شده است. همچنین در برخی منابع سرد کردن سریع نمونه پس از عملیات آنیل سفارش شده است. بدین منظور برای همگن سازی ساختار فولاد ریخته شده، تعداد ۱۰ نمونه، تحت عملیات آنیل در دمای ثابت ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد در مدت زمان های ۱،۳،۵،۶ و ۷ ساعت در دو محیط سرد شدن هوا و آب قرار گرفتند. جهت نمایش ریزساختار، نمونه ها با محلول اچانت گلیسرژیا حکاکی شده اند.

تصاویر متالوگرافی ریزساختار نمونه ها در زمان های متفاوت آنیل و محیط سرد شدن هوا و آب در شکل زیر نشان داده شده است.

همانطور که در این شکل الف و ب دیده می شود، مدت زمان یک ساعت برای همگن سازی ریزساختار نمونه ها کافی نیست و ساختار دندریتی حاصل از فرآیند انجماد از بین نرفته است. در حالیکه زمان های بیش از ۳ ساعت (پ و ت) ساختار همگن با دانه بندی مشخص حاصل شده است و اثر از فریت باقیمانده نیز مشاهده نمی شود. از طرف دیگر محیط سرد شدن نیز تاثیری بر ریزساختار نداشته است.





تصاویر میکروسکوپ نوری ریزساختار نمونه ها در زمان های متفاوت آنیل و محیط سرد شدن مختلف: الف) ۱ ساعت/ هوا، ب) ۱ ساعت/ آب، پ) ۳ ساعت/ هوا، ت) ۳ ساعت/ آب، ث) ۵ ساعت/ هوا، ج) ۵ ساعت/ آب، چ) ۶ ساعت/ هوا، ح) ۶ ساعت/ آب، خ) ۷ ساعت/ هوا، د) ۷ ساعت/ آب.

سختی برینل نمونه ها

سختی برینل نمونه ها با قطر فرورونده ۲/۵ میلیمتر و بار ۱۸۷/۵ کیلوگرم در جدول زیر گزارش شده است. همانطور که مشخص می باشد، زمان عملیات آنیل تاثیر چشمگیری بر سختی نمونه ها ندارد. از طرفی سرد شدن در محیط آب بطور میانگین ۱۰ برینل سختی را افزایش داده است که افزایش قابل ملاحظه ای نیست.

نمونه	زمان آنیل (ساعت)	محیط سرد شدن	سختی برینل			
			تست ۱	تست ۲	تست ۳	میانگین
۱	۱	هوا	۱۰۵	۱۰۶	۱۰۴	۱۰۵
۲	۱	آب	۱۱۴	۱۱۲	۱۲۰	۱۱۵
۳	۳	هوا	۱۰۴	۱۰۵	۱۰۹	۱۰۶
۴	۳	آب	۱۱۳	۱۱۳	۱۱۴	۱۱۳
۵	۵	هوا	۱۰۲	۱۰۳	۱۰۲	۱۰۲
۶	۵	آب	۱۱۱	۱۱۲	۱۱۵	۱۱۳
۷	۶	هوا	۹۳	۹۷	۹۵	۹۵
۸	۶	آب	۹۴	۱۰۷	۱۱۱	۱۰۴
۹	۷	هوا	۱۰۸	۱۰۷	۱۰۶	۱۰۷
۱۰	۷	آب	۱۱۲	۱۰۹	۱۱۳	۱۱۱

۳-۹ ذوب نمونه ها در کوره های صنعتی مطابق با دانش کسب شده

برای این منظور فولاد ۳۰۴ و فولاد ساده کربنی از جنس St12 به صورت تسمه های فلزی به هم جوش داده شدند و در کوره ESR با نسبت ۱:۹ و به وزن کلی ۲۰۰ کیلوگرم به همراه سرباره های آلومینا (۲۰٪)، آهک (۲۰٪) و فلورین (۶۰٪) ذوب شدند. ترکیب شیمیایی اولیه مواد مورد استفاده در این مرحله در جدول ۳-۱ زیر آورده شده است.

جدول ۳-۱. ترکیب آلیاژهای اولیه مورد استفاده جهت آلیاژسازی.

عنصر	C	Cr	Mn	Si	P	S	Ni	N	Fe
304	0.07	17.5-19.5	2	1	0.045	0.015	8-10.5	0.1	balance
St12	0.1	-	0.5	<0.4	-	-	-	-	balance

ترکیب شیمیایی محصول ذوب اولیه در جدول ۳-۲ آورده شده است.

جدول ۳-۲. ترکیب فولاد تولید شده از ذوب اولیه (درصد وزنی).

عنصر	C	Cr	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Al	Co	Cu	N	Fe
شمش	0.013	15.9	1.17	0.34	0.027	0.006	0.03	8.62	0.017	0.2	0.04	0.1	balance

همانطور که در جدول ۳-۲ نشان داده شده است، ترکیب شمش تهیه شده دارای مقادیر مجاز از کربن، گوگرد و فسفر می باشند که نشان از خلوص بالای مواد اولیه و عدم ورود ناخالصی حین ذوب می باشد. همچنین با توجه به استفاده از فولاد ساده کربنی کم کربن در مواد اولیه، درصد عناصر آلیاژی پائین آمده است که در مرحله بعد باید ضمن ذوب مجدد ESR برای خالص سازی به مذاب اضافه گردد.

برای این منظور یک تسمه فلزی از جنس آلیاژ نیکل- کروم- مولیبدن در کوره القایی تولید خواهد شد. سپس تسمه های ریخته گری شده، به فولاد تهیه شده در مرحله ۱، جوش داده می شود و در کوره ESR ذوب می شوند تا به ترکیب نهایی فولادی با ترکیب نیکل ۱۵٪، کروم ۱۹٪ و مولیبدن ۳٪ رسانده شود.

در این مرحله نیز از سرباره های ذکر شده در مرحله ۱ استفاده خواهد شد. هدف از افزودن این سرباره ها در هر مرحله تصفیه سازی مذاب جهت کاهش اکسیژن، کربن و گوگرد می باشد.

مهمترین نکات در این مرحله ذوب ریزی به شرح ذیل می باشد:

- هرچه نرخ ذوب کردن کمتر باشد، خلوص آلیاژ بیشتر است (مقدار پیشنهادی ۰/۷ kg/min)
- شمش تولید شده در این مرحله مجدداً آنالیز خواهد شد و چنانچه مقادیر اکسیژن، کربن و گوگرد در بازه تعریف شده در استاندارد نباشد، شمش های تولیدی در کوره VIM مجدداً ذوب می شوند.
- در تمام مراحل کاری تلاش بر این است تا حتی المقدور از کوره های ذوب القایی استفاده نشود زیرا منجر به تغییر غیرکنترل شده ترکیب می گردد.
- در مرحله ذوب کردن در کوره VIM می توان از سیم های آلومینیوم به همراه کلسیم/سیلیسیم در کنار شمش تولیدی استفاده کرد که منجر به کاهش عناصر ناخواسته اکسیژن، کربن و گوگرد می شوند.

۳-۱۰ عملیات کارمکانیکی گرم و آماده سازی نمونه‌ها جهت انجام کار مکانیکی سرد

نمونه‌های ریخته‌گری شده باید به منظور شکل دهی اولیه و همچنین آماده شدن برای کارمکانیکی سرد نهایی، مورد شکل دهی گرم قرار گیرند. برای این منظور قطعات فولاد 316 LVM پس از ریخته‌گری و تایید ترکیب شیمیایی، ابتدا تحت عملیات آنیل در دمای 1050°C به مدت ۳ ساعت قرار گرفت. پس از بررسی ریزساختار و سختی، نمونه‌های آنیل شده، تحت عملیات شکل دهی نورد گرم قرار گرفتند. برای این منظور ابتدا نمونه به مدت یک ساعت در دمای 1200°C قرار گرفت. سپس با توجه به غیریکنواختی ضخامت شمش اولیه، ابتدا در ۲ پاس ضخامت یکسان گردید (ضخامت تمامی طول شمش ۲۰ میلیمتر گردید). بعد از آن در عملیات نورد گرم ضخامت اولیه (۲۰ میلیمتر) در ۵ مرحله (پاس) به ۵ میلیمتر کاهش داده شد. با توجه به زمان اندک میان هر پاس نورد، افت قابل توجهی در دمای نمونه رخ نداد و عملیات حرارتی مجدد بین پاس‌ها بر روی نمونه انجام نشد. تصویر دستگاه نورد مورد استفاده در شکل ۳-۱ و تصویر نمونه پس از نورد در شکل ۳-۲ قابل مشاهده است.

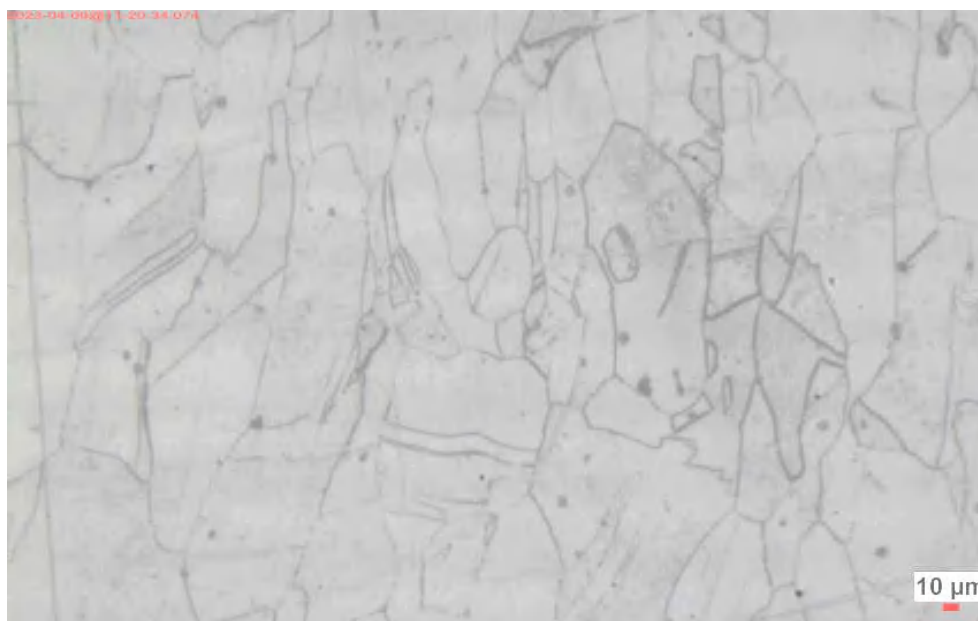


شکل ۳-۱- تصویر دستگاه نورد مورد استفاده در شرکت بلارک توس.



شکل ۲-۳- تصویر نمونه پس از نورد گرم.

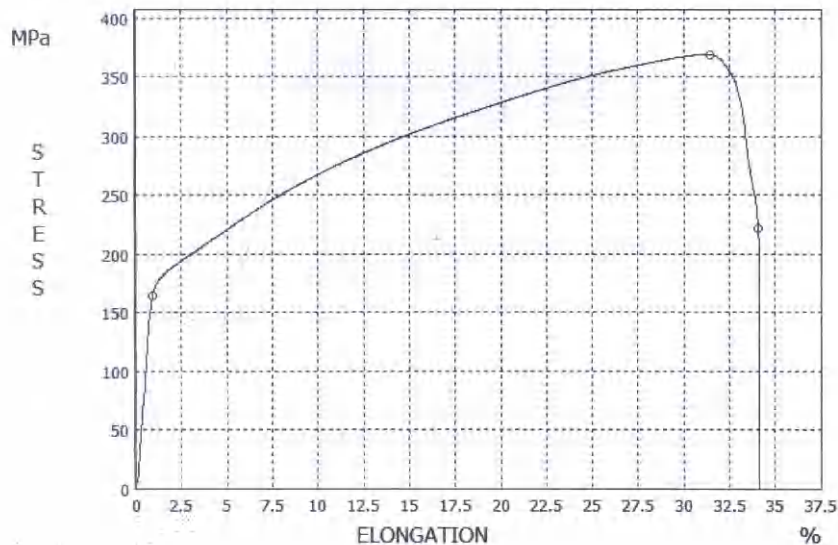
پس از انجام نورد گرم، ساختار متالوگرافی، سختی و خواص کششی نمونه تحت بررسی قرار گرفت. ریزساختار نمونه که در شکل ۳-۳ قابل مشاهده است که در آن دانه‌های آستنیتی مشخص می‌باشند. نتایج آزمون کشش و سختی سنجی در جدول ۳-۳ آورده شده است. همانطور که مشخص است، با انجام کار مکانیکی افزایش در سختی و استحکام نمونه رخ داده است.



شکل ۳-۳- تصویر ریزساختار نمونه پس از نورد گرم.

جدول ۳-۳- نتایج آزمون سختی و کشش نمونه‌ها پس از آنیل و نورد گرم

پس از آنیل	پس از نورد گرم	
۱۱۲	۱۸۳	سختی (HB)
۱۶۴	۴۴۹	تنش تسلیم ($N.mm^2$)
۳۷۰	۵۷۷	استحکام کششی ($N.mm^2$)
۳۴	۳۵	ازدیاد طول نسبی (%)



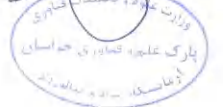
Results		
	Stress (MPa)	Elongation (%)
Peak	369.5929	31.4378
YS	164.538	0.9164
Break	222.125	34.053

Comments

Customer: Jihad Daneshgahi
Order No:-
Date Of Test: 1401/12/25
Tester: J. Saadatneshad

ID Specimen: Plate A-No.1
Order Date: 1401/12/20
Test Standard: ASTM E8

Approved by: A. Sahebham



Khorasan Science & Technology Park (KSTP)

Member of:



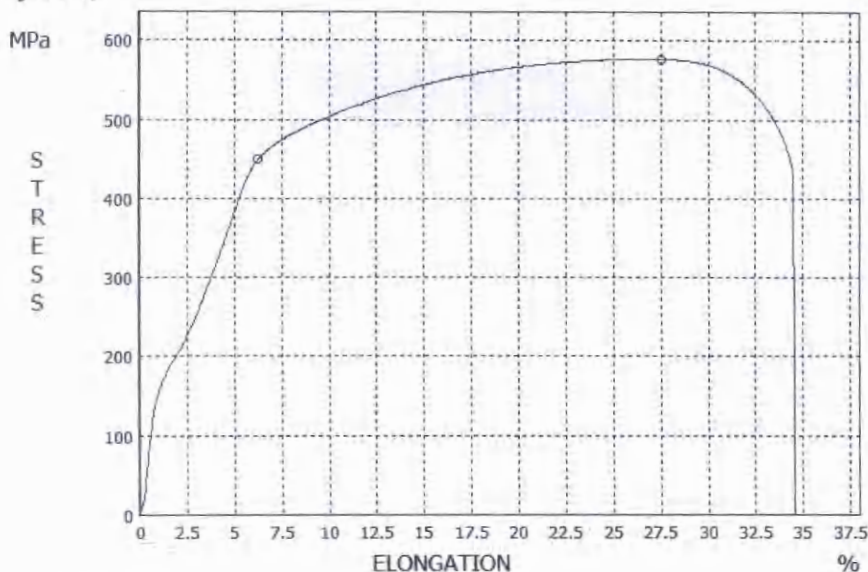
INTERNATIONAL ASSOCIATION OF SCIENCE PARKS
ASSOCIATION INTERNATIONALE DES TECHNOPOLES

نشانی دفتر خدمات فنی و آزمایشگاهی:
انتهای بلوار سجاده، خیابان امین، پلاک ۲۸
نقش
۰۵۱۳-۶۰۸۸۲۱۰
۰۵۱۳-۰۲۵۱۱-۰۵۱۳
۰۵۱۳-۵۴۴۵۶۱۳

نماینده

نشانی: مشهد، کیلومتر ۱۲ بزرگراه قوچان
ص: پ: ۹۱۷۳۵-۱۳۹
تلفن: ۰۵۱۳-۵۰۰۳۳۳۳
نماینده: ۰۵۱۳-۵۴۱۳۵۹۹
Km 12 Ghoochan Highway, Mashad, IRAN
P.O.Box 91735-139 Fax: +98 511 5413599
Tel: +98 511 5003333, info@KSTP.ir

شکل ۴-۳- گزارش نتایج آزمون کشش نمونه فولاد LVM ۳۱۶ پس از آنیل.



Results		
	Stress (MPa)	Elongation (%)
Peak	576.9717	27.5063
YS	449.5071	6.2644
*Break	436.461	34.5337

Comments

Customer: Jahad Daneshgahi ID Specimen: Plate B-No.2
Order No:- Order Date :1401/12/20
Date Of Test:1401/12/25 Test Standard: ASTM E8
Tester : J.Saadatnezhad

Approved by: A. Saheb Alam



Khorasan Science & Technology Park (KSTP)

Member of:



IASP
INTERNATIONAL ASSOCIATION OF SCIENCE PARKS
ASSOCIATION INTERNATIONALE DES TECHNOPOLES

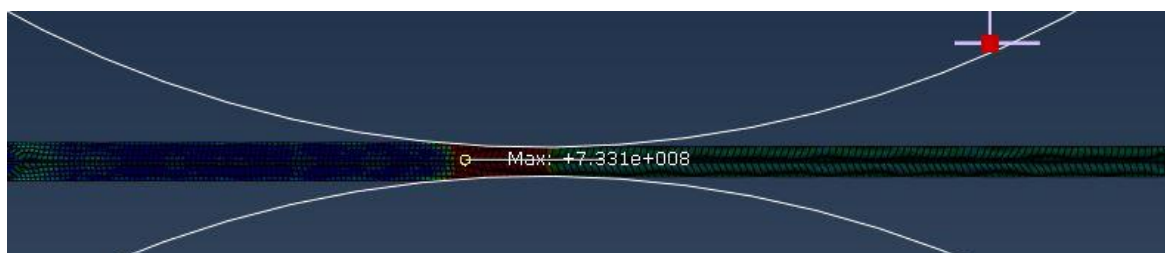
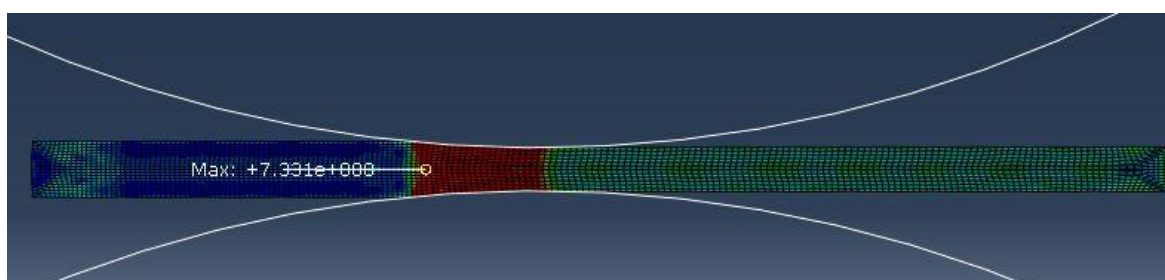
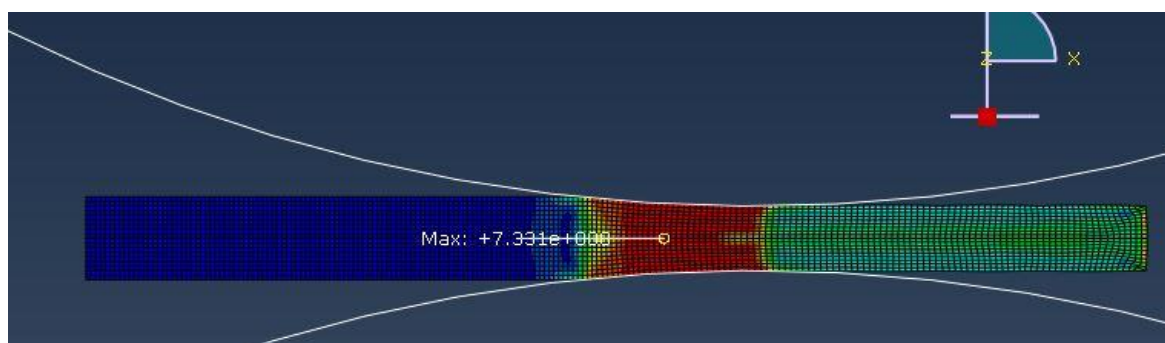
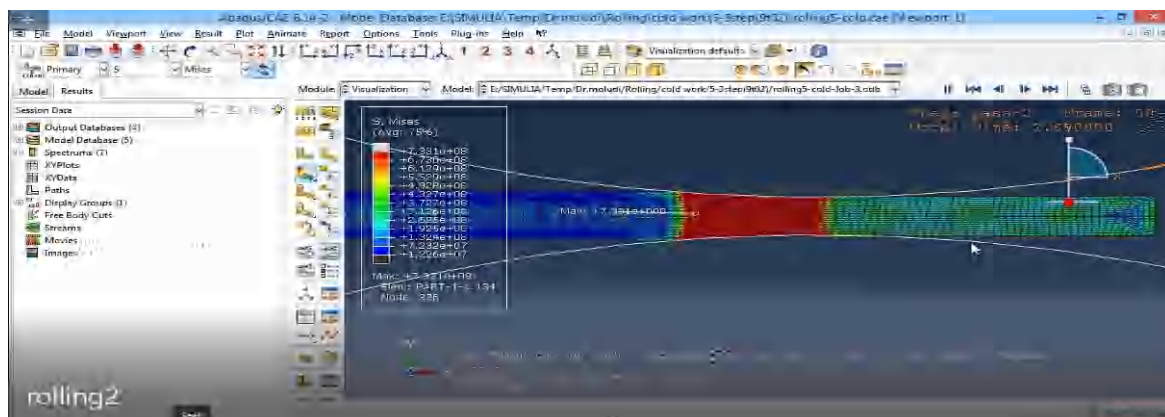
نشانی دفتر خدمات فنی و آزمایشگاهی:
انتهای بلوار سجاده، خیابان امین، پلاک ۲۸
تلفن: ۰۵۱۳-۶۰۸۸۲۱۰
۴-۵۰۰۲۵۱۱-۰۵۱۳
۰۵۱۳-۵۴۷۵۶۱۳
نماینده

نشانی مشهد، کیلومتر ۱۲ بزرگراه فوجیان
۹۱۷۳۵-۱۳۹
ص.پ: ۰۵۱۳-۵۰۰۳۳۳۳
تلفن: ۰۵۱۳-۵۴۱۳۵۹۹
نماینده
Km 12, Ghoochan Highway, Mashad, IRAN
P.O. Box 91735-139, Fax: +98 511 5413599
Tel: +98 511 5003333, info@KSTP.ir

شکل ۵-۳- گزارش نتایج آزمون کشش نمونه فولاد LVM ۳۱۶ پس از نورد گرم.

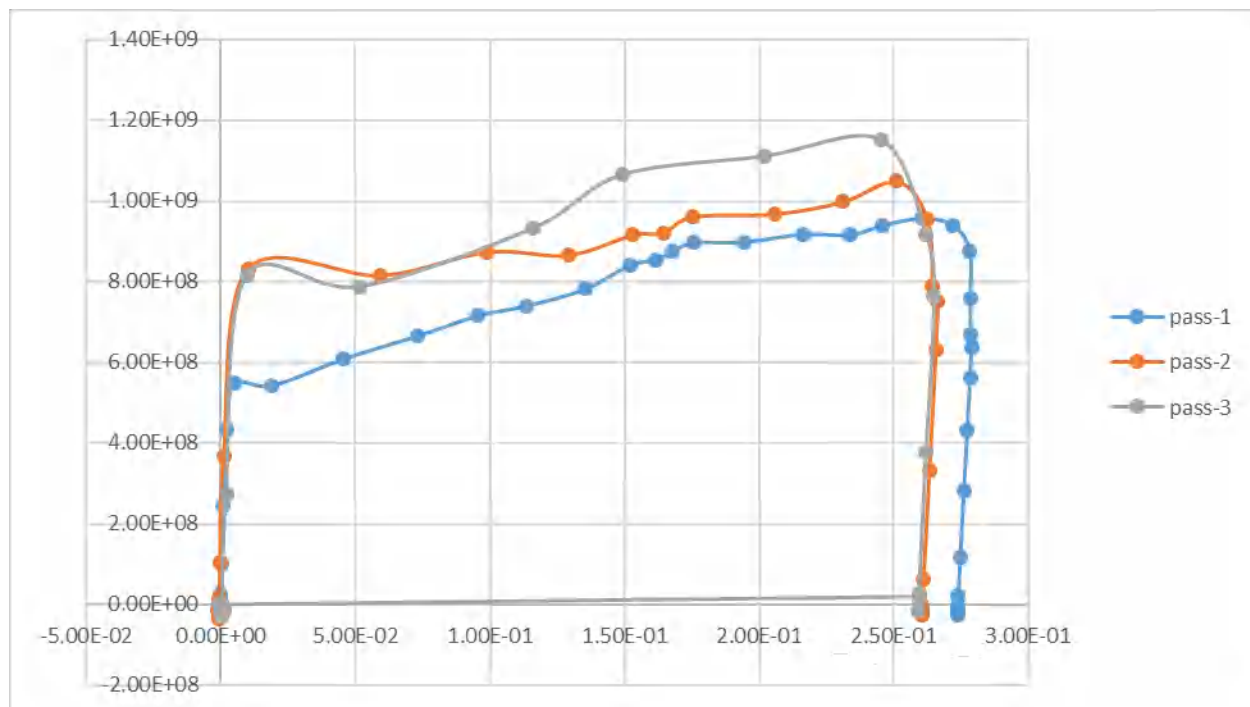
۳-۱۱ شبیه سازی فرایند کار مکانیکی سرد و تخمین خواص مد نظر برای محصول نهایی

به منظور تخمین رفتار شکل دهی ورق در نورد سرد و جلوگیری از سعی و خطای زیاد، شرایط نورد سرد این محصول توسط نرم افزار Abaqus شبیه سازی گردید. برای مشخصات خواص مکانیکی محصول اولیه از نمودارهای تنش کرنش قبلی استفاده گردید. در این فرایند نمونه اولیه ورق با عرض ۱۵۰ و ضخامت ۵ میلیمتر بود که پس از ۳ پاس نورد سرد به ضخامت ۴ میلیمتر می‌رسد. در تصویر ۳-۶-۳-۶ مراحل از انجام شبیه سازی نشان داده شده است.



شکل ۳-۶ - مراحل شبیه سازی و نحوه توزیع تنش در فرایند نورد سرد

در نمودارهای شکل ۳-۷، تخمین رفتار مکانیکی تنش-کرنش با استفاده از شبیه سازی نشاده داده شده است.



شکل ۳-۸- تخمین نمودار تنش-کرنش قطعه کار پس از سه مرحله نورد (از ۵ به ۴ میلیمتر کاهش ضخامت)

نتایج اولیه شبیه سازی به طور خلاصه عبارتند از:

- امکان انجام کار مکانیکی سرد با این میزان تغییر شکل بدون شکست نمونه وجود دارد. با بررسی مقادیر حداکثر تنش به وجود آمده در نقاط مختلف قطعه در پاس های مختلف، مشخص گردید که در هیچ کدام از قسمت ها میزان حداکثر تنش ایجاد شده در قطعه، از حد استحکام نهایی فولاد 316LVM تجاوز نمی کند.

- امکان رسیدن به خواص مکانیکی نمونه اصلی شامل استحکام تسلیم، استحکام نهایی و کرنش شکست، با انجام کار مکانیکی سرد فراهم است. مطابق با نمودارهای تنش - کرنش شبیه سازی شده با انجام سه مرحله پاس نورد، استحکام تسلیم به حدود ۸۳۰ مگاپاسکال، استحکام نهایی به ۱۱۵۰ مگا پاسکال و کرنش شکست به ۲۳٪ می رسد. این مقادیر با استاندارد فولادهای 316LVM (جدول ۴) مطابقت دارد.

۱۲-۳ نتایج کار مکانیکی سرد و رسیدن به محصول نهایی

پس از کار گرم قطعات فولاد ۳۱۶LVM مطابق مطالعات انجام شده و برخی دستورالعمل‌های موجود، پس از کار گرم قطعات آنیل خواهند شد و سپس تحت کار سرد قرار خواهند گرفت. به این منظور یک نمونه به ابعاد ۵ در ۱۰۰ میلیمتر با ضخامت ۵ میلیمتر از نمونه پس از نورد گرم آماده‌سازی شد. سپس تحت عملیات حرارتی آنیل در دمای 1050°C به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفت. تصویر این قطعه در شکل ۸-۳ آورده شده است.

به منظور انجام کار سرد، از دستگاه نورد آزمایشگاهی استفاده شد (شکل ۹-۳). کاهش ضخامت نمونه از ۵ میلیمتر به ۴ میلیمتر در دو مرحله (پاس) انجام شد.

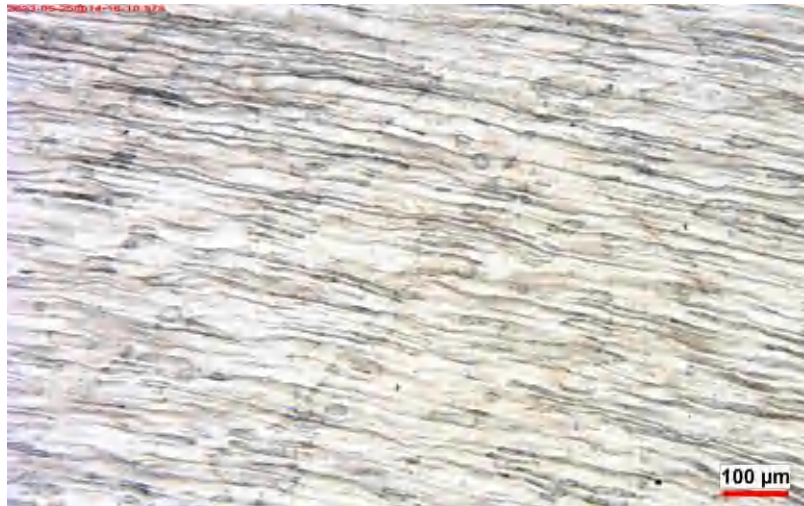


شکل ۸-۳- تصویر یکی از نمونه‌های آماده شده برای نورد سرد.



شکل ۹-۳- تصویر دستگاه نورد مورد استفاده به منظور انجام نورد در مقیاس آزمایشگاهی.

به منظور بررسی خواص قطعات پس از نورد، ریزساختار و سختی آن‌ها بررسی شد. برای این منظور یک نمونه از سطح مقطع عرضی قطعه برش و آماده‌سازی گردید. شکل ۱۰-۳، ریزساختار نمونه پس از نورد سرد را نشان می‌دهد. همانطور که در این تصویر مشاهده می‌شود، ساختار حاوی دانه‌های کشیده و ریز شده می‌باشد که مطابق با انتظار می‌باشد. نتایج سختی‌سنجی نیز نشان می‌دهد که پس از نورد سرد و ایجاد یک ساختار کشیده و دانه ریز، سختی به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به نمونه قبل از کار سرد افزایش یافته است. همانطور که در جدول شماره ۳-۴ مشاهده می‌شود، سختی نمونه پس از آنیل در حدود ۱۱۵ برینل بوده است که در اثر کار سرد (نورد) به ۲۹۰ برینل رسیده است.



شکل ۳-۱۰- تصویر ریزساختار نمونه پس از نورد سرد.

جدول ۳-۴- نتایج آزمون سختی نمونه‌ها پس از آنیل و پس از نورد سرد

نمونه آنیل شده و سپس کار سرد شده	نمونه آنیل شده پس از کار گرم	
۲۹۰	۱۱۵	سختی (HB)

نتایج نشان می‌دهد که دستیابی به ساختار و سختی مدنظر مطابق با استانداردهای موجود اتفاق افتاده است. در مرحله بعد کار سرد در مقیاس صنعتی با توجه به نتایج این بخش انجام خواهد شد.

برنامه ادامه پروژه

- ذوب نمونه‌ها در کوره‌های صنعتی مطابق با دانش کسب شده
- انجام عملیات کارمکانیکی گرم نمونه‌های صنعتی و آماده‌سازی نمونه‌ها جهت انجام کار مکانیکی سرد
- انجام کار مکانیکی سرد نمونه‌های صنعتی و رسیدن به محصول نهایی

۴- منابع و مراجع

- [1] Smith, W.F, Structure and Properties of Engineering Alloys, McGraw-Hill Book Company, (1981).
- [2] Hedstrom, P, "Deformation induced martensitic transformation of metastable stainless steel AISI 301", Lulea University of Technology, PhD thesis, (32005)
- [3] Soekrisno, Raden, Dharmastiti SR Suyitno, and Agus Suprihanto. "Evaluation of hardness, wear, corrosion resistance and magnetic properties of Austenitic Stainless Steel 316LVM by means short high temperature gas nitriding." Journal of Chemical and Pharmaceutical Research 7.12 (2015): 28-34.
- [4] Multigner, M., et al. "Influence of the sandblasting on the subsurface microstructure of 316LVM stainless steel: Implications on the magnetic and mechanical properties." Materials Science and Engineering: C 29.4 (2009): 1357-1360.
- [5] Metals Handbook, Metallography and Microstructures, American Society for Metals, 8th ed., Vol.9, 1980.
- [۶] گل‌عذار، م.ع، اصول و کاربرد عملیات حرارتی فولادها، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۱.
- [7] Metals Handbook, Heat Treating, American Society for Metals, 9th ed., Vol.4, 1981.
- [8] Multigner, M., et al. "Superficial severe plastic deformation of 316 LVM stainless steel through grit blasting: Effects on its microstructure and subsurface mechanical properties." Surface and Coatings Technology 205.7 (2010): 1830-1837.
- [9] Chobaut, N., et al. "Miniaturized tube fixed plug drawing: Determination of the friction coefficients and drawing limit of 316 LVM stainless steel." Journal of Materials Processing Technology 263 (2019): 396-407.
- [10] Barriuso, Sandra, et al. "Improvement of the blasting induced effects on medical 316 LVM stainless steel by short-term thermal treatments." Surface and Coatings Technology 258 (2014): 1075-1081.
- [۱۱] حبیب الله زاده، ع. انجماد فولادهای زنگ نزن آستنییتی، کنفرانس انجمن مهندسين متالورژی، ۱۳۷۶.
- [12] Ura-Bińczyk, E., et al. "Mechanical properties and corrosion resistance of hydrostatically extruded 316 LVM stainless steel after low-temperature plasma nitriding." Surface and Coatings Technology 375 (2019): 565-572.
- [13] Ahmadi, S., S. M. M. Hadavi, and A. Shokuhfar. "Evaluation of deoxidation process in medical grade of 316L stainless steel." International Journal of Iron & Steel Society of Iran 3.2 (2006): 22-28.
- [14] Krawczynska, A. T., et al. "Mechanical properties of nanostructured 316LVM stainless steel annealed under pressure." Mechanics of Materials 67 (2013): 25-32.
- [15] Ahmadi, S., et al. "Evaluation of the electroslog remelting process in medical grade of 316LC stainless steel." Journal of materials science & technology 25.5 (2009): 592.

- [16] Standard Specification for Wrought 18 Chromium- 14 Nickel- 2.5 Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673)1, (2008).
- [17] Standard Specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Sheet and Strip for Surgical Implants (UNS S31673), (2012).
- [18] S.V. Bhat: Biomaterials, Alpha Science International Ltd., New Delhi, India, 2002, 13.
- [19] J.R. Davic: Handbook of Materials for Medical Devices, ASM Int., New York, 2003, 51.
- [20] F.H. Silver: Biomaterials Medical Devices and Tissue Engineering, Chapman & Hall, New Jersey, 1994, 4.
- [21] G. Hoyle: Electroslog Remelting Process, Science Publisher Company, 1983, 5.
- [22] H.J. Mueller-Aue, D. Hengerer and W. Holzgruber: Trans. Indian Inst. Met., 1980, 33(2), 85.
- [23] A.C. Kell: Metals Hand Book, Elsevier Publication, 1995, 401.
- [24] A.F.V. Recum: Handbook of Biomaterials Evaluation, Taylor and Franeis, London, 1999, 13.
- [25] G.L. Winters and M.J. Nutt: Stainless Steel for Medical and Surgical Applications, ASM Int., New York, 2003, 3.
- [26] J.A. Disegi and L. Eschbach: Injury, 2000, 31(Suppl.4), D2.
- [27] P.O. Mellberg and H. Sandberg: Scand. J. Metall., 1973, 2, 83.
- [28] A. Mitchell and R.M. Smailer: Int. Metal. Rev., 1979, 5-6, 231.
- [29] S. Ahmadi, H. R. Shahverdi and H. Arabi. “EFFECTS OF ELECTRO-SLAG REMELTING PROCESS (ESR) ON MACROSTRUCTURE AND REFINEMENT OF A MEDICAL GRADE OF STAINLESS STEEL” Iranian Journal of Materials Science & Engineering 11 (2014):11.
- [30] T. Kekesi and M. Isshiki, “Principles of Metal Purification and Purity Evaluation”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002.
- [31] M. Isshiki, Y. Fukuda, K. Igaki: Trans. Japan Inst. Metals 27, 449 (1986).
- [32] Cong Zhang, Kuixian Wei, Damin Zheng, Wenhui Ma, Yongnian Dai “Phosphorus removal from upgraded metallurgical-grade silicon by vacuum directional solidification” Vacuum journal, (2014).
- [33] Shin-ya Kitamura et al, Dephosphorization Reaction of Chromium Containing Molten Iron by CaO-based Flux, ISIJ International vol 34 (1993):5, 401-407.