



تدوین دانش فنی تولید فولادهای زنگ نزن گرید LVM۳۱۶ و

فولادهای ضد زنگ بسیار نازک Ultrathin sheet

(گزارش مقطع سوم)

گروه پژوهشی مواد نوین

سازمان جهاددانشگاهی استان خراسان رضوی

پاییز ۱۴۰۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

شناسنامه گزارش

عنوان گزارش: گزارش مقطع سوم

شماره ویرایش: اول

عنوان فارسی طرح پژوهشی: تدوین دانش فنی تولید فولادهای زنگ نزن گرید LVM۳۱۶ و فولادهای ضد زنگ بسیار نازک Ultrathin sheet

عنوان انگلیسی طرح: Development of technical knowledge for the production of 316LVM stainless steels and Ultrathin sheet 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 تألیف‌کننده اصلی: ۰۵۱-۳۱۹۹۷۴۷۱

نشانی پست الکترونیک تألیف‌کننده اصلی: ahmad_moloodi@yahoo.com

این سند به همه همکارانی که برای انجام کارهای پژوهشی در کشور بی‌دریغ کوشش می‌نمایند، تقدیم می‌شود.

چکیده

فولاد زنگ نزن آستنییتی 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 انتهای 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 یا هدف ارزیابی آورده شده است.

فهرست

فصل اول: مقدمه	۸
۱- ۱- مقدمه	۹
فصل دوم: مروری بر منابع	۱۱
۱- ۲- فولادهای زنگ نزن	۱۲
۲- ۲- فولادهای زنگ نزن آستنیتی	۱۳
۳- ۲- فولاد زنگ نزن آستنیتی 316LVM	۱۵
۴- ۲- تأثیر عناصری آلیاژی	۱۶
۵- ۲- ریزساختار فولادهای آستنیتی	۱۷
۶- ۲- فرایند انجماد فولادهای زنگ نزن آستنیتی	۱۹
۶- ۲- ۱- انواع مکانیزم های انجماد	۱۹
۷- ۲- خواص مکانیکی فولادهای آستنیتی	۲۲
۸- ۲- روش های استحکامدهی فولادها	۲۳
۹- ۲- تغییر شکل سرد و آنیل فولاد زنگ نزن آستنیتی	۲۴
۱۰- ۲- استانداردهای کاربردی در راستای تولید فولاد 316LVM	۲۵
۱۰- ۲- ۱- بررسی استاندارد F138	۲۶
۱۰- ۲- ۱- ۱- مواد و روند ساخت	۲۶
۱۰- ۲- ۱- ۲- الزامات ترکیب شیمیایی	۲۶
۱۰- ۲- ۱- ۳- الزامات متالورژیکی	۲۷
۱۰- ۲- ۱- ۴- خواص مکانیکی	۲۷
۱۰- ۲- ۱- ۵- آزمون های ویژه	۲۸
۱۱- ۲- روش پیشنهادی جهت انجام ذوب و ریخته گری فولاد	۲۹
۱۱- ۲- ۱- ذوب در کوره القایی	۲۹
۱۱- ۲- ۱- ۱- مقدمه و اهمیت فرآیند	۲۹

۳۰	۲-۱۱-۱-۲ - روش انجام فرآیند ذوب فولاد 316LVM
۳۲	۲-۱۱-۱-۳ - ذوب در کوره تحت اتمسفر خلاء یا گاز خنثی
۳۴	فصل سوم: مواد و روش ساخت
۳۵	۳-۱- روند کلی تولید
۳۶	۳-۲- لیست مراکز و شرکت های خدمات دهنده
۳۷	۳-۳- مشخصات فنی فولاد 316LVM
۳۷	۳-۳-۱- آنالیز شیمیایی و خواص مکانیکی
۴۲	۳-۴- ریزساختار متالوگرافی
۴۶	۳-۵- سختی سنجی
۴۷	۳-۶- رفتار خوردگی
۴۸	۳-۷- نتایج ذوب در کوره خلاء
۴۹	منابع و مراجع

۱- فصل اول: 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 ۱۰/۵٪ 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 نزن آستنیتی

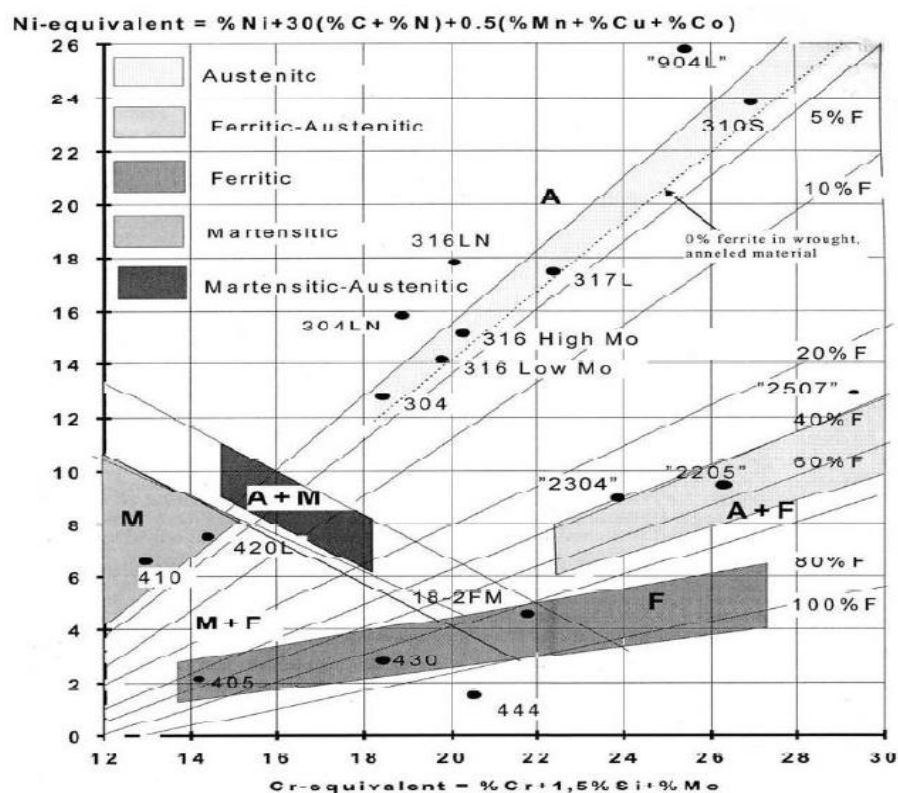
در نمودار شفلر (شکل ۱) فولادهای آستنیتی کم آلیاژ در گوشه چپ نمودار نزدیک به ناحیه فولادهای مارتنزیتی قرار گرفته‌اند که فولادهای زنگ نزن آستنیتی نیمه پایدار نامیده می‌شوند. در این دسته از فولادها آستنیت در اثر تغییر شکل به مارتنزیت تبدیل می‌شود. آستنیت در فولادهای آستنیتی پرآلیاژ، پایدارتر بوده و در اثر 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 نزن 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 316L 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

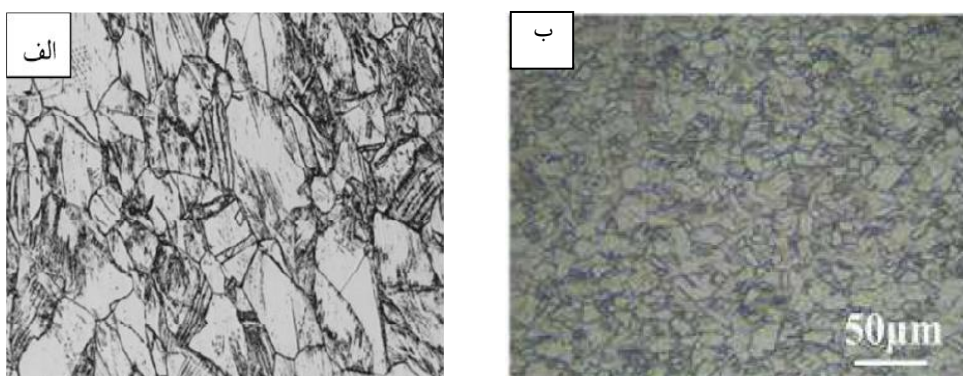
ریزساختار ایده آل فولادهای زنگ نزن آستنیتی فقط شامل آستنیت است اما به علت جدایش در ضمن انجماد، فریت تمایل دارد که تشکیل شود که در فولادهای زنگ نزن آستنیتی ریخته‌گری و جوشکاری شده اغلب دیده می‌شود.

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.

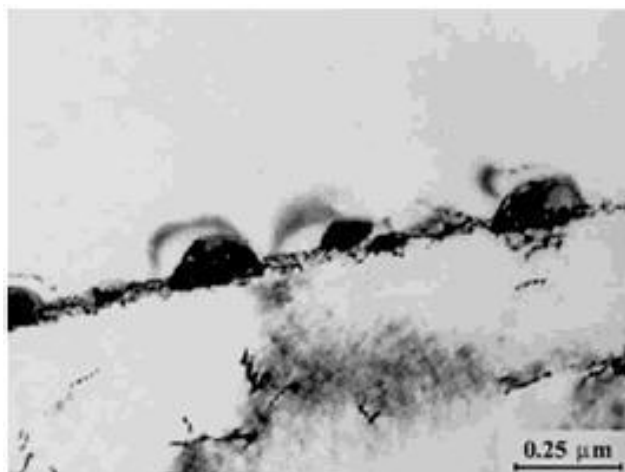
در شکل ۲ ریزساختار نوری این فولادها که علاوه بر فاز آستنیت حاوی باندهای برشی و مارتنزیت نیز است، نشان داده شده است. در شکل ۲-ب، ساختار ریزدانه فولادهای 316LVM که اندازه دانه متوسط ۱۰ میکرومتر دارد، نشان داده شده است.

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 زن 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 مکانیزم های 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

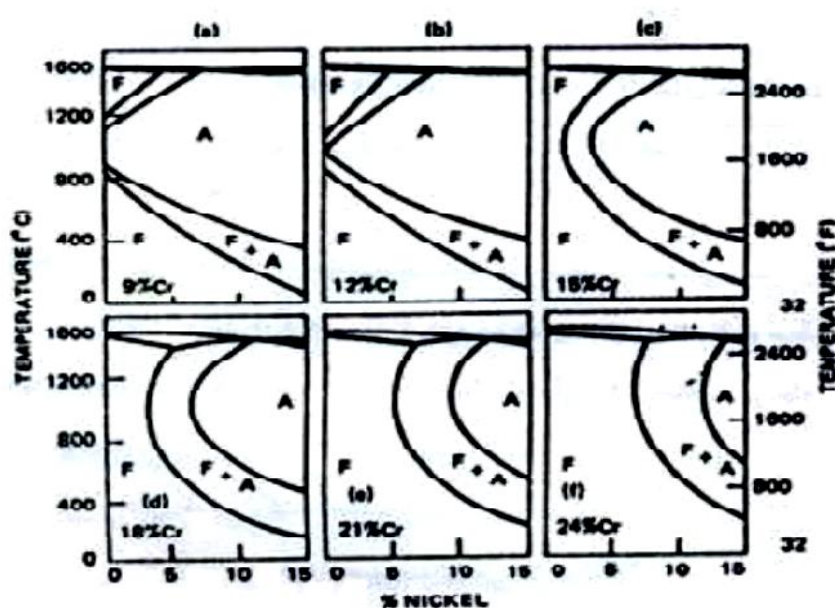
^۱sigma

^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:

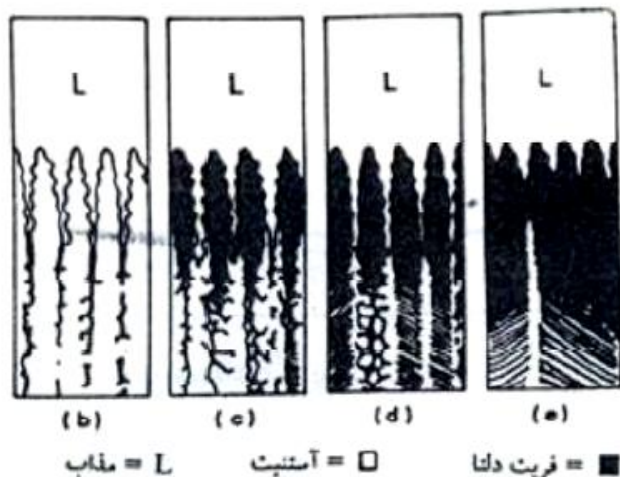
۱- انجماد تکفازی آستنیتی: مذاب صرفاً تبدیل به آستنیت شده و در دماهای بالا هیچ استحاله دیگری صورت نمی‌گیرد.

۲- انجماد دو فازی آستنیتی- فریتی: فاز رسوبی اولیه آستنیت بوده و قبل از تکمیل انجماد مابقی مذاب تبدیل به فریت می‌گردد.

۳- انجماد دو فازی فریتی-آستنیتی: فریت، فاز رسوبی اولیه از مذاب بوده (فریت اسکلتی) بواسطه واکنش پریتهکتیکی و یا یوتکتیکی میان سه فاز مذاب، فریت و آستنیت، فاز آستنیت در میان دندریتهای فریت رسوب نموده و در ادامه انجماد، آستنیت موجود ضمن پیشروی در مذاب، به داخل فریت دلتا نیز رشد می‌نماید. در این حالت کاهش شدید درصد حجمی فریت دلتا حاصل خواهد شد. البته در اثر بروز جدایش عناصر آلیاژی فریت زا، همواره مقادیری کمی فریت در آخرین مراحل انجمادی در میان دندریتهای باقی خواهد ماند.

۴- انجماد تک فازی فریتی: فریت تنها فاز در حین انجماد بوده و پس از اتمام انجماد، آستنیت بطور ترجیحی در مرزخانه‌ها جوانه زده و توسط مکانیزم ویدمنشتاتن در داخل فریت رشد می‌نماید.

شکل ۵ الگوی انجمادی هر یک از گونه‌های فوق را نشان می‌دهد. البته در تقسیم بندی فوق دو مشکل وجود دارد و آن تفکیک دقیق میان گونه‌های مختلف انجمادی است. به نحوی که برخی معتقدند در انجماد نوع اول بواسطه بروز جدایش تا حدودی فریت دلتا تشکیل می‌گردد. دیگر اینکه گاهی انجماد نوع دوم و سوم در کنار یکدیگر و بطور همزمان بوقوع می‌پیوندند. طبق مطالب فوق، زمینه اصلی در فولادهای زنگ نزن آستنیتی، فاز آستنیت 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 یا جامد موجود در زمینه فولاد و در لابلای دندریتهای آستنیتی رسوب کرده و تا دمای محیط پایدار می‌ماند [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]:

$$\sigma = \sigma_0 + Kd^{-0.5} \quad (2-1)$$

$$HV = HV_0 + K'd^{-0.5} \quad (2-2)$$

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** (HB) (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.	۰/۰۴	حداکثر ۲	Mn
	۰/۰۰۵	حداکثر ۰/۰۲۵	P
	۰/۰۰۵	حداکثر ۰/۰۱۰	S
	۰/۰۵	حداکثر ۰/۷۵	Si
	۰/۲۰	۱۷-۱۹	Cr*
	۰/۱۵	۱۳-۱۵	Ni
	۰/۱۰	۲/۲۵ - ۳	Mo*
	۰/۰۱	حداکثر ۰/۱۰	N
	۰/۰۳	حداکثر ۰/۵۰	Co
	-	باقیمانده	Fe**

۲- ۱۰- ۱- ۳- الزامات متالورژیکی

- در ریزساختار این فولاد با بزرگنمایی $100\times$ ، نباید فازهای دلتا فریت، چس^۱ و سیگما^۲ مشاهده شود. متالوگرافی و حکاکی^۳ این فولاد باید مطابق با استاندارد E407 انجام شود.

- ساختار فولاد از نظر تمیزی^۴ 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

۲- ۱۰- ۱- ۴- خواص مکانیکی

- خواص کششی

^۱Chi

^۲Sigma

^۳Etch

^۴Microcleanliness

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 تایید 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.

^۱Sensitization heat treatment

- محصول باید دارای اندازه دانه ASTM ۵ یا ریزتر باشد. اندازه‌گیری اندازه دانه باید بعد از کارگرم 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 زنگ‌نزن مانند 316LVM، به طور گسترده‌ای برای تولید ایمپلنت‌های ارتوپدی و پروتزها استفاده می‌شود. این نوع از فولادهای زنگ‌نزن در دسته «فولادهای شدت 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 (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].

در مقایسه با فولاد 316L بعنوان گرید صنعتی فولادهای زنگ‌نزن، 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 سالدوس 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 CaO ، Al_2O_3 و CaF_2 تشکیل می‌شود.

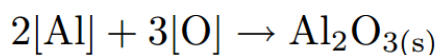
۲-۱۱-۲ - روش انجام فرآیند ذوب فولاد 316LVM

جهت ساخت شمش‌های اولیه، از آهن خالص، نیکل و منیزیم با فروکروم و فرومولیبدن کم کربن بعنوان شارژ اولیه کوره القایی استفاده می‌شود. فرآیند آلیاژسازی تحت اتمسفر گاز خنثی (آرگون با خلوص بالا) انجام می‌شود. بمنظور اکسیژن‌زدایی استفاده از وایرهای آلومینیومی و کلسیم-سیلیکونی پیشنهاد

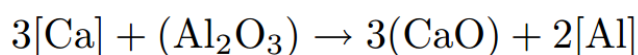
می‌شود. مقادیر عناصر فلزی با استفاده از اسپکترومتر و عناصر غیرفلزی مانند اکسیژن، کربن و سولفید با استفاده از آنالیزور کربن-سولفید-گاز (CHONS) تعیین می‌شود.

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 شمش مورد نظر با نرخ ذوب معین ذوب می‌شود (ماکزیمم دمای 1773 K دمایی با ماکزیمم قابلیت فوسفرزدایی). جهت بررسی مورفولوژی و ترکیب آخال‌ها از میکروسکوپ الکترونی و آنالیز EDS استفاده می‌شود.

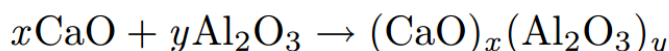
کنترل مقادیر گوگرد، فسفر و اکسیژن (با شرط رطوبت‌زدایی و چربی‌زدایی شارژ) بعنوان عوامل موثر بر کاهش خواص خوردگی و مکانیکی این دسته از فولادها نیازمند اعمال تکنیک‌های مناسب حین فرآیندهای ذوب است. حین اکسیژن‌زدایی از شمش‌های اولیه با وایر آلومینیوم یا کلسیم-سیلیکون، آخال‌هایی طبق واکنش‌های ۲-۴ ایجاد می‌شوند.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



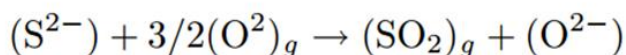
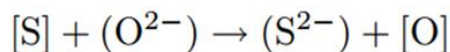
$$\Delta G_{1873\text{ K}}^0 = -1075103.6(\text{J})$$



$$\Delta G_{1873\text{ K}}^0 = -213573(\text{J})$$



اثر ترکیب سرباره الکتریکی در روش ESR بر میزان اکسیژن زدایی و گوگرد زدایی از مقایسه آنالیز شمش قبل و پس از فرآیند تعیین می شود. کاهش گوگرد حین فرآیند ESR با دو مکانیسم صورت می گیرد :



۱- واکنش بین سرباره (بخصوص CaF_2) با آخال های سولفیدی و ۲- واکنش بین گوگرد با اکسیژن موجود در اتمسفر ذوب. این واکنش ها بصورت زیر انجام می شوند:

حذف آخال ها در فرآیند ESR توسط حرکت چرخشی مذاب در زیر حمام سرباره تحت تاثیر قرار می گیرد. مکانیسم های اصلی برای کاهش آخال ها در حمام مذاب و سرباره شامل شناورسازی آخال ها روی حمام مذاب، چسبیدن آخال ها 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 می شود. در حین انجماد، جدایش فسفر در مرزهای دانه منجر به تردی سرد می شود. دردهماهای پایین تر این پدیده حتی جدی تر است. در فولادسازی معمولی، فسفر با اکسید کردن آن به سرباره رفته و سپس با حذف سرباره، حذف می شود. در تولید فولاد ضدزنگ 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 می آید. بمنظور دستیابی به حداکثر میزان فسفر زدایی کنترل عواملی چون دمای ماکزیمم فرآیند، ترکیب و بازیسیته سرباره در فرآیند ESR و ... موثر است [۲۹].

۲-۱۱-۳- 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 می شوند با اکسیژن یا نیتروژن اتمسفر واکنش نشان می دهند. 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.

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 316 LVM	مواد اولیه	
آزمایشگاه انرژی‌های تجدیدپذیر، مغناطیس و نانوتکنولوژی گروه فیزیک دانشکده علوم فردوسی	کوره ذوب خلا	ساخت	
آزمایشگاه متالورژی رازی			
شرکت پایدار فلز ویرا	کشش سرد		
گروه صنعتی صبا			
گروه صنعتی آتروپارت			
آزمایشگاه متالورژی رازی	آزمون کشش	بررسی و آنالیز نمونه	
آزمایشگاه خواص مکانیکی فردوسی			
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		
شرکت آلومینیوم رضا	کوانتومتری		
آزمایشگاه مرکزی فردوسی	ICP		آنالیز ترکیب شیمیایی
آزمایشگاه متالورژی رازی			
ریحان آزما	شیمی تر		
آزمایشگاه خوردگی دانشگاه فردوسی	آزمون حساسیت به خوردگی بین دانه ای		
آزمایشگاه انرژی‌های 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	
Ihr Zeichen und Bestelldatum / Customer Identity and Order No Date / N° de commande et Date E-mail 09.08.2018		Ihr Ansprechpartner / Contact Person / Notre Contact Wilk, Nadine +49 2335/977-415	
bright stainless steel bars grade X 2 CrNiMo 18153 (1.4441 ESU-remelt) acc. to 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		Ihr Ansprechpartner QM / Contact Person QM / Notre Contact QM 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-00028568 Dicke : 5.000 Tol. : + 0.000 / -0.018 mm Breite : Tol. : Profil : 0 Länge : 3000.000 - 3100.000 mm	
		Versanddatum/ Shipping date / Date d'expédition : 28.02.2019 Liefergewicht / Weight of Delivery / Poids Livré : 150.00 kg	
Heat-No.: / No de colee / Chargennr.: 074-61234-18 Erschmelzung : ESU Blockguss			
Schmelzanalyse [Angaben in Gewichtsprozent [%]			
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
Zugversuch gemäß DIN EN ISO 6892			
Abmessung		RP 0.2	RM A4 A5
mm		[(N/mm ²)-MPa]	[(N/mm ²)-MPa] [%]
Sollwerte :		min 862	min 1100 min 12 min 12
Istwerte		1 4.992 1084	1271 27 22
		2 4.993 1084	1269 29 23
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, Staboberfläche 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:			
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		EZM EdelstahlZieherei Mark GmbH Nordstraße 14 • 58300 Wetter Postfach 41 63 • 58294 Wetter	

28/2

EZM Edelstahlzieherei Mark GmbH	Werkssachverständige /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		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	
Ihr Zeichen und Bestelldatum / Customer Identity and Order No Date / N° de commande et Date E-mail 09.08.2018		Ihr Ansprechpartner / Contact Person / Notre Contact Wilk, Nadine +49 2335/977-415	
bright stainless steel bars grade X 2 CrNiMo 18153 (1.4441 ESU-remelt) acc. to ISO 5832-1 2007 and ASTM F 138-08 cold drawn, ground and polished tolerance h7 tensile strength 950-1080 N/mm² test certificate EN 10204/3.1		Ihr Ansprechpartner / Contact Person / Notre Contact Herr R. Naumann, Tel.: +49 (0)2335/ 977-474	
		EZM - Auftragsnummer : CA-00119464 / 20 Supplier reference / N° d ordre fournisseur : Lieferschein / Prod.-Nr. : CL-00232876-20 / FA-00028523 Dicke : 6.000 Tol. : + 0.000 / -0.012 mm Breite : Tol. : Profil : 0 Länge : 3000.000 - 3050.000 mm Versanddatum/ Shipping date / Date d'expédition : 28.02.2019 Liefergewicht / Weight of Delivery / Poids Livré : 13.00 kg	
Heat-No.: / No de cotee / Chargenr.: 039-860112/227-1 Erschmelzung : ESU Blockguss			
Schmelzanalyse [Angaben in Gewichtsprozent %]			
C	SI	MN	P S CR MO NI CU N C-Wert
0.0210	0.6100	1.7400	0.0160 0.0010 17.3400 2.7300 13.8500 0.0700 0.0980 26.3490
Zugversuch gemäß DIN EN ISO 6892			
Abmessung		RP 0.2	RM A4 A5
Einheit : mm		[(N/mm²)-MPa]	[(N/mm²)-MPa] [%] [%]
Sollwerte :		min 690	950 - 1080 min 15 min 15
Istwerte	1 5.991	827	980 31 27
	2 5.990	839	979 27 23
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, rissgeprüft und auf Maß kontrolliert. Identity checked (spectrometry). Ultrasonic or equivalent test for voids in billets. Inspections carried out: Crack test and control of dimension accuracy. Fe = Balance Korngröße gemäß DIN-EN ISO 643 / ASTM E 112: 9.0 - 10.0 Grain size in accordance with DIN-EN ISO 643 / ASTM E 112: 9.0 - 10.0 Mikroreinheitsgrad nach ISO 4967 / ASTM E 45, Methode A: Microscopic cleanliness in acc. with ISO 4967 / ASTM E 45, Methode A: A dünn / thin = 0.0 A dick / heavy = 0.0 B dünn / thin = 0.0 B dick / heavy = 0.0 C dünn / thin = 0.0 C dick / heavy = 0.0 D dünn / thin = 1.5 D dick / heavy = 0.5			
		EZM Edelstahlzieherei Mark GmbH Nordstraße 14 • 58300 Wetter Postfach 41 63 • 58294 Wetter	
			

EZM Edelstahlzieherei Mark GmbH Werkssachverständige H.: 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		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																							
Ihr Zeichen und Bestelldatum / Customer Identity and Order No Date / N° de commande et Date E-mail 09.08.2018		Ihr Ansprechpartner / Contact Person / Notre Contact Wilk, Nadine +49 2335/977-415																							
bright stainless steel bars grade X 2 CrNiMo 18153 (1.4441 ESU-remelt) acc. to ISO 5832-1 2007 and ASTM F 138-08 cold drawn, ground and polished tolerance h7 tensile strength 950-1080 N/mm ² test certificate EN 10204/3.1		Ihr Ansprechpartner QM / Contact Person QM / Notre Contact QM Herr R. Naumann, Tel.: +49 (0)2335/ 977-474																							
		EZM - Auftragsnummer : CA-00119464 / 20 Supplier reference / N° d'ordre fournisseur Lieferschein / Prod.-Nr. : CL-00232876-20 / FA-00029955 Dicke : 6.000 Tol. : + 0.000 / -0.012 mm Breite : Tol. : Profil : 0 Länge : 3000.000 - 3050.000 mm Versanddatum/ Shipping date / Date d'expédition : 28.02.2019 Liefergewicht / Weight of Delivery / Poids Livré : 495.00 kg																							
Heat-No. / No de coque / Chargeur: 039-860262/463-1 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>0.0170</td> <td>0.6700</td> <td>1.7400</td> <td>0.0140</td> <td>0.0010</td> <td>17.2600</td> <td>2.7400</td> <td>13.6700</td> <td>0.0900</td> <td>0.0940</td> <td>26.3020</td> </tr> </tbody> </table>				C	SI	MN	P	S	CR	MO	NI	CU	N	C-Wert	0.0170	0.6700	1.7400	0.0140	0.0010	17.2600	2.7400	13.6700	0.0900	0.0940	26.3020
C	SI	MN	P	S	CR	MO	NI	CU	N	C-Wert															
0.0170	0.6700	1.7400	0.0140	0.0010	17.2600	2.7400	13.6700	0.0900	0.0940	26.3020															
Zugversuch gemäß DIN EN ISO 6892 Abmessung RP 0.2 RM A4 A5 Einheit : mm [(N/mm ²)-MPa] [(N/mm ²)-MPa] [%] [%] Sollwerte : min 690 950 - 1080 min 15 min 15 Istwerte : 1 5.991 872 1021 30 25 2 5.996 841 1009 27 23																									
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 (Spektrum), US- oder äquivalentes Verfahren auf Lunker im Vormaterial geprüft, rissgeprüft und auf Maß kontrolliert. Identity checked (spectrometry). Ultrasonic or equivalent test for voids in billets. Inspections carried out: Crack test and control of dimension accuracy. Fe = Balance Korngröße gemäß DIN-EN ISO 643 / ASTM E 112: 9.0 - 10.0 Grain size in accordance with DIN-EN ISO 643 / ASTM E 112: 9.0 - 10.0 Mikroreinheitsgrad nach ISO 4967 / ASTM E 45, Methode A: Microscopic cleanliness in acc. with ISO 4967 / ASTM E 45, Methode A: A dünn / thin = 0.0 A dick / heavy = 0.0 B dünn / thin = 0.0 B dick / heavy = 0.0 C dünn / thin = 0.0 C dick / heavy = 0.0 D dünn / thin = 1.0 D dick / heavy = 0.5																									
		EZM Edelstahlzieherei Mark GmbH Nordstraße 14 - 58300 Wetter Postfach 41 63 - 58294 Wetter 																							

EZM Edelstahlzieherei Mark GmbH - Nordstraße 14 - 58300 Wetter		Abnahmezeugnis INSPECTION CERTIFICATE CERTIFICAT DE RECEPTION 3.1 nach DIN EN 10204																															
Osveh Asia Medical Instrument Co. No:139, 2nd Sanat St., Sanat Bly, IR-. Mashhad																																	
Ihr Zeichen und Bestellnummer / Customer Identity and Order No Date / N° de commande et Date E-mail 09.08.2018		Ihr Ansprechpartner / Contact Person / Notre Contact Wilk, Nadine +49 2335/977-415																															
bright stainless steel bars grade X 2 CrNiMo 18153 (1.4441 ESU-romelt) acc. to ISO 5832-1 2007 and ASTM F 138-08 cold drawn, ground and polished tolerance h8 tensile strength min. 1200 N/mm² test certificate EN 10204/3.1		Ihr Ansprechpartner QM / Contact Person QM / Notre Contact QM Herr R. Naumann, Tel.: +49 (0)2335/ 977-474 EZM - Auftragsnummer : CA-00119464 / 150 Supplier reference / N° d'ordre fournisseur : Lieferschein / Prod.-Nr. : CL-00232876-150 / FA-00028566 Dicke : 4.500 Tol. : + 0.000 / -0.018 mm Breite : Tol. : Profil : 0 Länge : 3000.000 - 3100.000 mm Versanddatum/ Shipping date / Date d'expédition : 28.02.2019 Liefergewicht / Weight of Delivery / Poids Livré : 150.00 kg																															
Heat-No.: / No de coque / Chargement: 074-61234-18 Erschmelzung : 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>				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								
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																							
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>Einheit</th> <th>mm</th> <th>[(N/mm²)-MPa]</th> <th>[(N/mm²)-MPa]</th> <th>[%]</th> <th>[%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sollwerte</td> <td></td> <td>min 862</td> <td>min 1200</td> <td>min 12</td> <td>min 12</td> </tr> <tr> <td>Istwerte</td> <td>1</td> <td>4.491</td> <td>1167</td> <td>1347</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2</td> <td>4.490</td> <td>1132</td> <td>1345</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table>				Abmessung		RP 0.2	RM	A4	A5	Einheit	mm	[(N/mm²)-MPa]	[(N/mm²)-MPa]	[%]	[%]	Sollwerte		min 862	min 1200	min 12	min 12	Istwerte	1	4.491	1167	1347	28		2	4.490	1132	1345	25
Abmessung		RP 0.2	RM	A4	A5																												
Einheit	mm	[(N/mm²)-MPa]	[(N/mm²)-MPa]	[%]	[%]																												
Sollwerte		min 862	min 1200	min 12	min 12																												
Istwerte	1	4.491	1167	1347	28																												
	2	4.490	1132	1345	25																												
Das Material ist frei von Delta - Ferrit, Chi und Signaphase. 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, Staboberfläche 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: 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		Zeichen des Lieferanten / Prüfstempel: EZM QA 																															

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

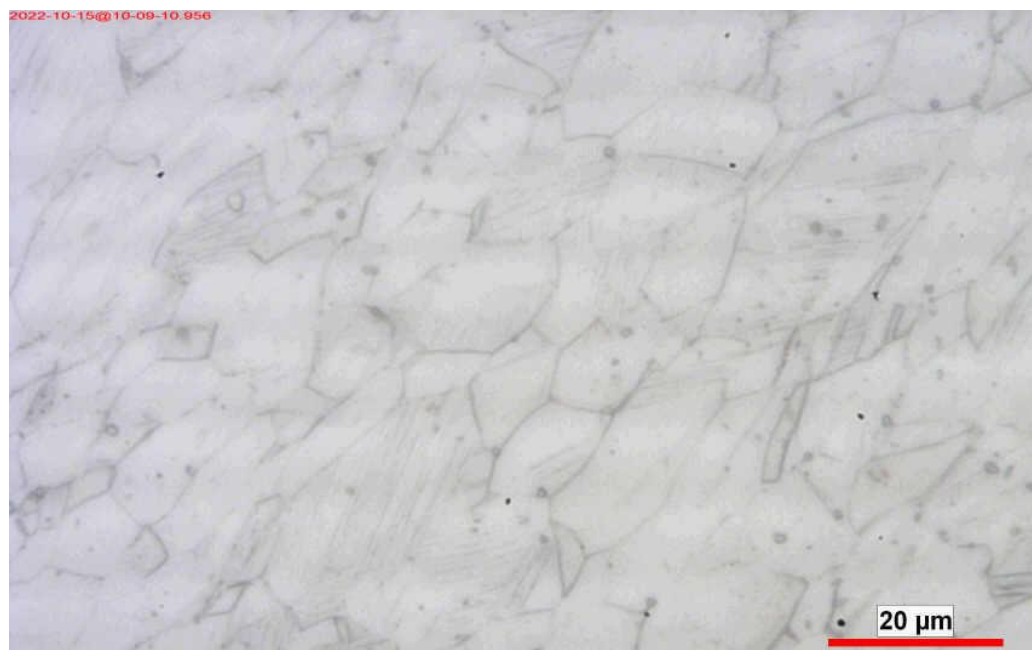
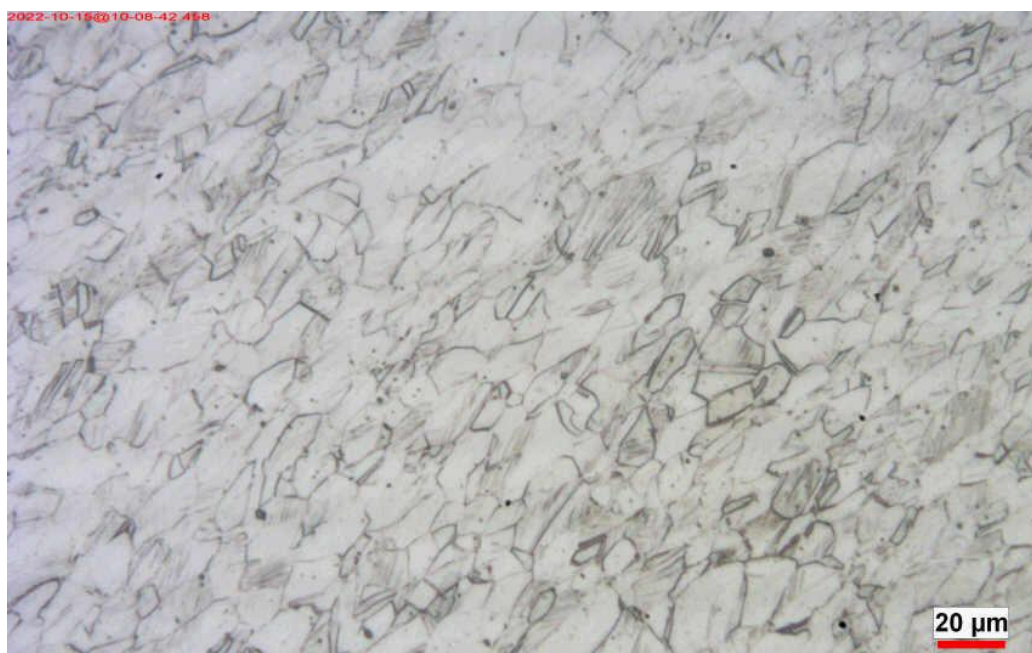
This is to certify, that the results are in agreement with the specifications.

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

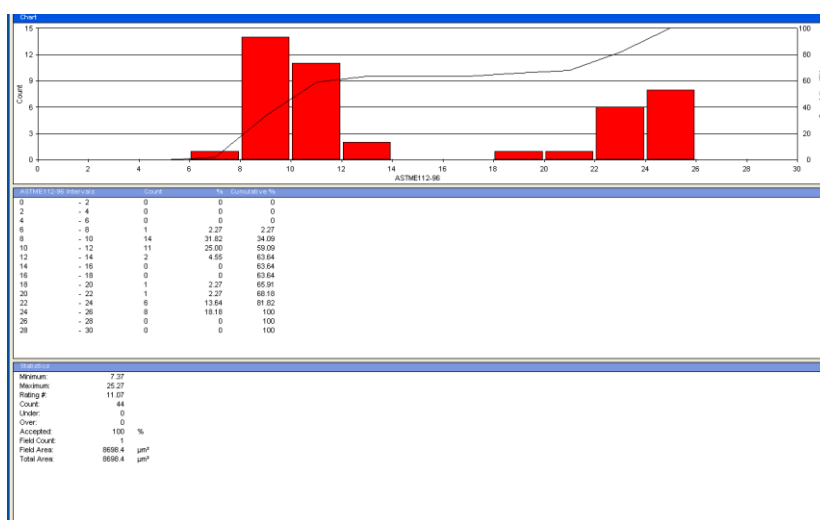
Werkstoffbescheinigungen die durch ein Datenverarbeitungssystem erstellt werden sind gem. EN 10204 Abschnitt 5 ohne Unterschrift gültig

۳-۴- ریزساختار متالوگرافی

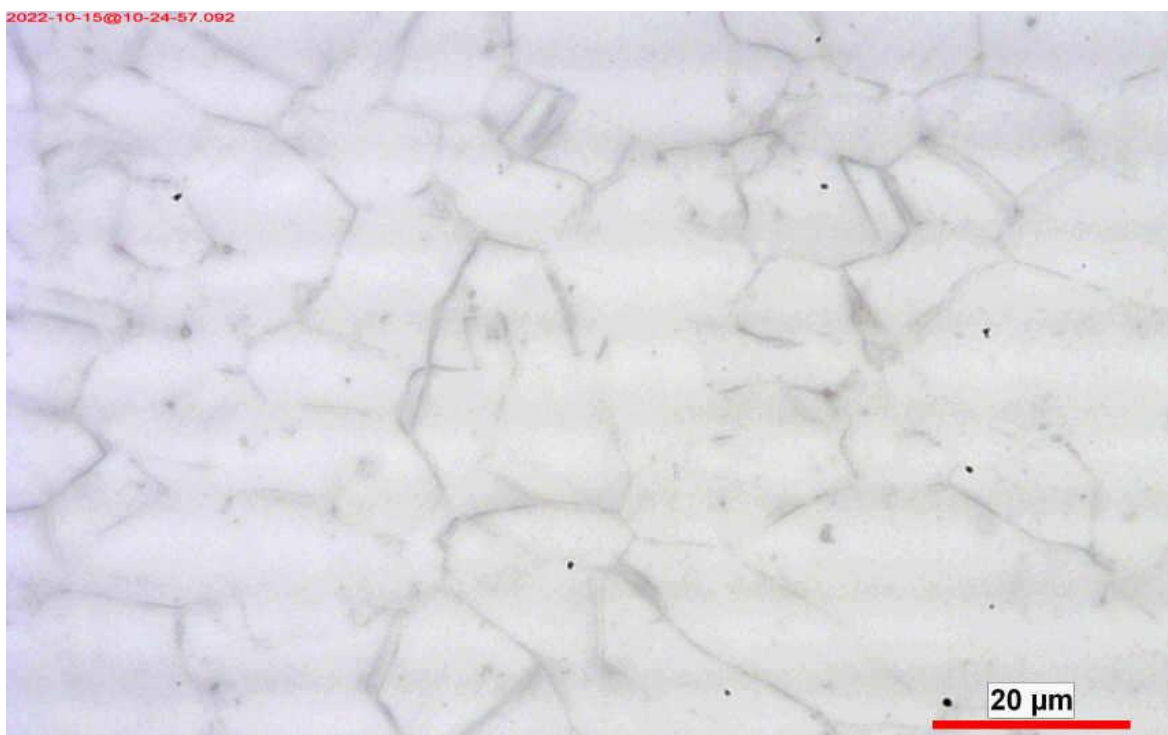
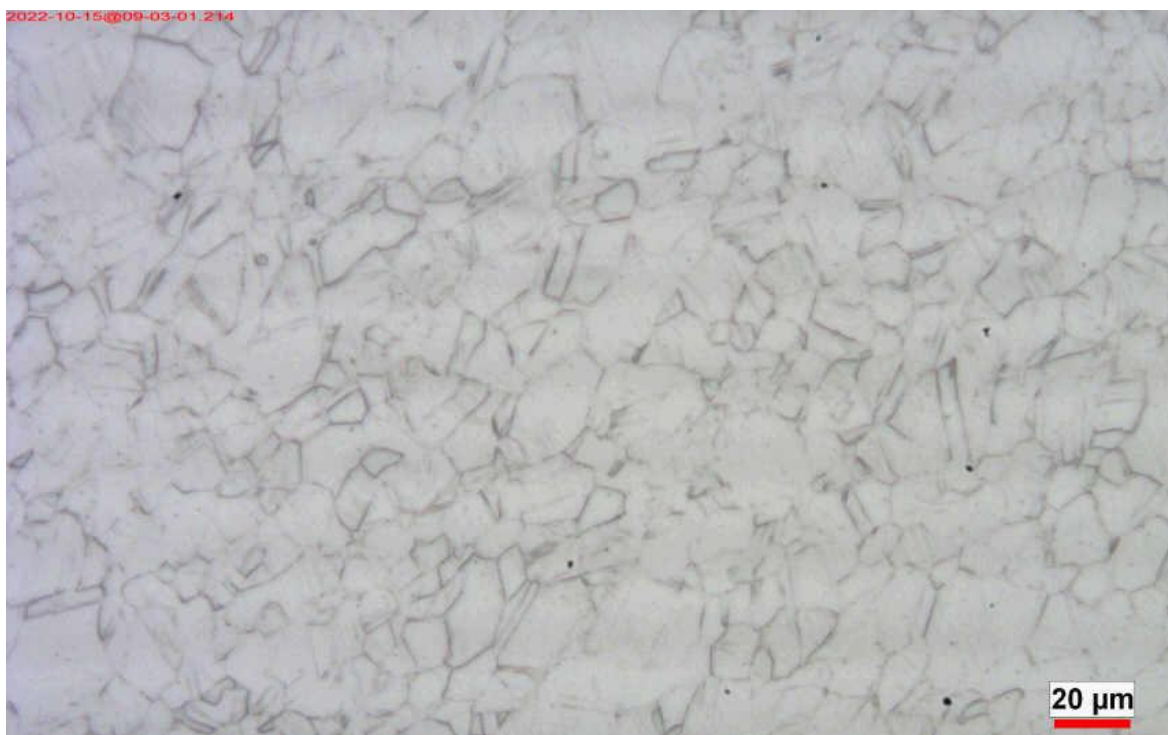
برای بررسی ریز ساختار و تعیین اندازه دانه، نمونه‌های ورق 316LVM در دو راستای عرضی (سطح مقطع) و طولی برش خورده و پس از آماده سازی متالوگرافی، مورد بررسی قرار گرفتند. در تصاویر شماره ۲-۳ تا ۵-۳ ریزساختار متالوگرافی به همراه تعیین عدد اندازه دانه برای دو مقطع برش آورده شده است.



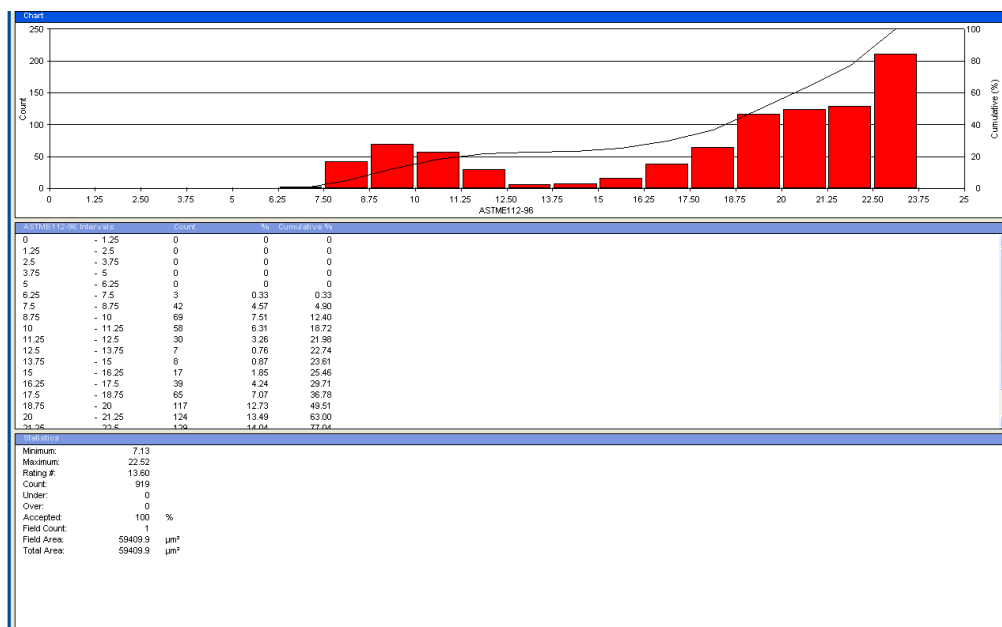
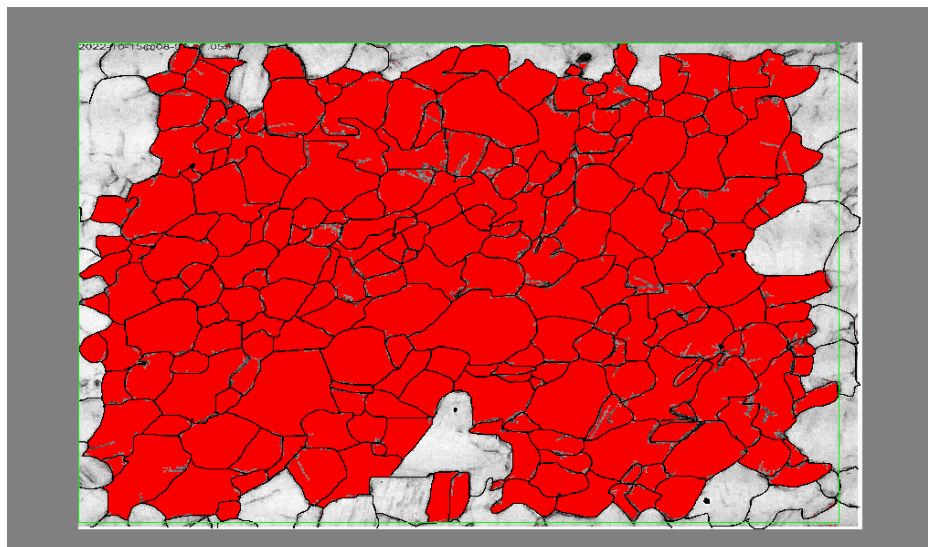
شکل ۲-۳. ریز ساختارهای مربوط به سطح مقطع عرضی در دو بزرگنمایی مختلف.



شکل ۳-۳. اندازه گیری 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.

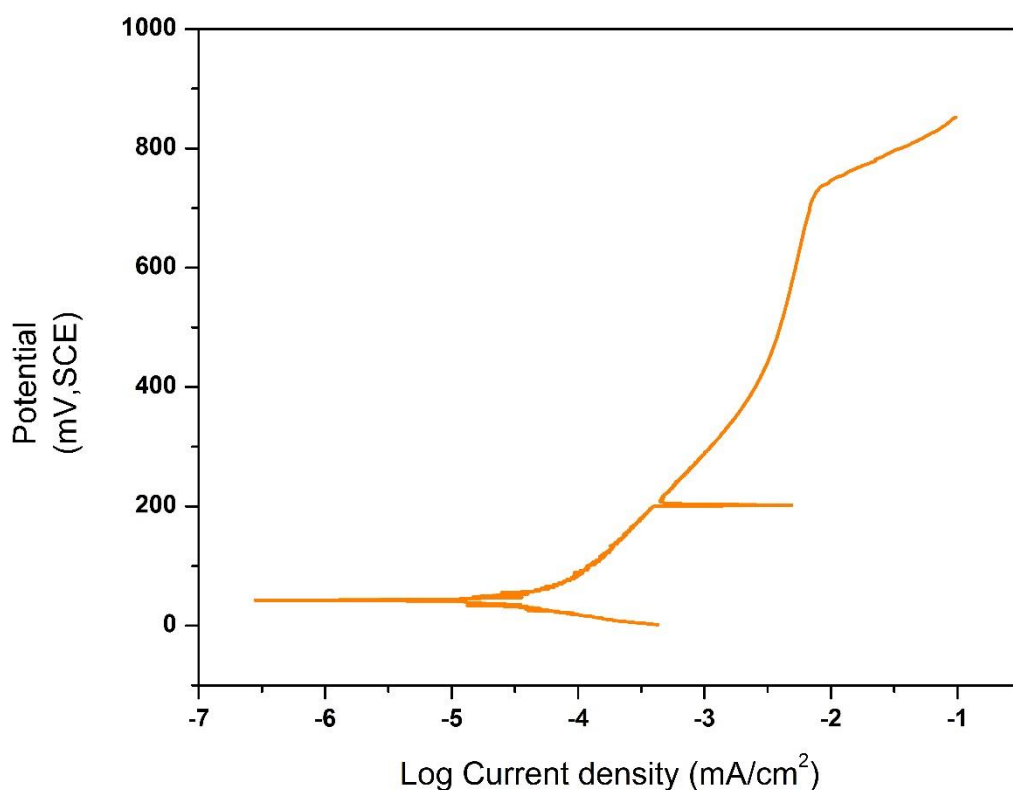
۳-۵- سختی سنجی

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 بازنگری: - تاریخ صدور: ۱۳۹۹/۱۰/۰۱		گواهی آزمون سختی سنجی		 جهاد دانشگاهی خراسان رضوی		
درخواست کننده:		دستگاه: UNIVERSAL HARDNESS TEST KOOPA		شرایط محیطی:		
رطوبت کمتر از ۶۰ درصد $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ دما		مدل: UV1		تاریخ درخواست: 1401/07/01		
تاریخ درخواست: 1401/07/01		تاریخ صدور: 1401/07/01		نام قطعه: فولاد 316lvm		
جنس قطعه: فولادی						
ردیف	موقعیت سختی سنجی	نیروی اعمالی	واحد سختی	عدد سختی		
				تست ۱	تست ۲	تست ۳
				تست ۴	تست ۵	متوسط عدد سختی
۱	سطح نمونه	30kg	HV	291	295	289
۲	سطح نمونه	150kg	HRC	31.4	31.4	31
نام و امضا آزمون کننده: _____ نام و امضا مدیر آزمایشگاه: _____ فاطمه ارجمند منصوره جعفری اسفاد						
آدرس: مشهد - میدان آزادی، پردیس دانشگاه فردوسی تلفن: ۳۱۹۹۷۴۸۴ تلفاکس: ۳۱۹۹۷ ص پ: ۱۳۷۶ - 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 0.1 میلی آمپر بر سانتیمتر مربع پلاریزه شد. شکل زیر نمودار پلاریزاسیون نمونه را نشان می‌دهد.



همانطور که از شکل مشخص می‌باشد شرایط پسیویتهی 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.

۳-۷- نتایج ذوب در کوره خلاء

نتایج آنالیز ذوب نمونه های قراضه فولاد زنگ نزن در کوه 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					

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 آستنیتی، 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 electroslag 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: Electroslag 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] Shin-ya Kitamura et al, Dephosphorization Reaction of Chromium Containing Molten Iron by CaO-based Flux, *ISIJ International* vol 34 (1993):5, 401-407.