



تحلیل اثر فرایند کار سرد مکانیکی بر ویژگی‌های ریزساختاری و سختی فولادهای آستنیتی زنگ نزن ۳۱۶ و ۳۱۶LVM

حسین امینی مشهدی*، حسین نوروزی صحرائی، احمد مولودی، مسعود گلستانی‌پور

گروه پژوهشی مواد نوین، سازمان جهاد دانشگاهی خراسان رضوی، مشهد، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: hamini@jdm.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی و زیست‌سازگاری مناسب، از پرکاربردترین مواد در صنایع به‌ویژه تجهیزات پزشکی و ایمپلنت‌های ارتوپدی محسوب می‌شوند. بهینه‌سازی خواص مکانیکی این فولادها از طریق فرایندهای شکل‌دهی نظیر کار سرد، نقش مهمی در افزایش طول عمر و عملکرد آنها دارد. در این پژوهش، اثر نورد سرد با درصد کاهش سطح مقطع مختلف بر ریزساختار و سختی فولادهای آستنیتی ۳۱۶ و ۳۱۶LVM مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات ریزساختاری پس از انجام نورد سرد نشان داد که با افزایش درصد کاهش سطح مقطع، دانه‌ها ریزتر شده و در جهت نورد به ویژه در درصد‌های ۴۰٪ و ۶۰٪ امتداد بیشتری می‌یابند. نتایج سختی‌سنجی نشان داد که با کاهش ۶۰٪ سطح مقطع، سختی فولاد ۳۱۶ از ۱۱۴ برینل به ۳۴۲ برینل و سختی فولاد ۳۱۶LVM از ۱۱۲ برینل به ۳۳۳ برینل افزایش یافت. مقایسه تصاویر میکروسکوپی با نتایج سختی‌سنجی و اشعه ایکس حاکی از آن است که در فولاد کم‌کربن ۳۱۶LVM، افزایش سختی عمدتاً ناشی از تغییرات مورفولوژیکی دانه‌ها در اثر کار سرد بدون ایجاد فاز مارتنزیتی قابل توجه است. اگرچه نتایج پراش اشعه ایکس، تشکیل مقدار اندکی مارتنزیت کرنشی را در فولاد ۳۱۶ نشان داد، اما این فاز در تصاویر نوری و الکترونی قابل تفکیک نیست و تیغه‌های مشاهده‌شده مربوط به باندهای لغزش و دوقلوبی‌های کرنشی هستند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، بهینه‌سازی شرایط کار سرد می‌تواند رویکردی مؤثر برای ارتقای خواص مکانیکی و دوام این فولادها باشد. این امر علاوه بر کاهش وابستگی به واردات مواد پیشرفته، گامی مهم در مسیر بومی‌سازی و توسعه کاربردهای صنعتی فولادهای آستنیتی زنگ‌نزن به‌شمار می‌رود.	مقاله پژوهشی دریافت: ۲۶ شهریور ۱۴۰۴ پذیرش: ۲۳ آذر ۱۴۰۴
	کلیدواژگان: فولاد آستنیتی زنگ نزن کار سرد مکانیکی سختی سنجی فولاد کم کربن مارتنزیت

Analysis of the effect of mechanical cold working on the microstructural features and hardness of austenitic stainless Steels 316 and 316LVM

Hosein Amini Mashhadi*, Hossein Norouzi Sahraei, Ahmad Moloodi, Masoud Golestanipour

Advanced Materials Research Group, Academic Center for Education, Culture, and Research (ACECR) of Khorasan Razavi, Mashhad, Iran

* Corresponding Author's Email: hamini@jdm.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 17 September 2025
Accepted: 14 December 2025

Keywords:

Austenitic Stainless Steel
Mechanical Cold Working
Hardness Testing
Low-Carbon Steel
Martensite

Abstract

Austenitic stainless steels are widely used in industrial and biomedical applications owing to their excellent corrosion resistance and biocompatibility. Improving their mechanical performance through deformation-based processes such as cold working is essential for enhancing durability and functional reliability. In this study, the effect of different thickness reductions during cold rolling on the microstructure and hardness of 316 and 316LVM austenitic stainless steels was investigated. Cold rolling was performed at room temperature with thickness reductions of 20%, 40%, and 60%. Microstructural examinations revealed that increasing deformation led to grain refinement and elongation along the rolling direction, accompanied by partial formation of strain-induced martensite. This transformation was more pronounced in 316 steel, while in 316LVM, the austenitic structure remained more stable due to its lower carbon content and higher purity. The Brinell hardness of 316 steel increased from 114 HB to 342 HB at 60% reduction, whereas that of 316LVM increased from 112 HB to 333 HB. Although X-ray diffraction analysis indicated a small amount of strain-induced martensite in 316 steel, the martensite phase was not visually distinguishable in OM/SEM images due to its very low volume fraction. Overall, the findings indicate that controlling the degree of cold work provides an effective approach to tailoring the mechanical properties of austenitic stainless steels for industrial and biomedical applications.

Please cite this article using:

Amini Mashhadi H, Norouzi Sahraei H, Moloodi A, Golestanipour M. Analysis of the effect of mechanical cold working on the microstructural features and hardness of austenitic stainless Steels 316 and 316LVM. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Oct 23;12(8):61-70. doi: 10.22034/ijme.2025.547323.2133 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی، پایداری حرارتی مناسب، شکل‌پذیری زیاد و خواص مکانیکی مطلوب، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند. از جمله این صنایع می‌توان به تجهیزات پزشکی، صنایع غذایی، دارویی و پتروشیمی اشاره کرد. این ویژگی‌ها موجب شده تا این گروه از فولادها علاوه بر مصارف صنعتی، در حوزه‌های زیستی مانند ایمپلنت‌های ارتوپدی و ابزارهای جراحی نیز جایگاه ویژه‌ای پیدا کنند. خواص یادشده عمدتاً ناشی از ساختار بلوری مکعبی با وجوه مرکزپر است که سبب افزایش قابلیت تغییر شکل پلاستیک، جذب انرژی زیاد هنگام شکست و پایداری فازی در دامنه‌ی وسیعی از دماها می‌شود. در میان فولادهای آستنیتی، دو گرید ۳۱۶ و ۳۱۶LVM به دلیل مقاومت بالا در محیط‌های خوردنده‌ی کلریدی و زیستی و خواص مکانیکی مطلوب، از پرکاربردترین انواع در صنایع حساس محسوب می‌شوند [۱، ۲، ۳، ۴]. برخلاف فولادهای مارتنزیتی یا فریتی که قابلیت سخت‌کاری حرارتی دارند، فولادهای آستنیتی به دلیل پایداری بالای فاز آستنیت در دمای محیط، از طریق عملیات حرارتی قابل سخت‌کاری نیستند [۵، ۶]. به همین دلیل، برای افزایش استحکام این فولادها از فرایندهای مکانیکی مانند کار سرد، به‌ویژه نورد سرد، استفاده می‌شود [۷].

فرایند نورد سرد نه تنها باعث افزایش سختی از طریق پدیده کارسختی^۱ می‌شود، بلکه منجر به تغییرات مهمی در ریزساختار فولاد نیز می‌گردد [۸]. از مهم‌ترین این تغییرات می‌توان به ریز شدن دانه‌ها، کشیدگی آن‌ها در جهت نورد و تشکیل فاز مارتنزیتی ناشی از کرنش اشاره کرد [۹، ۱۰]. این پدیده‌ها از طریق آرایش نابجایی‌ها به صورت صفحات لغزش و همچنین دوقلویی ناشی از تغییر شکل اتفاق می‌افتد [۷، ۱۱]. این تحولات در فولادهایی با نیکل کمتر یا پایداری آستنیتی پایین‌تر شدت بیشتری دارند. در فولادهای آستنیتی، افزایش تغییر شکل پلاستیک باعث تجمع نابجایی‌ها و تسریع تبدیل فاز FCC→BCT یا FCC→BCC می‌شود، به‌ویژه در صورتی که ترکیب شیمیایی فولاد مستعد این تبدیل باشد [۱۲، ۱۳]. ترکیب شیمیایی فولاد نقش مهمی در میزان این تحولات دارد [۱۴]. فولاد ۳۱۶LVM که به روش ذوب خلأ و با مقدار کربن بسیار پایین تولید می‌شود، در مقایسه با فولاد معمولی ۳۱۶ از خلوص بالاتری برخوردار است و برای کاربردهای زیست‌پزشکی و دقیق طراحی شده است [۱۵، ۱۶، ۱۷]. کاهش کربن در این فولاد از تشکیل کاربیدهای کروم جلوگیری کرده و مقاومت به خوردگی بین‌دانه‌ای را افزایش می‌دهد [۱۸]. همچنین خلوص بالاتر و کاهش ناخالصی‌های بین‌فلزی موجب پایداری بیشتر فاز آستنیت و در نتیجه کاهش تمایل به تشکیل مارتنزیت در حین کار سرد می‌گردد [۱۹، ۲۰].

در مطالعات مختلف، تفاوت عملکرد این دو فولاد در برابر نورد سرد مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان نمونه، تالها و همکاران در پژوهشی تاثیر کار سرد بر نرخ خوردگی دو فولاد ۳۱۶ و ۳۱۶LVM را به منظور استفاده طولانی مدت در شرایط شبیه‌سازی شده مایع بدن بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد کار سرد، کاهش وزن و نرخ خوردگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد [۱۱]. همچنین نقی‌زاده و سینگ در دو مطالعه مجزا، نشان دادند که افزایش میزان تغییر شکل سرد می‌تواند استحکام مکانیکی فولادهای آستنیتی ۳۱۶ را به‌طور مؤثری افزایش دهد [۲۱، ۲۲].

با توجه به اهمیت کنترل خواص مکانیکی در فولادهای آستنیتی مورد استفاده در صنایع و نیز نیاز کشور به بومی‌سازی مواد زیست‌پزشکی و کاهش وابستگی به واردات فولادهای خاص، انجام چنین پژوهش‌هایی از نظر علمی و صنعتی اهمیت بالایی دارد [۲۳، ۲۴].

در این پژوهش، تأثیر درصدهای مختلف کاهش ضخامت در فرایند نورد سرد بر ریزساختار و سختی فولادهای آستنیتی ۳۱۶ و ۳۱۶LVM بررسی شده است. هدف مطالعه، مقایسه‌ی رفتار این دو فولاد تحت شرایط یکسان نورد سرد با استفاده از آزمون‌های متالوگرافی نوری، سختی‌سنجی برینل و پراش پرتو ایکس (XRD) است. همچنین تلاش شده است با تحلیل نتایج به‌دست‌آمده، ارتباط میان تغییرات ریزساختاری و افزایش سختی تبیین گردد.

با وجود پژوهش‌های متعدد درباره فولادهای آستنیتی، مطالعه‌ی مستقیم و هم‌زمان تأثیر درصدهای مختلف نورد سرد بر دو گرید ۳۱۶ و ۳۱۶LVM از نظر ریزساختار، تشکیل فاز مارتنزیتی و سختی تاکنون گزارش نشده است. از این رو، هدف اصلی تحقیق حاضر، ارائه‌ی تحلیلی جامع و مقایسه‌ای از رفتار این دو فولاد در شرایط یکسان فرایند کار سرد است.

^۱ Strain Hardening

۲- مواد و روش‌ها**۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها**

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶ و ۳۱۶LVM تهیه شده و برای حذف اثرات فرایندهای قبلی ابتدا به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد آنیل و سپس در هوا سرد شدند. ترکیب شیمیایی این فولادها با استفاده از دستگاه کوانتومتر (GNR Solaris OES plus) تعیین شد که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولادهای تهیه شده (%)

فولاد	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Cu	Ti	V	W	N
۳۱۶	۰/۰۸	۲/۰	۰/۰۴۵	۰/۰۳	۱/۰	۱۸/۰	۱۰/۰	۲/۰							
۳۱۶LVM	۰/۰۱۵	۱/۴۲	۰/۰۱۹	۰/۰۰۴	۰/۵۳	۱۷/۰	۱۷/۰۵	۲/۷۰	۰/۰۰۷	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۰۵	۰/۰۶۲	۰/۰۰۶	۰/۰۴

پس از عملیات آنیل، از هر فولاد سه نمونه با ابعاد $۱ \times ۶ \times ۳$ سانتی‌متر تهیه شد و با استفاده از یک دستگاه نورد سرد، ساخته شده در آزمایشگاه گروه مواد نوین جهاد دانشگاهی مشهد، تحت نورد سرد با درصد کاهش سطح مقطع‌های مختلف ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ (به ترتیب با کدهای 20C.W، 40C.W، 60C.W) قرار گرفتند. تمامی مراحل نورد سرد در دمای محیط و با سرعت پایین انجام شد تا از افزایش دمای ناشی از اصطکاک و تغییر شکل جلوگیری گردد. از آنجا که هر دو نوع فولاد تحت شرایط یکسان و پیوسته نورد شدند، اختلاف دمایی قابل توجهی میان نمونه‌ها وجود نداشت. ضخامت نمونه‌ها قبل و بعد از نورد سرد در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲ ضخامت نمونه‌ها قبل و بعد از کار سرد

فولاد	درصد کاهش ضخامت	ضخامت قبل نورد (mm)	ضخامت بعد نورد (mm)
۳۱۶	۲۰		۸
	۴۰	۱۰	۶
	۶۰		۴
۳۱۶LVM	۲۰		۸
	۴۰	۱۰	۶
	۶۰		۴

۲-۲- مشخصه‌یابی

به منظور ارزیابی نمونه‌ها پس از انجام کار سرد، تغییرات ریزساختاری و سختی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌ها به صورت مقطع عرضی برش داده شده، مانت شدند، سپس پولیش و با محلولی شامل اسید هیدروکلریک (HCl)، اسید نیتریک (HNO_3) و آب اچ شدند. تصاویر متالوگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری (OM, Olympus PMG3) و جهت مشاهدات تکمیلی، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Tescan Vega XMU) که ریزساختار تغییرشکل یافته و مورفولوژی سطح را با جزئیات بیشتری نشان می‌دهد تهیه گردید.

آزمون سختی‌سنجی به روش برینل (BHN) با استفاده از دستگاه Koopa UV1 و با اعمال بار ۱۸۵ کیلوگرم انجام شد. آزمون سختی‌سنجی با بار ثابت در ۳ نقطه‌ی مختلف از سطح انجام و میانگین مقادیر حاصل به‌عنوان سختی نهایی گزارش شد. شناسایی فازها با بهره‌گیری از تکنیک پراش پرتو ایکس و با دستگاه دیفراکتومتر (Xpert Pro MPD, PANalytical) صورت گرفت. طیف XRD در بازه ۲۰ تا ۱۰۰ درجه و با تابش اشعه X از نوع $Cu (K\alpha = 1.54 \text{ \AA})$ جمع‌آوری شدند.

۳- نتایج و بحث

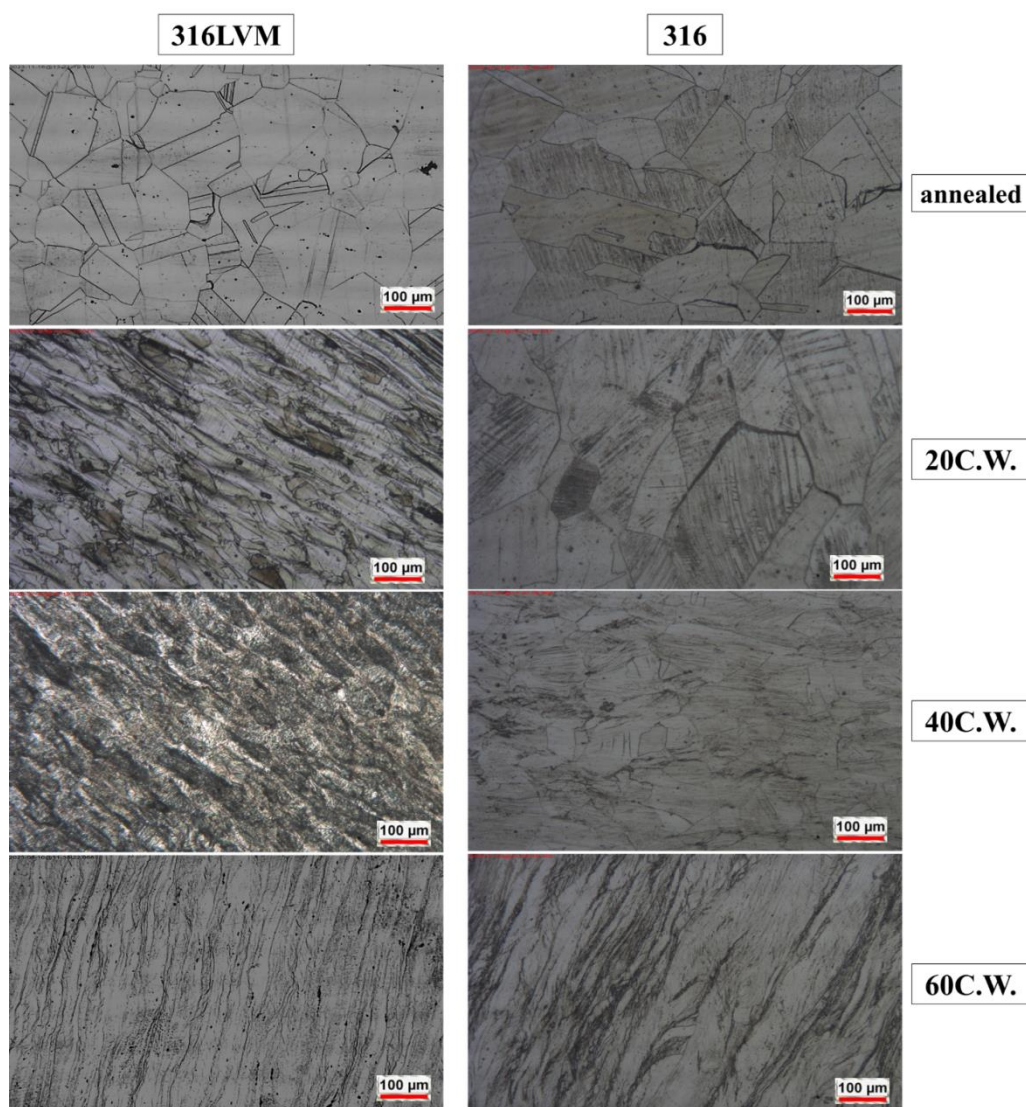
شکل ۱ ریزساختار نمونه‌ها را پس از عملیات آنیل و پس از نورد سرد نشان می‌دهند. پس از آنیل، ریزساختار آستنیتی فولادها به‌وضوح قابل مشاهده است و از دانه‌های هم‌محور تشکیل شده که ویژگی شاخص ساختار مکعبی با وجوه مرکزپر (FCC) به‌شمار می‌آید [۲۵، ۲۶]. با اعمال نورد سرد، تغییرات قابل‌توجهی در ریزساختار رخ داد که شامل ریزدانه شدن و کشیده شدن دانه‌ها در جهت نورد بود؛ این تغییرات در درصدهای کاهش ضخامت بالاتر مشهودتر بودند. علت این تغییرات را می‌توان به تجمع نابجایی‌ها و فعال شدن صفحات لغزش در طول تغییر شکل پلاستیک نسبت داد [۲۷، ۲۸]. با افزایش میزان کاهش ضخامت در فرایند نورد سرد، دانه‌ها در راستای نورد امتداد می‌یابند. این رفتار ناشی از لغزش گسترده صفحات کریستالی و کشیدگی دانه‌ها در فرایند نورد ناشی از فعال شدن سیستم‌های لغزش $\langle 110 \rangle$ {111} در ساختار FCC بوده است؛ پدیده‌ای که در نورد سرد فولادهای آستنیتی به‌عنوان یکی از نشانه‌های مهم افزایش کارسختی ناشی از کرنش شناخته می‌شود. کشیدگی دانه‌ها سبب افزایش چگالی نابجایی‌ها و تشکیل ساختارهای کشیده‌شده و در نهایت منجر به افزایش سختی می‌گردد [۲۹، ۳۰، ۳۱]. علاوه بر این، لایه‌های مارتنزیتی نیز درون دانه‌های آستنیتی ظاهر می‌شوند که ناشی از پدیده تبدیل فازی ناشی از کرنش است که به دلیل حجم کم در تصاویر میکروسکوپی به خوبی قابل مشاهده نیستند. این پدیده در فولاد ۳۱۶ به دلیل مقدار کمتر نیکل و پایداری کمتر فاز آستنیت نسبت به فولاد ۳۱۶LVM شدت بیشتری دارد. وجود مولیبدن و میزان بالاتر نیکل در ۳۱۶LVM موجب افزایش پایداری فاز آستنیت شده و در نتیجه از تشکیل مارتنزیت به میزان زیادی جلوگیری می‌کند [۳۲، ۳۳]. همچنین، کاهش میزان کربن نقش بسیار مهمی در مهار این تبدیل فازی ایفا می‌کند. فولاد ۳۱۶LVM که مقدار کمتری کربن دارد، میزان کمتری تشکیل فاز مارتنزیت را پس از نورد سرد نشان داد. این روند با نتایج مطالعات پیشین نیز همخوانی دارد که نشان داده‌اند مقدار نیکل و کربن به‌طور معکوس بر نرخ تبدیل فاز آستنیت به مارتنزیت در حین کار سرد تأثیر می‌گذارند [۳۴، ۳۵]. در نهایت، ریزساختار ریزدانه و حضور لایه‌های مارتنزیتی به‌طور مستقیم موجب بهبود خواص مکانیکی از جمله افزایش سختی شدند که در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت. این مشاهدات ریزساختاری نشان می‌دهد که تغییر شکل سرد نه تنها مورفولوژی دانه‌ها را تغییر داده، بلکه موجب تبدیل‌های فازی وابسته به ترکیب شیمیایی نیز شده است.

علاوه بر تصاویر متالوگرافی نوری، مشاهدات تکمیلی با میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز انجام شد که ریزساختار تغییرشکل‌یافته و مورفولوژی سطح را با جزئیات بیشتری در شکل ۲ نشان می‌دهد. نتایج حاصل از SEM روند تغییرات ریزساختاری مشاهده‌شده در تصاویر نوری را برای هر دو فولاد تأیید می‌کنند. در نمونه‌های نوردشده با ۲۰٪ کاهش ضخامت، کماکان ساختار آستنیتی با مرز دانه‌های مشخص مشاهده می‌شود، در حالی که با افزایش میزان کار سرد به ۶۰٪، دانه‌ها کشیده و جهت‌دار شده‌اند. مقایسه ریزساختار فولادهای ۳۱۶ و ۳۱۶LVM نشان می‌دهد که در فولاد ۳۱۶، به دلیل انرژی نقص انباشتگی کمتر، باندهای لغزش متراکم‌تر و دوقلوبی‌های کرنشی در برخی دانه‌ها مشاهده می‌شود. در مقابل، در فولاد ۳۱۶LVM با انرژی نقص انباشتگی بالاتر، نرخ دوقلوبی‌سازی کاهش یافته و تغییر شکل عمدتاً توسط لغزش کنترل می‌شود. این روند با رفتار مورد انتظار آلیاژهای آستنیتی با انرژی نقص انباشتگی متفاوت هم‌خوانی دارد [۳۶].

تغییرات سختی به‌عنوان تابعی از درصد کاهش ضخامت برای نمونه‌ها در شکل ۳ نمایش داده شده است. مقادیر سختی گزارش‌شده میانگین سه اندازه‌گیری مجزا بوده و انحراف اندازه‌گیری در محدوده ± 5 HB قرار داشت. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر دو فولاد، با افزایش میزان کار سرد، مقدار سختی افزایش یافته است؛ روندی که در اغلب فلزات تحت تغییر شکل سرد، معمول و مورد انتظار است. این افزایش سختی عمدتاً ناشی از ترکیب ریزدانه شدن ساختار، تکثیر نابجایی‌ها و ایجاد تنش‌های پسماند در حین تغییر شکل پلاستیک است. ریز شدن دانه‌ها باعث کاهش مسیر آزاد میانگین حرکت نابجایی‌ها شده و بر اساس اثر هال-پیچ^۱ به افزایش سختی کمک می‌کند (لازم به ذکر است که در این پژوهش، رابطه‌ی هال-پیچ صرفاً به‌منظور تبیین کیفی اثر ریزشدگی دانه‌ها بر افزایش سختی مورد استفاده قرار گرفته است). در عین حال، افزایش چگالی نابجایی‌ها مقاومت ماده را در برابر تغییر شکل‌های بعدی بالا می‌برد [۳۷]. همچنین، کرنش مکانیکی موجب ایجاد میدان‌های تنش داخلی در ساختار شده که این نیز به کارسختی منجر می‌شود [۳۸]. فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ افزایش سختی بیشتری را نشان داد. این رفتار را می‌توان با تشکیل قابل‌توجه فاز مارتنزیت ناشی از کرنش در طی فرایند تغییر شکل توضیح داد. مارتنزیت به‌عنوان فازی سخت‌تر و شکننده‌تر نسبت به آستنیت، موجب افزایش سختی

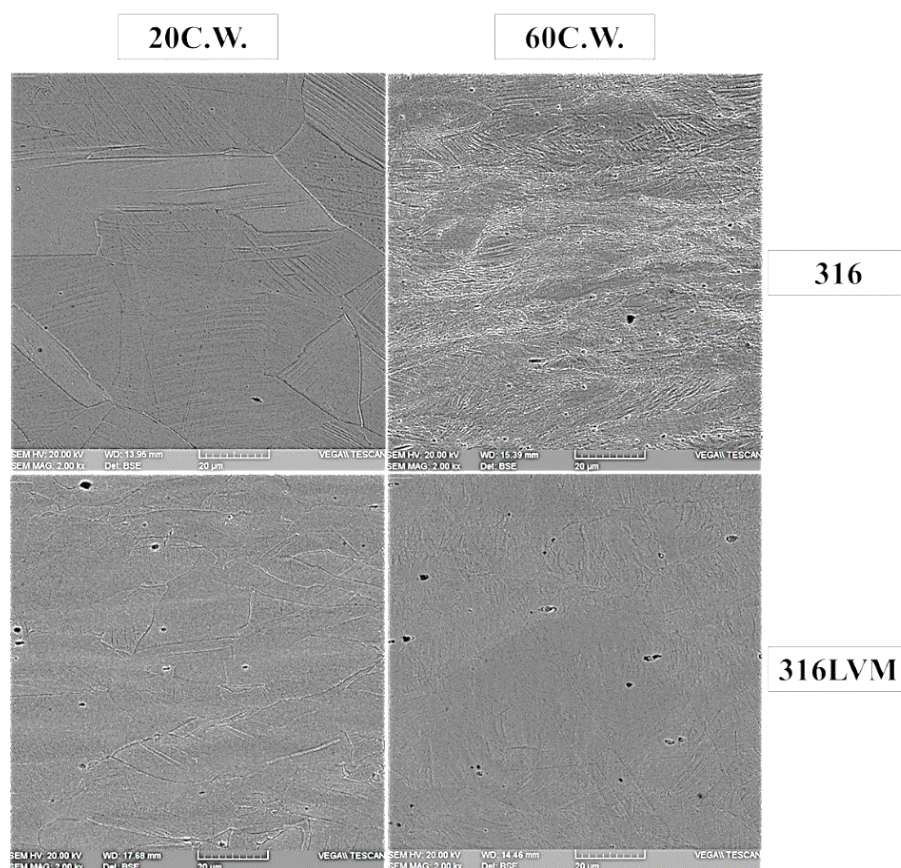
¹ Hall-Petch

کلی ماده می‌شود. تبدیل فازی مذکور به دلیل مقدار کمتر نیکل در فولاد ۳۱۶، که پایداری فاز آستنیت را کاهش داده و آن را مستعد تبدیل به مارتنزیت تحت تنش مکانیکی کرده، تسهیل شده است [۳۹]. در مقابل، فولاد ۳۱۶LVM به دلیل داشتن مقدار کمتر کربن و مقدار بیشتر نیکل، تنها مقدار بسیار اندکی از این تبدیل فازی را تجربه کرده است. بنابراین، افزایش سختی در این گرید از فولاد نسبت به ۳۱۶ ناچیز بوده و عمدتاً ناشی از عوامل ریزساختاری مانند ریزدانه شدن و کشیدگی دانه‌ها و نه تغییر فاز بوده است [۴۰]. این یافته نشان می‌دهد که در فولادهای آستنیتی با پایداری بالا، بهبود خواص مکانیکی در اثر نورد سرد عمدتاً محدود به مکانیزم‌هایی مانند افزایش نابجایی و مرزدانه‌ها است و نه تبدیل فازی.

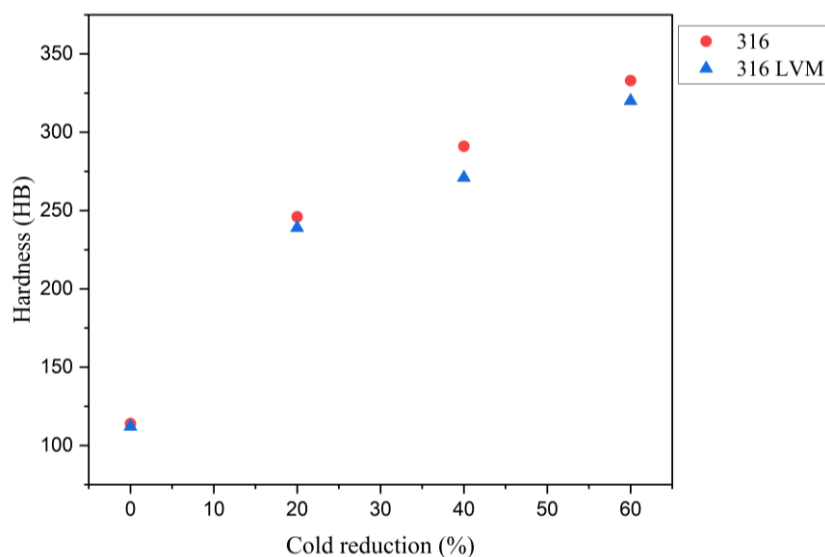


شکل ۱ تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه‌ها پس از آنیل و پس از به ترتیب ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد کار سرد

شایان ذکر است که تشکیل مارتنزیت القایی در فولادهای آستنیتی ۳۱۶ می‌تواند اثر نامطلوبی بر مقاومت به خوردگی داشته باشد. مطالعات نشان داده‌اند که فاز مارتنزیت نسبت به آستنیت رفتار الکتروشیمیایی آندی‌تری داشته و حضور آن منجر به افزایش چگالی جریان خوردگی، کاهش پتانسیل خوردگی و ایجاد ناهمگنی‌های میکروگالوانیکی می‌شود [۱۱، ۲۰، ۴۱، ۴۲]. در نتیجه، افزایش محتوای مارتنزیت-به‌ویژه در کرنش‌های بالا-می‌تواند پایداری خوردگی فولاد را کاهش دهد. از سوی دیگر، پایداری بالاتر آستنیت در فولاد ۳۱۶LVM و تشکیل بسیار محدود مارتنزیت در این گرید، سبب حفظ رفتار خوردگی مطلوب‌تر و زیست‌سازگاری بهتر آن در مقایسه با ۳۱۶ می‌شود. بدین ترتیب، مشاهده میزان کمتر مارتنزیت در ۳۱۶LVM در این پژوهش می‌تواند دلیل مناسبی بر برتری آن در کاربردهای حساس زیست‌پزشکی و محیط‌های خورنده باشد.



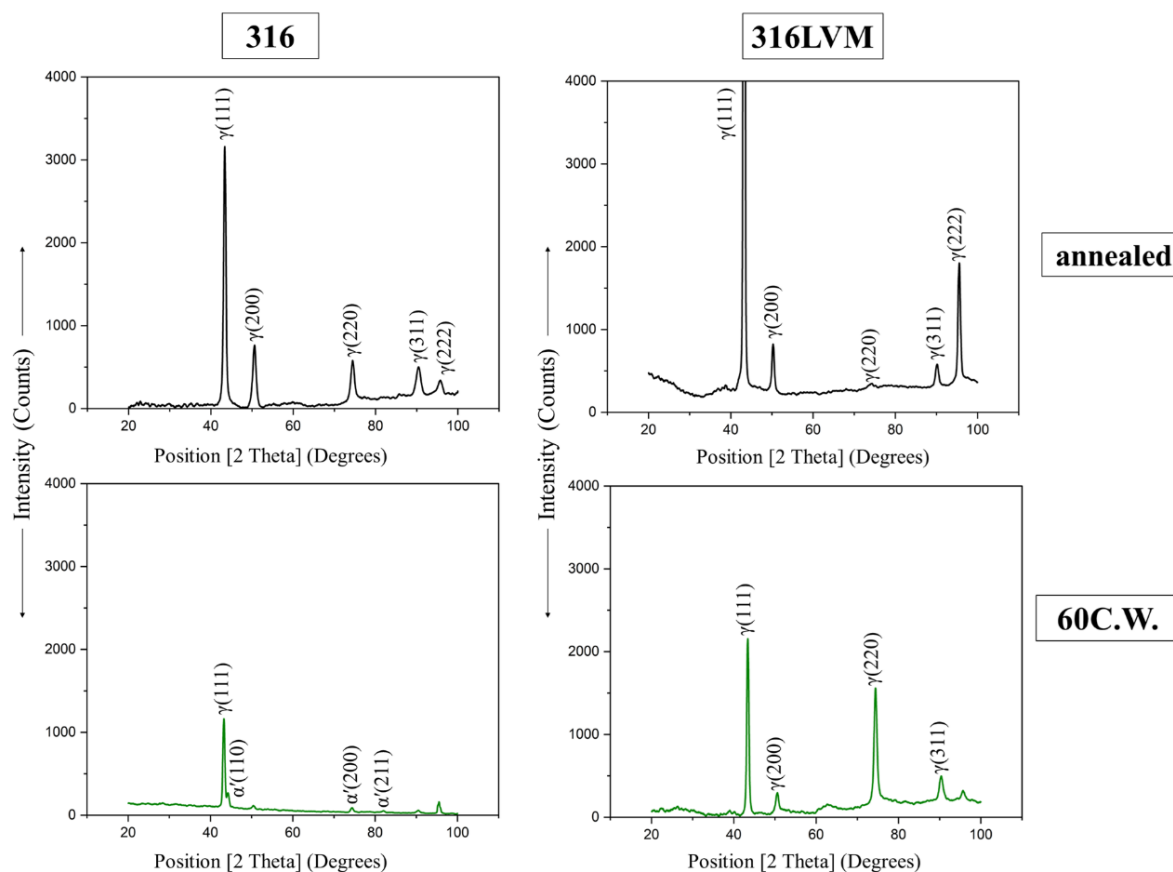
شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار نمونه‌ها پس از ۲۰ و ۶۰ درصد کار سرد



شکل ۳ تغییرات سختی در نمونه‌ها با افزایش درصد کار سرد (به ترتیب در حالت آنیل، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد نورد سرد)

شکل ۴ الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌ها را پس از آنیل و پس از ۶۰٪ کار سرد نشان می‌دهد. در مقایسه با حالت آنیل، الگوهای XRD نمونه‌های نورد شده به‌ویژه ۳۱۶ در ۶۰٪ کار سرد علاوه بر ظهور پیک $\alpha'(110)$ در حوالی 44.7° (نشانه تشکیل مارتنزیت القایی)، چند تغییر دیگر نیز نشان می‌دهند که به تحول ریزساختاری آستنیت مربوط است. نخست، شدت نسبی پیک‌های γ به‌خصوص $\gamma(111) \approx 43.5^\circ$ و $\gamma(200) \approx 50.5^\circ$ تغییر می‌کند. این تغییر شدت عمدتاً ناشی از بافت ترجیحی ایجاد شده در فرایند نورد است؛ هم‌راستاشدن دانه‌ها موجب می‌شود برخی صفحات بلوری در راستای تابش غالب و برخی مغلوب شوند و بنابراین نسبت شدت‌ها

دگرگون گردد [۴۳]. دوم، پهن شدن پیک‌ها و افزایش (FWHM) در نمونه‌های نوردشده مشاهده می‌شود که به دو عامل اصلی (۱) ریزش حوزهای پراش (کریستالیت‌ها) و (۲) افزایش چگالی نابجایی و ریزگرنش شبکه، نسبت داده می‌شود [۴۴]. سوم، در برخی بازتاب‌ها، جابجایی جزئی مکان پیک‌ها دیده می‌شود که به تنش‌های پسماند ماکروسکوپی و تغییر فاصله‌های میان‌صفحه‌ای d بر اساس قانون براگ مربوط است [۴۵]. علاوه بر این، افزایش ناپایداری‌های شبکه‌ای و مرزدانه‌ای ناشی از کار سرد می‌تواند پس‌زمینه را قدری بالا برده و نسبت سیگنال به نویز را کاهش دهد [۴۶]. در نهایت، مقایسه ۳۱۶ با ۳۱۶LVM نشان می‌دهد که در ۳۱۶LVM حتی در ۶۰٪ کار سرد نیز پیک‌های γ غالب باقی می‌مانند و تاثیر α' بسیار محدود است؛ این رفتار با پایداری بالاتر آستنیت به‌واسطه ترکیب شیمیایی برای ۳۱۶LVM سازگار است.



شکل ۴ طیف XRD نمونه‌ها بعد از آنیل و بعد از ۶۰٪ کار سرد

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر کار سرد مکانیکی بر ریزساختار و سختی فولادهای آستنیتی زنگ نزن ۳۱۶ و ۳۱۶LVM مورد بررسی قرار گرفت. نتایج زیر حاصل شد:

- نورد سرد منجر به ریزدانه‌گی و کشیده شدن دانه‌ها در هر دو نمونه شد. علاوه بر این موضوع، در فولاد ۳۱۶LVM به دلیل پایداری بالاتر آستنیت، تشکیل مارتنزیت تشخیص داده نشد اما در فولاد ۳۱۶ نتایج آزمون XRD تشکیل فاز مارتنزیت را تایید نمود. البته در تصاویر میکروسکوپی مربوط به این فولاد، تیغه‌های مارتنزیتی به دلیل حجم بسیار کم و ابعاد نانومقیاس این فاز به خوبی مشاهده نشد. در هر دو فولاد، تاثیرات کار مکانیکی مانند باندهای لغزش و دوقلوبی‌های کرنشی در تصاویر میکروسکوپی مشاهده گردید.
- سختی با افزایش کار سرد به خصوص در فولاد ۳۱۶ به طور قابل ملاحظه‌ای، افزایش یافت.

¹ Full Width at Half Maximum

- ثبات فاز در فولاد ۳۱۶LVM این فولاد را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهایی که نیاز به مقاومت به خوردگی بالا دارند تبدیل می‌کند.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، تأثیر عملیات حرارتی بازپخت پس از کار سرد بر ریزساختار و خواص مکانیکی این دو گرید فولادی بررسی گردد. همچنین، ارزیابی رفتار خوردگی و زیست‌سازگاری فولاد ۳۱۶LVM پس از نورد سرد، به‌ویژه در محیط‌های شبیه‌سازی شده بدن، می‌تواند دیدگاه دقیق‌تری از عملکرد این فولاد در کاربردهای پزشکی فراهم آورد. در کنار آن، تحلیل میکروسکوپی پیشرفته‌تر مانند (EBSD) برای تعیین دقیق‌تر جهت‌گیری‌های بلوری و توزیع فازها پیشنهاد می‌شود. در ادامه‌ی این پژوهش، انجام تحلیل‌های کمی‌تر از قبیل تعیین اندازه دانه و درصد فاز مارتنزیتی با استفاده از روش‌های تصویری و پراش پرتو ایکس به‌عنوان گام‌های بعدی تحقیق برنامه‌ریزی شده است.

References

- [1] Nouri A, Wen C. Stainless steels in orthopedics. In *Structural biomaterials 2021* Jan 1 (pp. 67-101). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-0-12-818831-6.00008-2
- [2] Fashu S, Trabadelo V. A critical review on development, performance and selection of stainless steels and nickel alloys for the wet phosphoric acid process. *Materials & Design*. 2023 Mar 1;227:111739. doi: 10.1016/j.matdes.2023.111739
- [3] Parsapour A, Fathi MH, Salehi M, Saatchi A, Mahdikhani M. The effect of surface treatment on corrosion behavior of surgical 316l stainless steel implant. *International Journal of Iron & Steel Society of Iran*. 2007;4(1):34-8.
- [4] Eskandari M. Laser surface modification of medical-grade stainless steel (316LVM) coated with hydroxyapatite-yttria-stabilized zirconia nanocomposite for enhanced biocompatibility [master's thesis]. Karaj (Iran): Materials and Energy Research Center, Nanotechnology and Advanced Materials Research Institute; 2017. [In Persian]
- [5] Weman K. *Welding processes handbook*. Elsevier; 2011 Nov 8.
- [6] Metan Kapuri E, Gorji A, Bakhshi M, Mirnia MJ. Investigation of formability and mechanical properties of 316 stainless steel sheet. In: *Proceedings of the 13th Iranian Conference on Manufacturing and Production Engineering*; 2016; Babol, Iran. [In Persian]
- [7] Monrrabal G, Bautista A, Guzman S, Gutierrez C, Velasco F. Influence of the cold working induced martensite on the electrochemical behavior of AISI 304 stainless steel surfaces. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019 Jan 1;8(1):1335-46. doi: 10.1016/j.jmrt.2018.10.004
- [8] Mohammadi Soleymani M, Mostafaei H. The effect of filler metal on the mechanical behavior of stainless steel welded by GTAW welding. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Jun 21;11(4):38-55. [In Persian]
- [9] Bolouk Heidari R, Gheisari K, Alavi Zaree SR, Eskandari M. Effect of cold rolling process on quantitative analysis and crystalline texture of AISI 316L austenitic stainless steel. In: *Proceedings of the 3rd National Conference on Materials, Metallurgy and Mining Engineering of Iran*; 2020; Ahvaz, Iran. [In Persian]
- [10] Maril Y, Camurri C, Zapata-Hernández O, Carrasco C, Maril M. Superficial grain refinement of 316L stainless steel by rolling with rough rolls. *Materials*. 2023 Sep 26;16(19):6416. doi: 10.3390/ma16196416
- [11] Talha M, Behera CK, Kumar S, Pal O, Singh G, Sinha OP. Long term and electrochemical corrosion investigation of cold worked AISI 316L and 316LVM stainless steels in simulated body fluid. *RSC Advances*. 2014;4(26):13340-9. doi: 10.1039/C3RA47881E
- [12] Berger A, Egels G, Fussik R, Benito SM, Weber S. A new approach to the optimization of the austenite stability of metastable austenitic stainless steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2023 Oct;32(20):9244-52. doi: 10.1007/s11665-023-08066-2
- [13] Pistorius PC, Du Toit M. Low-nickel austenitic stainless steels: metallurgical constraints. In *12th Int. Ferroalloys Congress, held June 2010* Jun 6 (pp. 6-9).
- [14] Mandal G, Dey I, Mukherjee S, Ghosh SK. Phase transformation and mechanical properties of ultrahigh strength steels under continuous cooling conditions. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022 Jul 1;19:628-42. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.05.033
- [15] Multigner M, Frutos E, González-Carrasco JL, Jiménez JA, Marín P, Ibáñez J. Influence of the sandblasting on the subsurface microstructure of 316LVM stainless steel: Implications on the magnetic and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: C*. 2009 May 5;29(4):1357-60. doi: 10.1016/j.msec.2008.11.002

- [16] Zhang K, Zou J, Grosdidier T, Dong C, Yang D. Improved pitting corrosion resistance of AISI 316L stainless steel treated by high current pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2006 Oct 5;201(3-4):1393-400. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.02.008
- [17] Rezaei A, Mobasherpour A, Hadavi S. Effect of cold working, heat treatment, and sandblasting on surface roughness and hardness of 316LVM stainless steel. In: *Proceedings of the 13th Student Scientific Conference on Materials and Metallurgical Engineering of Iran*; 2016; Tehran, Iran. [In Persian]
- [18] Khadak H, Akbari Mousavi SA. The effect of Nd: YAG laser welding pulse duration on the corrosion behavior of 316L steel in sulfuric acid. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 Jul 23;12(5):11-9. doi: 10.22034/ijme.2025.522457.2080
- [19] Nakada N, Ito H, Matsuoka Y, Tsuchiyama T, Takaki S. Deformation-induced martensitic transformation behavior in cold-rolled and cold-drawn type 316 stainless steels. *Acta Materialia*. 2010 Feb 1;58(3):895-903. doi: 10.1016/j.actamat.2009.10.004
- [20] Yu X, Chen S, Liu Y, Ren F. A study of intergranular corrosion of austenitic stainless steel by electrochemical potentiodynamic reactivation, electron back-scattering diffraction and cellular automaton. *Corrosion Science*. 2010 Jun 1;52(6):1939-47. doi: 10.1016/j.corsci.2010.02.015
- [21] Naghizadeh M, Mirzadeh H. Microstructural evolutions during reversion annealing of cold-rolled AISI 316 austenitic stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018 Jun;49(6):2248-56. doi: 10.1007/s11661-018-4583-6
- [22] Singh BB, Sivakumar K, Bhat TB. Effect of cold rolling on mechanical properties and ballistic performance of nitrogen-alloyed austenitic steels. *International Journal of Impact Engineering*. 2009 Apr 1;36(4):611-20. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2008.07.082
- [23] Pahnehaneh F, Naeimi F. A review on research challenges of 316L stainless steel used in medical applications. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019;28(1):13-23. [In Persian]
- [24] Contreras-Fortes J, Rodríguez-García MI, Sales DL, Sánchez-Miranda R, Almagro JF, Turias I. A machine learning approach for modelling cold-rolling curves for various stainless steels. *Materials*. 2023 Dec 27;17(1):147. doi: 10.3390/ma17010147
- [25] Sohrabi MJ, Naghizadeh M, Mirzadeh H. Deformation-induced martensite in austenitic stainless steels: A review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2020 Oct 8;20(4):124. doi: 10.1007/s43452-020-00130-1
- [26] Lakhdari MA, Krajcarz F, Mithieux JD, Van Landeghem HP, Veron M. Strength enhancement of superduplex stainless steel using thermomechanical processing. *Metals*. 2021 Jul 9;11(7):1094. doi: 10.3390/met11071094
- [27] Ohashi T. Dislocation Accumulation Due to Plastic Slip. In *Mathematical Modeling of Dislocation Behavior and Its Application to Crystal Plasticity Analysis 2023* Aug 1 (pp. 7-24). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-031-37893-5_3
- [28] Guo G, Zhang W, Zhang B, Xu J, Chen S, Ye X, Zhang Y, Zhang Z. Effect of precipitate phase on the plastic deformation behavior of Alloy 718: In-situ tensile experiment and crystal plasticity simulation. *International Journal of Plasticity*. 2025 Apr 1;187:104286. doi: 10.1016/j.ijplas.2025.104286
- [29] Rezende IT, Santos ES, da Silva Labiapari W, Siqueira EC. Microstructure evolution and corrosion behaviors of cold-rolled 304 stainless sheets of steel in 3.5% NaCl solution. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*. 2023;16(02):012-27. doi: 10.30574/gjeta.2023.16.2.0136
- [30] Odnobokova M, Yanushkevich Z, Kaibyshev R, Belyakov A. On the strength of a 316L-type stainless steel subjected to cold or warm rolling followed by annealing. *Materials*. 2020 May 2;13(9):2116. doi: 10.3390/ma13092116
- [31] Odnobokova M, Belyakov A, Enikeev N, Kaibyshev R, Valiev RZ. Microstructural changes and strengthening of austenitic stainless steels during rolling at 473 K. *Metals*. 2020 Nov 30;10(12):1614. doi: 10.3390/met10121614
- [32] Das A, Chakraborti PC, Tarafder S, Bhadeshia HK. Analysis of deformation induced martensitic transformation in stainless steels. *Materials Science and Technology*. 2011 Jan;27(1):366-70. doi: 10.1179/026708310X126684155340
- [33] Liu J. Deformation induced martensitic transformation in 304 stainless steels [master's thesis]. Columbia (SC): University of South Carolina; 2016.
- [34] Harwarth M, Brauer A, Huang Q, Pourabdoli M, Mola J. Influence of Carbon on the Microstructure Evolution and Hardness of Fe-13Cr-xC (x= 0-0.7 wt.%) Stainless Steel. *Materials*. 2021 Sep 4;14(17):5063. doi: 10.3390/ma14175063
- [35] Quitzke C, Huang Q, Biermann H, Volkova O, Wendler M. Influence of C and N on strain-induced martensite formation in Fe-15Cr-7Mn-4Ni-0.5 Si austenitic steel. *Materials*. 2021 Oct 29;14(21):6502. doi: 10.3390/ma14216502

- [36] Li S, Withers PJ, Deng Y, Yan K. Deformation microstructures and martensitic transformation pathways in cryogenically deformed 316L stainless steel. *Journal of Materials Science*. 2024 Feb;59(5):2134-54. doi: [10.1007/s10853-023-09262-0](https://doi.org/10.1007/s10853-023-09262-0)
- [37] Zheng C, Liu C, Ren M, Jiang H, Li L. Microstructure and mechanical behavior of an AISI 304 austenitic stainless steel prepared by cold-or cryogenic-rolling and annealing. *Materials Science and Engineering: A*. 2018 May 2;724:260-8. doi: [10.1016/j.msea.2018.03.105](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.105)
- [38] Chakaravarthy RS, Swaroop S. Synergistic interplay between residual stress, hardness, and microstructural evolution in laser peened stainless steel 347. *Materials Chemistry and Physics*. 2024 Sep 1;323:129616. doi: [10.1016/j.matchemphys.2024.129616](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129616)
- [39] Choi JY, Jin W. Strain induced martensite formation and its effect on strain hardening behavior in the cold drawn 304 austenitic stainless steels. *Scripta Materialia*. 1997 Jan 1;36(1):99-104. doi: [10.1016/S1359-6462\(96\)00338-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6462(96)00338-7)
- [40] Naghizadeh M, Mirzadeh H. Modeling the kinetics of deformation-induced martensitic transformation in AISI 316 metastable austenitic stainless steel. *Vacuum*. 2018 Nov 1;157:243-8. doi: [10.1016/j.vacuum.2018.08.066](https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.08.066)
- [41] Liu E, Zhang Y, Zhu L, Zeng Z, Gao R. Effect of strain-induced martensite on the tribocorrosion of AISI 316L austenitic stainless steel in seawater. *Rsc Advances*. 2017;7(71):44923-32. doi: [10.1039/C7RA07318F](https://doi.org/10.1039/C7RA07318F)
- [42] Friedrich S, Mehner T, Dittes A, Binotsch C, Clausmeyer T, Lampke T, Awiszus B. Prediction of Corrosion in the Stainless Steel 316L in the Near-Surface Zone by Numerical Simulation: Friedrich, Mehner, Dittes, Binotsch, Clausmeyer, Lampke, and Awiszus. *JOM*. 2025 Oct;77(10):7529-39. doi: [10.1007/s11837-025-07661-z](https://doi.org/10.1007/s11837-025-07661-z)
- [43] Kurc-Lisiecka A, Ozgowicz W, Ratuszek W, Chruściel K. Texture and structure evolution during cold rolling of austenitic stainless steel. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2012;52(1):22-30.
- [44] Williamson GK, Hall WH. X-ray line broadening from filed aluminium and wolfram. *Acta metallurgica*. 1953 Jan 1;1(1):22-31. doi: [10.1016/0001-6160\(53\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0001-6160(53)90006-6)
- [45] Prev y PS. X-ray diffraction residual stress techniques. ASM International; 1986. doi: [10.31399/asm.hb.v10.a0001761](https://doi.org/10.31399/asm.hb.v10.a0001761)
- [46] Cullity BD, Smoluchowski RJ. Elements of X-ray Diffraction. *Physics Today*. 1957 Mar 1;10(3):50-.