

تأثیر آنیل بعد از نورد بر ناهمسانگردی تغییر شکل تیتانیوم خالص

تیتانیوم خالص تجاری کارشده با داشتن استحکام ویژه بالا، مقاومت حرارتی و خوردگی و نیز زیست سازگاری بالا به صورت گسترده ای در صنایع خودروسازی، هوافضا، پزشکی و پتروشیمی مورد استفاده قرار می گیرد. جهت بررسی تأثیر عملیات آنیل بر ناهمسانگردی تغییر شکل ورق تیتانیوم خالص، نمونه های کشش در راستای 0° ، 45° و 90° نسبت به جهت نورد، از نمونه های نورد شده با و بدون آنیل پایانی تهیه و خواص مکانیکی آن ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که سطح شکست نمونه ها دارای زاویه 45° نسبت به جهت اعمال کشش بوده و نمونه های نورد شده دارای ناهمسانگردی شدیدی در مقادیر مدول یانگ، تنش تسلیم و استحکام نهایی بودند که این ناهمسانگردی با اعمال آنیل پایانی کاهش یافت. همچنین مشخص شد که با اعمال آنیل پایانی، شاخص ناهمسانگردی برای استحکام نهایی از $0/490$ به $0/326$ رسید و افزایش قابل توجهی در کرنش شکست مشاهده شد که می تواند برای شکل دهی این ورق امیدوارکننده باشد.

مرتضی آذربرمس^۱
استادیار

واژه های راهنما: تیتانیوم، شکل پذیری، ناهمسانگردی، نورد، آنیل

۱- مقدمه

تیتانیوم خالص تجاری کارشده به صورت گسترده ای در صنایع خودروسازی، هوافضا، کاشتنی های پزشکی [۱]- [۳] و صنایع پتروشیمی [۴] مورد استفاده قرار می گیرد. دلیل این امر، استحکام ویژه بالا [۵، ۶]، چگالی نسبتاً پایین ($4/5 \text{ g/cm}^3$)، مقاومت حرارتی [۷]، مقاومت خوردگی [۸ و ۹] و زیست سازگاری بالای آن [۱۰، ۱۱] می باشد. همچنین تیتانیوم با دارا بودن مقاومت حرارتی بالا، به صورت ورق یا لوله در ساخت کندانسور مبدل های حرارتی در صنایع دریایی استفاده می شود [۱۲].

^۱ نویسنده مسئول، استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران،

azarbarmas@sut.ac.ir

با توسعه صنایع، نیاز به سازه‌های سبک‌تر با استحکام و شکل‌پذیری بالا مورد نیاز است. یکی از راحت‌ترین روش‌های بهبود استحکام و شکل‌پذیری فلزات، استفاده از فرآیندهای ترمومکانیکی است که منجر به تغییر بافت بلوری، تغییر آرایش دانه‌ها، مرزهای فرعی و فازهای ثانویه می‌شوند. گرچه آلیاژهای تیتانیوم نسبت به تیتانیوم خالص از خواص مکانیکی بهتری برخوردار هستند، ولی افزودن عناصر آلیاژی، چالش‌هایی را برای کاربردهای پزشکی تیتانیوم می‌تواند به بار آورد [۱۳]. ورق‌های تیتانیومی نسبت به ورق‌های مشابه مورد استفاده در صنعت از قبیل ورق‌های فولادی و آلومینیومی، ناهمسانگردی تغییر شکل شدیدتری را تجربه می‌کنند [۱۴]. به علت ساختار بلوری شش‌ضلعی فشرده (hcp) با نسبت c/a نسبتاً پایین تیتانیوم، ساز و کار تغییر شکل تیتانیوم آلفا شامل دوقلوبی و لغزش می‌باشد [۱۵] که این ساز و کارهای تغییر شکل، نقشی اساسی در شکل‌گیری بافت حاصل از تغییر شکل و آنیل بعد از تغییر شکل دارند.

ناهمسانگردی به صورت تغییرات خواص نسبت به جهات نمونه تعریف می‌شود [۱۶] و معمولاً وجود ناهمسانگردی در خواص کششی به وجود جهت‌گیری ترجیحی (بافت) و تعداد سیستم‌های لغزش فعال نسبت داده می‌شود [۱۷]. عموماً برای بررسی وجود یا عدم وجود ناهمسانگردی در خواص کششی ورق‌های فلزی، نمونه‌هایی در راستای 0° ، 45° و 90° نسبت به جهت نورد تهیه شده و در این راستاها، خواص کششی از قبیل تنش تسلیم و مدول یانگ اندازه‌گیری می‌شوند. همچنین از پارامتر r (که به‌عنوان پارامتر لنگفورد^۱ نیز شناخته می‌شود) [۱۸] یا شاخص ناهمسانگردی I [۱۹] نیز برای توصیف کمی مقدار ناهمسانگردی موجود استفاده می‌شود. وجود ناهمسانگردی در خواص کششی به خودی خود مفید یا مضر نیست و بستگی به کاربرد قطعه دارد. مثلاً در کشش عمیق ورق‌ها نیاز است که ورق‌ها یک سیلان پلاستیکی بزرگی را قبل از شکست از طریق نازک شدن در راستای ضخامت تجربه کنند [۱]. بنابراین در این مورد، نیاز است که تغییر شکل در راستای ضخامت خیلی کمتر از سطح ورق باشد.

وقتی پلی‌کریستال تیتانیوم خالص تحت فرآیند نورد قرار می‌گیرد، اکثر دانه‌های آن جهت‌گیری مشابهی می‌گیرند [۱۹]؛ بنابراین پس از نورد، بسته به راستای اعمال تنش خارجی نسبت به جهت نورد، ورق رفتار تغییر شکل متفاوتی از خود نشان خواهد داد. از طرفی، همان‌گونه که ذکر شد، تیتانیوم خالص به علت داشتن ساختار HCP با تقارن پایین، تعداد سیستم‌های لغزش فعال محدودی دارد. لذا ناهمسانگردی تغییر شکل در تیتانیوم نسبت به فلزات با ساختار مکعبی بالاست.

یکی از روش‌های افزایش استحکام در فلزات و آلیاژهای با ساختار تقارن کم، افزایش استحکام ناشی از بافت است [۲۰، ۲۱]. بدین معنی که نمونه‌ای به‌دست بیاید که در راستای خاصی، دارای استحکام بالاتری باشد. با دانستن این راستا، می‌توان قطعاتی که در معرض تنش‌های بالا در راستای خاصی هستند را طوری در سازه‌ها قرار داد که بیشترین استحکام و عمر را ارائه دهند. همین‌طور در مورد کشش عمیق ورق تیتانیوم، تا جایی که امکان پذیر است، سعی می‌شود که کرنش اعمال شده در راستای ضخامت ورق، کمینه مقدار را داشته باشد، در حالی که در سطح ورق، هر چه همسانگردی بیشتر باشد، بهتر است، تا از عیب گوشواره‌ای شدن جلوگیری شود. البته در قطعاتی که در معرض تنش‌هایی در جهات مختلف هستند، یا راستای تنش اصلی در طول زمان عوض می‌شود، توصیه بر این است که از قطعه‌ای با همسانگردی رفتار تغییر شکل استفاده شود.

¹Lankford

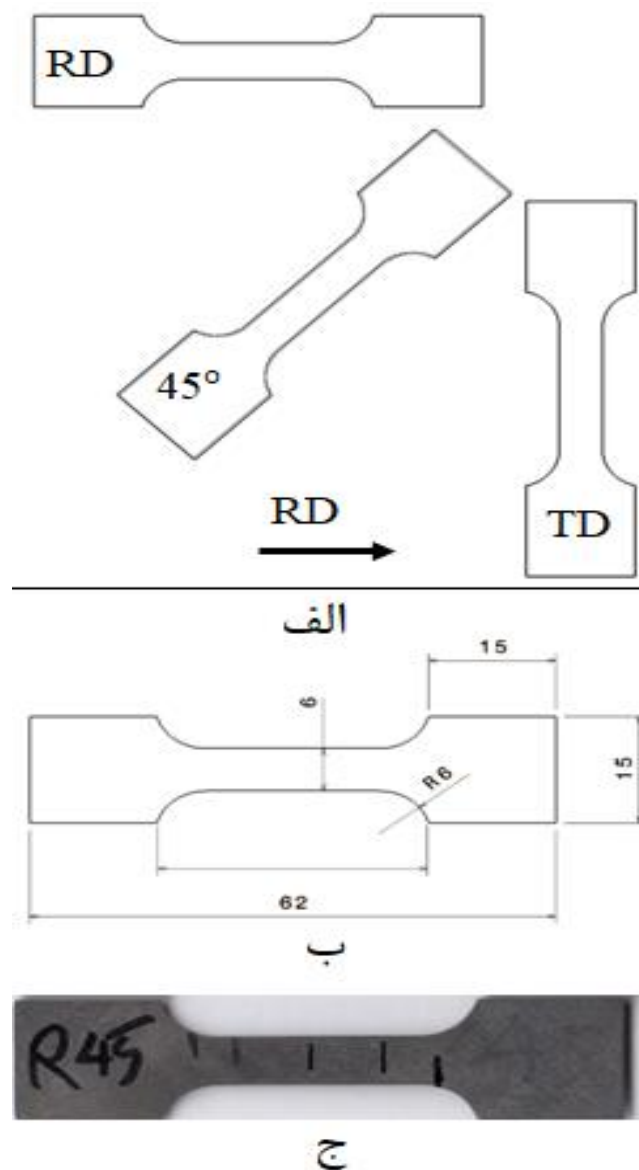
تاکنون کارهای گسترده‌ای در زمینه مطالعه خواص کششی و ناهمسانگردی رفتار تغییر شکل تیتانیم خالص تجاری انجام گرفته است. ونگ (Wang) و همکاران [۲۲] تا تأثیر تیر نورد گرم (دمای °C ۴۰۰) و آنیل پایانی (دمای °C ۶۶۰) را بر تغییر اجزای بافتی تیتانیم خالص تجاری بررسی کردند. نصیری آبراهه‌کوه و همکاران [۲۳] نیز با بررسی نورد سرد تیتانیم خالص در کاهش ضخامت‌های مختلف، مشاهده کردند که با افزایش مقدار تغییر شکل تا ۵۰ درصد، از ناهمسانگردی تغییر شکل کاسته شده و با افزایش بیشتر مقدار تغییر شکل، دوباره ناهمسانگردی افزایش می‌یابد. همچنین باثینی (Bathini) و همکاران [۲۴] با مطالعه خواص کششی نمونه‌های تیتانیم خالص و آلیاژ Ti64 برش داده شده در راستای نورد و عمود بر نورد، تأثیر ترکیب شیمیایی و امتداد نمونه را بر خواص کششی بررسی کرده‌اند. اخیراً ونگ (Wang) و همکاران [۲۵] با بررسی خواص کششی نمونه‌های تیتانیم خالص در ابعاد مختلف، دو سری معادله مشخصه با لحاظ نسبت ضخامت نمونه به اندازه دانه ارائه داده‌اند. چنگ (Chang) و همکاران [۲۶] نیز با انجام آزمایش‌های کشش و شبیه‌سازی نشان دادند که نمونه‌های تیتانیم خالص در راستای TD کارسختی و کرنش سختی پایینی را از خود نشان می‌دهند و دلیل این رفتار را به توزیع کرنش ناهمگن نسبت دادند.

یاپیسی (Yapici) و همکاران [۲۷] با بررسی تغییر شکل شدید تیتانیم خالص در کانال زاویه‌دار و سپس نورد سرد مشاهده کردند که نمونه‌های با راستای عمود بر جهت نورد، شکل‌پذیری و استحکام کششی نهایی بالاتری را از خود نشان می‌دهند. همچنین کاترین (Catherine) و عبدالحمید (Abdul Hamid) [۲۸] تأثیر دمای آنیل را بر خواص مکانیکی تیتانیم خالص تجاری مورد ارزیابی قرار داده و نشان داده‌اند که با آنیل نمونه در دمای °C ۷۰۰ استحکام کششی کاهش و با افزایش دمای آنیل از °C ۷۰۰ به °C ۹۰۰ این روند معکوس می‌شود. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود که در اکثر کارهای گزارش شده در زمینه بررسی رفتار تغییر شکل کششی ورق تیتانیم، یا تأثیر مقدار تغییر شکل بر ناهمسانگردی ورق تیتانیم مورد ارزیابی قرار گرفته و یا اینکه تأثیر دمای آنیل، ترکیب شیمیایی و امتداد نمونه بر خواص کششی بررسی شده‌اند و لذا مطالعه تأثیر آنیل پایانی بر ناهمسانگردی ورق تیتانیمی نورد شده می‌تواند موضوع جذابی باشد. بنابراین با توجه به اهمیت بحث ناهمسانگردی تغییر شکل جهت استفاده از تیتانیم خالص در صنعت، در این مقاله تأثیر آنیل پایانی بعد از نورد بر ناهمسانگردی تغییر شکل کششی این فلز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

در این کار پژوهشی، ورق تیتانیم خالص تجاری گرید ۲ با ضخامت اولیه ۱ mm به‌عنوان ماده اولیه مورد استفاده قرار گرفت. این ورق توسط شرکت لوتریوس (LOTERIOS) تولید شده بود. از ورق تهیه شده، نمونه‌هایی با طول ۱۵ cm و عرض ۷ cm بوسیله گیوتین برش داده شدند. سپس این ورق‌ها به کمک یک دستگاه نورد آزمایشگاهی مستقر در دانشگاه صنعتی سهند (ساخت شرکت برادران کاظمی) با ظرفیت ۱۶ تن، قطر غلتک ۱۲۷ mm و سرعت ۱۷ rpm تحت نورد سرد قرار گرفتند. جهت کاهش ضخامت حدود ۵۰ درصدی، ۱۵ بار به صورت پشت سر هم، ورق‌ها نورد سرد شدند. در ادامه، بخشی از نمونه‌ها تحت آنیل در دمای °C ۶۵۰ به مدت ۳۰ دقیقه قرار گرفتند تا تأثیر آنیل پایانی بر خواص مکانیکی ورق‌ها مورد ارزیابی قرار گیرد. سپس از نمونه‌های نورد شده و آنیل شده به‌وسیله دستگاه وایرکات، نمونه‌های آزمایش

کشش در راستای موازی جهت نورد (RD یا 0°)، 45° نسبت به جهت نورد (45°) و 90° نسبت به جهت نورد (TD یا 90°) برش داده شدند (در مورد راستای نمونه‌ها، به شکل (۱-الف) مراجعه شود). جهت نامگذاری نمونه‌ها، از حرف A در ابتدای نام نمونه‌های آنیل شده و از حرف R در ابتدای نام نمونه‌های نورد شده استفاده شد. برای مثال نمونه R0 به نمونه نورد شده که در راستای جهت نورد برش داده شده است (زاویه آن با جهت نورد 0° می‌باشد)، اشاره دارد. در ادامه، نمونه‌های برش داده شده، تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. آزمایش کشش با سرعت فک 1 mm/min به کمک دستگاه گوتک (Gotech) با ظرفیت 100 kN انجام گرفت. لازم به ذکر است همان‌گونه که در شکل (۱-ب) مشاهده می‌شود، ابعاد نمونه‌های کشش مطابق استاندارد ASTM E8 [۲۹] انتخاب شدند. همچنین شکل (۱-ج) نمونه آزمایش کشش برش داده شده از ورق تیتانیوم خالص را نشان می‌دهد.



شکل ۱- (الف) شماتیک نشان‌دهنده راستای نمونه‌های آزمایش کشش نسبت به جهت نورد ورق، (ب) شماتیک نشان‌دهنده ابعاد نمونه‌های کشش استفاده شده (اندازه‌ها بر حسب mm می‌باشند)، (ج) تصویر نمونه کشش برش داده شده از ورق تیتانیوم خالص

مبنای طراحی آزمایش‌ها در این مقاله بر پایه مبانی نظری آورده شده در بخش مقدمه و نیز کارهای انجام شده در زمینه تغییر شکل آلیاژهای تیتانیوم می‌باشد. با توجه به اینکه معمولاً برای بررسی ناهمسانگردی تغییرشکلی از نمونه‌های کشش در راستاهای 0° ، 45° و 90° نسبت به جهت نورد استفاده می‌شود، نمونه‌های کشش در این راستاها تهیه و نتایج آزمایش‌های کشش به صورت کیفی و کمی مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین با توجه به نتایج تحقیقات گزارش شده در زمینه تغییر شکل آلیاژهای تیتانیوم، مشاهده شد که با انجام عملیات آنیل پس از تغییر شکل سرد، می‌توان به کمک پدیده‌های نرم‌کننده ماده از قبیل تبلور مجدد استاتیکی، شکل‌پذیری نمونه‌ها را افزایش و ناهمسانگردی تغییر شکلی را تحت تأثیر قرار داد. لذا در این کار، علاوه بر نمونه‌های نورد شده، از نمونه‌های نورد و آنیل شده نیز استفاده شد تا تأثیر عملیات آنیل بر رفتار ناهمسانگردی و شکل‌پذیری آلیاژ مورد ارزیابی قرار گیرد.

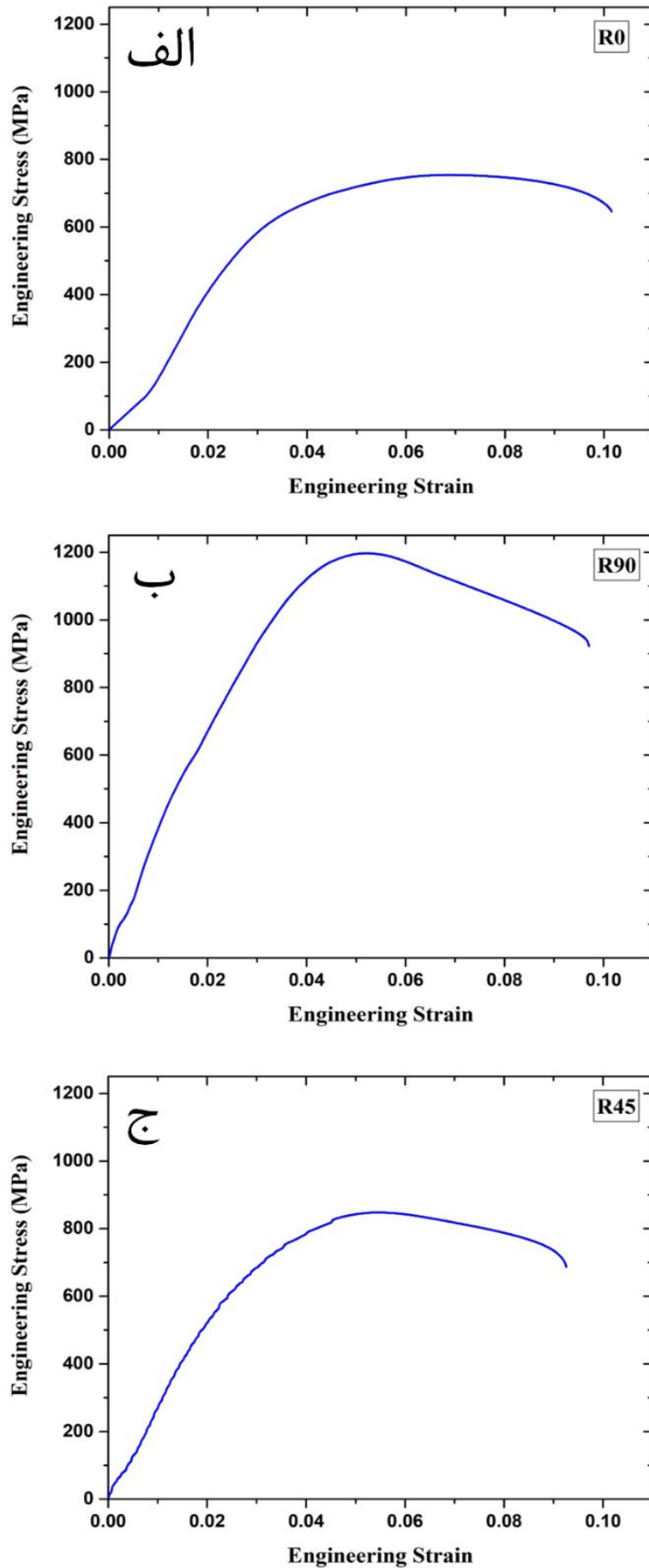
پس از انجام آزمایش کشش، داده‌های به‌دست آمده از نمودارهای نیرو-جابجایی، شامل نمودار تنش- کرنش مهندسی، مدول یانگ، تنش تسلیم، استحکام نهایی، حداکثر کرنش قابل اعمال و شاخص ناهمسانگردی، به کمک نرم‌افزار Origin Pro مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

۳- نتایج و بحث

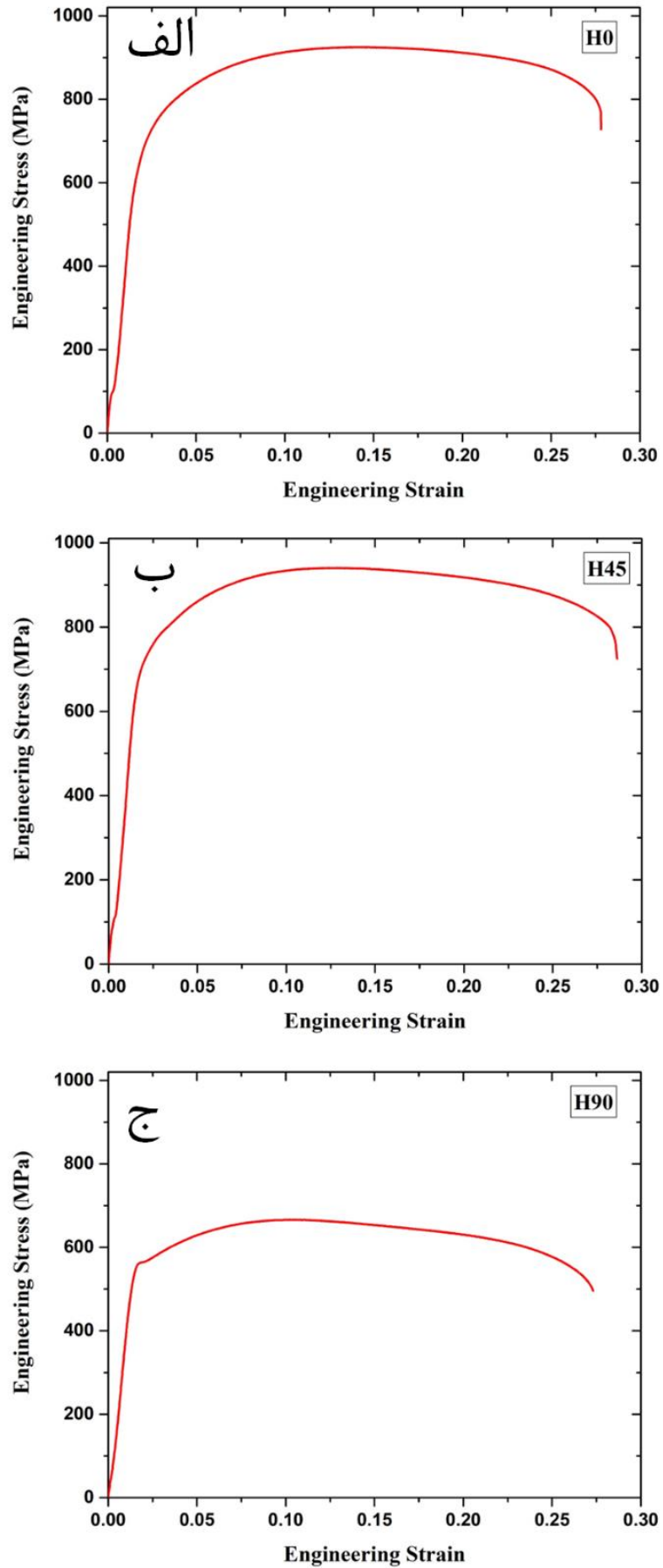
نمودارهای تنش مهندسی - کرنش مهندسی نمونه‌های تیتانیوم خالص تحت شرایط نورد شده و همچنین نورد و آنیل شده به ترتیب در شکل (۲) و شکل (۳) آورده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که تمامی نمونه‌ها پس از تغییر شکل کشسان (الاستیک) خطی، وارد ناحیه تغییر شکل مومسان (پلاستیک) شده و کارسختی را تجربه کرده و پس از رسیدن به استحکام نهایی (UTS-Ultimate tensile strength)، نمونه‌ها دچار گلوپی شده و در نهایت شکسته‌اند. نرم‌شدگی بعد از کارسختی در نمودارهای تنش-کرنش، به سیلان پلاستیک ناهمگن ناشی از افزایش دمای آدیاباتیک نسبت داده شده است [۳۰]. همان‌گونه که از نمودارهای تنش مهندسی-کرنش مهندسی مشخص است، شکل کلی نمودارها حاکی از وجود ناهمسانگردی در تغییر شکل نمونه‌ها بویژه در مورد نمونه‌های نورد شده بدون آنیل است. برای بررسی دقیق‌تر این موضوع، نیاز است که اطلاعات کمی مناسبی از بخش‌های مختلف نمودارها استخراج و مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند که این کار در ادامه انجام خواهد گرفت.

نکته قابل توجه در مورد نمونه‌های تیتانیوم شکسته شده در آزمایش کشش این است که همان‌گونه که در تصاویر آورده شده در شکل (۴) دیده می‌شود، تمامی این نمونه‌ها پس از تجربه کردن پدیده گلوپی موضعی، در راستای 45° نسبت به راستای اعمال نیروی کشش، دچار شکست شده‌اند. مشابه این رفتار در کارهای دیگر نیز گزارش شده است [۳۱، ۳۲] و می‌تواند به حداکثر بودن مقدار تنش برشی روی صفحات با زاویه 45° نسبت به راستای بارگذاری کشش محوری مرتبط باشد.

جهت بررسی دقیق‌تر رفتار ناهمسانگردی تغییر شکل، پارامترهای مدول یانگ، تنش تسلیم، استحکام نهایی و حداکثر تغییر شکل قابل اعمال، مورد ارزیابی قرار گرفتند.



شکل ۲- نمودارهای تنش مهندسی-کرنش مهندسی برای نمونه‌های تیتانیوم خالص نورد شده

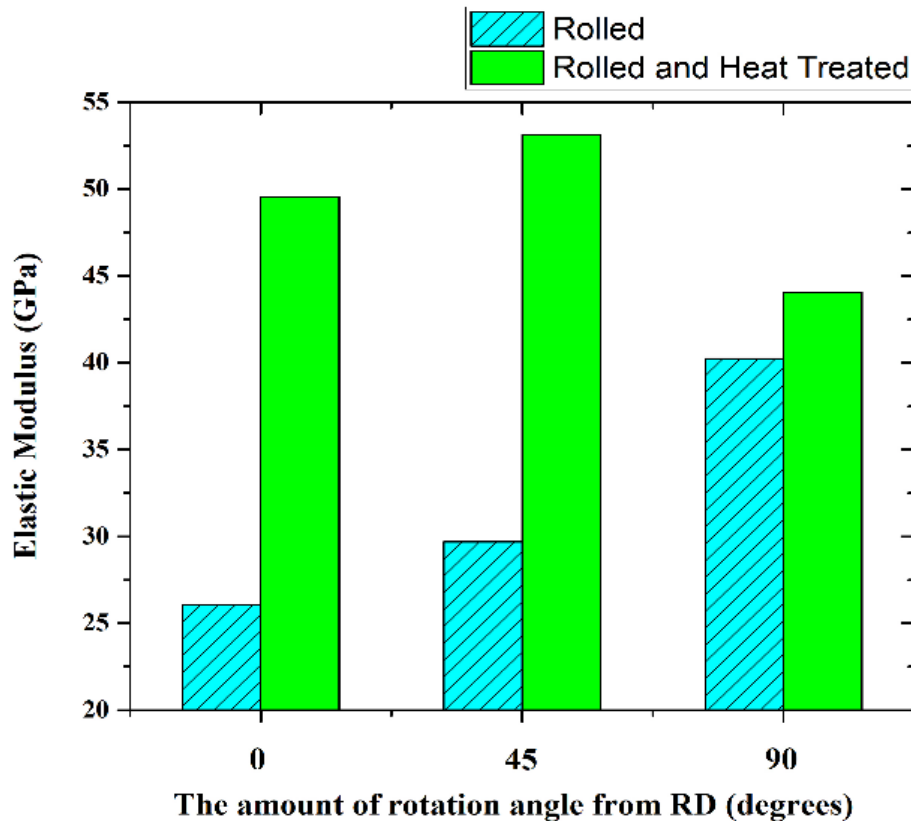


شکل ۳- نمودارهای تنش مهندسی- کرنش مهندسی برای نمونه‌های تیتانیوم خالص نورد و آنیل شده



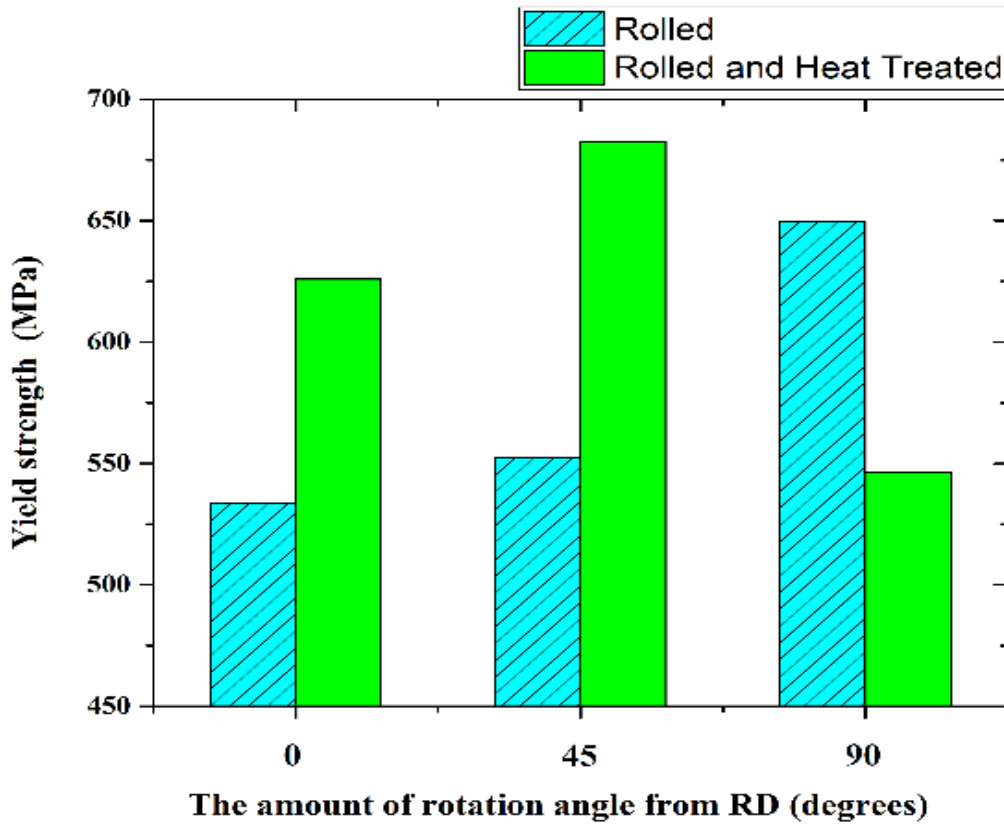
شکل ۴- تصاویر نمونه‌های تیتانیوم خالص نورد شده و نورد شده با آنیل پایانی بعد از انجام آزمایش کشش که شکست نمونه‌ها در راستای 45° نسبت به راستای اعمال نیروی کشش را نشان می‌دهند.

در شکل (۵) مقادیر مدول یانگ برای نمونه‌های تیتانیومی نورد شده و نورد شده با آنیل پایانی نسبت به راستای نمونه‌ها مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که در مورد نمونه‌های نورد شده، مدول یانگ از حدود 26 GPa برای نمونه RD به حدود 30 GPa برای نمونه 45° و 40 GPa برای نمونه TD افزایش یافته است. به عبارتی نتایج حاکی از افزایش 54% مدول یانگ برای نمونه TD نسبت به نمونه RD است و این موضوع نشان دهنده وجود ناهمسانگردی شدیدی در نمونه‌ها است. از طرف دیگر برای نمونه نورد شده با آنیل پایانی، مدول یانگ از حدود 50 GPa در نمونه RD به 53 GPa برای نمونه 45° و 44 GPa برای نمونه TD رسیده است. یعنی مدول یانگ نمونه در جهت TD نسبت به جهت RD مقدار کاهش 12% را تجربه کرده است که این امر نشان‌دهنده کاهش ناهمسانگردی در مدول یانگ است. تغییر مدول یانگ در ساختار تیتانیوم خالص نسبت به جهت نورد در کارهای دیگران [۳۳] نیز گزارش و به وجود بافت در ساختار ماده نسبت داده شده است.

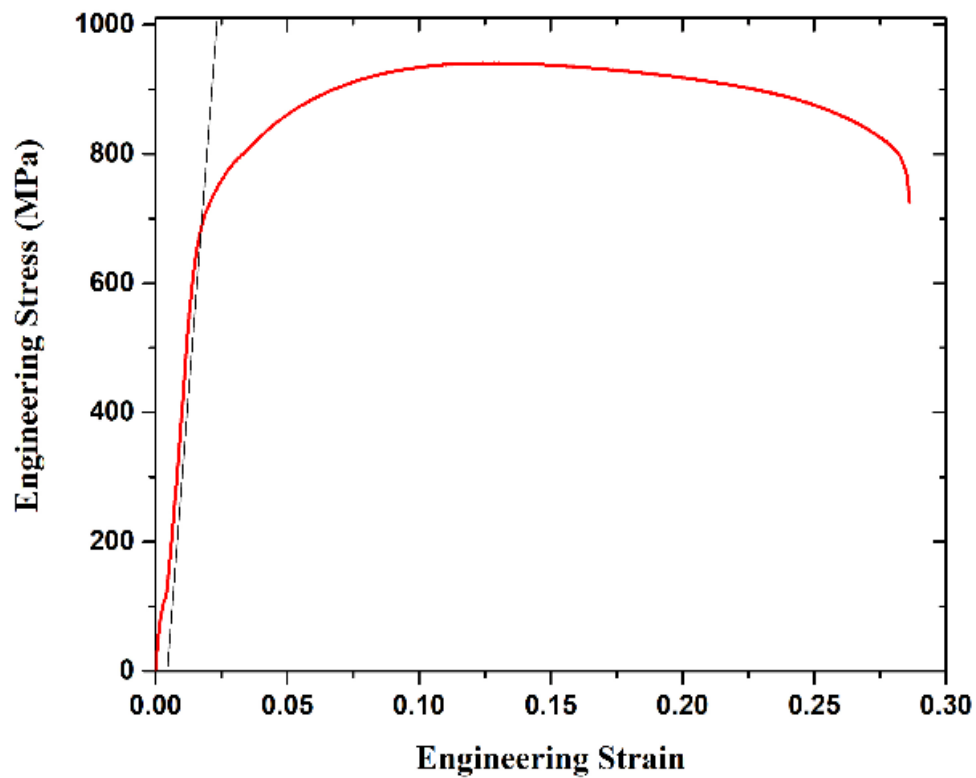


شکل ۵- نمودار ستونی نشان‌دهنده تغییرات مقادیر مدول یانگ نسبت به راستای نمونه‌ها برای فلز تیتانیوم نورد شده و نورد شده با آنیل پایانی

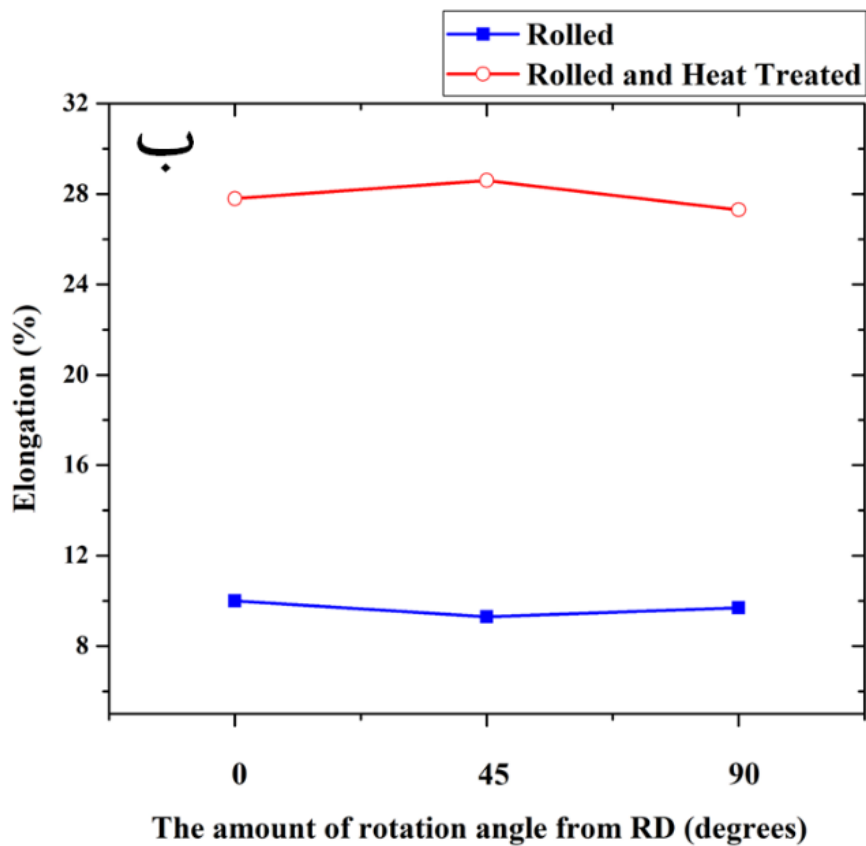
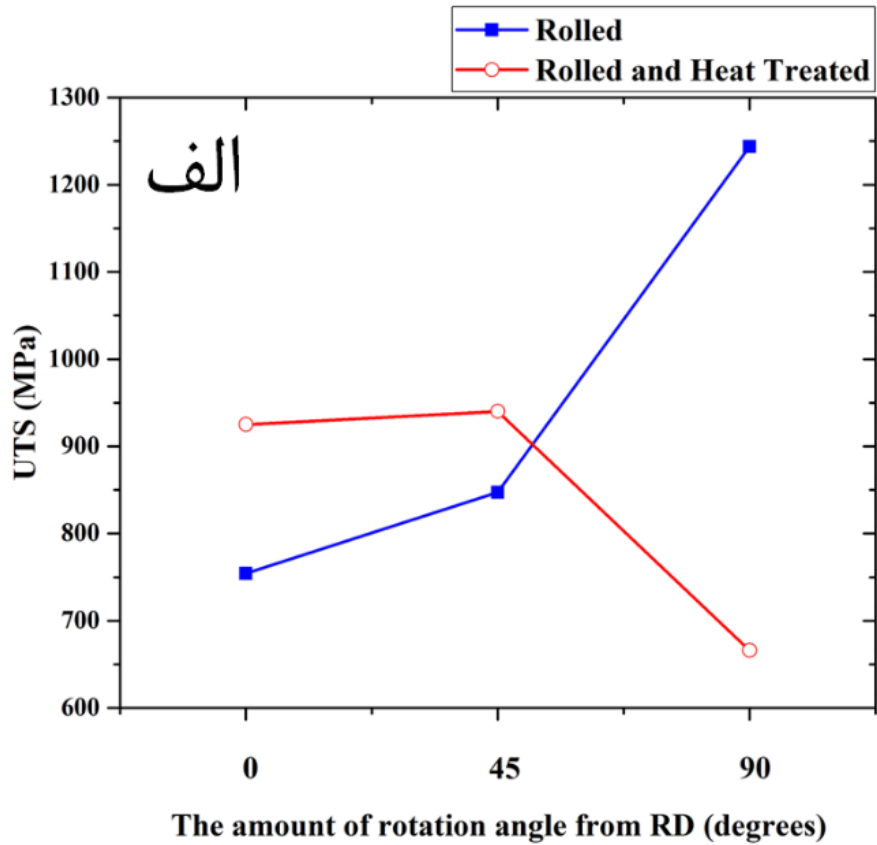
مقادیر تنش تسلیم نمونه‌های تیتانیوم نورد شده و نورد شده با آنیل پایانی در شکل (۶) آورده شده‌اند. با توجه به اینکه در اکثر نمودارهای تنش- کرنش، گذار از ناحیه الاستیک به ناحیه پلاستیک به صورت تدریجی بود، تعیین تنش تسلیم با استفاده از روش آفست 0.2% درصد انجام شد. یعنی ابتدا معادله ناحیه خطی در نمودار تنش کرنش به دست آمده و سپس خط به دست آمده، به اندازه کرنش 0.02% به سمت راست منتقل و ناحیه تقاطع این خط منتقل شده با نمودار تنش-کرنش به عنوان تنش تسلیم در نظر گرفته شد (شماتیک این روش در شکل (۷) آورده شده است). با توجه به شکل (۶) می‌توان گفت که رفتار ناهمسانگردی تنش تسلیم نمونه‌ها مشابه رفتار تغییرات مدول یانگ می‌باشد. بدین ترتیب که در نمونه نورد شده تنش تسلیم برای نمونه R90 حدود 22% بیشتر از نمونه R0 می‌باشد و در مورد نمونه نورد شده با آنیل پایانی، نمونه H90 حدود 13% درصد کمتر از نمونه H0 می‌باشد. نکته حائز اهمیت این است که پدیده افزایش تنش تسلیم ناشی از بافت در مورد نمونه نورد شده در حالت R90 رخ داده است و در مورد نمونه نورد شده با آنیل پایانی در حالت H45 ظاهر شده است. تفاوت در تنش تسلیم در جهات مختلف ورق، نشان می‌دهد که فعالیت سیستم‌های لغزش در نمونه‌ها با یکدیگر متفاوت است. ترتیب افزایش تنش تسلیم نمونه‌های تیتانیوم نورد شده از حالت موازی RD به سمت 45° و سپس به سمت TD می‌تواند ناشی از وجود بافت قاعده تقسیم شده TD (این بافت که تحت عنوان TD-split basal texture شناخته می‌شود، بافتی است که در تصاویر قطبی به جای اینکه یک بافت قاعده با یک پیک تنه‌ای متمرکز در مرکز ظاهر شود، به صورت دو پیک، یکی در سمت محور TD و دیگری به سمت محور TD- ظاهر می‌شود) باشد [۱۹].



شکل ۶- نمودار ستونی نشان دهنده تغییرات مقادیر تنش تسلیم نسبت به راستای نمونه‌ها برای فلز تیتانیوم نورد شده و نورد شده با آنیل پایانی



شکل ۷- شماتیک نشان دهنده روش تعیین تنش تسلیم با روش آفست ۰/۲ درصد برای نمونه‌های تیتانیومی نورد شده و نورد شده با آنیل پایانی



شکل ۸ - تغییرات مقادیر (الف) استحکام نهایی (UTS) و (ب) حداکثر تغییر شکل قابل اعمال (Elongation)، برای نمونه‌های تیتانیومی به صورت تابعی از اختلاف جهت گیری راستای نمونه نسبت به جهت نورد

در شکل (۸-الف) استحکام نهایی نمونه‌های نورد شده و نورد شده با آنیل پایانی به صورت تابعی از راستای نمونه‌ها آورده شده است. مشاهده می‌شود که در نمونه نورد شده، ناهمسانگردی شدیدی در مقادیر استحکام نهایی وجود دارد و افزایش استحکام از ۷۵۴ به ۱۲۴۴ MPa ملاحظه می‌شود. به عبارتی افزایش استحکام نهایی ۶۵ درصدی با تغییر راستای نمونه ظاهر شده است. این افزایش استحکام ناشی از بافت می‌تواند در کاربردهایی که تنش در یک راستا مقدار بسیار بالاتری از جهات دیگر دارد، مورد استفاده قرار گیرد. تفاوت در رفتار تغییر شکل پلاستیک نمونه‌ها در جهات مختلف می‌تواند ناشی از فعالیت دوقلوبی‌ها باشد که بر کارسختی ماده تأثیر می‌گذارد [۳۳].

نکته قابل توجه در این شکل این است که نمونه‌های نورد شده و نمونه‌های نورد شده با آنیل پایانی، رفتار ناهمسانگردی متفاوتی از خود نشان می‌دهند. اینکه در یک شرایطی برخی از خواص مکانیکی برای جهت TD بیشتر از ۴۵° و RD و در شرایط دیگر کمتر از ۴۵° و RD باشد، در کارهای مشابه دیگری [۱۹] نیز برای فلز تیتانیوم مشاهده شده است و می‌تواند به پدیده‌های ریزساختاری و بافتی رخ داده در ساختار در شرایط مختلف مرتبط باشد. استحکام پایین در جهت TD برای آلیاژ تیتانیومی تحت عملیات انحلال قرار گرفته توسط کومار (Kumar) و همکاران [۳۰] نیز گزارش شده است.

شکل (۸-ب) حداکثر کرنش اعمالی قبل از شکست نمونه‌های تیتانیومی را برای حالات نورد شده و نورد شده با آنیل پایانی نشان می‌دهد.

این نمودارها بیانگر این نکته هستند که در مورد مقدار تغییر شکل قابل اعمال، نمونه‌ها برای هر دو حالت نورد شده و نورد شده با آنیل پایانی تقریباً رفتار همسانگردی دارند. اما نمونه‌های آنیل شده تغییر طول خیلی بیشتری را تجربه کرده‌اند. برای مثال کرنش شکست نمونه H90 ۲/۸ برابر نمونه R90 بوده است. این افزایش حدود ۳ برابری در حداکثر کرنش می‌تواند برای شکل‌دهی این فلز جذاب باشد.

مقدار ناهمسانگردی در خواص کششی می‌تواند با شاخص ناهمسانگردی I به صورت رابطه $I = |X_{RD} - X_{TD}| / \bar{X}$ محاسبه شود که در این رابطه، X نشانگر خاصیت مکانیکی مد نظر (در اینجا استحکام نهایی و حداکثر کرنش قابل اعمال هستند) و \bar{X} میانگین خاصیت مکانیکی مورد نظر در جهات RD و TD می‌باشند. مقدار I به دست آمده از این رابطه هر چه بزرگتر باشد، نشانگر وجود ناهمسانگردی شدیدتر می‌باشد. مقادیر I محاسبه شده برای پارامترهای استحکام نهایی و حداکثر تغییر شکل در جدول (۱) آورده شده‌اند. ملاحظه می‌شود که شاخص ناهمسانگردی استحکام نهایی با انجام آنیل پایانی پس از نورد، از مقدار ۰/۴۹۰ به ۰/۳۲۶ کاهش یافته است. همچنین این جدول نشان می‌دهد که ناهمسانگردی ناچیزی در حداکثر تغییر شکل قابل اعمال وجود دارد و این ناهمسانگردی، با اعمال آنیل از مقدار ۰/۰۳۰ به ۰/۰۱۸ رسیده است.

جدول ۱- مقادیر شاخص ناهمسانگردی I محاسبه شده برای ورق‌های تیتانیوم خالص نورد شده و نورد شده با آنیل پایانی

	نمونه نورد شده	نمونه نورد شده با آنیل پایانی
I_{UTS}	۰/۴۹۰	۰/۳۲۶
$I_{Elongation}$	۰/۰۳۰	۰/۰۱۸

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، خواص کششی و رفتار ناهمسانگردی تغییر شکل ورق تیتانیوم خالص تجاری گرید ۲ در شرایط نورد شده و نورد شده با آنیل پایانی مورد مطالعه قرار گرفتند و نتایج زیر استخراج شدند:

- ۱- منحنی‌های تنش مهندسی - کرنش مهندسی تمامی نمونه‌ها، شامل ناحیه الاستیک، کارسختی، نرم‌شدگی و سپس شکست بودند و سطح شکست تمامی نمونه‌ها دارای زاویه 45° نسبت به جهت اعمال کشش بود.
- ۲- نمونه‌های نورد شده دارای ناهمسانگردی شدیدی در پارامترهای مدول یانگ، تنش تسلیم و استحکام نهایی بودند و ناهمسانگردی مشاهده شده در حداکثر کرنش قابل تحمل، ناچیز بود.
- ۳- نتایج نشان دادند که می‌توان به کمک فرآیندهای ساده نورد و آنیل، ورق تیتانیومی با ناهمسانگردی مکانیکی پایین و بالا به دست آورد. مشاهده شد که با انجام فرآیند آنیل در دمای 650°C به مدت ۳۰ دقیقه روی نمونه‌های نورد شده، ناهمسانگردی مدول یانگ و تنش تسلیم کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که شاخص ناهمسانگردی برای استحکام نهایی از ۰/۴۹۰ به ۰/۳۲۶ می‌رسد.
- ۴- مشاهده شد که آنیل نمونه‌های نوردی در دمای 650°C به مدت ۳۰ دقیقه می‌تواند حداکثر کرنش قابل اعمالی به ورق تیتانیوم خالص را تا حدود سه برابر ارتقا دهد که این موضوع می‌تواند برای شکل‌دهی این ورق برای تغییر شکل‌های شدید امیدوار کننده باشد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی سهند جهت در اختیار گذاشتن تجهیزات آزمایشگاهی تشکر می‌گردد.

مراجع

- [1] D. K. Chouhan, S. Biswas, A. K. Singh, and A. J. Shukla, "High Tensile Strength-ductility Combination in Cold Multiaxial Plane-strain Forged and Rolled Nanostructured Titanium," *Materialia*, Vol. 11, Article No. 100698, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100698>.
- [2] N. Maruthuvakudi Venkatram, S. Alsabeeha, N. R. Weston, Z. Liu, and D. N. Mavris, "Life Cycle Assessment and Risk Management of Titanium for Aerospace Applications," in *AIAA SCITECH 2024 Forum*, pp. 8-12, Orlando, FL, 2024, <https://doi.org/10.2514/6.2024-1216>.
- [3] K.-T. Kim, S. S. Nisar, and H.-C. Choe, "Mechanical Octacalcium Phosphate Coatings on the Plasma Electrolytic Oxidized Pure Titanium for Bio-implant Use," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 480, Article No. 130602, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130602>.
- [4] W. Li, S. Wang, Z. Huang, S. Li, Z. Huang, and H. Yu, "Anisotropic Mechanism of Cold-rolled Pure Titanium Plate During the Two-step Tensile Process of the Variable Path," *Materials Science and Engineering: A*, Article No. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146755>.

- [5] Y. Harada, K. Ogawa, and T. Aoki, "Effects of Thermomechanical Treatments on Tensile Properties of Pure Titanium," in *Materials Science Forum*, Vol. 1107, pp. 117–122, 2023, <https://www.scientific.net/MSF.1107.117>.
- [6] W. Li, S. Li, and H. Yu, "Research on the Anisotropy of Plastic Behavior and Deformation Mechanism of Textured Pure Titanium," *Materials Characterization*, Vol. 194, Article No. 112483, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.112483>.
- [7] B. Zhou, R. Yang, B. Wang, L. Deng, and Y. Zhang, "Twinning Behavior of Pure Titanium During Rolling at Room and Cryogenic Temperatures," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 803, Article No. 140458, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140458>.
- [8] E. P. Utomo, F. Rokhmanto, S. Herbirowo, and C. Sutowo, "Optimization of Ti-30Nb-xSn Alloys on Morphological, Mechanical and Corrosion Properties," *Advances in Materials and Processing Technologies*, Vol. 10, No. 3, pp. 2634–2642, 2024, <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2226920>.
- [9] B. Seo, H.-K. Park, C.-S. Park, and K. Park, "Effect of Alloying Elements on Corrosion Properties of High Corrosion Resistant Titanium Alloys in High Concentrated Sulfuric Acid," *Materials Today Communications*, Vol. 34, Article No. 105131, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105131>.
- [10] E. Y. Hussein, J. M. S. Al-Murshdy, N. S. Radhi, and Z. Al-Khafaji, "Surface Modification of Titanium Alloy by Titania/Silver Multilayers Coating for Biomedical Application," *Journal of Advanced Research in Micro and Nano Engineering*, Vol. 20, No. 1, pp. 66–78, 2024, <https://doi.org/10.37934/armne.20.1.6678>.
- [11] E. Marin, and A. Lanzutti, "Biomedical Applications of Titanium Alloys: A Comprehensive Review," *Materials (Basel)*, Vol. 17, No. 1, pp. 114, 2023, <https://doi.org/10.3390/ma17010114>.
- [12] J. Kim, Q. T. Pham, J. Ha, and Y. S. Kim, "Constitutive Modeling of Commercial Pure Titanium Sheet Based on Non-associated Flow Rule and Differential Hardening," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 230, Article No. 107549, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107549>.
- [13] A. Jäger, V. Gärtnerova, and K. Tesař, "Microstructure and Anisotropy of the Mechanical Properties in Commercially Pure Titanium after Equal Channel Angular Pressing with Back Pressure at Room Temperature," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 644, pp. 114–120, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.07.038>.
- [14] T. Hama, A. Kobuki, and H. Takuda, "Crystal-plasticity Finite-element Analysis of Anisotropic Deformation Behavior in a Commercially Pure Titanium Grade 1 Sheet," *International Journal of Plasticity*, Vol. 91, pp. 77–108, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2016.12.005>.
- [15] S. V. Zhrebtsov, G. S. Dyakonov, A. A. Salem, S. P. Malysheva, G. A. Salishchev, and S. L. Semiatin, "Evolution of Grain and Subgrain Structure During Cold Rolling of Commercial-purity Titanium," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 9, pp. 3474–3479, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.039>.

- [16] M. N. Bidgoli and L. Jing, "Anisotropy of Strength and Deformability of Fractured Rocks," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical*, Vol. 6, No. 2, pp. 156–164, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.01.009>.
- [17] Y. Wu, R. Fan, M. Chen, K. Wang, J. Zhao, and W. Xiao, "High-temperature Anisotropic Behaviors and Microstructure Evolution Mechanisms of a near- α Ti-alloy Sheet," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 820, pp. 141560, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141560>.
- [18] C. Moon, S. Thuillier, J. Lee, and M.-G. Lee, "Mechanical Properties of Solution Heat Treated Al-Zn-Mg-Cu (7075) Alloy under Different Cooling Conditions: Analysis with Full Field Measurement and Finite Element Modeling," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 856, Article No.158180, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.158180>.
- [19] J. W. Won, B.-C. Suh, J. H. Kim, D. W. Lee, and Y.-T. Hyun, "Texture Development of Pure Ti by Rolling at Various Temperatures and Its Effect on Sheet Formability," *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 32, pp. 2214–2223, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.08.038>.
- [20] G. Liu, Y. Yang, X. Luo, B. Huang, Z. Kou, and P. Li, "Improving the Mechanical Properties of Titanium Films by Texture Strengthening," *Materials Characterization*, Vol. 127, pp. 365–370, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.03.015>.
- [21] M. A. W. Lowden and W. B. Hutchinson, "Texture Strengthening and Strength Differential in Titanium-6al-4v," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 6, pp. 441–448, 1975, <https://doi.org/10.1007/BF02658401>.
- [22] L. Wang, H. Zhang, G. Huang, M. Cao, X. Cao, E. Mostaed, and M. Vedani, "Formability and Anisotropy of the Mechanical Properties in Commercially Pure Titanium after Various Routes Normal and Different Speed Rolling," *Journal of Materials Research*, Vol. 31, No. 21, pp. 3372–3380, 2016, <https://doi.org/10.1557/jmr.2016.352>.
- [23] H. Nasiri-Abarbekoh, A. Ekrami, A. A. Ziaei-Moayyed, and M. Shohani, "Effects of Rolling Reduction on Mechanical Properties Anisotropy of Commercially Pure Titanium," *Materials & Design*, Vol. 34, pp. 268–274, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.024>.
- [24] U. Bathini, T. S. Srivatsan, A. Patnaik, and T. Quick, "A Study of the Tensile Deformation and Fracture Behavior of Commercially Pure Titanium and Titanium Alloy: Influence of Orientation and Microstructure," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 8, pp. 1172–1182, 2010, <https://doi.org/10.1007/s11665-010-9613-5>.
- [25] S. Wang, L. Niu, C. Chen, Y. Pang, B. Liao, Z. H. Zhong, P. Lu, P. Li, X. D. Wu, J. W. Coenen, L.F. Cao, and Y.C. Wu, "Size Effects on the Tensile Properties and Deformation Mechanism of Commercial Pure Titanium Foils," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 730, pp. 244–261, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.06.009>.
- [26] L. Chang, Z. Miao, B. Zhou, C. Zhou, and X. He, "Understanding the Anisotropic Tensile Deformation Behavior of Commercially Pure Titanium by Experiments and Crystal Plasticity Simulations," *Materials Letters*, Vol. 339, Article No. 134095, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134095>.

- [27] G. G. Yapici, I. Karaman, and H. J. Maier, "Mechanical Flow Anisotropy in Severely Deformed Pure Titanium," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 434, No. 1–2, pp. 294–302, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.06.082>.
- [28] L. D. K. Catherine, and D. B. A. Hamid, "The Effect of Heat Treatment on the Tensile Strength and Ductility of Pure Titanium Grade 2," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 429, No. 1, Article No. 12014, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/429/1/012014.
- [29] E. ASTM, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", Annual Book of ASTM Standards, Designation: E8/E8M – 13a American, Provided by IHS under license with ASTM, Association State Highway and Transportation Officials Standard AASHTO No. T68 an American National Standard, 2001.
- [30] S. S. S. Kumar, B. Pavithra, V. Singh, P. Ghosal, and T. Raghu, "Tensile Anisotropy Associated Microstructural and Microtextural Evolution in A Metastable Beta Titanium Alloy," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 747, pp. 1–16, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.053>.
- [31] W. J. Harrison, M. T. Whittaker, and R. J. Lancaster, "A Model for Time Dependent Strain Accumulation and Damage at Low Temperatures in Ti–6al–4v," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 574, pp. 130–136, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.02.070>.
- [32] G. Del Guercio, M. Galati, A. Saboori, P. Fino, and L. Iuliano, "Microstructure and Mechanical Performance of Ti–6al–4v Lattice Structures Manufactured via Electron Beam Melting (EBM): A Review," *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, Vol. 33, No. 2, pp. 183–203, 2020, <https://doi.org/10.1007/s40195-020-00998-1>.
- [33] S. Wronski, K. Wierzbanowski, M. Jędrychowski, J. Tarasiuk, M. Wronski, A. Baczmanski, and B. Bacroix, "Microstructure Evolution of Titanium after Tensile Test," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 656, pp. 1–11, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.041>.

Effect of the Annealing after Rolling Process on the Deformation Anisotropy of Pure Titanium

*Corresponding author: **Morteza Azarbarmas**

Assistant Professor, Research Center for Advance Materials, Faculty of Materials Engineering,
Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

azarbarmas@sut.ac.ir

Abstract

Wrought commercial pure titanium, with high specific strength, heat and corrosion resistance, and bio-compatibility, is widely used in the automobile, aerospace, biological, and petroleum industries. For evaluating the effects of the annealing treatment on the forming anisotropy, tensile test samples with 0, 45 and 90° rotations to RD for rolled and annealed samples were prepared and their mechanical properties were investigated. Results showed that the fracture surface of samples have an angle of 45° with respect to the direction of the loading and rolled samples have a severe anisotropy in the Yang modulus and yield stress as well as UTS, and this anisotropy is reduced by applying the annealing treatment. Also, it was revealed that after the final annealing the anisotropy index of UTS is reduced from 0.490 to 0.326 and a considerable increase in the elongation of samples is seen which is encouraging for forming of pure titanium sheets.

Keywords: Titanium, Formability, Anisotropy, Rolling, Annealing