



**iMat 2022**



## بررسی ریزساختار و سختی فولاد زنگ‌نزن ۴۰۹ پس از انجام فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار همسان

ندا شهسوار<sup>۱</sup>، محمد حسن فرشیدی<sup>۲</sup>، غلامرضا ابراهیمی<sup>۳</sup>

Neda.Shahsavari72@yahoo.com

### چکیده

فولادهای زنگ‌نزن فریتی به واسطه خواصی مانند مقاومت به خوردگی تنش، ضریب انبساط حرارتی پایین و قیمت مناسب نسبت به سایر فولادهای زنگ‌نزن، کاربردهای گسترده‌ای در بخش‌های مختلف صنعت دارند. با این وجود، امکان بهبود خواص مکانیکی به ویژه سختی و استحکام این فولادها به کمک عملیات حرارتی وجود ندارد. لذا می‌توان از روش‌هایی مانند اعمال تغییر شکل شدید و دستیابی به ساختار فوق ریزدانه برای افزایش استحکام این فولادها بهره برد. در همین راستا، در این پژوهش تاثیر فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار همسان (ایکپ) بر ریزساختار و سختی فولاد زنگ‌نزن فریتی ۴۰۹ بررسی گردید. بدین منظور، نمونه‌هایی از این فولاد در ۱، ۲ و ۴ پاس و دو مسیر مختلف، تحت فرآیند ایکپ در یک قالب با زاویه کانال ۱۲۰ درجه قرار گرفتند. سپس ریزساختار نمونه‌ها پس از انجام متالوگرافی توسط میکروسکوپ نوری و الکترونی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، سختی سنجی به روش میکرو ویکرز بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که انجام ایکپ، کشیدگی دانه و ریز شدن آن‌ها را به دنبال دارد. البته، این اتفاق در مسیر C به دلیل چرخش نمونه پس از هر پاس به طور کمتر رخ داده است. نتایج سختی سنجی نیز نشان می‌دهد که بیشترین افزایش سختی مربوط به نمونه یک پاس با تغییر از ۲۰۰ ویکرز به ۲۵۰ ویکرز می‌باشد. برای نمونه‌های با تعداد پاس بیشتر، تغییرات ریزساختاری محدود شده و افزایش سختی کمتر رخ داده است. با افزایش تعداد پاس در هر دو مسیر با توجه به وقوع بازیابی، وقوع کرنش سختی در نمونه‌ها محدود گردیده و سختی ثابت شده است.

کلمات کلیدی: فولاد زنگ‌نزن فریتی، تغییر شکل شدید، فرآیند ECAP، ساختار ریزدانه.

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۲</sup> استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

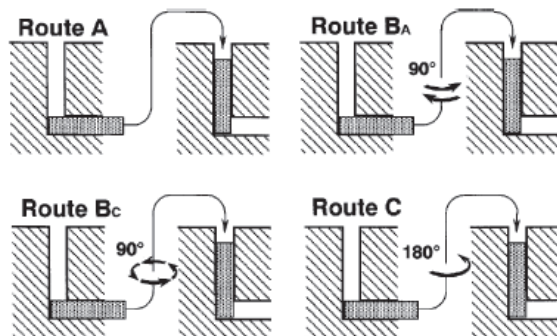
<sup>۳</sup> استاد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد



## ۱- مقدمه

فولادهای زنگ نزن فریتی ( $FSSs^1$ ) آلیاژهای آهن-کربن-کروم هستند که در مقایسه با فولادهای زنگ نزن آستنیتی ارزان تر هستند، ضریب انبساط حرارتی کمتری دارند و مقاومت بهتری در برابر ترک خوردگی ناشی از تنش دارند. با توجه به این ویژگی‌ها،  $FSSs$ ها به طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. این فولادها به طور معمول با انجام عملیات حرارتی سخت نمی‌شوند. در این آلیاژها، حداقل سختی و حداکثر شکل‌پذیری، چقرمگی و مقاومت در برابر خوردگی در شرایط آنیل شده وجود دارد. یکی از راه‌های افزایش سختی و استحکام فولادهای زنگ‌نزن فریتی، استفاده از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید ( $SPD^2$ ) می‌باشد [۲ و ۳].

فشار در کانال زاویه‌دار همسان ( $ECAP^3$ )، یکی از روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید است که به عنوان یک روش برای تولید مواد ریزدانه با استحکام بالا کاربرد دارد. در این روش، قطعه از طریق یک قالب دارای دو کانال با سطح مقطع مساوی، با زاویه‌ای بین ۹۰ درجه تا ۱۸۰ درجه، تحت پرس قرار می‌گیرد. در اثر عبور قطعه از کانال، سطح بالایی از تغییر شکل برشی ایجاد می‌شود. در این روش، محدودیت‌های کمتری نسبت به سایر روش‌های تغییر شکل شدید وجود دارد و با توجه به اینکه تغییری در ابعاد نمونه رخ نخواهد داد، امکان انجام این فرآیند در چند پاس متوالی وجود دارد [۳ و ۴]. متغیرهایی مانند زاویه کانال، سرعت اعمال فشار، دمای قالب، تعداد پاس و مسیر انجام فرآیند، در این روش وجود دارند که تغییر در آنها منجر به تغییر در ساختار و خواص نمونه پس از فرآیند می‌شود. چهار مسیر برای فرآیند فشار در این روش در نظر گرفته شده است. در مسیر A، نمونه پس از خارج شدن از قالب، بدون چرخش و مانند پاس اول، تحت اعمال پرس قرار می‌گیرد. در مسیر  $B_A$ ، نمونه پس از هر پاس به صورت متناوب، با زاویه ۹۰° چرخیده می‌شود و در مسیر  $B_C$ ، پس از هر پاس، نمونه در جهت یا خلاف جهت عقربه‌های ساعت تحت زاویه ۹۰° چرخیده می‌شود. نهایتاً در مسیر C نیز نمونه با زاویه ۱۸۰° پس از هر پاس چرخانده می‌شود [۵].



شکل ۱- چهار مسیر اصلی فرآیند فشار در کانال زاویه‌دار همسان (ایکپ) [۵].

<sup>1</sup> Ferritic Stainless Steels (FSSs)

<sup>2</sup> Severe Plastic Deformation (SPD)

<sup>3</sup> Equal-channel angular pressing (ECAP)



فرآیند ایکپ، در موارد بسیاری برای ایجاد تغییر شکل شدید و ساختار ریزدانه و افزایش استحکام برای آلیاژهای آلومینیوم [۶ و ۷]، آلیاژهای منیزیوم [۸]، فولادهای  $IF^1$  و کم کربن [۹ و ۱۰]، فولادهای زنگ نزن آستنیتی [۱۱ و ۱۲] بکار گرفته شده است. در این میان، به انجام فرآیند ایکپ بر روی فولادهای زنگ نزن فریتی و بررسی نتایج آن توجه کمتری شده است. لذا در این پژوهش، فرآیند ECAP بر روی آلیاژ فولاد زنگ نزن ۴۰۹ با هدف بررسی تاثیر آن بر ریزساختار و سختی این آلیاژ انجام شده است.

## ۲- مواد و روش تحقیق

### ۲-۱- فولاد مورد استفاده

فولاد مورد استفاده در این پژوهش، فولاد زنگ نزن فریتی ۴۰۹ با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول ۱ می باشد. برای انجام فرآیند فشار در کانال زاویه دار همسان (ECAP)، قطعاتی از این فولاد به ابعاد  $10 \times 10 \times 90 \text{ mm}^3$  و چهار گوشه آن با شعاع  $1 \text{ mm}$  پخ خورد. توسط ماشینکاری و ایرکات آماده گردید. به منظور حذف اثرات ناشی از نورد ورق فولادی تهیه شده، قطعات پس از آماده سازی تحت عملیات حرارتی آنیل در دمای  $800^\circ \text{C}$  به مدت ۲ ساعت قرار گرفتند و سپس در هوای آزاد تا دمای محیط خنک شدند.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده

عنصر	Cr	Mn	Si	Cr	Ni	Fe
درصد وزنی	۰/۰۸	۱/۰۰	۱/۰۰	۱۰/۵	۰/۵۰	باقیمانده

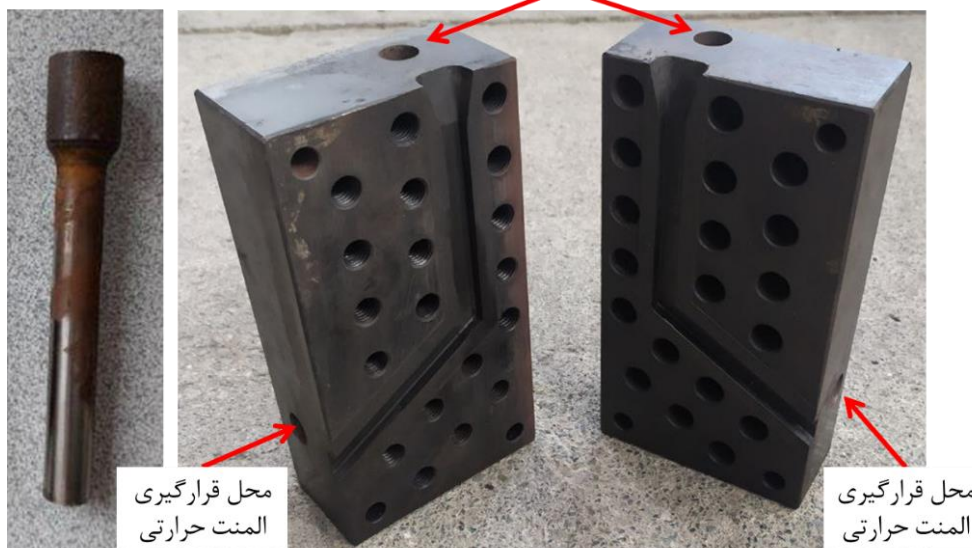
### ۲-۲- تجهیزات مورد استفاده

به منظور انجام فرآیند فشار در کانال زاویه دار همسان (ایکپ)، ابتدا یک قالب طراحی و ساخته شد. این قالب از جنس فولاد ابزار گرمکار AISI 1.2344 ساخته و سپس به منظور افزایش سختی، عملیات حرارتی سخت کاری بر روی آن انجام شد. این قالب دو لنگه، دارای کانالی با زاویه داخلی  $(\phi)$   $120^\circ$  درجه شعاع گوشه یک میلی متر می باشد. سطح مقطع این کانال مربعی به ابعاد  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  می باشد و طول آن  $90 \text{ mm}$  می باشد. همچنین در اطراف این کانال، چهار حفره برای قرارگیری المنت های حرارتی به منظور افزایش دمای قالب و نمونه در حین انجام فشار (ایکپ) تعبیه شده است. دو لنگه قالب به کمک ۱۹ عدد پیچ فولادی M12 به یکدیگر متصل خواهند شد. برای فشار نمونه در کانال و عبور آن از قسمت زاویه دار، از یک سنبه از جنس فولاد ابزار سردکار AISI 1.2379 (سخت کاری شده) به ابعاد  $10 \times 10 \times 90 \text{ mm}^3$  استفاده شد. تصویر قالب و سنبه مورد استفاده در شکل ۱ قابل مشاهده است.

<sup>1</sup> Interstitial-free



محل قرارگیری المنت حرارتی



ب

الف

شکل ۱- تصویر قالب (الف) و سنبه (ب) مورد استفاده جهت انجام فرآیند فشار در کانال زاویه دار همسان (ایکپ).

برای تامین نیروی مورد نیاز جهت انجام فشار (ایکپ)، از یک پرس هیدرولیک با ظرفیت ۶۰ تن استفاده شد. مجموعه قالب و سنبه درون بر روی فک پایینی دستگاه پرس قرار می گیرد و با حرکت فک بالایی، نیروی مورد نیاز جهت فشار سنبه درون کانال اعمال می شود.

### ۲-۳- انجام فرآیند فشار در کانال زاویه دار همسان (ایکپ)

نمونه های آماده شده در مراحل قبل، تحت فرآیند ایکپ در مسیرهای A و C تا چهار پاس (مرحله) قرار گرفتند. در حالت A نمونه پس از خارج شدن از قالب، بدون چرخش و مانند پاس قبلی تحت عملیات ایکپ قرار می گیرد. اما در حالت C نمونه پس از هر پاس با زاویه  $180^\circ$  چرخانده می شود. برای انجام ایکپ، کانال قالب و نمونه توسط روانکار دما بالا  $MoS_2$ ، روانکاری شدند. با توجه به اینکه نیروی فشاری بالایی برای فرآیند ایکپ مورد نیاز است، دمای قالب توسط المنت های حرارتی که درون قالب قرار خواهند گرفت تا دمای  $450^\circ C$  افزایش می یابد و سپس فرآیند فشار انجام می شود. مشخصات و علائم اختصاری نمونه ها در جدول ۲ آورده شده است.

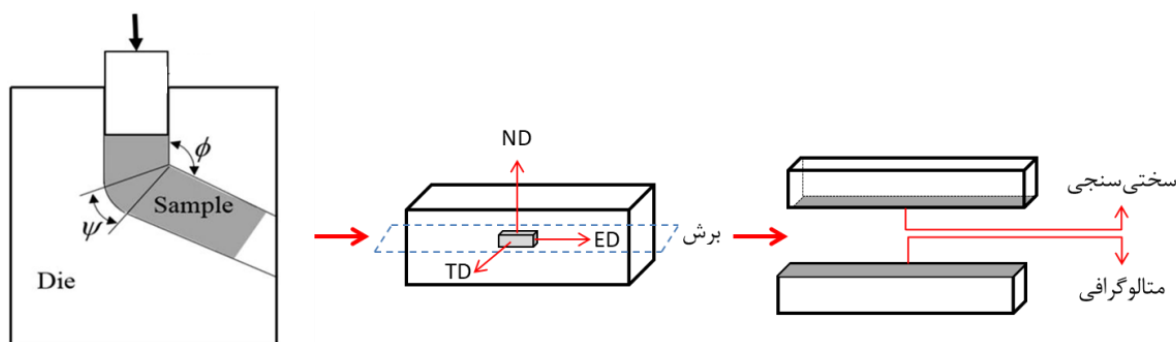


جدول ۲- علائم اختصاری و مشخصات نمونه‌ها، در مسیرها و تعداد پاس‌های مختلف

نمونه	مسیر	تعداد پاس
شاهد	-	-
۱P	-	۱
۲A	A	۲
۲C	C	۲
۴A	A	۴
۴C	C	۴

### ۲-۴- مشخصه‌یابی و بررسی نمونه‌ها

به منظور مطالعه تغییرات سختی و ریزساختار نمونه‌ها پس از انجام ایکپ، متالوگرافی و سختی‌سنجی انجام شد. برای انجام این آزمون‌ها، ابتدا نمونه‌هایی برای بررسی سختی و ریزساختار در جهت ED (جهت ایکپ)، مطابق با شکل ۳ از نمونه‌های ایکپ شده توسط وایرکات برش داده شد.



شکل ۳- طرح شماتیک نمونه‌های مورد استفاده برای متالوگرافی و سختی‌سنجی برش داده شده از نمونه‌های ایکپ شده.

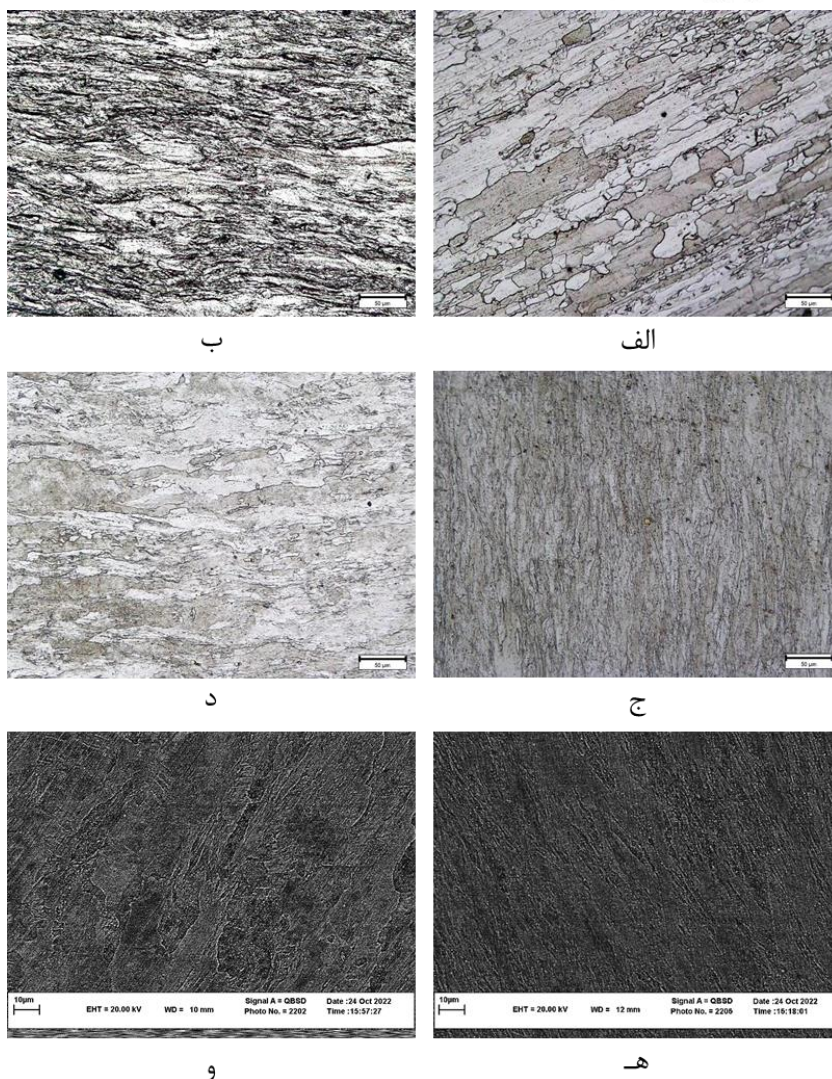
برای بررسی ریزساختار، سطح نمونه‌ها پس از سنباده‌زنی و پولیش توسط محلولی با نسبت‌های مساوی نیتریک اسید، هیدروکلریک اسید، استیک اسید و چند قطره گلسیرین، حکاکی (اچ) شد. سپس تصاویر ریزساختار نمونه توسط میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی‌های مختلف ثبت گردید. برای نمونه‌های چهار پاس که ساختار آن‌ها دچار کشیدگی زیاد می‌باشد، ریزساختار توسط میکروسکوپ الکترونی برگشتی (SEM) بررسی شد. همچنین، سختی قطعات توسط آزمون سختی‌سنجی میکرو ویکرز با بار ۲ کیلوگرم اندازه‌گیری شد.



### ۳- نتایج و بحث

شکل ۴، تصویر ریزساختار قطعات را نشان می‌دهد. ریزساختار نمونه شاهد که در تصویر ۴-الف مشاهده می‌شود، دانه‌های شبهه کروی پس از آنیل را نشان می‌دهد. تصاویر ۴-ب تا ۴-د نیز به ترتیب تصاویر نمونه‌های ۱ پاس، دو پاس در مسیر A و C را نشان می‌دهد. در این تصاویر مشاهده می‌شود که ساختار نمونه‌ها پس از ایکپ به شکل لایه‌ای و با دانه‌های کشیده شده می‌باشد که گواهی بر عبور نمونه‌ها از قسمت زاویه‌دار قالب و ایجاد کرنش برشی است. به دلیل کشیدگی و ریز دانه شدن دانه‌ها در نمونه‌های چهار پاس، ریزساختار آن‌ها همانطور که در شکل ۴-هـ (نمونه ۴A) و ۴-و (نمونه ۴C) مشاهده می‌شود توسط میکروسکوپ SEM بررسی گردید. با بررسی این تصاویر، می‌توان به این موضوع پی برد که در مسیر A چون تغییری در حالت قرارگیری قطعه در قالب ایکپ پس از هر پاس ایجاد نمی‌شود (مشابه نورد) کشیدگی دانه‌ها تا چهار پاس افزایش یافته است. این در حالی است که با انجام ایکپ در مسیر C افزایش کشیدگی دانه‌ها با تعداد پاس، کمتر رخ داده است. با بررسی ریزساختار قطعات ایکپ شده در مسیر C به دلیل چرخش  $180^\circ$  نمونه پس از هر پاس، نتیجه‌گیری می‌شود که کرنش وارد شده به تمام دانه‌ها یکسان نبوده است. در غیر این صورت دانه‌ها باید به شکل اولیه خود باز می‌گشتند.

نتایج سختی‌سنجی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین افزایش سختی مربوط به نمونه یک پاس می‌باشد که بیانگر افزایش کرنش و کارسختی در این نمونه می‌باشد. ولی با افزایش تعداد پاس، افزایش سختی محدود می‌شود؛ تا حدی که در نمونه‌های چهار پاس نه تنها افزایشی در سختی مشاهده نشده است، بلکه کاهش اندکی نیز رخ داده است. دلیل این موضوع این است که وقوع بازیابی در دمای  $0.4T_m$  مانع به کاهش کار سختی اشباع شده توسط فرآیند ایکپ می‌باشد. همچنین، افزایش سختی نمونه‌های دو پاس در مسیر A نسبت به مسیر C را می‌توان به کشیدگی و ریزدانه شدن در مسیر A نسبت داد.



شکل ۴- ریزساختار قطعات، الف) نمونه شاهد، ب) نمونه یک پاس، ج) نمونه ۲A، د) نمونه ۲C، ه) نمونه ۴A، و) نمونه ۴C.

### جدول ۳- نتایج حاصل از سختی سنجی

سختی (ویکرز)	نمونه
۲۰۰	شاهد
۲۵۰	۱
۲۶۹	۲A
۲۵۸	۲C
۲۶۲	۴A
۲۶۲	۴C



### ۴- نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی تاثیر فرآیند فشار در کانال زاویه دار همسان بر ریزساختار و سختی فولاد زنگ نزن فریتی ۴۰۹ انجام گردید و نتایجی به شرح ذیل حاصل شد.

- با انجام فرآیند ایکپ، در اثر وقوع کشیدگی دانه‌ها یک ساختار فوق ریزدانه به وجود آمده است.

- انجام فرآیند ایکپ در پاس‌های بیشتر، در مسیر A به دلیل اینکه تغییری در وضعیت قرارگیری نمونه در قالب نداریم، کشیدگی دانه‌ها با افزایش تعداد پاس بیشتر خواهد شد. این موضوع در نمونه‌های ایکپ شده در مسیر C، به دلیل چرخش نمونه پس از هر پاس، کمتر رخ داده است. البته، بررسی ریزساختار نمونه‌های ایکپ شده در مسیر C نشان می‌دهد که با افزایش تعداد پاس باز هم کشیدگی دانه‌ها مشاهده می‌شود که دلیل آن عدم یکسان بودن کرنش وارد شده به دانه‌ها می‌باشد.

- بررسی تغییرات سختی نمونه‌ها نشان می‌دهد که بیشترین افزایش سختی با انجام یک پاس اتفاق افتاده است که دلیل آن نیز وقوع کشیدگی و ریزدانه‌گی ساختار می‌باشد. سختی نمونه شاهد ۲۰۰ ویکرز و سختی نمونه یک پاس ۲۵۰ ویکرز می‌باشد. با افزایش تعداد پاس به دلیل تاثیر کمتر فرآیند ایکپ بر ساختار، تغییرات سختی محدود شده است. البته ریزدانه‌گی و کشیدگی ساختار در مسیر A نسبت به مسیر C بیشتر اتفاق افتاده است و همین موضوع دلیل افزایش بیشتر سختی در مسیر A (۲۶۹ ویکرز) نسبت به مسیر C (۲۵۸ ویکرز) در نمونه‌های دو پاس می‌باشد.

- با انجام ایکپ به میزان چهار پاس در هر دو مسیر، نه تنها افزایش سختی مشاهده نشده است، بلکه کاهش در سختی نیز نسبت به نمونه‌های دو پاس نیز مشاهده شده است. دلیل این موضوع، وقوع بازیابی در دمای  $0.4T_m$  می‌باشد که کاهش کارسختی را به دنبال داشته است.

### ۵- مراجع

- 1- C.L. Chen, A. Richter, R. Kögler, M. Griepentrog, and P. Reinstädt.: "Ion-irradiation effects on dissimilar friction stir welded joints between ODS alloy and ferritic stainless steel", Journal of alloys and compounds, 615, S448-S453.
- 2- D.F. Brower, Metals handbook, vol. 4. ASM, Metals Park, 1969.
- 3- N. Saito, M. Mabuchi, M. Nakanishi, I. Shigematsu, G. Yamauchi, and M. Nakamura.: "Application of equal channel angular extrusion on strengthening of ferritic stainless steel", Journal of materials science 36, no. 13, 3229-3232.
- 4- V.M. Segal.: "Materials processing by simple shear", Materials Science and Engineering: A, 197(2), 157-164.
- 5- M. Furukawa, Z. Horita, M. Nemoto, and T. G. Langdon.: "Processing of metals by equal-channel angular pressing", Journal of materials science, 36(12), 2835-2843.
- 6- R. Manna, N.K. Mukhopadhyay, and G.V.S. Sastry.: "Effect of equal channel angular pressing on microstructure and mechanical properties of commercial purity aluminum", Metallurgical and materials transactions A, 39(7), 1525-1534.





iMat 2022



- 7- Y.T. Zhu, and T.G. Langdon,:"The fundamentals of nanostructured materials processed by severe plastic deformation", Jom, 56(10), 58-63.
- 8- R.B. Figueiredo, and T.G. Langdon,:"Grain refinement and mechanical behavior of a magnesium alloy processed by ECAP", Journal of materials science, 45(17), 4827-4836.
- 9- D. Verma, N.K. Mukhopadhyay, G.V.S. Sastry, and R. Manna,:"Ultra-High-Strength Interstitial-Free Steel Processed by Equal-Channel Angular Pressing at Large Equivalent Strain", Metallurgical and Materials Transactions A, 47(4), 1803-1817.
- 10- R.B. Singh, N.K. Mukhopadhyay, G.V.S. Sastry, and R. Manna,:"Recovery of ductility in ultrafine-grained low-carbon steel processed through equal-channel angular pressing followed by cold rolling and flash annealing", Metallurgical and Materials Transactions A, 48(3), 1189-1203.
- 11- Z.J. Zheng, J.W Liu and Y. Gao,:"Achieving high strength and high ductility in 304 stainless steel through bi-modal microstructure prepared by post-ECAP annealing", Materials Science and Engineering: A, 680, 426-432.
- 12- M. Askari Khan-abadi, M. H. Farshidi, and M. H. Moayed,:"Microstructure Evolution of the Stainless Steel 316L Subjected to Different Routes of Equal Channel Angular Pressing", Iranian Journal of Materials Forming, 8(2), 4-11.