



## Improving Wear Behavior of 304L Stainless Steel under Constrained Groove Pressing

Masoud Farajollahi<sup>1</sup>, Mahmoud Ebrahimi<sup>2\*</sup>, Shahram Ajori<sup>2</sup>

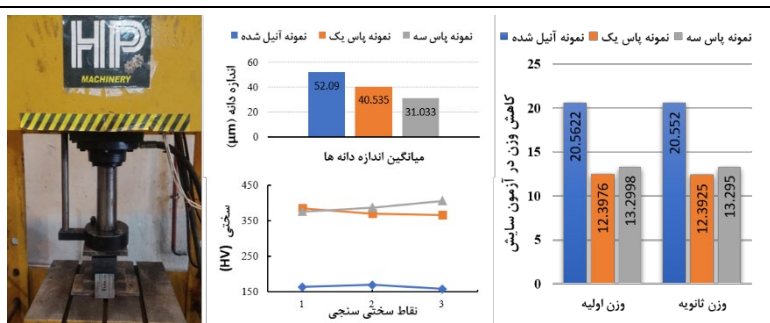
<sup>1</sup> M.Sc, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

### HIGHLIGHTS

- SPD was applied on 304L stainless steel.
- Hardness was improved by imposing the CGP.
- The wear rate decreased by increasing the pass number.
- The effect of the first pass is more prominent than other pass numbers.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 25 December 2023

Received in revised form: 13 January 2024

Accepted: 6 March 2024

Available online: 9 March 2024

\*Correspondence:

[ebrahimi@maragheh.ac.ir](mailto:ebrahimi@maragheh.ac.ir)

#### How to cite this article:

M. Farajollahi, M. Ebrahimi, S. Ajori. Improving wear behavior of 304L stainless steel under constrained groove pressing. Journal of Aerospace Mechanics. 2024; 20(2):17-28.

#### Keywords:

Severe plastic deformation

Ultra-fine-grained materials

Wear rate

Surface morphology

### ABSTRACT

Severe plastic deformation is considered one of the methods of producing materials with sub-micrometer and even ultra-fine-grained materials. The constrained groove pressing process is one of the severe plastic deformation methods for sheet-formed materials. In this research, the wear resistance and hardness of 304L stainless steel after being subjected to constrained groove pressing were analyzed with respect to the pass number. It was found that the hardness of the initial annealed sample was 163.5 HV, and It was equal to 373.7 and 389.5 HV in the first and third passes, showing an increase of 128% and 138% of hardness in the first and third passes compared to the initial sample. Moreover, the sample wear rate at the normal load of 30 N and 50 N was 0.049% and 1.16% for the initial annealed state, 0.041% and 0.56% for the first pass condition, and 0.036% and 0.24% for the final pass situation. The main reasons for the hardness improvement and wear resistance increase are related to the application of cold work and the increase of dislocation density. It should be mentioned that the dislocation movement makes the material more ductile (increase in the plastic deformation) if the density of dislocations in the material exceeds a certain limit, it leads to the interaction of dislocations and their locking; so, the material becomes more brittle. It can be concluded that the improvement of hardness and wear resistance increases with the addition of the pass number.





## بهبود رفتار سایشی فولاد آلیاژی زنگ‌نزن ۳۰۴L فراوری شده با روش پرس کاری شیارمقید

مسعود فرج الهی<sup>۱</sup>، محمود ابراهیمی<sup>۲\*</sup>، شهرام آجری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

### برجسته‌ها

- فرایند پرس کاری شیارمقید بر روی فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴L تا سه پاس اعمال گردید.
- اعمال فرایند موجب افزایش سختی نمونه‌ها گردید.
- نرخ سایش با افزایش تعداد پاس‌ها کاهش یافت.
- تأثیر پاس اول فرایند از بقیه پاس‌ها چشم‌گیرتر است.

### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۴

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

ارائه برخط: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

\*نویسنده مسئول:

[ebrahimi@maragheh.ac.ir](mailto:ebrahimi@maragheh.ac.ir)

کلیدواژه‌ها:

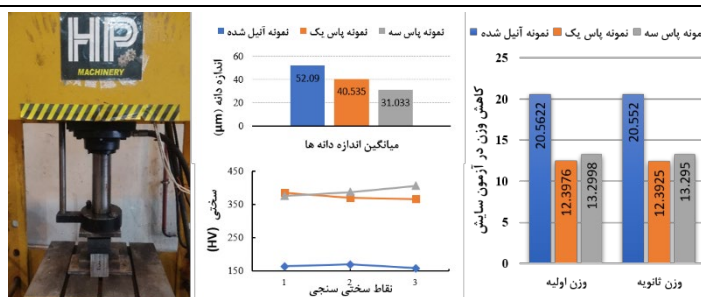
تغییرشکل پلاستیک شدید

مواد فوق ریزدانه

نرخ سایش

مورفولوژی سطح

### چکیده گرافیکی



### چکیده

تغییرشکل پلاستیک شدید به‌عنوان یکی از روش‌های تولید مواد با اندازه دانه زیر میکرومتر و حتی فوق ریزدانه مطرح می‌باشد. در این راستا، فرایند پرس کاری شیارمقید یکی از این تکنیک‌ها برای اعمال بر روی نمونه‌های ورقه‌ای شکل می‌باشد. در این پژوهش، مقاومت به سایش و سختی نمونه‌های فولاد آلیاژی زنگ‌نزن ۳۰۴L فراوری شده با روش پرس کاری شیارمقید شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که سختی نمونه آبیل شده برابر با ۱۶۳/۵ ویکرز و نمونه‌های پاس اول و سوم ۳۷۳/۷ و ۳۸۹/۵ ویکرز می‌باشد که نشان از افزایش ۱۲۸ و ۱۳۸ درصد سختی در پاس اول و سوم نسبت به نمونه آبیل شده است. همچنین، نتایج آزمون سایش نشان داد که نرخ سایش برای نمونه آبیل شده در نیروی نرمال ۳۰ و ۵۰ نیوتنی به ترتیب ۰/۰۴۹ و ۱/۱۶ درصد، برای نمونه پاس اول ۰/۴۱ و ۰/۵۶ درصد و برای نمونه پاس سوم ۰/۰۳۶ و ۰/۲۴ درصد می‌باشد. از جمله دلایل افزایش سختی و مقاومت به سایش را می‌توان به نتایج کار سرد و افزایش چگالی نابجایی‌ها نسبت داد. اگرچه نابجایی‌ها باعث انعطاف‌پذیری بیشتر ماده و افزایش تغییرشکل پلاستیک آن می‌شوند ولی اگر چگالی نابجایی‌ها در ماده از حد معینی بیشتر شود، منجر به برهمکنش نابجایی‌ها و قفل شدن آن‌ها می‌شود و ماده تردتر می‌گردد. نتایج نشان داد که افزایش سختی و مقاومت به سایش با افزایش تعداد پاس‌های فرایند بهبود می‌یابد.



## ۱- مقدمه

تغییرشکل در علم مواد، به تغییرشکل یا اندازه یک جسم با توجه به نیروی اعمال شده (انرژی تغییرشکل در این مورد از طریق کار منتقل می‌شود) یا تغییرات در اثر اعمال حرارت گفته می‌شود. مورد اول می‌تواند در نتیجه نیروهای کششی، فشاری، برشی، خمشی و یا پیچشی باشد. در مورد دوم مهم‌ترین عاملی که با درجه حرارت تعیین می‌شود، تحرک نقص‌های ساختاری مانند مرز بلورها و نابجایی در جامدات کریستالی و غیرکریستالی است. حرکت یا جابه‌جایی این نقص‌های متحرک به صورت حرارتی فعال شده و توسط میزان نفوذ اتمی محدود می‌شود. تغییرشکل اغلب به‌عنوان کرنش در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که تغییرشکل رخ می‌دهد، نیروهای داخلی بین‌مولکولی با نیروهای اعمال شده مخالفت می‌کنند. اگر نیروی اعمال شده خیلی زیاد نباشد این نیروها ممکن است برای مقاومت کامل در برابر نیروهای خارجی اعمال شده کافی باشند و به جسم اجازه دهند تا یک حالت سکون و تعادل جدید به خود بگیرد و بعد از برداشتن بار (نیروی اعمال شده) به حالت اولیه خود بازگردد. یک نیروی اعمال شده بزرگ‌تر ممکن است به تغییرشکل دائمی جسم یا حتی به شکست ساختاری آن منجر شود. اگر تغییرشکل ناچیز باشد می‌توان از مفهوم جسم صلب بهره برد [۱-۳].

تغییرشکل پلاستیک شدید یکی از روش‌های تولید مواد فوق‌ریزدانه و حتی نانو ساختار می‌باشد. در این روش، ریزساختار مواد با اعمال تغییرشکل پلاستیک شدید تغییر یافته و دانه‌های بزرگ‌تر به دانه‌های ریزتر تبدیل می‌شود [۴]. به علت شکل‌پذیری پایین مواد غیرفلزی، تولید مواد نانو ساختار فلزی با این روش مرسوم‌تر است. فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید یک اصطلاح عمومی برای توصیف گروهی از روش‌های کار بر روی مواد که به‌طور معمول کرنش‌های بسیار بزرگی را در نمونه‌ها (با ایجاد یک تنش هیدروستاتیک بالا و تنش برشی زیاد) به وجود می‌آورند که این کرنش بالا، چگالی عیوب (عموماً نابجایی‌ها و جاهای خالی) را افزایش می‌دهد که باعث ایجاد ساختار فوق‌ریزدانه می‌شود [۵].

توسعه اصول اساسی روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید به کارهای اولیه پرسی ویلیام بریچمن در دانشگاه هاروارد در

سال ۱۹۳۰ برمی‌گردد. اثرات این کار بر مواد جامد (با ترکیب فشار هیدروستاتیکی بزرگ با تغییرشکل برشی) منجر به دریافت جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۴۶ شد [۶]. از آنجا که مواد فوق‌ریزدانه از نظر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی از مواد دانه‌درشت برتر هستند، فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید قادر به تولید مواد فوق‌ریزدانه‌اند و بنابراین پتانسیل بالایی برای ساخت قطعات مختلف صنعتی دارند [۷]. از این رو، فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید یکی از مهم‌ترین و مفیدترین روش‌ها برای تولید فلزات و آلیاژهای فوق‌ریزدانه است. تاکنون، روش‌های مختلفی برای تغییرشکل پلاستیک شدید فلزات و آلیاژها معرفی گردیده است. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به فرایند پرس در کانال‌های زاویه‌دار [۸]، پیچش فشار بالا [۹]، فرایند فورج چندجهته [۱۰]، فرایند اکستروژن و فشردن چرخه‌ای [۱۱]، فرایند اتصال نوردی انباشتی [۱۲]، روش کنگره‌دار و صاف کردن متوالی [۱۳]، پیچش لوله با فشار بالا [۱۴] و روش اتصال چرخشی تجمعی [۱۵] اشاره نمود. در این بین، فرایند پرس کاری شیارمقید، یکی از روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید برای تولید ورق‌های فلزی با ابعاد مختلف می‌باشد [۱۶].

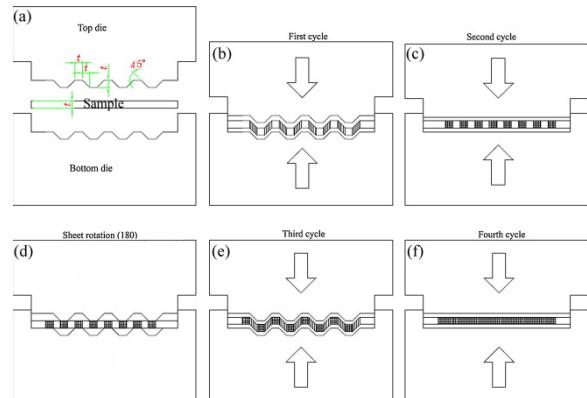
فرایند پرس کاری شیارمقید که ابتداً توسط شین و همکاران توسعه یافت پتانسیل بالایی برای ساخت فلزات و آلیاژهای ورقه‌ای دارا می‌باشد. تصویر شماتیک فرایند پرس کاری شیارمقید در شکل (۱) نشان داده شده است. بر این اساس، نمونه‌های آماده شده تا تعداد سیکل مدنظر، عملیات پرس کاری انجام می‌گیرد که مجموع چهار سیکل، یک پاس فرایند پرس کاری شیارمقید در نظر گرفته می‌شود که دومرتبه توسط قالب شیاردار نامتقارن و دومرتبه دیگر به وسیله قالب تخت انجام می‌گیرد [۱۷-۱۹]. در ابتدا، یک نمونه ورق در شکاف بین قالب‌های شیاردار بالا و پایین همان‌طور که در شکل (a1) نشان داده شده است قرار می‌گیرد. در سیکل اول، نمونه ورقه‌ای شکل توسط قالب شیاردار فشرده می‌شود و سپس در سیکل دوم، نمونه شیاردار به وسیله قالب تخت صاف می‌شود (شکل (b1 و c)). برای اعمال تغییرشکل شدید بر قسمت‌های کرنش نیافته شده پس از سیکل دوم، نمونه به میزان ۱۸۰ درجه حول محور عمود بر صفحه ورق چرخانیده می‌شود و سپس در سیکل سوم، نواحی تغییرشکل نیافته با

شرایط آنیل شده ۵۲ مگا پاسکال بوده که پس از پاس چهارم به ۱۳۵ مگا پاسکال رسید. روند صعودی استحکام کششی در پاس‌های بعدی با شیب کمتری ادامه می‌یابد اما استحکام تسلیم در پاس‌های بعدی نسبت به پاس اول روند نزولی داشته است [۸]. افزایش استحکام تسلیم و نهایی نسبت به حالت آنیل شده ناشی از دو عامل کار سخت و ریزدانه شدن می‌باشد [۲۱].

سایش پدیده تخریب مواد هست که شامل چندین مکانیسم مکانیکی و الکتروشیمیایی است. عملکرد این فرایند، اغلب منجر به صدمه، حذف و یا تغییر شکل تدریجی مواد در سطوح جامد می‌شود [۲۲]. این پدیده یکی از عمده‌ترین دلایل کاهش کارایی اجزای مکانیکی می‌باشد. اتلاف مواد، زمان‌بر بودن تجهیزات مربوط به تعمیرات و در نهایت جایگزینی قطعات فرسوده و خورده شده، از نظر مالی بسیار تأثیرگذار است [۲۳]. به‌طور کلی می‌توان سه مرحله برای سایش در نظر داشت: مرحله نخست که سرعت سایش بالاست، مرحله دوم که در آن سایش با سرعت ثابت ادامه دارد. بیشتر عمر کاری ماده در این مرحله است، مرحله سوم که در آن اثر سایش زیاد نمونه در مراحل پیشین، مقاومت ماده کم شده و سایش به‌طور اساسی و سرعت‌بالا ماده را نابود می‌سازد [۲۴]. عمده‌ترین مکانیسم‌های سایش، سایش خراشان (هنگامی رخ می‌دهد که یک سطح خشن سخت روی سطح نرم‌تری سر می‌خورد) [۲۵]، سایش چسبان (که لغزش موضعی بین دو سطح درگیر موجب گسیختگی اتصال و نهایتاً انتقال ماده از یک سطح به سطح دیگر) [۲۶] و سایش ورقه‌ای (سطح ماده به‌صورت لایه‌لایه در نظر گرفته می‌شود که در فرایند سایش به‌صورت پوسته‌پوسته جدا خواهد شد) می‌باشد [۲۷].

در این پژوهش، ورق‌هایی از فولاد آلیاژی زنگ‌نزن ۳۰۴L به ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شده‌اند که تحت فرایند پرس کاری شیارمقید قرار می‌گیرند. ابتدا طراحی و ساخت قالب‌های فرایند مدنظر انجام گرفته، سپس ورق‌های آماده شده به تعداد پاس ممکن تحت اعمال پرس کاری شیارمقید قرار می‌گیرند. در ادامه، آزمون سختی‌سنجی بر اساس معیار ویکرز برای سنجش میزان سختی انجام می‌گیرد. در گام بعد تغییرات ریزساختار نمونه‌های اولیه و نهایی به‌وسیله میکروسکوپ نوری مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

فشار بالا به دلیل عدم تقارن قالب شیاردار تغییر شکل می‌یابد و در نهایت در سیکل چهارم در قالب تخت دوباره صاف می‌شود که باعث ایجاد کرنش یکنواخت در سراسر نمونه می‌گردد (شکل ۱f). در نتیجه انجام فرایند پرس کاری شیارمقید در هر پاس، کرنشی معادل ۱/۱۶ در پاس اول، ۲/۳۲ در پاس دوم، ۳/۴۸ در پاس سوم و ۴/۶۴ در پاس چهارم بر نمونه‌ها اعمال می‌گردد. تمام پرس‌ها به کمک یک پرس هیدرولیک با سرعت پیستون حدود ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه انجام می‌شود. همچنین، برای کاهش اثرات اصطکاکی بین نمونه‌ها و قالب‌ها از دی سولفید مولیبدن به‌عنوان روان کننده استفاده می‌گردد. می‌دانیم که اعمال کرنش شدید پلاستیکی موجب افزایش حرکت نابجایی‌ها و در نهایت تشکیل مرز دانه‌های فرعی و در نتیجه، ریزدانه شدن ساختار می‌گردد که میزان ریزدانه شدن با مقدار کرنش اعمال شده در ارتباط مستقیم می‌باشد [۲۰].



شکل (۱): نمایش شماتیک فرایند پرس کاری شیارمقید [۲۰].

مطالعات پیشین نشان می‌دهد که سختی نمونه‌های آلومینیومی فراوری شده با فرایند پرس کاری شیارمقید با افزایش تعداد پاس‌ها به دلیل کار سخت شدن، افزایش می‌یابد به‌طوری‌که سختی نمونه آنیل شده که برابر با ۵۰ ویکرز بوده، در پاس اول به ۸۰ ویکرز، در پاس دوم به ۸۴ ویکرز و در پاس سوم به ۸۶ ویکرز رسیده است. البته روند افزایش سختی در پاس اول بسیار زیاد بوده و با افزایش پاس‌ها، این روند افزایشی کاهش می‌یابد. همچنین مقاومت کششی نهایی نمونه آنیل شده که برابر با ۸۲ مگا پاسکال بود، پس از پاس سوم به ۱۴۹ مگا پاسکال افزایش یافت و پس از پاس چهارم کمی کاهش یافته و به ۱۴۶ مگا پاسکال رسید. استحکام تسلیم نمونه در

ثانیه در دمای اتاق و رطوبت حدود ۴۵ درصد بدون شرایط روان کننده انجام شد. برای متالوگرافی و سختی‌سنجی قطعات مستطیلی شکل به ابعاد ۲ در ۲ میلی‌متر مربع به تعداد یک عدد آماده گردید.

**جدول (۱): عناصر شیمیایی فولاد آلیاژی زنگ‌نزن ۳۰۴L مورد مطالعه در این آزمون.**

گورد	فسفر	نیکل	منگنز	کروم	سیسیسم	کربن	آهن
۰/۳۰	۰/۰۴۵	<	۲	۱۸	۰/۷۵	۰/۰۲	باقیمانده



**شکل (۲):** تصویری از قالب‌های ساخت شده روش

پرس کاری شیارمقید و روند انجام این فرایند بعد از عملیات آنیلینگ نمونه‌های فولاد آلیاژی زنگ‌نزن ۳۰۴L.

به‌منظور بررسی تأثیرات فرایند پرس کاری شیارمقید و پاس‌های مختلف آن بر میزان سختی نمونه‌ها، از روش میکرو سختی‌سنجی ویکرز استفاده شد. در این راستا، بار اعمالی حدود ۱۵ ثانیه در سه نقطه برای هر نمونه در شرایط آزمایشگاهی (دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۴۱ درصد) اعمال شد.

برای بررسی تأثیر سایش بر روی نمونه‌های فولادی اولیه (آنیل شده) و فراوری‌شده با پرس کاری شیارمقید از روش پین روی دیسک استفاده گردید. در این روش، قبل از سنباده‌زنی اصلی، ابتدا وسط نمونه‌ها به قطر ۵ میلی‌متر به حالت سر خزینه سوراخ شده و از مش پایین تا ۳۰۰۰ سنباده‌زنی و پولیش کاری می‌شود تا سطحی صاف و صیقلی شود. بعد از انجام آزمون سایش، نمونه‌ها در داخل اتانول قرار داده شده و به مدت ۱۵ دقیقه در حمام اولتراسونیک مورد شستشو

همچنین رفتار سایشی نمونه‌های اولیه و فراوری‌شده به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و تغییرات مکانیسم سایش نمونه‌ها در طی فرایند مدنظر مورد مطالعه قرار گرفت.

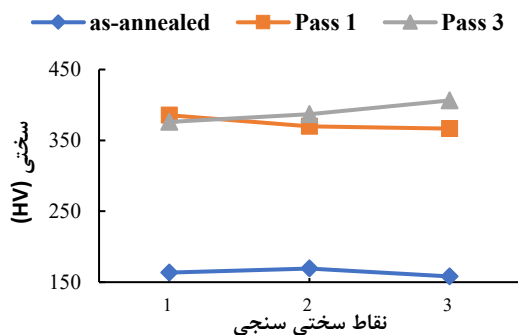
## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، ورق‌هایی از جنس فولاد آلیاژی زنگ‌نزن L ۳۰۴ که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ بیان گردیده، استفاده شده است. نمونه‌ها به شکل مربعی با طول ضلع ۸۰ میلی‌متر و با ضخامت ۲ میلی‌متر بریده شدند. با توجه به اینکه ابعاد شیارها به ضخامت ورق مورد استفاده بستگی دارد، طراحی قالب مورد نظر برای ورق‌هایی به ضخامت ۲ میلی‌متر انجام گرفت و نمونه‌ها برای دستیابی به ریزساختار یکنواخت و کاهش سطح تنش پسماند تحت عملیات آنیل در دمای ۱۰۵۰ درجه سلسیوس به مدت چهار ساعت به همراه تزریق گاز آرگون به صورت مستقیم به داخل محفظه کوره قرار گرفت. بعد از سپری شدن ۴ ساعت، کوره خاموش گردید درحالی‌که گاز آرگون تا دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس باز گذاشته شد تا به داخل محفظه کوره تزریق گردد و روند سرد شدن نمونه‌های فولادی به آرامی انجام گرفت. بعد از دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس گاز آرگون نیز قطع گردید تا نمونه‌ها در داخل محفظه کوره تا دمای محیط سرد شود.

نمونه‌های آنیل شده تا ۱۲ سیکل (۴ پاس) تحت عملیات پرس کاری قرار گرفتند. در نتیجه انجام فرایند پرس کاری شیارمقید در هر پاس، کرنش میانگین اعمال شده برابر با ۱/۱۶ در پاس اول، ۲/۳۲ در پاس دوم، ۳/۴۸ در پاس سوم اعمال گردید. لازم به ذکر است که نمونه ۴ پاسه به دلیل ایجاد ترک در سطح آن مورد بررسی قرار نگرفت. شکل (۲) روند انجام فرایند پرس کاری شیارمقید بعد از عملیات آنیل را نمایش می‌دهد.

بعد انجام عملیات فرایند پرس کاری شیارمقید، نمونه‌های فولادی برای برشکاری با دستگاه وایرکات از نوع رفت و برگشت آماده گردید. لازم به ذکر است که برای آزمایش سایش به وسیله دستگاه پین روی دیسک، قطعات مستطیلی شکل به ابعاد ۳۵ در ۳۵ میلی‌متر مربع و به تعداد دو عدد از هر نمونه (وسط نمونه) تهیه گردید. آزمایش سایش تحت دو نیروی ۳۰ و ۵۰ نیوتنی با طی مسافت ۱۰۰۰ متر و سرعت ۰/۱۴ متر بر

کند می‌شود. شکل ۳ نحوه توزیع سختی برحسب پاس‌های انجام‌شده را نمایش می‌دهد.



شکل (۳): توزیع سختی در نمونه‌های فولاد آلیاژی زنگ‌نزن ۳۰۴L برحسب پاس‌های انجام‌شده در فرایند پرس کاری شیارمقید.

از جمله دلایل تغییرات سختی می‌توان به نتایج کار سرد و افزایش چگالی نابجایی‌ها اشاره کرد. در مورد کار سرد این‌گونه می‌توان گفت که قبل از افزایش سختی ناشی از کار سختی شبکه مواد یک طرح تقریباً بی‌نقص و منظم را به نمایش می‌گذارد. این شبکه بی‌نقص در هر زمان دلخواهی می‌تواند توسط آنیل‌شدن به وجود آید یا بازیابی شود اما در اثر کار سرد، ساختار دانه‌بندی ماده به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تغییر یافته و نابجایی‌های جدیدی ایجاد می‌شود [۲۸]. این مقاومت در مقابل نابجایی‌های درون کریستالی باعث پیدا شدن مقاومتی در برابر تغییر شکل ماندگار می‌شود که منجر به افزایش سختی ماده می‌گردد.

### ۳-۲- خواص ریزساختاری

شکل ۴ ریزساختار نمونه‌های فولادی را در حالات قبل و بعد از فرایند پرس کاری شیارمقید نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که اندازه میانگین دانه در نمونه آنیل شده در حدود ۵۲ میکرومتر، در نمونه تک‌پاسه ۴۰/۶ میکرومتر و در نمونه سه‌پاسه ۳۱ میکرومتر اندازه‌گیری شد که به ترتیب کاهش ۲۲ و ۴۰ درصدی اندازه دانه‌ها در پاس‌های اول و سوم نسبت به نمونه اولیه (آنیل شده) را نشان می‌دهد. همچنین، مشاهده می‌شود که به دلیل ساختار فوق‌ریزدانه در پاس‌های یک و سه، مرزدانه‌ها تقریباً غیرقابل تشخیص هستند. شکل ۵ نمودار تغییرات میانگین اندازه دانه‌ها در نمونه‌های آنیل شده و

قرارگرفته و در هوا خشک گردید. بعد از چربی‌زدایی، نمونه‌ها در دو حالت قبل و بعد از اعمال فرایند پرس کاری شیارمقید در ترازوی دقیق با چهار رقم اعشار وزن گردید. لازم به ذکر است که آزمون سایش پین روی دیسک در نمونه‌های اولیه، پاس‌های یک و سه انجام گرفت. برای هر حالت، دو نیروی ۳۰ و ۵۰ نیوتنی اعمال گردید. آزمون سایش در مسافت ۱۰۰۰ متر طول و با سرعت ۰/۱۴ متر بر ثانیه در دمای اتاق و رطوبت حدود ۴۵ درصد بدون شرایط روان‌کننده انجام شد. برای این پژوهش از دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک مدل Ariana Modern Industry استفاده گردید. پس از اتمام آزمون سایش خشک، نمونه‌های آنیل شده، پاس‌های یک و سه تحت ارزیابی مورفولوژی سطوح فرسوده قرار گرفتند. امروزه روش‌های مختلفی جهت ارزیابی مورفولوژی سطوح فرسوده و آنالیز مواد وجود دارد که یکی از معروف‌ترین آن‌ها، استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌باشد.

### ۳- نتایج و بحث

اصلی‌ترین دلیل استفاده از فرایند پرس کاری شیارمقید ایجاد تغییرات ریزساختاری در نمونه و سوق دادن آن به سمت مواد فوق‌ریزدانه و حتی نانو ساختار می‌باشد، این تغییرات ریزساختاری باعث ایجاد تغییرات شگرفی در خواص فیزیکی و مکانیکی و نیز خواص سایشی و خستگی مواد می‌شود که بر پایه اعمال کرنش‌های شدید برشی بر نمونه می‌باشد.

### ۳-۱- سختی سنجی

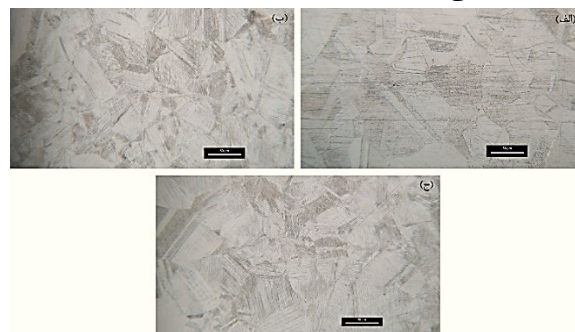
آزمون سختی سنجی به روش ویکرز بر روی نمونه‌های فولادی آنیل شده، پاس‌های یک و سه در سه نقطه مختلف، انجام گرفت. در این راستا، میزان سختی میانگین نمونه آنیل شده برابر ۱۶۳/۵ ویکرز بوده که پس از انجام پاس اول به مقدار میانگین ۳۷۳/۷ ویکرز می‌رسد و در پاس سوم، میانگین عدد سختی به ۳۸۹/۵ ویکرز افزایش می‌یابد. به عبارتی، نمونه‌های فولادی، افزایش ۱۲۸ درصدی سختی در پاس اول نسبت به نمونه آنیل شده و ۱۳۸ درصدی سختی در پاس سوم نسبت به نمونه آنیل شده را تجربه می‌کند. لذا با توجه به اعداد به‌دست‌آمده، مشاهده می‌شود مقدار سختی نمونه‌ها در ابتدا به شکل چشمگیری افزایش می‌یابد و سپس روند این افزایش



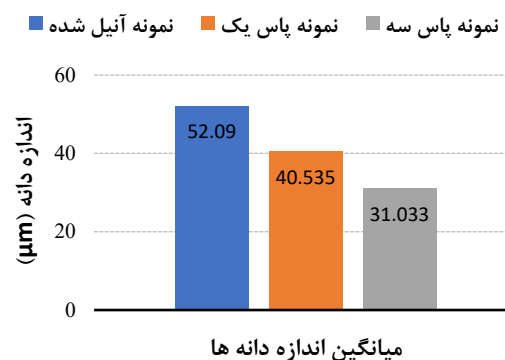
۰/۰۳۶ درصد می‌باشد. لذا، نمونه تک پاسه نسبت به نمونه آنیل شده ۱۶ درصد و نمونه سه پاسه نسبت به نمونه آنیل شده ۲۶ درصد بهبود کاهش وزن دارد. همچنین نرخ سایش در نیروی نرمال اعمالی ۵۰ نیوتنی برای نمونه آنیل شده ۱/۱۶ درصد، نمونه تک پاسه ۰/۵۶ درصد و نمونه سه پاسه ۰/۲۴ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده بهبود کاهش وزن در اثر اعمال فرایند پرس کاری شیارمقید می‌باشد. در این راستا، مقاومت به سایش نمونه تک پاسه نسبت به نمونه اولیه آنیل شده ۵۲ درصد و نمونه سه پاسه نسبت به نمونه آنیل شده ۷۹ درصد به دست آمد. نتایج حاکی از آن است که مقاومت به سایش با افزایش تعداد پاس‌ها بهبود می‌یابد. همچنین بزرگی بار اعمال شده بر کاهش نرخ سایش تأثیر دارد که می‌تواند به دلیل افزایش مقدار سختی باشد که از به هدر رفتن ماده به دلیل حرکت لغزشی نمونه با پین مانع می‌شود. این کار همچنین از لایه‌لایه شدن و باقی‌مانده‌های سایش جلوگیری می‌کند. مشخص شده است که کاهش اندازه دانه توسط فرایند پرس کاری شیارمقید منجر به افزایش سختی نمونه‌ها شده که باعث افزایش مقاومت به سایش می‌گردد. در حقیقت، نمونه فولادی سه پاسه به دلیل مقدار سختی بالاتر و پالایش شدید دانه‌ها، مقاومت سایشی بهتری از خود نشان می‌دهد.

کاهش کم مقادیر وزن و بهبود مقاومت نمونه‌ها در برابر سایش ناشی از پردازش و اعمال فرایند پرس کاری شیارمقید است که منجر به افزایش سختی و استحکام در برابر سایش به دلیل پالایش دانه می‌شود. بهبود رفتار سایشی نمونه‌های پرس کاری شیارمقید منجر به کاهش اتلاف جرم سایشی و در نتیجه تغییر توزیع میکروسختی و تغییر مکانیسم سایشی می‌شود. علاوه بر این، ریزدانه شدن و ایجاد نابعی‌های با چگالی بالا ناشی از تغییر شکل پلاستیک شدید، مقاومت مواد در برابر سایش را افزایش می‌دهد و به کاهش نرخ سایش کمک می‌کند. بنابراین، کاهش اندک مقادیر وزن پس از آزمون سایش را می‌توان به افزایش مقاومت در برابر سایش و بهبود خواص مکانیکی حاصل از تغییر شکل پلاستیک شدید نسبت داد. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت که نرخ سایش به دلیل افزایش سختی و استحکام نمونه فرآوری شده و ریزدانه شدن ساختار آن در اثر اعمال فرایند پرس کاری شیارمقید کاهش قابل توجهی می‌یابد [۲۹-۳۲].

فرآوری شده با پرس کاری شیارمقید را در حالات یک و سه پاسه نشان می‌دهد.



شکل (۴): ریزساختار نمونه‌های فولاد آلیاژی زنگ‌زن L ۳۰۴ برحسب پاس‌های انجام شده در فرایند پرس کاری شیارمقید: الف) نمونه اولیه آنیل شده؛ ب) نمونه تک پاسه؛ ج) نمونه سه پاسه.



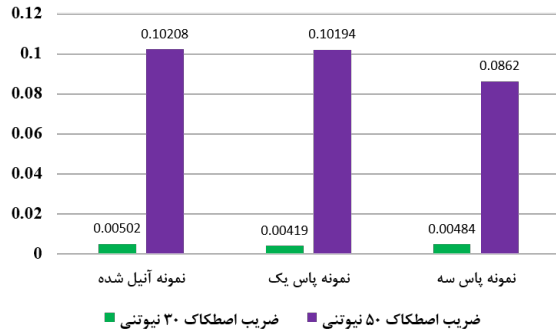
شکل (۵): نمودار تغییرات میانگین اندازه دانه در نمونه فولاد آلیاژی زنگ‌زن L ۳۰۴ در حالات قبل و بعد از فرایند پرس کاری شیارمقید.

### ۳-۳- رفتار سایشی

مقادیر کاهش وزن نمونه‌های اولیه و پاس‌های اول و سوم فرایند پرس کاری شیارمقید در حالات قبل و بعد از آزمون سایش (نیروهای نرمال ۳۰ و ۵۰ نیوتنی، مسافت ۱۰۰۰ متری با قطر ۲/۴ سانتی‌متر و سرعت ۰/۱۴ متر بر ثانیه) به وسیله ترازوی دیجیتالی به دست آمده که نتایج آن در شکل ۶ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود نرخ سایش نمونه‌های اولیه آنیل شده، تک و سه پاسه در نیروی نرمال ۳۰ نیوتنی به ترتیب برابر با ۰/۰۴۹ درصد، ۰/۰۴۱ درصد و

افزایش مقاومت در برابر سایش و کاهش ضریب اصطکاک می‌شود، اما در پاس سوم ضریب اصطکاک نسبت به پاس اول روند صعودی را نشان می‌دهد که ممکن است تحت تأثیر تغییرات ریزساختار ماده و گذار از حالت اصطکاک ایستا به دینامیکی باشد؛ این حالت قبلاً در مطالعات مربوط به فرایند ایکپ نیز گزارش شده است [۳۳-۳۵].



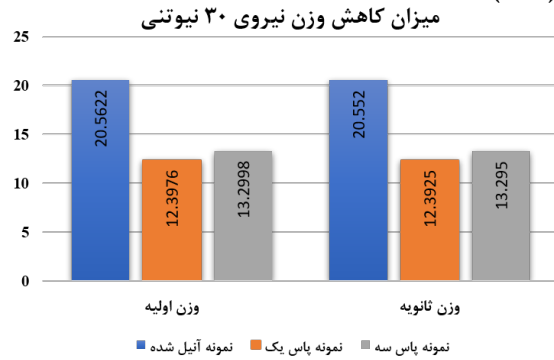
شکل (۷): نمودار میانگین ضریب اصطکاک در نمونه‌های اولیه آنبیل شده، تک و سه پاسه در طول آزمون سایش با بارهای نرمال اعمالی ۳۰ و ۵۰ نیوتنی.

### ۳-۵- مورفولوژی سطح سایش

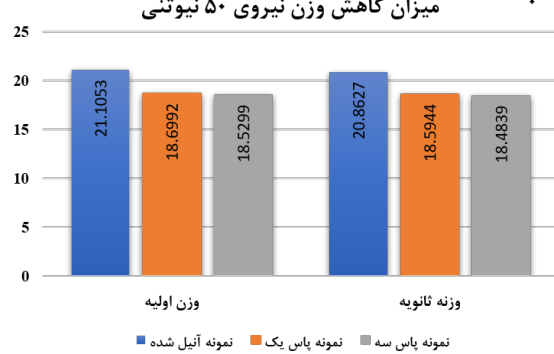
بررسی سطح سایش نمونه‌های فولادی در حالات قبل و بعد از فرایند پرس کاری شمارمقید به‌توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل‌های ۸ و ۹ برای هر دو بار نرمال اعمالی ۳۰ و ۵۰ نیوتنی آورده شده است.

در این راستا، شکل ۸ که مربوط به بار نرمال اعمالی ۳۰ نیوتنی است نشان می‌دهد که نمونه اولیه آنبیل شده دچار سایش شدید و تغییرشکل شدید پلاستیکی شده است. تغییرشکل پلاستیکی شدید و وجود ترک‌های عرضی و حفره‌ها در سطح سایش نمونه اولیه از مشخصه‌های اصلی مکانیسم سایش چسبان است. همچنین، مناطق لایه‌لایه شده و اکسیداسیون نیز در این شکل قابل مشاهده است. در این زمینه، وجود منطقه اکسیداسیون در نمونه آنبیل شده با مقدار اکسیژن ۱/۶ درصد وزنی تأیید شده است. همچنین، شرایط لایه‌برداری را می‌توان به‌صورت جدا شدن ماده از سطح نمونه و چسبیدن آن به پین توصیف کرد. با لغزش بیشتر، روند معکوس می‌شود، بدین معنا که ماده جدا شده از نمونه که بر

### (الف)



### (ب)



شکل (۶): میزان کاهش وزن فولاد آلیاژی زنگ‌نزن ۳۰۴L فراوری شده با فرایند پرس کاری شمارمقید در طول آزمون سایش (برحسب گرم) برای مقادیر مختلف بارهای نرمال: (الف) نیروی ۳۰ نیوتنی؛ (ب) نیروی ۵۰ نیوتنی.

### ۳-۴- ضریب اصطکاک

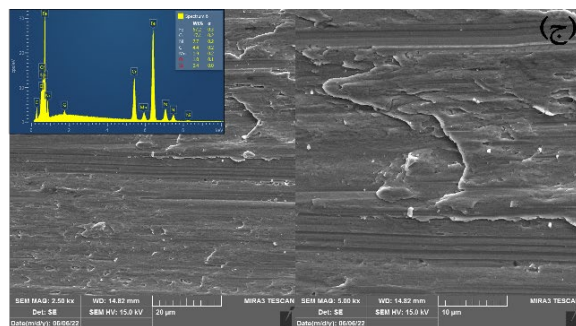
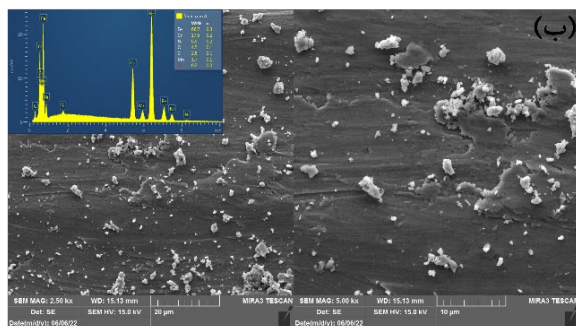
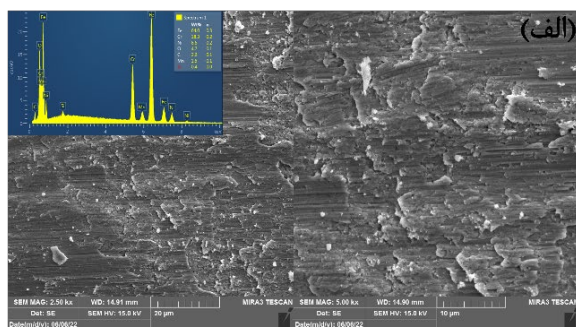
شکل ۷ نمودارهای میانگین ضریب اصطکاک برای هر یک از نمونه‌های اولیه، تک و سه پاسه در بارهای نرمال اعمال شده ۳۰ و ۵۰ نیوتنی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در بار اعمالی ۳۰ نیوتنی، ضریب اصطکاک در پاس اول نسبت به نمونه آنبیل شده روند نزولی داشته ولی در پاس سوم نسبت به پاس یک صعودی است، درحالی‌که برای بار اعمالی ۵۰ نیوتنی، ضریب اصطکاک در پاس اول و سوم نسبت به نمونه اولیه آنبیل شده نزولی شده است.

ضریب اصطکاک در اولین پاس در مقایسه با نمونه آنبیل شده روند نزولی داشته که نشان‌دهنده بهبود رفتار اصطکاکی ناشی از انجام پردازش است که این را می‌توان به عواملی مانند پالایش دانه و افزایش خواص مکانیکی نسبت داد که منجر به



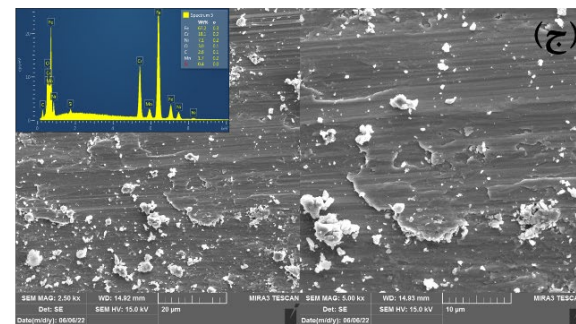
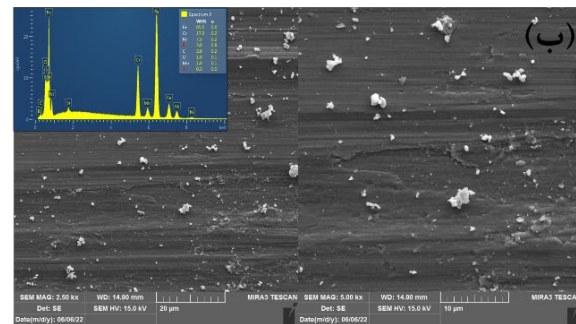
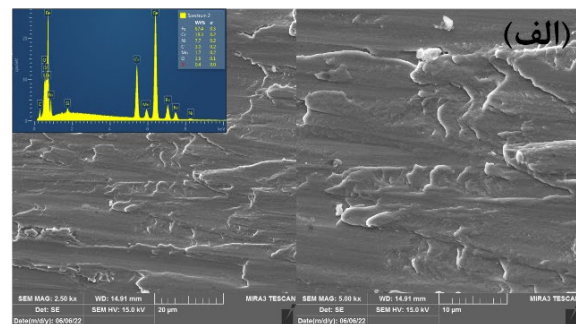
کمی سایش ورقه‌ای و چسبان مشاهده می‌گردد. لذا، با افزایش سختی نمونه‌های فولادی، مکانیسم سایش تغییر کرده و وجود منطقه اکسیداسیون در هر دو نمونه تک و سه پاسه به ترتیب با مقدار اکسیژن  $1/9$  و  $3$  درصد وزنی تأیید شده است.

بررسی سطح سایش نمونه‌ها برای بار نرمال اعمالی  $50$  نیوتنی که در شکل ۹ آورده شده نشان می‌دهد که سطح سایش نمونه اولیه آنیل شده ترکیبی از نواحی چسبندگی، نوارهای تغییر شکل پلاستیکی در امتداد جهت لغزش و نواحی لایه‌لایه شده می‌باشد.



شکل (۹): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس در نمونه‌های فولاد آلیاژی زنگ‌زن  $304L$  برحسب پاس‌های انجام‌شده در فرایند پرس‌کاری شیارمقید در طول آزمون سایش با بار نرمال اعمالی  $30$  نیوتنی: (الف) نمونه اولیه آنیل شده؛ (ب) نمونه تک پاسه؛ (ج) نمونه سه پاسه.

روی پین چسبیده است دوباره به سطح نمونه چسبیده می‌شود.



شکل (۸): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس در نمونه‌های فولاد آلیاژی زنگ‌زن  $304L$  برحسب پاس‌های انجام‌شده با فرایند پرس‌کاری شیارمقید در طول آزمون سایش با بار نرمال اعمالی  $30$  نیوتنی: (الف) نمونه اولیه آنیل شده؛ (ب) نمونه تک پاسه؛ (ج) نمونه سه پاسه.

علاوه بر آن، در نمونه‌های تک و سه پاسه به دلیل پالایش شدید دانه‌ها و سختی بیشتر نسبت به نمونه آنیل شده، نمونه‌ها از سطح مناسبی برخوردار بوده و تغییر شکل پلاستیکی کمی مشاهده گردید. در این راستا، وجود خطوط ممتد و موازی نشان از مشخصه سایش خراشان برای نمونه‌های تک و سه پاسه می‌باشد، به طوری که در نمونه تک پاسه، مقدار کمی سایش چسبان و در نمونه سه پاسه، مقدار

ویکرز می‌رسد. به عبارتی، نمونه فولادی فراوری شده به ترتیب افزایش ۱۲۸ و ۱۳۸ درصدی در پاس‌های اول و سوم نسبت به نمونه اولیه آنیل شده را تجربه می‌کند.

(۳) مکانیسم سایش برای هر دو بار نرمال اعمالی ۳۰ و ۵۰ نیوتن، سایش ورقه‌ای و چسبان برای نمونه آنیل شده می‌باشد که به سایش خراشان و مقدار کمی سایش ورقه‌ای در پاس‌های اول و سوم پرس کاری شیارمقید تغییر یافته است. همچنین، با افزایش بار نرمال اعمالی از ۳۰ به ۵۰ نیوتن، نرخ سایش به دلیل افزایش سطح تماس بین نمونه و پین افزایش می‌یابد.

(۴) میزان کاهش وزن ناشی از سایش در نمونه‌های فراوری شده با روش پرس کاری شیارمقید نسبت به نمونه اولیه آنیل شده کاهش یافته است. همچنین، مقاومت به سایش با افزودن تعداد پاس بهبود می‌یابد، به طوری که اثر پاس اول چشمگیرتر از پاس سوم می‌باشد. در این راستا، میزان کاهش وزن ناشی از سایش در بار نرمال اعمالی ۵۰ نیوتن قابل ملاحظه‌تر از بار نرمال اعمالی ۳۰ نیوتن است.

## ۵- مراجع

[1] Babaei H, Darvizeh A, Alitavoli M, Mirzababae Mostofi T. Experimental and Analytical Investigation into Plastic Deformation of Circular Plates Subjected to Hydrodynamic Loading. *Modares Mechanical Engineering* 2015; 15 (2): 305-312. **DOR** <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1394.15.2.28.6>.

[2] Asghari Rad P, Nili-Ahmadabadi M, Shirazi H. Semi-solid microstructural evolution of severely deformed AISI 304 stainless steel. *Metallurgical Engineering*. 2016;19(2):94-108. **DOI** <https://doi.org/10.22076/me.2017.46691.1086>.

[3] Chiou ST, Lee WS. Plastic deformation and fracture response of 304 stainless steel subjected to dynamic shear loading. *Materials Science and Technology*. 2013; (19): 1266-1272. **DOI** <https://doi.org/10.1179/026708303225005854>.

[4] Mills WJ. Fracture toughness of type 304 and 316 stainless steels and their welds. *International Materials*

اعمالی ۵۰ نیوتنی: الف) نمونه اولیه آنیل شده؛ ب) نمونه تک پاسه؛ ج) نمونه سه پاسه.

همچنین، این شکل ۹ الف نشان‌دهنده وجود منطقه اکسیداسیون در نمونه اولیه آنیل شده با مقدار اکسیژن ۴/۷ درصد وزنی می‌باشد. در نمونه‌های تک و سه پاسه، به دلیل پالایش شدید دانه‌ها و افزایش سختی نمونه‌ها، اندازه و عمق حفره‌های سایش و تغییر شکل پلاستیک نسبت به نمونه آنیل شده کم است. وجود خطوط ممتد و موازی نشان از مشخصه سایش خراشان دارد که در نمونه‌های تک و سه پاسه قابل مشاهده است. در این راستا، مقدار کمی سایش چسبان و ورقه‌ای در نمونه تک پاسه و مقدار کمی سایش ورقه‌ای در نمونه سه پاسه مشاهده گردید. همچنین، وجود منطقه اکسیداسیون در نمونه‌های تک و سه پاسه به ترتیب با مقدار اکسیژن ۴/۵ و ۱ درصد وزنی تأیید شده است که به ترتیب در شکل‌های ۹ ب و ۹ ج قابل مشاهده است. نتایج آزمون سایش در دو نیروی اعمالی ۳۰ و ۵۰ نیوتنی برای نمونه‌های تک و سه پاسه نسبت به نمونه اولیه آنیل شده حاکی از افزایش مقاومت به سایش آن‌ها می‌باشد که با افزایش کرنش اعمالی بر نمونه‌ها، نرخ سایش نیز کاهش چشمگیری می‌یابد. همچنین، میزان اکسیژن موجود در تمامی نمونه‌ها نمایانگر سایش اکسیداسیون در آن‌ها می‌باشد. دلیل افزایش مقاومت به سایش در نمونه‌های فراوری شده با روش پرس کاری شیارمقید، تشکیل ساختار فوق‌ریزدانه از طریق تجمع نابجایی‌ها است که موجب بهبود خواص مکانیکی ماده می‌شود؛ این موضوع در مطالعات دیگر مربوط به رفتار سایشی نمونه‌های تغییر شکل پلاستیک داده شده نیز گزارش شده است [۳۶-۳۸].

## ۴- نتیجه‌گیری

(۱) اندازه دانه نمونه‌های فولادی فراوری شده با روش پرس کاری شیارمقید نسبت به نمونه اولیه آنیل شده کوچک‌تر می‌شود، به طوری که با افزایش تعداد پاس‌ها، دانه‌ها ریزتر شده، استحکام افزایش یافته و شکل‌پذیری افت می‌کند.

(۲) میزان سختی نمونه آنیل شده برابر با ۱۶۳/۵ ویکرز است که در پاس‌های اول و سوم به ۳۷۳/۸ و ۳۸۹/۵

- 403-462. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.09.008>.
- [14] Toth LS, Chen C, Pougis A, Arzaghi M, Fundenberger JJ, Massion R, Suwas S. High pressure tube twisting for producing ultra fine grained materials: A Review. *Materials Transactions*. 2019; (60): 1177-1191. **DOI** <https://doi.org/10.2320/matertrans.MF201910>.
- [15] Segal V. Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD). *Materials*. 2018; (11): 1175. **DOI** <https://doi.org/10.3390/ma11071175>.
- [16] Javidikia M, Hashem R. Analysis and simulation of parallel tubular channel angular pressing of Al 5083 tube. *Transactions of the Indian Institute Metals*. 2017; (7): 11-17. **DOI** <https://doi.org/10.1007/s12666-017-1117-7>.
- [17] Gupta AK, Maddukuri TS, Singh SK. Constrained groove pressing for sheet metal processing. *Progress in Materials Science*. 2016; (84): 403-462. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.09.008>.
- [18] Shahmirzaloo A, Hosseini SM, Siah Sarani A, Rahmatabadi D, Hashemi R, Faraji G. Influences of the constrained groove pressing on microstructural, mechanical, and fracture properties of brass sheets. *Materials Research Express*. 2020; (7): 116526. **DOI** <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abc9f2>.
- [19] Shirani M, Anjabin N, Kim HS. Effects of constrained groove pressing on mechanical properties of a TWIP steel. *Materials Science and Technology*. 2021; (37): 1291-1301. **DOI** <https://doi.org/10.1080/02670836.2021.1996130>.
- [20] Sajadi A, Ebrahimi M, Djavanroodi F. Experimental and numerical investigation of Al properties fabricated by CGP process. *Materials Science and Engineering A*. 2012; (552): 97-103. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.121>.
- [21] Shirdel A, Khajeh A, Moshksar MM. Experimental and finite element investigation of semi-constrained groove pressing process. *Materials and Design*. 2010; (31): 946-950. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.035>.
- [22] Songbo Yin, D. Y. Li. A new phenomenon observed in determining the wear-corrosion synergy during a corrosive sliding wear test. *Wear*. 2008; (29): 45-52. **DOI** <https://doi.org/10.1007/s11249-007-9280-3>.
- [23] Ganechari SM, Kabadi VR, Kori SA, Tikotkar RG. Studies of high temperature sliding wear of medium carbon nickel-chromium based alloy steel. *Reviews*. 1997; (42): 45-82. **DOI** <https://doi.org/10.1179/imr.1997.42.2.45>.
- [5] Azushima A, Kopp R, Korhonen A, Yang DY, Micari F, Lahoti GD, Groche P, Yanagimoto J, Tsuji N, Rosochowski A, Yanadida A. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals*. 2008; (57): 716-735. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>.
- [6] Kawasaki M, Figueiredo RB, Langdon T. Twenty-Five years of severe plastic deformation: recent developments in evaluating the degree of homogeneity through the thickness of disks processed by high-pressure torsion. *Journal of Materials Science*. 2012; (47): 7719-7725. **DOI** <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6507-y>.
- [7] Lee HH, Yoon JI, Kim HS. Single-roll angular-rolling: A new continuous severe plastic deformation process for metal sheets. *Scripta Materialia*, 2018; (146): 204-207. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.11.043>.
- [8] Valiev RZ, Langdon TG. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. *Progress in Materials Science*. 2006; (51): 881-981. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>.
- [9] Zhilyaev AP, Langdon TG. Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications. *Progress in Materials Science*. 2008; (53): 893-979. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2008.03.002>.
- [10] Ansarian I, Shaeri MH, Ebrahimi M, Minarik P, Bartha K. Microstructure evolution and mechanical behaviour of severely deformed pure titanium through multi directional forging. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019; (776): 83-95. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.196>.
- [11] Ebrahimi M, Wang Q, Attarilar Sh. A comprehensive review of magnesium-based alloys and composites processed by cyclic extrusion compression and the related techniques. *Progress in Materials Science*. 2023; (131): 101016. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101016>.
- [12] Valiev RZ, Islamgaliev RK, Alexandrov IV. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*. 2000; (45): 103-189. **DOI** [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00007-9).
- [13] Gupta AK, Maddukuri TS, Singh SK. Constrained groove pressing for sheet metal processing. *Progress in Materials Science*. 2016; (84):

- sliding steel contacts. *Tribology International*. 2019; (134): 394-407. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.014>.
- [34] Djavanroodi F, Ebrahimi M, Nayfeh JF. Tribological and mechanical investigation of multi-directional forged nickel. *Scientific Reports*. 2019; (9): 241. **DOI** <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36584-w>.
- [35] Jiang L, Huang W, Liu C, Guo Y, Chen C, Wang J, Yu W. The effects of stored energy on wear resistance of friction stir processed pure Ti. *Results in Physics*. 2019; (12): 1276-1284. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.01.025>.
- [36] Salehi M. Delamination wear mechanism in gray cast iron. *International Journal of Engineering*. 2000; (3): 37-50.
- [37] Wu J, Ebrahimi M, Attarilar Sh, Gode C, Zadshakoyan M. Cyclic Extrusion compression process for achieving ultrafine-grained 5052 aluminum alloy with eminent strength and wear resistance. *Metals*. 2022; (12): 1627. **DOI** <https://doi.org/10.3390/met12101627>.
- [38] Ebrahimi M, Par MA. Twenty-year uninterrupted endeavor of friction stir processing by focusing on copper and its alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019; (781): 1074-1090. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.083>.
- [39] Proceedings of the International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology. 2010; (10): 792-797. **DOI** <https://doi.org/10.1145/1741906.1742089>.
- [24] Varga M, Lerocq S, Rojacz H, Ripoll MR. Study of wear mechanisms at high temperature scratch testing. *Wear*. 2017; (389): 112-118. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.027>.
- [25] Ozdil N, Kayseri GO, Menguc GS. Analysis of abrasion characteristics in textiles. *Abrasion Resistance of Materials*. 2012; (10): 57-72.
- [26] Tanzi MC, Farè S, Candiani G. Sterilization and degradation. *Foundations of Biomaterials Engineering*. 2019; (47): 289-328.
- [27] Fan R, Attarilar Sh, Shamsborhan M, Ebrahimi M, Gode C, Ozkavak HV. Enhancing mechanical properties and corrosion performance of AA6063 aluminum alloys through constrained groove pressing technique. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020; (30): 1790-1802. **DOI** [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65339-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65339-0).
- [28] Ebrahimi M, Wang Q, Attarilar Sh. A comprehensive review of magnesium-based alloys and composites processed by cyclic extrusion compression and the related techniques. *Progress in Materials Science*. 2023; (131): 101016. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101016>.
- [29] Gopi KR, Shivananda NH. Impact of ECAP on wear performance of Al-Mn magnesium alloy. *Materials Research Express*. 2020; (7): 016550. **DOI** <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab663c>.
- [30] Divya SP, Nagaraj M, Kesavamoorthy M, Srinivasan SA, Ravisankar B. Investigation on the effect of ECAP routes on the wear behavior of AA2014. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2018; (71): 67-77. **DOI** <https://doi.org/10.1007/s12666-017-1141-7>.
- [31] Radhi HN, Mohammed MT, Aljassani AMH. Influence of ECAP processing on mechanical and wear properties of brass alloy. *Materials Today: Proceedings*. 2021; (44): 2399-2402. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.461>.
- [32] Elhefnawey M, Shuai GL, Li Z, Nemat-Alla M, Zhang DT, Li L. On dry sliding wear of ECAPed Al-Mg-Zn alloy: Wear rate and coefficient of friction relationship. *Alexandria Engineering Journal*. 2021; (60): 927-939. **DOI** <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.10.021>.
- [33] Geng Z, Puhan D, Reddyhoff T. Using acoustic emission to characterize friction and wear in dry