

Journal of Aerospace Mechanics

DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.2.2.6

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

Masoud Farajollahi¹, Mahmoud Ebrahimi ^{02*}, Shahram Ajori ⁰²

¹M.Sc, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

² 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.

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 *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

G R A P H I C A L A B S T R A C T



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.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Non-Commercial (CC BY-NC) license.



Aerospace Mechanics





DOR: <u>20.1001.1.26455323.1403.20.2.2.6</u>

بهبود رفتار سایشی فولاد آلیاژی زنگنزن ۳۰۴۱ فراوریشده با روش پرس کاری شیارمقید

مسعود فرج الهی'، محمود ابراهیمی 👓 *، شهرام آجری 👓

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران ^۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

ن

چکیدہ گرافیکی

مڪانيڪِ هوافضا



چکیدہ

تغییرشکل پلاستیک شدید بهعنوان یکی از روشهای تولید مواد با اندازه دانه زیر میکرومتر و حتی فوق ریزدانه مطرح میباشد. در این راستا، فرایند پرسکاری شیارمقید یکی از این تکنیکها برای اعمال بر روی نمونههای ورقهایشکل میباشد. در این پژوهش، مقاومت به سایش و سختی نمونههای فولاد آلیاژی زنگنزن ۳۰۴L فراوریشده با روش پرسکاری شیارمقید شده مورد تجزیهوتحلیل قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که سختی نمونه آنیل 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 آنیل شده است. همچنین، نتایج آزمون سایش نشان داد که نرخ سایش برای نمونه آنیل شده در نیروی نرمال ۳۰ و ۵۰ نیوتنی به ترتیب ۰/۰۴۹ و ۱/۱۶ درصد، برای نمونه یاس اول ۰/۰۴۱ و ۵۶/۰ درصد و برای نمونه پاس سوم ۰/۰۳۶ و ۲۴/۰ درصد می باشد. از جمله دلایل افزایش سختی و مقاومت به سایش را میتوان به نتایج کار سرد و افزایش چگالی نابجاییها نسبت داد. اگرچه نابجايىها باعث انعطاف پذيرى بيشتر ماده و افزايش تغيير شكل پلاستيك أن مي شوند ولی اگر چگالی نابجاییها در ماده از حد معینی بیشتر شود، منجر به برهمکنش نابجاییها و قفل شدن آنها میشود و ماده تردتر می گردد. نتایج نشان داد که افزایش سختی و مقاومت به سایش با افزایش تعداد پاسهای فرایند بهبود مییابد.

برجستهها

- فرایند پرسکاری شیارمقید بر روی فولاد
 زنگنزن ۲۰۴L تا سه یاس اعمال گردید.
- اعمال فرایند موجب افزایش سختی نمونهها گردید.
- نرخ سایش با افزایش تعداد پاسها کاهش یافت.
- تأثير پاس اول فرايند از بقيه پاسها
 چشم گيرتر است.

مشخصات مقاله

تاريخچه مقاله:
نوع مقاله: علمی پژوهشی
دریافت: ۲٬۱۰٬۰۴
بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶
ارائه برخط: ۱۴۰۲/۱۹
*نویسنده مسئول:
brahimi@maragheh.ac.ir

کلیدواژهها: تغییرشکل پلاستیک شدید مواد فوق ریزدانه نرخ سایش مورفولوژی سطح

> * این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز CC BY-NC) Creative Commons Attribution Non-Commercial) توزیع شده است. **ناشر**: دانشگاه جامع امام حسین⁽³⁾

BY NC

۱– مقدمه

تغییر شکل در علم مواد، به تغییر شکل یا اندازه یک جسم با توجه به نیروی اعمال شده (انرژی تغییر شکل در این مورد از طریق کار منتقل می شود) یا تغییرات در اثر اعمال حرارت گفته میشود. مورد اول میتواند درنتیجه نیروهای کششی، فشاری، برشی، خمشی و یا پیچشی باشد. در مورد دوم مهم ترین عاملی که با درجه حرارت تعیین می شود، تحرک نقصهای ساختاری مانند مرز بلورها و نابجایی در جامدات کریستالی و غیرکریستالی است. حرکت یا جابهجایی این نقصهای متحرک بهصورت حرارتی فعال شده و توسط میزان نفوذ اتمى محدود مىشود. تغيير شكل اغلب بهعنوان كرنش در نظر گرفته می شود. همان طور که تغییر شکل رخ می دهد، نيروهاى داخلى بينمولكولى با نيروهاى 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 تغییر شکل 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 نانوساختار میباشد. در این روش، ریزساختار مواد با اعمال تغییرشکل پلاستیک شدید تغییریافته و دانههای بزرگتر به دانههای ریزتر تبدیل میشود [۴]. به علت شکلپذیری پایین مواد غیرفلزی، تولید مواد نانوساختار فلزی با این روش مرسومتر است. فرایندهای تغییرشکل پلاستیک شدید یک اصطلاح عمومی برای توصیف گروهی از روشهای کار بر روی مواد که به طورمعمول 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 بریجمن در دانشگاه هاروارد در

سال ۱۹۳۰ برمی گردد. اثرات این کار بر مواد جامد (با ترکیب فشار هیدرواستاتیکی بزرگ با تغییرشکل برشی) منجر به دریافت جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۴۶ شد [۶]. ازآنجاکه مواد فوقریزدانه ازنظر 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]. ازاینرو، فرايندهاى تغييرشكل پلاستيک شديد يکى از مهمترين و مفیدترین روشها برای تولید فلزات و آلیاژهای فوقریزدانه است. تاكنون، روشهای مختلفی برای تغییرشكل 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 [17]، روش کنگرهدار و صاف کردن متوالی [۱۳]، پیچش لوله با فشار بالا [۱۴] و روش اتصال چرخشی تجمعی [۱۵] اشاره نمود. دراینبین، فرایند پرسکاری شیارمقید، یکی از روشهای تغییرشکل پلاستیک شدید برای تولید ورقهای فلزى با ابعاد مختلف مى باشد [18].

فرایند پرسکاری شیارمقید که ابتداً توسط شین و همکاران توسعه یافت پتانسیل بالایی برای ساخت فلزات و آلیاژهای ورقهای دارا میباشد. تصویر شماتیک فرایند پرسکاری شیارمقید در شکل (۱) نشان دادهشده است. بر این اساس، نمونههای آمادهشده تا تعداد سیکل مدنظر، عملیات پرسکاری انجام می گیرد که مجموع چهار سیکل، یک پاس فرایند پرسکاری شیارمقید در نظر گرفته می شود که دومر تبه توسط قالب شیاردار نامتقارن و دومرتبه دیگر بهوسیله قالب تخت انجام می گیرد [۱۹–۱۹]. در ابتدا، یک نمونه ورق در شکاف بین قالبهای شیاردار بالا و پایین همانطور که در شکل (a۱) نشان دادهشده است قرار می گیرد. در سیکل اول، نمونه ورقهای شکل توسط قالب شیاردار فشرده می شود و سپس در سیکل دوم، نمونه شیاردار بهوسیله قالب تخت صاف می شود (شکل (b۱ و c)). برای اعمال تغییر شکل شدید بر قسمتهای کرنش نیافته شده پس از سیکل دوم، نمونه به میزان ۱۸۰ درجه حول محور عمود بر صفحه ورق چرخانیده می شود و سپس در سیکل سوم، نواحی تغییر شکل نیافته با

فشار بالا به دلیل عدم تقارن قالب شیاردار تغییرشکل مییابد و درنهایت در سیکل چهارم در قالب تخت دوباره صاف میشود که باعث ایجاد کرنش یکنواخت در سراسر نمونه می گردد (شکل ۴۱). درنتیجه انجام فرایند پرسکاری شیارمقید در هر پاس، کرنشی معادل ۱/۱۶ در پاس اول، ۲/۳۲ در پاس دوم، می گردد. تمام پرسها به کمک یک پرس هیدرولیک با سرعت می گردد. تمام پرسها به کمک یک پرس هیدرولیک با سرعت برای کاهش اثرات اصطکاکی بین نمونهها و قالبها از دی سولفید مولیبدن به عنوان روان کننده استفاده می گردد. می دانیم که اعمال کرنش شدید پلاستیکی موجب افزایش حرکت نابجاییها و درنهایت تشکیل مرز دانههای فرعی و درنتیجه، ریزدانه شدن ساختار می گردد که میزان ریزدانه شدن با مقدار کرنش اعمالشده در ارتباط مستقیم میباشد (۲۰].



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

مطالعات پیشین نشان میدهد که سختی نمونههای آلومینیومی فراوری شده با فرایند پرس کاری شیارمقید با افزایش تعداد پاس ها به دلیل کار سخت شدن، افزایش می یابد به طوری که 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 پاس ها، این روند افزایشی پاس اول بسیار زیاد بوده و با افزایش پاس ها، این روند افزایشی شده که برابر با ۸۲ مگا پاسکال بود، پس از پاس سوم به ۱۴۹ شده که برابر با ۱۴۸ مگا پاسکال بود، پس از پاس سوم به ۱۴۹ مگا پاسکال افزایش یافت و پس از پاس چهارم کمی کاهش

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 مكانيكي و الكتروشيميايي است. عملكرد اين فرايند، اغلب منجر به صدمه، حذف و یا تغییر شکل تدریجی مواد در سطوح جامد می شود [۲۲]. این پدیده یکی از عمده ترین دلایل کاهش کارایی اجزای مکانیکی میباشد. اتلاف مواد، زمانبر بودن تجهیزات مربوط به تعمیرات و درنهایت جایگزینی قطعات فرسوده و خورده شده، ازنظر مالی بسیار تأثیرگذار است [۲۳]. بهطور کلی می توان 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 در اثر سایش زیاد نمونه در مراحل پیشین، مقاومت ماده کم شده و سایش بهطور اساسی و سرعتبالا ماده را نابود می سازد [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 لایه لایه در نظر گرفته می شود که در فرایند سایش

بهصورت پوسته پوسته جدا خواهد شد) میباشد [۲۷]. در این پژوهش، ورقهایی از فولاد آلیاژی زنگنزن ۲۰۴۱ به ضخامت ۲ میلیمتر استفاده شده اند که تحت فرایند پرسکاری شیارمقید قرار می گیرند. ابتدا طراحی و ساخت قالبهای فرایند مدنظر انجام گرفته، سپس ورقهای آماده شده به تعداد پاس ممکن تحت اعمال پرسکاری شیارمقید قرار می گیرند. در ادامه، آزمون سختی سنجی بر اساس معیار ویکرز برای سنجش میزان سختی انجام می گیرد. در گام بعد تغییرات ریز ساختار نمونه های اولیه و نهایی به وسیله میکروسکوپ نوری مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد.

همچنین رفتار سایشی نمونههای اولیه و فراوری شده به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف سنجی پراش انرژی اشعه ایکس مورد تجزیه وتحلیل قرار گرفته و تغییرات مکانیسم سایش نمونه ها در طی فرایند مدنظر موردمطالعه قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، ورقهایی از جنس فولاد آلیاژ زنگنزن L ۳۰۴ که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ بیان گردیده، استفادهشده 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 مورداستفاده بستگی دارد، طراحی قالب موردنظر 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 بهصورت مستقیم به داخل محفظه کوره قرار گرفت. بعد از سیری شدن ۴ ساعت، کوره خاموش گردید درحالی که گاز آرگون تا دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس باز گذاشته شد تا به داخل محفظه کوره تزریق گردد و روند سرد شدن نمونههای فولادی بهآرامی 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 پرسکاری قرار گرفتند. درنتیجه انجام فرایند پرسکاری 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 برسی قرار نگرفت. شکل (۲) روند انجام فرایند پرسکاری شیارمقید بعد از عملیات آنیل را نمایش می دهد.

بعد انجام عملیات فرایند پرسکاری شیارمقید، نمونههای فولادی برای برشکاری با دستگاه وایرکات از نوع رفتوبرگشت آماده گردید. لازم به ذکر است که برای آزمایش سایش بهوسیله دستگاه پین روی دیسک، قطعات مستطیلی شکل به ابعاد ۳۵ در ۳۵ میلیمترمربع 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 ۱۹۲۴ متر بر

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 میلیمترمربع به تعداد یک عدد آماده گردید.

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

آهن	كربن	ستليسيم	كروم	منگنز	نيكل	فسفر	گوگرد	نيتروژن
باقيمانده	۰/۰۲	۵۷/۰	11	٢	~	./. F۵	۰/۰۳۰	•//•



شکل (۲): تصویری از قالبهای ساخت شده روش پرسکاری شیارمقید و روند انجام این فرایند بعد از عملیات آنیلینگ نمونههای فولاد آلیاژی زنگنزن ۳۰۴L.

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

برای بررسی تأثیر سایش بر روی نمونههای فولادی اولیه (آنیل شده) و فراوریشده با پرسکاری 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 پولیشکاری میشود تا سطحی صاف و صیقلی شود. بعد از انجام آزمون سایش، نمونهها در داخل اتانول قرار دادهشده و به مدت ۱۵ دقیقه در حمام اولتراسونیک مورد شستشو

قرار گرفته 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 ۱۸/۴ متر بر ثانیه در دمای اتاق و رطوبت حدود ۴۵ درصد بدون شرایط روان کننده انجام شد. برای این پژوهش از دستگاه آزمون سایش پین روی دیسک مدل زمون سایش خشک، نمونههای آنیل شده، پاسهای یک و سه تحت ارزیابی مورفولوژی سطوح فرسوده قرار گرفتند. آمروزه 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

اصلی ترین دلیل استفاده از فرایند پرس کاری شیارمقید ایجاد تغییرات ریزساختاری در نمونه و سوق دادن آن به سمت مواد فوقریزدانه و حتی نانوساختار میباشد، این تغییرات ریزساختاری باعث ایجاد تغییرات شگرفی در خواص فیزیکی و مکانیکی و نیز خواص سایشی و خستگی مواد می شود که بر پایه اعمال کرنش های شدید برشی بر نمونه می باشد.

۳-۱- سختی سنجی

آزمون سختی سنجی به روش ویکرز بر روی نمونه های فولادی آنیل شده، پاس های 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 ۱۷۳/۲ ویکرز می سد و در پاس سوم، میانگین عدد سختی به ۱۹۹/۵ ویکرز افزایش می یابد. به عبارتی، نمونه های 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 می کند. لذا با توجه به اعداد به دست آمده، مشاهده می شود مقدار سختی نمونه ها در ابتدا به شکل چشمگیری افزایش می یابد و سپس روند این افزایش

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 پرسکاری شیارمقید.

ازجمله دلایل تغییرات سختی میتوان به نتایج کار سرد و افزایش چگالی نابجاییها اشاره کرد. در مورد کار سرد این گونه 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 به طور قابل ملاحظهای تغییریافته 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 می گردد.

۲-۳- خواص ریزساختاری

شکل ۴ ریزساختار نمونههای فولادی را در حالات قبل و بعد از فرایند پرسکاری شیارمقید نشان می دهد. نتایج حاکی از آن است که اندازه میانگین دانه در نمونه آنیل شده در حدود ۵۲ میکرومتر، در نمونه تک پاسه ۴۰/۶ میکرومتر و در نمونه سه پاسه ۳۱ میکرومتر اندازه گیری شد که به ترتیب کاهش ۲۲ و ۴۰ درصدی اندازه دانهها در پاسهای اول و سوم نسبت به نمونه اولیه (آنیل شده) را نشان می دهد. همچنین، مشاهده می شود که به دلیل ساختار فوق ریزدانه در پاسهای یک و سه، مرزدانهها تقریباً غیرقابل تشخیص هستند. شکل ۵ نمودار تغییرات میانگین اندازه دانهها در نمونههای آنیل شده و

فراوری شده با پرسکاری شیارمقید را در حالات یک و سه

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

نمونه پاس سه 💻 نمونه پاس یک 💻 نمونه آنیل شده 🗖



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

۳–۳– رفتار سایشی

مقادیر کاهش وزن نمونههای اولیه و پاسهای اول و سوم فرایند پرسکاری 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 ۱۹/۴ متر بر ثانیه) بهوسیله ترازوی دیجیتالی بهدستآمده که نتایج آن در شکل ۶ آورده شده است.

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود نرخ سایش نمونه های اولیه آنیل شده، تک و سه پاسه در نیروی نرمال ۳۰ نیوتنی به ترتیب برابر با ۰/۰۴۹ درصد، ۰/۰۴۱ درصد و

۰/۰۳۶ درصد می باشد. 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 می باشد. 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 می یابد. همچنین بزرگی بار اعمال شده بر کاهش نرخ سایش تأثیر دارد که می تواند به دلیل افزایش مقدار سختی باشد که از به هدر رفتن ماده به دلیل حرکت لغزشی نمونه با پین مانع می شود. این کار همچنین از لایهلایه شدن و باقیماندههای سایش جلوگیری می کند. مشخص شده است که کاهش اندازه دانه توسط فرایند پرس کاری شیار مقید منجر به افزایش سختی نمونهها شده که باعث افزایش مقاومت به سایش می گردد. 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 پرسکاری شیارمقید است که منجر به افزایش سختی و استحکام در برابر سایش به دلیل پالایش دانه می شود. بهبود رفتار سایشی نمونه های پر س کاری شیارمقید منجر به کاهش اتلاف جرم سایشی و درنتیجه تغییر توزيع ميكروسختي و تغيير مكانيسم سايشي مي شود. علاوه بر این، ریزدانه شدن و ایجاد نابجاییهای 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 می توان به افزایش مقاومت در برابر سایش و بهبود خواص مکانیکی حاصل از تغییرشکل پلاستیک شدید نسبت داد. بهعبارتدیگر میتوان نتیجه گرفت که نرخ سایش به دلیل افزایش سختی و استحکام نمونه فراوری شده و ریزدانه شدن ساختار آن در اثر اعمال فرایند پرسکاری شیارمقید کاهش قابل توجهي مي يابد [٢٩-٣٢].



شکل (۶): میزان کاهش وزن فولاد آلیاژی زنگنزن ۳۰۴L فراوریشده با فرایند پرسکاری شیارمقید 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 می شود که در بار اعمالی ۳۰ نیوتنی، ضریب اصطکاک در پاس اول نسبت به نمونه آنیل شده روند نزولی داشته ولی در پاس سوم نسبت به پاس یک صعودی است، درحالی که برای بار اعمالی ۵۰ نیوتنی، ضریب اصطکاک در پاس اول و سوم نسبت به نمونه اولیه آنیل شده نزولی شده است.

ضریب اصطکاک در اولین پاس در مقایسه با نمونه آنیل 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

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 گزارششده است [۳۳–۳۵].



شکل (۷): نمودار میانگین ضریب اصطکاک در نمونههای اولیه آنیل 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 پرسکاری شیارمقید به توسط 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 آنیل 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 لایه لایه شده و اکسیداسیون نیز در این شکل قابل مشاهده است. در این زمینه، وجود منطقه اکسیداسیون در نمونه آنیل شده با مقدار زمینه، وجود منطقه اکسیداسیون در نمونه آنیل شده با مقدار لایه برداری را می توان به صورت جدا شدن ماده از سطح نمونه و چسبیدن آن به پین توصیف کرد. با لغزش بیشتر، روند معکوس می شود، بدین معنا که ماده جداشده از نمونه که بر



شکل (۸): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیفسنجی پراش انرژی پرتوایکس در نمونههای فولاد آلیاژی زنگنزن ۲۰۴L برحسب پاسهای انجامشده با فرایند پرسکاری شیارمقید در طول آزمون سایش با بار نرمال اعمالی ۳۰ 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 تغییرشکل پلاستیکی کمی مشاهده گردید. در این راستا، وجود خطوط ممتد و موازی نشان از مشخصه سایش خراشان برای نمونههای تک و سه پاسه میباشد، بهطوریکه در نمونه تک پاسه، مقدار کمی سایش چسبان و در نمونه سه پاسه، مقدار

کمی سایش ورقهای و چسبان مشاهده می گردد. 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 ۱/۹ و ۳ درصد وزنی تأییدشده است.

بررسی سطح سایش نمونهها برای بار نرمال اعمالی ۵۰ نیوتنی که در شکل ۹ آورده شده نشان میدهد که سطح سایش نمونه اولیه آنیل شده ترکیبی از نواحی چسبندگی، نوارهای تغییرشکل 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 زنگنزن ۲۰۴L برحسب پاسهای انجامشده در فرایند پرسکاری شیارمقید در طول آزمون سایش با بار نرمال

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 می باشد. در نمونههای تک و سه پاسه، به دلیل یالایش 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 یاسه و مقدار کمی سایش ورقهای در نمونه سه یاسه مشاهده گردید. همچنین، وجود منطقه اکسیداسیون در نمونههای تک و سه پاسه به ترتیب با مقدار اکسیژن ۴/۵ و ۱ درصد وزنی تأییدشده است که به ترتیب در شکلهای **۹ ب** و **۹ ج** قابلمشاهده 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 فراوریشده با روش پرسکاری شیارمقید، تشکیل ساختار فوقریزدانه از طریق تجمع نابجاییها است که موجب بهبود خواص مکانیکی ماده می شود؛ این موضوع در مطالعات دیگر مربوط به رفتار سایشی نمونههای تغییر شکل پلاستیک داده شده نیز گزار ش شده است .[77-79]

۴- نتیجهگیری

- ۱) اندازه دانه نمونههای فولادی فراوریشده با روش پرسکاری شیارمقید نسبت به نمونه اولیه آنیل شده کوچکتر میشود، بهطوریکه با افزایش تعداد پاسها، دانهها ریزتر شده، استحکام افزایشیافته و شکلپذیری افت میکند.
- ۲) میزان سختی نمونه آنیل شده برابر با ۱۶۳/۵ ویکرز
 ۱ست که در پاسهای اول و سوم به ۳۷۳/۸ و ۳۸۹/۵

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

- 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 پرسکاری شیارمقید تغییریافته 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.
- ۹) میزان کاهش وزن ناشی از سایش در نمونههای فراوریشده با روش پرسکاری شیارمقید نسبت به نمونه اولیه آنیل شده کاهش یافته است. همچنین، مقاومت به سایش با افزودن تعداد پاس بهبود می باید، به طوری که اثر پاس اول چشمگیرتر از پاس سوم می باشد. در این راستا، میزان کاهش وزن ناشی از سایش در بار نرمال اعمالی ۵۰ نیوتنی قابل ملاحظهتر از بار نرمال اعمالی ۳۰ نیوتنی است.

۵- مراجع

[1] Babaei H, Darvizeh A, Alitavoli M, Mirzababaie 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** <u>http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1394.15.2.28.</u> <u>6</u>.

[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** <u>https://doi.org/10.22076/me.2017.46691.1086</u>.

[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

403-462.

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.

DOI

<u>nups.//doi.org/10.2320/matertrans.wiF201910</u>.

[15] Segal V. Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD). Materials. 2018; (11): 1175. **DOI** <u>https://doi.org/10.3390/ma11071175</u>.

[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** <u>https://doi.org/10.1007/s12666-017-1117-7</u>.

[17] Gupta AK, Maddukuri TS, Singh SK.
Constrained groove pressing for sheet metal processing. Progress in Materials Science. 2016; (84): 403-462.

https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.09.008.

[18] Shahmirzaloo A, Hosseini SM, Siahsarani 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** <u>https://doi.org/10.1088/2053-1591/abc9f2</u>.

[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 semiconstrained 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** <u>https://doi.org/10.1007/s11249-007-9280-3</u>.

[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** <u>https://doi.org/10.1179/imr.1997.42.2.45</u>.

[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 highpressure 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 angularrolling: 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 equalchannel angular pressing as a processing tool for grain refinement. Progress in Materials Science. 2006; (51): 881-981.

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** <u>https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00007-9</u>.

[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** <u>https://doi.org/10.1038/s41598-018-36584-w</u>.

[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** <u>https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.083</u>. 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, Leroch 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.

[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** <u>https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab663c</u>.

[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