Journal of Aerospace Mechanics/ 2024/ Vol.20/ No.3/ 17-29

Journal of Aerospace Mechanics

DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.3.2.8

Effect of Constrained Groove Pressing Process on Electrochemical, Hardness, and Microstructure Behavior of 6061 Aluminum Alloy

Seyed-Rasoul Hoseini[1], Mahmoud Ebrahimi[2*], Shahram Ajori[2]

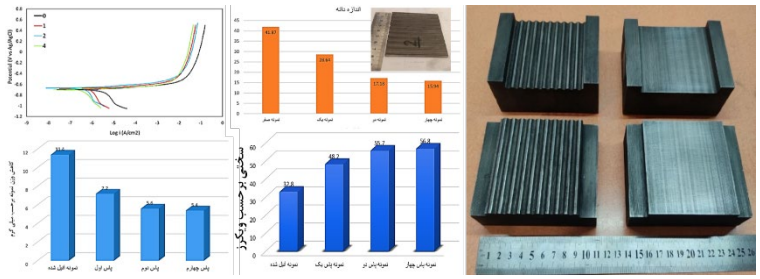
[1] M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

[2] Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

HIGHLIGHTS

- CGP was performed up to four passes on Al6061.
- Grain refinement was very intensive at the first processing pass.
- The corrosion rate was decreased by the addition of pass number.
- Surface corrosion SEM was in good agreement with the test results.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 3 April 2024

Received in revised form: 13 May 2024

Accepted: 1 June 2024

Available online: 29 June 2024

*Correspondence:

ebrahimi@maragheh.ac.ir

How to cite this article:

S. Hosseini, M. Ebrahimi, S. Ajori. Effect of constrained groove pressing process on electrochemical, hardness, and microstructure behavior of 6061 aluminum alloy. Journal of Aerospace Mechanics. 2024; 20 (3):17-29.

Keywords:

Constrained groove pressing

Grain refinement

Hardness

Corrosion resistance

Corrosion rate

ABSTRACT

The so-called severe plastic deformation processes have received great attention from researchers due to the production of materials with desirable physical and mechanical properties through grain refinement. In this work, the corrosion behavior, hardness, and microstructure of 6061 aluminum alloy (Al6061) have been investigated after processing by constrained groove pressing (CGP). The results showed that the average grain size of the annealed sample, which was 42 micrometers, reached 24, 17, and 16 micrometers in the first, second, and fourth passes, respectively. Also, the hardness of the initial, first, second, and fourth passes was 33, 48, 56, and 57 HV, respectively. Therefore, the average hardness value increases dramatically at first, and then the increasing trend slows down in subsequent passes. Finally, the corrosion resistance of samples increases with CGP operation, so that the corrosion current of the first, second, and fourth pass samples shows a decrease of 45%, 59%, and 65%, respectively, as compared to the initial sample. The corrosion current reduction due to the CGP application is due to the decrease of surface defects such as holes, cracks, and open porosity, which was proven by the scanning electron microscope obtained from the corrosion surface of the samples. Finally, the sample weight reduction (the weight difference before and after the corrosion test) at different CGP conditions confirmed the results of the polarization curves.

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

Publisher: Imam Hossein University © Authors

مکانیک هوافضا/ سال ۱۴۰۳/ دوره ۲۰/ شماره ۳/ صفحه ۱۷-۲۹

نشریه مکانیک هوافضا

DOR: 20.1001.1.26455323.1403.20.3.2.8

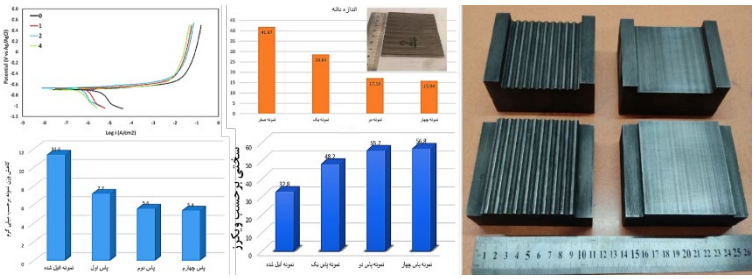
بررسی تجربی تأثیر فرایند پرس‌کاری شیارمقید بر رفتار الکتروشیمیایی، سختی و ریزساختار آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱

سیدرسول حسینی[۱]، محمود ابراهیمی[۲*]، شهرام آجری[۲]

[۱] کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مراغه، ایران

[۲] دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه مراغه، ایران

چکیده گرافیکی



برجسته‌ها

- آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ تا چهار پاس تحت فرایند پرس‌کاری شیارمقید قرار گرفت.
- پالایش دانه در پاس اول فرایند بسیار شدید بود.
- جریان خوردگی با افزایش تعداد پاس کاهش یافت.
- تصاویر میکروسکوپی سطوح خوردگی مطابقت خوبی با نتایج آزمون داشت.

چکیده

فرایندهای موسوم به تغییرشکل پلاستیکی شدید به دلیل ایجاد خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب از طریق ریزدانه کردن فلزات و آلیاژها موردتوجه شدید محققین قرارگرفته است. در این مطالعه، رفتار خوردگی، سختی و ریزساختاری آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در حالات قبل و بعد از فرایند پرس‌کاری شیار مقید موردمطالعه قرارگرفته است. نتایج نشان داد که اندازه دانه متوسط نمونه اولیه آنیل شده که برابر با ۴۲ میکرومتر بوده به ترتیب به ۲۴، ۱۷ و ۱۶ میکرومتر در پاس‌های اول، دوم و چهارم می‌رسد. همچنین، سختی نمونه‌های پرس‌کاری شده یک، دو و چهار پاسه از ۳۳ ویکرز در حالت اولیه به ترتیب به ۴۸، ۵۶ و ۵۷ ویکرز می‌رسد. لذا مقدار سختی ابتدا به شکل چشم‌گیری افزایش یافته و سپس، روند این افزایش در پاس‌های بعدی کند می‌گردد. نهایتاً مقاومت به خوردگی نمونه‌های آلومینیومی با اعمال فرایند مذکور افزایش می‌یابد به‌طوری‌که دانسیته جریان خوردگی نمونه‌های پاس اول، دوم و چهارم به ترتیب ۴۵٪، ۵۹٪ و ۶۵٪ کاهش را نسبت به نمونه اولیه نشان می‌دهد. کاهش دانسیته جریان خوردگی در اثر اعمال فرایند پرس‌کاری شیارمقید به دلیل کاهش میزان عیوب سطحی از قبیل حفره‌ها، ترک‌ها و تخلخل‌های باز می‌باشد که توسط تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به‌دست‌آمده از سطح خوردگی نمونه‌ها اثبات شد. نهایتاً، کاهش وزن نمونه‌ها (اختلاف وزن در حالات قبل و بعد از آزمون خوردگی) با اعمال فرایند و افزایش تعداد پاس‌ها، نتایج آزمون خوردگی را تأیید کرد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

ارائه برخط: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

*نویسنده مسئول:

ebrahimi@maragheh.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

فرایند پرس‌کاری شیارمقید

پالایش دانه

سختی‌سنجی

مقاومت به خوردگی

جریان خوردگی

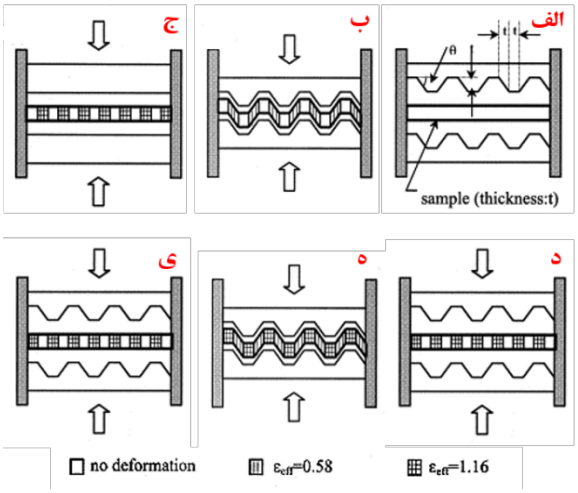
* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع‌شده است.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین(ع)

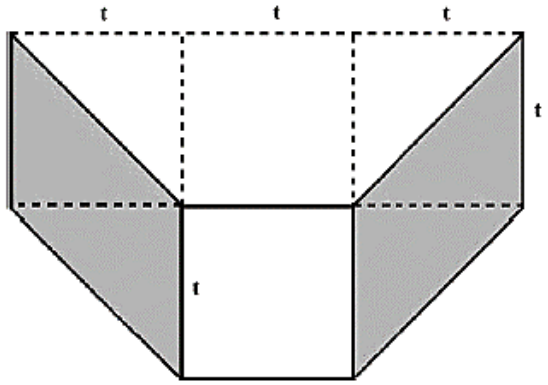
۱- مقدمه

فرایند پرس‌کاری شیارمقید که اولین بار توسط شین و همکارانش [۱] در سال ۲۰۰۱ معرفی شد به‌طور خلاصه شامل کنگره‌ای کردن ورق توسط قالب شیاردار و سپس صاف کردن آن توسط قالب مسطح به‌صورت پی‌درپی می‌باشد. شکل **۱** نحوه انجام مراحل مختلف فرایند پرس‌کاری شیارمقید را توضیح می‌دهد.



شکل (۱): طرحواره مراحل مختلف انجام فرایند پرس‌کاری شیارمقید در طول یک پاس [۱].

بر این اساس، هر پاس فرایند پرس‌کاری شیارمقید شامل چهارچرخه می‌باشد. در چرخه اول، از یک قالب غیرمتقارن شیاردار که ابعاد t نشان داده‌شده در شکل **۱ الف** برابر با ضخامت ورق می‌باشد، استفاده می‌گردد. لازم به ذکر است که هر دو قالب از اطراف توسط دیواره‌های مکعبی به‌خوبی احاطه‌شده‌اند و زمانی که عملیات پرس‌کاری انجام می‌شود فاصله بین نیمه بالایی و نیمه پایینی آن برابر با ضخامت ورق می‌شود. درواقع، ناحیه تغییرشکل یافته یا کنگره‌ای شده تحت برش خالص در شرایط کرنش صفحه‌ای قرار می‌گیرد که به‌صورت ناحیه هاشورخورده در شکل **۱ ب** نشان داده‌شده است، ولی به ناحیه تخت آن، کرنشی اعمال نمی‌شود. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که در قالب با زاویه شیار ۴۵ درجه (θ=45°)، کرنش برشی ۱ به ناحیه تغییرشکل یافته اعمال می‌شود که معادل با کرنش مؤثر ۰/۵۸ می‌باشد. چرخه دوم که با استفاده از قالب‌های تخت انجام می‌گیرد، نواحی از ورق که قبلاً تغییرشکل پیداکرده بودند را تحت تغییرشکل برشی معکوس قرار می‌دهد، درحالی‌که ناحیه صاف ورق همچنان بدون تغییر باقی‌مانده است. درنتیجه کرنش مؤثر در ناحیه تغییرشکل یافته برابر با ۱/۱۶ خواهد بود که در شکل **۱ ج** با ناحیه دو بار هاشور خورده مشاهده می‌گردد. در چرخه سوم، نمونه به‌اندازه ۱۸۰ درجه حول محور عمودی چرخانیده می‌شود (شکل **۱ د**). نامتقارن بودن قالب‌ها باعث می‌شود که نواحی که قبلاً تحت تغییرشکل پلاستیک قرارگرفته‌اند، بدون تغییر بماند و برعکس نواحی از ورق که تحت تغییرشکل قرار نگرفته‌اند، دچار تغییرشکل پلاستیک شوند که در شکل **۱ ه** قابل‌مشاهده است. نهایتاً در چرخه چهارم با انجام عملیات صاف کردن بر روی ورق، کرنش مؤثر ۱/۱۶ در کل نمونه حاصل می‌شود [۱-۴]. می‌توان گفت که با اعمال این چهارچرخه بر روی نمونه، یک پاس عملیات پرس‌کاری شیارمقید به اتمام رسیده است و با اعمال پاس‌های بیشتر می‌توان به کرنش‌های بالاتری در نمونه بدون تغییر ابعاد هندسی قابل‌ملاحظه، دست یافت. به‌عنوان‌مثال، با انجام چهار پاس فرایند پرس‌کاری شیارمقید، درمجموع کرنش مؤثر ۴/۶۴ به نمونه اعمال می‌شود [۴-۶].



شکل (۲): طرحواره‌ای از ناحیه تغییرشکل یافته پلاستیکی در فرایند پرس‌کاری شیارمقید [۴].

شیردل و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۹ کرنش مؤثر اعمالی بر ناحیه تغییرشکل یافته نمونه در چرخه اول فرایند پرس‌کاری شیارمقید را با توجه به شکل **۲** محاسبه کرده‌اند. لازم به ذکر است که با توجه به شکل، در این روابط مقدار زاویه شیار ۴۵ درجه فرض شده است. همچنین، ایشان تغییرشکل نمونه در این فرایند را تحت شرایط کرنش صفحه‌ای مطالعه کرده‌اند.

تاکنون مطالعات فراوانی بر روی مواد مختلف فراوری‌شده با فرایند پرس‌کاری شیارمقید صورت گرفته است [۸-۱۱]. به‌عنوان‌مثال، شین و همکارانش [۱۲] فرایند مذکور را تا چهار پاس بر روی ورق‌هایی از جنس آلومینیوم خالص (۹۹/۹۹٪) انجام دادند. نتایج نشان داد که روند تغییرات ریزساختاری حاصل‌شده بسیار شبیه اتفاقی است که در طول فرایند ایکپ (ECAP) صورت می‌گیرد. با افزایش مقدار کرنش اعمالی، چگالی نابجایی‌ها افزایش یافته و دانه‌های فرعی با مرزهای کوچک زاویه تشکیل می‌شود. به‌تدریج با افزایش میزان کرنش در چرخه‌های بعدی فرایند، مرزهای دانه‌های فرعی از نابجایی‌ها اشباع می‌شوند و در ادامه این دانه‌های فرعی به دانه‌های اصلی با مرزدانه‌های بزرگ زاویه تبدیل می‌شوند که درنتیجه موجب ریزدانه شدن کل ساختار ماده می‌شوند. لی و همکارانش [۱۳] فرایند پرس‌کاری شیارمقید را شبیه‌سازی کردند و گزارش دادند که بعد از چهارچرخه (یک پاس)، کرنش مؤثر در ناحیه بین قسمت صاف و شیاردار نمونه و همچنین در بالا و پایین ورق کمتر از سایر نواحی خواهد بود. همچنین دریافتند که در این فرایند، تغییرشکل پلاستیک یکنواخت در راستای ضخامت ورق وجود ندارد و کرنش مؤثر در مرکز بیشتر از سطح آن می‌باشد. باوجوداین، با ادامه فرایند و افزایش تعداد پاس‌ها، این تفاوت کاهش چشم‌گیری می‌یابد. در مطالعه‌ای دیگر بر روی ورق‌های آلومینیومی خالص در دو دمای محیط و کرایجنیک (دمای ۱۵۰- درجه سلسیوس یا دمای نیتروژن مایع)، به علت شکل‌پذیری پایین نمونه در دمای کرایجنیک، ماکزیمم استحکام کششی با افزایش تعداد پاس‌ها پس از پاس دوم کاهش بیشتری نسبت به نمونه‌هایی که در دمای محیط پرس‌کاری شده‌اند، دارد [۱۴]. چنین نتیجه‌ای در تحقیقی مشابه که بر روی نمونه‌های مس خالص تجاری انجام داده‌اند مشاهده گردید [۱۵]. در مطالعه فرایند پرس‌کاری شیارمقید توسط پنگ و همکارانش [۱۶] بر روی نمونه آلیاژ دوفازی Cu-Zn به‌منظور بررسی احتمال ایجاد ترک و روش‌های جلوگیری از آن، نمونه ورقه‌ای‌شکل به سه ناحیه تقسیم گردید که شامل ناحیه بدون تغییرشکل، ناحیه تحت تنش برشی و ناحیه کوچکی تحت خمش و کشش (مناطق نزدیک به گوشه‌ها) می‌باشد. همچنین، مشاهده گردید که ترک همیشه در گوشه دندانه‌های قالب به وجود می‌آید. چنین نتیجه‌ای، همچنین برای ورق تیتانیومی خالص نیز گزارش‌شده است [۱۷].

از بین آلیاژهای مختلف آلومینیوم، آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ به دلیل استحکام نسبتاً بالا، چقرمگی مناسب، مقاومت به خوردگی نسبتاً خوب و خستگی مطلوب، موردتوجه فراوان صنایع مختلف می‌باشد. درواقع، آلومینیوم آلیاژی سری ۶۰۰۰ حاوی عناصر آلیاژی منیزیم و سیلیسیم می‌باشند. از این آلیاژها، به‌طور گسترده‌ای در صنایع دریایی، دفاعی، خطوط لوله، مخزن‌ها، پل‌های سبک و سریع الاحداث، قایق‌های موتوری و هوافضا استفاده می‌شوند [۱۸].

از طرف دیگر، خوردگی یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فلزات و آلیاژها می‌باشد [۱۹]. خوردگی به‌عنوان زوال یک فلز در اثر واکنش‌های شیمیایی یا فیزیکی و مکانیکی با محیط اطراف آن ماده تعریف می‌شود. لازم به ذکر است که پدیده خوردگی در تمامی دسته‌های مواد ازجمله فلزات، سرامیک‌ها، پلیمرها و کامپوزیت‌ها روی می‌دهد اما وقوع آن در فلزات و آلیاژهای آن بسیار شایع بوده و اثرات مخرب زیادی بر جای گذاشته است. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که خوردگی و هزینه‌های ناشی از آن، سالانه خسارت زیادی به اقتصاد جوامع وارد کرده که حدود ۶٪ از تولید ناخالص ملی هر کشور را به خود اختصاص داده است. لذا، بهبود هرچه بیشتر مقاومت به خوردگی فلزات و به‌ویژه آلیاژهای غیر آهنی به‌منظور گسترش کاربردها و جایگزینی این فلزات با فولادها جهت کاهش وزن سازه‌ها، خودروها و فضاپیماها لازم و ضروری به نظر می‌رسد. اگرچه تاکنون، مطالعاتی در مورد رفتار خوردگی نمونه‌های فراوری‌شده با فرایندهای مختلف تغییرشکل پلاستیکی شدید انجام‌گرفته است، بااین‌حال، گزارشات متناقضی در مورد افزایش یا کاهش مقاومت به خوردگی نمونه‌ها در اثر اعمال این فرایندها به چشم می‌خورد؛ لذا مطالعه پیش‌رو به‌منظور بررسی اثرات اعمال فرایند پرس‌کاری شیارمقید بر رفتار الکتروشیمیایی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ پرداخته است.

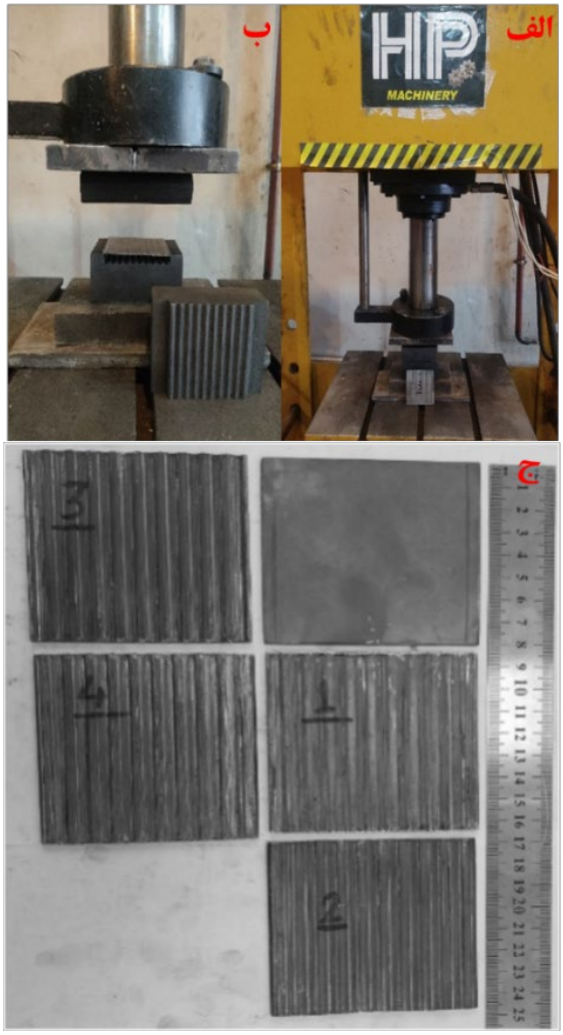
۲- مواد و روش تحقیق

برای این تحقیق، آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ ورقه‌ای‌شکل به ضخامت ۲ میلی‌متر استفاده شد. برای این منظور، ابتدا

نمونه‌ها به ابعاد ۸۰ در ۸۰ میلی‌مترمربع برش داده شد و سپس برای دستیابی به ریزساختار یکنواخت، تحت عملیات آنیلینگ کامل قرار گرفت. در این راستا، دما و مدت زمان عملیات به ترتیب ۴۲۰ درجه سلسیوس و ۲۰ دقیقه انتخاب گردید و عملیات سرد شدن نمونه‌ها به‌آرامی در داخل کوره انجام گرفت.

فرایند پرس‌کاری شیارمقید تا چهار پاس بر روی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ با موفقیت انجام گرفت. توجه شود که انجام پاس پنجم منجر به ایجاد ترک در سطح ورق گردید و لذا، پاس چهارم به‌عنوان پاس نهایی برای این مطالعه در نظر گرفته شد. شکل **۳**، دستگاه پرس استفاده‌شده، قالب پرس‌کاری شیارمقید و نمونه‌های فراوری‌شده تا چهار پاس را به‌وضوح نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که سرعت پرس هیدرولیکی برابر با ۲/۵ میلی‌متر بر ثانیه و روانکار استفاده‌شده در این تحقیق، مولیبدن‌دی‌سولفید بوده است. در ادامه، ورق‌های آلومینیومی فراوری‌شده با فرایند پرس‌کاری شیارمقید در دو اندازه برای بررسی خواص مکانیکی، ریزساختاری و خوردگی آماده شدند. نمونه‌هایی به ابعاد ۱۰ در ۱۰ میلی‌مترمربع برای مطالعه خواص ریزساختاری و سختی‌سنجی و برای بررسی رفتار خوردگی، نمونه‌هایی به ابعاد ۱۰ در ۲۰ میلی‌مترمربع از قسمت مرکزی ورق‌ها برش داده‌شده و آماده گردید.

نمونه‌های تهیه‌شده برای متالوگرافی، پس از مانت شدن، تحت سنباده‌زنی تا شماره ۵۰۰۰ با کاغذ سنباده سیلیسیم‌کاربید قرار گرفت. برای پولیش‌کاری از پودر آلومینا استفاده شد. همچنین، محلول اچانت بکار رفته اسید هیدروفلوئوریک در آب مقطر (۹۹/۵٪ آب مقطر و ۰/۵٪ اسید هیدروفلوئوریک) بود. در نهایت، از میکروسکوپ نوری مدل PMG3 برای بررسی تغییرات ریزساختاری استفاده شد. همچنین، برای بررسی سختی ورق آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در حالات قبل و بعد از فرایند پرس‌کاری شیارمقید از میکروسختی‌سنجی ویکرز مدل MDPEL-M400 استفاده گردید (شکل **۴**). برای این منظور، نمونه‌ها پس مانت شدن، سنباده‌زنی و پولیش‌کاری شد. برای هر حالت، آزمون سختی‌سنجی سه بار تکرار شد و مقدار میانگین گزارش شد. لازم به ذکر است که آزمون سختی‌سنجی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت ۴۱٪ انجام‌گرفته است.



شکل (۳): نحوه فراوری نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱: الف) دستگاه پرس هیدرولیکی؛ ب) قالب فرایند پرس‌کاری شیارمقید؛ ج) نمونه‌های فراوری‌شده تا چهار پاس.

نهایتاً، آزمون خوردگی به روش پلاریزاسیون به کمک دستگاه ZIVEsp2 به‌منظور اندازه‌گیری مقاومت به خوردگی ورق آلومینیوم آلیاژِ در حالات قبل و بعد از اعمال فرایند پرس‌کاری شیارمقید انجام گرفت که در شکل **۵ الف** آورده شده است. قبل از آزمون فوق‌الذکر، نمونه‌ها در دستگاه التراسونیک با الکل چربی‌زدایی شده و وزن اولیه آن‌ها ثبت گردید. لازم به توضیح است که برای این آزمون از سه الکترود: pt به‌عنوان الکترود شمارنده که از جنس پلاتین می‌باشد، الکترود رفرنس که همیشه پتانسیل ثابت داشته و پتانسیل نمونه نسبت به آن

اندازه‌گیری می‌شود و از جنس کلرید جیوه می‌باشد و الکترود کار که به نمونه آلومینیومی متصل می‌شود، استفاده می‌شود. همچنین، پتانسیل مدارباز که درواقع به تعادل رسیدن سطح الکترود می‌باشد پس از ۲۰ دقیقه غوطه‌وری و پتانسیل نمونه در محلول پایدار (۳/۵٪ سدیم‌کلرید در آب مقطر) حدود ۷۲۰- میلی‌ولت تعیین شد که با سرعت خوردگی ۱/۵ میلی‌متر بر ثانیه صورت گرفت. لازم به ذکر است که آزمون خوردگی مطابق با روش پلاریزاسیون به‌منظور سنجش و اندازه‌گیری مقاومت به خوردگی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در حالات قبل و بعد از فرایند پرس‌کاری شیارمقید انجام گرفت. آزمون مدارباز، منحنی تغییرات ولتاژ برحسب زمان می‌باشد که در این حالت، آزمون خوردگی پس‌ازاینکه مدار نمونه‌های فوق‌الذکر به شرایط پتانسیل تعادل رسید انجام می‌گردد. در مطالعه حاضر طی این آزمون، ولتاژ اسکن‌ریت (نرخ اسکن برحسب میلی‌ولت بر ثانیه) یک میلی‌ولت بر ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین مدت‌زمان آزمون برای هر نمونه بدون در نظر گرفتن مدت‌زمان مدارباز حدوداً ۳۰ دقیقه به طول انجامید. لازم به توضیح است که ابتدا، شیب کاتدی و آندی برای هر نمونه رسم گردید و سپس جریان خوردگی مطابق با رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$i_c = {0.026}/{RP} \qquad (1)$$

در انتهای آزمون خوردگی، وزن نمونه اندازه‌گیری شد و تفاضل آن به‌عنوان میزان خوردگی گزارش گردید. نهایتاً، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TESCAN-mira3 مطابق با شکل **۵ ب** به‌منظور آنالیز مورفولوژی سطح خوردگی و محصولات خوردگی استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

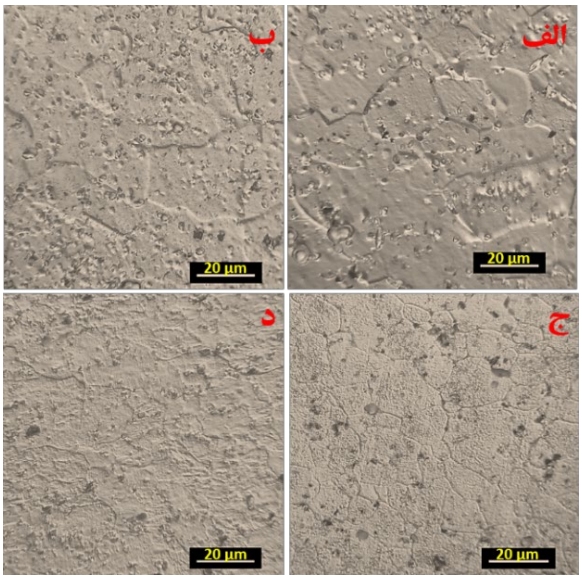
۳-۱- تغییرات ریزساختاری

شکل **۶** تغییرات ریزساختاری آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ را در حالات قبل و بعد فرایند پرس‌کاری شیارمقید نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است اعمال فرایند مذکور و افزایش تعداد پاس‌ها موجب کاهش اندازه دانه نمونه‌های آلومینیومی می‌شود. دراین‌ارتباط، شکل **۶ الف** که مربوط به نمونه اولیه آنیل شده می‌باشد دارای اندازه دانه متوسط ۴۲ میکرومتر است.

شکل (۴): الف) میکروسکوپ نوری؛ ب) میکروسختی‌سنجی مورداستفاده در این تحقیق.

شکل (۵): الف) آزمون پلاریزاسیون؛ ب) میکروسکوپ الکترونی روبشی مورداستفاده در این تحقیق.

اعمال یک پاس فرایند پرس‌کاری شیارمقید همان‌طور که در شکل **۶ ب** نشان داده‌شده است موجب ریزدانگی شدید نمونه آلومینیومی می‌شود به‌طوری‌که اندازه متوسط آن به حدود ۲۳/۶ میکرومتر می‌رسد. تغییرات مربوطه حدود ۴۴٪ کاهش در اندازه متوسط دانه‌ها را در اثر اعمال فقط یک پاس از فرایند مشخص می‌کند. همچنین، با توجه به شکل‌های **۶ ج** و **۶ د**، اندازه دانه متوسط نمونه آلومینیوم آلیاژی در پاس‌های دوم و چهارم به حدود ۱۷/۲ و ۱۵/۶ میکرومتر می‌رسد که حاکی از کاهش ۲۷٪ و ۹٪ نسبت پاس قبل از آن دارد. لذا تأثیر پاس اول فرایند به‌مراتب از پاس‌های بعدی بیشتر بوده و با افزایش تعداد پاس‌ها، شیب کاهش اندازه دانه کاهش محسوسی می‌یابد.

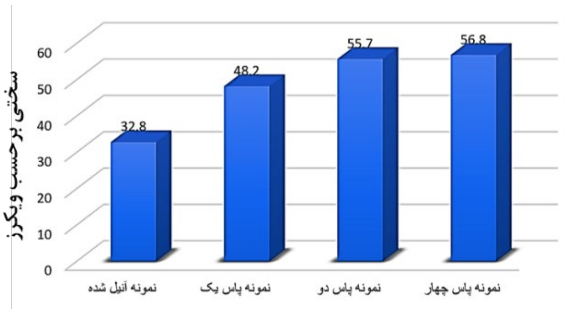


شکل (۶): تصاویر ریزساختاری نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری‌شده با فرایند پرس‌کاری شیارمقید: الف) حالت اولیه آنیل شده؛ ب) پاس اول؛ ج) پاس دوم؛ د) پاس چهارم.

کاهش شدید در پالایش و ریزدانه شدن آلومینیوم آلیاژی را می‌توان به پدیده کار سختی، قفل و انباشته شدن نابجایی‌ها، ایجاد مرزدانه و درنهایت تشکیل ساختار فوق‌ریزدانه نسبت داد. نابجایی‌ها یک عیب خطی هستند که درون شبکه‌های بلوری مواد وجود دارند. درواقع، نابجایی‌ها عامل اصلی استحکام، قابلیت شکل‌پذیری و خواص مکانیکی فلزات به شمار می‌آیند که مقدار آن با اعمال فرایندهای تغییرشکل پلاستیکی شدید، به‌سرعت افزایش می‌یابند. نابجایی‌ها در فلزات و آلیاژها رفتاری مشابه با موجودات زنده دارند. آن‌ها به وجود می‌آیند، حرکت کرده و رشد می‌کنند، بر یکدیگر اثر می‌گذارند، تکثیر می‌شوند، دارای انرژی هستند و حتی ممکن است نابود گردند [۲۰-۲۴]. در این مطالعه، علت ریزدانگی نمونه آلومینیم آلیاژی را می‌توان چنین بیان کرد که نمونه با اعمال فرایند پرس‌کاری شیارمقید، تحت تغییرشکل پلاستیکی شدید قرار می‌گیرد. چنین تغییرشکل پلاستیکی شدیدی، کرنش‌های بالایی را بر نمونه تحمیل می‌کند که درنتیجه آن، دانسیته بالایی از نابجایی‌ها در هر پاس از فرایند وارد ساختار ماده می‌شوند. این نابجایی‌ها به‌تدریج مرزهای با زاویه کوچک را تشکیل داده که با انباشته شدن آن‌ها بر روی هم، مرزهای با زاویه بزرگ پدید می‌آید که نهایتاً منجر به ریز شدن دانه‌های ماده آلومینیومی می‌شود [۲۴]. لذا می‌توان گفت که عمده‌ترین دلیل استفاده از فرایند پرس‌کاری شیارمقید، سوق پیدا کردن مواد به ساختارهای فوق‌ریزدانه و حتی نانوساختار می‌باشد که موجب بهبود قابل‌ملاحظه در خواص فیزیکی و مکانیکی مواد فراوری‌شده می‌گردد.

۳-۲- تغییرات سختی

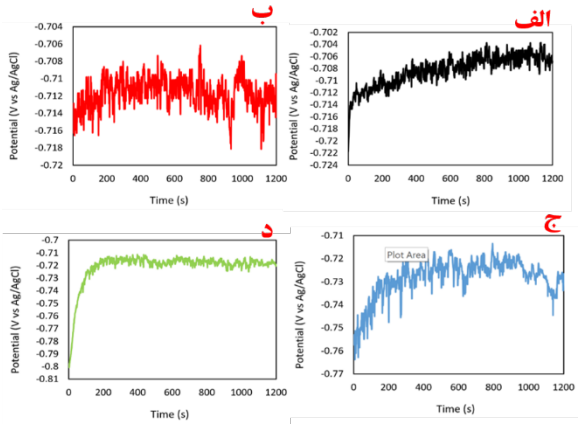
تغییرات سختی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری‌شده با فرایند پرس‌کاری شیارمقید در شکل **۷** آورده شده است. بر این اساس، میانگین سختی نمونه اولیه آنیل شده برابر با ۳۲/۸ ویکرز می‌باشد که در اثر اعمال اولین پاس به مقدار میانگین ۴۸/۲ ویکرز می‌رسد که افزایشی در حدود ۴۷٪ را نشان می‌دهد. در پاس دوم از فرایند، میانگین سختی نمونه به مقدار ۵۵/۷ ویکرز می‌رسد که در مقایسه با پاس اول، افزایش ۱۶٪ را تجربه کرده است. همچنین، میانگین سختی در پاس نهایی به حدود ۵۶/۸ ویکرز رسیده است که افزایش ۲٪ را نسبت به پاس دوم بیان می‌کند. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که مقدار سختی در پاس اول به‌صورت چشم‌گیری افزایش یافته است ولی روند افزایش سختی در پاس‌های بعدی کاهش قابل‌ملاحظه‌ای یافته است که ازجمله مهم‌ترین دلایل افزایش سختی می‌توان به پدیده کار سرد و افزایش چگالی نابجایی‌ها اشاره نمود. نتایج مشابهی نیز قبلاً بر روی ورق‌های آلومینیومی خالص مشاهده کرده‌اند [۲۵ و ۲۶].



شکل (۷): نمودار تغییرات سختی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری‌شده با فرایند پرس‌کاری شیارمقید تا پاس چهارم.

۳-۳- مقاومت به خوردگی

آزمون خوردگی مطابق با روش پلاریزاسیون در حالات قبل و بعد از فرایند پرس‌کاری شیارمقید انجام گرفت. بر این اساس، شکل **۸** نمودار منحنی تغییرات ولتاژ نمونه‌ها برحسب زمان را در مدارباز نشان می‌دهد. برحسب نتایج منحنی مدارباز در این مطالعه، مدت زمان رسیدن به حالت تعادل ۲۰ دقیقه به طول انجامیده است که ولتاژ مدارباز برای نمونه اولیه آنیل شده ۷۰۶/۷- میلی‌ولت، برای پاس اول ۷۱۰- میلی‌ولت، برای پاس دوم ۷۱۶- میلی‌ولت و برای پاس چهارم (نهایی) ۷۲۰- میلی‌ولت می‌باشد.



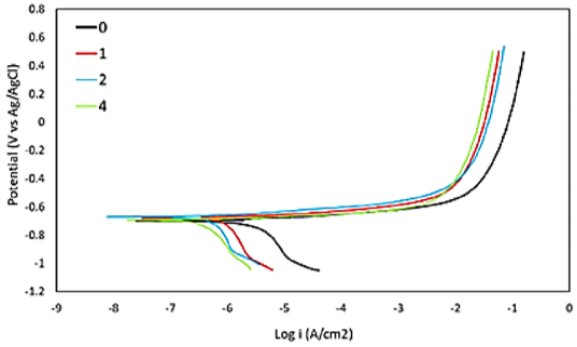
شکل (۸): نمودار منحنی تغییرات ولتاژ نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ برحسب زمان در مدارباز: الف) حالت اولیه آنیل شده؛ ب) پاس اول؛ ج) پاس دوم؛ د) پاس چهارم.

پس از انجام آزمون خوردگی و پس‌ازاینکه مدار نمونه‌های فوق‌الذکر به شرایط پتانسیل تعادل رسید، شیب کاتدی و آندی برای هر نمونه رسم شده و سپس جریان خوردگی محاسبه شد. در این رابطه، جدول **۱** مقادیر محاسبه‌شده را بیان می‌کند.

جدول (۱): مقادیر شیب آندی، شیب کاتدی، ولتاژ و جریان خوردگی در آزمون پلاریزاسیون نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری‌شده با فرایند پرس‌کاری شیارمقید.

شرایط نمونه	شیب آندی	شیب کاتدی	E_c (mV vs Ag/AgCl)	i_c (A/cm²) × 10^{-6}
آنیل شده	۰/۰۱۶۸	-۰/۰۶۶	-۷۲۲	۹/۳۱
تک‌پاسه	۰/۰۲۱۲	-۰/۰۶۵۵	-۶۹۰	۵/۰۹
دو پاسه	۰/۰۲۴۵	-۰/۰۴۸۶	-۶۹۷	۳/۷۹
چهار پاسه	۰/۰۲۰۱	-۰/۰۴۱۳	-۶۸۱	۳/۲۶

همچنین، شکل **۹** نمودار پلاریزاسیون نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری‌شده با فرایند پرس‌کاری شیارمقید را نشان می‌دهد. بر این اساس و با توجه به نتایج جدول (۱)، مشخص است که بهبود شدید خوردگی در پاس‌های اول و دوم رخ داده است و در پاس چهارم روند بهبود خوردگی تقریباً ثابت مانده است. لذا نمونه‌های آلومینیومی دو و چهار پاسه دارای کمترین مقدار دانسیته جریان خوردگی و یا به عبارتی دارای بیشترین میزان مقاومت به خوردگی هستند. باید در نظر داشت که پتانسیل خوردگی تنها امکان وقوع یا عدم وقوع خوردگی را نشان می‌دهد و معیار قضاوت در مورد مقاومت به خوردگی نمونه‌های آلومینیومی، مقدار دانسیته جریان خوردگی است که سینتیک خوردگی را مشخص می‌کند.



شکل (۹): منحنی پلاریزاسیون نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ در حالات قبل (۰) و بعد از فرایند پرس‌کاری شیارمقید یک پاسه (۱)، دو پاسه (۲) و چهار پاسه (۴).

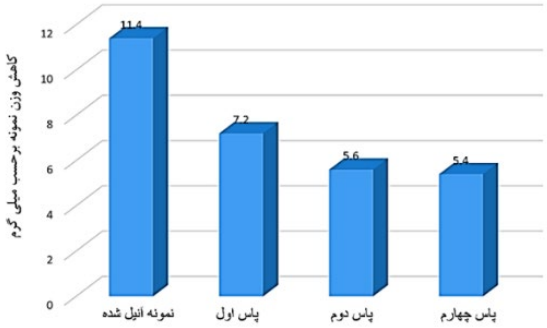
با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص است که اعمال فرایند پرس‌کاری شیارمقید بر روی نمونه‌های ورقه‌ای‌شکل آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ موجب مثبت‌تر شدن نسبی پتانسیل خوردگی شده و دانسیته جریان خوردگی را کاهش می‌دهد (افزایش مقاومت به خوردگی). کاهش دانسیته جریان خوردگی در اثر اعمال تغییرشکل پلاستیک شدید از طریق فرایند پرس‌کاری شیارمقید احتمالاً به دلیل کاهش میزان عیوبات سطحی از قبیل حفرات، ترک‌ها و تخلخل‌های باز می‌باشد که به دلیل کاهش سطحی از نمونه‌ای که در تماس با محیط خوردگی بوده سبب می‌شود که دانسیته جریان خوردگی کاهش یابد. به‌عنوان‌مثال، نمونه دو پاسه نسبت به نمونه تک پاسه دانسیته جریان خوردگی کمتری دارد؛ به عبارتی نسبت به نمونه پاس اول، مقاومت به خوردگی بیشتری از خود نشان می‌دهد. همچنین، نمونه‌های پاس‌های دوم و چهارم جریان خوردگی تقریباً یکسانی داشته است؛ یعنی مقاومت به خوردگی نمونه پاس نهایی نسبت به نمونه دو پاسه تغییر چندانی نداشته است. با توجه به کاهش اندازه دانه نمونه‌ها با اعمال فرایند پرس‌کاری شیارمقید و افزایش تعداد پاس‌ها، پارامتر مذکور رابطه‌ای مستقیم با دانسیته جریان خوردگی دارد. مطالعات قبلی حاکی از آن است که آلومینیوم در محدوده پسیو معمولاً به‌صورت موضعی و در اشکال مختلف حفره نمایان می‌شود که این نوع خوردگی، شایع‌ترین نوع آن در بین آلیاژهای آلومینیوم می‌باشد که بیانگر احتمال خوردگی بالا در مکان‌های پرانرژی مثل مرزدانه‌ها است [۲۷ و ۲۸]. تکنیک‌های مهندسی مرز دانه‌ها مانند پرس‌کاری شیارمقید می‌تواند ساختار دانه را اصلاح کند و میزان مرزهای زاویه کم و مرزهای ویژه (CSL) را در آلیاژهای آلومینیوم افزایش دهد. این امر با کاهش حساسیت به خوردگی بین‌دانه‌ای و افزایش لایه پاسیو مقاوم در برابر خوردگی، مقاومت به خوردگی کلی را بهبود می‌بخشد [۲۹ و ۳۰]. جدول **۲** به‌طور خلاصه مقایسه‌ای از مطالعات انجام‌شده بر روی آلومینیوم فراوری‌شده به روش پرس‌کاری شیارمقید را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، تمایل بالا به خوردگی و شدت واکنش‌های خوردگی موجب تشکیل یک فیلم اکسیدی یا هیدروکسیدی می‌گردد. به عبارتی در نمونه‌های آلومینیومی، فیلم‌های سطحی خیلی سریع تشکیل گردیده که رفتار خوردگی بهتر به‌واسطه ایجاد این فیلم پسیو روی سطح ایجاد می‌گردد. لذا مکانیسم خوردگی می‌تواند شامل مرحله شکست لایه پسیو و در ادامه توسعه حفره و نهایتاً پسیواسیون مجدد حفره باشد؛ یعنی لایه اکسیدشده بعد از تخریب و خوردگی، دوباره ترمیم می‌شود. به عبارتی، بعد از شکست لایه پسیو، مجدداً یک لایه پسیو در اندازه میکرون روی سطح نمونه‌ها ایجاد می‌گردد.

جدول (۲): مقایسه‌ای از مطالعات انجام‌شده بر روی آلومینیوم فراوری‌شده به روش پرس‌کاری شیارمقید.

	اندازه دانه	سختی‌سنجی	جریان خوردگی ($\mu A \cdot cm^{-2}$)
AA6061 (مطالعه حاضر)	فوق‌ریزدانه شدن تا ۲۳/۶ میکرومتر	سخت‌شدن قابل‌ملاحظه از ۳۲/۸ تا ۵۶/۸ ویکرز	۳/۲۶ -۹/۳۱
AA6061 [32]	فوق‌ریزدانه شدن از ۳۷/۴ تا کمتر از یک میکرومتر	سخت‌شدن قابل‌ملاحظه از ۴۲ تا ۵۶ ویکرز	-
AA6082 [31]	فوق‌ریزدانه شدن	-	۱/۴۰ -۰/۸۹
AA6063 [9]	فوق‌ریزدانه شدن تا ۵۰۰ نانومتر	سخت‌شدن قابل‌ملاحظه از ۴۲/۴ تا ۹۸/۲ ویکرز	۰/۱۵ -۰/۴۰

شکل **۱۰** تغییرات وزن نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری‌شده با فرایند پرس‌کاری شیارمقید را در حالات قبل و بعد از آزمون خوردگی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاضل وزن (اختلاف وزن در حالات قبل و بعد از آزمون خوردگی) نمونه تک پاسه نسبت به نمونه اولیه آنیل شده در حدود ۳۷٪ کاهش‌یافته است که نشان‌دهنده بهبود مقاومت به خوردگی آن است. همچنین، نمونه دو پاسه نسبت به نمونه تک پاسه، کاهش تفاضل وزن ۲۲٪ داشته که حاکی از افزایش مقاومت به خوردگی نمونه آلومینیوم آلیاژی در اثر اعمال فرایند پرس‌کاری شیارمقید می‌باشد. لازم به توضیح است که کاهش تفاضل وزن نمونه‌ها پس از پاس دوم تغییرات

چندانی را تجربه نمی‌کند به‌طوری‌که اختلاف تفاضل وزن نمونه‌های دو و چهار پاسه تنها در حدود ۳٪ است بهبود قابل‌توجهی یافته است؛ به عبارتی، مقاومت به خوردگی نمونه‌ها پس از پاس دوم تقریباً ثابت می‌ماند.



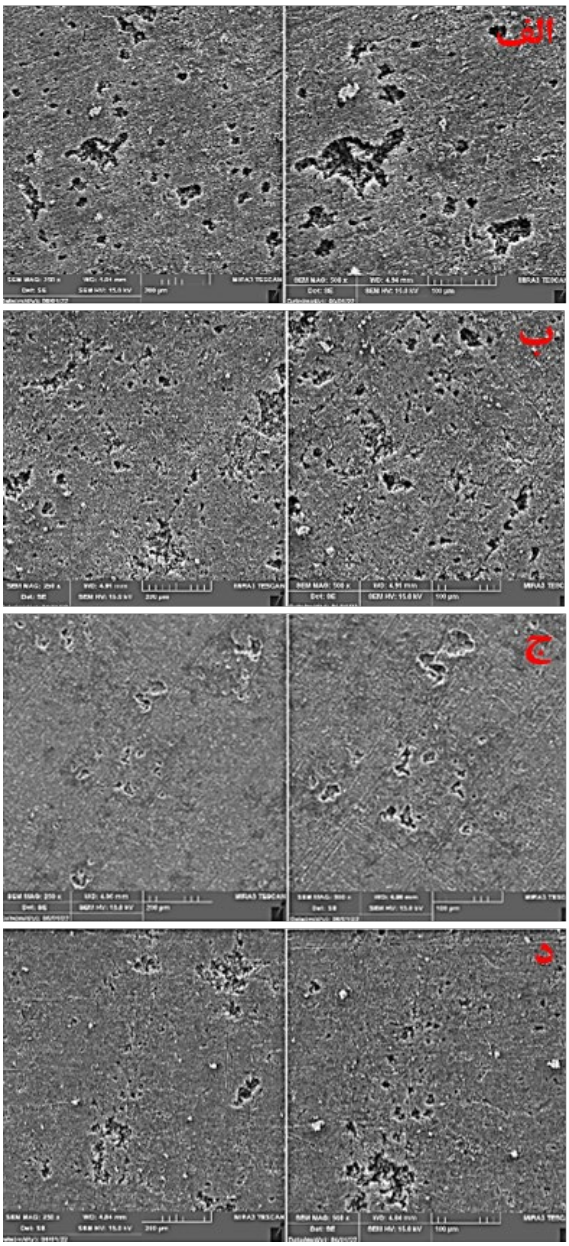
شکل (۱۰): تغییرات تفاضل وزن (قبل و بعد از آزمون خوردگی) نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری‌شده با فرایند پرس‌کاری شیارمقید.

شکل **۱۱** مورفولوژی سطح نمونه‌های آلومینیومی فوق‌الذکر را پس از آزمون خوردگی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تعداد، اندازه و حتی عمق حفره‌ها در نمونه تک پاسه به‌مراتب از نمونه اولیه آنیل شده کمتر است. همچنین، پارامترهای فوق‌الذکر با افزایش تعداد پاس‌ها کاهش یافته و در نمونه دو پاسه از نمونه تک پاسه کمتر می‌باشد. نهایتاً تعداد، اندازه و عمق حفره‌ها در نمونه‌های پاس دوم و چهارم تغییرات چندانی نیافته است که چنین مورفولوژی سطحی به تغییرات ریزساختاری، پالایش دانه‌ها و دانسیته جریان خوردگی بستگی دارد. لذا، اعمال تغییرشکل پلاستیک شدید از طریق فرایند پرس‌کاری شیارمقید بر نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ موجب کاهش اندازه دانه، افزایش سختی و درنهایت بهبود مقاومت به خوردگی می‌گردد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خواص ریزساختاری، مکانیکی و خوردگی ورق‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری‌شده با فرایند پرس‌کاری شیارمقید موردبررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج این مطالعه به شرح زیر است:

- اعمال فرایند پرس‌کاری شیارمقید و افزایش تعداد پاس منجر به کاهش اندازه دانه نمونه‌های آلومینیومی گردید. در این زمینه، پالایش دانه در اولین پاس فرایند (حدود ۴۴٪) بسیار چشم‌گیر بوده ولی شیب این روند در پاس‌های بعدی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که اندازه دانه متوسط نمونه در پاس‌های دوم و چهارم به ترتیب ۱۷/۲ و ۱۵/۷ میکرومتر می‌باشد که اختلاف محدود ۹٪ داشت.
- نتایج آزمون سختی‌سنجی نشان داد که سختی نمونه آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ از مقدار میانگین ۳۲/۸ ویکرز در نمونه اولیه آنیل شده به مقدار میانگین ۴۸/۲، ۵۵/۷ و ۵۶/۸ ویکرز به ترتیب در پاس‌های اول، دوم و چهارم می‌رسد که به عبارتی افزایش ۴۷٪ در پاس اول، ۱۶٪ در پاس دوم و ۲٪ در پاس چهارم را نسبت به نمونه اولیه آنیل شده نشان می‌دهد. لذا مقدار سختی ابتدا به شکل چشم‌گیری افزایش یافته و سپس، در پاس‌های بعدی، روند این افزایش کند می‌گردد.
- نتایج آزمون پلاریزاسیون نشان داد که دانسیته جریان خوردگی نمونه‌های آلومینیومی در اثر اعمال فرایند پرس‌کاری شیارمقید به ترتیب کاهش ۴۵٪، ۵۹٪ و ۶۵٪ را در نمونه‌های پاس اول، دوم و چهارم نسبت به نمونه اولیه نشان می‌دهد. لذا کاهش دانسیته جریان خوردگی در اثر اعمال تغییرشکل پلاستیک شدید از طریق فرایند پرس‌کاری شیارمقید به دلیل کاهش میزان عیوبات سطحی از قبیل حفرات، ترک‌ها و تخلخل‌های باز می‌باشد که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی به‌دست‌آمده از سطح خوردگی نمونه‌ها نشان داده شد.
- کاهش وزن نمونه‌ها (اختلاف وزن در حالات قبل و بعد از آزمون خوردگی) با اعمال فرایند پرس‌کاری شیارمقید و افزایش تعداد پاس‌ها روند کاهشی داشته که در ارتباط معکوس با مقاومت به خوردگی آن‌ها است؛ به‌طوری‌که افزایش مقاومت به خوردگی در پاس اول فرایند چشم‌گیرتر از پاس‌های دوم و چهارم می‌باشد.



شکل (۱۱): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح خوردگی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ فراوری‌شده با فرایند پرس‌کاری شیارمقید: (الف) نمونه اولیه آنیل شده، (ب) نمونه تک پاسه، (ج) نمونه دو پاسه و (د) نمونه چهار پاسه.

۵- مراجع

[1] Shin DH, Park JJ, Kim YS, Park KT. Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. Materials Science and Engineering: A. 2002;328(1-2):98-103. **DOI:** https://doi.org/10.1016/s0921-5093(01)01665-3.

[2] 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.

[3] Jandaghi MR, Pouraliakbar H. Study on the effect of post-annealing on the microstructural evolutions and mechanical properties of rolled CGPed aluminum-manganese-silicon alloy. Materials Science and Engineering: A. 2017;679:493-503. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.054.

[4] Pouraliakbar H, Firooz S, Jandaghi MR, Khalaj G, Amirafshar A. Combined effect of heat treatment and rolling on pre-strained and SPDed aluminum sheet. Materials Science and Engineering: A. 2014;612:371-9. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.054.

[5] Wang Z, Guan Y, Li L, Zhu L. The fracture behavior and thermal stability of commercially pure nickel sheets processed by constrained groove pressing. Metals. 2019;9(10):1047. **DOI:** https://doi.org/10.3390/met9101047.

[6] Thuy PT, Hue DT, Ngung DM, Quang P. A study on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy after constrained groove pressing. InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019 (Vol. 611, No. 1, p. 012005). IOP Publishing. **DOI:** https://doi.org/10.1088/1757-899x/611/1/012005.

[7] Shirdel A, Khajeh A, Moshksar MM. Experimental and finite element investigation of semi-constrained groove pressing process. Materials & Design. 2010;31(2):946-50. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.035.

[8] Fereshteh-Saniee F, Ghorbanhosseini S, Sonboli A. Inclusive anisotropy and texture analyses of AZ91 Mg sheets subjected to various passes of elevated-temperature constrained groove pressing. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2023;237(7):1638-50. **DOI:** https://doi.org/10.2139/ssrn.4160321.

[9] Fan RJ, Attarilar S, Shamsborhan M, Ebrahimi M, Ceren Gö, Özkavak HV. Enhancing mechanical

https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.01.043.

[17] Wojtas D, Wierzbanowski K, Chulist R, Pachla W, Bieda-Niemiec M, Jarzębska A, Maj Ł, Kawałko J, Marciszko-Wiąckowska M, Wroński M, Sztwiertnia K. Microstructure-strength relationship of ultrafine-grained titanium manufactured by unconventional severe plastic deformation process. Journal of Alloys and Compounds. 2020;837:155576. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155576.

[18] Kaibyshev R, Malopheyev S. Mechanisms of dynamic recrystallization in aluminum alloys. InMaterials Science Forum 2014 (Vol. 794, pp. 784-789). Trans Tech Publications Ltd. **DOI:** https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.794-796.784.

[19] Ralston KD, Birbilis N. Effect of grain size on corrosion: a review. Corrosion. 2010;66(7):075005-. **DOI:** https://doi.org/10.5006/1.3462912.

[20] Wu J, Djavanroodi F, Shamsborhan M, Attarilar S, Ebrahimi M. Improving mechanical and corrosion behavior of 5052 aluminum alloy processed by cyclic extrusion compression. Metals. 2022;12(8):1288. **DOI:** https://doi.org/10.3390/met12081288.

[21] Ebrahimi M, Wang Q, Attarilar S. 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.

[22] Ebrahimi M, Gholipour H, Djavanroodi F. A study on the capability of equal channel forward extrusion process. Materials Science and Engineering: A. 2016;650:1-7. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.014.

[23] Ebrahimi M, Djavanroodi F, Nazari Tiji SA, Gholipour H, Gode C. Experimental investigation of the equal channel forward extrusion process. Metals. 2015;5(1):471-83. **DOI:** https://doi.org/10.3390/met5010471.

[24] Ebrahimi M, Shaeri MH, Naseri R, Gode C. Equal channel angular extrusion for tube configuration of Al-Zn-Mg-Cu alloy. Materials Science and Engineering: A. 2018;731:569-76. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.06.080.

properties and corrosion performance of AA6063 aluminum alloys through constrained groove pressing technique. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2020;30(7):1790-802. **DOI:** https://doi.org/10.1016/s1003-6326(20)65339-0.

[10] Peng LI, Tingting TA, Zhuoshuai ZH, Wenxian WA, Chengzhong CH. Refinement strengthening of AZ31 magnesium alloy by warm constrained groove pressing. Materials Science. 2017;23(1):84-8. **DOI:** https://doi.org/10.5755/j01.ms.23.1.14392.

[11] Khodabakhshi F, Kazeminezhad M. The effect of constrained groove pressing on grain size, dislocation density and electrical resistivity of low carbon steel. Materials & Design. 2011;32(6):3280-6. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.032.

[12] Shin DH, Park JJ, Kim YS, Park KT. Constrained groove pressing and its application to grain refinement of aluminum. Materials Science and Engineering: A. 2002;328(1-2):98-103. **DOI:** https://doi.org/10.1016/s0921-5093(01)01665-3.

[13] Lee JW, Park JJ. Numerical and experimental investigations of constrained groove pressing and rolling for grain refinement. Journal of Materials Processing Technology. 2002;130:208-13. **DOI:** https://doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00722-7.

[14] Pouraliakbar H, Jandaghi MR, Khalaj G. Constrained groove pressing and subsequent annealing of Al-Mn-Si alloy: microstructure evolutions, crystallographic transformations, mechanical properties, electrical conductivity and corrosion resistance. Materials & Design. 2017;124:34-46. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.053.

[15] Soon Fong K, Jen Tan M, Lan Ng F, Danno A, Wah Chua B. Microstructure stability of a fine-grained AZ31 magnesium alloy processed by constrained groove pressing during isothermal annealing. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2017;139(8):081007. **DOI:** https://doi.org/10.1115/1.4036529.

[16] Peng K, Su L, Shaw LL, Qian KW. Grain refinement and crack prevention in constrained groove pressing of two-phase Cu–Zn alloys. Scripta Materialia. 2007;56(11):987-90. **DOI:**

[25] Braga DP, Magalhães DC, Kliauga AM, Della Rovere CA, Sordi VL. Microstructure, mechanical behavior and stress corrosion cracking susceptibility in ultrafine-grained Al-Cu alloy. Materials Science and Engineering: A. 2020;773:138865. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138865.

[26] Ebrahimi M, Attarilar S, Gode C, Djavanroodi F. Damage prediction of 7025 aluminum alloy during equal-channel angular pressing. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 2014;21:990-8. **DOI:** https://doi.org/10.1007/s12613-014-1000-z.

[27] Ebrahimi M, Attarilar S, Djavanroodi F, Gode C, Kim HS. Wear properties of brass samples subjected to constrained groove pressing process. Materials & Design. 2014;63:531-7. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.043.

[28] Peng K, Zhang Y, Shaw LL, Qian KW. Microstructure dependence of a Cu–38Zn alloy on processing conditions of constrained groove pressing. Acta Materialia. 2009;57(18):5543-53. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.07.049.

[29] Yan J, Heckman NM, Velasco L, Hodge AM. Improve sensitization and corrosion resistance of an Al-Mg alloy by optimization of grain boundaries. Scientific reports. 2016;6(1):26870. **DOI:** https://doi.org/10.1038/srep26870.

[30] Zhao Y, Niverty S, Ma X, Chawla N. Correlation between corrosion behavior and grain boundary characteristics of a 6061 Al alloy by lab-scale X-ray diffraction contrast tomography (DCT). Materials Characterization. 2022;193:112325. **DOI:** https://doi.org/10.2139/ssrn.3985219.

[31] Hockauf M, Meyer LW, Nickel D, Alisch G, Lampke T, Wielage B, Krüger L. Mechanical properties and corrosion behaviour of ultrafine-grained AA6082 produced by equal-channel angular pressing. Journal of Materials Science. 2008;43:7409-17. **DOI:** https://doi.org/10.1007/s10853-008-2724-9.

[32] Jia J, Yang Z, Xu B, Xie W, Xu Y, Luo J, Wang Q. Microstructure evolution, mechanical properties, and strengthening mechanisms of 6061 aluminum alloy processed via corrugated constrained groove pressing. Materials Science and Engineering: A. 2023;878:145218. **DOI:** https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145218.

[33] Farajollahi M, Ebrahimi M, Ajori S. Improving Wear Behavior of 304L Stainless Steel under Constrained Groove Pressing. Journal of Aerospace Mechanics, 2024;20 (2):17-28. **DOR:** https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455323.1403.20.2.2.6.