



مطالعه رفتار خوردگی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ فراوری شده با عملیات سایش مکانیکی سطح

محمود ابراهیمی*، رضا برجیس

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: ebrahimi@maragheh.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۳ خرداد ۱۴۰۴
پذیرش: ۲۸ شهریور ۱۴۰۴

کلیدواژگان:

ساجمه‌زنی شدید
مواد فوق‌ریزدانه
آزمون سختی‌سنجی
مقاومت به خوردگی

چکیده

اندازه دانه به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی ساختاری، نقش مهمی در تعیین رفتار مکانیکی و فیزیکی مواد فلزی ایفا می‌کند. عملیات ساجمه زنی با اعمال تنش‌های فشاری شدید به سطح ماده، اندازه‌دانه‌ها را به‌طور قابل ملاحظه‌ای در لایه سطحی کاهش می‌دهد؛ لذا، در این پژوهش، تأثیر عملیات سایش مکانیکی سطح بر رفتار مکانیکی و خوردگی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ با تغییر مدت‌زمان ساجمه‌زنی و اندازه ساجمه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که این فرایند، بدون توجه به پارامترهای اعمالی علاوه بر ریزدانه سازی از حدود ۱۵ میکرومتر به کمتر از ۳ میکرومتر، سختی نمونه‌ها را به طور قابل‌ملاحظه‌ای تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد. افزایش مدت‌زمان ساجمه‌زنی و کاهش قطر ساجمه منجر به افزایش بیشتر سختی شد، به‌طوری‌که نمونه با ساجمه ۳ میلی‌متری و زمان ۱۰ دقیقه (نمونه ۳-۱۰) بیشترین سختی (۷۲ ویکرز، معادل ۵۰ درصد افزایش) را نشان داد. همچنین، عملیات ساجمه‌زنی موجب کاهش نرخ خوردگی پلاریزاسیون نمونه‌ها نسبت به حالت خام اولیه شد و نمونه ۳-۱۰ کمترین نرخ خوردگی را داشت. نتایج آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نیز با آزمون پلاریزاسیون تطابق داشته و افزایش مقاومت امپدانس و افزایش مقاومت به خوردگی در نمونه‌های فراوری‌شده را تایید کرد. همچنین، ریزدانه‌شدن ساختار سطح و افزایش مساحت مرزدانه‌ها، علی‌رغم افزایش زبری، مقاومت به خوردگی را افزایش می‌دهد. عملیات سایش مکانیکی سطح باعث تشکیل لایه سخت‌شده‌ای شد که ضخامت آن با افزایش مدت‌زمان ساجمه‌زنی و کاهش قطر ساجمه بیشتر گردید و توزیع یکنواخت فازهای بین‌فلزی و ریزدانه شدن ساختار، خوردگی را از حالت موضعی به یکنواخت تغییر داد. این تغییرات در الگوهای پراش اشعه ایکس با کاهش شدت و افزایش پهنای پیک‌ها مشاهده شد.

Corrosion behavior investigation of 7075 aluminum alloy processed by surface mechanical attrition treatment

Mahmoud Ebrahimi*, Reza Berjis

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran
* Corresponding Author's Email: ebrahimi@maragheh.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 24 May 2025
Accepted: 19 September 2025

Keywords:

Severe Shot Peening
Ultrafine-Grained Materials
Hardness Test
Corrosion Resistance

Abstract

Grain size, as a key structural parameter, plays a significant role in determining the mechanical and physical behavior of materials. In this regard, this research dealt with the effect of surface mechanical attrition treatment on the mechanical and corrosion behavior of 7075 aluminum alloy, which was investigated by varying the shot peening duration and shot size. The results showed that this process, in addition to refining the grain size from about 15 μm to less than 3 μm , significantly increased the hardness of the samples by up to 50%. Increasing the shot peening duration and decreasing the shot size led to further improvements in hardness, with the sample treated with 3 mm shots for 10 minutes (sample 3-10) exhibiting the highest hardness (72 Vickers). Moreover, surface mechanical attrition treatment reduced the corrosion rate of the samples compared to the as-received condition, with sample 3-10 showing the lowest corrosion rate. Electrochemical impedance spectroscopy results were consistent with polarization tests, confirming the enhancement of impedance and corrosion resistance in the processed samples. The Warburg parameter was identified as an indicator for evaluating the quality of the protective layer and ion diffusion. Additionally, grain refinement and increased grain boundary area, despite increased surface roughness, contributed to improved corrosion resistance. Also, the surface mechanical attrition treatment formed a harder outer layer that became thicker with longer peening durations and smaller shot sizes. Uniform distribution of intermetallic phases and grain refinement transformed the corrosion mode from localized to uniform. These changes were evident in X-ray diffraction patterns as decreased peak intensity and increased peak broadening.

Please cite this article using:

Ebrahimi M, Berjis R. Corrosion behavior investigation of 7075 aluminum alloy processed by surface mechanical attrition treatment. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Sep 23;12(7):1-17. doi: 10.22034/ijme.2025.531053.2097 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

در علم مواد، اندازه دانه به عنوان یکی از تاثیرگذارترین پارامترهای مورد بررسی جهت بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی می باشد. از این رو پژوهشگران این حوزه کوشش کرده اند با استفاده از روش های مختلف سعی بر ریزکردن دانه بندی فلزات و آلیاژها کنند. در این زمینه، تاثیرات ریزکردن دانه ها بر روی فلزات و آلیاژها را می توان با استفاده از رابطه هال-پچ^۱ (رابطه ۱) بیان نمود که در آن، σ_0 و k و d به ترتیب مربوط به استحکام تسلیم اولیه، ثابت تسلیم و قطر متوسط دانه ها می باشد. این رابطه نشان دهنده افزایش استحکام تسلیم با کاهش اندازه دانه در مواد مختلف می باشد که موجب بهبود چشم گیر خواص فلزات و آلیاژها می شود [۱-۳]. توجه به این نکته ضروری است که هرچند دانه های ریز استحکام را افزایش می دهند، اما معمولاً شکل پذیری و قابلیت تغییر شکل پلاستیک کاهش می یابد، چرا که دانه های کوچک تر کمتر توانایی جذب تغییر شکل های بزرگ را دارند. از طرف دیگر، دانه های ریز مقاومت به خستگی و چقرمگی را مطابق رابطه هال-پچ بهبود می بخشد و دمای انتقال شکنندگی را کاهش می دهند که ان امر باعث افزایش دوام مواد در شرایط بارگذاری متناوب می شود [۴، ۵]. لازم به ذکر است که اندازه و شکل دانه ها در ریزساختار فلزات و آلیاژها، علاوه بر خواص مکانیکی، بر ویژگی های فیزیکی مواد مانند هدایت حرارتی، مقاومت به خوردگی و رفتار در عملیات های حرارتی نیز تأثیر می گذارد [۶، ۷].

$$\sigma = \sigma_0 + k/\sqrt{d} \quad (1)$$

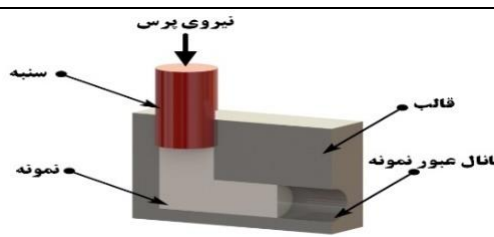
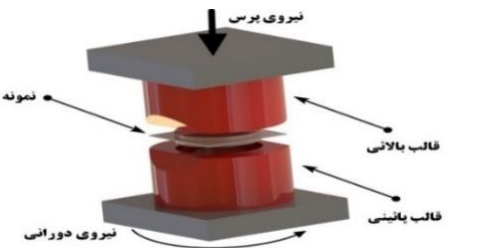
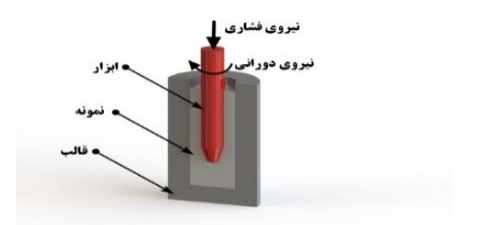

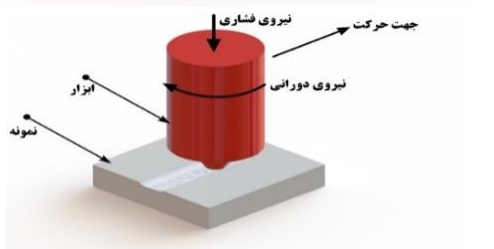
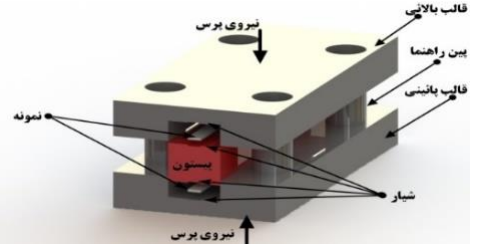
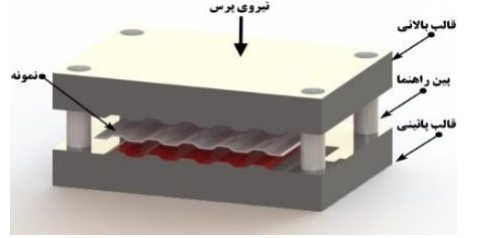
فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید^۲ به مجموعه ای از روش های شکل دهی مکانیکی اطلاق می شود که در آن ها کرنش های پلاستیکی بسیار بالایی به ماده اعمال می شود، بدون آنکه تغییر محسوسی در ابعاد کلی قطعه ایجاد شود. هدف اصلی این فرایندها، تولید مواد حجیم با ساختار دانه ای فوق ریزدانه یا نانو ساختار است که خواص مکانیکی و فیزیکی ماده را به طور چشم گیری بهبود می بخشد [۸-۱۰]. این مواد به دلیل خواص مکانیکی و فیزیکی برتر، کاربردهای گسترده ای در حوزه های علمی و صنعتی دارند که از مهم ترین آن ها می توان به صنعت هوافضا (تولید قطعات سبک وزن با استحکام بالا مثل اتصالات و پوسته موتورها، افزایش مقاومت به خستگی در قطعات تحت بارگذاری چرخه ای و ...)، صنعت خودروسازی (ساخت قطعات موتور و شاسی با استحکام بالا و کاهش وزن، بهبود مقاومت به سایش در سیستم های ترمز، انتقال نیرو و ...)، پزشکی و ایمپلنت ها (تولید ایمپلنت های استخوانی مثل مفاصل ران با زیست سازگاری بهتر و استحکام بالا، کاهش خطر خوردگی در ایمپلنت ها به دلیل ریزساختار یکنواخت و ...)، ابزارهای صنعتی و برش (ساخت مته های حفاری، تیغه های برش و ابزارهای سایشی با طول عمر بالا، پوشش های نانو ساختار مقاوم به خوردگی برای تجهیزات نفت و گاز و ...) و سازه های مهندسی (استفاده در پل ها و ساختمان ها برای بهبود مقاومت به خستگی مانند فولاد نانو ساختار با نانوذرات مس، افزایش ایمنی سازه های تحت بار دینامیک و ...) اشاره کرد [۱۱-۱۳]. در این خصوص، تاکنون روش های مختلفی از فرایند تغییر شکل پلاستیک شدید معرفی گردیده که از مهم ترین آن ها می توان به فرایند پرس با کانال های هم مقطع زاویه دار (ایکپ) [۱۴]، پیچش فشار بالا [۱۵]، پرسکاری شیار مقید [۱۶] و ساچمه زنی شدید [۱۷] می باشد. در این زمینه، جدول ۱ تعدادی از روش های تغییر شکل پلاستیکی شدید به همراه شکل شماتیک و مقدار کرنش پلاستیکی اعمالی در هر پاس آورده شده است.

مطالعات پیشین اثبات کرده است که فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید به ویژه روش های ترکیبی و تکنیک های مبتنی بر پودر توانایی بهبود چشمگیر خواص مکانیکی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ را دارند. با این حال، کنترل پارامترهای فرایند نظیر دما، نرخ کرنش و فشار برای دستیابی به ریزساختار یکنواخت و اجتناب از ناهمگنی ضروری است [۲۳-۲۵]. این بهبودها زمینه ساز کاربردهای پیشرفته در صنایع مختلف یاد شده در بالا است. در جدول ۲ مروری بر تاثیرات فرایندهای مختلف تغییر شکل پلاستیک شدید بر روی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ شده است. با بررسی جدول ۲ می توان به این نتیجه رسید که اعمال این فرایندها سبب افزایش استحکام تسلیم، استحکام نهائی و سختی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ از یک سو و کاهش درصد ازدیاد طول از سوی دیگر شده است. در واقع، تشکیل دانه های فوق ریز باعث افزایش تعداد مرزهای دانه می شود. لذا، مرزهای دانه به عنوان موانعی برای حرکت نابجایی ها عمل می کنند که این امر منجر به افزایش استحکام و سختی ماده می شود. اگرچه در پاس های اولیه ممکن است چقرمگی کاهش یابد، اما با افزایش تعداد پاس ها و اصلاح ساختار دانه ها، چقرمگی استاتیکی می تواند بهبود یابد که این موضوع به دلیل تغییر در جهت گیری مرزهای دانه و کاهش تمرکز تنش در نواحی بحرانی است [۲۶-۲۸].

¹ Hall - Petch Relationship

² Severe Plastic Deformation

جدول ۱ معرفی تعدادی از فرایندهای تغییر شکل پلاستیکی شدید

| عنوان فرایند | مقدار کرنش اعمالی در هر پاس | شماتیک فرایند |
|---|---|---|
| پرس در کانال‌های هم‌مقطع زاویه‌دار [۱۸] | $\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} (2 \cot \left(\frac{\phi + \psi}{2} \right) + \psi)$ |  |
| پیچش فشار بالا [۱۹] | $\varepsilon = \frac{2\pi nr}{h\sqrt{3}}$ |  |
| اکستروژن معکوس اصطکاکی اغتشاشی [۲۰] | $\varepsilon = \frac{2\pi nr}{h\sqrt{3}}$ |  |
| اتصال نورد تجمعی [۳] | $\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{h_n}{h_{n-1}} \right)$ |  |
| فرایند اصطکاکی-اغتشاشی [۲۱] | $\varepsilon = \frac{2\pi nr}{\sqrt{3}h}$ |  |
| فرایند کشویی فشار بالا [۲۲] | $\varepsilon = \frac{x}{\sqrt{3}h}$ |  |
| پرس کاری شیار مقید [۱۶] | $\varepsilon = \frac{4}{3} \ln \left(\frac{r+t}{r+0.5t} \right)$ |  |

جدول ۲ مروری بر یافته‌های کلیدی در مورد خواص مکانیکی و ریزساختاری آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ بعد از اعمال فرایندهای مختلف تغییرشکل پلاستیکی

شدید بر اساس مطالعات تجربی

| فرایند و تعداد پاس اعمالی | جنس نمونه | استحکام تسلیم (مگاپاسکال) | استحکام نهائی (مگاپاسکال) | ازدیاد طول (%) | اندازه‌دانه (میکرومتر) | سختی سنجی (ویکرز) |
|--|-----------|---------------------------|---------------------------|----------------|------------------------|-------------------|
| ایکپ (قبل و بعد از ۴ پاس) [۲۹] | 7075-0 | ۱۱۸ و ۳۹۰ | ۲۲۸ و ۴۳۴ | ۱۲/۴ و ۵/۶ | ۴۰ و ۰/۵ | ۶۲ و ۱۴۰ |
| اکستروژن در کانال‌های پیچشی با مقطع بیضی (قبل و بعد از ۳ پاس) [۳۰] | 7075-T6 | ۴۲۰ و ۵۲۰ | ۴۵۶ و ۶۰۱ | ۱۲ و ۶/۱ | ۴۹ و ۴ | ۱۵۸ و ۲۰۸ |
| فورج چند جهته (قبل و بعد از ۳ پاس) [۳۱] | 7075-T6 | ۲۵۰ و ۴۲۰ | ۲۹۰ و ۴۸۰ | ۱۵ و ۲۵ | ۴۹ و ۳/۷ | ۸۲ و ۱۵۵ |

فرایند تغییرشکل پلاستیک شدید سطحی^۱ به مجموعه‌ای از روش‌های مهندسی سطح اشاره دارد که طی آن‌ها تنها لایه‌های سطحی ماده (معمولاً در محدوده چند میکرومتر تا چند صد میکرومتر ضخامت) تحت کرنش پلاستیک بسیار بالا قرار می‌گیرند، درحالی‌که ساختار و خواص حجم داخلی ماده تقریباً دست‌نخورده باقی می‌ماند. این فرایندها با هدف ایجاد ریزساختار فوق‌ریزدانه و حتی نانوساختار در سطح ماده انجام می‌شوند و منجر به بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، تریبولوژیکی و عملکردی سطح می‌گردند [۳۲-۳۴]. در این روش‌ها، اعمال کرنش شدید در سطح ماده باعث افزایش چگالی نابجایی‌ها، شکست دانه‌های درشت و تشکیل دانه‌های ریز و هم‌اندازه^۲ در لایه سطحی می‌شود. این تغییرات ساختاری موجب افزایش استحکام، سختی، مقاومت به سایش، خستگی و خوردگی سطح می‌شود [۷-۳۵]. از جمله روش‌های متداول تغییر شکل پلاستیک شدید سطحی می‌توان به مواردی اشاره کرد که در جدول ۳ آورده شده است.

در این روش‌ها، سطح ماده تحت ضربات مکرر، فشار یا اصطکاک شدید قرار می‌گیرد. این اعمال منجر به ایجاد چگالی بسیار بالایی از نابجایی‌ها و عیوب کریستالی در سطح می‌شود. در نتیجه، کرنش‌های اعمالی شدید باعث شکسته شدن دانه‌های درشت اولیه و تقسیم آن‌ها به دانه‌های بسیار ریز و گاهی در حد نانومتر می‌گردد. این دانه‌های فوق‌ریز و نانومتری، ساختار سطح را به شدت اصلاح می‌کنند. در نهایت، افزایش چگالی نابجایی‌ها و اعمال کرنش مداوم، منجر به بازآرایی نابجایی‌ها و تشکیل مرزهای دانه جدید می‌شود. در نتیجه، سطح ماده به یک ساختار نانومقیاس با دانه‌های هم‌اندازه و توزیع یکنواخت تبدیل می‌شود [۳۴، ۴۱، ۴۲].

به‌طور کلی، این اثرات ناشی از آن است که تنش‌های فشاری سطحی، برای گسترش ترک نیاز به غلبه تنش کششی خارجی دارند و در نتیجه، ماده در برابر شکست و خوردگی مقاوم‌تر می‌شود. مطالعات پیشین نشان داده است که تفاوت بین تنش‌های پسماند مطلوب و نامطلوب در ساختار مواد به نوع و جهت تنش باقی‌مانده در ماده پس از برداشتن بار اعمالی و تأثیر آن بر خواص و عملکرد ماده بستگی دارد. اثبات شده است که تنش‌های پسماند مطلوب (به‌ویژه فشاری) معمولاً در سطح ایجاد شده و باعث بهبود خواص مکانیکی و عملکردی ماده می‌شوند، درحالی‌که تنش‌های پسماند نامطلوب (به‌ویژه کششی) در نواحی بحرانی باعث کاهش مقاومت به خستگی، شکست و خوردگی شده و باید تا حد امکان از ایجاد آن‌ها جلوگیری کرد [۴۶، ۴۷]. با توجه به اهمیت بالای مقاومت به خوردگی در عملکرد بلندمدت مواد مهندسی و محدودیت‌های مطالعات پیشین، این پژوهش با تمرکز ویژه بر تأثیر روش‌های تغییرشکل پلاستیک شدید سطحی بر روی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ انجام شده است، که این موضوع تاکنون به‌طور جامع و سیستماتیک کمتر مورد بررسی قرار گرفته است [۴۱، ۴۸، ۴۹].

نوآوری اصلی این پژوهش در کاربرد فرایند سایش مکانیکی سطح با پارامترهای کنترل شده شامل زمان ساچمه‌زنی و اندازه ساچمه و بررسی دقیق تأثیر آن‌ها بر مقاومت به خوردگی می‌باشد. علاوه بر این، ترکیب داده‌های تجربی شامل آزمون‌های الکتروشیمیایی (امپدانس و پلاریزاسیون) و تحلیل ساختاری غیرمستقیم از طریق الگوهای پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی، به فهم عمیق‌تری از مکانیسم‌های بهبود مقاومت به خوردگی ناشی از ریزدانه شدن و تنش‌های پسماند کمک می‌کند. این رویکرد جامع، گامی نو در درک ارتباط میان تغییرات ریزساختاری سطح و عملکرد خوردگی آلیاژهای آلومینیوم برداشته و می‌تواند راهگشای توسعه فرایندهای متناسب جهت افزایش دوام و کارایی این مواد در کاربردهای حساس به خوردگی باشد.

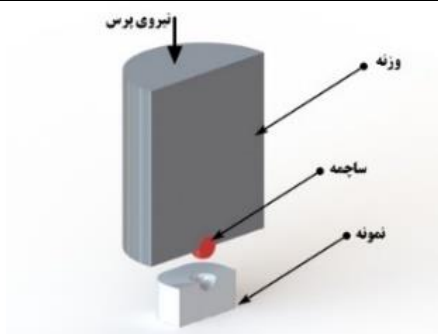
¹ Surface Severe Plastic Deformation

² Equiaxed

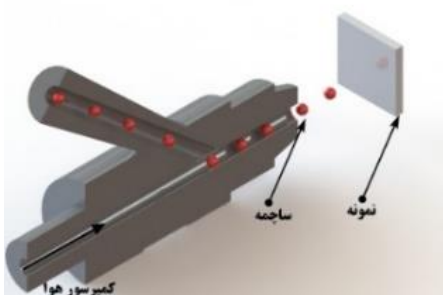
جدول ۳ مروری بر فرایندهای متداول تغییر شکل پلاستیک شدید سطحی

شکل شماتیکی فرایند

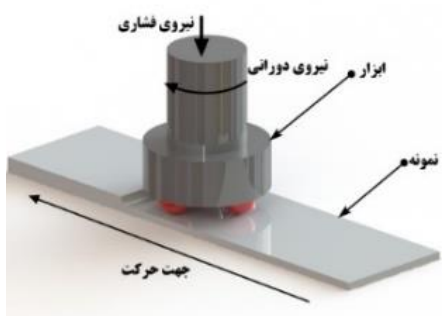
عنوان فرایند



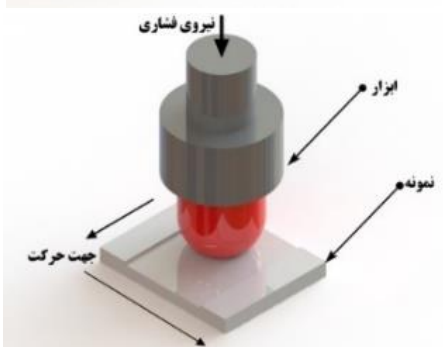
فرایند انداختن ساجمه [۳۶]



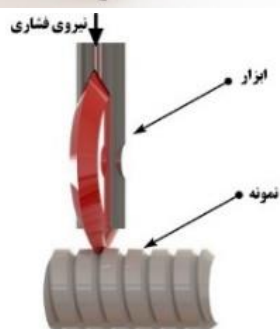
فرایند ساجمه‌زنی با هوا [۳۷]



نورد چرخشی چند محوره [۳۸]



فرایند کشوئی سایشی - اصطکاکی [۳۹]

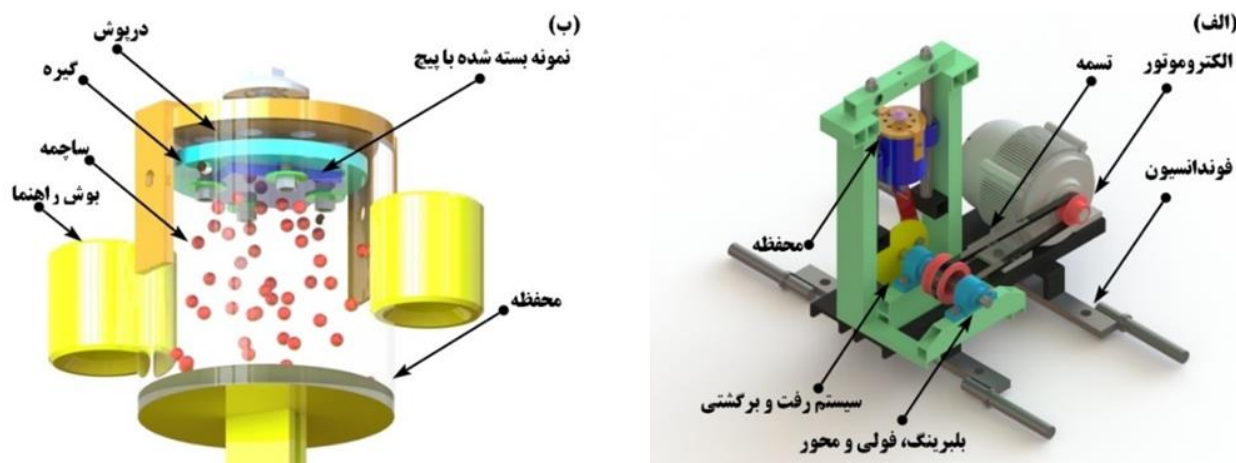


نورد ریشه پیچ التراسونیک [۴۰]

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح

فرایند انجام گرفته در این پژوهش، عملیات سایش مکانیکی سطح^۱ نام دارد که شماتیک آن در شکل ۱-الف نشان داده شده است. این روش بر پایه فرایند ساچمه‌زنی ابداع و توسعه یافته است. مطابق شکل ۱-ب، نمونه‌های مورد آزمایش در قسمت فوقانی قرار گرفته و ساچمه‌هایی از جنس فولاد در قسمت تحتانی در درون محفظه قرار می‌گیرند. محفظه از طریق مکانیزم رفت و برگشتی که نیروی آن توسط الکتروموتور تعبیه شده تامین گردیده، شروع به حرکت می‌کند. ساچمه‌ها از قسمت تحتانی شروع به حرکت کرده و با ضربات متوالی بر روی سطح نمونه سبب تشکیل یک لایه سطحی ریزدانه می‌شوند. در این فرایند برخلاف روش ساچمه‌زنی که از ساچمه‌های متنوع و زیر ۱ میلی‌متر استفاده می‌گردد، فقط از یک نوع ساچمه و در اندازه‌های بین ۲ تا ۱۰ میلی‌متر استفاده می‌گردد. انتخاب ساچمه‌های بزرگ‌تر باعث افزایش انرژی برخورد ساچمه با سطح نمونه می‌شود زیرا انرژی برخورد وابسته به جرم و سرعت ساچمه است و ساچمه‌های بزرگ‌تر جرم بیشتری دارند. اثر این انتخاب ساچمه‌های بزرگ‌تر بر انرژی ضربه این است که انرژی بالاتر برخورد باعث کرنش پلاستیک شدیدتر در سطح نمونه می‌شود که در نهایت منجر به ریزدانه شدن ساختار سطح و افزایش ضخامت لایه سخت شده می‌گردد. همچنین عمق تغییرشکل پلاستیک نیز با افزایش انرژی برخورد ساچمه‌ها که با افزایش اندازه ساچمه و طول مدت عملیات افزایش می‌یابد، بیشتر خواهد بود. بنابراین استفاده از ساچمه‌های بزرگ‌تر ضمن ایجاد انرژی و کرنش بیشتر، امکان کنترل بهتر عمق و ضخامت لایه اصلاح شده سطحی را فراهم می‌کند که از مزایای مهم این روش در مطالعه حاضر به شمار می‌رود. در عملیات سایش مکانیکی سطح، برخورد پی در پی ساچمه‌ها به نمونه منجر به اعمال کرنش‌های پلاستیکی بالا به سطح نمونه‌ها و تغییرشکل پلاستیکی شدید می‌گردد و در نهایت منجر به اصلاح و فراوری ریزساختار نمونه می‌شود. این اصلاح و فراوری دانه می‌تواند تا مقیاس نانو نیز ادامه داشته باشد. مشخص شده است که فرایند مذکور بر روی بیشتر فلزات و آلیاژها از جمله مس، آلومینیوم، آهن، نیکل، منیزیم و تیتانیوم مناسب می‌باشد. لایه سخت شده از سطح نمونه به سمت عمق امتداد پیدا کرده که لایه بالایی ساختار فوق ریزدانه (و حتی نانوساختار) داشته و با نفوذ به عمق به حالت درشت دانه تبدیل می‌گردد.



شکل ۱ الف) عملیات سایش مکانیکی سطح، ب) نحوه انجام فرایند مذکور و قرارگیری نمونه‌ها در محفظه آن

۲-۲- انتخاب ماده و نحوه اعمال عملیات سایش مکانیکی سطح

با توجه به کاربردهای وسیع آلومینیوم و آلیاژهای آن در صنایع مختلف به دلیل استحکام نسبتاً بالا و مقاومت به خوردگی متوسط، در این پژوهش از ورق‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ با ضخامت ۵ میلی‌متر استفاده شده است که آنالیز شیمیایی آن در جدول ۴ آورده شده است. ورق در حالت تجاری معمول T651 تهیه شده است که رایج‌ترین و استانداردترین حالت برای ورق‌های ۷۰۷۵ بوده و منجر به استحکام و خواص مکانیکی بهینه می‌شود که امکان مقایسه و تحلیل نتایج را تسهیل می‌کند. به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها جهت اعمال فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح، ابتدا قطعات در ابعاد ۵۰×۵۰ میلی‌متر مربع برش داده شده و سپس در درون کوره در

¹ Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT)

دمای ۴۱۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۵۰ دقیقه تحت عملیات حرارتی آنیلینگ قرار گرفته‌اند [۵۰]. این شرایط دما و زمانی برای بازسازی ریزساختار، کاهش تنش‌های داخلی و آماده‌سازی نمونه برای فرایند تغییرشکل پلاستیکی شدید سطحی بسیار مناسب است. عملیات آنیلینگ در اتمسفر محافظ آرگون انجام گرفت تا از اکسیداسیون سطح نمونه جلوگیری شود. این کار از تشکیل لایه اکسیدی ضخیم روی سطح نمونه جلوگیری کرده و کیفیت نمونه جهت آزمایش‌های خوردگی و خواص مکانیکی حفظ می‌شود. لازم به ذکر است که پارامترهای متغیر در فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح در این پژوهش شامل مدت زمان اجرای فرایند و قطر ساچمه‌ها می‌باشد که در جدول ۵ نشان شده است. همچنین باتوجه به سرعت خطی ساچمه‌ها (سرعت ضربه) که ۴/۸ متر بر ثانیه است (جدول ۵)، فرکانس رفت و برگشت محفظه در محدوده ۵۰ تا ۲۰۰ هرتز خواهد بود. ارتفاع پرتاب ساچمه‌ها بین ۵ تا ۲۰ میلی‌متر انتخاب شده تا ضربات شدید و کرنش پلاستیک بالا در سطح ایجاد گردد. مدت‌زمان تماس ساچمه‌ها نیز در محدوده چند میکروثانیه تا میلی‌ثانیه است. در نهایت با توجه به استفاده از ساچمه‌های فولادی با قطر ۳ تا ۶ میلی‌متر و جرم تقریبی ساچمه (باتوجه به چگالی فولاد) که برای این ابعاد معمولاً چند میلی‌گرم تا چند ده میلی‌گرم است. انرژی برخورد با در نظر گرفتن معادله $E=1/2 mv^2$ و سرعت ۴/۸ متر بر ثانیه و جرم تخمینی ساچمه معادل ۱/۲۸ تا ۱۰/۲ میلی ژول خواهد بود. همچنین برای اندازه‌گیری زبری سطح، از دستگاه زبری‌سنج تماسی که دارای یک سوزن نازک و نوک‌تیز می‌باشد استفاده شده است. این سوزن بر روی سطح نمونه حرکت کرده و تغییرات ارتفاع سطح را ثبت می‌کند.

جدول ۴ آنالیز شیمیایی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ مورد استفاده در این تحقیق برحسب درصد وزنی

| عنصر | منیزیم | آهن | تیتانیوم | سیلیکون | منگنز | روی | مس | کروم | آلومینیوم |
|-----------|--------|------|----------|---------|-------|------|------|------|-----------|
| درصد وزنی | ۲/۸۲ | ۰/۱۵ | ۰/۲۰ | ۰/۰۵ | ۰/۰۱ | ۵/۹۲ | ۱/۹۳ | ۰/۱۹ | مابقی |

جدول ۵ نحوه کدگذاری و پارامترهای انتخابی برای نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ مورد استفاده در این تحقیق

| نمونه | زمان ساچمه‌زنی (دقیقه) | سرعت خطی (متر بر ثانیه) | قطر ساچمه (میلی‌متر) |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| نمونه خام اولیه (RM) | ۰ | ۰ | ۰ |
| نمونه آلومینیومی ۵-۳ | ۵ | ۴/۸ | ۳ |
| نمونه آلومینیومی ۵-۶ | ۵ | ۴/۸ | ۶ |
| نمونه آلومینیومی ۱۰-۳ | ۱۰ | ۴/۸ | ۳ |
| نمونه آلومینیومی ۱۰-۶ | ۱۰ | ۴/۸ | ۶ |

۲-۳- آزمون سختی‌سنجی و اندازه‌گیری خوردگی

پس از انجام عملیات سایش مکانیکی سطح در چهار حالت مختلف، ابتدا نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ به منظور بررسی سختی تحت آزمون میکروسختی‌سنجی به روش ویکرز تحت نیروی ۲۰۰ گرم به مدت زمان ۱۵ ثانیه قرار گرفته‌اند. در این مطالعه، برای هر نمونه حداقل پنج نقطه سختی‌سنجی به صورت پراکنده و در مناطق مختلف سطح نمونه انتخاب شده است تا نماینده‌ای کامل و قابل‌اعتماد از سختی سطح فراهم گردد. همچنین، نقاط انتخاب شده بر روی لایه سخت‌شده و دور از لبه‌های نمونه و نواحی غیریکنواخت بوده‌اند تا اثرات مرزی یا ناهمگنی‌ها کاهش یابد. میانگین سختی حاصل از این نقاط برای ارائه نتایج استفاده شده است. پس از سختی‌سنجی نمونه‌ها برای انجام آزمون خوردگی به ابعاد ۲۰×۲۰ میلی‌متر مربع به‌توسط برش وایرکات آماده شده‌اند. لازم به ذکر است که از دستگاه Ivium stat به منظور انجام آزمون خوردگی استفاده شد. رفتار خوردگی نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM G3-89R99 در محلول ۳/۵ درصد آب‌نمک و در دمای محیط ثابت و برابر با ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. همچنین محلول در شرایط سکون بوده و هم‌زمانی انجام نشده است تا شرایط خوردگی یکنواخت و استاندارد مطابق با استاندارد ASTM-G31 حفظ شود. این شرایط استاندارد به منظور کنترل دقیق پارامترهای خوردگی انتخاب شده‌اند تا نتایج قابل‌مقایسه و قابل‌اتکایی ارائه گردد. در این آزمون، الکتروود مرجع از نوع کالومل بوده، الکتروود کمکی گرافیت و الکتروود کار نیز نمونه‌های اولیه و فراوری شده می‌باشند. پتانسیل مدار باز^۱ با

^۱ Open Circuit Potential

سرعت اسکن ۳ میلی‌ولت بر ثانیه اندازه‌گیری شده و پارامترهایی مانند پتانسیل خوردگی، چگالی جریان خوردگی و امپدانس الکتروشیمیایی با استفاده از روش برونیایی تافل^۱ در نرم‌افزار Ivium تحلیل و محاسبه گردیده‌اند. دامنه بسامد امپدانس الکتروشیمیایی بین ۰/۱ تا ۱۰۰ کیلوهرتز می‌باشد و دامنه سیگنال ولتاژ سینوسی ۱۰ مگاولت می‌باشد. در نهایت، به منظور بررسی اثر خوردگی بر روی سطوح نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده گردید. بدین منظور نمونه‌ها برای بررسی بهتر اثر خوردگی بر سطح نمونه‌ها پوشش طلا داده شد. برای این منظور از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده Mira3 FEG-SEM استفاده گردید.

۲-۴- بررسی‌های ریزساختاری

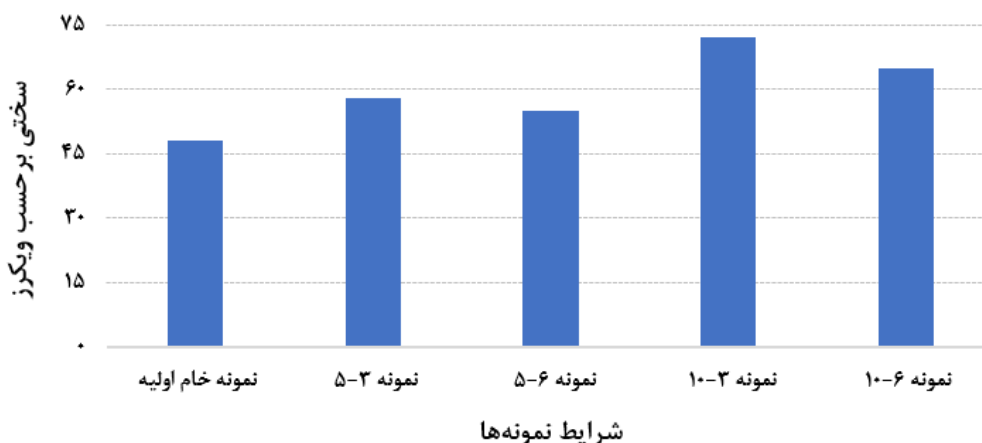
به منظور تحلیل ریزساختار سطح نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ در وضعیت‌های قبل و بعد از اعمال فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح، آزمون EBSD با هدف تعیین اندازه‌دانه‌ها، توزیع مرز دانه‌ها و میزان ریزدانه‌شدن انجام گرفت. این آزمون با استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (مدل Mira3 FEG-SEM) شرکت Tescan مجهز به سیستم EBSD انجام شد. این آزمون تحت شرایط ولتاژ ۲۰ کیلوولت، فاصله نمونه تا دکتور ۱۵ میلی‌متر و وضوح ۵۰ نانومتر انجام شد. همچنین نرم‌افزار تحلیل داده OIM Analysis برای استخراج اطلاعات استفاده شد. نمونه‌ها پس از فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح، پس از برش و صیقل دقیق، با استفاده از پولیش مکانیکی و الکترولیتی جهت رفع هرگونه عیوب و بهبود کیفیت سطح آماده‌سازی شدند. نتایج EBSD برای دو نمونه انتخاب شدند؛ نمونه خام اولیه و نمونه ۳-۱۰ (با ساچمه ۳ میلی‌متر و مدت زمان ۱۰ دقیقه) که بهترین خواص مکانیکی و مقاومت خوردگی را نشان داده است. تصاویر و داده‌های EBSD جهت نشان دادن تغییرات ریزساختار و ریزدانه‌شدن سطحی به کار رفته است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج سختی سنجی

نتایج آزمون سختی سنجی برای آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ در حالات قبل (نمونه اولیه) و بعد از عملیات سایش مکانیکی سطح در شکل ۲ آورده شده است. برای هر نمونه حداقل پنج بار آزمون سختی به صورت جداگانه انجام شده و میانگین سختی‌ها به عنوان مقدار نهایی گزارش گردیده است. انحراف معیار نتایج برای نمونه خام اولیه حدود $\pm 1/2$ ویکرز و در نمونه‌های ساچمه‌زنی شده در بازه در بازه $\pm 1/5$ تا $\pm 2/1$ ویکرز است. انحراف معیار کمی بالاتر برای نمونه‌های فراوری شده به دلیل تغییرات ساختاری و تاثیر پارامترهای مختلف فرایند سایش مکانیکی سطح است. مشاهده می‌شود که اعمال فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح فارغ از مدت زمان ساچمه‌زنی و قطر ساچمه موجب افزایش قابل‌ملاحظه سختی نمونه‌ها می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که کاهش قطر ساچمه و افزایش مدت زمان ساچمه‌زنی موجب بهبود بیشتر در سختی نمونه‌های آلومینیومی می‌شود. با اعمال فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح با قطر ساچمه ۶ میلی‌متر به مدت زمان ۵ دقیقه (نمونه ۶-۵)، سختی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ از ۴۸ ویکرز در حالت خام اولیه به ۵۵ ویکرز بهبود می‌یابد که حاکی از افزایش ۱۵٪ می‌باشد. با ثابت نگه‌داشتن قطر ساچمه، چنانچه مدت زمان اعمالی به ۱۰ دقیقه افزایش یابد (نمونه ۶-۱۰)، سختی آن به ۶۵ ویکرز می‌رسد که بیانگر افزایش ۱۸٪ در مقایسه با نمونه ۶-۵ می‌باشد. از طرف دیگر، با ثابت نگه‌داشتن مدت زمان ساچمه‌زنی به ۵ دقیقه، چنانچه قطر ساچمه‌های استفاده شده از ۶ به ۳ میلی‌متر تغییر یابد (نمونه ۳-۵)، سختی آن در مقایسه با نمونه ۶-۵ تنها در حدود ۵٪ افزایش می‌یابد. لازم بذکر است که تاثیر افزایش قطر ساچمه بر سختی نمونه‌ها به دلیل اعمال کرنش‌های پلاستیکی بیشتر، ریزدانه‌شدن مؤثرتر، افزایش تراکم نابجایی‌ها و ضخامت بیشتر لایه سخت‌شده سطح به صورت همزمان است که در مجموع سختی را افزایش می‌دهند. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح، تاثیر زمان ساچمه‌زنی به مراتب از تاثیر قطر ساچمه قابل‌ملاحظه‌تر است. همچنین در عملیات فوق، چنانچه قطر ساچمه به ۳ میلی‌متر و مدت زمان ساچمه‌زنی به ۱۰ دقیقه تغییر کند سختی نمونه آلومینیومی ۳-۱۰ به ۷۲ ویکرز می‌رسد که در مقایسه با نمونه اولیه، افزایش ۵۰٪ نشان می‌دهد. بنابراین آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ فراوری شده با عملیات سایش مکانیکی سطح با قطر ساچمه ۳ میلی‌متر و مدت زمان ۱۰ دقیقه (نمونه ۳-۱۰) بیشترین سختی سطح را ایجاد می‌کند.

¹ Tafel Extrapolation



شکل ۲ تغییرات سختی سنجی برحسب مدت زمان ساچمه زنی و قطر ساچمه در طول عملیات سایش مکانیکی سطح برای نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵

۳-۲- رفتار خوردگی

مقاومت به خوردگی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ فراوری شده با فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح و همچنین نمونه خام اولیه اندازه‌گیری شده است براین اساس، ابتدا شیب مناطق تافل آندی و کاتدی و در نهایت مقدار خوردگی هر یک از نمونه‌های آلومینیومی بدست آمده که در جدول ۶ نشان داده شده است. شیب‌های آندی و کاتدی از معادله تافل استخراج می‌شوند که رابطه بین پتانسیل الکتریکی و لگاریتم چگالی جریان را در نواحی خطی آندی و کاتدی به صورت تقریباً خطی بیان می‌کند. برای استخراج پتانسیل خوردگی (E_{corr}) و چگالی جریان خوردگی (i_{corr})، خطوط امتداد داده‌های خطی در نواحی آندی و کاتدی روی نمودار لگاریتم جریان-پتانسیل رسم می‌شوند و نقطه تلاقی این دو خط تعیین کننده E_{corr} و مقدار i_{corr} است. این مقادیر به عنوان پارامترهای کلیدی در ارزیابی رفتار خوردگی به کار می‌روند، به طوری که چگالی جریان خوردگی نمایانگر میزان نرخ خوردگی است. درصد کاهش نرخ خوردگی هر نمونه نسبت به نمونه خام اولیه با استفاده از رابطه زیر (رابطه ۲) محاسبه شده است که در آن $R_{\text{خام اولیه}}$ نرخ خوردگی نمونه خام اولیه و $R_{\text{نمونه}}$ نرخ خوردگی نمونه فراوری شده می‌باشد.

$$\text{درصد کاهش نرخ خوردگی} = \frac{R_{\text{خام اولیه}} - R_{\text{نمونه}}}{R_{\text{خام اولیه}}} \times 100 \quad (2)$$

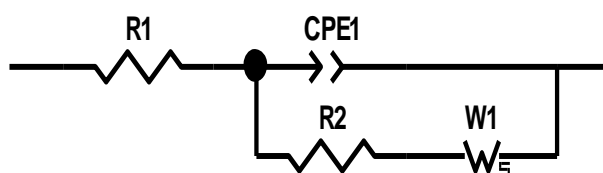
جدول ۶ مقادیر پلاریزاسیون تافل برای نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ در طول عملیات سایش مکانیکی سطح

| نمونه | پتانسیل خوردگی (V) | دانشیته جریان خوردگی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | مقاومت پلاریزاسیون (ohm) | شیب آندی | شیب کاتدی | نرخ خوردگی (mm/y) |
|-----------|--------------------|--|--------------------------|----------|-----------|-------------------|
| خام اولیه | -۱/۲۵۳۵ | ۷۲/۹۴ | ۳۳۴/۲ | ۰/۴۱۱ | ۰/۰۶۵ | ۲/۱۴۶ |
| ۵-۳ | -۱/۲۵۰۵ | ۴۷/۳۸ | ۵۹۴/۸ | ۰/۲۵۳ | ۰/۰۹۶ | ۱/۳۹۴ |
| ۵-۶ | -۱/۲۵۱۶ | ۵۲/۸۷ | ۵۷۷/۰ | ۰/۶۳۳ | ۰/۰۶۷ | ۱/۵۵۶ |
| ۱۰-۳ | ۱/۱۶۱۸ | ۳۰/۶۶ | ۶۴۳/۷ | ۰/۰۹۹ | ۰/۰۸۴ | ۰/۹۰۲ |
| ۱۰-۶ | ۱/۲۲۲۳ | ۳۴/۷۲ | ۶۳۹/۱ | ۰/۳۸۱ | ۰/۰۵۹ | ۱/۰۲۲ |

نتایج نشان می‌دهد که نرخ خوردگی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ فراوری شده با عملیات سایش مکانیکی سطح در مقایسه با نمونه خام اولیه کاهش ملموسی یافته است. نتایج حاکی از آنست که نمونه فراوری شده با قطر ساچمه ۶ میلی‌متر و مدت زمان ۵ دقیقه (نمونه ۵-۶) دارای بیشترین نرخ خوردگی است در حالی که نمونه فراوری شده با قطر ساچمه ۳ میلی‌متر و مدت زمان ۱۰ دقیقه (نمونه ۱۰-۳) دارای کمترین نرخ خوردگی می‌باشد. در این زمینه، اعمال فرایند مذکور با قطر ساچمه و مدت زمان ساچمه‌زنی ۶ میلی‌متر و ۵ دقیقه (نمونه ۵-۶) و ۳ میلی‌متر و ۱۰ دقیقه (نمونه ۱۰-۳) در مقایسه با حالت خام اولیه به ترتیب موجب کاهش ۲۷

درصد و ۵۸ درصد نرخ خوردگی می‌گردد. همچنین تاثیر مدت‌زمان ساچمه‌زنی از قطر ساچمه اعمالی بر نرخ خوردگی نمونه‌های آلومینیومی در عملیات فوق قابل‌ملاحظه‌تر است. در این راستا، کاهش قطر ساچمه استفاده شده در عملیات سایش مکانیکی سطح از ۶ به ۳ میلی‌متر با ثابت نگه‌داشتن مدت‌زمان ساچمه‌زنی (۵ دقیقه)، نرخ خوردگی نمونه حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد درحالی‌که با افزایش مدت‌زمان ساچمه‌زنی از ۵ به ۱۰ دقیقه با ثابت نگه‌داشتن قطر ساچمه استفاده شده (۶ میلی‌متر)، حدود ۳۴ درصد کاهش در نرخ خوردگی نمونه آلومینیومی نشان می‌دهد.

شکل ۳ مدار معادل و متناظر با امپدانس جهت انطباق داده‌ها برای بررسی رفتار خوردگی نمونه‌های آلومینیومی نشان داده شده است. به کمک این مدار معادل می‌توان معادل داده‌های امپدانس الکتروشیمیایی را محاسبه نمود که در جدول ۷ آورده شده است. همچنین مقادیر امپدانس الکتروشیمیایی برای نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ در حالات قبل و بعد از فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح در این جدول نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از طریق آزمون امپدانس الکتروشیمیایی با اندکی اختلاف در نرخ تغییرات با مقادیر بدست آمده از آزمون پلاریزاسیون همخوانی مناسبی نشان می‌دهند. از طرفی در مدار معادل، به جای مدول خازنی، المان ظرفیتی لایه مضاعف وجود دارد که بیانگر تاثیرات سطح بر روی رفتار ذخیره بار در لایه مضاعف دارد. باتوجه‌به نتایج آزمون، خوردگی باعث بوجود آمدن مدول امپدانس واربرگ شده است که نشانگر این مطلب می‌باشد که در فرایند خوردگی، یون‌های خورنده موجود در الکترولیت و یا محصولات خوردگی به درون الکترولیت و یا به سمت سطح نمونه تمایل نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که امپدانس واربرگ^۱ یک جزء از امپدانس الکتروشیمیایی است که ناشی از فرایندهای انتقال جرم^۲ یون‌ها یا گونه‌های واکنش‌دهنده در محلول الکترولیت به سطح الکتروود است. این امپدانس معمولاً در طیف فرکانسی پایین در اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی مشاهده می‌شود و به صورت یک خط با شیب ۴۵ درجه در نمودار نیمه‌لگاریتمی نایکوئیست ظاهر می‌گردد. حضور واضح امپدانس واربرگ در داده‌های طیف‌سنجی نشان‌دهنده این است که واکنش‌های خوردگی ممکن است تحت کنترل نفوذ یون‌ها به زیر لایه محافظ یا درون ساختار سطحی نمونه باشند. لذا مشاهده این مؤلفه به طور مستقیم بیانگر کیفیت لایه محافظ نیست، بلکه نشانه‌ای از وجود محدودیت‌های نفوذی در سیستم است. از سوی دیگر، با اینکه ارتباط بین وجود امپدانس واربرگ و نوع خاصی از خوردگی مثل خوردگی حفره‌ای یا تنش‌ی بسیار محتمل است اما اثبات کامل این موضوع نیازمند تحلیل دقیق میکروسکوپی سطح بعد از آزمون می‌باشد تا بتوان برداشت صحیح‌تری داشت. درنهایت می‌توان گفت که در آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ که مقاومت به خوردگی متوسطی دارد به دلیل ترکیب آلیاژی شامل روی، منیزیم و مس، حساسیت به خوردگی حفره‌ای و تنش‌ی وجود دارد. باتوجه‌به جدول ۷ می‌توان دریافت که مقاومت به خوردگی در تمامی نمونه‌های فراوری شده در مقایسه با نمونه خام اولیه افزایش قابل‌توجهی یافته است داشته که مقدار این افزایش برای نمونه‌های ۱۰-۳ و ۱۰-۶ به دلیل مدت‌زمان بالای انجام فرایند قابل‌توجه بوده است. بنابراین نتایج حاکی از آنست که این فرایند می‌تواند مقاومت امپدانس سطح را افزایش داده و مقاومت به خوردگی نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ را افزایش دهد.



شکل ۳ مدار معادل الکتریکی منحنی‌های امپدانس الکتروشیمیایی

مشخص شده است که فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح به دلیل ماهیت فرایند منجر به افزایش زبری سطح می‌شود که مقدار افزایش این زبری بسته به مدت‌زمان اجرای فرایند و اندازه ساچمه‌های استفاده شده می‌تواند متفاوت است. این زبری سطح می‌تواند تغییرات قابل‌توجهی در نتایج رفتار خوردگی نمونه‌های آلومینیومی ایجاد نماید، چراکه افزایش زبری سطوح سبب کاهش تابع‌کار الکترون‌ها شده و به‌این‌ترتیب واکنش‌های الکتروشیمیایی به‌راحتی انجام می‌پذیرد. در این حالت، مرزدانه‌ها، دوقلوبی‌ها و نابجایی‌ها که

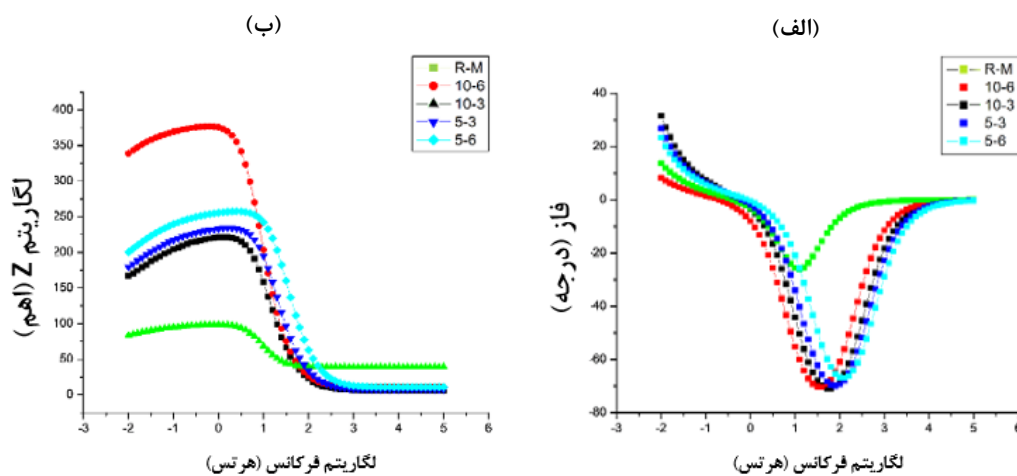
¹ Warburg Impedance

² Diffusion

در حین انجام این عملیات دارای انرژی الاستیک نهفته‌ای هستند مکان‌های آندی مرجع را تشکیل می‌دهند؛ بنابراین مرزدانه‌ها نقش آندی و خود دانه‌ها نقش کاتدی در خوردگی خواهند داشت که در این رابطه نسبت مساحت آند به کاتد بر روی میزان خوردگی تأثیرگذار است. از این رو سطح بزرگ کاتد سبب تسهیل واکنش احیاء شده که مطابق اصل خنثایی الکتریکی، انحلال آندی باید افزایش یابد. به‌طور کلی، اگر سطح دانه بسیار بزرگتر از مرزدانه باشد، موجب افزایش نرخ خوردگی در مرزدانه‌ها می‌شود؛ اما با ریزدانه‌شدن ساختار نمونه‌ها در اثر اعمال فرایند مذکور، نسبت مساحت آند به کاتد به نفع مرزدانه‌ها تغییر پیدا کرده و مکان‌های کاتدی کاهش می‌یابند که در این حالت جریان خوردگی، کاهش چشمگیری خواهد داشت. در این خصوص، شکل ۴-الف نمودار فاز - لگاریتم فرکانس و شکل ۴-ب نمودار لگاریتم قسمت حقیقی - لگاریتم فرکانس را نشان می‌دهد.

جدول ۷ مقادیر امپدانس الکتروشیمیایی برای نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ در طول عملیات سایش مکانیکی سطح

| پارامترها | | | | زمان غوطه‌وری | نمونه |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|---------------|-----------|
| امپدانس واربرگ | المان ظرفیتی لایه مضاعف | مقاومت لایه مضاعف یا انتقال بار | مقاومت محلول الکتrolیت | (h) | |
| (S.s ^{-0.5}) | (F.cm ⁻²) | (ohm/cm ²) | (ohm/cm ²) | | |
| $-2/137 \times 10^{-1}$ | $7/527 \times 10^{-5}$ | $2/234 \times 10^{-2}$ | 6/390 | ۱ | خام اولیه |
| $-2/37 \times 10^{-1}$ | $6/956 \times 10^{-5}$ | $3/136 \times 10^{-2}$ | 7/570 | ۱ | ۵-۳ |
| $-1/988 \times 10^{-1}$ | $2/618 \times 10^{-5}$ | $1/087 \times 10^{-1}$ | $1/087 \times 10^{-1}$ | ۱ | ۵-۶ |
| -۴/۹۷۵ | $3/393 \times 10^{-4}$ | $6/187 \times 10^{-1}$ | $3/888 \times 10^{-1}$ | ۱ | ۱۰-۳ |
| $-1/20 \times 10^{-1}$ | $6/853 \times 10^{-5}$ | $3/727 \times 10^{-2}$ | $1/14 \times 10^{-1}$ | ۱ | ۱۰-۶ |



شکل ۴ الف) نمودار فاز - لگاریتم فرکانس، ب) نمودار لگاریتم قسمت حقیقی - لگاریتم فرکانس برای نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ در حالات قبل و بعد از فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح

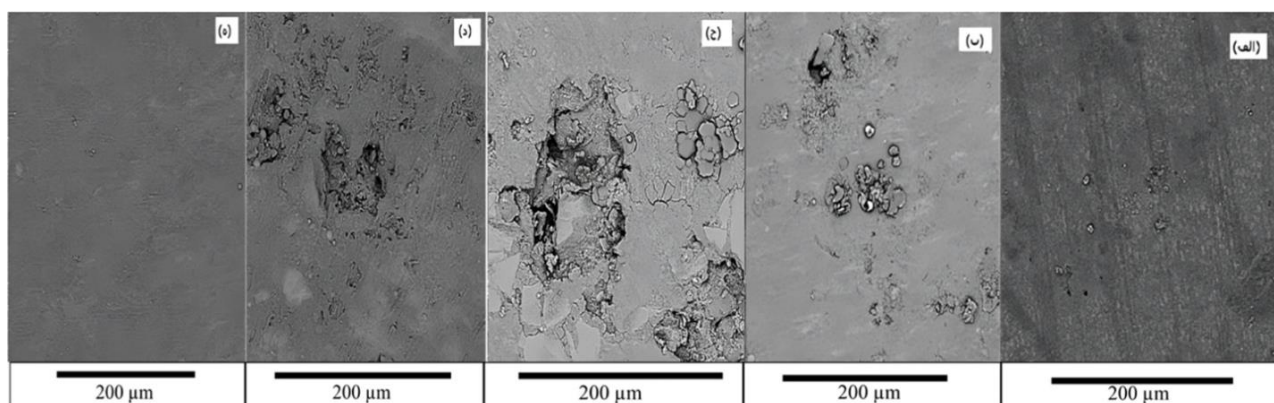
۳-۳- نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی

به‌منظور محاسبه ضخامت لایه سخت‌شده در نمونه‌های آلومینیومی تحت فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است. مقدار ضخامت لایه سخت‌شده با توجه به پارامترهای متغیر فرایند (مدت‌زمان ساچمه‌زنی و قطر ساچمه) متفاوت است که مقادیر آن‌ها در جدول ۸ آورده شده است. نتایج جدول زیر حاکی از تشکیل یک لایه سخت‌شده بر روی نمونه‌های تحت فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح است که در این رابطه نمونه خام اولیه فاقد این لایه سخت‌شده است. مشخص است که افزایش مدت‌زمان ساچمه‌زنی و کاهش اندازه ساچمه‌های استفاده شده موجب افزایش ضخامت لایه تشکیل‌شده می‌گردد. لازم به ذکر است که افزایش ضخامت لایه به همراه سایر تغییرات ریزساختاری، اثر هم‌افزا بر خواص سختی نمونه‌ها دارد؛ اما سختی نهایی به‌تنهایی تابع مستقیم ضخامت نیست و دیگر پارامترهای ریزساختاری و کرنش‌های پلاستیک تأثیرگذارند.

جدول ۸ ضخامت لایه تشکیل شده بر روی سطح نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ در طول عملیات سایش مکانیکی سطح

| نمونه | ضخامت لایه تغییرشکل یافته (میکرومتر) |
|-----------------|--------------------------------------|
| نمونه خام اولیه | ۰ |
| ۵-۳ | ۲۱ |
| ۵-۶ | ۱۷ |
| ۱۰-۳ | ۵۲ |
| ۱۰-۶ | ۴۲ |

به منظور تحلیل بیشتر رفتار خوردگی، نمونه‌های آلومینیومی در حالات قبل و بعد از اعمال فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح به توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن در شکل ۵ قابل مشاهده است. مطابق شکل ۵-الف که مربوط به سطح خوردگی در نمونه خام اولیه است می‌توان دریافت که خوردگی بصورت موضعی بوده و در قسمت‌های خاصی از سطح نمونه متمرکز شده است. سطح خوردگی برای نمونه‌های فراوری شده که در شکل‌های ۵-ب تا ۵-ه نشان داده شده حاکی از خوردگی بصورت یکنواخت می‌باشد که عمده‌ترین علت آن وجود یک لایه سطحی سخت شونده می‌باشد. لازم به ذکر است که در آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵، فازهای بین‌فلزی مانند $MgZn_2$ نقش مهمی در رفتار خوردگی دارند. به نظر می‌رسد که فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح موجب توزیع یکنواخت چنین فازهایی می‌شود که به افزایش مقاومت به خوردگی در نمونه‌ها منجر می‌شود. لازم به ذکر است که فاز بین‌فلزی $MgZn_2$ در آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ به عنوان فازی آندی‌تر نسبت به زمینه آلومینیوم شناخته می‌شود و معمولاً محل شروع خوردگی‌های حفره‌ای در این آلیاژ محسوب می‌گردد. در این مطالعه، بهبود قابل توجه مقاومت به خوردگی نمونه‌های فراوری شده تا حدی به توزیع یکنواخت‌تر فازهای بین‌فلزی مانند $MgZn_2$ نسبت داده شده است. با این حال، به دلیل عدم ارائه داده‌های میکروسکوپی ترکیبی مانند آنالیز EDS یا Mapping در این پژوهش، این بخش به صورت فرضیه‌ای منطقی مطرح شده است. اصلاح ساختار ریزدانه‌ای سطح و ایجاد لایه سخت‌شده یکنواخت، که احتمالاً منجر به پراکنش بهتر فازهای مستعد به خوردگی می‌شود، می‌تواند باعث کاهش خوردگی موضعی و رشد یکنواخت‌تر خوردگی گردد. جهت بررسی دقیق‌تر نقش توزیع این فازها در بهبود مقاومت به خوردگی، پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی تحلیل‌های میکروسکوپی ترکیبی و شناسایی جزئیات ساختاری ارائه شود.

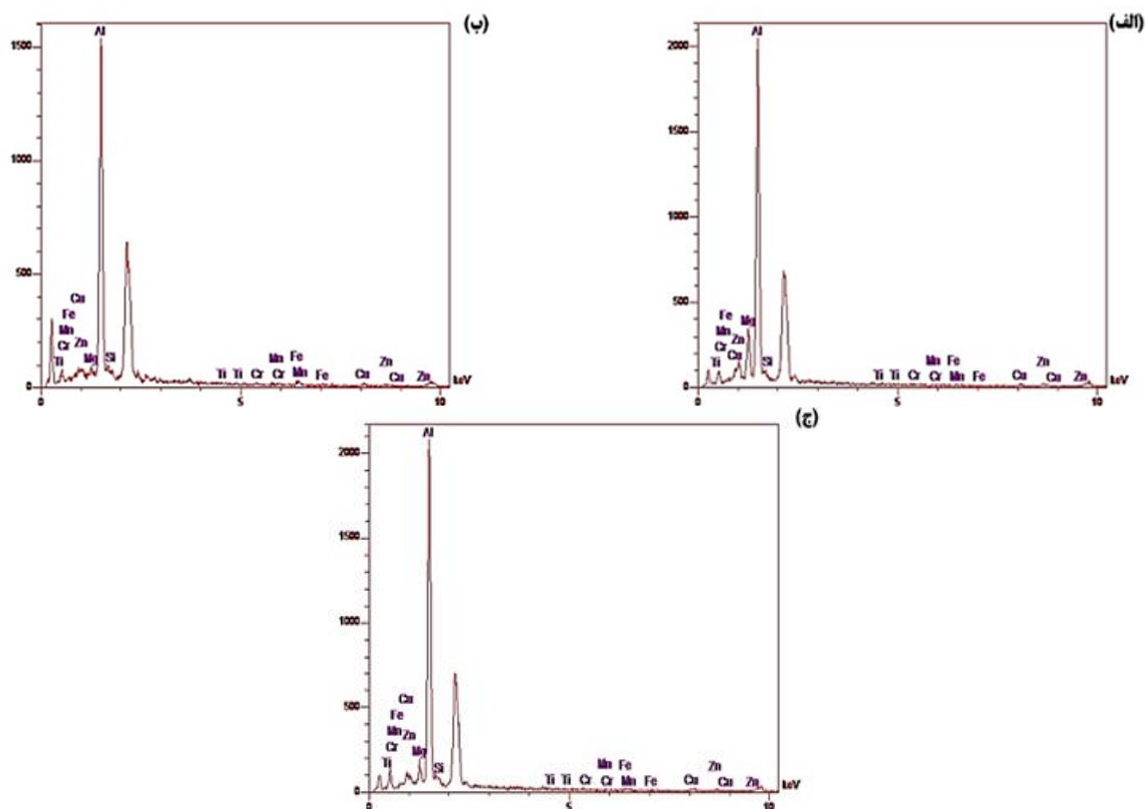


شکل ۵ مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی از آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ در (الف) نمونه خام اولیه و (ب-ه) فراوری شده با عملیات سایش مکانیکی سطح برای نمونه‌های (ب) ۵-۳، (ج) ۵-۶، (د) ۱۰-۳ و (ه) ۱۰-۶

۳-۴- نتایج الگوهای پراش اشعه ایکس

شکل ۶ الگوهای پراش اشعه ایکس برای نمونه‌های آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ در حالات قبل و بعد از فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح را نشان می‌دهد. مشخص شده است که الگوهای پراش اشعه ایکس که نشان‌دهنده تغییرات ریزساختاری و تنش‌های پسماند ناشی از عملیات سایش مکانیکی سطح در آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ هستند می‌توانند بر خواص مکانیکی و خوردگی نمونه تأثیرگذار

باشند. نتایج حاکی از آنست که شدت پیکها در نمونه‌های فرآوری شده به شدت کاهش یافته و پهن‌تر شده‌اند که این موضوع ناشی از کاهش قابل توجه اندازه‌دانه و میکروکرنش‌های ناشی از انجام فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح می‌باشد. لذا افزایش مدت‌زمان ساچمه‌زنی و کاهش اندازه ساچمه‌های مورد استفاده در فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح که ناشی از تغییرات ریزساختار و تنش‌های پسماند در سطح نمونه است، موجب کاهش شدت پیکها و افزایش پهنای آنها (افزایش پهنای در نیمه ارتفاع پیکها) می‌گردد.

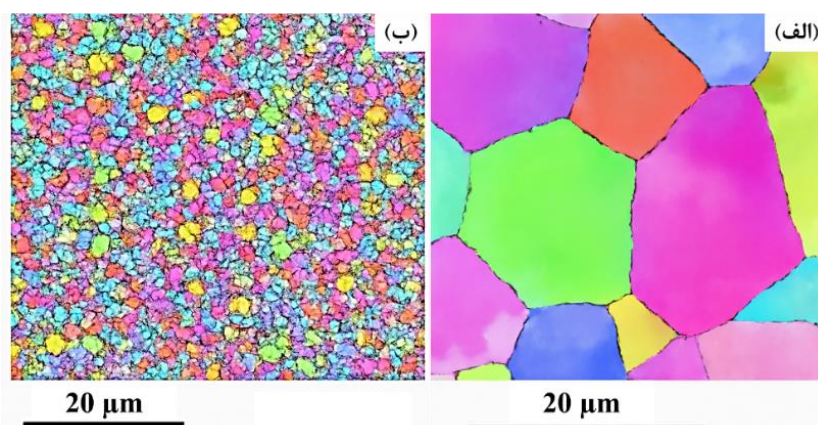


شکل ۶ الگوی پراش اشعه ایکس در آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ برای (الف) نمونه خام اولیه، ب و ج) نمونه‌های فرآوری شده با عملیات سایش مکانیکی سطح برای دو حالت ب) نمونه ۳-۱۰ و ج) نمونه ۵-۶

۳-۵- نتایج ریزساختاری

تصاویر EBSD ارائه شده در شکل ۷، ریزساختار سطحی نمونه خام اولیه و نمونه فرآوری شده با عملیات سایش مکانیکی سطح در شرایط ساچمه ۳ میلی‌متر و مدت‌زمان ۱۰ دقیقه (نمونه ۳-۱۰) را نشان می‌دهد. در نمونه خام اولیه، دانه‌ها از اندازه متوسط بزرگ‌تر و توزیع نامنظمی برخوردار هستند که باعث کاهش سختی و مقاومت به خوردگی می‌شود. در مقابل، نمونه ۳-۱۰ دارای ساختاری ریزدانه با اندازه‌دانه‌های به‌طور محسوسی کوچکتر و توزیع یکنواخت‌تر مرزدانه‌ها است.

اندازه‌دانه متوسط در نمونه خام اولیه تقریباً برابر با 15 ± 3 میکرومتر بوده، در حالی که در نمونه ۳-۱۰ این مقدار به حدود $2/5 \pm 0/5$ میکرومتر کاهش یافته است. این کاهش چشمگیر اندازه‌دانه ناشی از اعمال کرنش‌های پلاستیک شدید در سطح طی عملیات سایش مکانیکی است که به شکستن دانه‌های درشت اولیه و تشکیل دانه‌های ریز و هم‌اندازه منجر گردیده است. ریزدانه‌شدن ساختار سطحی نه تنها موجب افزایش سختی نمونه شده، بلکه با افزایش نسبت مساحت مرزدانه‌ها و توزیع یکنواخت فازهای بین‌فلزی، مقاومت به خوردگی نمونه را بهبود بخشیده است. همچنین افزایش تعداد مرزهای دانه به عنوان موانع مؤثر در حرکت نابجایی‌ها، استحکام مکانیکی را بهبود می‌بخشد و تنش‌های پسماند فشاری ایجادشده در سطح نیز باعث افزایش مقاومت به خستگی و خوردگی می‌شود. این نتایج تصویری با داده‌های سختی‌سنجی و رفتار خوردگی تطابق کامل داشته و نشان‌دهنده اثر مثبت فرایند عملیات سایش مکانیکی سطح بر اصلاح ریزساختار و بهبود خواص مکانیکی و خوردگی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ است.



شکل ۷ الگوی پراش الکترون برگشتی (EBSD) در آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ (الف) نمونه خام اولیه، (ب) نمونه فراوری شده با عملیات سایش مکانیکی سطح در شرایط ساچمه ۳ میلی‌متر و مدت زمان ۱۰ دقیقه (نمونه ۳-۱۰)

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار مکانیکی و خوردگی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ فراوری شده با عملیات سایش مکانیکی سطح در مدت زمان ساچمه‌زنی و اندازه ساچمه متفاوت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. براین اساس، مهم‌ترین نتایج بدست آمده به قرار زیر هستند:

- اعمال این فرایند بدون توجه به پارامترها، سختی نمونه‌ها را به‌طور قابل‌ملاحظه افزایش می‌دهد. همچنین، افزایش مدت زمان ساچمه‌زنی و کاهش قطر ساچمه، سختی نمونه‌ها را بیشتر بهبود می‌بخشد. در این رابطه، زمان ساچمه‌زنی تأثیر بسیار بیشتری نسبت به قطر ساچمه دارد. ترکیب اندازه ساچمه ۳ میلی‌متری با مدت زمان ساچمه‌زنی ۱۰ دقیقه (نمونه ۳-۱۰) با سختی ۷۲ ویکرز، بیشترین افزایش سختی (۵۰ درصد) را ایجاد می‌کند.
- عملیات سایش مکانیکی سطح باعث کاهش نرخ خوردگی نمونه‌های آلومینیوم ۷۰۷۵ نسبت به نمونه خام اولیه شده است. در این رابطه، افزایش مدت زمان ساچمه‌زنی و کاهش قطر ساچمه در عملیات سایش مکانیکی سطح، مقاومت به خوردگی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ را به‌طور محسوسی افزایش می‌بخشد و مدت زمان ساچمه‌زنی عامل مؤثرتری نسبت به قطر ساچمه است. لذا نمونه ۳-۱۰ کمترین نرخ خوردگی را نشان داده است.
- آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نتایج مشابه با آزمون پلاریزاسیون نشان داده است. مشخص شد که نمونه‌های فراوری شده با عملیات سایش مکانیکی سطح، مقاومت امپدانسی و در نتیجه مقاومت به خوردگی نسبت به نمونه خام اولیه به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. در این راستا، شاخص واربرگ نیز به‌عنوان معیاری برای ارزیابی کیفیت لایه محافظ و نفوذ یون‌ها عمل می‌کند. لازم به ذکر است که ریزدانه شدن ساختار سطح پس از اعمال فرایند، علی‌رغم افزایش زبری، به دلیل افزایش مساحت مرزخانه‌ها و کاهش مکان‌های کاتدی، مقاومت به خوردگی را افزایش می‌دهد.
- عملیات سایش مکانیکی سطح موجب تشکیل لایه‌ای سخت‌شده بر سطح آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ می‌شود که ضخامت آن با افزایش مدت زمان ساچمه‌زنی و کاهش قطر ساچمه افزایش می‌یابد. این لایه در نمونه خام اولیه وجود ندارد. از طرف دیگر، توزیع یکنواخت فازهای بین‌فلزی و تشکیل لایه سخت‌شونده سطحی، مقاومت به خوردگی نمونه‌های فراوری شده را نسبت به نمونه خام اولیه افزایش داده و خوردگی را از حالت موضعی به حالت یکنواخت تبدیل می‌کند.
- عملیات سایش مکانیکی سطح باعث ریزدانه شدن و افزایش میکروکرنش‌ها در آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ می‌شود که در الگوهای پراش اشعه ایکس با کاهش شدت و افزایش پهنای پیک‌ها قابل مشاهده است. این تغییرات با افزایش مدت زمان ساچمه‌زنی و کاهش قطر ساچمه بیشتر می‌شوند.
- تصاویر EBSD نشان‌دهنده ریزدانه شدن قابل توجه ساختار سطحی نمونه‌های آلومینیوم ۷۰۷۵ پس از عملیات سایش مکانیکی سطح بوده که اندازه‌دانه متوسط از حدود ۱۵ میکرومتر در نمونه خام اولیه به کمتر از ۳ میکرومتر در نمونه فراوری شده کاهش یافته که این تغییرات ساختاری عامل اصلی بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقاومت به خوردگی می‌باشد.

References

- [1] Cabibbo M. Microstructure strengthening mechanisms in different equal channel angular pressed aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2013 Jan 10;560:413-32. doi: 10.1016/j.msea.2012.09.086
- [2] Morozova A, Kaibyshev R. Grain refinement and strengthening of a Cu-0.1 Cr-0.06 Zr alloy subjected to equal channel angular pressing. *Philosophical Magazine*. 2017 Aug 23;97(24):2053-76. doi: 10.1080/14786435.2017.1324649
- [3] Xun Y, Mohamed FA. Refining efficiency and capability of top-down synthesis of nanocrystalline materials. *Materials Science and Engineering: A*. 2011 Jun 25;528(16-17):5446-52. doi: 10.1016/j.msea.2011.03.015
- [4] Ebrahimi M, Shamsborhan M. Monotonic and dynamic mechanical properties of PTCAE aluminum. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017 May 25;705:28-37. doi: 10.1016/j.jallcom.2017.02.109
- [5] Huppmann M, Lentz M, Chedid S, Reimers W. Analyses of deformation twinning in the extruded magnesium alloy AZ31 after compressive and cyclic loading. *Journal of Materials Science*. 2011 Feb;46(4):938-50. doi: 10.1007/s10853-010-4838-0
- [6] Guan RG, Tie D. A review on grain refinement of aluminum alloys: progresses, challenges and prospects. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2017 May;30(5):409-32. doi: 10.1007/s40195-017-0565-8
- [7] Gode C, Attarilar S, Eghbali B, Ebrahimi M. Electrochemical behavior of equal channel angular pressed titanium for biomedical application. In *AIP Conference Proceedings* 2015 Mar 30 (Vol. 1653, No. 1, p. 020041). AIP Publishing LLC. doi: 10.1063/1.4914232
- [8] 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 Jun 1;56(11):987-90. doi: 10.1016/j.scriptamat.2007.01.043
- [9] Figueiredo RB, Barbosa ER, Zhao X, Yang X, Liu X, Cetlin PR, Langdon TG. Improving the fatigue behavior of dental implants through processing commercial purity titanium by equal-channel angular pressing. *Materials Science and Engineering: A*. 2014 Dec 1;619:312-8. doi: 10.1016/j.msea.2014.09.099
- [10] Xu C, Schroeder S, Berbon PB, Langdon TG. Principles of ECAP-Conform as a continuous process for achieving grain refinement: Application to an aluminum alloy. *Acta Materialia*. 2010 Feb 1;58(4):1379-86. doi: 10.1016/j.actamat.2009.10.044
- [11] Cartigeyen S, Mahadevan K. Effects of heat input and particulate deposition on Cu/SiCp surface composite processed by friction stir processing. *Indian J Eng Mater Sci (IJEMS)*. 2016 Apr 1;23(2&3):145-51.
- [12] Swamy PK, Mylraiah S, Gowdru Chandrashekarappa MP, Lakshmikanthan A, Pimenov DY, Giasin K, Krishna M. Corrosion behaviour of high-strength Al 7005 alloy and its composites reinforced with industrial waste-based fly ash and glass fibre: comparison of stir cast and extrusion conditions. *Materials*. 2021 Jul 14;14(14):3929. doi: 10.3390/ma14143929
- [13] Bagheri S, Guagliano M. Review of shot peening processes to obtain nanocrystalline surfaces in metal alloys. *Surface Engineering*. 2009 Jan 1;25(1):3-14. doi: 10.1179/026708408X334087
- [14] Djavanroodi F, Ebrahimi M, Rajabifar B, Akramizadeh S. Fatigue design factors for ECAPed materials. *Materials Science and Engineering: A*. 2010 Dec 15;528(2):745-50. doi: 10.1016/j.msea.2010.09.080
- [15] Langdon TG. Twenty-five years of ultrafine-grained materials: Achieving exceptional properties through grain refinement. *Acta Materialia*. 2013 Nov 1;61(19):7035-59. doi: 10.1016/j.actamat.2013.08.018
- [16] ATTARILAR S, SHAMSBORHAN M, EBRAHIMI M, GÖDE C, ÖZKAVAK HV. Enhancing mechanical properties and corrosion performance of AA6063 aluminum alloys through constrained groove pressing technique. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020 Jul 1;30(7):1790-802. doi: 10.1016/S1003-6326(20)65339-0
- [17] Alipour Layin M, Ashrafi A, Khodadadi M. Experimental study of the flow forming process of grooved copper-aluminum bi-layer tubes and investigation of the separation force between the two layers. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 Apr 21;12(2):44-58. doi: 10.22034/ijme.2025.498237.2040 [In Persian]
- [18] Lapovok R, Estrin Y. Superplasticity in magnesium alloys by severe plastic deformation. In *Advances in Wrought Magnesium Alloys* 2012 Jan 1 (pp. 144-185). Woodhead Publishing. doi: 10.1533/9780857093844.1.144
- [19] Utyasheva FZ, Raabb GI, Zhilyaeva AP. Processing ultrafine-grained and nanostructured materials. In: *Superplasticity and grain boundaries in ultrafine-grained materials*. 2nd ed. Elsevier Ltd.; 2021 Jan. doi: 10.1016/B978-0-12-819063-0.00015-1
- [20] Wan B, Chen W, Lu T, Liu F, Jiang Z, Mao M. Review of solid state recycling of aluminum chips. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017 Oct 1;125:37-47. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.06.004
- [21] 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 Apr 15;781:1074-90. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.12.083
- [22] Yu H, Tieu AK, Lu C, Liu X, Liu M, Godbole A, Kong C, Qin Q. A new insight into ductile fracture of ultrafine-

- grained Al-Mg alloys. *Scientific Reports*. 2015 Apr 8;5(1):9568. doi: 10.1038/srep09568
- [23] Petryk H, Stupkiewicz S. A quantitative model of grain refinement and strain hardening during severe plastic deformation. *Materials Science and Engineering: A*. 2007 Jan 25;444(1-2):214-9. doi: 10.1016/j.msea.2006.08.076
- [24] Gupta AK, Maddukuri TS, Singh SK. Constrained groove pressing for sheet metal processing. *Progress in Materials Science*. 2016 Dec 1;84:403-62. doi: 10.1016/j.pmatsci.2016.09.008
- [25] Ostovari Moghaddam A, Mazinani A, Ketabchi M. Effect of accumulative roll bonding and equal channel angular rolling on microstructural and mechanical properties of Cu-Al-Mn shape memory alloys. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2017 Sep;70(7):1901-9. doi: 10.1007/s12666-016-1007-4
- [26] Fahimi Hanzaei A, Mousavi SM, Akbari J. Experimental and numerical study of environmental parameters' influence on the surface morphology of mesostructures fabricated by integrating additive manufacturing and electroforming processes. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2025 Jan 20;11(11):15-25. doi: 10.22034/ijme.2024.477345.2006 [In Persian]
- [27] Jafarzadeh H, Shalchi E, Shameli M. Fabrication and characterization of the mechanical properties of Al1050-CNT composites using accumulative channel-die compression bonding process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Apr 20;11(2):69-81. doi: 10.22034/IJME.2024.437634.1922 [In Persian]
- [28] Bagheri-Bami A, Honarpisheh M. An investigation of residual stress distribution in friction drilling of AA 7075 sheets by finite element modeling. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2024 Apr 20;11(2):20-36. doi: 10.22034/IJME.2024.436544.1920 [In Persian]
- [29] Horita Z, Fujinami T, Nemoto M, Langdon TG. Improvement of mechanical properties for Al alloys using equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001 Nov 23;117(3):288-92. doi: 10.1016/S0924-0136(01)00783-X
- [30] Beygelzimer Y, Varyukhin V, Synkov S, Orlov D. Useful properties of twist extrusion. *Materials Science and Engineering: A*. 2009 Mar 15;503(1-2):14-7. doi: 10.1016/j.msea.2007.12.055
- [31] Cherukuri B, Nedkova TS, Srinivasan R. A comparison of the properties of SPD-processed AA-6061 by equal-channel angular pressing, multi-axial compressions/forgings and accumulative roll bonding. *Materials Science and Engineering: A*. 2005 Nov 25;410:394-7. doi: 10.1016/j.msea.2005.08.024
- [32] Djavanroodi F, Ebrahimi M, Nayfeh JF. Tribological and mechanical investigation of multi-directional forged nickel. *scientific reports*. 2019 Jan 18;9(1):241. doi: 10.1038/s41598-018-36584-w
- [33] Nadammal N, Kailas SV, Suwas S. A bottom-up approach for optimization of friction stir processing parameters; a study on aluminium 2024-T3 alloy. *Materials & Design (1980-2015)*. 2015 Jan 1;65:127-38. doi: 10.1016/j.matdes.2014.09.005
- [34] Attarilar S, Djavanroodi F, Ebrahimi M, Al-Fadhlah KJ, Wang L, Mozafari M. Hierarchical microstructure tailoring of pure titanium for enhancing cellular response at tissue-implant interface. *Journal of Biomedical Nanotechnology*. 2021 Jan 1;17(1):115-30. doi: 10.1166/jbn.2021.3015
- [35] Hosseini S, Farajollahi M, Gode C, Ebrahimi M, Wang Q. Effect of surface condition on fatigue life of 7075 aluminium alloy. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2025 Oct 2;64(4):1875-85. doi: 10.1080/00084433.2024.2445969
- [36] Antunes RA, De Oliveira MC. Effect of surface treatments on the fatigue life of magnesium and its alloys for biomedical applications. In *Surface modification of magnesium and its alloys for biomedical applications* 2015 Jan 1 (pp. 283-310). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-1-78242-077-4.00009-7
- [37] Ravnkar D, Šturm R, Žagar S. Effect of shot peening on the strength and corrosion properties of 6082-T651 aluminium alloy. *Materials*. 2023 Jul 12;16(14):4976. doi: 10.3390/ma16144976
- [38] Chen H, Yang J, Zhou HA, Moering J, Yin ZH, Gong Y, Zhao K. Mechanical properties of gradient structure Mg alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017 Sep;48(9):3961-70. doi: 10.1007/s11661-017-4216-5
- [39] Attarilar S, Salehi MT, Al-Fadhlah KJ, Djavanroodi F, Mozafari M. Functionally graded titanium implants: Characteristic enhancement induced by combined severe plastic deformation. *PLoS One*. 2019 Aug 23;14(8):e0221491. doi: 10.1371/journal.pone.0221491
- [40] Maleki E, Bagherifard S, Astaraee AH, Sgarbazzini S, Bandini M, Guagliano M. Application of gradient severe shot peening as a novel mechanical surface treatment on fatigue behavior of additively manufactured AlSi10Mg. *Materials Science and Engineering: A*. 2023 Aug 10;881:145397. doi: 10.1016/j.msea.2023.145397
- [41] Shaeri MH, Shaeri M, Ebrahimi M, Salehi MT, Seyyedein SH. Effect of ECAP temperature on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2016 Apr 1;26(2):182-91. doi: 10.1016/j.pnsc.2016.03.003
- [42] Ebrahimi M, Gode C. Severely deformed copper by equal channel angular pressing. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2017 Apr 1;27(2):244-50. doi: 10.1016/j.pnsc.2017.03.002
- [43] Pandey V, Singh JK, Chattopadhyay K, Srinivas NS, Singh V. Influence of ultrasonic shot peening on corrosion

- behavior of 7075 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017 Nov 5;723:826-40. doi: [10.1016/j.jallcom.2017.06.310](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.06.310)
- [44] Sun Q, Yang M, Jiang Y, Lei L, Zhang Y. Achieving excellent corrosion resistance properties of 7075 Al alloy via ultrasonic surface rolling treatment. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022 Aug 5;911:165009. doi: [10.1016/j.jallcom.2022.165009](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165009)
- [45] Yazdani F, Rabiee SM, Jamaati R. Comparison of conventional and severe shot peening effects on the microstructure, texture, roughness, hardness, and electrochemical behavior of austenitic stainless steel. *Heliyon*. 2024 May 30;10(10). doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e31284](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31284)
- [46] Edward AB, Heyns PS, Pietra F. Shot peening modeling and simulation for RCS assessment. *Procedia Manufacturing*. 2017 Jan 1;7:172-7. doi: [10.1016/j.promfg.2016.12.044](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.044)
- [47] Miková K, Bagherifard S, Bokuvka O, Guagliano M, Trško L. Fatigue behavior of X70 microalloyed steel after severe shot peening. *International Journal of Fatigue*. 2013 Oct 1;55:33-42. doi: [10.1016/j.ijfatigue.2013.04.021](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.04.021)
- [48] Ebrahimi M, Pashmforoush F, Gode C. Evaluating influence degree of equal-channel angular pressing parameters based on finite element analysis and response surface methodology. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019 Feb;41(2):95. doi: [10.1007/s40430-019-1597-y](https://doi.org/10.1007/s40430-019-1597-y)
- [49] Ebrahimi M. Numerical analysis of conventional and modified equal channel angular pressing. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019 Sep;72(9):2263-73. doi: [10.1007/s12666-019-01675-3](https://doi.org/10.1007/s12666-019-01675-3)
- [50] Cao R, Yu X, Feng Z, Ojima M, Inoue J, Koseki T. Effect of annealing temperature and time on microstructure and mechanical properties of multilayered steel composite sheets. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016 Dec;47(12):6042-55. doi: [10.1007/s11661-016-3747-5](https://doi.org/10.1007/s11661-016-3747-5)