

## رفتار مکانیکی و خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تقویت‌شده با پودر آلومینا توسط فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی

رامین کرمی<sup>۱</sup>، امیر موسی اباذری<sup>۲</sup>، محمود ابراهیمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

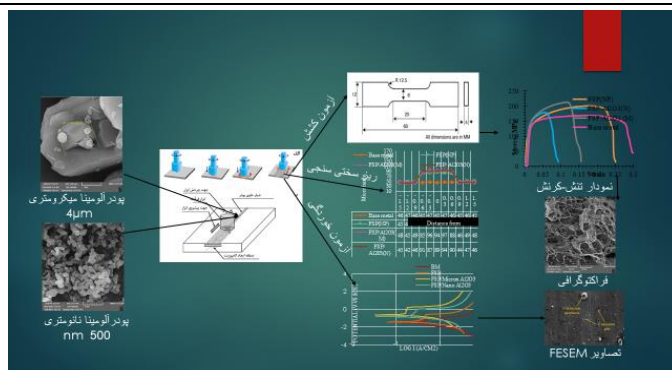
<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

### برجسته‌ها

- سختی و استحکام کششی در نتیجه فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی و افزایش ذرات تقویتی آلومینا بهبود می‌یابند.
- مقاومت به خوردگی آلومینیوم ۶۰۶۱ در اثر افزودن ذرات آلومینا و اعمال فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی افزایش پیدا می‌کند.
- نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت ذرات تقویتی آلومینا با اندازه میکرومتری نسبت به اندازه نانومتری است.

### چکیده گرافیکی



### مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۱۶

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۳

ارائه برخط: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱

\*نویسنده مسئول:

am.abazari@urmia.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

کامپوزیت زمینه فلزی

آلومینیوم ۶۰۶۱

خواص مکانیکی

خوردگی

### چکیده

در این تحقیق به بررسی پارامترهای فرآیندی و شرایط فرآوری سطحی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ طی فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی پرداخته می‌شود. پارامترهای مهم جهت فرآوری نمونه‌ها در انجام این فرآیند پس از بررسی کامل انتخاب‌شده‌اند. تأثیر پارامترهای فرآیندی مختلف شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی و عمق فروروی ابزار و اندازه ذرات تقویتی پودر آلومینا بر روی استحکام کششی و ریز سختی و رفتار خوردگی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. پس از تولید نمونه‌ها، آزمون کشش، شکست‌نگاری و سختی‌سنجی سطح رویه نمونه‌های مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که فرآوری با افزودن ذرات آلومینا در سایز میکرومتری استحکام کششی نهایی، سختی و مقاومت به خوردگی را نسبت به ذرات نانومتری بهبود بیشتری می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که رفتار خوردگی پس از افزودن ذرات تقویتی آلومینا به دلیل کاهش سرعت، جریان و پتانسیل خوردگی نسبت به فلز پایه بهبود می‌یابد. ارزیابی میکرو ساختار نمونه‌های فرآوری شده پس از آزمون خوردگی نشان می‌دهد که ذرات تقویتی آلومینا در اندازه میکرومتری باعث کاهش میزان حفرات می‌شود و منجر به ایجاد سطح نمونه صاف‌تری می‌شود.

## ۱- مقدمه

کامپوزیت‌ها می‌شود. راتی و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۷، عمق فروروی ابزار را بر روی الگوی پراکندگی ذرات تقویتی در ماتریس فلزی بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که عمق کم فروروی منجر به عدم تولید کافی گرما و تشکیل حفره می‌شود و سطح بالاتر عمق فروروی سبب خروج ذرات تقویتی و حتی چسبیدن مواد به شانه ابزار می‌شود؛ بنابراین جهت ساخت کامپوزیت‌هایی با سطحی عاری از نقص، عمق فروروی بهینه از پارامترهای مهمی است که بایستی مدنظر قرار گیرد.

اکومپایی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۹، نحوه بهبود عملکردی حاصل از ترکیبات مختلفی از فازهای تقویتی مورد استفاده در ساخت آلیاژ با زمینه آلومینیومی و کامپوزیت‌های هیبریدی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که چالش‌های بسیاری در طی فرآیند وجود دارد که حصول پارامترهای بهینه را با چالش مواجه می‌کند و جهت کسب نتایج معتبر بایستی گستره وسیعی از مواد را مورد مطالعه قرار داد. کومار و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۹، تأثیر پارامترهای فرآیندی و ویژگی‌های ابزار را بر مشخصه‌های مکانیکی کامپوزیت‌های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ که توسط فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی سنتز شده بودند را بررسی کردند و نشان دادند که اختلاط بهینه تقویت‌کننده‌ها و توزیع یکنواخت با زمینه آلومینیومی وابسته به انتخاب ابزار مناسب در فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی است.

در این پژوهش جهت مطالعه پارامترهای فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی و ساخت کامپوزیت زمینه فلزی و فرآوری سطحی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، تأثیر انواع پارامترهای فرآیندی شامل سرعت دورانی، سرعت پیشروی و عمق فروروی ابزار و اندازه ذرات تقویتی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت بر اساس نمونه‌های فرآوری شده، پارامترهای بهینه تعیین شد. طبق پارامترهای معین شده دو نمونه مطلوب و بی‌عیب از نظر شکل ظاهری در سه شرایط متفاوت ساخته شد:

- ۱) فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی بدون افزودن پودر
- ۲) فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی با افزودن پودر آلومینا با اندازه میکرومتری

با پیشرفت تکنولوژی و نیاز صنایع، تقاضا جهت بهبود خواص مکانیکی، خوردگی و ... آلیاژها افزایش یافته است. در این راستا، اخیراً استفاده از کامپوزیت‌های حاوی ذرات تقویتی با خواص بالای مکانیکی افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است [۱ و ۲]. فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی یکی از روش‌های رایج تولید کامپوزیت‌ها با استفاده از ذرات تقویتی است که بدون ذوب شدن ماده، عمل ریز کردن فلز پایه و تقویت‌کننده را انجام می‌دهد و منجر به بهبود خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی می‌شود. این فرآیند یک فرآیند سبز است زیرا هیچ‌گونه آسیبی به طبیعت وارد نمی‌کند [۳ و ۴]. کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی که از زمینه آلومینیومی و ذرات تقویتی تشکیل شده‌اند نقش مهمی در صنایع مختلف دارند. آلیاژهای آلومینیوم به دلیل چگالی پایین، نسبت بالای استحکام به وزن و مقاومت در برابر خوردگی، به طور گسترده‌ای در صنایع هوافضا، خودروسازی، دفاعی و کشتی‌سازی به کار می‌روند. خواص آلیاژهای آلومینیوم را می‌توان با افزودن ذرات تقویتی با پروسه‌های کنترل شده مانند فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی تغییر داد و کامپوزیت‌هایی مستحکم با پایه آلومینیوم ایجاد کرد [۵].

فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی روشی است بر مبنای ساخت، پردازش و سنتز مواد که از طریق آن می‌توان ویژگی‌های سطح را تغییر داد بدون اینکه خصوصیات فلز پایه تغییر چندانی کند [۶]. شارما و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۵، تأثیر ذرات تقویت‌کننده  $Si_3N_4$  را بر روی خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲-T۶ بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش درصد وزنی ذرات از ۳٪ تا ۱۲٪، برخی خواص مکانیکی از قبیل استحکام کششی و سختی افزایش یافته و شکل‌پذیری کاهش می‌یابد.

دینهاران [۸] در سال ۲۰۱۶، تأثیر ذرات سرامیکی مختلف ( $WC, Al_2O_3, TiC, B_4C, SiC$ ) را به عنوان ماده تقویتی بر استحکام آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ آزمایش کرد. نتایج به دست آمده نشان داد که کامپوزیت‌های ایجاد شده با استفاده از ذرات  $TiC$  منجر به سختی بالاتر نسبت به سایر

۳) فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی با افزودن پودر آلومینا با اندازه نانومتری

خواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی نمونه‌های تولیدی با یکدیگر و همچنین با آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ مقایسه شد. جهت بررسی و تحلیل نوع شکست و تأثیر ذرات تقویتی بر نوع شکست و میزان حفره‌های ایجادشده از تصاویر شکست نگاری بعد از آزمون کشش استفاده شد. در نهایت به منظور بررسی سطوح خورده شده، آزمون پلاریزاسیون خوردگی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت و با استفاده از تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی، سطوح نمونه‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

برای بالا بردن درصد شکل پذیری و تقویت استحکام کششی نمونه‌ها فرآیند آنیل نرم بر روی نمونه‌ها انجام شد. در این فرآیند نمونه‌ها در داخل کوره قرار داده می‌شود و دما از دمای محیط به دمای ۴۲۰ درجه سانتی‌گراد رسانده شده و در این دما به مدت دو ساعت نگهداری می‌شود. سپس حرارت‌دهی متوقف شده و قطعات تا رسیدن دما تا دمای اتاق در داخل کوره باقی می‌مانند سپس با استفاده از فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی عملیات فرآوری بر روی نمونه‌ها صورت گرفت. لذا جهت انجام فرآوری و تولید نانوکامپوزیت استفاده از دو نوع ابزار ضروری است: ابزار بدون پین و ابزار پین‌دار. ابزار اول شانه‌ای به قطر ۱۸ میلی‌متر دارد که برای بستن شیار حاوی پودر ضروری است. ابزار دوم جهت ایجاد لایه کامپوزیتی استفاده می‌شود و علاوه بر دارا بودن شانه‌ای به قطر ۱۸ میلی‌متر شامل یک پین با سطح مقطع مربعی به اندازه ۶×۶ میلی‌متر مربع و طول ۴/۸ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۱-الف). ابزارهایی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌اند از جنس فولاد گرم کار H13 است که به دلیل چقرمگی بالا و مقاومت به سایش مناسب در دماهای بالا و همچنین قابلیت ماشین‌کاری مطلوب آن انتخاب شدند. برای انجام فرآیند جهت تأمین دور مورد نیاز فرایند، از دستگاه فرز عمودی با توان ۱۶۰۰ دور بر دقیقه استفاده شد. روبندها، الگوی زیگزاگی بر روی نمونه‌ها، نقشه الگو و ابزارهای مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.



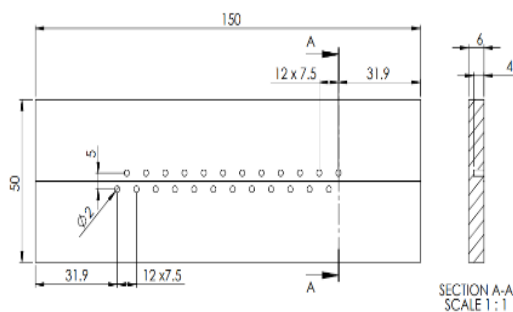
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

**شکل (۱):** الف) ابزارهای مورد استفاده در تحقیق حاضر؛ ب) تصویری از فرآوری و روبندها جهت نگه‌داشتن قطعه کار؛ ج) تصویر الگوی سوراخ زیگزاگی جهت پر کردن پودر؛ د) طرح الگوی زیگزاگی.

جهت انجام آزمون کشش از منطقه اغتشاشی و در راستای حرکت ابزار (استناد شده به استاندارد ASTM E8-E8M-11) و مطابق با شکل ۲ توسط دستگاه وایرکات برش خورده و آماده سازی شدند. پس از آزمون کشش، فرآیند شکست نگاری به منظور مشاهده مکانیسم شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی به دلیل قدرت تفکیک و عمق میدان بسیار خوب آن، از سطوح نمونه های شکسته شده صورت گرفت. به منظور اندازه گیری سختی نمونه ها، آزمون ریزسختی از نوع ویکرز بر لایه کامپوزیت ایجاد شده در سطح مقطع رویی نمونه اندازه گیری انجام گرفت. میزان بار دستگاه تست ریزسختی برابر با ۲۰۰ گرم و مدت زمان اعمال بار ۱۵ ثانیه تنظیم و فواصل انجام آزمون در ناحیه اندازه گیری برابر با ۳ میلی متر انتخاب شدند. با توجه به اینکه نیروی اعمالی در این آزمون بسیار اندک بوده و میزان ریزسختی قرائت شده به کیفیت سطح بسیار حساس است، بنابراین نمونه ها بایستی مطابق مراحل متالوگرافی پولیش شوند. لذا نمونه ها توسط ورق های سنباده کاربیدی تا شماره ۳۰۰۰ سنباده زده شده و سپس به وسیله دستگاه پولیش با پودر ساینده آلومینای ۰/۳ میکرومتری پولیش داده شد تا جهت انجام آزمون آماده سازی شوند.

آزمون پلاریزاسیون الکتروشیمیایی نمونه های فلز پایه، فرآوری شده بدون افزودن پودر، فرآوری شده با افزودن پودر آلومینا در اندازه میکرومتری، فرآوری شده با افزودن پودر آلومینا در اندازه نانومتری، در محلول ۳/۵ درصد وزنی NaCl با ۶۰ دقیقه زمان غوطه وری در محلول انجام شد. آزمون خوردگی الکتروشیمیایی بر اساس استاندارد ASTM G5 انجام شد. در این روش از سیستم سه الکترودی در محیط الکترولیت ۳/۵ درصد وزنی NaCl استفاده شد. الکتروکاتود کالومل به عنوان مرجع، پلاتین به عنوان الکتروکاتود کمکی و نمونه مورد ارزیابی به عنوان الکتروکاتود کار انتخاب شدند. مطالعه سطح خوردگی توسط تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی بعد از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از سطح نمونه ها انجام گرفت. آزمون پلاریزاسیون خوردگی سه نمونه فرآوری شده نسبت به نمونه فلز پایه بررسی شد و تصاویر بعد از آزمون خوردگی توسط

آنالیز کوانتومتری ورق های آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در جدول ۱ نشان داده شده است. جهت بهبود ساختار از ذرات نانومتری / میکرومتری آلومینا (۵۰۰ نانومتر و ۴ میکرومتر) به عنوان ماده تقویت کننده استفاده شد. نمونه های آلومینیومی با ابعاد ۶×۵۰×۱۲۰ میلی متر مکعب تهیه شده و بر روی بستر ماشین فرز قرار داده شدند. همچنین سوراخ هایی به قطر ۱۵ میلی متر در فاصله های مشخص از نوار حرکت قطعات طراحی شد. لازم به ذکر است که از الگوی سوراخ زیگزآگی جهت پر کردن پودر در سطح قطعه کار استفاده شده است. دلیل استفاده از طرح زیگزآگی بر روی نمونه های آلومینیومی جهت اختلاط سطحی و توزیع یکنواخت مواد افزودنی و کمتر شدن حفره در مقطع عرضی نمونه ها و در زیر ابزار فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی است.

از جمله خواص مکانیکی مهم نمونه ها می توان به استحکام کششی اشاره نمود که تعیین کننده میزان تنش قابل تحمل توسط قطعه تحت بارهای کششی می باشد. در این پژوهش استحکام کششی به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شده است. همچنین خوردگی منطقه اغتشاش یافته نمونه های تولید شده پس از فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی مسئله مهم دیگری است که نیاز به بررسی دارد. از نتایج آزمایش استحکام کششی می توان جهت استخراج مدول الاستیسیته، تنش نهایی، تنش شکست، درصد افزایش طول نمونه قبل از شکست، چقرمگی و ضربه پذیری استفاده نمود. برای بررسی رفتار کششی مواد فرآوری شده با استفاده از عملیات اصطکاکی-اغتشاشی، آزمایش استحکام کششی بر روی مواد کامپوزیت شده صورت گرفت. شکل ۲ ابعاد نمونه کشش، تصویر نمونه قبل از تست کشش و همچنین بعد از تست کشش را نشان می دهد. در ادامه، جدول ۲ پارامترهای فرآوری جهت انجام فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی را نشان می دهد.

نتایج آزمون کشش نمونه های فرآوری شده بدون پودر، فرآوری شده با افزودن ذرات تقویتی آلومینا در اندازه میکرومتری و فرآوری شده با افزودن ذرات تقویتی آلومینا در اندازه نانومتری نسبت به فلز پایه مقایسه گردید. نمونه ها

شکل (۲): ابعاد نمونه کشش: الف) طبق استاندارد ASTM E8-E8M-11 [۱۲]؛ ب) قبل تست کشش؛ ج) بعد تست کشش.

جدول (۲): پارامترهای فرآوری جهت انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

تعداد پاس	۳ پاس (پاس اول و سوم: راستگرد؛ پاس دوم: چپگرد)
زاویه تقعر شانه (درجه)	۵°
هندسه	مربعی
فرم ابزار	هر ضلع بین (mm) ۱۸
	ارتفاع بین (mm) ۶
	زاویه انحراف ابزار (درجه) ۴/۸
زمان نگهداری (S)	۳۰
عمق فروروی (mm)	۱۲
سرعت پیشروی (mm.min)	۰/۲۵
سرعت چرخشی (rpm/min)	۴۰
	۱۶۰۰

### ۳- نتایج و بحث

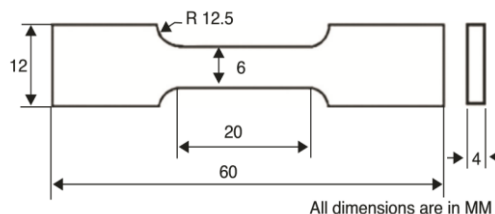
آزمایش‌های مورد استفاده برای بررسی تغییرات خواص مکانیکی و خوردگی نمونه‌ها با انجام فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی و افزودن ذرات الومینا در دو سایز نانو و میکرومتری و بدون پودر در این بخش مورد بحث قرار می‌گیرند.

یکی از مسائل مهم و با اهمیت، بررسی، کنترل و کاهش دادن عیوب حفره در مقطع عرضی منطقه اغتشاش یافته است که طی فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی در صورت استفاده از سرعت چرخشی پایین و سرعت پیشروی بالا ایجاد می‌شود. این عمدتاً در ابتدای قطعه به چشم می‌خورد که دلیل اصلی آن کمتر بودن دمای ابزار و نمونه، در طول فرآیند می‌باشد. همچنین در انتهای نمونه فرآوری شده به دلیل خارج شدن ابزار از قطعه کار و کم شدن مواد پلاستیکی در قسمت پیشرو باعث ایجاد عیب حفره در قسمت انتهایی نمونه می‌شود. عمدتاً تولید گرمای حرارتی ضعیف توسط سرعت چرخشی پایین، سرعت پیشروی بالا و از طرفی رسانایی حرارتی زیاد آلیاژ آلومینیوم، این سه عامل

میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطح نمونه‌ها گرفته شد.

جدول (۱): آنالیز شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ استفاده شده در این تحقیق

عناصر	درصد (%)
Al	۹۷/۷۲۳
Si	۰/۴۰۰
Mg	۰/۸۲۳
Fe	۰/۳۷۸
Cu	۰/۲۹۰
Ti	۰/۱۵۵
Zn	۰/۴۰۰
Mn	۰/۰۷۵
سایر عناصر	۰/۳۰۴



(الف)

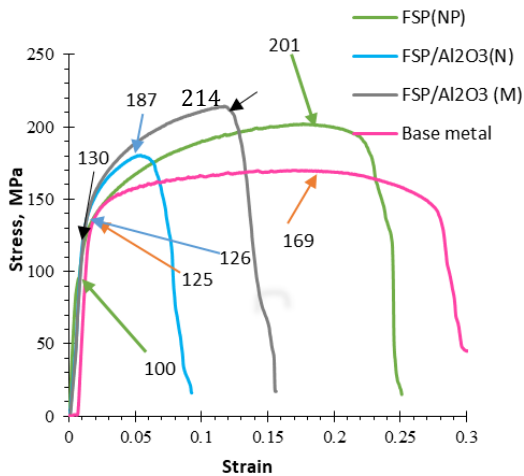


(ب)



(ج)

درصد کاهش پیدا کرده است. درصد ازدیاد طول برای نمونه‌های فرآوری شده بدون افزودن ذرات تقویتی، با ذرات تقویتی میکرومتری آلومینا و با ذرات تقویتی نانومتری آلومینا به ترتیب ۵، ۱۵/۵ و ۲۱/۵ به دست آمد که نسبت به فلز پایه کاهش یافته است.



شکل (۳): منحنی تنش و کرنش مهندسی فلز پایه و نمونه‌های فرآوری.

جدول (۳): نتایج آزمون کششی فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده

فلز پایه	FSP(NP)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (M)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (N)
استحکام نهایی (MPa)	۲۰۱	۲۱۴	۱۸۷
درصد اختلاف با فلز پایه	↑٪۱۹	↑٪۲۷	↑٪۱۱
استحکام تسلیم (MPa)	۱۰۰	۱۳۰	۱۲۶
درصد اختلاف با فلز پایه	↓٪۲۰	↑٪۴	↑٪۰/۸
ازدیاد طول (%)	۲۳	۱۲/۵	۶/۵
اختلاف با فلز پایه	↓ ۵	↓ ۱۵/۵	↓ ۲۱/۵

### ۳-۲- آزمون سختی سنجی

پروفیل سختی ناحیه اغتشاشی نمونه‌های فرآوری شده با افزودن پودر آلومینا تحت تأثیر اندازه دانه و اندازه ذرات

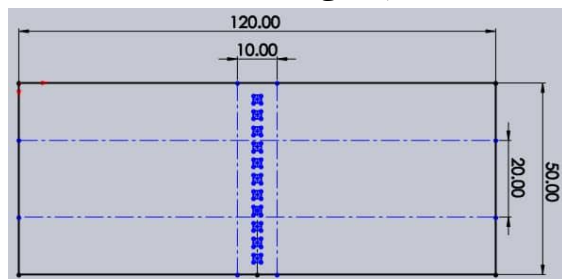
و شرایط محیطی و نوع الگوی پر کردن ذرات تقویتی و هندسه ابزار عواملی هستند که باهم منجر به سیالیت ضعیف مواد خمیری در اطراف ابزار در منطقه فرآوری شده می‌شود. در نهایت جریان ضعیف مواد پلاستیکی نمی‌تواند حفره به‌جای مانده از ابزار پیشرو را به‌موقع پر کند و نقص حفره ایجاد می‌شود.

### ۳-۱- آزمون کشش

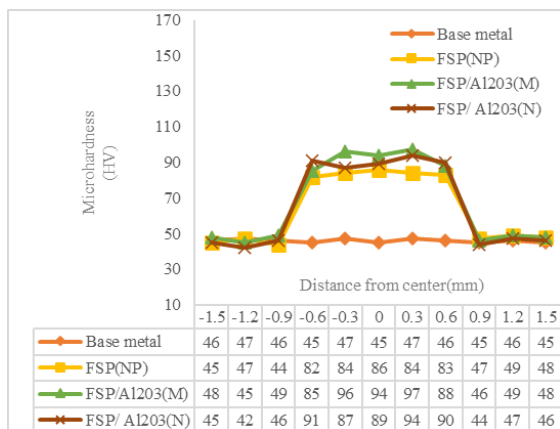
بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تست کشش (شکل ۳ و جدول ۳)، استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم با افزودن ذرات تقویتی میکرومتری آلومینا (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(M)) حدوداً به ترتیب به مقادیر ۲۱۴ و ۱۳۰ مگا پاسکال رسیده است که به ترتیب ۱/۲۶ و ۱/۰۵ برابر استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم فلز پایه (استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم فلز پایه به ترتیب برابر ۱۶۹ و ۱۲۵ مگا پاسکال) است. همچنین استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم برای نمونه فرآوری شده بدون افزودن ذرات تقویتی (FSP(NP)) به ترتیب برابر ۲۰۱ و ۱۰۰ مگا پاسکال می‌باشد که نسبت به فلز پایه به ترتیب ۱۹٪ افزایش و ۲۰٪ کاهش یافته‌اند. استحکام کششی نهایی و تسلیم نمونه فرآوری شده با افزودن ذرات تقویتی نانو آلومینا (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(N)) به ترتیب ۱۸۷ و ۱۲۶ مگا پاسکال است. همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، انعطاف‌پذیری این آلیاژ به دلیل استفاده از ذرات تقویتی سرامیکی با اندازه نانومتری بسیار کاهش یافته است و انعطاف‌پذیری این آلیاژ به میزان ۶/۵ درصد رسیده است که این مقدار ۷۷ درصد نسبت به فلز پایه کاهش یافته است. شکل ۳ منحنی تنش و کرنش مهندسی و جدول ۳ نتایج آزمون کششی فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده را نمایش می‌دهد.

بر اساس نتایج آزمون‌های کشش انجام شده که در جدول ۳ آورده شده است، مشخص می‌شود که فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی استحکام کششی نهایی را حدوداً تا ۱۹، ۲۷ و ۱۱ درصد به ترتیب برای نمونه‌های فرآوری شده بدون افزودن ذرات تقویتی، با ذرات تقویتی میکرومتری آلومینا و با ذرات تقویتی نانومتری آلومینا نسبت به فلز پایه افزایش می‌دهد. استحکام تسلیم حدوداً تا ۴ و ۰/۸٪ به ترتیب برای نمونه‌های فرآوری شده با ذرات تقویتی میکرومتری آلومینا و با ذرات تقویتی نانومتری آلومینا افزایش پیدا کرده است ولی برای نمونه‌های فرآوری شده بدون افزودن ذرات تقویتی ۲۰

معادل ۹۲ HV است؛ به عبارت دیگر این نانو کامپوزیت بیش از دو برابر سخت تر از آلیاژ اولیه با مقدار میانگین سختی HV ۴۶ است. نتایج آزمون سختی به طور کلی نشان دهنده تأثیر افزایشی فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی و افزودن ذرات تقویتی آلومینا در دو سایز بر رفتار سختی نمونه‌ها بود. به طوری که مقدار سختی نمونه‌های (NP) FSP/، FSP/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (N) به ترتیب ۸۲، ۱۰۰ و ۹۶ درصد بیشتر از فلز پایه می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل (۴): (الف) تصویر شماتیک نقاط سنجش سختی و (ب)

پروفیل ریزسختی از مقطع نمونه‌ها.

جدول (۴): نتایج تست سختی (HV) فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده

فلز پایه	FSP (NP)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (M)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (N)	میانگین سختی (HV)
۴۶	۸۴	۹۲	۹۰	
-	↑٪۸۲	↑٪۱۰۰	↑٪۹۶	اختلاف با فلز پایه

تقویتی در نواحی مختلف می‌باشد و پروفیل سختی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ یکنواخت تر از پروفیل‌های نمونه‌های فرآوری شده است. ریز شدن دانه‌ها در مورد نمونه‌های کامپوزیتی مربوط به انجام فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی و حضور نسبتاً یکنواخت ذرات آلومینا است که به عنوان هسته عمل می‌کنند و از رشد دانه به هنگام تبلور مجدد جلوگیری می‌کنند [۱۳]. مکانیسم‌های افزایش سختی عبارت‌اند از:

- (۱) تغییر شکل پلاستیک شدید
  - (۲) توزیع یکنواخت ذرات تقویتی درون ماتریس آلومینیوم به هنگام فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی
  - (۳) ریزدانه شدن طی فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی
- با بررسی سختی نمونه‌ها قبل و بعد از فرآیند، مشاهده می‌شود که سختی در همه نمونه‌ها افزایش یافته است. دلایل افزایش سختی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:
- (۱) ریز شدن شدید دانه به هنگام تبلور مجدد
  - (۲) ذرات آلومینا که فاز سخت تر هستند به صورت یکنواخت در زمینه آلومینیوم توزیع شده‌اند و یک کامپوزیت تقویت شده با ذرات را به وجود آوردند.
  - (۳) در روش استحکام‌دهی رسوبی هرچقدر از ذرات تقویتی در اندازه کوچک و تعداد بیشتر استفاده گردد، میزان سختی افزایش پیدا خواهد کرد.
- تغییرات سختی بر اساس تست سختی سنجی ویکرز در شکل ۴ الف تصویر شماتیک نقاط سنجش سختی و ۴ ب پروفیل ریزسختی از مقطع نمونه‌ها آورده شده است و در جدول ۴ نتایج تست سختی فلز پایه و نمونه‌های فرآوری شده را آورده شده است.

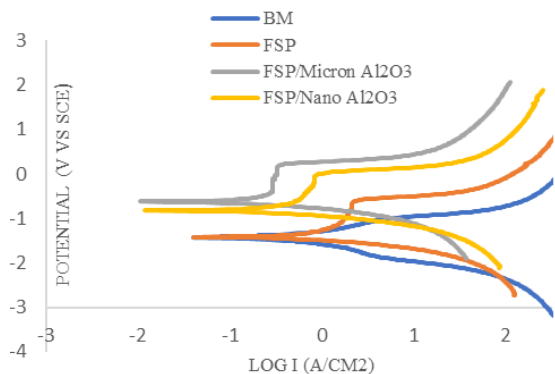
با مشاهده جدول ۴ ملاحظه می‌شود که نمونه تولید شده با ذرات میکرومتری به طور کلی سختی بیشتری را نسبت به نمونه تولیدی با پودر نانومتری از خود نشان می‌دهد؛ چراکه اندازه دانه متوسط در نمونه تولیدی با ذرات میکرومتری بزرگ‌تر از نمونه تولیدی با پودر نانومتری است. بررسی اطلاعات شکل ۴ نشان می‌دهد که نقش ذرات تقویت کننده و نحوه توزیع آن‌ها تأثیر زیادی بر میزان سختی نمونه‌ها دارد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین مقدار میانگین سختی برای نمونه‌های فرآوری شده با ذرات تقویتی میکرومتری آلومینا FSP/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) به دست آمده است که



FESEM حذف گردند. مقادیر چگالی جریان خوردگی، پتانسیل خوردگی، سرعت واکنش‌های آندی و کاتدی با رسم خطوط مماس بر روی قسمت خطی شاخه‌های آندی و کاتدی محاسبه شد. این مقادیر همراه با نرخ خوردگی و مقاومت قطبش در جدول ۵ فهرست شده‌اند. مقدار نرخ خوردگی، نشان‌دهنده کاهش وزن در سال به‌عنوان شاخصی از خوردگی محاسبه شد [۱۴]. جدول ۵ پارامترهای الکتروشیمیایی خوردگی متوسط منحنی‌های پلاریزاسیون را نشان می‌دهد. رفتار خوردگی توسط منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیکی نمونه‌ها در حالت آنیل شده و پس از ۳ پاس فرآوری در شکل ۵ نشان داده شده است.

**جدول (۵):** پارامترهای الکتروشیمیایی خوردگی منحنی‌های پلاریزاسیون

کد نمونه	مقاومت خوردگی (Ohm)	پتانسیل خوردگی (V)	جریان خوردگی $\times 10^{-5}$ ( $A.cm^{-2}$ )	سرعت خوردگی (mm/y)
آلومینیوم ۶۰۶۱	۳۰۱/۴	- ۱/۴۴۵	۶/۷۲	۰/۹۸۶
FSP/(NP)	۴۰۷/۷	- ۱/۴۱۵	۴/۸۱	۰/۴۶۳
FSP/(M)	۹۵۰/۰	- ۰/۶۴۲	۱/۹۷	۰/۲۰۴
FSP/(N)	۶۱۰/۲	- ۰/۸۵۶	۲/۲۲	۰/۳۴۶



**شکل (۵):** منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های پایه و فرآوری شده با ذرات آلومینا.

نرخ خوردگی با استفاده از نرم‌افزار VersaSTAT4 محاسبه شده است. پارامترهای مهم پلاریزاسیون الکتروشیمیایی در جدول ۵ فهرست شده است. مشاهده

به‌طور خلاصه می‌توان نتایج آنالیز تست کشش و سختی را به این صورت بیان کرد:

- طبق نتایج شکل ۳، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی نمونه‌ها بعد از انجام فرآیند در حالت حضور و عدم حضور ذرات تقویت‌کننده در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ افزایش یافته است. به‌طور کلی، استحکام آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ مستقل از حضور و یا عدم حضور ذرات تقویت‌کننده پس از اعمال فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی افزایش خواهد یافت.
- طبق نتایج شکل ۳، انعطاف‌پذیری نمونه‌ها بعد از اعمال فرآیند، در حضور و عدم حضور ذرات تقویت‌کننده در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ پس از فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته است.
- بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۴ می‌توان ادعا کرد که نمونه‌های تقویت شده با ذرات آلومینای میکرومتری در مقایسه با سایر نمونه‌ها افزایش سختی بیشتری از خود نشان می‌دهند؛ ولی به‌طور کلی، سختی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ مستقل از حضور و یا عدم حضور ذرات تقویت‌کننده پس از فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی افزایش خواهد یافت.

### ۳-۳- آزمون خوردگی

جهت آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمون خوردگی، از سنباده‌زنی و تمیزکاری سطح، شستشو و چربی‌زدایی با استون انجام می‌شود و قبل از غوطه‌ور شدن با آب مقطر شسته و خشک می‌شوند. نمونه‌های مورد آزمایش، عمود بر ناحیه اغتشاش به ابعاد  $10 \times 10 \times 6$  میلی‌متر انتخاب گردید و بقیه سطح نمونه به‌جز روی سطح مدنظر با لاک پوشانده شدند. سپس آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های مختلف پس از ۶۰ دقیقه غوطه‌وری در محلول ۳/۱۵ وزنی NaCl با  $PH=7$  انجام شد تا مقاومت به خوردگی مطابق با استاندارد آزمون خوردگی الکتروشیمیایی ASTM G5 محاسبه گردد. وزن نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون خوردگی اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها با اولتراسونیک تمیز شدند تا نمک‌های چسبیده به سطح برای بررسی سطوح زیر میکروسکوپ



فعال در هنگام تماس با محیط خورنده به طور ناگهانی در مقابل خوردگی فوق‌العاده مقاوم می‌شوند؛ و آن به واسطه پدیده‌ای است که رویین شدن یا پسیو شدن نامیده می‌شود. در رویین شدگی، فلز واکنش داده و لایه‌ای از محصولات خوردگی بسیار نازک که نامرئی است ایجاد می‌کند و مانعی است که خوردگی را چندین مرتبه کاهش می‌دهد [۱۵]. در مورد آلومینیوم و آلیاژهای آن لایه اکسیدی چسبنده در تماس آلیاژ با هوا به سرعت تشکیل می‌شود و این به معنی رویین شدن آلیاژ پیش از آغاز آزمون است؛ این لایه اکسیدی چسبنده در سطح، عامل ایجاد مقاومت به خوردگی در آلیاژهای آلومینیوم است. در این آزمون نمونه FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) دارای بیشترین مقاومت به خوردگی را نشان می‌دهد (شکل ۵) که شاخه آندی در این نمونه به سمت مقادیر منفی‌تر چگالی جریان منتقل شده است. این رفتار می‌تواند تحت تأثیر استحکام یافتن لایه اکسیدی سطح آلومینیوم ۶۰۶۱ باشد. بعلاوه ذرات تقویتی داخل نمونه نقش برجسته‌ای بر بهبود مقاومت به خوردگی ایفا می‌کنند. مشاهده شد که مقاومت به خوردگی ناحیه اغتشاش تهیه‌شده توسط FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) به طور قابل توجهی در مقایسه با فلز پایه بهبود یافته است. مقاومت پلاریزاسیون، پتانسیل خوردگی، دانسیته جریان خوردگی و سرعت خوردگی ناحیه اغتشاش در این نمونه به ترتیب ۹۵۰/۰ اهم (بالترین)، ۰/۶۴۲- ولت (کمترین)، ۱/۹۷×۱۰<sup>-۵</sup> آمپر بر سانتی‌متر مربع (کمترین) و ۰/۲۰۴ میلی‌متر در سال (کمترین) به دست آمد.

منحنی پلاریزاسیون (شکل ۵)، خطوط تافلی فلز پایه و سه نمونه فرآوری شده را که هرکدام دارای دو شاخه کاتدی و آندی می‌باشد، نشان می‌دهد؛ محل تلاقی این خطوط، جریان و پتانسیل خوردگی است. در این آزمون جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی نسبت به الکتروود مرجع کالومل اندازه‌گیری می‌شود. همچنین مقاومت پلاریزاسیون، R<sub>p</sub>، نشانگر مقاومت کامپوزیت در مقابل نفوذ محلول الکترولیت مورد نظر (NaCl) است. با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده و نمودار پلاریزاسیون ترسیم‌شده توسط این داده‌ها مشاهده می‌شود که سرعت خوردگی با جریان خوردگی رابطه مستقیم دارد. نرخ خوردگی یا سرعت

می‌شود که با فرآوری آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ مقادیر جریان خوردگی و سرعت خوردگی کاهش و مقاومت خوردگی افزایش می‌یابد. فرآوری نمونه‌ها با ذرات تقویتی آلومینا با سایز میکرومتری باعث کاهش جریان و سرعت و افزایش مقاومت خوردگی بیشتری نسبت به سایر فرایندهای فرآوری شده است. استفاده نکردن از ذرات تقویتی طی فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی به دلیل اینکه انرژی پایینی طی فرآوری صرف می‌شود، ممکن است باعث ایجاد نرخ خوردگی بالاتری شود زیرا در این شرایط می‌تواند سلول‌های گالوانیکی تشکیل شود که منجر به خوردگی گالوانیکی و تشکیل حفره‌های اولیه برای خوردگی حفره‌ای گردد.

نتایج آزمون خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ حاکی از تشکیل لایه پسیو در سطح نمونه است و بعلاوه افزودن ذرات آلومینا باعث ایجاد فصل مشترکی از لایه پسیو و کامپوزیت در سطح نمونه‌های فرآوری شده با ذرات سرامیکی می‌شود. سه عامل مهم مقاومت به خوردگی نمونه‌ها را تحت تأثیر می‌دهد:

- ۱) پس از فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی، سرعت خنک‌سازی نمونه فرآوری شده که تشکیل آرایش دندریتی را کنترل می‌کند.
- ۲) نحوه توزیع (یکنواخت و غیریکنواخت) ذرات تقویتی آلومینا در فلز پایه
- ۳) رفتار الکتروشیمیایی در بخش‌های آندی و کاتدی منحنی پلاریزاسیون نمونه

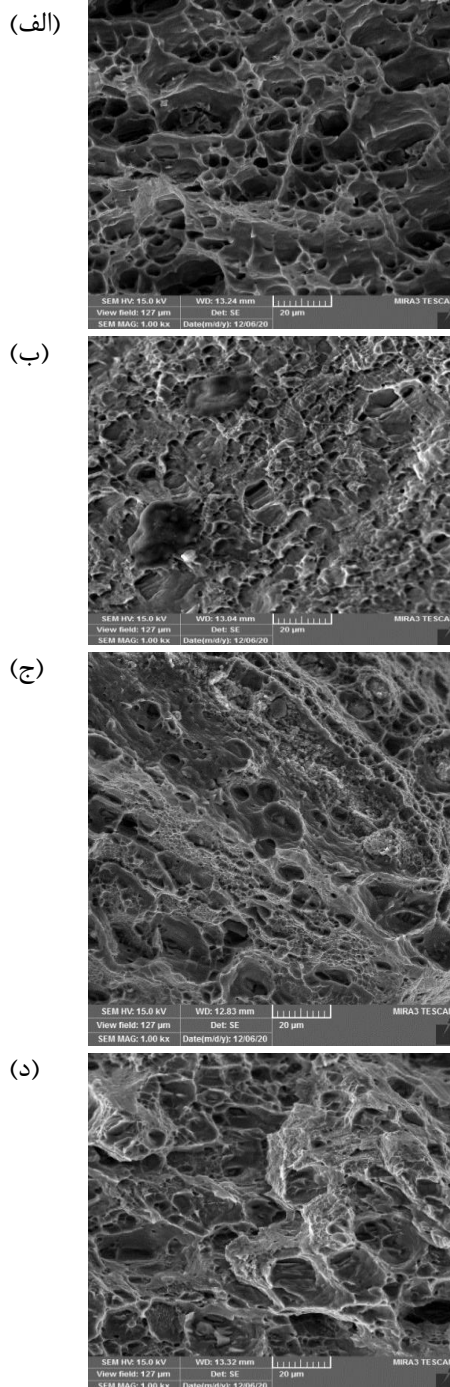
رفتار خوردگی نمونه‌های مختلف از طریق پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و تصاویر FESEM بعد از آزمون خوردگی تجزیه و تحلیل می‌شود و در ادامه به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرند.

### ۱-۳-۳- رفتار قطبی شدن

به منظور دریافت درک بهتری از رفتار خوردگی در نمونه‌های مختلف آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک روی همه نمونه‌ها انجام گرفت و نتایج آن استخراج و گزارش شده است. در شاخه آندی نمودار، جریان خوردگی به صورت ناگهانی افزایش می‌یابد که این به دلیل حضور لایه رویین روی سطح آلیاژ قبل از شروع آزمون است. برخی از فلزات

## ۴-۳- آنالیز شکست

شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌های مطالعه شده را برای الف) فلز پایه، ب) FSP (NP) ج) FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) د) FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (N) نشان می‌دهد.



خوردگی،  $R_{corr}$ ، در فلزات برحسب میلی‌متر در سال با فرمول زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$R_{corr} = \frac{87.6w}{\rho AT} \quad (1)$$

در این رابطه  $W$  کاهش وزن نمونه (گرم)،  $\rho$  چگالی نمونه ( $gr/mm^3$ )،  $A$  سطح خوردگی ( $mm^2$ ) و  $T$  زمان خوردگی (سال) است.

طبق نتایج جدول ۵ در آزمون خوردگی، مقاومت، پتانسیل، جریان و سرعت خوردگی برای نمونه FSP/(NP) به ترتیب ۳۵٪ (افزایش)، ۲٪ (کاهش)، ۲۸٪ (کاهش) و ۵۳٪ (کاهش)، برای نمونه FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) به ترتیب ۲۱۵٪ (افزایش)، ۵۶٪ (کاهش)، ۷۱٪ (کاهش) و ۷۹٪ (کاهش) و برای نمونه FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (N) به ترتیب ۱۰۲٪ (افزایش)، ۴۱٪ (کاهش)، ۶۷٪ (کاهش) و ۶۵٪ (کاهش) نسبت به فلز پایه تغییر یافته‌اند. مقادیر جدول ۵ بیانگر مقاومت به خوردگی بالای تمامی نمونه‌های فرآوری شده نسبت به فلز پایه می‌باشد. مضافاً اینکه نمونه FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) دارای بیشترین مقاومت به خوردگی الکتروشیمیایی در مقایسه با سایر نمونه‌ها است. با مقایسه سایر نمونه‌ها، مقاومت به خوردگی نمونه‌ها را می‌توان به صورت زیر مقایسه کرد:

$$FSP/Al_2O_3 (M) > FSP/Al_2O_3 (N) > FSP (NP) > BM$$

آزمون خوردگی الکتروشیمیایی نانوکامپوزیت‌های فرآوری شده نشان می‌دهد که نمونه FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) از نظر جریان خوردگی ۷۱ درصد و نمونه FSP/(NP) ۲۸ درصد و نمونه FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (N) ۶۷ درصد نسبت به نمونه فلز پایه مقاومت به خوردگی کمتری دارند. همچنین بیشترین مقاومت خوردگی (کمینه سرعت و جریان خوردگی) برای نمونه FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) می‌باشد.

بر اساس تحقیق انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که آلومینیوم کامپوزیت شده با ۵ درصد ذرات آلومینا در سایز میکرومتری از نظر استحکام کششی، سختی و پارامترهای خوردگی می‌تواند یک نمونه مطلوب و بهینه برای به دست آوردن یک نانوکامپوزیت زمینه فلزی آلومینیومی بسیار مقاوم از نظر خواص مکانیکی و خوردگی باشد.

شکست‌نگاری، ذرات نانو را در سطح شکست در این تصویر نمی‌توان دید.

توزیع ذرات تقویتی آلومینا در منطقه فرآوری شده در تصاویر میکروسکوپ نوری به‌وضوح قابل‌مشاهده نیست ولی با میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) می‌توان آن‌ها را شناسایی کرد (شکل ۷). این موضوع نشان می‌دهد که فرایند فرآوری به شکل قابل قبولی انجام شده است و توزیع ذرات به‌صورت یکنواخت و مطلوب انجام شده است. در نمونه‌های فرآوری شده با ذرات میکرومتری، سطوح شکست به‌صورت حفره‌های عمیق و کشیده تشکیل می‌شود. در این نمونه‌ها ماهیت شکست از شکست نرم در فلز پایه به شکست ترد تغییر می‌کند. به‌طوری‌که سطح شکست نمونه  $FSP/Al_2O_3 (M)$  سطحی نسبتاً هموار با حفراتی بسیار ریز و سطحی بر جای می‌گذارد. افزایش تعداد حفرات در نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با نمونه آلیاژ آلومینیوم  $FSP (NP)$  و  $۶۰۶۱$  تأثیرپذیر از افزایش مکان‌های مناسب برای جوانه‌زنی حفرات است. سطوح شکست نمونه‌های نانو کامپوزیتی  $FSP/Al_2O_3 (N)$  در شکل ۵ آورده شده است. ذرات آلومینا در این شکل به نحوه مطلوبی در سراسر ناحیه شکست توزیع شده‌اند؛ این توزیع یکنواخت ناشی از انجام سه پاس فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی است. سطوح شکست نمونه‌های نانو کامپوزیتی، تشکیل شده از تعداد زیادی حفرات کم‌عمق، کوچک و نزدیک به هم است. این مشاهدات می‌تواند حاکی از این واقعیت باشد که قابلیت تغییرشکل پلاستیک در نمونه‌های کامپوزیتی به دلیل استفاده از ذرات سرامیکی آلومینا کاهش یافته باشد. همچنین استفاده کردن از ذرات آلومینا در سایز نانویی به علت سایز خیلی کوچک این پودر و آگلومره شدن ذرات در ناحیه اغتشاش و عدم توزیع یکنواخت ذرات نسبت به نمونه میکرومتری، می‌تواند علت کاهش نسبی استحکام کششی این نمونه نسبت به نمونه فرآوری شده با ذرات میکرومتری باشد.

#### ۱-۴-۳- آنالیز خوردگی سطوح شکست

شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطوح خورده شده بعد از ۶۰ دقیقه غوطه‌وری در

شکل (۶): تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطوح شکست نمونه‌ها: الف) فلز پایه؛ ب)  $FSP (NP)$ ؛ ج)  $FSP/Al_2O_3 (M)$ ؛ د)  $FSP/Al_2O_3 (N)$ .

برای نمونه‌های آلیاژ اولیه (۶ الف) و فرآوری شده بدون افزودن ذرات تقویتی (۶ ب) نشان داده شده است. گودی‌های بزرگ و عمیق و همچنین ناهمواری‌هایی که در تصویر مشاهده می‌شود از مشخصه‌های شکست نرم می‌باشد. بررسی این تصاویر نشان می‌دهد که این دو نمونه در آزمون کشش دچار شکست نرم شده‌اند. شکست نرم در فلزاتی با خاصیت چکش‌خواری مطلوب و چقرمگی بالا مانند آلومینیوم به‌صورت بین‌دانه‌ای در بارهای اعمالی زیاد رخ می‌دهد. شکست نرم با جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن میکرو حفرات در نزدیکی مرکز مقطع نمونه تحت تنش آغاز می‌گردد.

همان‌طور که در شکل ۶ الف نشان داده شده است فلز پایه دارای تعداد زیادی برجستگی‌ها، پارگی‌های بزرگ، لبه‌های برشی بزرگ و تعداد زیادی فرورفتگی‌های عمیق است که نشان‌دهنده حالت شکست شکل‌پذیر است. وجود حفره‌های عمیق و درشت و همچنین نرم شدن قطعه به دلیل فرآیند آنیل قبل از فرآیند اصلی در نمونه فلز پایه منجر به شکست نرم در آزمون کشش می‌شود. شکل ۶ ب نشان می‌دهد که نمونه  $FSP (NP)$  دارای تعداد زیادی گودی‌های کم‌عمق کوچک و تقریباً یکنواخت است که نشان‌دهنده حالت شکست شکننده‌تر و تردتر نسبت به فلز پایه است. حفره‌های ریز و سطحی در مقطع شکسته شده به دلیل ریزساختار و تبلور مجدد ایجاد شده طی این فرآیند تشکیل شده است.

نمونه  $FSP/Al_2O_3 (M)$  (شکل ۶ ج) دارای تعداد زیادی گودی‌های بزرگ کم‌عمق با تجمع ذرات آلومینا و سطح غیریکنواخت بوده که نشان‌دهنده حالت شکست شکننده و ترد است. نمونه  $FSP/Al_2O_3 (N)$  دارای تعداد زیادی پارگی‌های ریز و لبه‌های برشی بزرگ می‌باشد و دارای چاله‌های ریزودرشت زیادی با سطح غیریکنواخت است که نشان‌دهنده احتمال بالای تجمع ذرات آلومینا در سایز نانو در این نمونه است؛ بنابراین این نمونه، شکست ترد را تجربه می‌کند. به دلیل محدودیت بزرگ‌نمایی تصاویر

مشهود است. شدت خوردگی با توجه به تعداد حفره‌های زیاد موجود روی سطح خورده شده نمونه بدون افزودن ذرات تقویتی، زیاد می‌باشد.

با توجه به شکل ۷ ب مکانیسم خوردگی در نمونه‌های فرآوری شده با افزودن ذرات تقویتی آلومینا در اندازه میکرومتری، از نوع خوردگی حفره‌ای است و شدت خوردگی با توجه به تعداد حفره‌های موجود روی سطح، نشان می‌دهد که میزان خوردگی از نمونه بدون پودر و نمونه‌های فرآوری شده با افزودن ذرات تقویتی آلومینا در اندازه نانومتری کم‌تر است. نمونه  $Al_2O_3$  (M) به علت سایز بزرگ‌تر ذرات تقویتی نسبت به  $Al_2O_3$  (N) مقاومت خوردگی بیشتری از خود نشان داده و با توجه به اینکه جریان خوردگی با سرعت خوردگی رابطه مستقیم دارد سرعت و جریان خوردگی در نمونه  $FSP/Al_2O_3$  (M) نسبت به نمونه فلز پایه کاهش پیدا می‌کند.

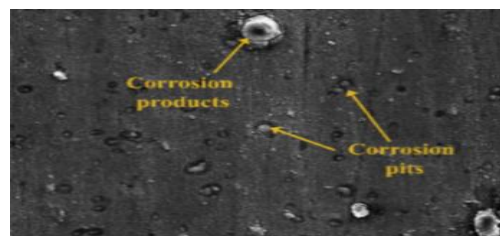
در تصویر ۷ ج، ذرات نانومتری آلومینا در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به‌عنوان بازدارنده خوردگی کاتدی عمل می‌کنند و چون در آند اکسیداسیون اتفاق می‌افتد و حالت فدا شونده دارد به همین دلیل حداقل میزان جریان خوردگی در آن اتفاق می‌افتد. همچنین در نمونه حاوی ذرات نانومتری آلومینا دسته‌ای از حفرات ریزودرشت به‌صورت پراکنده بر روی سطح خورده شده قابل مشاهده است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر افزودن ذرات آلومینا در دو سایز میکرومتری و نانومتری با نسبت حجمی ۵٪ و بدون افزودن پودر طی سه پاس فرآیند اصطکاکی - اغتشاشی بر روی خواص مکانیکی و رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ مطالعه شد و نتایج زیر به دست آمد:

- نتایج ارائه شده نشان می‌دهند که فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی، استحکام کششی نهایی را حدوداً تا ۱۹، ۲۷ و ۱۱ درصد به ترتیب برای

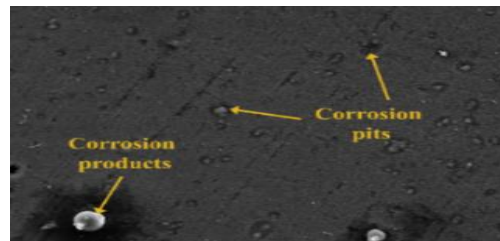
محلول ۳/۵ % NaCl آزمون خوردگی الف) FSP (NP) ب)  $FSP/Al_2O_3$  (M) ج)  $FSP/Al_2O_3$  (N) را نشان می‌دهد. آزمون پلاریزاسیون خوردگی سه نمونه فرآوری شده نسبت به نمونه فلز پایه بررسی شد و تصاویر بعد از خوردگی توسط میکروسکوپ FE-SEM گرفته شد. نتایج نشان داد که پتانسیل خوردگی پس از فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی به میزان قابل توجهی تغییر نکرده است. کامپوزیت‌ها با وجود بهینه‌سازی پارامترها عمدتاً به دلیل ایجاد گودال‌ها و ترک‌ها در سطوح سطحی یا مقطع عرضی اکثر نمونه‌ها حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، حفره‌های بیشتری نسبت به فلز پایه دارند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۷): تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی گسیل میدانی از سطوح خورده شده بعد از ۶۰ دقیقه غوطه‌وری در محلول ۳/۵٪ NaCl (آزمون خوردگی) الف) FSP (NP) ؛ ب)  $FSP/Al_2O_3$  (M)؛ ج)  $FSP/Al_2O_3$  (N).

با توجه به شکل ۷ الف مشاهده می‌شود که در نمونه فرآوری شده بدون افزودن ذرات تقویتی، مکانیسم خوردگی از نوع خوردگی حفره‌ای است و محصولات خوردگی کاملاً



مقاومت به خوردگی نمونه‌ها می‌شود به طوری که پتانسیل خوردگی نمونه‌های FSP/(NP)، FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) و FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (N) به ترتیب حدود ۲، ۵۶ و ۴۱ درصد کمتر از مقدار مشابه در فلز پایه بودند. همچنین سرعت و جریان خوردگی این نمونه‌ها به ترتیب (۲۸، ۵۳)، (۷۹، ۷۱) و (۶۵، ۶۷) درصد کمتر از فلز پایه بودند. همچنین مقاومت پلاریزاسیون نیز در سه نمونه به ترتیب برابر است با ۳۵، ۲۱۵ و ۱۰۲ درصد که افزایش چشم‌گیری نسبت به فلز پایه داشته و این بیانگر مقاومت به خوردگی بالاتر نمونه‌های کامپوزیت و فرآوری شده نسبت به فلز پایه می‌باشد.

در نهایت بر اساس تحقیق انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که آلومینیوم کامپوزیت و فرآوری شده با ۵ درصد وزنی ذرات آلومینا در سایز میکرومتری از نظر استحکام کششی، سختی و مقاومت به خوردگی یک نمونه مطلوب و بهینه جهت تولید نانو کامپوزیت زمینه فلزی آلومینیومی بسیار مقاوم از نظر خواص مکانیکی و خوردگی است.

نمونه‌های FSP/(NP)، FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) و FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (N) نسبت به فلز پایه افزایش می‌دهد.

(۲) نتایج آزمون سختی ارائه شده در شکل ۴ و جدول ۴ نشان می‌دهند که افزودن ذرات تقویتی آلومینا در هر دو سایز میکرو و نانو باعث بهبود رفتار سختی نمونه‌ها می‌شود. به طوری که مقدار سختی نمونه‌های FSP/(NP)، FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) و FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (N) به ترتیب ۸۲، ۱۰۰ و ۹۶ درصد بیشتر از فلز پایه اندازه‌گیری شد. در نمونه FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) مکانیسم‌های تقویت‌کننده به دلیل استفاده از پودر تقویتی در سایز میکرومتری تأثیر بیشتری نسبت به مکانیسم‌های تضعیف‌کننده داشتند؛ به طوری که در بین تمامی نمونه‌های فرآوری شده و فلز پایه، بیشترین مقدار سختی مربوط به نمونه FSP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (M) می‌باشد. (۳) نتایج آزمون خوردگی نشان می‌دهند که استفاده از فرآیند اصطکاکی-اغتشاشی منجر به افزایش

## ۵- مراجع

[6] Mishra R, Charit I. Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite. *Materials Science and Engineering: A*. 2003; 341 (1): 307-310.

[7] Sharma P, Sharma S, Khanduja D. Production and some properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> reinforced aluminium alloy composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2015; 3(3): 352-359.

[8] Dinaharan I. Influence of ceramic particulate type on microstructure and tensile strength of aluminum matrix composites produced using friction stir processing. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2016; 4(2): 209-218.

[9] Rathee S, Maheshwari S, Siddiquee AN, Srivastava M. Effect of tool plunge depth on reinforcement particles distribution in surface composite fabrication via friction stir processing. *Defence technology*. 2017; 13(2): 86-91.

[10] Ikumapayi OM, Akinlabi ET, Pal SK, Majumdar JD. A survey on reinforcements used in friction stir processing of aluminium metal matrix and hybrid composites. *Procedia Manufacturing*. 2019; 35: 935-40.

[1] Ravindran P, Manisekar K, Rathika P, Narayanasamy P. Tribological properties of powder metallurgy-Processed aluminium self lubricating hybrid composites with SiC additions. *Materials & Design*. 2013; 45: 561-70.

[2] Monikandan VV, Joseph MA, Rajendrakumar PK. Dry sliding wear studies of aluminum matrix hybrid composites. *Resource-Efficient Technologies*. 2016; 2: S12-24.

[3] Raafat M, Mahmoud TS, Zakaria HM, Khalifa TA. Microstructural, mechanical and wear behavior of A390/graphite and A390/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> surface composites fabricated using FSP. *Materials Science and Engineering: A*. 2011; 528(18): 5741-6.

[4] Adem K, Uygur I, Cete E. Surface modification of aluminum by friction stir processing. *Journal of materials processing technology*. 2011; 211(3): 313-317.

[5] Sharma P, Sharma S, Khanduja D. Production and some properties of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> reinforced aluminum alloy composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2015; 3(3): 352-359.





effect of addition of hardystonite on the strength, ductility and corrosion resistance of WE43 magnesium alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;13:1855-65.

[15] Thompson NG, Payer JH. DC electrochemical test methods. Volume 6 of Corrosion testing made easy NACE International, 1998.

[16] Rao DS, Ramanaiah N. Evaluation of Wear and Corrosion Properties of AA6061/TiB<sub>2</sub> Composites Produced by FSP Technique. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2017; 5(6):353-361.

[11] Kumar M, Prasanth R, Selvakumar B, Ranjith V. A review on friction stir processing of Al6061 surface composites. In AIP Conference Proceedings 2019; 2128(1): 020031.

[12] ASTM E8/ E8M-21, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

[13] Atul K, Pal K, Mula S. Effects of cryo-FSP on metallurgical and mechanical properties of stir cast Al7075-SiC nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021; 852: 156925.

[14] Eivani AR, Tabatabaei F, Khavandi AR, Tajabadi M, Mehdizade M, Jafarian HR, Zhou J. The



## Mechanical and Corrosion Behavior of Friction Stir Processed 6061 Aluminum Alloy Reinforced by Alumina Powder

Ramin Karami<sup>1</sup>, Amir Musa Abazari<sup>2\*</sup>, Mahmoud Ebrahimi<sup>3</sup>

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

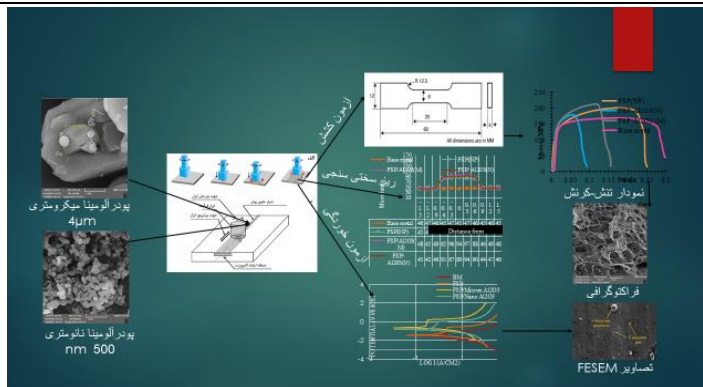
<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Maragheh, Maragheh, Iran

### HIGHLIGHTS

- Hardness and tensile strength are improved as a result of the friction-stirring process and the addition of alumina reinforcement particles.
- The corrosion resistance of aluminum 6061 increases due to the addition of alumina particles and the application of the friction-stirring process.
- Results indicate the positive effect of alumina particles with micrometer size compared to nanometer size.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 15 September 2022

Received in revised form: 8 October 2022

Accepted: 24 November 2022

Available online: 12 December 2022

\*Correspondence:

am.abazari@urmia.ac.ir

#### How to cite this article:

R. Karami, A.M. Abazari, M. Ebrahimi. Mechanical and corrosion behavior of friction stir processed 6061 aluminum alloy reinforced by Alumina powder. Journal of Aerospace Mechanics. 2023; 19(1):45-59.

### ABSTRACT

This paper presents an investigation into the process parameters and conditions of friction stir processing for aluminum alloy 6061. The effect of process parameters including speed, feed, tool penetration depth, and reinforcement particles on the strength, hardness, and corrosion behavior of the samples are investigated. Tensile test, fracture mapping, and surface hardness measurement, as important mechanical properties, are performed using broken samples. The obtained results show that adding alumina particles in micrometer size with friction stir processing improves the final tensile strength, hardness, and corrosion resistance. The results show that the corrosion behavior of the processed samples is improved by reducing the corrosion rate, corrosion current, and corrosion potential compared to the base metal. The microstructure of the processed samples after the corrosion test shows that samples with micrometer-sized alumina reinforcement particles have fewer holes than others and lead to a more polished and smoother surface.

---

*Keywords:*

Frictional stir processing

Composite metal base

Aluminum alloy 6061

Mechanical properties

Corrosion

---

