

تأثیر عملیات حرارتی آنیل بین پاسی بر تحولات ریزساختاری، خواص مکانیکی و سایشی نانو کامپوزیت در جای $Al_{3003-Ti}/Al_3Ti$ تولید شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

مجتبی زادعلی محمد کوتیانی* و خلیل رنجبر

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۸/۰۲/۱۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۸/۰۳/۱۲

چکیده

کامپوزیت در جای تقویت شده با Al_3Ti با استفاده از FSP بر روی آلیاژ کارسرد شده $Al_{3003-H14}$ تولید شد. از پودر تیتانیوم به عنوان تقویت کننده استفاده شد و ۶ پاس FSP اعمال گردید. عملیات حرارتی آنیل در $500^\circ C$ و به مدت زمان ۴ h به دو صورت مختلف: یکی در شرایط بعد از ۶ پاس FSP و دیگری در شرایط بین پاسی و بعد از اعمال ۴ پاس انجام شد. در مورد دوم، پس از انجام عملیات حرارتی دو پاس دیگر نیز اعمال شد. تحولات ریزساختاری، خواص مکانیکی و سایشی فلز پایه و نمونه‌های کامپوزیتی اندازه گیری شد و باهم مقایسه شدند. بررسی نتایج نشان داد که انجام عملیات حرارتی منجر به تشدید واکنش در جای آلومینایدی شده، به گونه‌ای که عملیات حرارتی بین پاسی باعث بهبود داکتیلیته و مقاومت سایشی می‌شود. نتایج نشان داد که مکانیزم سایشی غالب برای فلز پایه و نمونه کامپوزیتی به ترتیب مکانیزم چسبان شدید و چسبان/خراشان می‌باشد، در حالی که بعد از انجام عملیات حرارتی بین پاسی مکانیزم سایشی به ورقه‌ای تغییر پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، نانو کامپوزیت در جای، Al_3Ti ، عملیات حرارتی، سایش.

۱- مقدمه

عنوان روشی مناسب جهت بهبود خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیم شناخته شده است. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی تقویت شده با نانوذرات نسبت به زمینه تقویت نشده دارای مدول الاستیک، استحکام کششی و مقاومت به سایش بالاتری می‌باشند و به همین دلیل مورد توجه محققان قرار گرفته و عنوان بسیاری از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. کامپوزیت‌های در جای دسته از این کامپوزیت‌ها

آلومینیم و آلیاژهای آن به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن بالا، دانسیته پایین و مقاومت به خوردگی بالا به طور گسترده در صنایع هوافضا و خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه تکنولوژی کامپوزیت‌سازی توسط افزودن فازهای تقویت کننده و سخت همچون ذره، لایه و الیاف به زمینه به

* عهده‌دار مکاتبات: مجتبی زادعلی محمد کوتیانی

نشانی: اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مواد

تلفن: ۰۶۱-۳۳۳۳۶۶۴۲، دورنگار: ۰۶۱-۳۳۳۳۶۶۴۲، پست الکترونیکی: m.zadali1371@gmail.com

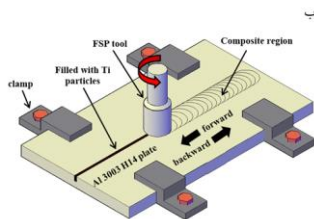
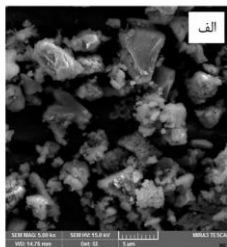
ذرات به صورت واکنش نداده در ریزساختار باقی می‌مانند [۵-۷]. انجام عملیات حرارتی بر روی چنین کامپوزیت‌هایی می‌تواند منجر به بهبود واکنش‌های درجای گردد [۹-۱۱]. برای مثال، کی و همکاران [۹] گزارش کردند که انجام عملیات حرارتی بر روی کامپوزیت زمینه آلومینیمی تقویت‌شده با ذرات Ni/Al_3Ti تولید شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی باعث واکنش بخش قابل توجهی از ذرات Ni واکنش نداده موجود در زمینه می‌گردد. در پژوهش مشابه دیگری نیز خدابخشی و همکاران [۱۰] به بررسی تاثیر عملیات حرارتی آنیل بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت $Al-TiO_2/Al_3Ti$ تولید شده توسط فرآیند FSP پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که عملیات حرارتی آنیل باعث کامل شدن واکنش حالت جامد بین نانوذرات TiO_2 با زمینه Al شده و منجر به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود. انجام عملیات حرارتی آنیل با وجود اینکه منجر به بهبود واکنش‌های درجای می‌شود ولی تشکیل ترکیبات آلومینیدی ترد و ضخیم در فصل مشترک ذرات و زمینه می‌تواند به عنوان محلی برای شروع ترک عمل نموده و در نتیجه باعث افت داکتیلیته شود [۱۲، ۱۳]. ژانگ و همکاران [۱۳] گزارش کردند که اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی کامپوزیت عملیات حرارتی شده Al/Al_3Ti می‌تواند به واسطه شکسته شدن و توزیع یکنواخت ذرات در سرتاسر زمینه باعث بهبود داکتیلیته شود. با وجود اینکه تاثیر عملیات حرارتی آنیل بر تحولات ریزساختاری و مکانیکی برخی کامپوزیت‌های تولید شده توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی انجام شده است ولی تاکنون هیچ پژوهشی مبنی بر تاثیر عملیات حرارتی آنیل در شرایط بین پاسی بر روی نانو کامپوزیت درجای $Al_3Ti/Al-Ti$ صورت نگرفته است. لذا هدف پژوهش حاضر بررسی تاثیر عملیات حرارتی آنیل در شرایط بین پاسی و مقایسه آن با شرایط انجام عملیات حرارتی بعد از تولید کامپوزیت می‌باشد. سپس تحولات ریزساختاری، خواص مکانیکی و سایشی نمونه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند.

می‌باشند که به دلیل پیوند قوی تر بین ذرات و زمینه، پایداری ترمودینامیکی بیشتر ذرات و همچنین توزیع یکنواخت تر ذرات در زمینه معمولاً خواص مکانیکی بهتری را نسبت به کامپوزیت‌های غیردرجای ارائه می‌دهند [۱، ۲]. فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) به عنوان یک تکنیک حالت جامد جدید و برگرفته از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) اخیراً جهت تولید کامپوزیت‌های درجای زمینه آلومینیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این فرآیند یک ابزار در حال چرخش وارد قطعه شده و در یک مسیر مشخص حرکت داده می‌شود لذا عمل اصطکاکی و اغتشاشی بوجود آمده باعث توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده در سرتاسر زمینه می‌شود [۳]. در هنگام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی وقوع واکنش شیمیایی بین زمینه تغییر شکل پلاستیک یافته با ذرات فلزی افزوده شده به زمینه می‌تواند منجر به تشکیل ترکیبات آلومینیدی گردد. تغییر شکل پلاستیکی شدید، بالا رفتن دما به خاطر گرمای اصطکاکی، ریزدانه‌گی و افزایش سطوح مرزدانه‌ها و نیز افزایش چگالی نابه‌جایی‌ها که شرایط را برای نفوذ آلومینیم به داخل ذرات تسهیل می‌نمایند به عنوان مهمترین دلایل تشکیل ترکیبات آلومینیدی در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در نظر گرفته می‌شوند [۴]. تاکنون واکنش شیمیایی بین زمینه آلومینیم با ذرات فلزی خالص همچون [۵] Ti ، [۶] Ni و [۷] Nb و در نتیجه به ترتیب تشکیل ترکیبات آلومینیدی Al_3Ti ، Al_3Ni و Al_3Nb ، در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی گزارش شده است. در میان ترکیبات آلومینیدی مختلف به عنوان ذرات تقویت کننده درجای در زمینه آلومینیم، ترکیب Al_3Ti به دلیل داشتن دانسیته پایین ($3/3 \text{ g/cm}^3$) و مدول الاستیک بالا (۲۱۷ GPa) به عنوان تقویت کننده‌ای جذاب برای آلیاژهای آلومینیم شناخته می‌شود [۸]. بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه کامپوزیت‌های درجای نشان می‌دهد با وجود این که واکنش بین ذرات فلزی با زمینه آلومینیم جهت تولید کامپوزیت درجای توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی انجام می‌شود ولی بخش عمده‌ای از این

جدول ۱: ترکیب شیمیایی ورق Al3003-H14 (بر حسب درصد وزنی).

Al	Mn	Fe	Si	Cu	Mg	Zn	Cr
۹۷/۹	۱/۰۹	۰/۴۸۵	۰/۱۶۴	۰/۱۵۷	۰/۰۲۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱۱

بین پاسی (بعد از اعمال پاس) بر روی کامپوزیت تولید شده نیز انجام شد (بعد از انجام عملیات حرارتی در شرایط بین پاسی مجدداً ۲ پاس دیگر اعمال شد).

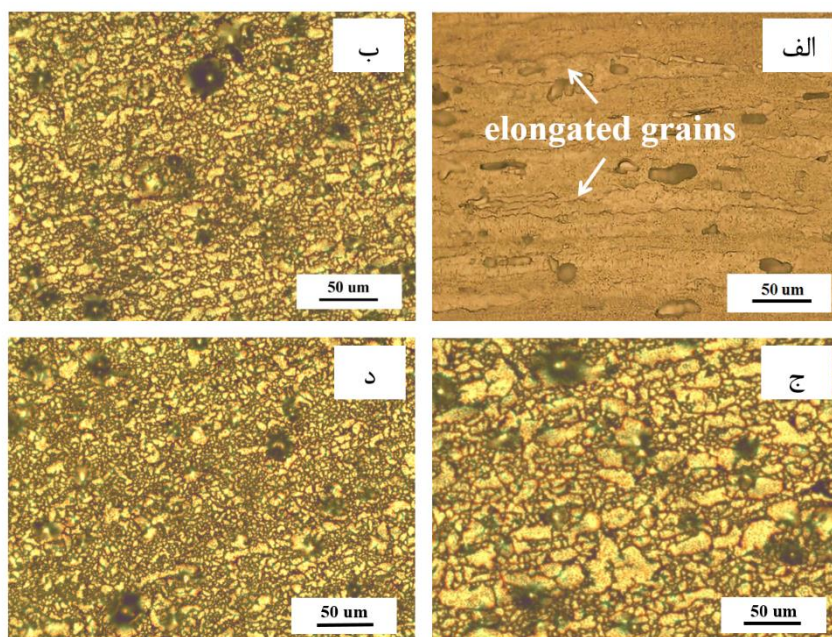


شکل ۱: الف) مورفولوژی پودر Ti و ب) شماتیک FSP.

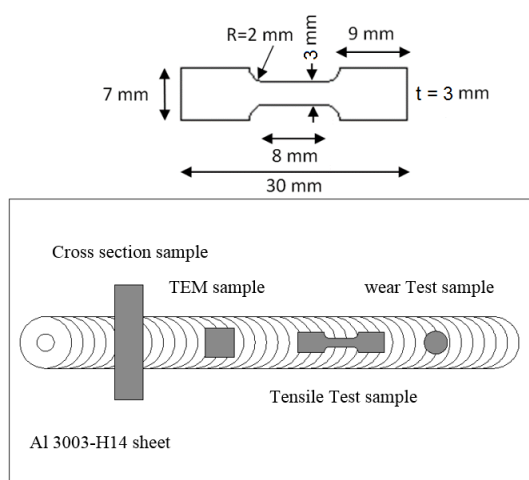
بررسی‌های ریزساختاری نمونه توسط میکروسکوپ نوری (Meiji Techno/IM 7200)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, MIRA3 TSCAN) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM, CM120FEG) انجام شد. به منظور شناسایی فازهای موجود در ریزساختار کامپوزیت از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) نیز استفاده شد. ریزسختی نمونه‌ها توسط دستگاه میکروسختی سنچ ویکرز تحت بار ۱۰۰ gf و زمان ۱۵ sec انجام شد. نمونه‌های کششی به صورت طولی شکل طبق استاندارد ASTM E8 به کمک وایرکات از مرکز ناحیه کامپوزیتی تهیه شده و آزمون کشش توسط دستگاه سنتام در دمای محیط با نرخ کرنش اولیه $10^{-3} S^{-1} * 30$ انجام شد.

۲- فعالیت‌های تجربی

در این پژوهش از ورق آلیاژ کارسرد شده Al3003-H14 با ضخامت ۹ mm و با ابعاد $170 \times 100 \text{ mm}^2$ به عنوان فلز پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی ورق مذکور در جدول (۱) آورده شده است. یک شیار طولی با عرض ۱/۴ و عمق ۴ mm در سطح ورق به منظور افزودن ذرات تقویت کننده ماشینکاری شد. پودر فلزی تیتانیم با خلوص ۹۹/۹۹٪ و اندازه ذرات کوچکتر از ۲۰ میکرون با مورفولوژی نشان داده شده در شکل ۱ (الف) به عنوان ذرات تقویت کننده به شیار مذکور افزوده شده و به خوبی فشرده شدند. از دو ابزار استوانه‌ای (شکل شامل ۱) ابزار بدون پین با قطر شانه ۱۲ mm جهت بستن سطح شیار و جلوگیری از بیرون ریختن پودرها و ۲) ابزار حاوی پین با قطر شانه ۱۸ mm، قطر پین ۶ mm، طول پین ۵ mm و زاویه ۳۰° رو به جلو استفاده شد. به منظور اغتشاش بهتر ماده در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی رزوه‌هایی در جهت ساعت گرد و با گام ۱ mm بر روی پین ایجاد شد. ابزارها از جنس فولاد گرم کار H13 انتخاب شدند و جهت دستیابی به سختی ۵۵ HRC فرآیند عملیات حرارتی و کوئنچ کردن در روغن و آب بر روی آن‌ها انجام شد. تعداد ۶ پاس فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به صورت رفت و برگشتی و با سرعت چرخشی و پیشروی بهینه شده به ترتیب ۱۰۰۰ rpm و ۵۶ mm/min جهت تولید کامپوزیت انجام شد. شماتیک فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در شکل ۱ (ب) آورده شده است. یک مرحله عملیات حرارتی آنیل در دمای ۵۰۰ °C به مدت زمان ۴ h یکی در شرایط بعد از تولید کامپوزیت (بعد از اعمال ۶ پاس) و دیگری در شرایط



شکل ۳: تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار الف) فلز پایه، ب) کامپوزیت، ج) کامپوزیت عملیات حرارتی شده و د) کامپوزیت عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی.



شکل ۲: شماتیک چگونگی استخراج نمونه‌های سطح مقطع جهت بررسی‌های ریزساختاری و ریزسختی، TEM، کشش و سایش.

میکرون می‌باشد. مطابق با شکل ۳ (ب) مشاهده می‌شود که حضور ذرات تقویت‌کننده در نمونه کامپوزیتی باعث ریزدانه شدن و تغییر ریزساختار به دانه‌های ریز و هم‌محور تا حدود $7 \mu\text{m}$ می‌شود.

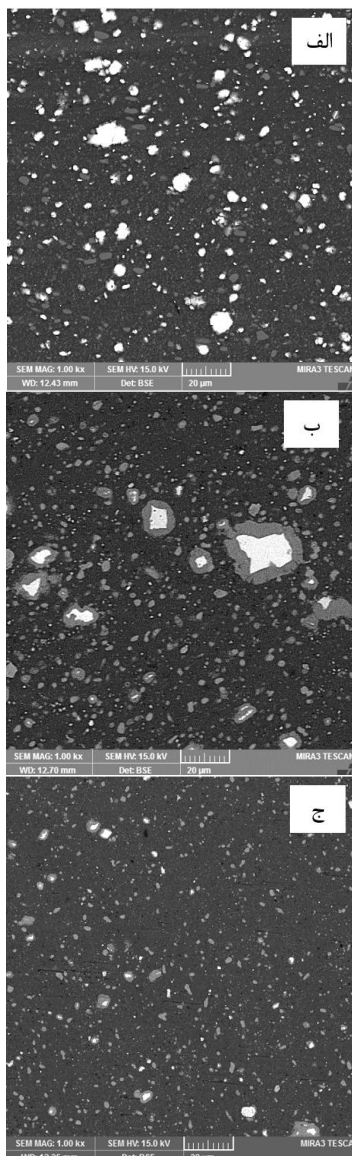
رفتار سایشی نمونه‌ها توسط دستگاه سایش پین روی دیسک (WAZAU, Type TRM250) در دمای محیط انجام شد. دیسک سایشی از فولاد پولیش شده E52100 (100Cr6) با سختی ۶۲-۶۵ HRC انتخاب شد. تست سایش برای تمامی نمونه‌ها تحت یک سرعت لغزشی ثابت 0.24 m/s ، نیروی عمودی 24 N و مسافت لغزشی 1000 m انجام شد. شماتیک چگونگی استخراج نمونه‌های سطح مقطع (جهت بررسی ریزساختاری-ریزسختی)، TEM، تست کشش و سایش در شکل (۲) نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی‌های ریزساختاری

تصاویر میکروسکوپی نوری از ریزساختار فلز پایه و نمونه‌های کامپوزیتی در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۳ (الف) دیده می‌شود فلز پایه دارای دانه‌های بزرگ و کارسرد شده با طول متوسط حدود $150 \mu\text{m}$

با توجه به تصویر مشاهده می شود که بخش های مرکزی ذره درشت تیتانیم با زمینه آلومینیم وارد واکنش نشده است که دلیل چنین رفتاری می تواند به خاطر تشکیل خود ترکیب آلومینایدی Al_3Ti باشد چرا که یک بار در فصل مشترک تشکیل شده و به عنوان یک مانع و مرز عمل کرده و از تماس مستقیم بین ذرات تیتانیم با زمینه آلومینیم جهت واکنش جلوگیری خواهد کرد.



شکل ۴: تصاویر SEM از نحوه توزیع ذرات تقویت کننده در ریزساختار نمونه الف) کامپوزیت، ب) کامپوزیت عملیات حرارتی شده و ج) کامپوزیت عملیات شده در شرایط بین پاسی.

انجام عملیات حرارتی بر روی نمونه کامپوزیتی (شکل ۳ ج) منجر به درشت شدن دانه ها تا حدود ۲۰ میکرون می گردد در حالی که نمونه عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی مطابق با شکل ۳ د) ریزدانه گی قابل توجهی (حدود ۵ میکرون) را از خود نشان می دهد. ریزدانه شدن ریزساختار نمونه عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی می تواند به وقوع مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی (DRX) در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی نسبت داده شود [۱۴، ۱۵].

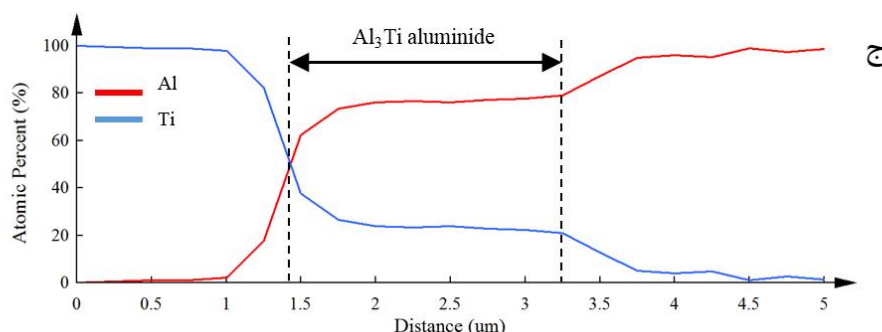
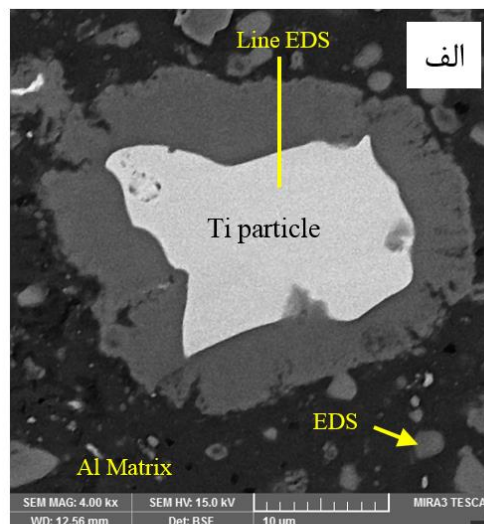
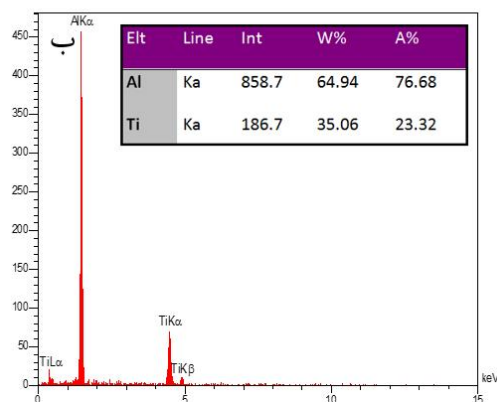
تصاویر SEM از ریزساختار نمونه های کامپوزیتی در شکل (۴) نشان داده شده است. مطابق با این تصاویر مشاهده می شود که ذرات تقویت کننده در سرتاسر زمینه به خوبی توزیع شده و هیچ گونه عیوب داخلی از جمله حفره، تونل و منطقه آگلومره شده ای دیده نمی شود. عدم تشکیل عیوب در ناحیه کامپوزیتی می تواند تاییدی بر بهینه بودن پارامترهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی در نظر گرفته شود [۱۶]. با مقایسه تصاویر ملاحظه می شود که ذرات تیتانیم در زمینه نمونه کامپوزیتی (شکل ۴ الف) به شکل ذراتی سفید رنگ دیده می شوند در حالی که این ذرات بعد از عملیات حرارتی (شکل ۴ ب) به ذراتی عمدتاً خاکستری رنگ تبدیل می شوند. دلیل چنین رفتاری وقوع واکنش شیمیایی بین ذرات تیتانیم با زمینه آلومینیم در حین فرآیند عملیات حرارتی می باشد.

شکل ۵ الف) تصویر بزرگنمایی شده یکی از ذرات موجود در ریزساختار کامپوزیت عملیات حرارتی شده (شکل ۴ ب) را نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود ذره سفید رنگ تیتانیم توسط یک لایه ی خاکستری رنگ احاطه شده است. آنالیز EDS خطی از این لایه (شکل ۵ ج) نشان می دهد که این مناطق ترکیبات آلومینایدی Al_3Ti می باشند که به صورت درجای و مطابق با رابطه (۱) در اثر نفوذ آلومینیم به درون ذرات تیتانیم تشکیل شده اند [۱۷].



مشاهده می‌شود که اعمال مجدد فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (۲ پاس بعد از عملیات حرارتی) در نمونه‌ی عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی بر شکل، اندازه و توزیع ذرات

این در حالی است که ذرات ریزتر تیتانیوم رفتار متفاوتی را از خود نشان می‌دهند به گونه‌ای که کوتاه بودن فاصله نفوذ باعث پیشرفت واکنش تا بخش‌های مرکزی این ذرات

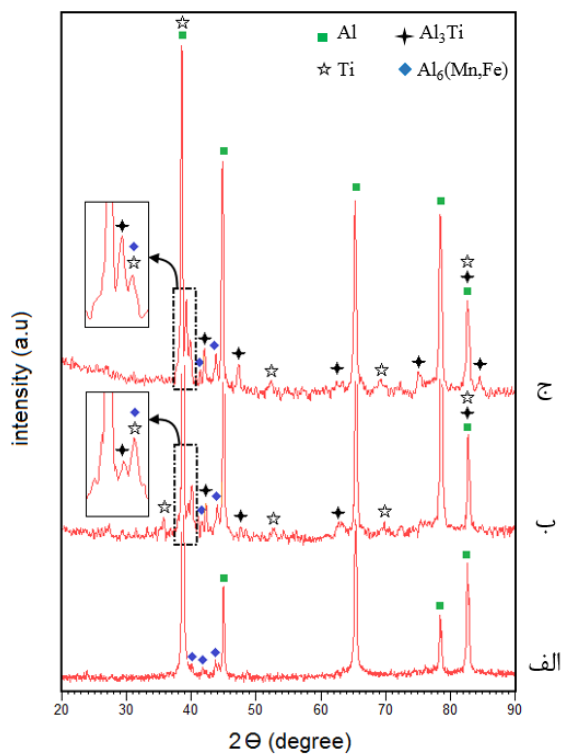


شکل ۵: الف) تصویر SEM با بزرگنمایی بالا از ریزساختار نمونه کامپوزیتی عملیات حرارتی شده، ب) آنالیز EDS از منطقه مشخص شده با پیکان در تصویر الف و ج) آنالیز EDS خطی از فصل مشترک ذره تیتانیوم با زمینه آلومینیم.

تقویت کننده اثرگذار بوده است به گونه‌ای که چرخش و اغتشاش شدید ابزار منجر به شکسته شدن ترکیبات آلومینیدی به ذرات کوچک‌تر، هم‌محور و نیز توزیع بهتر آن‌ها در سرتاسر زمینه می‌شود. صحرائی‌نژاد و همکاران [۱۹] گزارش کردند که دو عامل تغییر شکل پلاستیکی شدید حاصل از چرخش ابزار و نیز برخورد خود ذرات تقویت کننده با همدیگر می‌تواند مهمترین دلیل شکسته شدن ذرات تقویت کننده در اثر اعمال فرآیند FSP در نظر گرفته

شده است (شکل ۵ ب). لی و همکاران [۱۱] نیز در پژوهش مشابهی بهبود واکنش درجای بین ذرات مولیدن با زمینه آلومینیم در حین عملیات حرارتی کامپوزیت Al/Mo تولید شده توسط فرآیند FSP را گزارش کردند. از آنجایی که ترکیبات آلومینیدی Al_3Ti ماهیت ترد و شکننده‌ای دارند لذا در حین فرآیند FSP می‌توانند توسط چرخش ابزار شکسته شده و به صورت نانوذرات در سرتاسر زمینه توزیع شوند [۵، ۱۸]. با مقایسه تصاویر ۴ (ب) و (ج)

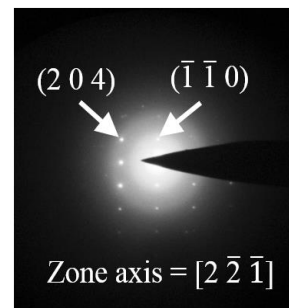
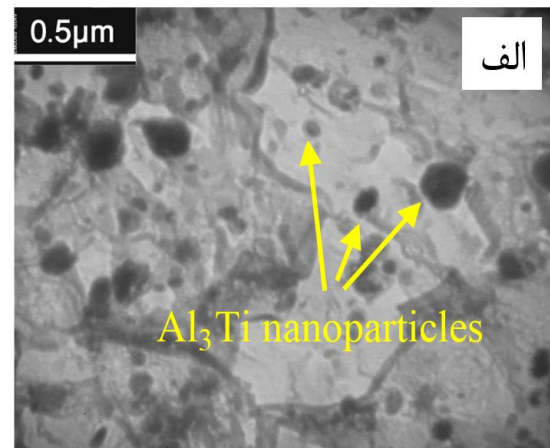
الگوی XRD از ریزساختار فلز پایه، نمونه کامپوزیتی و نیز کامپوزیت عملیات حرارتی شده در شکل (۷) آورده شده است. همان گونه که از الگوی نمونه‌های کامپوزیتی مشاهده می‌شود پیک‌های پراش ترکیب Al_3Ti می‌تواند تاییدی بر واکنش در جای بین ذرات تیتانیم با زمینه آلومینیم باشد. علاوه بر حضور ترکیبات آلومینیدی ملاحظه می‌شود که پیک‌های پراش مربوط به ذرات تیتانیم نیز در الگو دیده می‌شوند. حضور چنین پیک‌هایی در الگو می‌تواند به خاطر حضور ذرات تیتانیم موجود در ریزساختار نسبت داده شوند که در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و نیز در حین فرآیند عملیات حرارتی موفق به واکنش با آلومینیم نشده و به صورت ذرات واکنش داده نشده در ریزساختار باقی می‌مانند.



شکل ۷: الگوهای XRD نمونه‌های الف) فلز پایه، ب) کامپوزیت و ج) کامپوزیت عملیات حرارتی شده.

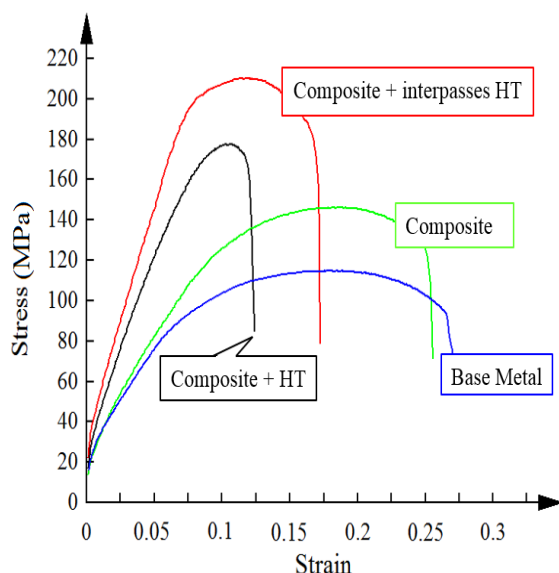
با مقایسه الگوی نمونه کامپوزیتی و نیز کامپوزیت عملیات حرارتی شده می‌توان تأثیر عملیات حرارتی آنیل بر کاهش شدت پیک‌های مربوط به تیتانیم و افزایش تعداد و شدت

شوند. در پژوهش مشابه دیگری نیز خدابخشی و همکاران [۵] گزارش کردند که حضور میکروترک‌ها در ترکیبات آلومینیدی به واسطه تنش‌های کششی به وجود آمده در حین واکنش‌های نفوذی می‌تواند پارامتر موثر دیگری در شکسته شدن و نانوذره شدن تکه‌های درشت ترکیبات Al_3Ti در نظر گرفته شوند. تصویر TEM و نیز الگوی SAD از ریزساختار نمونه عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی در شکل (۶) آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۶ (الف) مشاهده می‌شود مقادیر زیادی از نانوذرات آلومینیدی به صورت ذرات کروی شکل و با اندازه ذرات کوچکتر از ۱۰۰ nm به طور کاملاً یکنواخت در سرتاسر زمینه توزیع شده‌اند. الگوی SAD تهیه شده از این نانوذرات مطابق با شکل ۶ (ب) نشان می‌دهد که این ذرات عمدتاً ترکیبات آلومینیدی Al_3Ti با ساختار کریستالی تتراگونال می‌باشند.



شکل ۶: الف) تصویر TEM زمینه روشن از نحوه توزیع نانوذرات تقویت‌کننده در ریزساختار نمونه کامپوزیت عملیات شده در شرایط بین پاسی و ب) الگوی SAD از نانوذرات آلومینیدی Al_3Ti .

ذرات تیتانیم با زمینه آلومینیم باشد [۱۲، ۱۳]. این در حالی است که نمونه کامپوزیتی در شرایط عملیات حرارتی بین پاسی نسبت به نمونه عملیات حرارتی شده استحکام کششی و داکتیلیته به مراتب بالاتری (بهبود ۲۰ درصدی در استحکام کششی و ۴۰٪ در داکتیلیته) را از خود نشان می‌دهد. مقادیر متوسط ریزسختی اندازه گیری شده برای نمونه‌ها در شکل (۹) آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود نمونه‌های کامپوزیتی به خاطر ترکیبات سخت Al_3Ti سختی به مراتب بالاتری را نسبت به فلز تقویت نشده (۴۲ HV) از خود نشان می‌دهند و بیشترین ریزسختی (حدود ۷۰ HV) در شرایط عملیات حرارتی بین پاسی حاصل می‌شود.



شکل ۸: نمودارهای تنش- کرنش مهندسی نمونه‌ها.

بهبود خواص مکانیکی به ویژه داکتیلیته در نمونه عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی نسبت به نمونه عملیات حرارتی شده مطابق با بررسی‌های ریزساختاری می‌تواند به شکسته شدن و توزیع یکنواخت ترکیبات آلومینیدی در حین فرآیند مجدد FSP نسبت داده شود. لذا شکسته شدن ذرات در نمونه عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی منجر به کاهش فاصله بین ذرات تقویت کننده می‌شود. از آنجایی که با کاهش فاصله بین ذرات تقویت کننده

پیک‌های مربوط به ترکیب آلومینیدی Al_3Ti را به وضوح مشاهده نمود. کی و همکاران [۹] نیز در پژوهشی مشابه مصرف بخش عمده‌ای از ذرات Ni واکنش نداده موجود در ریزساختار در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و تشکیل مقادیر قابل ملاحظه‌ای از ترکیبات Al_3Ti بعد از انجام عملیات حرارتی آنیل بر روی کامپوزیت Al/Al_3Ti را گزارش کردند.

با بررسی نتایج حاصل شده می‌توان گفت که انرژی حرارتی ناشی از فرآیند آنیل در نمونه عملیات حرارتی شده منجر به افزایش نرخ نفوذ اتمی و در نتیجه تسهیل واکنش شیمیایی بین زمینه آلومینیم با ذرات تیتانیم می‌شود. این در حالی است که در نمونه عملیات حرارتی شده بین پاسی شرایط برای واکنش و در نتیجه آلومیناید شدن ذرات تیتانیم به مراتب بهتر از دیگر نمونه‌ها (کامپوزیتی و کامپوزیتی عملیات شده) می‌باشد چرا که فرآیند آلومیناید شدن طی سه مرحله یعنی در حین تولید کامپوزیت، در حین عملیات حرارتی و نیز در حین دو پاس نهایی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند اتفاق بیفتد.

۳-۲- خواص مکانیکی

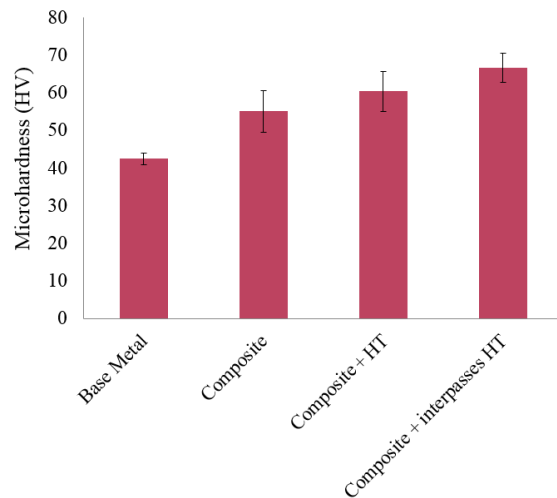
منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی برای نمونه‌ها در شکل (۸) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فلز پایه استحکام کششی ۱۱۰ MPa و داکتیلیته حدود ۲۷٪ را از خود نشان می‌دهد. این در حالی است که کامپوزیت کردن فلز پایه باعث بهبود استحکام کششی تا ۱۵۰ MPa و کاهش اندک داکتیلیته تا ۲۵٪ می‌شود. همچنین از نمودار مشاهده می‌شود که نمونه کامپوزیتی در شرایط بعد از عملیات حرارتی و نیز در شرایط عملیات حرارتی بین پاسی استحکام کششی به ترتیب حدود ۱۸۰ و ۲۱۰ MPa و نیز داکتیلیته‌ی ۱۲ و ۱۷٪ را از خود نشان می‌دهند. افت داکتیلیته و شکست ترد نمونه کامپوزیتی در شرایط بعد از عملیات حرارتی می‌تواند به علت حضور ترکیبات سخت و ترد Al_3Ti در فصل مشترک بین

- سختی بالاتر نمونه‌های کامپوزیتی نسبت به فلز پایه باعث کاهش سطح تماس بین نمونه و دیسک ساینده شده و در نتیجه اصطکاک کاهش می‌یابد [۲۲].

- حضور ذرات تقویت کننده در نمونه‌های کامپوزیتی به دلیل تحمل بار بیشتر و جلوگیری از تماس مستقیم دیسک ساینده با زمینه نرم آلومینیم باعث جلوگیری از تغییر شکل پلاستیکی و در نتیجه بهبود مقاومت سایشی می‌شود [۲۳].

- پیوند قوی بین ذرات تقویت کننده با زمینه آلومینیم به واسطه تشکیل درجای می‌تواند به عنوان عامل دیگری در بهبود مقاومت سایشی در نظر گرفته شود [۲۴، ۲۵].

نابه‌جایی‌ها با موانع بیشتری برخورد می‌کنند لذا استحکام و سختی افزایش می‌یابد [۱۸].

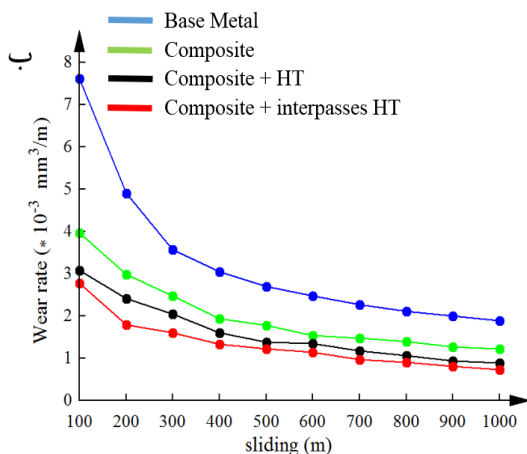
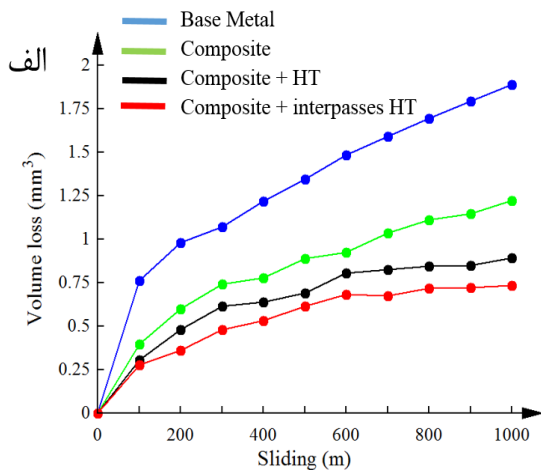


شکل ۹: میانگین مقادیر ریزسختی نمونه‌ها.

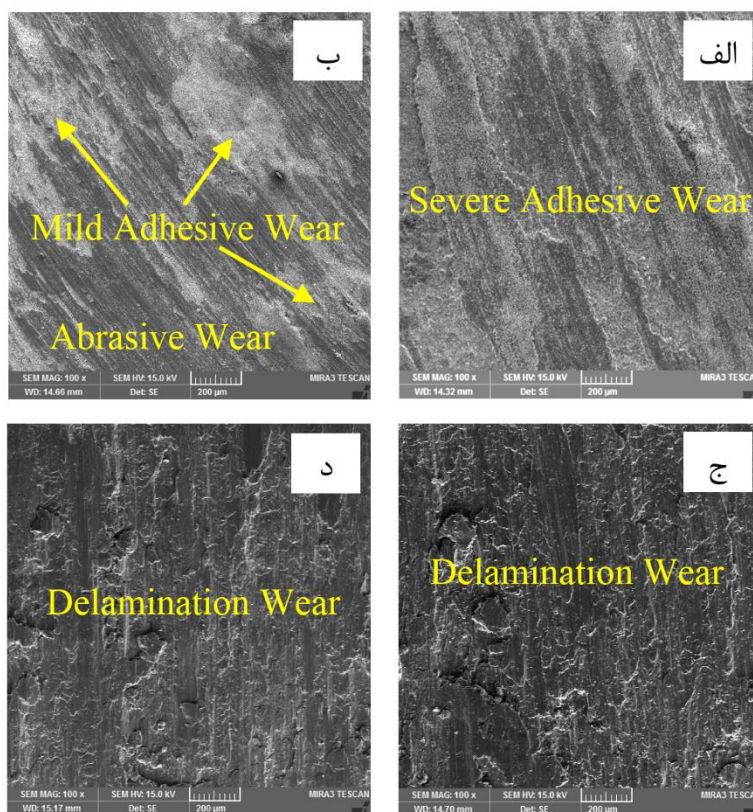
با این وجود می‌توان گفت که بهبود خواص مکانیکی در نمونه عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی مطابق با بررسی‌های ریزساختاری می‌تواند به ریزدانه شدن ریزساختار مطابق با رابطه هال-پچ [۲۰] و نیز توزیع نانوذرات آلومینایدی در زمینه مطابق مکانیزم استحکام‌دهی اوراوان [۲۱] نسبت داده شود.

۳-۳- ارزیابی رفتار سایشی

نمودارهای کاهش حجم سایشی و نیز نمودارهای نرخ سایش بر حسب مسافت لغزشی برای نمونه‌ها در شکل (۱۰) نشان داده شده است. مطابق با این نمودارها مشاهده می‌شود که نمونه‌های کامپوزیتی مقاومت سایشی به مراتب بالاتری نسبت به فلز پایه ارائه می‌دهند و بیشترین مقاومت سایشی را نمونه عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی از خود نشان می‌دهد به گونه‌ای که از همان ابتدای فرآیند سایش نرخ سایشی پایداری را ارائه می‌دهد. بهبود مقاومت سایشی نمونه‌های کامپوزیتی به ویژه نمونه‌های عملیات حرارتی شده نسبت به زمینه تقویت نشده را می‌توان به دلایل ارائه شده در زیر نسبت داد:



شکل ۱۰: نمودار الف) کاهش حجم و ب) نرخ سایش بر حسب مسافت لغزشی نمونه‌ها.



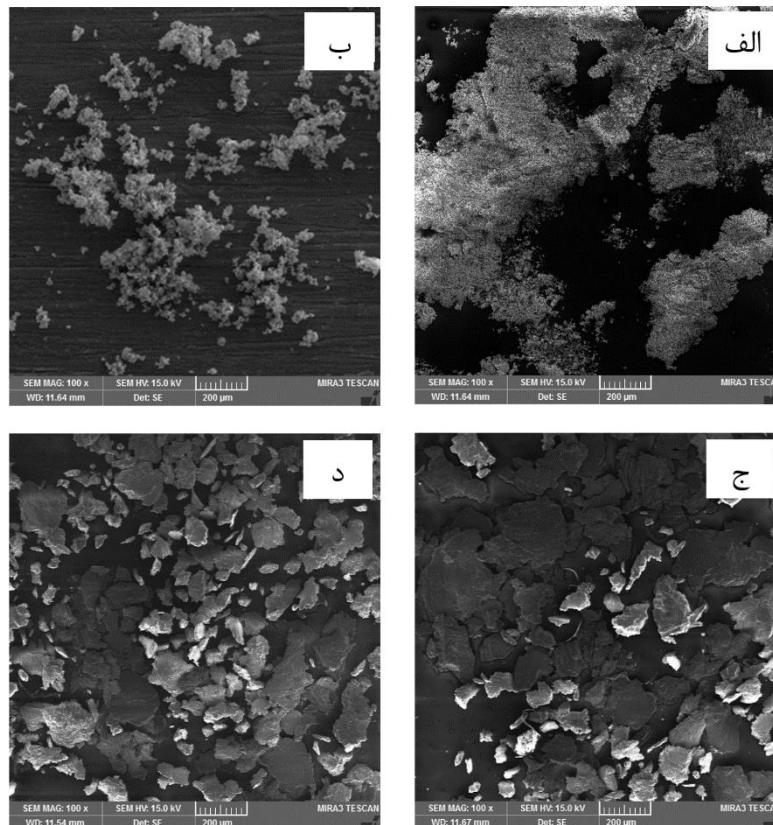
شکل ۱۱: تصاویر SEM از سطوح سایش نمونه (الف) فلز پایه، (ب) کامپوزیت، (ج) کامپوزیت عملیات حرارتی شده و (د) کامپوزیت عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی.

۳-۴- بررسی سطوح سایش

تصاویر SEM از سطوح سایش برای نمونه‌ها در شکل (۱۱) آورده شده است. مورفولوژی سطوح سایش برای نمونه فلز پایه مطابق با شکل ۱۱ (الف) نشان می‌دهد که سطوح سایش حاوی کندگی‌هایی به صورت درشت و عمیق می‌باشد. این در حالی است که سطوح سایش نمونه کامپوزیتی (شکل ۱۱ ب) و نیز کامپوزیت‌های عملیات حرارتی شده (شکل ۱۱ ج و د) حاوی کندگی‌هایی کوچک و سطحی و همچنین شیارهایی کم عمق می‌باشد. چنین رفتاری برای نمونه‌های کامپوزیتی می‌تواند بیان‌گر مقاومت بیشتر ماده در برابر دیسک ساینده و در نتیجه بهبود مقاومت سایشی در نظر گرفته شود [۲۶]. دیناهاران و همکاران [۲۷] تاثیر حضور ذرات تقویت‌کننده Al_3Ti بر رفتار سایشی زمینه آلیاژ آلومینیم

$Al6061$ را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که نرم‌شدگی و چسبیده شدن زمینه تقویت‌نشده به سطح دیسک سایشی باعث جدا شدن تکه‌های درشت از سطح ماده می‌شود در حالی که افزودن ذرات تقویت‌کننده Al_3Ti باعث افزایش مقاومت زمینه در برابر تغییر شکل پلاستیک و در نتیجه بهبود مقاومت سایشی می‌شود.

تصاویر SEM از مورفولوژی ذرات سایشی برای نمونه فلز پایه و نیز نمونه‌های کامپوزیتی در شکل (۱۲) آورده شده است. همان‌طور که از شکل ۱۲ (الف) مشاهده می‌شود ذرات سایشی برای فلز پایه به صورت تکه‌هایی بزرگ و ضخیم می‌باشند که خود مطابقت خوبی با سطوح سایش (شکل ۱۱ الف) دارند. چنین رفتاری می‌تواند بیانگر وقوع سایش چسبان شدید در فلز پایه باشد [۲۸].



شکل ۱۲: تصاویر SEM از ذرات سایشی نمونه (الف) فلز پایه، (ب) کامپوزیت، (ج) کامپوزیت عملیات حرارتی شده و (د) کامپوزیت عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی.

عملیات حرارتی شده مشاهده می‌شود که ذرات سایشی برای نمونه عملیات شده بین پاسی ریزتر و یکنواخت‌تر می‌باشند. این رفتار می‌تواند به خاطر کوتاه بودن فواصل بین ذرات تقویت کننده در این نمونه باشد که منجر به کاهش مسافت رشد ترک و در نتیجه جدا شدن ماده به صورت ورقه‌های کوچک‌تر می‌گردد. لذا مطابق با مورفولوژی سطوح سایش و ذرات سایشی می‌توان مکانیزم غالب سایشی چسبان/خراشان را برای نمونه کامپوزیتی و نیز مکانیزم سایشی ورقه‌ای را برای نمونه‌های کامپوزیتی عملیات حرارتی شده در نظر گرفت.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کامپوزیت درجای تقویت شده با نانوذرات Al_3Ti با استفاده از پودر فلزی تیتانیوم بر روی زیرلایه آلیاژ

این در حالی است که مورفولوژی ذرات سایشی برای نمونه کامپوزیتی (شکل ۱۲ ب) نشان می‌دهد که ذرات سایشی برای این نمونه به صورت ذراتی ریزتر و یکنواخت‌تر بوده و برای نمونه‌های کامپوزیتی عملیات حرارتی شده (شکل ۱۲ ج و د) به صورت ورقه ورقه‌ای می‌باشند.

سختی بالای سطح کامپوزیت‌های عملیات حرارتی شده می‌تواند مقاومت به سایش سطح را افزایش دهد ولی از آنجایی که در این نمونه‌ها مقادیر زیادی از ترکیبات آلومینایدی ترد حضور دارند لذا این ترکیبات می‌توانند در حین سایش به عنوان محل‌هایی جهت تمرکز تنش و شروع ترک عمل نمایند به گونه‌ای که به هم پیوستن این ترک‌ها در لایه‌های زیرین باعث جدا شدن ماده به صورت ورقه ورقه‌ای می‌گردد [۲۴]. با مقایسه ذرات سایشی نمونه‌های کامپوزیتی

- مکانیزم سایشی غالب چسبان شدید برای فلز پایه تقویت نشده، چسبان/خراشان برای نمونه‌ی کامپوزیتی و سایش ورقه‌ای برای نمونه‌های عملیات حرارتی شده تعیین شد.

مراجع

- [1] H. Fotoohi, B. Lotfi, Z. Sadeghian, J.W. Byeon, *Materials Characterization*, **149**, 2019, 124.
- [2] M. Sarkari Khorrami, S. Samadi, Z. Janghorban, M. Movahedi, *Materials Science & Engineering A*, **641**, 2015, 380.
- [3] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, I. Charit, *Materials Science and Engineering A*, **341**, 2003, 307.
- [4] M. Zadali Mohammad-Kotiyani, K. Ranjbar, R. Dehmlaei, *Materials Characterization*, **131**, 2017, 78.
- [5] F. Khodabakhshi, A. Simchi, A.H. Kokabi, A.P. Gerlich, *Materials Characterization*, **108**, 2015, 102.
- [6] J. Qian, J. Li, J. Xiong, F. Zhang, X. Lin, *Materials Science and Engineering A*, **550**, 2012, 279.
- [7] S.R. Hosseini Zeidabadi, H. Daneshmanesh, *Materials Science and Engineering A*, **702**, 2017, 189.
- [8] M. Nofar, H.R. Madaah Hosseini, N. Kolagar-Daroonkolaie, *Materials and Design*, **30**, 2009, 280.
- [9] L. Ke, C. Huang, L. Xing, K. Huang, *Journal of Alloys and Compounds*, **503**, 2010, 494.
- [10] F. Khodabakhshi, A. Simchi, A.H. Kokabi, A.P. Gerlich, M. Nosko, *Materials & Design*, **63**, 2014, 30.
- [11] I.S. Lee, P.W. Kao, C.P. Chang, *Intermetallics*, **35**, 2013, 9.
- [12] A. Rezaei, H.R. Madaah Hosseini, *Materials Science and Engineering A*, **689**, 2017, 166.
- [13] Q. Zhang, B.L. Xiao, D. Wang, Z.Y. Ma, *Materials Chemistry and Physics*, **130**, 2011, 1109.
- [14] E.A. El-Danaf, M.M. El-Rayes, M.S. Soliman, *Materials and Design*, **31**, 2010, 1231.
- [15] M. Amra, K. Ranjbar, R. Dehmlaei, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **24**, 2015, 3169.
- [16] M. Narimani, B. Lotfi, Z. Sadeghian, *Surface & Coatings Technology*, **285**, 2016, 1.
- [17] U.R. Kattner, J.C. Lin, Y.A. Chang, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **23**, 1992, 2081.
- [18] C.J. Hsu, C.Y. Chang, P.W. Kao, N.J. Ho, C.P. Chang, *Acta Materialia*, **54**, 2006, 5241.
- [19] S. Sahraeinejad, H. Izadi, M. Haghshenas, A.P. Gerlich, *Materials Science and Engineering A*, **626**, 2015, 505.
- [20] G. Azimi-Roeen, S.F. Kashani-Bozorg, M. Nosko, S. Nagy, I. Matko, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **27**, 2018, 471.
- [21] S.R. Anvari, F. Karimzadeh, M.H. Enayati, *Journal of Alloys and Compounds*, **562**, 2013, 48.
- [22] N. Hosseini, F. Karimzadeh, M.H. Abbasi, M.H. Enayati, *Materials and Design*, **31**, 2010, 4777.
- [23] E.R.I. Mahmoud, M. Takahashi, T. Shibayanagi, K. Ikeuchi, *Wear*, **268**, 2010, 1111.
- [24] S. Anvari, F. Karimzadeh, M. Enayati, *Wear*, **304**, 2013, 144.
- [25] M. Golmohammadi, M. Atapour, A. Ashrafi, *Materials and Design*, **85**, 2015, 471.
- [26] M. Amra, K. Ranjbar, S.A. Hosseini, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **28**, 2018, 866.
- [27] I. Dinaharan, G. Ashok kumar, S.J. Vijay, N. Murugan, *Materials & Design*, **63**, 2014, 213.
- [28] D. Ghanbari, M. Kasiri Asgarani, K. Amini, F. Gharavi, *Measurement*, **104**, 2017, 151.

کاربردشده‌ی آلومینیم Al3003-H14 توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی تولید شد. یک مرحله عملیات حرارتی آنیل در دمای ۵۰۰ °C به مدت زمان ۴ h در دو شرایط مختلف یکی بعد از تولید کامپوزیت (بعد از اعمال ۶ پاس) و دیگری در شرایط بین پاسی (بعد از ۴ پاس یا به عبارتی دیگر قبل از ۲ پاس نهایی از ۶ پاس) بر روی کامپوزیت انجام شد. تحولات ریزساختاری، خواص مکانیکی و رفتار سایشی نمونه‌ها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. اهم نتایج حاصله به قرار زیر است:

- حضور ذرات تقویت کننده در کامپوزیت باعث تغییر ریزساختار فلز پایه از دانه‌های بزرگ و کشیده شده به دانه‌های ریز و هم‌محور شد. انجام عملیات حرارتی آنیل باعث درشت شدن دانه‌ها شد در حالی که در نمونه عملیات شده بین پاسی به دلیل اعمال مجدد فرآیند FSP ریزساختار به مقدار قابل توجهی ریزدانه شد.

- مشاهده شد که ترکیبات آلومینیدی Al₃Ti به صورت یک لایه در فصل مشترک ذرات تیتانیم با زمینه آلومینیم تشکیل می‌شوند به طوری که بخش‌های مرکزی ذرات به صورت واکنش نداده باقی می‌مانند. انجام عملیات حرارتی آنیل باعث بهبود واکنش‌های درجای شد به گونه‌ای که بخش عمده‌ای از ذرات تیتانیم واکنش نداده موجود در ریزساختار با ترکیبات Al₃Ti جایگزین شدند.

- نمونه‌های کامپوزیتی به دلیل حضور ترکیبات آلومینیدی سخت Al₃Ti استحکام کششی، ریزسختی و مقاومت به سایش به مراتب بالاتری نسبت به زمینه تقویت نشده از خود نشان دادند و بالاترین خواص مکانیکی در نمونه کامپوزیتی عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی حاصل شد.

- مشاهده شد که کامپوزیت عملیات حرارتی شده در شرایط بین پاسی به دلیل شکسته شدن و توزیع همگن ترکیبات آلومینیدی بهبود ۲۰ درصدی در استحکام کششی، ۴۰٪ در داکتیلیته و ۱۵٪ در ریزسختی را نسبت به نمونه عملیات حرارتی شده از خود نشان می‌دهد.