



بررسی اثر اندازه ذرات تقویت کننده بر رفتار سایشی در کامپوزیت های زمینه NiTi

محمد فرویزی^۱، محمد ذاکری^۲، محمدرضا رحیمی پور^۳، تورج عبادزاده^۴

^۱. پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک (استادیار)

^۲. پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک (استادیار)

^۳. پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک (استاد)

^۴. پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک (دانشیار)

چکیده

بررسی های انجام شده بر روی آلیاژ NiTi نشان می دهد که این آلیاژ بدلیل خواص منحصربفردی نظیر خاصیت شبه الاستیسیته، پتانسیل بالایی جهت استفاده بعنوان زمینه کامپوزیت های مقاوم به سایش دارد. اما بدلیل اینکه در بارهای بالا و مسافت های طولانی سایش رفتار شبه الاستیسیته تحت تاثیر قرار می گیرد مقاومت به سایش نایتینول کاهش پیدا می کند. به همین دلیل امروزه از افزودن ذرات تقویت کننده برای بهبود عملکرد این ماده در حین سایش استفاده می کنند. یکی از مهمترین نکات در طراحی مواد کامپوزیتی، اندازه این ذرات است. در این مطالعه از ذرات آلومینایی با سه اندازه ۱ میکرون، ۰/۳ میکرون و ۸۰ نانومتری برای تقویت NiTi استفاده گردید. پودرهای کامپوزیتی تهیه شده با استفاده از روش SPS تف جوشی شدند. نتایج آزمون XRD بر روی نمونه های تف جوشی شده نشان داد مقدار فاز مارتنزیتی در نمونه های تقویت شده با تقویت کننده های ریزتر بیشتر است که علت آن تنش های حرارتی ایجاد شده فصل مشترک تقویت کننده و زمینه در حین سرمایش است. نتایج مربوط به آزمون سختی سنجی نشان داد با کاهش اندازه تقویت کننده های آلومینایی میزان سختی در نمونه های کامپوزیتی بیشتر می شود که علت آن افزایش موانع ایجاد شده برای حرکت نابجایی ها در نمونه های با تقویت کننده های ریزتر است. برای بررسی رفتار سایشی نمونه ها از روش پین بر روی دیسک استفاده گردید. نتایج اندازه گیری عرض ناحیه سائیده شده که بعنوان معیاری از مقاومت به سایش است نشانگر عملکرد بهتر نمونه های تقویت شده با ذرات تقویت کننده ریزتر است.

واژه های کلیدی: NiTi، Al₂O₃، پایداری فازی، کامپوزیت، سایش.

مقدمه

با توجه به پیشرفت صنایع مختلف و ایجاد نیازمندی های جدید، ضرورت ساخت مواد مهندسی با کاربردهای چندگانه روز به روز به اهمیت بیشتری به خود می گیرد. آلیاژهای حافظه دار^۱ بدلیل دارا بودن خواص منحصر بفردی نظیر خاصیت شبه الاستیسیته^۲ و حافظه داری بعنوان مواد مهندسی با کاربردهای چندگانه مطرح می باشند. در بین مواد حافظه دار، آلیاژ NiTi بدلیل داشتن مقاومت به خوردگی و سایش قابل توجه و میزان کرنش برگشت پذیر بالاتر، از اهمیت بیشتری در بین مواد حافظه دار برخوردار است. در سال های اخیر مطالعات زیادی بر روی خواص مختلف آلیاژ NiTi از جمله خواص سایشی آن انجام گرفته است. بررسی های انجام شده نشان می دهد که این ماده عملکرد بسیار مناسبی در برابر انواع مختلف سایش دارد و می تواند بعنوان یک ماده مقاوم به سایش جایگزین مواد مورد استفاده در صنعت گردد. علت چنین رفتاری بطور عمده به خاصیت شبه الاستیسیته این آلیاژ بر می گردد [۱]. در کنار این خاصیت، وجود برخی خواص ذاتی مانند آهننگ کارسختی بالا هم در رفتار سایشی ماده نقش دارد [۲ و ۳]. اما نکته مهم در مورد خاصیت شبه الاستیسیته این است که این خاصیت فقط در محدوده دمایی مشخص (اندکی بالاتر از دمای پایان تشکیل آستنیت A_f) و تحت بارگذاری های کم موثر است. بنابراین بهبود خواص مکانیکی فاز NiTi می تواند در ارتقاء رفتار سایشی آن بسیار تاثیر گذار باشد. یکی از روش های رایج برای بهبود خواص مکانیکی، استفاده از ذرات تقویت کننده است. امروزه دسته جدیدی از کامپوزیت ها بوجود آمده اند که در آنها از مواد حافظه دار مانند NiTi بعنوان فاز زمینه و از ذرات سخت و ترد مانند TiC و TiN بعنوان تقویت کننده ذره ای استفاده می شود [۴ و ۵]

بررسی های انجام شده بر روی مواد کامپوزیتی زمینه فلزی نشان می دهد که اندازه ذرات تقویت کننده نقش بسزایی در رفتار سایشی و مکانیکی این مواد دارند. در مواد کامپوزیتی تقویت شده با ذرات سرامیکی بدلیل تفاوت قابل توجه بین ضرایب انبساط حرارتی زمینه و تقویت کننده، میزان تنش حرارتی ناشی از عدم انطباق بالا است. در نتیجه، در حین سرمایش نابجاییها در فصل مشترک تقویت کننده/زمینه ایجاد می شوند [۶]. بطور قطع اندازه ذرات تقویت کننده بر میزان نابجایی های ایجاد شده در حین فرآیند سرمایش پس از تف جوشی موثر است. در مطالعه قبلی انجام شده توسط فرویزی و همکاران اثر مثبت افزودن نانوذرات سرامیکی بر مقاومت به سایش آلیاژ NiTi مورد بررسی قرار گرفت [۷]. با این وجود خلاء یک مطالعه مقایسه ای در مورد اثر اندازه ذرات تقویت کننده سرامیکی (شامل ذرات با سایز میکرونی و نانومتری) بر ریزساختار و رفتار سایشی آلیاژ NiTi احساس می شود. آلومینا با دارا بودن سختی و استحکام بالا، مقاومت به خوردگی مناسب و خواص حرارتی خوب دارای کاربردهای فراوانی در عرصه مهندسی است که از آن جمله می توان به کاربرد آن بعنوان ماده مقاوم به سایش اشاره کرد. بنابراین، در این تحقیق از ذرات آلومینا با اندازه های ۱ میکرون، ۰/۳ میکرون و

^۱ Shape Memory Alloys^۲ Pseudoelasticity

۸۰ نانومتر بعنوان تقویت کننده استفاده گردید تا بتوان نقش اندازه ذرات تقویت کننده را بر استحاله مارتنزیتی، ریزساختار و رفتار سایشی کامپوزیت های زمینه NiTi مورد بررسی قرار داد.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از پودرهای آلومینا با سایزهای مختلف و پودر نایتینول اتمیزه شده بعنوان مواد اولیه استفاده گردید. در جدول ۱ ویژگی های پودرهای مورد استفاده ارائه شده است. ترکیب پودر نایتینول مورد استفاده در این تحقیق ۵۶ wt% Ni-Ti می باشد که علت استفاده از این ترکیب بهره گیری از خاصیت شبه الاستیسیته آن در حین انجام آزمون سایش می باشد.

با توجه به نتایج مطالعات قبلی انجام شده بر روی سیستم کامپوزیتی NiTi-Al₂O₃ و به منظور مشاهده استحاله مارتنزیتی در نمونه های کامپوزیتی درصد وزنی ذرات تقویت کننده برابر با ۴ درصد وزنی از ذرات آلومینا در نظر گرفته شد. برای تهیه پودر کامپوزیتی مورد نظر از یک دستگاه آسیای سیاره ای استفاده گردید. برای انجام فرآیند آسیاکاری نسبت وزنی پودر به گلوله ۱:۱۰ و سرعت چرخش در حین فرآیند آسیا ۳۰۰ دور بر دقیقه انتخاب شد. جنس گلوله های مورد استفاده در این فرآیند فولاد پر کروم و میزان زمان آسیاکاری ۱۰ ساعت می باشد.

با توجه به اینکه تهیه نمونه های بالک از آلیاژ NiTi با استفاده از روش های تف جوشی در غیاب فشار منجر به ایجاد ساختار متخلخل در نمونه ها می شود، در این تحقیق از روش تف جوشی پلاسمای جرقه ای^۱ برای تهیه نمونه های بالک استفاده گردید. دمای مورد استفاده در فرآیند تف جوشی ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد، بار اعمالی ۳۰ مگاپاسکال، زمان فرآیند ۶ دقیقه و اتمسفر مورد استفاده خلاء در نظر گرفته شد. نمونه های تهیه شده بصورت دیسکی شکل با قطر ۳۰ میلی متر و ضخامت حدود ۷ میلی متر می باشند.

برای بررسی خواص سایشی نمونه های تف جوشی شده و به منظور تحلیل اثر اندازه ذرات آلومینایی بر مقاومت به سایش کامپوزیت های زمینه حافظه دار، آزمایش سایش انجام گرفت. بدین منظور، از دستگاه سایش با مکانیزم پین بر روی دیسک^۲ در شرایط خشک استفاده شد. پین های مورد استفاده در آزمون سایش از جنس فولاد متالورژی پودر ۵۲۱۰۰ با سختی ۶۴ RC (معادل ۸۴۰ ویکرز) می باشد. بار عمودی اعمالی در حین سایش بین ۲۰ نیوتن و شعاع حرکتی پین در حین سایش معادل ۷۵ میلی متر انتخاب شد. پس از انجام سایش به مسافت ۱۰۰ متر تغییر وزن، عرض ناحیه سائیده شده تعیین و در بررسی های مربوط به مقاومت به سایش مورد استفاده قرار گرفت. پس از جمع کردن براده های سایش، سطوح سائیده شده با استفاده از استون و الکل در حمام التراسونیک تمیز شدند.

^۱ Spark Plasma Sintering (SPS)

^۲ Pin on Disc

به منظور بررسی سطوح سایش و مکانیزم سایش از میکروسکوپ الکترونی استفاده شد. همچنین، به منظور بررسی وضعیت انتقال عناصر در حین سایش از آشکارساز EDX^۱ استفاده گردید که این بررسی می تواند در تعیین مکانیزم سایش موثر باشد. نوع میکروسکوپ های الکترونی روبشی مورد استفاده در این تحقیق JEOL JSPM-۵۴۰۰, Japan و SEM, Philips XL۳۰, the Netherlands می باشند.

نتایج و بحث

• آنالیز فازی نمونه های تف جوشی شده به روش SPS

در این مطالعه برای ساخت کامپوزیت های زمینه NiTi از ذرات آلومینایی با سایزهای ۱ میکرون، ۰/۳ میکرون و ۸۰ نانومتری استفاده گردید. به منظور بررسی اثر افزودن ذرات تقویت کننده و همچنین مطالعه تاثیر اندازه تقویت کننده های آلومینایی بر ریزساختار نمونه های تف جوشی شده به روش SPS، از روش پراش اشعه ایکس استفاده گردید. شکل ۱ نتایج حاصل از طرح پراش اشعه ایکس (XRD) برای نمونه های تف جوشی شده NiTi خالص و نمونه های کامپوزیتی NiTi-۴ wt.% Al₂O₃ را نشان می دهد.

مطالعه طرح پراش مربوط به نمونه NiTi خالص پس از انجام تف جوشی نشان می دهد که ترکیب آن از فاز B۲-NiTi تشکیل شده است. اما بررسی طرح پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه های کامپوزیتی دارای تقویت کننده های آلومینایی با اندازه های مختلف نشان می دهد که ترکیب فازی این نمونه ها با نمونه تف جوشی شده NiTi خالص دارای سه تفاوت عمده است:

- الف) مقدار فاز B۱۹'-NiTi در نمونه های کامپوزیتی افزایش قابل توجهی یافته است که نشان می دهد پایداری فاز مارتنزیتی پس از افزودن ذرات تقویت کننده آلومینایی افزایش یافته است.
- ب) بررسی شدت پیک های فاز مارتنزیتی نشان می دهد با کاهش اندازه ذرات تقویت کننده آلومینایی میزان فاز مارتنزیتی افزایش یافته است.
- ج) پیک های کوچکی مربوط به ترکیبات بین فلزی Ni_۲Ti و NiTi_۲ در طرح پراش نمونه های کامپوزیتی ظاهر شده است.

یکی از مهمترین تغییرات ایجاد شده پس از افزودن ذرات تقویت به زمینه مواد کامپوزیتی، ایجاد تنش های حرارتی ناشی از عدم تطابق در مدول الاستیک و ضریب انبساط حرارتی بین فاز زمینه و ذرات تقویت کننده است که منجر به افزایش دانسیته نابجایی ها در فصل مشترک بین زمینه/تقویت کننده است [۶]. افزایش دانسیته نابجایی باعث تسهیل فرآیند نفوذ عنصری گردیده و در نتیجه در نمونه های کامپوزیتی فازهای بین فلزی NiTi_۲/Ni_۲Ti به مقدار کم تشکیل می شود که در طرح پراش های مربوطه این امر مشخص است. همچنین، با توجه به مقادیر ضرایب انبساط حرارتی برای فاز زمینه NiTi و ذرات تقویت کننده آلومینا ($\alpha_{NiTi} = 11 \times 10^{-6} / ^\circ C$) و ($\alpha_{Al_2O_3} = 7/6 \times 10^{-6} / ^\circ C$) [۹ و ۸] در حین سرمایش در فصل مشترک بین تقویت کننده ها و زمینه تنش کششی

^۱ Energy Dispersive X-ray (EDX)

ایجاد می گردد. با توجه به رابطه تجربی کلازیوس-کلاپیرون بدست آمده برای آلیاژ NiTi در مورد تاثیر تنش اعمالی بر دمای استحاله مارتنزیتی ($d\sigma/dT=6/5 \text{ MPa}/^\circ\text{K}$) [۱۰] می توان نتیجه گرفت که تنش کششی ایجاد شده در فصل مشترک در تسهیل استحاله مارتنزیتی موثر است و باعث افزایش دمای استحاله مارتنزیتی و در نتیجه افزایش پایداری فاز مارتنزیت (افزایش کسر حجمی مارتنزیت) در نمونه های کامپوزیتی در دمای محیط می گردد. همچنین، می توان انتظار داشت در نمونه های کامپوزیتی تقویت شده با ذرات نانومتری بدلیل فصل مشترک های بیشتر بین زمینه و تقویت کننده های آلومینایی میزان ایجاد فاز مارتنزیتی ناشی از تنش های حرارتی در دمای محیط افزایش بیشتری داشته باشد که مطالعات ریزساختاری انجام شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تایید کننده همین موضوع است (شکل ۲). همانگونه که در این شکل مشاهده می شود ریزساختار نمونه های کامپوزیتی بصورت مخلوطی از فازهای آستنیتی و مارتنزیتی NiTi و مقادیر جزیی از ترکیبات بین فلزی است. از سوی دیگر، مطالعات انجام شده توسط ژانگ و همکارانش [۱۱ و ۱۲] نشان می دهد که وجود فازهای بین فلزی نظیر NiTi_۲ از یکسو جوانه زنی فاز مارتنزیت را تسهیل می کنند و از سوی دیگر از رشد تیغه های مارتنزیتی ممانعت بعمل می آورند. در نتیجه در ریزساختار آلیاژ NiTi در این حالت فاز مارتنزیت مورفولوژی ریزتری خواهد داشت.

• آزمون سختی سنجی

با توجه به اهمیت خاصیت سختی بر رفتار سایشی مواد، آزمون میکروسختی در چندین نقطه بر روی نمونه های تف جوشی شده انجام پذیرفت. شکل ۳ نتایج مربوط به آزمون سختی سنجی را بر روی نمونه های تهیه شده به روش SPS نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود با کاهش اندازه تقویت کننده های آلومینایی میزان سختی در نمونه های کامپوزیتی بیشتر می شود که علت آن افزایش موانع ایجاد شده برای حرکت نابجایی ها در نمونه های با تقویت کننده های ریزتر است.

• آزمون سایش

به منظور مطالعه اثر اندازه ذرات تقویت کننده آلومینایی بر رفتار سایشی کامپوزیت های زمینه NiTi، آزمون سایش با مکانیزم پین بر روی دیسک بر روی نمونه های تف جوشی شده انجام گرفت. در شکل ۴ تغییرات عرض ناحیه سائیده شده پس از انجام آزمون سایش در بار ۲۰ نیوتن و مسافت ۱۰۰ متر برای نمونه NiTi خالص و نمونه های کامپوزیتی تقویت شده با ۴ درصد وزنی از ذرات آلومینا با سایزهای مختلف رسم شده است. برای اندازه گیری ابعاد ناحیه سائیده شده از تصاویر SEM (شکل ۵) استفاده گردید. همانگونه که مشاهده می شود مقدار عرض ناحیه سائیده شده در نمونه NiTi خالص در حدود ۱۴۱۰ میکرون می باشد. در حالیکه در مورد نمونه های کامپوزیتی پس از افزودن ذرات آلومینایی عرض ناحیه سائیده شده کاهش قابل توجهی از خود نشان می دهد که نشان از افزایش مقاومت به سایش در نمونه های کامپوزیتی است. همچنین، مقایسه رفتار سایشی نمونه های کامپوزیتی نشان می دهد نمونه های تقویت شده با ذرات آلومینایی ریزتر (مانند نمونه تقویت شده با نانوذرات آلومینا) دارای مقاومت به سایش بیشتری هستند.

به منظور بررسی مکانیزم سایش در نمونه های تهیه شده از تصاویر SEM و آنالیز EDX استفاده گردید. با مراجعه به شکل ۵ (الف) مشاهده می شود که در نمونه NiTi خالص در حین سایش تغییر شکل پلاستیک شدیدی رخ داده است. همچنین، وجود شیار در سطوح سایش نمونه مذکور نشان می دهد که مکانیزم سایش در این حالت از نوع سایش خراشان است. در این نوع مکانیزم، بدلیل تفاوت قابل ملاحظه در سختی بین گلوله ساینده و نمونه تحت سایش به اصطلاح سطح سایش شخم زده می شود که در تصاویر ارائه شده این مساله کاملاً نمایان است. از سوی دیگر، در بخش هایی از ریزساختار براده های ایجاد شده در اثر حرکت متوالی پین فولادی به سطح سایش جوش خورده اند. نتایج آزمون EDX از سطح سایش این نمونه نشان می دهد که مقدار ناچیزی آهن از پین وارد سطح مذکور شده (۰/۲۵ درصد وزنی) و در عین حال لایه اکسید تیتانیم هم در حین فرآیند سایش بوجود آمده است.

با مقایسه شکل ۵ (الف) با شکل های (ب)، (ج) و (د) نشان می دهد افزودن ذرات آلومینایی باعث تغییر در مکانیزم سایش شده است. همچنین، مقایسه سطوح سایشی نمونه های کامپوزیتی نشان می دهد که اندازه ذرات تقویت کننده نیز بطور قابل توجهی بر مکانیزم سایش اثرگذار بوده اند. شکل ۴ (ب) تصویر سطح سایش نمونه NiTi-۴Al₂O₃ تقویت شده با ذرات ۱ میکرونی آلومینا را نشان می دهد. همانگونه که ملاحظه می شود در این نمونه در بخش هایی از سطح سایش شاهد کنده شدن ذرات هستیم. مطابق نظریه لایه ای شدن^۱ در سطوح سایش [۱۳]، این ترک ها در سطوح داخلی در حین سایش ایجاد می شوند و با تکرار سیکل های سایش، این سطوح شرایطی مشابه شرایط ایجاد شده در حین خستگی را تجربه می کنند و به تدریج این ترک ها به سطح نمونه می رسند که در مرحله آخر با بهم پیوستن این ترک ها بخشی از سطح سایش از نمونه جدا می شود. طبق نتیجه آزمون EDX از سطح سایش نمونه مذکور، در حدود ۰/۲۸ درصد وزنی آهن از پین به سطح سایش اضافه شده و لایه اکسید تیتانیم نیز در حین سایش تشکیل شده است.

بررسی تصاویر SEM از سطوح سایش نمونه های کامپوزیتی با اندازه تقویت کننده های ریزتر (۰/۳ میکرون و ۸۰ نانومتری) (شکل های ۵ (ج) و (د)) نشان می دهد که در حین سایش با بار ۲۰ نیوتن و به مسافت ۱۰۰ متر میزان آسیب وارد شده به سطح سایش جزئی بوده و نه تنها عرض ناحیه سائیده شده نسبت به نمونه خالص کاهش چشمگیر داشته است بلکه در حین سایش حالت لایه ای شدن نیز مشاهده نشد. بررسی سطوح سایش این کامپوزیت ها نشان می دهد که در حین سایش پین فولادی دچار سائیدگی قابل توجهی شده و آهن فراوانی وارد سطح سایش شده است. بررسی نتایج حاصل از آنالیز سطحی نشان می دهد در بخش های جوش خورده به سطح سایش حدود ۱۸/۵ درصد وزنی آهن وجود دارد که نشان از سایش قابل توجه پین فولادی و در عین حال مقاومت به سایش قابل ملاحظه این نمونه کامپوزیتی است.

^۱ Delamination

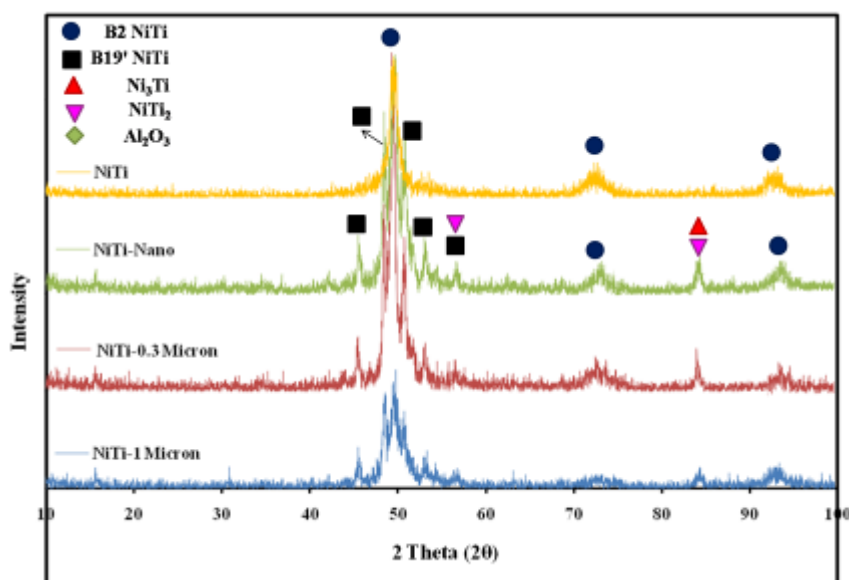
نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور مطالعه اثر اندازه ذرات تقویت کننده بر رفتار سایشی کامپوزیت های زمینه حافظه دار، از ذرات آلومینا با ۴ درصد وزنی و با اندازه های ۱ میکرون، ۰/۳ میکرون و ۸۰ نانومتر برای تقویت زمینه NiTi استفاده گردید. مطالعه ریزساختار نمونه های تف جوشی شده به روش SPS نشانگر افزایش پایداری فاز مارتنزیت در نمونه های کامپوزیتی است. بطوریکه با کاهش اندازه تقویت کننده ها مقدار فاز مارتنزیت بیشتر می شود. همچنین، نتایج آزمون سختی سنجی و سایش نشانگر سختی و مقاومت به سایش بیشتر در نمونه های کامپوزیتی تقویت شده با ذرات ریزتر است بگونه ای که نمونه دارای ذرات آلومینای ۸۰ نانومتری عملکرد سایشی بهتری را از خود نشان می دهد.

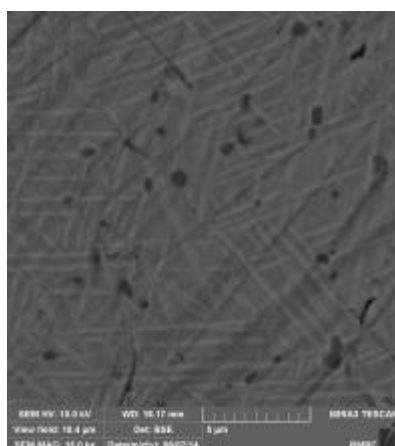
مراجع

- [۱] D. Y. Li, "A new type of wear-resistant material: pseudo-elastic TiNi alloy", *Wear*, ۲۲۱, ۱۹۹۸, ۱۱۶-۱۲۳.
- [۲] J. Jin, H. Wang, "Wear resistance of Ni-Ti alloy", *Acta Metall. Sinica*, ۲۴, ۱۹۸۸, ۶۶-۷۰.
- [۳] Y. N. Liang, S. Z. Li, Y. B. Jin, W. Jin, S. Li, "Wear behavior of a TiNi alloy", *Wear*, ۱۹۸, ۱۹۹۶, ۲۳۶.
- [۴] H. Z. Ye, R. Liu, D. Y. Li, and R. Eadie, "Development of a New Wear-Resistant Material: TiC/TiNi Composite", *Scrip. Mater.*, ۴۱, ۱۹۹۹, ۱۰۳۹-۱۰۴۵.
- [۵] H. Z. Ye, R. Liu, D. Y. Li, and R. Eadie, "Wear and friction of a new wear-resistant material: TiNi-based composites", *Comp. Sci. Tech*, ۶۱, ۲۰۰۱, ۹۸۷-۹۹۴.
- [۶] Q.Z. Wang, F.S. Han, J. Wu, G.L. Hao, "Thermal stresses in a macroscopic graphite particulates reinforced CuAlMn shape memory alloy studied by internal friction" *Mater. Sci. Eng., A* ۴۰۸, ۲۰۰۵, ۲۴۷-۲۵۴.
- [۷] M. Farvizi, T. Ebadzadeh, M.R. Vaezi, H.S. Kim, A. Simchi, "Effect of nano Al₂O₃ addition on mechanical properties and wear behavior of NiTi intermetallic" *Mater. Des.* ۵۱C, ۲۰۱۳, ۳۷۵-۳۸۲.
- [۸] K.L. Fukami-Ushiro, D.C. Dunand, "Niti and NiTi-TiC composites: Part III. shape-memory recovery" *Metal. Mater. Trans. A* ۲۷A, ۱۹۹۶, ۱۹۳-۲۰۳.
- [۹] T.W. Clyne, P.J. Withers, *An Introduction to Metal Matrix Composites*, Cambridge University Press, New York, NY, USA, ۱۹۹۳.
- [۱۰] A. Isalgue, V. Torra, A. Yawny, F.C. Lovey, "Metastable effects on martensitic transformation in SMA" *J. Therm. Anal. Calorim.* ۹۱, ۲۰۰۸, ۹۹۱-۹۹۸.
- [۱۱] J. X Zhang, M. Sato, and A. Ishida, "Structure of martensite in sputter-deposited Ti-Ni thin films containing Guinier-Preston zones", *Acta Materialia*, ۴۹, ۲۰۰۱, ۳۰۰۱-۳۰۱۰.
- [۱۲] J. X Zhang, M. Sato, and A. Ishida, "The effect of two types of precipitates upon the structure of martensite in sputter-deposited Ti-Ni thin films", *Smart Materials and Structures*, ۱۳, ۲۰۰۴, ۳۷-۴۲.
- [۱۳] C. V. White, "Friction, Lubrication and Wear Technology", *ASM Handbook*, vol. ۱۸, ۱۰th ed., ASM International, Metals Park, pp. ۵۵۳-۵۶۲, ۱۹۹۲.

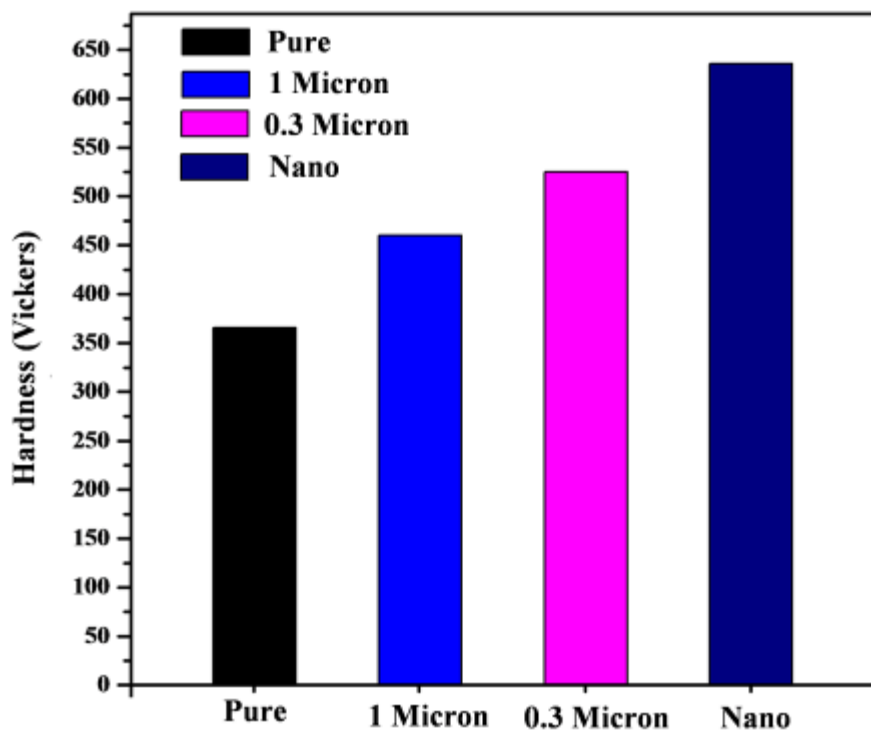
جدول ۱: ویژگی پودرهای مورد استفاده در این تحقیق.				
میانگین اندازه ذرات	شرکت	خلوص	فرمول شیمیایی	ماده
۱ میکرومتر	Taimei Chemicals,	۹۹/۹	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	آلومینا
۰/۳ میکرومتر	Taimei Chemicals,	۹۹/۹	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	آلومینا
۸۰ نانومتر	Taimei Chemicals,	۹۹/۹	Nano $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	نانو آلومینا
۱۵ میکرومتر	SAES Smart Materials	بیش از ۹۹/۹	NiTi	نایتینول



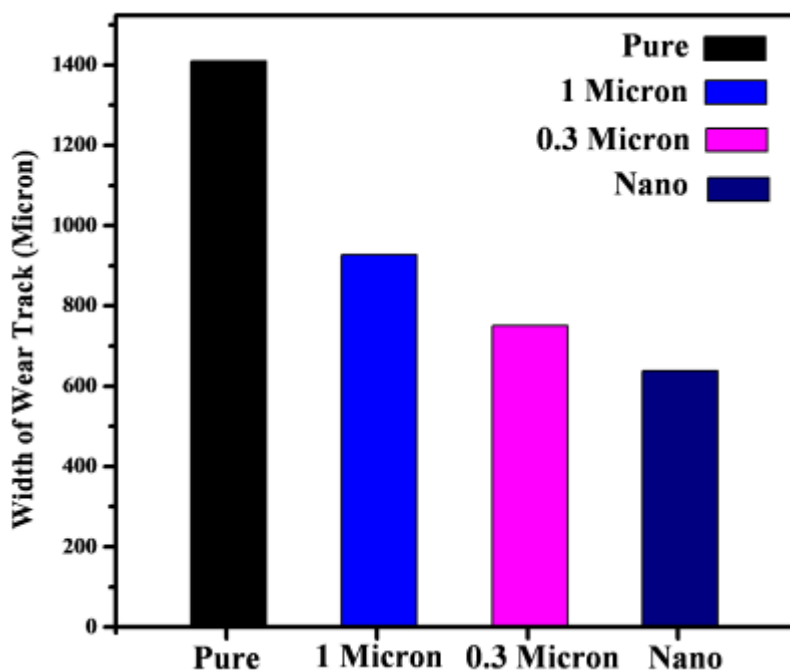
شکل ۱. طرح پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه NiTi خالص و نمونه های کامپوزیتی زمینه NiTi تقویت شده با ۴ درصد وزنی از ذرات آلومینا با سایزهای ۱ میکرون، ۰/۳ میکرون و ۸۰ نانومتری.



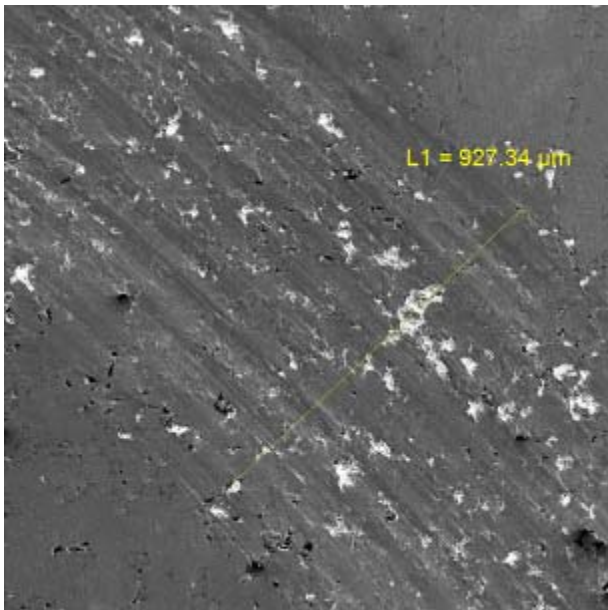
شکل ۲. ساختار مارتنزیتی ایجاد شده در نمونه ۴ wt.% Al_2O_3 NiTi تقویت شده با ذرات نانومتری آلومینایی.



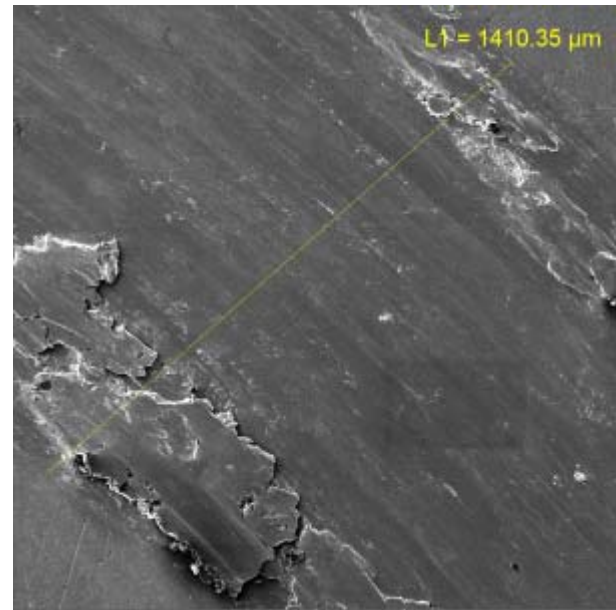
شکل ۳. نتایج حاصل از آزمون میکروسختی برای نمونه های تف جوشی شده به روش SPS (که در آن نمونه Pure نشاندهنده نمونه NiTi خالص و سایر نمونه ها با اندازه تقویت کننده مشخص شده اند).



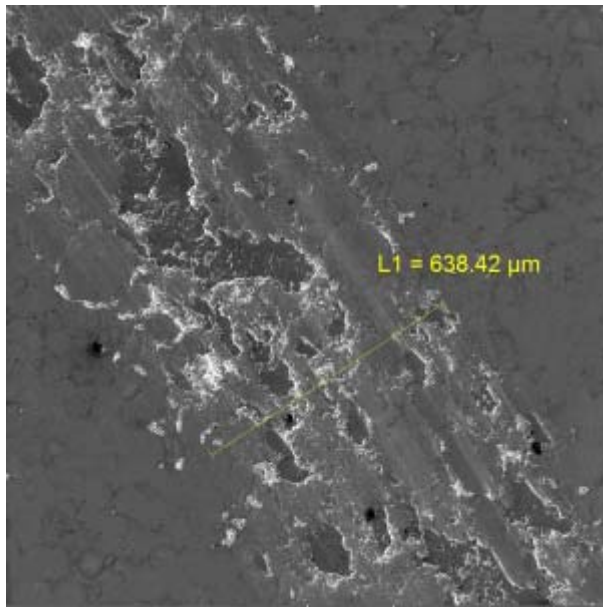
شکل ۴. تغییرات عرض ناحیه سائیده شده برای نمونه های تف جوشی شده به روش SPS پس از انجام آزمون سایش در بار ۲۰ نیوتن و مسافت ۱۰۰ متر.



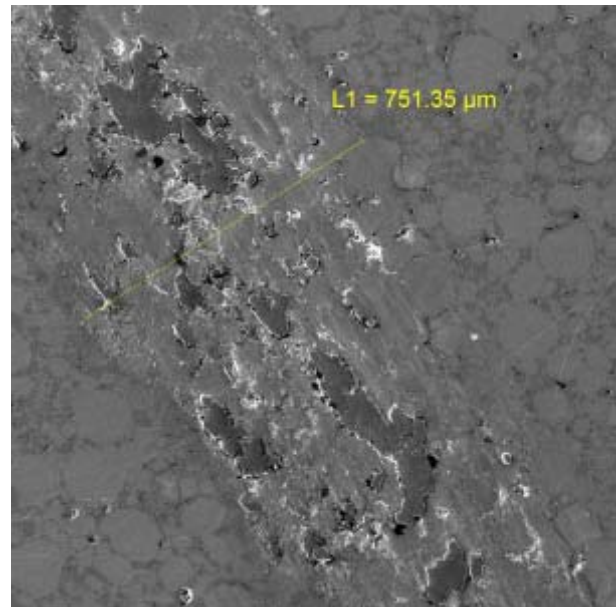
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۵. اندازه گیری عرض ناحیه سائیده شده با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) نمونه NiTi خالص، (ب) نمونه NiTi-۴Al₂O₃ تقویت شده با ذرات ۱ میکرونی، (ج) نمونه NiTi-۴Al₂O₃ تقویت شده با ذرات ۰/۳ میکرونی و (د) نمونه NiTi-۴Al₂O₃ تقویت شده با ذرات ۸۰ نانومتری.