



پژوهشگاه مواد و انرژی

سنتز و بررسی رفتار سایشی نانوکامپوزیت های ذره ای $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NiTi}$

دانشجو:

محمد فرویزی

پایان نامه برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی مواد

اساتید راهنما:

دکتر تورج عبادزاده

دکتر محمدرضا واعظی

استاد مشاور:

دکتر عبدالرضا سیم چی

خرداد ماه ۱۳۹۲

تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: محمد فرویزی

را با عنوان: سنتز و بررسی رفتار سایشی نانوکامپوزیت های ذره ای $Al_2O_3/NiTi$

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه دکتری تأیید می کند.

امضاء	رتبه علمی	نام و نام خانوادگی	اعضای هیئت داوران
			استاد راهنما
			استاد راهنما
			استاد مشاور
			استاد ممتحن
			استاد ممتحن
			استاد ممتحن
			نماینده تحصیلات تکمیلی

تقدیم بہ

پدرو مادر بزرگوارو، ہمسرفداکارم

تشکر و قدردانی

از اساتید محترم راهنما جناب آقای دکتر تورج عبادزاده و آقای دکتر محمدرضا واعظی و استاد محترم مشاور جناب آقای دکتر سیم چی و آقای دکتر کیم که در تمام مراحل این پایان نامه با راهنمایی های دلسوزانه خود مسیر انجام این تحقیق را هموار نمودند کمال تشکر را دارم. از اساتید محترم ممتحن جناب آقای دکتر فرشاد اخلاقی، جناب آقای دکتر محمدرضا رحیمی پور و جناب آقای دکتر محمد ذاکری که زحمت مطالعه و داوری این پایان نامه را قبول نموده و با راهنمایی های خود باعث بهبود کیفیت این تحقیق شدند کمال تشکر را دارم.

از پدر و مادر بزرگواری که نه تنها در مدت تحصیل، بلکه در تمام مراحل زندگی فداکارانه مسیر پیشرفت را برایم هموار کردند و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند سپاسگذاری می‌کنم. همچنین از همسر عزیزم که همواره در این مسیر سخت امیدوارانه کنارم بود تشکر می‌کنم.

حق تالیف / گردآوری و تحقیق

این پروژه تحقیقاتی به شماره شناسه ۷۸۸۹۷۳ در پژوهشگاه مواد و انرژی به ثبت رسیده است و کلیه دستاوردهای تحقیقاتی شامل نتایج نظری، نتایج علمی و عملی، دانش فنی و سایر موارد مربوط به این پروژه متعلق به پژوهشگاه مواد و انرژی می باشد. بهره برداری از نتایج پروژه برای موسسات دولتی و غیر دولتی با مجوز پژوهشگاه مواد و انرژی و درج نام پژوهشگاه مواد و انرژی امکان پذیر است.

چکیده

بررسی های انجام شده بر روی آلیاژ NiTi نشان می دهد که این آلیاژ بدلیل خواص منحصر بفردی نظیر خاصیت شبه الاستیسیته، پتانسیل بالایی جهت استفاده بعنوان زمینه کامپوزیت های مقاوم به سایش دارد. هدف این پژوهش در بخش اول، سنتز کامپوزیت زمینه NiTi تقویت شده با درصد های کم (تا ۶ درصد وزنی) از نانوذرات Al_2O_3 می باشد. بدین منظور، درصد های مختلف از این نانوذرات به سیستم آلیاژی Ni-Ti اضافه شده و اثر آنها بر مراحل آلیاژسازی مکانیکی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد پس از افزودن نانوذرات Al_2O_3 زمان رسیدن به شرایط پایدار در آلیاژسازی مکانیکی کاهش و سرعت تشکیل فاز NiTi در مجاورت این ذرات افزایش می یابد که علت آن افزایش دانسیته نابعی ها و تسهیل فرآیند جوش سرد و شکست ذرات در حین آلیاژسازی مکانیکی در حضور نانوذرات می باشد. از پودر اتمیزه نایتینول برای بررسی اثر پیش ماده بر خواص سایشی در کنار پودر بدست آمده از آلیاژسازی مکانیکی استفاده شد. پودر های تهیه شده برای ساخت قطعات کامپوزیتی به روش تف جوشی در خلاء و پرس گرم ایزواستاتیک تحت فرآیند تف جوشی قرار گرفتند. نتایج اندازه گیری دانسیته نمونه های تف جوشی شده نشان داد که با روش تف جوشی در خلاء امکان رسیدن به دانسیته کامل وجود ندارد اما نمونه های تهیه شده به روش HIP به دانسیته کامل رسیدند. نتایج حاصل از طرح پراش اشعه ایکس و DSC نشان داد افزودن نانوذرات به زمینه NiTi باعث افزایش پایداری فاز مارتنزیتی و بالا رفتن دمای این استحاله می شود. همچنین، مقدار فاز های بین فلزی در نمونه های کامپوزیتی بیشتر از نمونه های خالص NiTi می باشد. به منظور بررسی خواص مکانیکی و شبه الاستیسیته نمونه های تف جوشی شده از روش فرورونده نانو استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد پس از افزودن نانوذرات خاصیت شبه الاستیسیته کاهش نسبی از خود نشان می دهد ولی خواص مکانیکی نمونه های تقویت شده با نانوذرات بطور چشمگیری افزایش یافته است. آزمون سایش بر روی نمونه های تهیه شده به روش گلوله بر روی دیسک انجام گرفت. مطالعه سطوح سایش نشان داد نمونه های تقویت شده با نانو ذرات مقاومت به سایش بسیار بهتری در مقایسه با نمونه NiTi خالص از خود نشان دادند که بطور عمده به بهبود خواص مکانیکی و دارا بودن مقدار قابل قبول خاصیت شبه الاستیسیته در این نمونه ها بر می گردد. در نهایت، مکانیزم سایش در نمونه های تف جوشی با استفاده از SEM مورد مطالعه قرار گرفت.

کلید واژه ها: نانو کامپوزیت، NiTi، نانو ذرات Al_2O_3 ، فرورونده نانو، سایش.

فهرست مطالب

فصل ۱ مقدمه

مقدمه ۲

فصل ۲ مروری بر منابع مطالعاتی

۱-۲ آلیاژ NiTi ۶

۱-۱-۲ تاریخچه ۶

۲-۱-۲ دیاگرام فازی Ti-Ni ۷

۳-۱-۲ استحاله مارتنزیتی در سیستم آلیاژی NiTi ۸

۴-۱-۲ رفتار سوپرالاستیسیته (شبه الاستیسیته) ۱۱

۵-۱-۲ رفتار حافظه داری ۱۳

۶-۱-۲ اثر ترکیب شیمیایی بر دمای انجام استحاله استنیت \leftrightarrow مارتنزیت ۱۵

۷-۱-۲ رفتار سایشی آلیاژ NiTi ۱۶

۸-۱-۲ بعنوان فاز زمینه ی کامپوزیت های مقاوم به سایش ۱۸

۲-۲ استفاده از روش فرورونده نانو برای بررسی خواص مواد حافظه دار ۲۱

۳-۲ آلیاژسازی مکانیکی ۲۸

۱-۳-۲ تاریخچه ۲۸

۲-۳-۲ انواع آسیاب های مورد استفاده در آلیاژسازی مکانیکی ۳۱

۳-۳-۲ ورود آلودگی در حین آلیاژسازی ۳۸

۴-۳-۲ انواع سیستم های آسیاکاری مکانیکی ۳۹

- ۴۲..... ۵-۳-۲ مکانیزم فرآیند آلیاژسازی مکانیکی
- ۴۳..... ۶-۳-۲ مکانیزم تشکیل مواد نانوساختار در حین آلیاژسازی مکانیکی
- ۴۴..... ۷-۳-۲ مکانیزم ایجاد ساختار آمورف حین آلیاژسازی مکانیکی
- ۴۵..... ۸-۳-۲ آلیاژسازی مکانیکی در سیستم Ti-Ni
- ۴۷..... ۴-۲ تف جوشی
- ۵۰..... ۱-۴-۲ روش پرس گرم ایزو استاتیک
- ۵۳..... ۵-۲ سایش
- ۵۳..... ۱-۵-۲ تعریف سایش
- ۵۴..... ۲-۵-۲ انواع مکانیزم های سایش
- ۵۸..... ۳-۵-۲ اثر خواص مواد بر رفتار سایشی
- ۵۹..... ۴-۵-۲ روش های کاهش اثرات سایش

فصل ۳ مواد و روش پژوهش

- ۶۱..... ۱-۳ مواد اولیه
- ۶۴..... ۲-۳ آلیاژسازی مکانیکی
- ۶۶..... ۳-۳ فرآیند تف جوشی
- ۶۶..... ۱-۳-۳ تف جوشی در اتمسفر خلاء
- ۶۷..... ۲-۳-۳ تف جوشی با استفاده از روش پرس گرم ایزواستاتیک (HIP)

۴-۳ ریزسختی سنجی	۶۸
۵-۳ آزمایش فرورونده نانو	۶۹
۶-۳ آزمایش سایش	۶۹
۷-۳ روش های ارزیابی مورد استفاده در تحقیق	۷۱
۱-۷-۳ بررسی فازی به روش پراش اشعه ایکس	۷۱
۲-۷-۳ اندازه گیری اندازه ذرات	۷۱
۳-۷-۳ بررسی دماهای استحاله مارتنزیتی توسط روش DSC	۷۲
۳-۷-۳ بررسی ریزساختاری با میکروسکوپ الکترونی روبشی	۷۲
۴-۷-۳ بررسی ریزساختاری با میکروسکوپ الکترونی عبوری با وضوح بالا	۷۳
تقسیم بندی مراحل انجام پروژه	۷۵
فصل ۴ نتایج و بحث	
۱-۴ آلیاژسازی مکانیکی	۷۸
۱-۱-۴ آلیاژسازی مکانیکی در سیستم Ni-Ti	۷۸
۲-۱-۴ آلیاژسازی مکانیکی در سیستم Ni-Ti-nano Al ₂ O ₃	۸۲
۳-۱-۴ اندازه گیری میکروسختی نمونه های پودری	۹۲
۲-۴ تف جوشی	۹۴
۱-۲-۴ تف جوشی در خلاء	۹۵
۲-۲-۴ تف جوشی به روش پرس گرم ایزو استاتیک	۱۰۶
۳-۴ استفاده از روش فرورونده نانو برای تعیین خواص مکانیکی و شبه الاستیسیته	۱۱۳

۱-۳-۴ بررسی خواص مکانیکی و شبه الاستیسیته نمونه های تهیه شده به روش تف جوشی در خلاء.....	۱۱۳
۲-۳-۴ بررسی خواص مکانیکی و شبه الاستیسیته نمونه های تهیه شده به روش پرس گرم ایزواستاتیک.....	۱۱۸
۴-۴ آزمون سایش.....	۱۲۱
۱-۴-۴ نقش نانوذرات Al_2O_3 بر رفتار سایشی نمونه های تهیه شده از پودر نایتینول اتمیزه و تف جوشی شده در خلاء.....	۱۲۱
۲-۴-۴ رفتار سایشی نمونه های تف جوشی شده به روش پرس گرم ایزواستاتیک.....	۱۲۸
۵-۴ مقایسه خواص مکانیکی و سایشی نمونه های تف جوشی شده در خلاء و تف جوشی شده به روش پرس گرم ایزواستاتیک.....	۱۴۲
فصل ۵ نتیجه گیری	۱۴۵
فصل ۶ پیشنهادات	۱۴۹
مراجع	۱۵۱

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۲ دیاگرام فازی سیستم آلیاژی Ti-Ni ۸
- شکل ۲-۲ سه مسیر انجام استحاله ی مارتنزیتی در سیستم آلیاژی Ti-Ni ۹
- شکل ۳-۲ ساختار مارتنزیتی آلیاژ NiTi ۱۰
- شکل ۴-۲ منحنی مربوط به کسر حجمی مارتنزیت ایجاد شده در حین سرمایش و گرمایش ۱۱
- شکل ۵-۲ منحنی تنش - کرنش برای آلیاژ Ti-51at.%Ni در دمای اتاق ۱۳
- شکل ۶-۲ مراحل مربوط به رفتار حافظه داری ۱۴
- شکل ۷-۲ ایجاد تغییر شکل دائمی بدلیل اعمال بار زیاد در حین مراحل ایجاد حافظه داری ۱۴
- شکل ۸-۲ اثر تغییر کسر مولی Ni بر دمای آغاز استحاله مارتنزیتی ۱۵
- شکل ۹-۲ مقایسه نرخ سایش NiTi در مقایسه با چند ماده مهندسی ۱۸
- شکل ۱۰-۲: مقایسه مقاومت به سایش در مواد مختلف در بارهای اعمالی متفاوت ۲۰
- شکل ۱۱-۲ انواع فرورونده های مورد استفاده در روش فرورونده نانو ۲۲
- شکل ۱۲-۲ فرورفتگی ایجاد شده ناشی از فرورونده بر کوویچ ۲۳
- شکل ۱۳-۲ منحنی تغییرات بار اعمالی بر حسب عمق فرورونده بدست آمده از روش فرورونده نانو ۲۴
- شکل ۱۴-۲ منحنی تنش - کرنش حاصل از بارگذاری کششی ۲۵
- شکل ۱۵-۲ نحوه محاسبه میزان انرژی تغییر شکل قابل بازیابی (W_{rc}) و میزان انرژی تغییر شکل کل (W_t) با استفاده از روش فرورونده نانو ۲۶
- شکل ۱۶-۲ منحنی بار اعمالی بر حسب جابجایی برای آلیاژ NiTi در حالت بدون عملیات حرارتی و پس از اعمال عملیات حرارتی و فولاد ۳۰۴ در بارگذاری های کم و زیاد ۲۷
- شکل ۱۷-۲ تاریخچه روش آلیاژسازی مکانیکی ۲۹

- شکل ۲-۱۸ نمونه ای از آسیای SPEX 8000 ۳۳
- شکل ۲-۱۹ نمونه ای از آسیای ساینده مورد استفاده در آلیاژسازی مکانیکی ۳۴
- شکل ۲-۲۰ شکل شماتیک از آسیای افقی غلتان ۳۶
- شکل ۲-۲۱ نمونه از آسیای سیاره ای ۳۷
- شکل ۲-۲۲ مراحل انجام آلیاژسازی مکانیکی در سیستم نرم - نرم ۴۰
- شکل ۲-۲۳ مراحل انجام آلیاژسازی مکانیکی در سیستم نرم - ترد ۴۱
- شکل ۲-۲۴ نمونه ای از پودر اتمیزه با مورفولوژی کروی ۵۱
- شکل ۲-۲۵ الف) تصویر یک نمونه قبل از انجام HIP و ب) تصویر همان نمونه پس از اتمام HIP و ماشین کاری محفظه. ۵۲
- شکل ۲-۲۶ مراحل انجام تف جوشی به روش پرس گرم ایزواستاتیک (HIP) ۵۲
- شکل ۲-۲۷ مکانیزم سایش خراشان دو جسمی و سه جسمی ۵۵
- شکل ۲-۲۸ مکانیزم سایش چسبان ۵۶
- شکل ۳-۱ تصویر SEM مربوط به الف) پودر نیکل، ب) پودر تیتانیم، ج) پودر نانو آلومینا و د) پودر نایتینول ۶۲
- شکل ۳-۲ توزیع اندازه ذرات پودرهای اولیه الف) نیکل و ب) تیتانیم ۶۳
- شکل ۳-۳ تصاویر مربوط به نمونه های تف جوشی شده به روش پرس گرم ایزواستاتیک الف) قبل از جدا کردن کپسول و ب) بعد از ماشین کاری و خارج کردن کپسول ۶۸
- شکل ۳-۴ تصویر شماتیک از دستگاه سایش با مکانیزم گلوله بر روی دیسک ۷۰
- شکل ۳-۵ نمونه ای از دستگاه دیمپلر مورد استفاده در آماده سازی نمونه های بالک TEM ۷۴
- شکل ۴-۱ الگوی پراش اشعه ایکس در زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی برای سیستم Ni-Ti و در غیاب ذرات تقویت کننده ۷۸

شکل ۲-۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی برای سیستم Ni-Ti و در غیاب ذرات تقویت کننده ۷۹

شکل ۳-۴ تصویر زمینه روشن TEM از پودر Ni-Ti پس از ۵۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی در غیاب ذرات تقویت کننده ۸۰

شکل ۴-۴ تصویر HRTEM از پودر آلیاژسازی شده Ni-Ti پس از ۱۰ ساعت آسیا کاری ۸۱

شکل ۵-۴ الگوی پراش اشعه ایکس در زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی برای سیستم Ni-Ti و در حضور ۶ درصد وزنی از نانوذرات Al_2O_3 ۸۲

شکل ۶-۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی برای سیستم Ni-Ti در حضور ۴ درصد وزنی از نانوذرات Al_2O_3 ۸۳

شکل ۷-۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در زمانهای مختلف آلیاژسازی مکانیکی برای سیستم Ni-Ti در حضور ۶ درصد وزنی از نانوذرات Al_2O_3 ۸۴

شکل ۸-۴ مراحل مختلف آلیاژسازی مکانیکی در سیستم آلیاژی Ni-Ti ۸۵

شکل ۹-۴ تغییرات اندازه میانگین ذرات در پودرهای کامپوزیتی دارای درصدهای مختلف نانوذرات Al_2O_3 با زمان آلیاژسازی مکانیکی ۸۶

شکل ۱۰-۴ تصویر TEM از پودر کامپوزیتی Ni-Ti- 6wt% Al_2O_3 پس از انجام آلیاژسازی به مدت ۱۰ ساعت ۸۸

شکل ۱۱-۴ بررسی نحوه توزیع عناصر در سیستم Ni-Ti- 6wt% Al_2O_3 پس از گذشت ۱۰ ساعت از زمان آسیا کاری به روش EDX-TEM Mapping ۸۹

شکل ۱۲-۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری به همراه طرح پراش مربوطه برای پودر کامپوزیتی Ni-Ti- 6wt% Al_2O_3 پس از انجام آلیاژسازی مکانیکی به مدت ۵۰ ساعت ۹۰

شکل ۴-۱۳ تصویر HRTEM و IFFT از پودر کامپوزیتی با ترکیب Ni-Ti- 6wt% Al₂O₃ پس از انجام ۱۰ ساعت آلیاژسازی مکانیکی ۹۱

شکل ۴-۱۴ تعیین اندازه کریستالیت ها در نمونه Ni-Ti- 6wt% Al₂O₃ با ساختار دانه اعوجاج یافته با استفاده از اندازه گیری خطوط فرینج ۹۱

شکل ۴-۱۵ نتایج آزمایش سختی سنجی بر روی پودرهای آسیا کاری شده Ni-Ti و Ni-Ti-6wt% Al₂O₃ ۹۳

شکل ۴-۱۶ (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه تف جوشی شده NiTi بدست آمده از پودر اتمیزه نایتینول ، (ب) تصویر میکروسکوپ نوری از فضای بین ذرات NiTi ۹۸

شکل ۴-۱۷ طرح پراش اشعه ایکس برای نمونه های تف جوشی شده NiTi و NiTi-6Al₂O₃ در دمای ۱۰۰۰°C و به مدت ۶ ساعت ۱۰۰

شکل ۴-۱۸ منحنی DSC مربوط به (الف) نمونه NiTi تف جوشی شده و (ب) نمونه NiTi-6Al₂O₃ پس از انجام تف جوشی ۱۰۱

شکل ۴-۱۹ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه کامپوزیتی NiTi-6Al₂O₃ تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی و تف جوشی در خلاء در بزرگنمایی های مختلف ۱۰۵

شکل ۴-۲۰ طرح پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه های NiTi خالص و نمونه کامپوزیتی زمینه NiTi تقویت شده با نانوذرات آلومینا تهیه شده به روش آلیاژسازی مکانیکی و تف جوشی در خلاء ۱۰۶

شکل ۴-۲۱ تصاویر OM از نمونه های (الف) NiTi خالص بدست آمده از پودر نایتینول اتمیزه، (ب) نمونه 6Al₂O₃-NiTi بدست آمده از پودر اتمیزه نایتینول و نانوذرات آلومینا و (ج) نمونه 6Al₂O₃-NiTi بدست آمده از پودرهای حاصل از آلیاژسازی مکانیکی پس از انجام تف جوشی به روش HIP ۱۰۸

شکل ۴-۲۲ تصویر HRTEM مربوط به نمونه کامپوزیتی $\text{NiTi-6Al}_2\text{O}_3$ بدست آمده از پودر اتمیزه نایتینول و نانوذرات آلومینا به همراه تصاویر FFT و IFFT که نشاندهنده ساختار B2 در بخش موردنظر است ۱۰۹

شکل ۴-۲۳ تصویر HRTEM مربوط به نمونه کامپوزیتی $\text{NiTi-6Al}_2\text{O}_3$ بدست آمده از پودر اتمیزه نایتینول و نانوذرات آلومینا به همراه تصاویر FFT و IFFT که نشاندهنده تشکیل فاز NiTi_2 در بخش موردنظر است ۱۱۰

شکل ۴-۲۴ تصویر HRTEM از نمونه کامپوزیتی تهیه شده از پودرهای بدست آمده از آلیاژسازی مکانیکی و تف جوشی شده به روش HIP به همراه تصاویر FFT از نقاط مختلف آن ۱۱۱

شکل ۴-۲۵ تصویر HRTEM از نمونه کامپوزیتی $\text{MA-NiTi-6Al}_2\text{O}_3$ که تشکیل فاز مارتنزیتی را در مجاورت فاز NiTi_2 نشان می دهد ۱۱۲

شکل ۴-۲۶ منحنی بار اعمالی بر حسب جابجایی در سطح، بدست آمده از آزمون فرورونده نانو برای نمونه های کامپوزیتی تقویت شده با درصد های مختلف از نانوذرات Al_2O_3 ۱۱۴

شکل ۴-۲۷ تغییرات سختی و مدول الاستیک نمونه های کامپوزیتی زمینه NiTi با درصد نانوذرات Al_2O_3 ۱۱۵

شکل ۴-۲۸ تغییرات ضریب η با درصد وزنی نانوذرات ۱۱۶

شکل ۴-۲۹ منحنی های بار اعمالی بر حسب جابجایی در سطح برای نمونه های تف جوشی شده به روش HIP ۱۱۹

شکل ۴-۳۰ تغییرات عرض ناحیه سائیده شده با درصد وزنی نانوذرات Al_2O_3 موجود در نمونه های کامپوزیتی پس از انجام آزمون سایش در بار ۱۰ نیوتن و مسافت ۱۰۰ متر ۱۲۲

شکل ۴-۳۱ تغییرات عمق ناحیه تحت سایش با درصد وزنی نانوذرات آلومینا پس از انجام آزمون سایش به مسافت ۱۰۰ متر و در بارهای مختلف ۱۲۳

شکل ۴-۳۲ تصویر SEM از سطح سایش نمونه (الف) NiTi و (ب) NiTi-6Al₂O₃، (ج) نتایج حاصل از آشکارساز EDS مربوط به نمونه NiTi و (د) نمونه NiTi-6Al₂O₃ پس از انجام آزمون سایش در بار ۱۰ نیوتن و مسافت ۱۰۰ متر ۱۲۵

شکل ۴-۳۳ تغییرات ضریب اصطکاک با مسافت سایش برای نمونه های تف جوشی شده در خلاء در حین آزمون سایش با بار ۱۰ نیوتن ۱۲۶

شکل ۴-۳۴ تصویر SEM از سطح سایش نمونه مرجع (NiTi) پس از انجام تست سایش به مسافت ۳۰۰ متر تحت بارهای ۱۰ و ۲۰ نیوتنی ۱۲۹

شکل ۴-۳۵ تصویر SEM از سطح سایش نمونه NiTi-6Al₂O₃ تهیه شده از پودر نایتینول اتمیزه و نانوذرات آلومینا پس از انجام تست سایش به مسافت ۳۰۰ متر و تحت بارهای مختلف ۱۲۹

شکل ۴-۳۶ تصویر SEM از سطح سایش نمونه MA-NiTi-6Al₂O₃ تهیه شده از پودر حاصل از آلیاژی مکانیکی پس از انجام تست سایش به مسافت ۳۰۰ متر و تحت بار ۲۰ نیوتن ۱۳۰

شکل ۴-۳۷ تغییرات عرض ناحیه سائیده شده با بار اعمالی برای نمونه NiTi و نمونه NiTi-6Al₂O₃ ۱۳۲

شکل ۴-۳۸ سطح سایش مربوط به نمونه HIP-NiT ۱۳۳

شکل ۴-۳۹ سطح سایش مربوط به نمونه HIP-NiTi-6Al₂O₃ ۱۳۵

شکل ۴-۴۰ سطح سایش مربوط به نمونه MA-HIP-NiTi-6Al₂O₃ ۱۳۶

شکل ۴-۴۱ ترکهای ایجاد شده در سطح سایش نمونه MA-HIP-NiTi-6Al₂O₃ ۱۳۸

شکل ۴-۴۲ تصویر SEM از سطح گلوله کاربید تنگستنی پس از انجام آزمون سایش به مسافت ۳۰۰ متر و تحت بار ۲۰ نیوتن در برابر نمونه MA-HIP-NiTi-6Al₂O₃ ۱۳۹

شکل ۴-۴۳ تصویر OM از سطح گلوله فولادی پس از انجام آزمون سایش به مسافت ۳۰۰ متر و تحت بار ۲۰ نیوتن در برابر نمونه MA-HIP-NiTi-6Al₂O₃ ۱۳۹

شکل ۴-۴۴ نتایج مربوط به آنالیز EDS از سطح سایش نمونه های تف جوشی به روش HIP ۱۴۰
شکل ۴-۴۵: تصویر حاصل از 3D-Profilometer از سطح سایش نمونه MA-NiTi-6Al₂O₃ پس از انجام آزمون سایش به مسافت ۳۰۰ متر و تحت بار ۲۰ نیوتن ۱۴۱

فهرست جدول ها

- جدول ۱-۲ ثوابت شبکه و اطلاعات کریستالوگرافی مربوط به فاز مارتنزیتی آلیاژ NiTi ۱۰
- جدول ۱-۳ ویژگی پودرهای مورد استفاده در این تحقیق ۶۱
- جدول ۲-۳ دماهای انجام استحاله مربوط به پودر اتمیزه اولیه ۶۴
- جدول ۱-۴ دانسیته نمونه های تهیه شده به روش تف جوشی در خلاء ۹۶
- جدول ۲-۴ نتایج مربوط به سختی، مدول الاستیک و خاصیت شبه الاستیسیته نمونه های تف جوشی شده به روش HIP ۱۲۰
- جدول ۳-۴ مقایسه خواص مکانیکی و شبه الاستیسیته نمونه NiTi-6Al₂O₃ تهیه شده از پودر نایتینول اتمیزه و نانوذرات آلومینا به روش تف جوشی در خلاء و پرس گرم ایزواستاتیک بدست آمده از روش فرورونده نانو ۱۴۲
- جدول ۴-۴ مقایسه رفتار سایشی نمونه NiTi-6Al₂O₃ تهیه شده از پودر نایتینول اتمیزه و نانوذرات آلومینا به روش تف جوشی در خلاء و پرس گرم ایزواستاتیک پس از انجام آزمون سایش به مسافت ۳۰۰ متر و تحت بار ۱۰ نیوتن ۱۴۳

فصل ۱

مقدمه