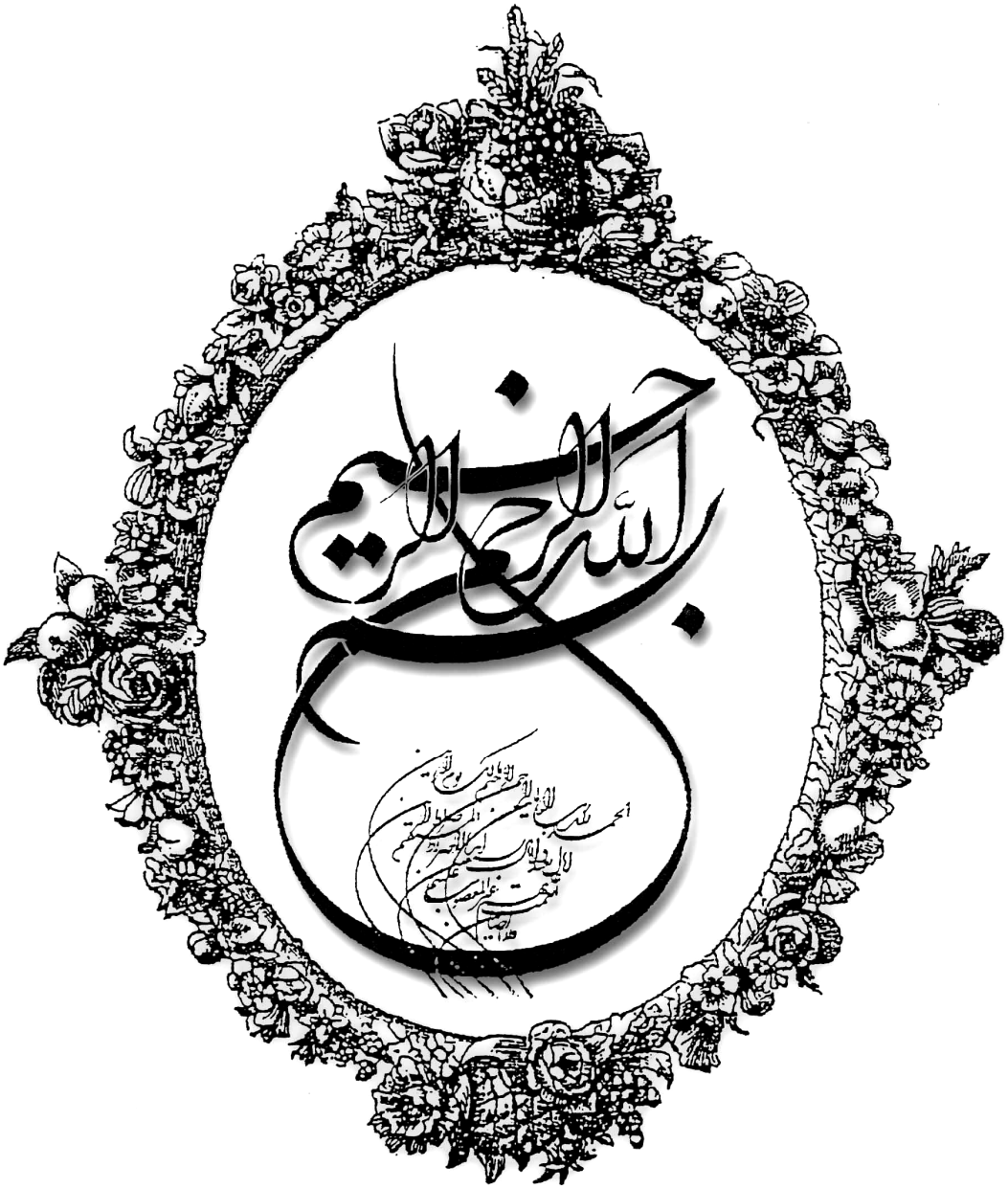
بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی مواد- صنایع

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد گرایش شکل دادن فلزات

عنوان :

ساخت کامپوزیت هوشمند NiTi/Al و بررسی خواص مکانیکی آن

توسط :

سعید باقری

اساتید راهنما :

دکتر فتح الله قدس

دکتر احمد کرمانپور

سال ۱۳۹۰

تقدیم به پدر عزیز

و

مادر مهربانم

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه

فصل ۱ .....۱

مقدمه.....۱

فصل ۲ .....٤

مروری بر منابع.....۴

۲-۱- انواع آلیاژهای حافظه دار.....۵

۲-۲- آلیاژ NiTi از دیدگاه کریستالوگرافی.....۸

۲-۳- استحاله مارتنزیتی.....۹

۲-۳-۱- خصوصیات کلی استحاله مارتنزیتی.....۹

۲-۳-۲- پدیده های مرتبط با استحاله مارتنزیتی.....۱۴

۲-۳-۳- رفتار ترموالاستیک.....۱۵

۲-۳-۴- ترمودینامیک استحاله مارتنزیتی ترموالاستیک.....۱۶

۲-۳-۵- رفتار حافظه داری.....۱۹

۲-۳-۵-۱- اثر حافظه داری یک طرفه و دو طرفه.....۲۳

۲-۳-۶- رفتار سوپر الاستیک.....۲۵

۲-۴- روش های فراوری کلی آلیاژهای Ti-Ni.....۲۷

۲-۴-۱- مواد خام.....۲۷

۲-۴-۲- ذوب و ریخته گری.....۲۸

۲-۴-۳- روش های تولید نایتینول متخلخل.....۳۰

۲-۴-۴- طراحی آلیاژ.....۳۱

۲-۴-۵- کار سرد و کار گرم.....۳۳

۲-۴-۶- عملیات حرارتی.....۳۴

۲-۴-۷- جوشکاری و اتصال.....۳۵

۲-۴-۸- شرایط سطحی.....۳۵

۲-۵- کاربردهای آلیاژهای حافظه دار.....۳۶

۲-۵-۱- کاربردهای پزشکی.....۳۶

۲-۵-۱-۱-استنت های قلبی عروقی ۳۷
۲-۵-۱-۲-آب بند حفرات دهلیزی ۳۷
۲-۵-۱-۳- سیم های راهنما ۳۸
۲-۵-۲- کاربردهای صنعتی ۳۹
۲-۵-۲-۱- سیستم های رباتیک و میکرو الکترومکانیک ۳۹
۲-۵-۲-۲- صنایع هوا- فضا ۴۰
۲-۵-۲-۳- صنایع خودروسازی ۴۳
۲-۵-۲-۴- سازه های عمرانی ۴۳

۲-۶- رفتار ترمومکانیکی آلیاژ NiTi ۴۴
۲-۶-۱- مکانیزم تغییرشکل ۴۴
۲-۶-۲- تغییرشکل شبه لودرز ۴۶
۲-۶-۳- حالت تغییرشکل ۴۷
۲-۶-۴- اثر بافت یا تکسچر ۴۷
۲-۶-۵- دمای تست ۴۸
۲-۶-۶- رفتار استحاله ۴۹
۲-۶-۷- تأثیر ترکیب شیمیایی آلیاژ ۵۰
۲-۶-۸- اثر کار سرد و آنیل کردن ۵۲
۲-۶-۹- اثر پیرسازی ۵۳

فصل ۳ ..... ۵۸

روش تحقیق ۵۸

۳-۱- مواد و تجهیزات ۵۸

۳-۲- روش انجام فرایند پرس گرم ۶۰

۳-۳- تست کشش سیم NiTi و بررسی اثر حافظه داری ۶۲

۳-۴- بررسی دمای استحاله سیم توسط روش کالریمتری ۶۴
۳-۴-۱- روش انجام آزمون DSC ۶۵

۳-۵- آزمایش کشش نمونه های کامپوزیت NiTi/Al ۶۵

۳-۶- متالوگرافی نمونه ها ۶۶

۳-۷- آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) ۶۷

۳-۸- آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و EDS ۶۸

فصل ٤ ..... ٦٩

بحث و نتایج ۶۹

۴-۱- بررسی دماهای استحاله سیم NiTi توسط آزمون DSC ۶۹
۴-۱-۱- بررسی منحنی DSC سیم NiTi در حالت آنیل انحلالی ۶۹
۴-۱-۲- بررسی منحنی DSC سیم در سیکل برگشت اول ۷۱
۴-۱-۳- بررسی منحنی DSC سیم NiTi در سیکل برگشت دوم و سیکل کامل سوم ۷۸
۴-۱-۴- اثر پایدار شدن مارتنزیت ۸۱

۴-۲- بررسی رفتار تنش – کرنش کامپوزیت NiTi/Al ۸۳
۴-۲-۱- رفتار تنش – کرنش سیم NiTi ۸۳
۴-۲-۲- رفتار تنش – کرنش نمونه های کامپوزیت NiTi/Al ۸۶
۴-۲-۲-۱- رفتار تنش – کرنش کامپوزیت NiTi/Al با ۴٪ حجمی سیم NiTi ۸۶
۴-۲-۲-۲- رفتار تنش – کرنش کامپوزیت NiTi/Al با ۸٪ حجمی سیم NiTi ۹۲

۴-۳- بررسی فازی سیم NiTi توسط پراش پرتوی ایکس ۹۷

۴-۴- بررسی متالوگرافی نمونه ها ۱۰۲
۴-۴-۱- بررسی ریزساختار زمینه AA1100 ..... ۱۰۲
۴-۴-۲- متالوگرافی سیم NiTi ۱۰۴
۴-۴-۳- متالوگرافی سطح مقطع کامپوزیت NiTi/Al ۱۰۶

۴-۵- بررسی سطح مقطع کامپوزیت NiTi/Al توسط میکروسکوپ الکترونی ۱۰۷

۴-۶- ارزیابی ترکیب شیمیایی فصل مشترک بروش EDS ۱۱۱

فصل ۵ ..... ۱۱۸

نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۱۸

۵-۱- نتیجه گیری ۱۱۸

۵-۲- پیشنهادها ۱۲۰

مراجع ۱۲۱

فهرست اشکال

شکل ۲-۱- ساختار کریستالی آلیاژهای NITI (الف) ساختار مکعبی B2 فاز مادر ۸

شکل ۲- ۲- مدل ساده ای از استحاله مارتنزیتی[۲]. ۹

شکل ۲-۳- نمایشی از چگونگی همبسته ماندن صفحه های مارتنزیت ۱۰

شکل۲-۴- نمایشی شماتیک از چگونگی لغزش نابجایی و دوقلویی مارتنزیت..... ۱۲

شکل ۲-۵- الف) یک تک کریستال با فاز B ب) تحولات خود انطباقی و دوقلویی شدن ۱۳

شکل ۲-۶ – الف) مقطعی از یک نمونه مارتنزیتی ب) نتیجه نهایی از تغییرشکل ساختار ۱۴

شکل ۲-۷- شماتیک تغییرشکل که توسط استحاله مارتنزیتی بوسیله تنش اعمالی ایجاد شده است..... ۱۷

شکل ۲-۸- اثر تنش بر دمای تعادلی استحاله مارتنزیتی طبق رابطه کلازیوس – کلاپیرن..... ۱۸

شکل ۲-۹- نحوه تغییر ساختار بلوری فازها در اثر(الف) اعمال حرارت ۲۰

شکل۲-۱۰- نمایش ویژگی شبه پلاستیک در مارتنزیت دو قلو [۲۱]..... ۲۱

شکل ۲-۱۱- نمایش رفتار شبه پلاستیک برای آستنیت خالص در بازه دمایی $M_S< T <A_S$ [۲۱]..... ۲۲

شکل ۲-۱۲- نمایش چگونگی ایجاد خاصیت حافظه داری [۲۱] ۲۳

شکل ۲-۱۳- (الف) اثر حافظه داری یک طرفه (ب) اثر حافظه داری دو طرفه ۲۴

شکل ۲-۱۴- مقایسه اثر حافظه داری یک طرفه و دو طرفه با استفاده از فنر. ۲۵

شکل ۲-۱۵- منحنی تنش – کرنش آلیاژ حافظه دار CU-ZN و رفتار سوپرالاستیک آن [۲۲]..... ۲۶

شکل ۲-۱۶- منطقه اثر حافظه داری و سوپرالاستیسیته در دیاگرام تنش – دما [۲۳] ۲۷

شکل۲-۱۷- فرایند تولید آلیاژ حافظه دار TI-NI ۲۸

شکل ۲-۱۸- مدل شماتیک کوره القایی تحت خلأ (VIM) ۲۹

شکل ۲-۱۹- شماتیک مدل کوره قوس الکتریکی VAR ۳۰

شکل ۲-۲۰- ارتباط بین مقدار نیکل و دمای A_F ۳۲

شکل ۲-۲۱- اثر عنصر آلیاژی سوم بر دمای M_S آلیاژ حافظه دار..... ۳۳

شکل ۲-۲۲- استحکام کششی و ازدیاد طول آلیاژ هم اتم TI-NI در دمای بالا..... ۳۴

شکل ۲-۲۳- نمایش خاصیت سختی دو جانبه در نایتینول..... ۳۷

شکل ۲-۲۴- نمایش دو صفحه بکار رفته برای آب بندی حفره بین دو دهلیز قلب و نحوه عملکرد آن [۴۰] ۳۸

شکل ۲-۲۵- نمونه هایی از کاربرد نایتینول در وسایل پزشکی ۳۹

شکل۲-۲۶- مقایسه نسبت توان به وزن انواع مختلف عملگرها..... ۴۰

شکل ۲-۲۷- نازل شورن و نحوه قرار گیری نوارهای حافظه دار ۴۱

شکل ۲-۲۸ - نمایش شماتیک مکانیزم متداول بالَک ۴۲

شکل ۲-۲۹- نمایش بالَک مجهز به سیم های حافظه دار..... ۴۲

شکل ۲-۳۰- رفتار تنش-کرنش NITI هم اتم تغیر شکل داده توسط استحاله ۴۵

شکل ۲-۳۱- ارتباط دمایی تنش های بحرانی برای تغییرشکل NITI ۴۹

شکل ۲-۳۲- اثر مقدار NI بر دماهای استحاله آلیاژ دوتایی NITI ۵۰

شکل ۲-۳۳- اثر کار سرد و کار گرم بر دماهای استحاله NITI دوتایی ۵۲

شکل ۲-۳۴- اثر آنیل کردن بعد از کار سرد بر دماهای استحاله برای NITI ۵۳

شکل ۲-۳۵- دیاگرام فازی سیستم دوتایی TI-NI [۸۲] ۵۴

شکل ۲-۳۶- رسوبات غنی از نیکل آلیاژهای NITI [۸۳]..... ۵۵

شکل۲-۳۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری که نشاندهنده رسوبات پیوسته TI_3NI_4 ..... ۵۶

شکل ۲-۳۸- تصویر TEM در آلیاژ پیرشده TI-50.8AT%NI..... ۵۷

شکل۳-۱- فیکسچر و قطعات جانبی طراحی شده جهت عملیات حرارتی نمونه ها..... ۵۹

شکل ۳-۲- فرایند عملیات حرارتی کفشک های پرس گرم ۶۰

شکل ۳-۳- شماتیک کلی فرایند بکار رفته به منظور ساخت کامپوزیت NITI/AL..... ۶۱

شکل ۳-۴- نمونه کشش تخت طبق استاندارد ASTM E8M..... ۶۱

شکل ۳-۵- نمونه کامپوزیتی شامل ۴ درصد حجمی NITI بعد از فرایند پرس..... ۶۲

شکل ۳-۶- دستگاه کشش سیم بهمراه فیکسچر مخصوص کشش سیم..... ۶۳

شکل ۳-۷- بررسی اثر حافظه داری یکطرفه سیم NITI ۶۳

شکل ۳-۸- شماتیک کلی از روش DSC ۶۴

شکل ۳-۹- شماتیک سیستم مورد استفاده در کشش نمونه های کامپوزیتی در دماهای مختلف..... ۶۶

شکل ۴-۱- منحنی DSC مربوط به سیم حافظه دار در شرایط آنیل ۷۱

شکل ۴-۲- منحنی DSC سیم NITI در شرایط بعد از پرس گرم..... ۷۲

شکل ۴-۳- روند فاز های تشکیل شده در سیم NITI ۷۳

شکل ۴-۴- تغییر فاز قسمتهای مختلف نمونه در اثر گرم شدن تا دمای پرس گرم..... ۷۴

شکل ۴-۵- تغییر فاز قسمت های مختلف سیم NITI ۷۵

شکل۴-۶- تصاویر TEM و حضور تنش های کوهیرنسی ۷۷

شکل۴-۷ - منحنی بدست آمده از آزمون DSC بر روی سیم حافظه دار در سیکل دوم گرم شدن..... ۷۹

شکل ۴-۸ منحنی DSC سیکل سوم شامل سیکل سرد شدن و سیکل گرم شدن..... ۸۰

شکل ۴-۹- مقایسه سیکل گرم شدن سیم NITI در شرایط مختلف عملیات حرارتی ۸۲

شکل ۴-۱۰- نمودار تنش – کرنش سیم NITI در حالت دریافتی..... ۸۴

شکل ۴-۱۱- نمودار تنش –کرنش سیم NITI در شرایط آنیل انحلالی ۸۵

شکل ۴-۱۲- نمودار تنش – کرنش آلیاژ AA1100 بدون سیم حافظه دار ۸۷

شکل ۴-۱۳- نمودار تنش- کرنش کامپوزیت NITI/AL شامل ۴٪ درصد..... ۸۸

شکل ۴-۱۴- نمودار تنش-کرنش نمونه AA1100 و نمونه کامپوزیتی A_1 ..... ۸۹

شکل۴-۱۵- مقایسه رفتار تنش-کرنش دو نمونه کامپوزیتی A_1 و A_2..... ۹۰

شکل ۴-۱۶- منحنی تنش-کرنش نمونه های کامپوزیتی A_3 و A_4 ..... ۹۰

شکل ۴-۱۷- مقایسه رفتار مکانیکی دو نمونه A_5 و A_6 با درصدهای مختلف کرنش اولیه. ۹۲

شکل ۴-۱۸- منحنی تنش-کرنش نمونه B_1 شامل ۸٪ درصد حجمی سیم حافظه دار NITI ۹۳

شکل ۴-۱۹- مقایسه رفتار مکانیکی دونمونه B_1 و B_2 در دماهای بترتیب زیر A_S و بالای A_F ۹۳

شکل ۴-۲۰- منحنی تنش-کرنش نمونه های کامپوزیتی B_3 و B_4 ..... ۹۴

شکل ۴-۲۱- مقایسه رفتار مکانیکی دو نمونه B_5 و B_6 با درصدهای مختلف کرنش اولیه. ۹۵

شکل ۴-۲۲- مقایسه رفتار تنش – کرنش نمونه های AA1100 ، A_5 ، A_6 ، B_5 و B_6 . ۹۶

شکل ۴-۲۳- الگوی پراش اشعه ایکس از نمونه سیم در حالت دریافتی. ۹۸

شکل۴-۲۴ – الگوی پراش اشعه ایکس نمونه سیم حافظه دار با کرنش اولیه ۳٪ . ۹۹

شکل ۴-۲۵- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه سیم حافظه دار NITI با کرنش اولیه ۵٪ . ۱۰۰

شکل ۴-۲۶- مقایسه الگوی XRD نمونه ۳٪ و ۵٪ کرنش. ۱۰۱

شکل ۴-۲۷- الگوی پراش اشعه ایکس نمونه پیر شده در دمای ۴۵۰°C-۴۰۰ بمدت ۱۵۰ دقیقه. ۱۰۲

شکل۴ -۲۸ - الف) زمینه آلومینیم AA110 در بزرگنمایی 30X توسط اچ ماکرو ۱۰۳

شکل ۴-۲۹- تصویر میکروسکوپ نوری زمینه آلومینیم AA1100 با اچ میکرو. ۱۰۳

شکل ۴-۳۰- تصاویر میکروسکوپ نوری از سیم حافظه دار NITI در حالت مارتنزیت ۱۰۵

شکل۴ -۳۱- ریزساختار نمونه پیر شده که در آن رسوبات NI_4TI_3 در مرزدانه ها ۱۰۶

شکل ۴-۳۲ – چگونگی فصل مشترک نمونه کامپوزیت NITI/AL ۱۰۷

شکل ۴-۳۳- سطح مقطع کامپوزیت NITI/AL در بزرگنمایی 33X . ۱۰۸

شکل ۴-۳۴- سطح مقطع کامپوزیت NITI/AL شامل ۴٪ حجمی سیم ۱۰۹

شکل ۴-۳۵- فصل مشترک کامپوزیت هوشمند NITI/AL و نواحی مختلف فازی ۱۱۰

شکل۴-۳۶- فصل مشترک NITI/AL در بزرگنمایی 3000X (تصویر کوچکتر) ۱۱۱

شکل ۴-۳۷- نواحی انتخاب شده به منظور بررسی فازهای تشکیل شده توسط آنالیز EDS . ۱۱۲

شکل ۴-۳۸- الگوی EDS مربوط به نقطه ۱ ..... ۱۱۲

شکل ۴-۳۹- الگوی EDS مربوط به نقطه شماره ۲ در فصل مشترک تشکیل شده. ۱۱۳

شکل۴-۴۰- الگوی EDS مربوط به نقطه شماره ۳ در فصل مشترک تشکیل شده. ۱۱۴

شکل ۴-۴۱- دیاگرام سه تایی AL-TI-NI در دمای K ۱۲۰۰. ..... ۱۱۵

شکل ۴-۴۲- الگوی EDS مربوط به نقطه شماره ۴ در لایه تشکیل شده در داخل NITI ۱۱۶

شکل ۴-۴۳- موقعیت نقطه ۴ در لایه تشکیل شده در داخل NITI ۱۱۶

فهرست جداول

جدول ۲-۱- بعضی از ترکیبات آلیاژهای آهنی حافظه دار [۷]..... ۵

جدول ۲-۲- ترکیب آلیاژهای غیر آهنی حافظه دار [۷]..... ۵

جدول۲-۳- برخی خواص فیزیکی ، مکانیکی و شیمیایی نایتینول در مقایسه با دو آلیاژ حافظه دار [۸]..... ۷

جدول ۲-۴- نمونه هایی از آلیاژهای سه تایی NITIX که رفتار حافظه داری نشان می دهند[۷۷] ۵۱

جدول ۳-۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم AA1100 مورد استفاده (درصد وزنی)..... ۵۹

جدول ۳-۲ – مشخصات فرایند پرس گرم بکار رفته در نمونه های مختلف NITI/AL ۶۲

جدول ۴-۱- شرایط نمونه های کامپوزیت NITI/AL در تست کشش تک محور..... ۸۷

جدول ۴-۲- ترکیب شیمیایی آنالیز شده در نقطه ۱ توسط EDS..... ۱۱۳

جدول۴-۳- شدت و آنالیز شیمیایی عناصر موجود در فصل مشترک (نقطه ۲) ۱۱۳

جدول۴-۴- شدت و آنالیز شیمیایی عناصر موجود در فصل مشترک (نقطه ۳) ۱۱۵

جدول۴-۵- شدت و آنالیز شیمیایی عناصر موجود در لایه تشکیل شده در داخل NITI (نقطه ۴) ۱۱۷

چکیده :

استفاده از آلیاژهای حافظه دار در کامپوزیت های زمینه فلزی باعث بهبود رفتار آنها از طریق خواص منحصربفرد این آلیاژها می گردد. در این پژوهش کامپوزیت هوشمند NiTi/Al به روش پرس گرم تهیه شد و شرایط بهینه از نظر دما و فشار پرس مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه های کامپوزیت هوشمندNiTi/Al با درصدهای حجمی ۴٪ و ۸٪ از سیم حافظه دار NiTi و کرنش های اولیه ۳٪ و ۵٪ تهیه شدند و رفتار آنها تحت تست کشش تک محور در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. اثر فرایند پرس گرم بر روی رفتار استحاله ای سیم NiTi نیز توسط آنالیز حرارتی کالریمتری بررسی شد.

نتایج نشان داد بین سیم های حافظه دار NiTi و زمینه آلومینیم در حین فرایند پرس گرم پیوند مناسب تشکیل شد. بررسی میکروسکوپ الکترونی و آنالیز فازی نیز نفوذ مؤثر اتم های تیتانیم و نیکل بداخل زمینه آلومینیم و تشکیل فصل مشترک لازم جهت انتقال تنش فشاری ناشی از تغییرحالت مارتنزیت به آستنیت در سیم حافظه دار به زمینه آلومینیم را نشان داد. با افزایش درصد حجمی و کرنش اولیه سیم های حافظه دار NiTi ، تنش تسلیم کامپوزیت بترتیب ۱۲/۵٪ و ۴۲٪ افزایش یافت.

واژه های کلیدی : آلیاژ حافظه دار ، کامپوزیت هوشمند NiTi/Al ، پرس گرم ، آنالیز حرارتی کالریمتری

فصل ۱

مقدمه

نیاز روز افزون به طراحی و کاربرد سیستم هایی با وظایف پیشرفته و قابلیت کنترل بسیار کارآمد سبب گردیده که استفاده از مواد معمولی پاسخگوی تمامی احتیاجات مورد نظر در زمینه های مختلف نباشد. از این رو تحقیقات گسترده ای در تکنولوژی مواد به سمت شناسایی و تولید ساختارهایی از مواد با ویژگی ها و رفتارهای بهبود یافته جهت گیری شده اند. در بسیاری از سیستم های پیشرفته اگر چه اعمال نیروها و تغییر مکان های مورد نیاز با استفاده از منابع تأمین انرژی موجود امکان پذیر می باشد ولی محدودیت های قابل توجهی بر اندازه و جرم قطعات به کار رفته تحمیل می شود . بنابراین نیاز به سیستم هایی که در رفتار خود دارای انعطاف پذیری بسزایی بوده و در مواقع لزوم عملکرد خود را چنان تنظیم نمایند که کمترین اثرات جانبی را بر بخش های دیگر داشته باشند ، احساس می شود. این دسته از مواد تحت شرایط مختلف رفتارهای متفاوتی از خود نشان داده و به صورت چند منظوره[۱] عمل می نمایند . مواد هوشمند قادر به تبدیل انرژی هایی از قبیل الکتریکی، مغناطیسی و حرارتی به انرژی مکانیکی می باشند. چنانچه این تبدیل انرژی در

[۱] Multifunctional

یک ماده هوشمند اتفاق بیفتد عملکرد آن را به صورت عملگر[1] و در صورتی که عکس تبدیل انرژی نامبرده رخ دهد عملکرد آن را به صورت حسگر[2] می نامند . آلیاژهای حافظه دار[3] مانند نایتینول از جمله مواد هوشمند محسوب می شوند[۱] .

نخستین بار فلز حافظه دار در نمایشگاه بروکسل در اوایل دهه ی ۱۹۶۰ به نمایش در آمد . در این نمایشگاه دیوید لیبرمان میله ای از آلیاژ حافظه دار طلا - کادمیم را به نمایش گذاشت . اما پدیده حافظه داری در آلیاژها نخستین بار در سال ۱۹۳۲ توسط چانگ و رید[4] در مورد آلیاژ طلا-کادمیم انجام شد . آنها متوجه شدند که استحاله اتفاق افتاده در این آلیاژ قابلیت برگشت پذیری دارد[۲]. آنها این نتیجه را بر اساس مشاهدات متالوگرافی و تغییرات ایجاد شده در مقاومت الکتریکی تشریح کردند . تا سال ۱۹۶۲ میلادی گرچه اثر حافظه داری در برخی از سیستم های آلیاژی مشاهده شده بود ولیکن کاربردهای مهندسی و عملی این آلیاژ برجسته نبود . تا اینکه اثر حافظه داری در آلیاژهای Ni-Ti در یک آزمایشگاه نیروی دریایی آمریکا در سال ۱۹۶۲ میلادی کشف شد[۳] . این کشف توسط ولیام بولر و همکارانش در ضمن پژوهش برای یافتن مواد دریایی غیرخورنده مغناطیسی صورت گرفت .

آلیاژهای حافظه دار (SMAs) موادی با خواص منحصر به فرد می باشند. از این خواص می توان به روابط مدول یانگ با دما، اثر حافظه داری شکلی، اثر سوپر الاستیک و خواص جذب انرژی و جذب ارتعاش اشاره کرد[۴] . از موانعی که بر سر راه توسعه استفاده از مواد حافظه دار وجود داشته می توان به هزینه بالا، فقدان درک کامل از رفتار ترمودینامیکی، وابستگی خواص به دما و مشکلات ماشین کاری آنها اشاره کرد.

در دهه های اخیر، استفاده از آلیاژهای حافظه دار به عنوان تقویت کننده، در کامپوزیت ها افزایش چشمگیری یافته است. بطور مثال "پین و روگر" در سال ۱۹۹۱ در زمینه رفتار کامپوزیت هوشمند زمینه پلیمری و "اسکات" نیز در سال ۱۹۹۷ بر روی اثر سطح آلیاژ حافظه دار بکار رفته بر رفتار کامپوزیت حاصل تحقیقاتی را انجام دادند. محققین دیگری نیز بر روی فصل مشترک

[1] Actuator
[2] Sensor
[3] Shape Memory Alloys (SMAs)
[4] Chang & Read

ایجاد شده و توزیع تنش/کرنش در زمینه کامپوزیت متمرکز شدند[۵] . تلاش های زیادی مبنی بر مدلسازی رفتار آلیاژهای حافظه دار و کامپوزیت های آنها نیز صورت گرفته است که اکثر آنها بر روی کامپوزیت های زمینه پلیمری معطوف شده است [۵,۱] و تحقیقات انجام شده در مورد کامپوزیت های هوشمند با زمینه فلزی بسیار محدود می باشد.

در تحقیق حاضر در فصل دوم پس از مروری بر آلیاژهای حافظه دار ، خواص و ویژگی های آلیاژ نایتینول، روش های تولید آن ، کاربردها و موارد ترمومکانیکی مربوط به آن مورد بررسی قرار گرفته است .

در فصل سوم روش بکار رفته در ساخت کامپوزیت هوشمند NiTi/Al و آزمایشات مربوطه بطور کامل تشریح شده است .

فصل چهارم نتایج آزمایشات و بررسی های صورت گرفته در فصل ۳ مورد بحث و بررسی قرار گرفته است .

در فصل آخر نتایج بدست آمده در این پژوهش و پیشنهادات مفید در جهت ادامه و بهبود روند پژوهش بطور مختصر ارائه شده است .

فصل ۲

مروری بر منابع

آلیاژهای حافظه دار جزء جدید ترین دسته از مواد هوشمند به شمار می روند. مهمترین ویژگی این آلیاژها آن است که چنانچه تا دمای خاصی حرارت ببینند می توانند کرنش های ماندگار ایجاد شده در اثر بارگذاری را آزاد کرده و شکل اولیه خود را بدست آورند. البته این ویژگی، که خاصیت حافظه داری[۱] نام دارد، تنها بخشی از خصوصیات این دسته از مواد بوده و دارای خواص منحصر به فرد دیگری نیز می باشند . بیشترین ویژگی از این خواص در آلیاژی با درصد اتمی تقریباً مساوی از نیکل و تیتانیوم مشاهده شده است که به آلیاژ نایتینول مشهور است.

گرچه تاکنون مواد حافظه دار دیگری از قبیل CuAlNi ، CuZnAl و FeMnSi نیز شناخته شده اند ، این آلیاژ به عنوان معروف ترین آلیاژ حافظه دار مطرح و اغلب تحقیقات بر روی آن انجام پذیرفته است. عمدتاً ترکیب Ni_xTi_{1-x} که x بین ۰/۴۷ تا ۰/۵۱ تغییر می کند از خود خاصیت حافظه داری نشان می دهد ولی وجود نایتینول های حافظه دار با درصد وزنی نیکل تا حد ۵۷٪ نیز

[۱] Shape Memory Effect (SME)

گزارش شده است [۶] .

۲-۱- انواع آلیاژهای حافظه دار

امروزه آلیاژهای فراوانی با خاصیت حافظه داری کشف شده اند . اما بجز برخی از آنها نظیر Ni-Ti و آلیاژهای پایه مس مابقی کاربرد تجارتی نداشته و از خاصیت حافظه داری آنها استفاده نمی شود . مشخصات عمومی برخی از این آلیاژهای حافظه دار آهنی و غیر آهنی در جداول ۲-۱ و ۲-۲ آورده شده است .

جدول ۲-۱- بعضی از ترکیبات آلیاژهای آهنی حافظه دار [۷]

آلیاژ	ترکیب شیمیایی	تغییر ساختار	هیسترزیس دمایی	نوع شبکه
Fe-Pd	~ 30 at% Pd	FCC-FCT	کوچک	نامنظم
Fe-Ni-Co-Ti	33% Ni,10% Co,4% Ti (wt%)	FCC-BCT	کوچک	نامنظم
Fe-Ni-C	31% Ni, 0.4% C (wt%)	FCC-BCT	بزرگ	نامنظم
Fe-Mn-Si	~ 30% Mn , ~ 5% Si (wt%)	FCC-HCP	بزرگ	نامنظم
Fe-Cr-Ni-Mn-Si-Co	~ 10% Cr , < 10% Ni , < 15% Mn < 7% Si , < 15 % Co (wt%)	FCC-HCP	بزرگ	نامنظم

جدول ۲-۲- ترکیب آلیاژهای غیر آهنی حافظه دار [۷]

آلیاژ	ترکیب شیمیایی	تغییر ساختاری	هیسترزیس دمایی	نوع شبکه
Ag-Cd	44 ~ 49 Cd	B2-2H	~ 15	منظم
Au-Cd	46.5 ~ 50 Cd	B2-2H	~ 15	منظم
Cu-Zn	38.5 ~ 41.5 Zn	B2-9R, rhombohedral	~ 10	منظم

Cu-Zn-X (X= Si,Sn,Al,Ca)	A Few At%	B2 (DO3) -9R , M9R (18R ,M18 R)	~ 10	منظم
Cu-Al-Ni	28 ~ 29 Al 3 ~ 4.5 Ni	DO3-2H	~ 35	منظم
Cu-Sn	~ 15 Sn	DO3-2H , 18R	-	منظم
Cu-Au-Zn	23~ 28 Au , 45 ~ 47 Zn	Huseler – 18R	~ 6	منظم
Ni-Al	36 ~ 38 Al	B2-3R	~ 10	منظم
Ni-Ti	49 ~ 51 Ni	B2- monoclinic B2-rhombohedral	20-100 1-2	منظم
In-Ti	18 ~ 23 Ti	FCC-FCT	~ 4	نامنظم
In-Cd	4 ~ 5 Cd	FCC-FCT	~ 3	نامنظم
Mn-Cu	5 ~ 35 Cu	FCC-FCT	-	نامنظم

در جدول زیر برخی از خواص مهم نایتینول در مقایسه با آلیاژهای حافظه دار CuZnAl و CuNiAl ارائه شده است . همانگونه که از این جدول قابل مشاهده است ضریب انبساط حرارتی پایین ، مدول الاستیک کم به همراه مقاومت خوردگی و زیست سازگاری عالی از جمله برتری های این آلیاژ نسبت به دیگر مواد حافظه دار برای کاربردهای پزشکی محسوب می شود . وجود تلفیقی از پیوندهای قوی کوالانسی و فلزی در این ترکیب بین فلزی و همچنین تشکیل سریع لایه محافظ و چسبنده از اکسید تیتانیوم در سطح این آلیاژ از عوامل اصلی مقاومت خوردگی و زیست سازگاری آن محسوب می شوند .