بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

ارزیابی تاثیر جوشکاری لیزر مشابه و غیرمشابه آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیم و عملیات حرارتی پس از آن بر ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال

پایان نامه کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب و روش ساخت مواد

غلامرضا میرشکاری

اساتید راهنما

دکتر احمد کرمانپور **دکتر احمد ساعتچی**

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته شناسایی و انتخاب مواد آقای غلامرضا میرشکاری

تحت عنوان

ارزیابی تاثیر جوشکاری لیزر مشابه و غیرمشابه آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیم و عملیات حرارتی پس از آن بر ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر احمد کرمانپور
۲- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر احمد ساعتچی
۳- استاد مشاور پایان نامه	دکترسید خطیب الاسلام صدرنژاد
۴- استاد داور	دکتر فتح الله کریم‌زاده
۵- استاد داور	دکتر مسعود عطاپور
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر کیوان رئیسی

– سپاس نامه –

حمد و سپاس بی‌کران پروردگار یکتا که توفیق گام نهادن در راه کسب معرفت را به من ارزانی داشت.

اینک که به لطف خداوند علیم در این راه بی‌انتها تا بدین مرحله رسیده‌ام، بر خود واجب می‌دانم تا صمیمانه‌ترین سپاس‌ها و تشکرات را به اساتید ارجمند راهنما و مشاور، آقایان دکتر احمد ساعتچی، دکتر احمد کرمانپور و دکتر سید خطیب الاسلام صدرنژاد که از روز ابتدا تا انتهای کار علاوه بر ارائه راهنمایی‌های ارزنده علمی در راه انجام پروژه همواره پشتیبان، مشوق و عامل روحیه بخش بنده برای پیشرفت کار بودند و اندک بضاعتم نتیجه سعی و تلاش بی دریغ آنهاست و همچنین اعضای محترم هیات داوری، اساتید گرانقدر آقایان دکتر فتح الله کریم‌زاده و دکتر مسعود عطاپور که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده گرفتند، تقدیم نمایم.

همچنین لازم می‌دانم که کمال تشکر و سپاسگزاری را از زحمات کارکنان و مسئولین محترم آزمایشگاه‌های دانشکده مهندسی مواد داشته باشم که بنده را در انجام آزمایشات پروژه یاری نمودند.

در پایان سلامتی و موفقیت روزافزون را برای تمامی این عزیزان آرزومندم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

تکیه‌گاه زندگی، پدرم؛

اسطوره محبت و مهربانی، مادرم؛

و سرچشمه گذشت و فداکاری، همسرم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

فهرست شکل‌ها ..... یازده

فهرست جداول ..... شانزده

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

فصل دوم: مروری بر مطالب ۶

۲-۱ معرفی و تاریخچه آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیم ۶

۲-۲ خواص آلیاژ نیکل-تیتانیم ۸

۲-۲-۱ سوپرالاستیسیته ۸

۲-۲-۲ حافظه‌داری ۹

۲-۳ جوشکاری لیزر ۱۳

۲-۳-۱ مبانی لیزر ۱۳

۲-۳-۲ جوشکاری لیزر پالسی Nd:YAG ۱۴

۲-۳-۳ پارامترهای جوشکاری ۱۵

۲-۳-۴ گاز محافظ ۱۶

۲-۳-۵ حالات مختلف جوشکاری لیزر ۱۶

۲-۴ ریزساختار نمونه‌های نیکل-تیتانیم جوشکاری شده به روش لیزر ۱۷

۲-۵ خواص مکانیکی نمونه‌های نیکل-تیتانیم جوشکاری شده به روش لیزر ۲۱

۲-۵-۱ سختی سنجی ۲۱

۲-۵-۲ استحکام کششی ۲۳

۲-۵-۳ رفتار خستگی ۲۴

۲-۶ رفتار خوردگی نمونه‌های نیکل-تیتانیم جوشکاری شده به روش لیزر ۲۶
۲-۷ اثر عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر خواص اتصال جوش لیزر آلیاژ نیکل-تیتانیم ۲۹
۲-۷-۱ ریزساختار جوش ۲۹
۲-۷-۲ سختی جوش و فلز پایه ۳۱
۲-۷-۳ استحکام کششی جوش ۳۲
۲-۷-۴ مقاومت به خوردگی جوش ۳۴
۲-۷-۴-الف بررسی زیست سازگاری ۳۵
۲-۷-۴-ب مقاومت به خوردگی حفره‌ای ۳۶
۲-۷-۴-ج رفتار خوردگی گالوانیک ۳۸
۲-۸ جمع‌بندی و هدف از پژوهش حاضر ۳۹
فصل سوم: مواد و روش‌های تحقیق ۴۰
۳-۱ تهیه و آماده سازی مواد اولیه ۴۰
۳-۲ جوشکاری لیزر سیم‌های نیکل-تیتانیم و فولاد زنگ‌نزن ۴۲
۳-۳ عملیات حرارتی پس از جوشکاری ۴۵
۳-۴ آماده‌سازی نمونه‌ها برای مطالعات ریزساختاری ۴۵
۳-۵ آنالیز فازی نمونه‌ها ۴۵
۳-۶ آنالیز حرارتی ۴۶
۳-۷ آزمون میکروسختی ۴۶
۳-۸ آزمون کشش ۴۶
۳-۹ آزمون‌های خوردگی ۴۶
فصل چهارم: نتایج و بحث ۴۹
۴-۱ جوشکاری لیزر مشابه آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیم ۴۹
۴-۱-۱ ریزساختار اتصال ۴۹

۴-۱-۲ استحاله‌های فازی ۵۲
۴-۱-۳ خواص مکانیکی اتصال ۵۴
۴-۱-۴ رفتار خوردگی اتصال ۵۸
۴-۲ جوشکاری لیزر غیرمشابه آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیم به فولاد زنگ‌نزن ۶۵
۴-۲-۱ ریزساختار اتصال ۶۵
۴-۲-۲ خواص مکانیکی اتصال ۶۷
۴-۲-۳ رفتار خوردگی اتصال ۷۳
۴-۳ تاثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر خواص اتصال غیرمشابه آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیم به فولاد زنگ‌نزن. ۷۹
۴-۳-۱ ریزساختار اتصال ۷۹
۴-۳-۲ خواص مکانیکی اتصال ۷۹
۴-۳-۳ رفتار خوردگی اتصال ۸۳
فصل پنجم: نتیجه‌گیری ۸۹
۵-۱ نتیجه‌گیری ۸۹
۵-۲ پیشنهادات ۹۰
مراجع ۹۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲- ۱ ساختار کریستالی و فازهای موجود در آلیاژ نیکل-تیتانیم ۷

شکل ۲- ۲ منحنی بارگذاری و باربرداری آلیاژ سوپرالاستیک نیکل-تیتانیم ۸

شکل ۲- ۳ پدیده سوپرالاستیسیته در منحنی تنش- دما ۸

شکل ۲- ۴ منحنی تنش-کرنش ۹

شکل ۲- ۵ اثر حافظه‌داری در آلیاژ نیکل-تیتانیم ۱۰

شکل ۲- ۶ تغییرات فازی ناشی از دما همراه با اعمال بار مکانیکی ۱۰

شکل ۲- ۷ تصویر شماتیک بارگذاری ترمومکانیکی که تاثیر حافظه‌داری را در نیکل-تیتانیم نشان می‌دهد ۱۱

شکل ۲- ۸ دیاگرام فازی تنش-دما ۱۲

شکل ۲- ۹ پدیده هیستریزیس و تغییرات درصد فازها به عنوان تابعی از دما در حین گرم کردن و سرد کردن آلیاژ نیکل-تیتانیم ۱۳

شکل ۲- ۱۰ دیاگرام فازی Ti-Ni ۱۳

شکل ۲- ۱۱ تصویر شماتیک نشر ناشی از تهییج ۱۴

شکل ۲- ۱۲ تصویر شماتیک لیزر Nd:YAG ۱۵

شکل ۲- ۱۳ تصویر شماتیک پالس‌های لیزر Nd:YAG ۱۵

شکل ۲- ۱۴ تصویر شماتیک پرتو لیزر ۱۶

شکل ۲- ۱۵ مقایسه دو حالت جوشکاری هدایتی و سوراخ کلیدی ۱۷

شکل ۲- ۱۶ ساختار انجمادی ناحیه جوش ۱۸

شکل ۲- ۱۷ حضور دندریت‌های ستونی در منطقه جوش ۱۸

شکل ۲- ۱۸ ریزساختار اتصال مشابه نیکل-تیتانیم/نیکل-تیتانیم ۱۹

شکل ۲- ۱۹ ریزساختار اتصال غیرمشابه فولاد زنگ‌نزن/نیکل-تیتانیم به همراه سختی سنجی ویکرز ۱۹

شکل ۲- ۲۰ ریزساختار (الف) فلز پایه (ب) آلیاژ نیکل-تیتانیم جوش داده شده ۲۰

شکل ۲- ۲۱ (الف) تصویر میدان روشن از فلز پایه، فاز B2 در ناحیه [۱۱۱]، (ب) تصویر میدان روشن از فلز جوش، ذرات مشکی رنگ Ti_2Ni در ناحیه [۱۱۰] ۲۰

شکل ۲- ۲۲ ریزساختار و آنالیز عنصری خطی ناحیه جوش ۲۱

شکل ۲- ۲۳ سختی بدست آمده در نواحی مختلف جوش (الف) عمود بر راستای نورد (ب) موازی با راستای نورد ۲۲

شکل ۲- ۲۴ تغییرات سختی در نواحی جوش، HAZ و فلز پایه در نمونه نیکل-تیتانیم جوش داده شده به وسیله لیزر ۲۲

شکل ۲- ۲۵ منحنی تنش-کرنش سیم‌های نیکل-تیتانیم و فولادی قبل از جوش، اتصالات نیکل-تیتانیم/نیکل-تیتانیم و فولاد/نیکل-تیتانیم ۲۳

شکل ۲- ۲۶ منحنی تنش-کرنش سیم نیکل-تیتانیم قبل از جوش ناشی از اعمال بار سیکلی (ε=٪۲/۵, N=۱۰) ۲۴

شکل ۲- ۲۷ منحنی تنش-کرنش اتصالات نیکل-تیتانیم/نیکل-تیتانیم ناشی از اعمال بار سیکلی (ε=٪۲/۵, N=۱۰)..... ۲۵

شکل ۲- ۲۸ منحنی تنش-کرنش اتصالات فولاد/نیکل-تیتانیم ناشی از اعمال بار سیکلی (ε=٪۲/۵, N=۱۰)..... ۲۵

شکل ۲- ۲۹ مقاومت پلاریزاسیون (R_p) محاسبه شده طی آزمایش پلاریزاسیون خطی ۲۶

شکل ۲- ۳۰ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک سیکلی فلز پایه و آلیاژ نیکل-تیتانیم جوش داده شده در محلول NaCl ٪۰/۹ ..... ۲۷

شکل ۲- ۳۱ مورفولوژی سطح (الف) فلز پایه (ب) نیکل-تیتانیم جوش داده شده پس از آزمون خوردگی ۲۸

شکل ۲- ۳۲ منحنی پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فلز پایه و فلز جوش نمونه نیکل-تیتانیم جوشکاری شده به روش لیزر ۲۹

شکل ۲- ۳۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی قبل از عملیات حرارتی پس از جوشکاری (الف) منطقه جوش (ب) منطقه HAZ..... ۳۰

شکل ۲- ۳۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پس از عملیات حرارتی پس از جوشکاری در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد (الف) منطقه جوش (ب) منطقه HAZ..... ۳۰

شکل ۲- ۳۵ الگوی پراش پرتو ایکس از نمونه اولیه و مناطق جوش مختلف ۳۱

شکل ۲- ۳۶ مقدار میانگین میکروسختی در شرایط متفاوت..... ۳۲

شکل ۲- ۳۷ منحنی تنش-کرنش نمونه اولیه و نمونه‌های جوشکاری شده مختلف..... ۳۳

شکل ۲- ۳۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطوح شکست قطعات جوشکاری شده (الف) بدون عملیات حرارتی پس از جوشکاری (ب) با عملیات حرارتی پس از جوشکاری در دمای ۳۵۰ درجه سانتیگراد..... ۳۳

شکل ۲- ۳۹ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های فلز پایه و منطقه جوش، قبل و بعد از عملیات حرارتی پس از جوشکاری ۳۴

شکل ۲- ۴۰ منحنی پلاریزاسیون سیکلی (الف) نمونه‌های فلز پایه (ب) نمونه‌های ناحیه جوش با و بدون عملیات حرارتی پس از جوشکاری در محلول هنک و در دمای ۳۷/۵ درجه سانتیگراد..... ۳۷

شکل ۲- ۴۱ (الف) چگالی جریان گالوانیک (ب) پتانسیل گالوانیک بین نمونه‌های فلز پایه و ناحیه جوش در محلول هنک و در دمای ۳۷/۵ درجه سانتیگراد..... ۳۸

شکل ۳- ۱ سطح سیم‌های مورد استفاده (الف) قبل از تمیزکاری و (ب) پس از تمیزکاری به منظور جوشکاری..... ۴۱

شکل ۳- ۲ تصویر دستگاه جوشکاری لیزر Nd:YAG مورد استفاده در این تحقیق..... ۴۲

شکل ۳- ۳ تصویر شماتیک نگهدارنده مورد استفاده جهت اتصال سیم‌ها ۴۳

شکل ۳- ۴ تصویر شماتیک نحوه اتصال سیم‌ها ۴۳

شکل ۳- ۵ تصاویر (الف) سیستم انتقال آب از درون حمام بن ماری به ظرف حاوی سل الکتروشیمیایی و (ب) سل الکتروشیمیایی مورد استفاده که درون ظرف حاوی آب ۳۷ درجه سانتیگراد قرار گرفته است..... ۴۸

شکل ۴- ۱ تصویر سیم‌های نیکل-تیتانیم جوش داده شده به روش لیزر ۵۰

شکل ۴- ۲ (الف) ریزساختار ناحیه اتصال، (ب) ریزساختار ناحیه جوش که ساختار دندریتی را نشان می‌دهد و (ج) ریزساختار خط ذوب که رشد اپیتکسیال را نشان می‌دهد ۵۰

شکل ۴- ۳ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های فلز پایه و فلز جوش ۵۲

شکل ۴- ۴ منحنی‌های آنالیز گرماسنجی افتراقی نمونه‌های فلز پایه و فلز جوش ۵۳

شکل ۴- ۵ پروفیل سختی بدست آمده از نواحی مختلف قطعه جوشکاری شده..... ۵۴

شکل ۴- ۶ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های NiTi و اتصال NiTi-NiTi..... ۵۵

شکل ۴- ۷ سطح شکست سیم NiTi مورد استفاده در دو بزرگنمایی متفاوت: (الف) ۱۲۵ X و (ب) ۲۰۰۸ X..... ۵۶

شکل ۴- ۸ سطح شکست اتصال NiTi-NiTi در دو بزرگنمایی متفاوت: (الف) ۱۲۵ X و (ب) ۱۰۰۰ X..... ۵۷

شکل ۴- ۹ محل شکست نمونه اتصال NiTi-NiTi پس از آزمون کشش ۵۸

شکل ۴- ۱۰ تغییرات در پتانسیل مدار باز نمونه‌های فلز پایه و فلز جوش در محلول رینگر و در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد به مدت ۷ ساعت ۵۹

شکل ۴- ۱۱ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های فلز پایه و فلز جوش در محلول رینگر و در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد..... ۵۹

شکل ۴- ۱۲ مورفولوژی سطح نمونه فلز پایه پس از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک: (الف) در بزگنمایی کم (ب) در بزرگنمایی زیاد ۶۱

شکل ۴- ۱۳ مورفولوژی سطح نمونه فلز جوش پس از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک: (الف) در بزگنمایی کم (ب) در بزرگنمایی زیاد ۶۲

شکل ۴- ۱۴ مورفولوژی سطح فلز پایه پس از آزمون غوطه‌وری: (الف) در بزگنمایی کم (ب) در بزرگنمایی زیاد ۶۳

شکل ۴- ۱۵ مورفولوژی سطح فلز جوش پس از آزمون غوطه‌وری: (الف) در بزگنمایی کم (ب) در بزرگنمایی زیاد ۶۴

شکل ۴- ۱۶ (الف) تصویر سیم‌های نیکل-تیتانیم و فولاد زنگ‌نزن جوش داده شده به روش لیزر، (ب) تصویر با بزرگنمایی زیاد از محل مربع نشان داده شده در شکل (الف) که ساختار دندریتی ناحیه جوش را نشان می‌دهد ۶۵

شکل ۴- ۱۷ (الف) ریزساختار خط ذوب در سمت نیکل-تیتانیم، (ب) ریزساختار خط ذوب در سمت فولاد زنگ‌نزن ۶۶

شکل ۴- ۱۸ الگوی پراش پرتو ایکس فلزات پایه نیکل-تیتانیم و فولاد زنگ‌نزن و فلز جوش ۶۸

شکل ۴- ۱۹ پروفیل سختی بدست آمده از نواحی مختلف قطعه جوشکاری شده ۶۸

شکل ۴- ۲۰ تصاویر گرفته شده بوسیله میکروسکوپ نوری از ریزساختار فلز پایه، ناحیه HAZ در مجاورت فلز پایه و ناحیه HAZ در مجاورت خط ذوب به ترتیب در هر دو سمت (الف-ج) فولاد زنگ‌نزن و (د-و) نیکل-تیتانیم ۶۹

شکل ۴- ۲۱ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های(الف) نیکل-تیتانیم و فولاد زنگ‌نزن مورد استفاده و (ب) اتصال NiTi-SS ۷۰

شکل ۴- ۲۲ سطح شکست سیم فولاد زنگ‌نزن مورد استفاده در دو بزرگنمایی متفاوت: (الف) X ۱۲۲ و (ب) X ۹۷۹ ..... ۷۱

شکل ۴- ۲۳ سطح شکست اتصال NiTi-SS در دو بزرگنمایی متفاوت: (الف) X ۱۲۵ و (ب) X ۱۰۰۰ ..... ۷۲

شکل ۴- ۲۴ محل شکست نمونه اتصال NiTi-SS پس از آزمون کشش ۷۳

شکل ۴- ۲۵ تغییرات در پتانسیل مدار باز نمونه‌های فلز پایه فولاد زنگ‌نزن و نیکل-تیتانیم و فلز جوش به مدت ۷ ساعت ۷۴

شکل ۴- ۲۶ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های فلز پایه فولاد زنگ‌نزن و نیکل-تیتانیم و فلز جوش ۷۵

شکل ۴- ۲۷ مورفولوژی سطح نمونه‌ها پس از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک: (الف) فولاد زنگ‌نزن، (ب) نیکل-تیتانیم و (ج) فلز جوش ۷۶

شکل ۴- ۲۸ مورفولوژی سطح نمونه‌ها پس از آزمون غوطه‌وری: (الف) فولاد زنگ‌نزن، (ب) نیکل-تیتانیم و (ج) فلز جوش ۷۷

شکل ۴- ۲۹ الگوی پراش پرتو ایکس ناحیه جوش نمونه‌ها قبل و بعد از عملیات حرارتی پس از جوشکاری ۷۹

شکل ۴- ۳۰ پروفیل سختی بدست آمده از نواحی مختلف قطعات جوشکاری شده قبل و بعد از عملیات حرارتی پس از جوشکاری ۸۰

شکل ۴- ۳۱ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های اتصال قبل و بعد از عملیات حرارتی پس از جوشکاری ۸۱

شکل ۴- ۳۲ سطح شکست اتصال NiTi-SS: (الف) بدون عملیات حرارتی پس از جوشکاری، (ب) پس از عملیات حرارتی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و (ج) پس از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد ۸۱

شکل ۴- ۳۳ منحنی‌های تغییرات پتانسیل مدار باز فلز جوش نمونه‌های جوشکاری شده قبل و بعد از عملیات حرارتی پس از جوشکاری در محلول رینگر و در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد به مدت ۷ ساعت.....۸۳

شکل ۴- ۳۴ منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فلز جوش نمونه‌های با و بدون عملیات حرارتی پس از جوشکاری در محلول رینگر و در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد.....۸۴

شکل ۴- ۳۵ مورفولوژی سطح فلز جوش نمونه‌ها پس از آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک: (الف) بدون عملیات حرارتی پس از جوشکاری، (ب) پس از عملیات حرارتی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و (ج) پس از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد ۸۵

شکل ۴- ۳۶ مورفولوژی سطح فلز جوش نمونه‌ها پس از آزمون غوطه‌وری: (الف) بدون عملیات حرارتی پس از جوشکاری، (ب) پس از عملیات حرارتی در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد و (ج و د) پس از عملیات حرارتی در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد در بزرگنمایی‌های متفاوت.....۸۷

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲- ۱ ترکیب شیمیایی سطح در نمونه‌های فلز پایه و ناحیه جوش با و بدون عملیات حرارتی پس از جوشکاری در اعماق ۰A و ۵۰A (مقدار درون پرانتز) ۳۵

جدول ۲- ۲ مقادیر پارامترهای ثابت مدار معادل به عنوان تابعی از زمان غوطه وری نمونه‌های فلز پایه و ناحیه جوش در دو حالت با و بدون عملیات حرارتی پس از جوشکاری در محلول هنک و در دمای ۳۷/۵ درجه سانتیگراد ۳۶

جدول ۲- ۳ پارامترهای خوردگی الکتروشیمیایی در آزمون‌های خوردگی پلاریزاسیون و گالوانیک در محلول هنک و در دمای ۳۷/۵ درجه سانتیگراد ۳۷

جدول ۳- ۱ ترکیب شیمیایی سیم‌های نیکل-تیتانیم و فولاد زنگنزن مورد استفاده (at.%) ۴۱

جدول ۳- ۲ برخی پارامترهای آزمایش شده به منظور دستیابی به بهترین پارامتر جهت جوشکاری ۴۴

جدول ۳- ۳ پارامترهای جوشکاری نهایی مورد استفاده در این تحقیق ۴۴

جدول ۳- ۴ ترکیب شیمیایی محلول فیزیولوژیک رینگر ۴۶

جدول ۴- ۱ دماهای استحاله‌های فازی نمونه‌های فلز پایه و فلز جوش که از منحنی‌های مربوطه بدست آمده‌اند ۵۳

جدول ۴- ۲ مقادیر پارامترهای خوردگی الکتروشیمیایی که از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های فلز پایه و فلز جوش بدست آمده است ۶۰

جدول ۴- ۳ ترکیب شیمیایی سطحی و نسبت Ti/Ni نمونه‌های فلز پایه و فلز جوش ۶۰

جدول ۴- ۴ مقادیر پارامترهای خوردگی الکتروشیمیایی که از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های فلزات پایه و فلز جوش بدست آمده است ۷۵

جدول ۴- ۵ مقادیر پارامترهای خوردگی الکتروشیمیایی که از منحنی‌های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک فلز جوش نمونه‌های با و بدون عملیات حرارتی پس از جوشکاری بدست آمده است ۸۵

چکیده

خواص منحصر به فرد آلیاژ نیکل-تیتانیم (NiTi) نظیر اثر حافظه‌داری، سوپرالاستیسیته و زیست سازگاری، استفاده گسترده از این آلیاژ را در زمینه‌های گوناگون همانند صنایع هوافضا، صنایع خودروسازی و ساخت ابزارآلات الکترونیکی و پزشکی میسر ساخته است. در این راستا، اتصال و جوشکاری این آلیاژ به صورت مشابه و غیرمشابه با سایر آلیاژها از اهمیت قابل توجهی برخوردار بوده و در سال‌های اخیر توجه بسیاری به آن مبذول شده است. فولادهای زنگ‌نزن یکی از آلیاژهای پرکاربرد می‌باشند که به دلیل خواص مکانیکی و کارپذیری مطلوب، قیمت مناسب و مقاومت به خوردگی بالا در زمینه‌های گوناگون به ویژه ساخت ابزارآلات پزشکی کاربرد فراوان دارند. از این رو، اتصال آلیاژ نیکل-تیتانیم به فولاد زنگ‌نزن می‌تواند منجر به گسترش کاربرد این آلیاژ در زمینه‌های گوناگون شود. جوشکاری لیزر به دلیل حرارت ورودی کم و تمرکز حرارتی بالا، کاهش قابل ملاحظه ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه جوش، میزان پایین تنش پسماند و اعوجاج در قطعه کار و سرعت جوشکاری بالا، روشی مناسب برای جوشکاری آلیاژ نیکل-تیتانیم می‌باشد. از این رو در این تحقیق، جوشکاری لیزر Nd:YAG سیم نیکل-تیتانیم به صورت مشابه و غیرمشابه با سیم فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ مورد بررسی قرار گرفت. بعلاوه، به منظور دستیابی به روشی جهت بهبود خواص اتصال غیرمشابه سیم‌های نیکل-تیتانیم و فولاد زنگ‌نزن، تاثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر خواص اتصال غیرمشابه بررسی شد. ریزساختار، رفتار استحاله‌های فازی و خواص مکانیکی اتصالات با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، آنالیز تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS)، پراش پرتو ایکس (XRD)، آنالیز گرماسنجی افتراقی (DSC)، میکروسختی سنج ویکرز و آزمون کشش مورد بررسی قرار گرفتند. رفتار خوردگی قطعات جوشکاری شده نیز با استفاده از آزمون‌های پتانسیل مدار باز، پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و غوطه‌وری در محلول فیزیولوژیک رینگر در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که استحکام کششی اتصال مشابه نیکل-تیتانیم معادل ۸۳۵ MPa (در حدود ۶۳٪ استحکام سیم نیکل-تیتانیم) با کرنشی در حدود ۱۶٪ می‌باشد. اتصال بدست آمده همچنین دارای خاصیت سوپرالاستیک بوده و رفتار شبه الاستیک این آلیاژ را حفظ می‌کند. این در حالی است که، استحکام کششی و کرنش اتصال غیرمشابه نیکل-تیتانیم به فولاد زنگ‌نزن به دلیل تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد در ناحیه جوش افت قابل توجهی داشت. همچنین در اتصال مشابه، فلز جوش مقاومت به خوردگی بهتری نسبت به فلز پایه از خود نشان داد. از سوی دیگر در اتصال غیرمشابه، فلز جوش از مقاومت به خوردگی قابل توجه، نزدیک به فولاد زنگ‌نزن و بهتر از نیکل-تیتانیم برخوردار بود. بعلاوه، عملیات حرارتی پس از جوشکاری نشان داد که تاثیرات بسزایی بر خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال غیرمشابه نیکل-تیتایم به فولاد زنگ‌نزن دارد. عملیات حرارتی پس از جوشکاری در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد منجر به بهبود مقاومت به خوردگی و استحکام کششی اتصال تا حدود ۱/۸ برابر نمونه مشابه قبل از عملیات حرارتی شد؛ در حالیکه، افزایش دمای عملیات حرارتی تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد، منجر به افت خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصال بر اثر تشکیل ترکیبات بین فلزی بیشتر در ناحیه جوش گردید. بنابراین، کنترل دمای عملیات حرارتی پس از جوشکاری به منظور بهبود خواص اتصال غیرمشابه نیکل-تیتانیم به فولاد زنگ‌نزن حائز اهمیت می‌باشد.

کلمات کلیدی: آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیم، فولاد زنگ‌نزن، جوشکاری لیزر، عملیات حرارتی پس از جوشکاری.

فصل اول

مقدمه

آلیاژهای حافظه‌دار[1] دسته‌ای از آلیاژهای جدید با قابلیت‌های منحصر به فرد می‌باشند. این آلیاژها می‌توانند تحت تنش‌های وارده در حد مجاز تغییر شکل داده و مجدداً با دادن حرارت به شکل اولیه خود بازگردند، یا پس از برداشتن بار مکانیکی به صورت الاستیک (تا حدود ۸٪ کرنش الاستیک) به شکل نخستین خود بازگردند. پدیده اول را حافظه‌داری و پدیده دوم را سوپرالاستیسیته می‌نامند. یکی از مهمترین آلیاژهای حافظه‌دار، آلیاژهای نیکل-تیتانیم (NiTi) می‌باشند که تحت نام تجاری نایتینول[2] شناخته می‌شوند. اساس خاصیت برگشت پذیری و حافظه‌داری این آلیاژها، تغییر حالت‌های فازی آن‌ها می‌باشد. این آلیاژها کاربردهای گوناگون و بسیار مفیدی در زمینه‌هایی همچون هوافضا، صنایع خودروسازی، پزشکی، دندانپزشکی و غیره دارند. گسترده‌ترین کاربرد آلیاژهای نیکل-تیتانیم در پزشکی و ساخت ایمپلنت‌هایی نظیر سیم‌های راهنما[3]، استنت‌ها[4] و غیره می‌باشد.

تجاری شدن آلیاژهای حافظه‌دار و به طور خاص نیکل-تیتانیم، داستان موفقیت منحصر به فرد آنهاست. کشف رفتار حافظه‌داری در آلیاژهای مس-کادمیم و مس-روی با هیاهوی کمی در مقالات فنی روبرو شد. با این حال وقتی اثر حافظه‌داری در آلیاژ نیکل-تیتانیم در سال ۱۹۶۲ کشف شد به شدت مورد توجه قرار گرفت و در کاربردهایی نظیر پرچ، موتورهای گرمایی، کوپلینگ، قطع کننده مدار، محرک‌های خودرو و غیره مورد استفاده قرار گرفت. در این مسیر متالورژیست‌ها در حل اسرار حافظه‌داری بسیار سریع عمل کردند و در اوایل دهه ۱۹۷۰ حتی توانستند جزییات پروسه حافظه‌داری را به خوبی توضیح دهند. اما متاسفانه درک صنعتی مهندسان با یک تاخیر زمانی روبرو شد [۱].

---

[1] Shape memory alloys
[2] Nitinol
[3] Guide wires
[4] Stents

در اوایل دهه ۱۹۸۰ روشن شد که حافظه‌داری یک معجزه مالی و تجاری نمی‌تواند باشد. در حالی که تصویر ذهنی در مورد آلیاژهای حافظه‌دار هنوز بهبود نیافته بود، در اوایل دهه ۱۹۹۰ بسیاری از شرکت‌های تجاری تسلیم شدند و به تکنولوژی‌های قبل بازگشتند. اما به دنبال پژوهش‌های دانشمندان با گذشت زمان، تصویر ذهنی نسبت به این موضوع متفاوت‌تر شد. امروزه آلیاژ نیکل-تیتانیم یا نایتینول به یک کلمه تخصصی و معروف در دنیای مهندسی پزشکی تبدیل شده است و تولیدکنندگان این آلیاژ رشد به شدت بالایی را داشته‌اند. به طور کلی می‌توان گفت شرکت‌های اصلی و بزرگ دنیا نقشی در شروع تجارت آلیاژهای حافظه‌دار نداشتند. ابتدا گروهی از کارآفرینان که به این تکنولوژی باور داشتند، شرکت‌های تولیدی کوچکی به راه انداختند. سپس به دنبال آن تلاش کمپانی‌های بزرگ نیز آغاز شد. توجه بیشتر از آنکه به حافظه‌دار بودن این آلیاژ باشد، به سمت سوپرالاستیسیته[۱] بودن آن معطوف شد و همچنین کاربردهای پزشکی جهت ساخت ایمپلنت‌های گوناگون نظیر ایمپلنت‌های ارتوپدی، سیم‌های اورتودنسی، مواد جایگزین استخوان، کاتاترها، پمپ‌های انسولین و استنت‌ها بیشتر مورد توجه قرار گرفت [۱].

اما واقعا چه چیز باعث این تغییر ناگهانی و معروف شدن نیکل-تیتانیم شد؟

سوپر الاستیسیته قطعا از اوایل دهه ۱۹۷۰ شناخته شده بود. هزینه‌های مواد پایین آمدند اما نه آنقدر کافی که بازار خرید و فروش را به راه اندازند. با این وجود برای کاربردهای پزشکی در واقع هزینه مواد یک بخش کوچکی از کل هزینه وسیله‌های پزشکی می‌باشد و هزینه‌ها به ندرت می‌توانند نقشی در فعال یا غیر فعال کردن کاربردهای مهم پزشکی داشته باشند. به نظر می‌رسد دلایل متفاوتی برای این موفقیت ناگهانی وجود دارد. شاید مهم‌تر از همه این باشد که صنعت پزشکی خود را به سمت هرچه کمتر انجام دادن اعمال پزشکی باز سوق می‌دهد و این به نوبه خود تقاضا برای ساختن ابزارآلات و دستگاه‌های جدید را ایجاد کرده است که این ابزارآلات و دستگاه‌ها قطعا نمی‌توانند با مواد معمولی ساخته شوند [۱].

به منظور دستیابی به طیف وسیعی از کاربردها و ساخت ابزارآلات پزشکی جدید، در سال‌های اخیر علاقه شدیدی به اتصال آلیاژهای نیکل-تیتانیم به صورت مشابه و غیرمشابه به سایر آلیاژهای زیست سازگار نظیر فولاد زنگ‌نزن، تیتانیم و پلاتین وجود داشته است، هرچند که تحقیقات انجام شده در این زمینه همچنان محدود می‌باشد. برای مثال، ایمپلنت‌های ارتوپدی و سیم‌های راهنما اغلب از جوشکاری مشابه و غیر مشابه این آلیاژها ساخته می‌شوند [۲]. در میان آلیاژهای زیست سازگار مورد استفاده جهت اتصال به آلیاژ نیکل-تیتانیم، فولاد زنگ‌نزن از اقبال بیشتری برخوردار بوده است. به ویژه، اتصال غیرمشابه سیم‌های نیکل-تیتانیم و فولاد زنگ‌نزن در ساخت ابزارآلات پیچیده پزشکی بسیار پرکاربرد بوده است. هرچند که به دلیل تفاوت‌های بسیار در خواص فیزیکی و شیمیایی این مواد، جوشکاری آن‌ها فرایندی دشوار می‌باشد.

جوشکاری لیزر، جوشکاری قوسی الکترود تنگستنی با گاز محافظ، جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی و جوشکاری مقاومتی روش‌های جوشکاری هستند که با موفقیت در جوشکاری آلیاژهای نیکل-تیتانیم همراه بوده‌اند، اگرچه بهترین روش برای جوشکاری این آلیاژها جهت ساخت ابزارآلات پیچیده با ابعاد بسیار کوچک، جوشکاری لیزر می‌باشد. روش جوشکاری لیزر یکی از مهمترین و پرکاربردترین روش‌ها در جوشکاری آلیاژهای نیکل-تیتانیم می‌باشد. در این روش استفاده از منبع Nd:YAG به ویژه می‌تواند برای جوشکاری قطعات با ضخامت‌های کم به

---

۱ Superelasticity

دلیل دقت و تمرکز حرارتی بالای آن، کاهش قابل ملاحظه ناحیه متاثر از حرارت، کاهش ناحیه جوش و توزیع حرارتی پایین و همچنین کمترین میزان تنش پسماند و اعوجاج در قطعه کار ، مناسب باشد. بعلاوه، کنترل مناسب پارامترهای جوشکاری در این روش می‌تواند دستیابی به نتایج دلخواه و مناسب را تضمین کند [۳].

آلیاژهای نیکل-تیتانیم غالبا همانند تیتانیم و فولاد زنگ‌نزن، دارای مقاومت به خوردگی بالا می‌باشند. این امر با تشکیل خود به خودی لایه‌های اکسیدی محافظ نظیر TiO_2 بر روی سطح، محقق می‌شود. حتی در محیط‌های اکسید کننده ضعیف نیز شاهد تشکیل این اکسیدهای محافظ بر روی سطح خواهیم بود. در محیط بدن، مایعات مختلفی در تماس با ایمپلنت‌های نیکل-تیتانیم قرار می‌گیرند. مشکلات اساسی به ویژه زمانی پیش می‌آید که مایعات اسیدی قوی نظیر ترشحات معدوی، به سطح آلیاژ حمله‌ور شوند. به طور کلی، خوردگی آلیاژ نیکل-تیتانیم در بدن از دو جنبه حائز اهمیت می‌باشد. اول اینکه، خوردگی این آلیاژ همراه با آزاد شدن نیکل از سطح ایمپلنت و ورود آن به بافت‌ها و مایعات بدن بوده که منجر به ایجاد آلرژی در فرد بیمار می‌شود. دوم اینکه، خوردگی ایمپلنت نیکل-تیتانیم باعث کاهش خواص مکانیکی آن شده که در بدترین حالت منجر به شکسته شدن ایمپلنت در بدن بیمار می‌شود [۴]. هرچند خوردگی و رفتار الکتروشیمیایی این آلیاژها در محلول‌های متفاوت شبیه سازی شده بدن نظیر محلول نمک ایزوتونیک[۱] [۹-۵]، محلول هنک[۲] [۱۰، ۱۱]، محلول رینگر[۳] [۹، ۱۲] و بزاق دهان مصنوعی[۴] [۶، ۹، ۱۳] به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته است، اما بررسی خوردگی این آلیاژها پس از جوشکاری و به ویژه جوشکاری لیزر همچنان محدود است [۱۴، ۱۵]، با وجود اینکه قطعات جوشکاری شده معمولا در نواحی مختلف مستعد به انواع خوردگی می‌باشند [۱۶].

آلیاژ نیکل-تیتانیم دارای دیاگرام تنش-کرنش منحصر به فردی نسبت به سایر آلیاژهای متداول در پزشکی می‌باشد. این در حالی است که این منحنی شبیه به منحنی‌های بدست آمده از بافت‌های زنده در بدن می‌باشد. برای مثال، کرنش تا حدود ۸٪ در این آلیاژ قابل بازیابی می‌باشد، در حالیکه در فولاد زنگ‌نزن این مقدار ۰/۵٪ و در مورد استخوان‌ها حدود ۲٪ گزارش شده است. این شباهت در رفتار مکانیکی میان این آلیاژ و استخوان، تقاضا جهت استفاده از آلیاژ نیکل-تیتانیم را در ساخت ایمپلنت‌های تحت بار افزایش می‌دهد. با توجه به نیاز به جوشکاری آلیاژ نیکل-تیتانیم در کاربردهای پزشکی، بررسی رفتار مکانیکی این آلیاژ نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۱۷].

عملیات حرارتی پس از جوشکاری لیزر به منظور تنش زدایی، بهبود ساختار و کاهش عیوب ناشی از حرارت اعمال شده به قطعه پیشنهاد می‌شود. انتظار می‌رود با انجام عملیات حرارتی پس از جوشکاری و در نتیجه اصلاح ترکیب شیمیایی سطح و یا آزاد شدن تنش‌های پسماند، خواص اتصال آلیاژ نیکل-تیتانیم بهبود یابد. همچنین انتخاب دمای مناسب به منظور عملیات حرارتی پس از جوشکاری، می‌تواند منجر به بهبود خواص اتصال قطعات آلیاژ نیکل-تیتانیم جوشکاری شده گردد [۱۸، ۱۹]. با این وجود، تحقیقات در زمینه بررسی اثر عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر خواص اتصال آلیاژ نیکل-تیتانیم بسیار محدود می‌باشد.

---

۱ Isotonic saline
۲ Hanks' solution
۳ Ringer's solution
٤ Artificial saliva

با توجه به مطالب ذکر شده، هدف از این پژوهش بررسی جوشکاری لیزر آلیاژ نیکل-تیتانیم به صورت مشابه و غیرمشابه با فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و تاثیر این روش بر ریزساختار، خواص مکانیکی و رفتار خوردگی اتصالات بدست آمده می‌باشد. همچنین در این پژوهش سعی شده است تاثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری بر خواص اتصال غیرمشابه آلیاژ نیکل-تیتانیم و فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ مورد بررسی قرار گیرد.

در فصل دوم پژوهش حاضر، اطلاعاتی در مورد تاریخچه آلیاژ حافظه‌دار نیکل-تیتانیم و خواص منحصر بفرد آن و مبانی فرایند جوشکاری لیزر آورده شده است. در ادامه این فصل، برخی تحقیقات انجام شده در زمینه جوشکاری لیزر مشابه و غیرمشابه آلیاژ نیکل-تیتانیم مورد بررسی قرار می‌گیرند. در پایان فصل نیز تحقیق حاضر در زمینه تاثیرعملیات حرارتی پس از جوشکاری بر خواص اتصال لیزر مشابه آلیاژ نیکل-تیتانیم به تفصیل ارائه می‌شود. فصل سوم به فعالیت‌های تجربی و آزمایشات انجام شده اختصاص دارد و در فصل چهارم به بحث و بررسی درباره نتایج آزمایشات پرداخته می‌شود. در نهایت نیز نتایج مهم تحقیق و پیشنهادات برای ادامه کار در فصل پنجم بیان می‌شود.