بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

رساله دوره دکتری مهندسی مواد

بررسی تغییرات ریزساختاری و خواص مکانیکی در فرایند جوشکاری همزن اصطکاکی فولاد زنگ نزن آستنیتی به فولاد کربنی

مصطفی جعفرزادگان

استاد راهنما:

دکتر امیر عبداله زاده

استاد مشاور:

دکتر حمید اسدی

شهریور ماه ۱۳۹۱

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل رساله دکتری نگارنده دررشته مهندسی مواد است که در سال ۱۳۹۱ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر امیر عبداله زاده، مشاوره جناب آقای دکتر حمید اسدی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده رابه عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواندخسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده‌نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب مصطفی جعفرزادگان دانشجوی رشته مهندسی مواد مقطع دکتری تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

تام و نام خانوادگی: مصطفی جعفرزادگان

تاریخ و امضا: ۱۳۹۱/۷/۱۵

دستورالعمل حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیات علمی، دانشجویان، دانش آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی که با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد ذیل را رعایت نمایند:

ماده ۱- حقوق مادی و معنوی پایان نامه‌ها / رساله‌های مصوب دانشگاه متعلق به دانشگاه است و هرگونه بهره‌برداری از آن باید با ذکر نام دانشگاه و رعایت آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مصوب دانشگاه باشد.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و استاد راهنما مسئول مکاتبات مقاله باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب حاصل از نتایج پایان نامه / رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی دانشگاه باید با مجوز کتبی صادره از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه و بر اساس آئین نامه های مصوب انجام می‌شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق حوزه پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این دستورالعمل در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۱۳۸۴/۴/۲۵ در شورای پژوهشی دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب لازم الاجرا است و هرگونه تخلف از مفاد این دستورالعمل، از طریق مراجع قانونی قابل پیگیری می شود.

نام و نام خانوادگی: مصطفی حیدرزادگان

امضاء: ۱۳۹۱/۷/۱۰

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای **مصطفی جعفرزادگان** رساله ۲٤ واحدی خود را **با عنوان بررسی تغییرات ریز ساختاری و خواص مکانیکی در فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی فولاد زنگ نزن آستنیتی به فولاد کربنی** در تاریخ ۱۳۹۱/٦/۲۵ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی مواد – شناسائی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر امیر عبداله زاده	استاد	
استاد مشاور	دکتر حمید اسدی	استاد	
استاد ناظر	دکتر فرشید مالک قائینی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر رضا میراسعیلی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر فرشید کاشانی بزرگ	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر کامران دهقانی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر فرشید مالک قائینی	استادیار	

تقدیم

تقدیم به پدر، مادر و خانواده‌ام که همواره دلسوز، مشوق و راهنمای من در مسیر زندگی بوده‌اند.

همچنین تقدیم به تمامی اساتید و مربیان دلسوز که زحماتشان باعث افزایش آگاهی و گسترش دید اینجانب به زندگی شده و نقش مهمی در آموزش و تربیت اینجانب داشته‌اند.

تشکر و قدردانی

با تشکر از دکتر امیر عبداله زاده، دکتر توحید سعید و دکتر فرشید مالک که در طول دوره کارشناسی ارشد و دکتری از راهنمایی‌های ایشان برخوردار بودم. همچنین از زحمات جناب آقای مهندس فیروز کارگر در به ثمر رسیدن این کار کمال تشکّر و قدردانی را می نمایم.

بخشی از کار پژوهشی حاضر با تجهیزات پیشرفته آنالیز در دانشگاه *Harbin Institute Technology* انجام گرفت که بدین وسیله از دکتر *Aihan Feng* و *Jun Shen* در فراهم نمودن زمینه مناسب برای انجام آزمایشات، قدردانی می‌شود.

مصطفی جعفرزادگان

شهریور ۱۳۹۱

چکیده

یکی از پرکاربردترین جوشکاری‌های غیر همجنس، جوشکاری فولادهای کربنی و فولادهای زنگ نزن آستنیتی است که به صورت گسترده در صنایع مختلف استفاده می شود. با این وجود، روشهای جوشکاری ذوبی این فولادها به یکدیگر با مشکلات متعدد مهندسی و متالورژی همراه است که از جمله آنها می توان تشکیل مارتنزیت و کاربیدهای کروم، افت خواص در ناحیه تحت تاثیر حرارت، ترک انجمادی و ترک هیدروژنی را نام برد. از طرفی دیگر جوشکاری همزن اصطکاکی یکی از روشهای جدید اتصال فلزات می‌باشد که توسعه فراوانی داشته است. به نظر می رسد که ماهیت حالت جامد جوشکاری همزن اصطکاکی، می‌تواند مشکلات جوشکاری ذوبی اتصالات غیر همجنس را حل کرده و جوش با استحکام بالا و نرمی مطلوب ایجاد کند.

با توجه به آنچه گفته شد، در این تحقیق روش جوشکاری همزن اصطکاکی جهت اتصال فولاد زنگ نزن آستنیتی ۳۰۴ به فولاد کم کربن *st37* استفاده شده است. جوشکاری به صورت لب به لب و با تغییر سرعت چرخش ابزار در محدوده *rpm* ۸۰۰-۴۰۰ و سرعت جوشکاری ۵۰ و *mm/min* ۱۰۰ صورت گرفت. ساختار جوشها توسط پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش الکترونهای برگشتی و میکروسکوپ الکترونی عبوری بررسی شد. خواص مکانیکی جوشها نیز توسط آزمونهای سختی سنجی و کشش مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که ریزساختار فلز پایه فولاد *st37* حاوی پرلیت و فریت درشت است در حالی که نواحی ناحیه تحت تاثیر حرارت دچار ریزدانگی کامل و جزئی شده‌اند. ناحیه همزده این فولاد نیز حاوی فریت - پرلیت ریز، فریت مرزدانه‌ای و ویدمن اشتاتن، مقدار اندکی بینیت، مارتنزیت و مارتنزیت اتوتمپر حاصل از استحاله آستنیت در حین سرد شدن جوشها می باشد. با افزایش سرعت چرخش ابزار یا کاهش سرعت جوشکاری به دلیل حرارت ورودی بالاتر، اندازه دانه فریت در ناحیه همزده فولاد *st37* افزایش می یابد.

در طرف دیگر جوشها، ریزساختار فلز پایه فولاد ۳۰۴ حاوی دانه های درشت آستنیت است. در ناحیه تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی دانه‌ها تغییر شکل داده و چگالی نابجایی و دانه‌های فرعی زیاد دارند که نشان‌دهنده وقوع بازیابی پویا است. ناحیه همزده نیز حاوی دانه‌های ریز بازبلوری شده است که برخی دانه‌ها

نابجایی کم و برخی نابجایی زیاد دارند. با افزایش سرعت چرخش ابزار یا کاهش سرعت جوشکاری، دمای تغییر شکل آستنیت در حین جوشکاری همزن اصطکاکی بیشتر بوده و در نتیجه اندازه دانه افزایش می یابد.

نتایج سختی سنجی نشان داد که سختی نواحی همزده به دلیل وجود ریزساختار ظریفتر، از سختی فلزهای پایه مربوطه بیشتر است. همچنین سختی نواحی همزده دو فولاد با اندازه دانه طبق رابطه هال-پچ ارتباط معکوس دارد. آزمون کشش نیز استحکام و نرمی مناسبی برای جوشها نشان می‌دهد ولی در دو مورد از جوشها وجود عیوب اکسیدی و ذرات کاربید تنگستن باعث افت استحکام کششی و نرمی شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، جوشکاری همزن اصطکاکی غیرهمجنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ به فولاد کم کربن *st37* روی هم رفته ریزساختاری ظریف با مقدار مارتنزیت و بینیت اندک و بدون رسوبات کاربید کروم در جوشها ایجاد می‌کند که قابلیت این روش را برای جایگزینی با روشهای جوشکاری ذوبی نشان می‌دهد. همچنین جوشها علاوه بر ریزساختار مناسب از استحکام و نرمی بیشتر از فلز پایه *st37* برخوردار هستند.

کلید واژه‌ها: جوشکاری همزن اصطکاکی غیر همجنس، ریزساختار، بازبلوری، خواص کششی، سختی سنجی

فهرست مطالب

فصل اول – مقدمه..... ۱

فصل دوم – مروری بر منابع..... ۴

۲-۱- معرفی روش جوشکاری همزن اصطکاکی ۴

۲-۱-۱- متغیرهای فرآیند ۷

۲-۲- تغییرات ریزساختاری در FSW ۹

۲-۲-۱- ناحیه همزده..... ۱۰

۲-۲-۱-۱- سازوکارهای بازبلوری پویا..... ۱۱

۲-۲-۱-۲- نحوه سیلان ماده در ناحیه همزده ۱۹

۲-۲-۲- ناحیه تحت عملیات ترمومکانیکی ۲۰

۲-۲-۲-۱- بازیابی پویا ۲۱

۲-۲-۳- ناحیه متأثر از حرارت ۲۲

۲-۳- خواص مکانیکی در FSW ۲۴

۲-۳-۱- سختی..... ۲۴

۲-۳-۲- استحکام و نرمی ۲۴

۲-۴- جوشکاری مواد مختلف با روش FSW..... ۲۸

۲-۴-۱- جوشکاری همزن اصطکاکی فولادهای زنگ نزن آستنیتی ۲۸

۲-۴-۲- جوشکاری همزن اصطکاکی فولادهای کربنی..... ۳۲

۲-۵- جوشکاری فولادهای زنگ نزن به فولادهای کربنی یا کم آلیاژ ۳۵

۲-۵-۱- تعیین ساختمان فلز جوش ۳۷

۲-۵-۲- مسایل جوشکاری ذوبی ۳۸

۲-۵-۳- ترک خوردگی انجمادی..... ۳۹

۲-۵-۴- شکست خزشی در HAZ..... ۴۰

۲-۵-۵- ترک هیدروژنی ۴۰
۲-۶- جوشکاری حالت جامد فولاد زنگ نزن آستنیتی به فولاد کربنی ۴۱
۲-۶-۱- جوشکاری اصطکاکی ۴۱
۲-۶-۲- جوشکاری نفوذی ۴۴
فصل سوم – مواد و روش انجام آزمایش ۴۶
۳-۱- جوشکاری همزن اصطکاکی ۴۶
۳-۲- اندازه گیری دما ۵۰
۳-۳- برش نمونه ها ۵۱
۳-۴- پراش پرتو X ۵۲
۳-۵- آزمون کشش ۵۲
۳-۶- متالوگرافی نوری ۵۳
۳-۶- آزمون سختی ۵۴
۳-۸- میکروسکوپ الکترونی عبوری ۵۴
۳-۹- پراش الکترونهای برگشتی ۵۶
فصل چهارم- نتایج و بحث ۵۷
۴-۱- بررسی عیوب موجود در جوشکاری همزن اصطکاکی ۵۷
۴-۲- اندازه گیری دما ۶۷
۴-۳- بررسی ها با پراش پرتو ایکس ۶۸
۴-۴- بررسی درشت ساختار جوشها و دسته بندی ریزساختار ۶۹
۴-۵- ریز ساختار نواحی مختلف اتصال ۷۳
۴-۵-۱- ریز ساختار فلز پایه فولاد *st37* ۷۳
۴-۵-۲- ریزساختار ناحیه تحت تاثیر حرارت در فولاد *st37* ۷۵
۴-۵-۳- ریزساختار ناحیه همزده فولاد *st37* ۸۱

۴-۵-۴- ریزساختار ناحیه مرزی دو فولاد در ناحیه همزده ۹۳
۴-۵-۵- ریزساختار فلز پایه فولاد ۳۰۴ ..... ۹۷
۴-۵-۶- ریزساختار ناحیه تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی در فولاد ۳۰۴ ..... ۱۰۰
۴-۵-۷- ریزساختار ناحیه همزده فولاد ۳۰۴ ..... ۱۰۳
۴-۵-۸- ناحیه *HAZ* در فولاد ۳۰۴ ..... ۱۰۷
۴-۶- تغییرات سختی ۱۰۹
۴-۷- خواص کششی ۱۱۴
۴-۷-۱- خواص کششی نمونه های عرضی ۱۱۴
۴-۷-۲- خواص کششی نمونه های طولی و بررسی سطوح شکست ۱۱۶
نتیجه گیری ۱۲۰
پیشنهادها ۱۲۲
منابع و مراجع ۱۲۳

فهرست اشکال

شکل ۲-۱- تصویری طرح وار از فرآیند *FSW* ۵

شکل ۲-۲- نواحی مختلف ریزساختاری در جوشکاری همزن اصطکاکی آلیاژ آلومینیم *2024-T351* ۹

شکل ۲-۳- تأثیر متغیرهای فرایند بر شکل ناحیه همزده در *A356*. ۱۰

شکل ۲-۴- دانه ریز یا دانه درشت شدن در بازبلوری پویا و رابطه آن با Z ۱۲

شکل ۲-۵- ریزساختار *Al-Li* نورد شده ۱۴

شکل ۲-۶- تصویر میکروسکوپ نوری از ناحیه *FSW* مربوط به آلیاژ *Al-Li*. ۱۴

شکل ۲-۷- تصویر *TEM* از ریزساختار ناحیه *DRX*. ۱۵

شکل ۲-۸- نمودار تحولات شکل گیری ریزساختار در فرآیند *FSW* ۱۶

شکل ۲-۹- شکل طرح وار چگالی نابجایی ها در یک جبهه باز بلوری پویا ۱۷

شکل ۲-۱۰- تکامل ریزساختار در طول باز بلوری. *(d) – (a)* : اندازه دانه اولیه بزرگ. *(e)*: اندازه دانه اولیه کوچک ۱۸

شکل ۲-۱۱- تأثیر دما بر منحنیهای تنش و کرنش در فولاد $C\%$ ۰/۶۸ ..... ۱۸

شکل ۲-۱۲- ریزساختار *TMAZ* در آلیاژ ۷۰۷۵*Al* ۲۰

شکل ۲-۱۳- منحنیهای تنش- کرنش برای آلیاژ *Al-1%Mg* در دمای ۴۰۰ C^o ۲۱

شکل ۲-۱۴- تغییرات ریزساختاری در بازیابی پویا ۲۳

شکل ۲-۱۵- ریزساختار صفحه *ND-RD* در آلیاژ *Al-۰/۱Mg* ۲۳

شکل ۲-۱۶- مرزهای بزرگ زاویه در آلیاژهای آلومینیم (نورد ۴۰۰C^o). ۲۳

شکل ۲-۱۷- نمودار سختی جوش همزن اصطکاکی *6063Al-T5*. ۲۵

شکل ۲-۱۸- تصویر *TEM* از توزیع رسوبات در نواحی مختلف ریزساختاری جوش *FSW* آلیاژ ۶۰۶۳*Al -T*۵ ..... ۲۵

جدول ۲-۱- بازده اتصال *FSW* در آلیاژهای مختلف آلومینیم ۲۶

شکل ۲-۱۹- تغییرات خواص کششی مناطق مختلف جوش در آلیاژ ۷۰۷۵*Al* ۲۷

شکل ۲-۲۰- تصویر میکروسکوپ نوری از (a) فلزپایه، (b) جوش ۳۰۰*rpm*، (c) جوش ۵۰۰*rpm* ۲۹

شکل ۲-۲۱- منحنی های کشش فلزپایه و جوشهای ۳۰۰ و rpm ۵۰۰ فولاد $304L$ ۲۹

شکل ۲-۲۲- تصاویر TEM از نواحی مختلف FSW و فلز پایه فولاد ۳۰۴ ..... ۳۰

شکل ۲-۲۳- نمودار سختی در مقطع جوش FS فولاد ۳۰۴ ..... ۳۱

شکل ۲-۲۴- توزیع اندازه دانه در نواحی مختلف FSW و فلز پایه فولاد ۳۰۴ براساس نقشه های OIM ۳۱

شکل ۲-۲۵- ناحیه SZ حاوی فریت و ذرات فاز ثانویه منظم شده، فریت مرزدانه و مجموعه های فریت – کاربید ۳۲

شکل ۲-۲۶- تصویر میکروسکوپ نوری نواحی مختلف HAZ. ۳۳

شکل ۲-۲۷- تصویر نواحی مختلف HAZ در FSW فولاد کربن متوسط و دماهای مربوطه در نمودار دوفازی ۳۳

شکل ۲-۲۸- نمودار سختی در نواحی مختلف FSW فولاد ۱۰۱۸ ..... ۳۵

جدول ۲-۲- خواص کششی در دمای اتاق FSW فولاد ۱۰۱۸ ..... ۳۵

شکل ۲-۲۹- استفاده از نمودار شفلر برای محاسبه ساختار فلز جوش نامشابه ۳۸

شکل ۲-۳۰- ترک خوردگی انجمادی در یک جوش نبشی زیر پودری. ۳۹

شکل ۲-۳۱- جوش پس از اعمال فروفلوید بر سطح پرداختکاری شده، سمت راست ۴۱

شکل ۲-۳۲- ریزساختار در مرکز (C) و محیط (P) اتصال جوش برای $B5, B7, B9 , B12$ ۴۲

شکل ۲-۳۳- توزیع عناصر نسبت به مرکز جوش ۴۱۴۰-۳۰۴ ($B5, B12$) ۴۲

شکل ۲-۳۴- اثر $burn\text{-}off\ length$ بر توزیع سختی در مقطع جوش ۴۳

جدول ۲-۳- اثر $burn\text{-}off\ length$ بر استحکام ضربه ۴۳

شکل ۲-۳۵- تصویر SEM از اتصال فصل مشترک ۳۰۴-۴۱۴۰ و نتایج EDS. ۴۵

جدول ۳-۱- ترکیب شیمیایی ورقهای فولادی مورد استفاده بر حسب درصد وزنی. ۴۶

شکل ۳-۱- ابزار کاربید تنگستن دارای پین برای جوشکاری همزن اصطکاکی روی ورقها. ۴۷

شکل ۳-۲- قید و بند مورد استفاده برای FSW. ۴۷

شکل ۳-۳- دستگاه فرز سنگین NC به کار رفته در جوشکاری FSW. ۴۹

شکل ۳-۴- دستگاه دورسنج غیر تماسی برای اندازه گیری سرعت چرخش ابزار. ۵۰

شکل ۳-۵- (a) دستگاه ثبت دمای دماسنج ها، (b) دماسنج مادون قرمز غیر تماسی. ۵۱
شکل ۳-۶- تصویر طرح وار جوش همزن اصطکاکی و محل تهیه نمونه های کشش و متالوگرافی. ۵۱
شکل ۳-۷- ابعاد نمونه های کشش در استاندارد *ASTM E8M-99* ۵۲
شکل ۳-۸- نمونه های تخت کشش طولی و عرضی از جوش. (a) نمونه طولی و (b) نمونه عرضی. ۵۳
شکل ۳-۹- محلهای سختی سنجی بر روی مقطع نمونه جوش. ۵۵
شکل ۳-۱۰- محل پانچ نمونه های *TEM* به قطر mm ۳ از یک برش از مقطع جوش به ضخامت حدود μm ۱۰۰. ..... ۵۵
شکل ۴-۱- عیبی سراسری به دلیل سرعت چرخش کم ابزار نسبت به سرعت جوشکاری ۵۹
شکل ۴-۲- ابزارهای شکسته شده در حین جوشکاری ۵۹
شکل ۴-۳- تغییر شکل شانه و شکست پین و اثر آن بر کیفیت جوشها ۶۰
شکل ۴-۴- ذرات کاربید تنگستن ناشی از سایش ابزار در جوشها. ۶۱
شکل ۴-۵- رادیوگراف از جوش ۵۰-۸۰۰ نشان دهنده ذرات کاربید تنگستن ۶۱
شکل ۴-۶- ایجاد شیار روباز در جوشها وقتی ورقهای فولاد ۳۰۴ در سمت پیشرونده قرار دارند ۶۲
شکل ۴-۷- نمونه ای از عیوب تونلی یا شیاری در مقطع جوش فولاد ۳۰۴ ..... ۶۲
شکل ۴-۸- لایه های اکسید در سطح و مقطع جوشها ۶۴
شکل ۴-۹- کیفیت عالی سطح جوش *FSW* غیر همجنس ۵۰-۶۰۰. ..... ۶۵
شکل ۴-۱۰- منحنی چرخه گرمایی اندازه گیری شده توسط دماسنج در زیر ورقها در جوش ۵۰-۸۰۰. ..... ۶۷
شکل ۴-۱۱- نتایج پراش پرتو ایکس از سطوح بدون پرداختکاری جوشها. ۶۸
شکل ۴-۱۲- نتایج پراش پرتو ایکس از جوشها پس از حذف اکسیدهای سطحی ۷۰
شکل ۴-۱۳- تصویر بزرگنمایی پایین از مقاطع عرضی جوشها. ۷۱
شکل ۴-۱۴- تصاویر سطح جوشها پس از پرداختکاری و حکاکی کردن ۷۲
شکل ۴-۱۵- ریزساختار فلز پایه فولاد *st37*. ۷۳
شکل ۴-۱۶- تصاویر *TEM* از فلز پایه فولاد *st37*. ۷۴

شکل ۴-۱۷- تصویر $EBSD$ نشاندهنده مرزهای کم زاویه و بزرگ زاویه فلز پایه $st37$ ۷۴
شکل ۴-۱۸- توزیع اندازه دانه های فریت در فلز پایه $st37$ ۷۵
شکل ۴-۱۹- تصاویر میکروسکوپ نوری از نواحی ریزدانگی جزیی HAZ فولاد $st37$ در جوشهای مختلف. ۷۶
شکل ۴-۲۰- تصاویر SEM از نواحی ریزدانگی جزیی HAZ فولاد $st37$ در جوشهای مختلف. ۷۷
شکل ۴-۲۱- نواحی مختلف HAZ مطابق با نمودار آهن - کربن در جوشکاری ذوبی ۷۸
شکل ۴-۲۲- تصاویر میکروسکوپ نوری از نواحی ریزدانگی کامل HAZ فولاد $st37$ در جوشهای مختلف. ۷۸
شکل ۴-۲۳- تصاویر SEM از نواحی ریزدانگی کامل HAZ فولاد $st37$ در جوشهای مختلف. ۷۹
شکل ۴-۲۴- تصاویر TEM از HAZ فولاد $st37$ ۸۰
شکل ۴-۲۵- تصاویر میکروسکوپ نوری از نواحی حاوی فریت و پرلیت در ناحیه همزده فولاد $st37$ ۸۲
شکل ۴-۲۶- تصاویر TEM از ساختار فریت و پرلیت در ناحیه همزده فولاد $st37$ ۸۳
شکل ۴-۲۷- رابطه اندازه دانه فریت در ناحیه همزده فولاد $st37$ و شرایط جوشکاری FSW ۸۴
شکل ۴-۲۸- تصاویر میکروسکوپ نوری از ناحیه همزده فولاد $st37$ در جوشهای مختلف. ۸۵
شکل ۴-۲۹- تصاویر SEM از ناحیه همزده فولاد $st37$ در جوشهای مختلف. ۸۶
شکل ۴-۳۰- تصاویر SEM از ذرات ریز سمانتیت پراکنده در فریت در ناحیه همزده فولاد $st37$ ۸۷
شکل ۴-۳۱- تصاویر TEM از (a) فریت ویدمن اشتاتن و (b) فریت مرزدانه ای در ناحیه همزده فولاد $st37$ ۸۸
شکل ۴-۳۲- تغییرات سرعت نسبی فصل مشترک ناهمدوس به نیمه همدوس با سرعت سرمایش. ۸۹
شکل ۴-۳۳- تصاویر TEM از تیغه های مارتنزیت در ناحیه همزده فولاد $st37$ ۹۰
شکل ۴-۳۴- تغییر دمای شروع و ریخت شناسی مارتنزیت با تغییر درصد کربن ۹۰
شکل ۴-۳۶- تصاویر TEM از مجموعه های فریت و ذرات سمانتیت در مارتنزیت اتوتمپر و بینیت. ۹۲
شکل ۴-۳۷- تصویر $EBSD$ از مرزدانه های ناحیه همزده فولاد $st37$ در جوش ۱۰۰-۶۰۰. ..... ۹۳
شکل ۴-۳۸- نمودار توزیع اندازه دانه در ناحیه همزده فولاد $st37$ در جوش ۱۰۰-۶۰۰. ..... ۹۴
شکل ۴-۳۹- تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک دو فولاد در ناحیه همزده فولاد $st37$ ۹۴

شکل ۴-۴۰- (*a*) تصویر *SEM* از ناحیه همزده مرزی در جوش ۵۰-۶۰۰ و (*b*) و (*c*) *EDS*. ۹۵
شکل ۴-۴۱- (*a*) تصویر *SEM* از ناحیه همزده جوش ۵۰-۶۰۰. (*b*) نتایج *EDS* خطی از مرز دو فولاد. ۹۶
شکل ۴-۴۲- تصویر *SEM* از ناحیه همزده جوش ۵۰-۸۰۰ و نتایج *EDS* ۹۷
شکل ۴-۴۳- (*a*) تصاویر میکروسکوپ نوری و (*b*) *SEM* از ریزساختار فلز پایه فولاد ۳۰۴. ..... ۹۸
شکل ۴-۴۴- تصاویر *TEM* از فلز پایه فولاد ۳۰۴. ..... ۹۸
شکل ۴-۴۵- تصویر *EBSD* از مرزدانه های آستنیت در فلز پایه فولاد ۳۰۴. ..... ۹۹
شکل ۴-۴۶- نمودار توزیع اندازه دانه آستنیت در فلز پایه فولاد ۳۰۴. ..... ۹۹
شکل ۴-۴۷- تصاویر میکروسکوپ نوری از نواحی تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی فولاد ۳۰۴ در جوشهای مختلف..... ۱۰۰
شکل ۴-۴۸- تصاویر *TEM* از نواحی تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی در فولاد ۳۰۴. ..... ۱۰۲
شکل ۴-۴۹- نمودار کاذب *Fe-Cr-Ni* در مقطع *70%Fe* ۱۰۳
شکل ۴-۵۰- تصویر میکروسکوپ نوری از نواحی همزده فولاد ۳۰۴ جوشهای مختلف. ۱۰۴
شکل ۴-۵۱- رابطه اندازه دانه آستنیت در ناحیه همزده فولاد ۳۰۴ و شرایط جوشکاری *FSW*. ۱۰۵
شکل ۴-۵۲- تصاویر *TEM* از نواحی همزده در فولاد ۳۰۴. ..... ۱۰۶
شکل ۴-۵۳- تصویر *EBSD* از مرزدانه های ناحیه همزده فولاد ۳۰۴ در جوش ۱۰۰-۶۰۰. ..... ۱۰۸
شکل ۴-۵۴- نمودار توزیع اندازه دانه در ناحیه همزده فولاد ۳۰۴ در جوش ۱۰۰-۶۰۰. ..... ۱۰۸
شکل ۴-۵۵- منحنی دما- زمان رسوب $M_{23}C_6$ برای آلیاژ *18Cr -8Ni* با مقادیر کربن مختلف ۱۰۹
شکل ۴-۵۶- تغییرات سختی در مقطع عرضی جوشها. ۱۱۰
شکل ۴-۵۷- رابطه بین سختی و مقدار کربن برای ریز ساختارهای مختلف در فولادها ۱۱۱
شکل ۴-۵۸- بیشینه سختی در ناحیه همزده فولاد *st37* برحسب سرعت چرخش ابزار و سرعت جوشکاری *FSW*..... ۱۱۱
شکل ۴-۵۹- رابطه سختی نواحی همزده حاوی فریت + پرلیت و فلز پایه *st37* با اندازه دانه فریت. ۱۱۲
شکل ۴-۶۰- بیشینه سختی در ناحیه همزده فولاد ۳۰۴ برحسب سرعت چرخش ابزار و سرعت جوشکاری *FSW*..... ۱۱۳
شکل ۴-۶۱- رابطه سختی نواحی همزده جوشها و فلز پایه ۳۰۴ با اندازه دانه و مقایسه با نتایج *Schino*. ۱۱۴

شکل ۴-۶۲- تصویر نمونه های کشش عرضی پس از آزمون کشش..... ۱۱۵
شکل ۴-۶۳- منحنی تنش- کرنش نمونه های طولی و فلز پایه فولاد $st37$..... ۱۱۷
شکل ۴-۶۴- تصاویر SEM از سطوح شکست در بزرگنماییهای مختلف..... ۱۱۸
شکل ۴-۶۵- تصاویر SEM از سطوح شکست نمونه های کشش طولی..... ۱۱۹

فهرست جداول

جدول ۲-۱- بازده اتصال FSW در آلیاژهای مختلف آلومینیم ۲۶

جدول ۲-۲- خواص کششی در دمای اتاق FSW فولاد ۱۰۱۸ ..... ۳۵

جدول ۲-۳- اثر $burn\text{-}off\ length$ بر استحکام ضربه ۴۳

جدول ۳-۱- ترکیب شیمیایی ورقهای فولادی مورد استفاده بر حسب درصد وزنی. ۴۶

جدول ۳-۲- محلولهای حکاکی مورد استفاده در حکاکی نمونه ها ۵۳

جدول ۴-۱- شرایط جوشکاری FSW و نحوه نامگذاری نمونه ها. ۵۸

جدول ۴-۲- تصویر جوشهای غیر همجنس FSW ورقهای فولاد $st37$ به فولاد ۳۰۴. ..... ۶۶

جدول ۴-۳- استحکام تسلیم و کششی نمونه های کشش عرضی و دو فلز پایه. ۱۱۵

۱ فصل اول - مقدمه

جوشکاری همزن اصطکاکی یا جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (*FSW*)[1] یک روش نوین اتصال حالت جامد می‌باشد که در سال ۱۹۹۱ توسط مؤسسه جوشکاری (*TWI*)[2] ابداع شد. روش جوشکاری *FSW* بسیار ساده است. این کار بوسیله یک ابزار چرخنده غیر مصرفی شامل یک پین مخصوص و شانه انجام می‌گیرد. پین در حال چرخش به درز جوش وارد شده و در طول خط اتصال حرکت می‌کند و بدین ترتیب باعث اتصال دو ورق می‌گردد. گرما بوسیله اصطکاک بین ابزار و قطعه کاری و تغییر شکل پلاستیک قطعه تأمین می‌شود. گرمای موضعی ماده را در اطراف پین نرم کرده و ترکیب چرخش و حرکت ابزار باعث انتقال مواد از جلوی پین به عقب آن می‌گردد. در نتیجه این فرآیند یک اتصال حالت جامد ایجاد می‌گردد.

این روش اتصال‌دهی یک روش بهینه از نظر صرفه‌جویی در انرژی و دوستدار محیط زیست به شمار می‌آید. در عمل این روش در اتصال آلیاژهای مستحکم آلومینیم در صنایع هوا و فضا و دیگر آلیاژهای فلزی که با روشهای معمول قابلیت جوش پذیری ندارند، قابل استفاده است. اتصال هیچ نیازی به ماده پرکننده ندارد، بنابراین همه آلیاژهای آلومینیم و حتی مواد مرکب می‌توانند اتصال یابند بدون اینکه مشکلی از بابت ترکیب شیمیایی و اتصال ایجاد گردد. *FSW* یکی از روشهای مورد توجه در اتصال فلزات می‌باشد که اخیراً توسعه فراوانی داشته است.

---

1 - Friction Stir Welding
2 - The Welding Institute