دانشکده فنی و مهندسی

رساله برای دریافت درجه دکتری تخصصی

رشته مهندسی متالورژی و مواد، گرایش جوشکاری و اتصال مواد

بررسی تغییرات ریزساختاری فولاد زنگ‌نزن دوپلکس در فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی

نگارنده

توحید سعید

استاد راهنما

دکتر امیر عبداله زاده

استادان مشاور

دکتر فرشید مالک قائینی

دکتر حمید اسدی

تیر ماه ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحیم

آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی

دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری 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 هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می‌باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

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

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده‌ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده‌ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه های مصوب انجام شود.

ماده ٤- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته‌ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه می‌باشد، باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ٥- این آیین‌نامه در ٥ ماده و یک تبصره در تاریخ۸۷/٤/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/٤/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱٥ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

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 پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته مهندسی متالورژی و مواد است که در سال ۸۹ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر امیر عبداله‌زاده، مشاوره جناب آقای دکتر فرشید مالک قائینی و 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 آثار علمی» 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 را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت 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 شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

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

نام و نام خانوادگی: توحید سعید

تاریخ و امضا: ۸۹/۳/۳۱

دانشکده فنی و مهندسی

رساله برای دریافت درجه دکتری تخصصی

رشته مهندسی متالورژی و مواد، گرایش جوشکاری و اتصال مواد

بررسی تغییرات ریزساختاری فولاد زنگ‌نزن دوپلکس در فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی

نگارنده

توحید سعید

استاد راهنما

دکتر امیر عبداله زاده

استادان مشاور

دکتر فرشید مالک قائینی

دکتر حمید اسدی

تیر ماه ۱۳۸۹

تقدیم به:

پدر، مادر و همسرم

آنان که راه زندگی را به من آموختند؛

عزیزانی که وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر؛ مویشان سپیدی گرفت تا رویم سپید بماند. آنان که راستی قامتم، در شکستن قامتشان تجلی یافت و آنان که فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان سرمایه‌های جاودانه زندگیم بوده و خواهد بود.

در برابر وجود گرامیشان زانوی ادب بر زمین می‌نهم و با دلی مملو از عشق و محبت بر دستانشان بوسه می‌زنم.

قدردانی وسپاس:

سپاس بی‌پایان بر خداوند لطیف الصنعی که آهن را در دست داوود نرم کرد.

به عنوان بنده‌ای حقیر و ناسپاس، بر خود لازم می‌دانم که شکرگزار خدایی باشم که در تمامی مراحل زندگی حامی‌ام بوده و بهترینها را به من داده است.

خالصانه‌ترین سپاس و قدردانی این شاگرد بی‌تجربه متعلق به استاد راهنمای بزرگوار و دانشمند جناب آقای دکتر امیر عبداله‌زاده است که من را شیفته مکتب علم، تدبیر، اخلاق و منش خود نموده و الگوی بی‌بدیل زندگی‌ام بوده است. از خداوند متعال برای ایشان، طلب طول عمر و سلامتی و برای خود و دانشجویان، توفیق بهره‌مندی هر چه بیشتر از ایشان را دارم.

وظیفه خود می‌دانم که قدردان استادان مشاور خود، دکتر فرشید مالک و دکتر حمید اسدی باشم که راهنماییهای دلسوزانه و روشنگرانه آنها مسیر پژوهش را بر من هموار نمود.

از تمامی کسانی که در طول دوره دکتری و انجام رساله یاریگر اینجانب بوده‌اند نهایت تشکر را دارم، بویژه جناب آقای مهندس فیروز کارگر، دوست و یار خاطرم که از هیچ لطفی در حقم دریغ ننمود. همچنین از مهندسان بابک سازگاری، مصطفی جعفرزادگان، سهیل سلیمانی و سعید بهروز قائمی به سبب همکاری و تلاش در پیشبرد اهداف پژوهشی نهایت امتنان را دارم. از خداوند می‌خواهم که قلب تمامی این عزیزان را همواره نورانی نگه دارد

این پژوهش با حمایت مالی شرکت نفت و گاز پارس انجام شده است و علاوه بر حمایت مادی، پشتیبانی شرکت از پروژه و همچنین علاقه‌مندی ریاست و پرسنل واحد پژوهش و توسعه به انجام این کار، موجب دلگرمی نگارنده بوده است که در اینجا مورد قدردانی قرار می‌گیرد.

چکیده

جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW)، بسیاری از مشکلات و محدودیتهای ناشی از ذوب و انجماد فلز جوش را ندارد و با کنترل متغیرهای آن می‌توان به ریزساختار و خواص مکانیکی مناسب در موضع اتصال رسید. پژوهش حاضر به بررسی نحوه پیدایش ریزساختار در متغیرهای مختلف FSW و تأثیر آن بر خواص مکانیکی فولاد زنگ‌نزن دوپلکس ۲۲۰۵ SAF می‌پردازد. یک ابزار ساده از جنس WC-Co برای فرآوری ورقهای ۲ mm در سرعتهای چرخشی ۲۰۰، ٤۰۰، ٦۰۰ و ۸۰۰ rpm و سرعتهای جوشکاری ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰ و ۳۵۰ mm/min به کار رفت.

مطالعه ریزساختار و مشخصات بافتی ناحیه همزده (SZ) با آنالیز تفرق الکترونهای برگشتی (EBSD) مشخص کرد که در فریت، فرآیند تبلورمجدد دینامیکی پیوسته و در آستنیت، فرآیندهای تبلورمجدد ایستایی و دینامیکی پیوسته اتفاق می‌افتد و سبب تشکیل دانه‌های ریز هم‌محور می‌گردد. تغییرات اندازه دانه و ویژگیهای بافتی نشان داد که ماده در سمت پیشرونده SZ تغییرشکل پلاستیک بیشتری را متحمل می‌شود و بنابراین اندازه دانه‌ها در این ناحیه کوچکتر از سایر نقاط جوش است.

علاوه بر این، با افزایش سرعت جوشکاری و یا کاهش سرعت چرخشی، با وجود ثابت ماندن نسبت α/γ، اندازه دانه‌های دو فاز در ناحیه همزده کاهش و بدین ترتیب متوسط سختی و استحکام کششی در SZ افزایش می‌یابد. این نتایج بوسیله ارتباط بین متغیرهای جوشکاری و دمای بیشینه جوش تشریح شد. همچنین، شکلهای قطبی حاصل از مرکز جوش مشخص کرد که بافت برشی ناشی از چرخش پین، با افزایش سرعت جوشکاری و کاهش سرعت چرخشی به تدریج ناپدید می‌گردد.

کلید واژه: فولاد زنگ‌نزن دوپلکس، جوشکاری همزن اصطکاکی (FSW)، تغییرات ریزساختاری، آنالیز تفرق الکترونهای برگشتی (EBSD).

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول- مقدمه	**۱**
فصل دوم- پیشینه پژوهشی	**۵**
۲-۱- معرفی	**٦**
۲-۲- متغیرهای جوشکاری	**۹**
۲-۳- میدانهای دمایی	**۱۲**
۲-٤- نواحی ریزساختاری	**۱٤**
۲-۵- سازوکارهای پیدایش ریزساختار	**۱۹**
۲-٦- تغییرشکل و توسعه بافت	**۲۷**
۲-۷- جوشکاری همزن اصطکاکی فولادها	**۳٤**
۲-۸- فولادهای زنگ‌نزن دوپلکس	**٤۱**
۲-۹- تعریف مسأله و ضرورت انجام پژوهش	**۲٦**
فصل سوم- روش پژوهش تجربی	**٤٦**
۳-۱- ماده اولیه	**٤۷**
۳-۲- دستگاه جوشکاری	**٤۷**
۳-۳- ابزار جوشکاری	**٤۸**
۳-٤- سایر تجهیزات	**۵۱**
۳-۵- جوشکاری همزن اصطکاکی	**۵۲**
۳-٦- بازرسی جوش	**۵۳**
۳-۷- ریزساختار و بافت بلوری	**۵٤**
۳-۸- تفرق اشعه ایکس	**۵٦**
۳-۹- ارزیابی خواص مکانیکی جوش	**۵٦**
فصل چهارم- نتایج و بحث	**۵۸**

٤-١- پنجره فرآیند ٥٩
٤-٢- چرخه حرارتی جوش ٦٣
٤-٣- ریزساختار مناطق مختلف جوش ٧١
٤-٤- مشخصه‌یابی بافت ٨٧
٤-٥- سازوکارهای پیدایش ریزساختار ١٠٤
٤-٦- ریزساختار SZ در پارامترهای مختلف جوشکاری ١١٣
٤-٧- بافت SZ در پارامترهای مختلف جوشکاری ١١٥
٤-٨- فاز سیگما ١١٨
٤-٩- خواص مکانیکی ١٢٠

نتیجه‌گیری و پیشنهادها ١٢٣

مراجع ١٢٨

ضمیمه

فهرست جدولها

عنوان صفحه

جدول ۲-۱: چند نمونه از ابزارهای متداول در FSW ۱۰

جدول ۲-۲: جمع‌بندی موارد مربوط به ریزساختارهای فوق ریز دانه در FSW/FSP ۱۷

جدول ۲-۳: خلاصه مطالعات انجام شده در زمینه سازوکارهای تبلورمجدد دینامیکی در SZ ۲۰

جدول ۲-٤: متغیرهای جوشکاری و ابزار به کار رفته در FSW فولادها ۳۷

جدول ۲-۵: خواص کششی عرضی جوشهای همزن اصطکاکی فولادها ٤۰

جدول ۳-۱: ترکیب شیمیایی (بر حسب wt٪) و خواص مکانیکی فلز پایه ٤۷

جدول ۳-۲: ابعاد ابزار و پارامترهای جوشکاری به کار رفته در پژوهش ۵۳

جدول ۳-۳: شرایط آزمون پرتونگاری اشعه X، مشخصات منبع و فیلم ۵٤

جدول ٤-۱: متوسط اندازه دانه و نسبتهای فازی در نواحی مختلف قطعه جوش ۸۳

جدول ٤-۲: اجزای معمول در بافت فلزات bcc ۸۹

جدول ٤-۳: اجزای معمول در بافت فلزات fcc ۸۹

جدول ٤-٤: اجزا و رشته‌های ایده‌ال در بافت برشی ساده فلزات bcc ۹۱

جدول ٤-۵: اجزا و رشته‌های ایده‌ال در بافت برشی ساده فلزات fcc ۹۱

فهرست شکلها

عنوان صفحه

شکل ۲-۱: تصویر طرحوار از فرآیند FSW ۷

شکل ۲-۲: نواحی مختلف ریزساختاری در جوش همزن اصطکاکی ۱۵

شکل ۲-۳: تأثیر پارامترهای FSW بر اندازه دانه ناحیه همزده ۱۶

شکل ۲-٤: ریزساختار TMAZ در آلیاژ ۷۰۷۵Al ۱۸

شکل ۲-۵: تصاویر زمینه روشن TEM ۲۱

شکل ۲-٦: ریزساختار نواحی مختلف جوش ۲۲

شکل ۲-۷: محل تهیه نمونه‌ها و تصاویر TEM ۲۵

شکل ۲-۸: تحولات شکل‌گیری ریزساختار در فرآیند FSW ۲٦

شکل ۲-۹: ریزساختار SEM/EBSD در نواحی مختلف جوش ۲٦

شکل ۲-۱۰: تصاویر قطبی {۱۱۱} مرکز جوش در فاصله‌های ۲۹

شکل ۲-۱۱: نواحی مختلف جوش در فرآیند همزن اصطکاکی ۲۹

شکل ۲-۱۲: ODF های مربوط به مورد ۳۰

شکل ۲-۱۳: نقشه جهت‌گیری دانه‌ها، تصاویر قطبی و مقاطع ODF ۳۱

شکل ۲-۱٤: حلقه‌های پیازی در SZ با دو جهت‌گیری مختلف دانه‌ها ۳۲

شکل ۲-۱۵: جریانهای مختلف مواد در اطراف پین ۳۲

شکل ۲-۱٦: دو طرح متداول برای ابزار FSW در فولادها ۳۵

شکل ۲-۱۷: تشکیل فریت در مرز دانه‌های آستنیت در سمت پیشرونده SZ ۳۸

شکل ۲-۱۸: نقشه‌های فازی الف) فلز پایه، ب)سمت AS، ج) مرکز و د) RS ٤۳

شکل ۳-۱: ریزساختار اولیه فولاد زنگ‌نزن SAF ۲۲۰۵ ٤٨
شکل ۳-۲: دستگاه فرز سنگین NC به کار رفته در FSW فولاد ٤٩
شکل ۳-۳: نمونه ابزار جوشکاری وسنگهای سنگزنی ٥٠
شکل ۳-٤: ابزار در حین جوشکاری که با سیستم آبگرد خنک می‌گردد ٥٠
شکل ۳-٥: محل قرارگیری ترموکوپلها در پشت ورق ٥١
شکل ۳-٦: ترمومتر چهار کانالی و دورسنج ٥٢
شکل ۳-۷: نمونه SAF ۲۲۰۵ که با فرآیند FSW ٥٣
شکل ۳-۸: چرخش تمامی تصاویر قطبی به اندازه ۹۰- درجه حول TD ٥٦
شکل ۳-۹: ابعاد و محل تهیه نمونه‌های کشش الف) عرضی و ب) طولی ٥٧
شکل ٤-۱: پنجره فرآیند FSW در جوشکاری فولاد زنگ‌نزن دوپلکس ٥٩
شکل ٤-۲: ابزارهای شکسته شده در حین جوشکاری ٦٠
شکل ٤-۳: تشکیل حفره ریز در حین جوشکاری همزن اصطکاکی ٦١
شکل ٤-٤: نمودارهای دما- زمان نقطه زیر پین در سرعتهای مختلف جوشکاری ٦٤
شکل ٤-٥: نمودارهای دما- زمان نقطه زیر پین در سرعتهای مختلف چرخشی ٦٤
شکل ٤-٦: الف) نرخ سرمایش، و ب) دمای بیشینه ٦٦
شکل ٤-۷: دمای بیشینه اندازه‌گیری شده به صورت تابعی از شاخص حرارتی ٦٦
شکل ٤-۸: الف) طرح ساده ابزار FSW در مدل تولید حرارت ٦٧
شکل ٤-۹: دمای بیشینه اندازه‌گیری شده در فواصل مختلف از مرکز جوش ٧٠
شکل ٤-۱۰: نمایش طرحوار از اختلاف برآیند سرعتهای خطی و پیچشی ٧١
شکل ٤-۱۱: تصاویر نوری از جوش همزن اصطکاکی و ریزساختار نواحی مختلف آن ٧٢
شکل ٤-۱۲: الف) مقطع عمودی نمودار فازی Fe-Ni-Cr ٧٣

شکل ٤-١٣: داده‌های EBSD فلز پایه ٧٥
شکل ٤-١٤: توزیع محور ناهمسویی آستنیت مربوط به فلز پایه ٧٦
شکل ٤-١٥: داده‌های EBSD مربوط به TMAZ ٧٦
شکل ٤-١٦: نقشه‌های EBSD ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی ٧٧
شکل ٤-١٧: توزیع جهت‌گیری ماکروسکوپی HABs و LABs ٨٠
شکل ٤-١٨: داده‌های EBSD مربوط به SZ ٨٢
شکل ٤-١٩: نقشه‌های فازی و توزیع زاویه ناهمسویی دو فاز α و γ ٨٤
شکل ٤-٢٠: نقشه‌های فازی و توزیع زاویه ناهمسویی دو فاز α و γ ٨٦
شکل ٤-٢١: بافت بلوری الف) فریت، و ب) آستنیت در فلز پایه ٨٧
شکل ٤-٢٢: موقعیت ایده‌ال اجزای مهم بافتی در شکل قطبی ٨٨
شکل ٤-٢٣: جهت‌گیریهای اجزا و رشته‌های ایده‌ال در بافت برشی ساده ٩٢
شکل ٤-٢٤: تصاویر قطبی {١١١} آستنیت و {١١٠} فریت ٩٣
شکل ٤-٢٥: جهت‌گیری صفحه و جهت برشی در ناحیه همزده ٩٤
شکل ٤-٢٦: تصاویر قطبی چرخش یافته شکل ٤-٢٤ ٩٥
شکل ٤-٢٧: مقاطع ODF فریت در مناطق مختلف SZ ٩٧
شکل ٤-٢٨: مقاطع ODF آستنیت در مناطق مختلف SZ ٩٨
شکل ٤-٢٩: تصاویر قطبی {١١١} آستنیت و {١١٠} فریت ١٠٠
شکل ٤-٣٠: تصاویر قطبی شکل ٣-٢٩ الف بعد از چرخش ١٠٠
شکل ٤-٣١: میدانهای اصلی سیلان مواد در FSW ١٠١
شکل ٤-٣٢: جهت‌گیری صفحات فشرده بلوری در نقاط مختلف SZ ١٠٢
شکل ٤-٣٣: کرنشهای برشی ناشی از چرخش پین و شانه ابزار ١٠٣

شکل ٤-٣٤: توسعه DDRX ١٠٦

شکل ٤-٣٥: توسعه ریزساختار در فرآیند تبلورمجدد دینامیکی هندسی ١٠٧

شکل ٤-٣٦: مدل تبلورمجدد دینامیکی پیوسته ١٠٨

شکل ٤-٣٧: مدل ریزساختاری پیشنهادی برای تغییرات ریزساختاری فولاد زنگ‌نزن دوپلکس ١١٢

شکل ٤-٣٨: تصاویر ریزساختار مرکز ناحیه همزده در شرایط مختلف جوشکاری ١١٤

شکل ٤-٣٩: تغییرات اندازه دانه الف) فریت، و ب) آستنیت در مرکز SZ ١١٥

شکل ٤-٤٠: تصاویر قطبی {١١١} فریت در مرکز ناحیه همزده ١١٦

شکل ٤-٤١: تصاویر قطبی {١١١} آستنیت در مرکز ناحیه همزده ١١٧

شکل ٤-٤٢: الگوهای XRD ناحیه همزده در بعضی از شرایط جوشکاری ١١٩

شکل ٤-٤٣: نمودار توزیع سختی جوش همزن اصطکاکی فولاد SAF ٢٢٠٥ ١٢٠

شکل ٤-٤٤: اثر پارامترهای جوشکاری بر متوسط سختی و استحکام کششی ١٢١

شکل ٤-٤٥: محل شکست نمونه‌های کشش عرضی در چند نمونه جوش ١٢٢

فهرست علائم و نشانه‌ها

سمت پیشرونده	AS
شبکه بلوری مکعبی مرکزدار	bcc
فلز پایه	BM
شاخص اطمینان از اندیس‌گذاری	C.I
تبلورمجدد دینامیکی پیوسته	CDRX
تبلورمجدد دینامیکی ناپیوسته	DDRX
بازیابی دینامیکی	DRV
تفرق الکترونهای برگشتی	EBSD
نیرو	F (N)
شبکه بلوری مکعبی با وجوه مرکزدار	fcc
میزان مرزهای کوچک زاویه	f_{LAB}
فرآوری همزن اصطکاکی	FSP
جوشکاری همزن اصطکاکی	FSW
تبلورمجدد دینامیکی هندسی	GDRX
جوشکاری قوس فلز با گاز محافظ	GMAW
جوشکاری قوس تنگستنی با گاز محافظ	GTAW
مرزهای بزرگ زاویه	HABs
ناحیه متأثر از حرارت	HAZ
حرارت ورودی در واحد طول جوش	H_{net}
ارتفاع پین	H_p
سختی ویکرز	Hv
شاخص کیفیت تصویر	IQI
مرزهای کوچک زاویه	LABs
گشتاور	M
مگاپاسکال	MPa
جهت عمود برصفحه نورد	ND
درجه سانتیگراد	^oC
تابع توزیع جهت‌گیری	ODF
نام تجاری نرم‌افزاری که بصورت خودکار الگوهای EBSD را حل می‌کند.	OIM™
فشار عمودی ابزار	P
نیترید بور مکعبی پلی کریستالی	PCBN
مناطق خالی از رسوب	PFZ

انرژی فعالسازی	Q
ثابت جهانی گازها	R
جهت نورد	RD
شعاع پین ابزار	r_p
سمت پسرونده	RS
شعاع شانه ابزار	r_s
حجمی از فلز که در واحد زمان به داخل حفره اکسترود می‌شود	s
ترک خوردگی-تنشی	SCC
جهت برشی	SD
میکروسکوپ الکترونی روبشی	SEM
فاصله فیلم و منبع در پرتونگاری اشعه X	SFD
انرژی نقص در چیدن	SFE
عمود بر صفحه برشی	SPN
بازیابی ایستایی	SRV
تبلورمجدد ایستایی	SRX
ناحیه همزده	SZ
دما	T
جهت عرضی ورق	TD
میکروسکوپ الکترونی عبوری	TEM
زمان پرکردن حفره	$t_۱$
دمای ذوب آلیاژ	T_m
ناحیه متأثر از عملیات ترمومکانیکی	TMAZ
فرآیند ترمومکانیکی	TMP
دمای بیشینه	T_p
عدم وضوح هندسی	U_g
استحکام کششی	UTS
سرعت جوشکاری	v
حجم حفره جوش	V
کاربید تنگستن	WC
جهت جوشکاری	WD
تفرق اشعه X	XRD
استحکام تسلیم	YS
پارامتر زنر- هولمن	Z
فریت	α

آستنیت	γ
کرنش برشی ناشی از چرخش پین	$\gamma_{r\theta}$
کرنش برشی ناشی از چرخش شانه	$\gamma_{z\theta}$
میزان کرنش	ε
نرخ کرنش	$\dot{\varepsilon}$
بازده حرارتی	η
زاویه ناهمسویی	θ
زاویه ناهمسویی بحرانی	θ_c
متوسط زاویه ناهمسویی	θ_m
ضریب اصطکاک	μ
فاز ترد بین‌فلزی سیگما	σ
تنش برشی تماسی	$\tau_{contanct}$
سرعت چرخشی	ω
سرعت زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه)	ω_r (rad/s)

فصل اول

مقدمه

فرآیند جوشکاری همزن اصطکاکی[1] (FSW) در سال ۱۹۹۱ میلادی توسط مؤسسه انگلیسی TWI ابداع گردید و برای اولین بار در جوشکاری آلیاژهای آلومینیم به کار گرفته شد [۱]. این ابداع را شاید بتوان یکی از مهمترین پیشرفتهای فنی در زمینه جوشکاری در طول نیم قرن گذشته دانست که بنا بر دلایلی مانند حرارت ورودی و اعوجاج کم، استحکام بالای جوش، بازده انرژی بالا، میزان آلایندگی پایین و بسیاری از مزایای دیگر مورد توجه صنایع مرتبط با آلومینیم بوده است [۲]. به گونه‌ای که در مدت کوتاهی، FSW کاربردهایی را در صنایع هوا و فضا، خودروسازی، حمل و نقل، کشتی‌سازی، نفت و گاز و پتروشیمی یافته است. در سایه ورود FSW به صنعت اتصال آلیاژهای آلومینیم، هزینه-های تولید به طور چشمگیری کاهش یافت؛ محصولات جدید تولید شد و نیروی کار ماهر وقت و توانایی خود را آزادانه صرف سایر امور نمود. علاوه بر این، خود فرآیند نیز با گذشت زمان بهینه-سازی شد و مجموعه‌ای از فناوریهای وابسته را ایجاد کرد [۳].

نگاهی بر مقالات و مستندات چاپ شده و همایشهای بین‌المللی برگزار شده نشان می‌دهد که از نظر گسترش مرزهای دانش و پیشرفت علم نیز این فرآیند اتصال حالت جامد، نسبت به سایر روشهای جوشکاری رشد سریعی را در ۱۰ سال گذشته داشته است. طی این مدت هفت همایش بین‌المللی درباره جوشکاری همزن اصطکاکی و فناوریهای مربوطه برگزار شده است که در متون علمی به آنها بسیار ارجاع داده می‌شود و خود اهمیت موضوع را می‌رساند. این همایشها به ترتیب در ایالات متحده امریکا (کالیفرنیا – ۱۹۹۹)، سوئد (گوتنبرگ – ۲۰۰۰)، ژاپن (کوبه – ۲۰۰۱)، ایالات متحده امریکا (یوتا – ۲۰۰۳)، فرانسه (متز – ۲۰۰٤)، کانادا (مونترال – ۲۰۰٦) و ژاپن (جزیره آواجی– ۲۰۰۸) برگزار گردید.

1- Friction stir welding