



طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

نویسندگان:

مهندس حسین مهرعلی

(کارشناس ارشد مهندسی جوش، دانشگاه پلی تکنیک تهران)

دکتر کرامت ملک‌زاده

(دانشیار دانشگاه صنعتی مالک اشتر و محقق پژوهشکده سازمان صنایع هوایی)

مهندس محمد باباخان‌زاده

(مهندس جوش و محقق پژوهشکده سازمان صنایع هوایی)

سرشناسه	: مهرعلی، حسین، ۱۳۴۶ -
عنوان و نام پدیدآور	: طراحی و شبیه‌سازی و بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی / نویسندگان حسین مهرعلی، کرامت ملک‌زاده، محمد باباخان‌زاده.
مشخصات نشر	: تهران: اخوان ۱۳۹۰
مشخصات ظاهری	: ۱۹۲ ص، مصور، نمودار.
شابک	: 978-964-8586-44-2
وضعیت فهرست‌نویسی	: فیپا
یادداشت	: واژه‌نامه.
یادداشت	: کتاب‌نامه.
موضوع	: جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
شناسه افزوده	: ملک زاده، کرامت، ۱۳۴۷ -
شناسه افزوده	: بابا خان زاده، محمد، ۱۳۵۰ -
رده‌بندی کنگره	: ۱۳۹۰ ط ۴ م ۹ / م ۹ / ۲۲۸ TS
رده‌بندی دیویی	: ۶۷۱ / ۵۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۲۴۹۵۵۶۳

طراحی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
تألیف: مهندس حسین مهرعلی - دکتر کرامت ملک زاده - مهندس محمد باباخان‌زاده

انتشارات اخوان

ناظر چاپ و ویراستار: کاظم پری پیکر

تیراژ: ۱۰۰۰ نسخه

قیمت: ۵۰۰۰ تومان

چاپ اول: ۱۳۹۰

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۸۵۸۶-۴۴-۲

میدان انقلاب - خیابان ۱۲ فرودین - تقاطع وحید نظری - پلاک ۱۰۴ - طبقه اول - واحد ۱

تلفن: ۰۹۱۲۳۳۷۸۷۳۸ - ۶۶۴۸۲۲۸۳

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی،
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین
روزگاران بهترین پشتیبان است،
به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در
پناهشان به شجاعت می گراید،
و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند،
این مجموعه را به پدر و مادر عزیزمان تقدیم می کنیم.

حسین مهرعلی

کرامت ملک زاده

محمد موسی باباخان زاده

فهرست مطالب

فصل اول

معرفی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و کاربردهای آن

- ۱-۱- معرفی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی..... ۱۶
- ۲-۱- مزایا و معایب جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی..... ۲۲
- ۳-۱- کاربردهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی..... ۲۵
- ۱-۳-۱- صنایع هوافضا..... ۲۵
- ۲-۳-۱- صنایع خودروسازی..... ۲۶
- ۳-۳-۱- صنایع ریلی..... ۲۹
- ۴-۳-۱- صنایع دریایی..... ۳۰
- ۵-۳-۱- صنایع ساختمانی..... ۳۱
- ۴-۱- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در ایران..... ۳۱
- مراجع..... ۳۵

فصل دوم

پارامترهای موثر بر کیفیت جوش اصطکاکی اغتشاشی

- ۱-۲- پارامترهای موثر بر کیفیت جوش اصطکاکی اغتشاشی..... ۳۸
- ۱-۱-۲- پارامترهای جوشکاری..... ۳۸
- ۱-۱-۱-۲- سرعت چرخشی..... ۳۸
- ۲-۱-۱-۲- سرعت پیشروی..... ۴۱
- ۳-۱-۱-۲- آفت..... ۴۲

۴۴	 جهت دوران ۴-۱-۱-۲
۴۵	 زاویه ابزار ۵-۱-۱-۲
۴۶	 نیروی محوری ۶-۱-۱-۲
۴۷	 نیروی مهار قطعه‌کار ۷-۱-۱-۲
۴۸	 پارامترهای دستگاه ۲-۱-۲
۴۸	 قطر شولدر ۱-۲-۱-۲
۵۶	 هندسه شولدر ۲-۲-۱-۲
۶۱	 هندسه پین ۳-۲-۱-۲
۶۳	 عمق نفوذ پین در قطعه‌کار ۴-۲-۱-۲
۶۴	 قطر پین ۵-۲-۱-۲
۶۴	 جنس ابزار ۶-۲-۱-۲
۶۷	 مراجع

فصل سوم

مروری بر مکانیزم های اصطکاکی اغتشاشی و

خصوصیات اتصال حاصل از آن

۷۰	 ۱-۳ مکانیزم های مختلف اصطکاکی اغتشاشی
۷۰	 ۱-۱-۳ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
۷۳	 ۲-۱-۳ فرایند اصطکاکی اغتشاشی
۷۶	 ۳-۱-۳ نقطه جوش اصطکاکی اغتشاشی
۷۸	 ۲-۳ خصوصیات جوش اصطکاکی اغتشاشی
۷۸	 ۱-۲-۳ نواحی مختلف ایجاد شده در جوش اصطکاکی اغتشاشی
۷۹	 ۱-۱-۲-۳ منطقه کاملاً تغییر شکل یافته
۸۴	 ۲-۱-۲-۳ ناحیه متأثر ترمومکانیکی
۸۵	 ۳-۱-۲-۳ ناحیه متأثر حرارتی
۸۵	 ۲-۲-۳ خصوصیات مکانیکی جوش اصطکاکی اغتشاشی
۸۵	 ۱-۲-۲-۳ استحکام کششی و شکل پذیری
۸۶	 ۲-۲-۲-۳ خستگی
۸۷	 ۳-۲-۲-۳ چقرمگی شکست
۸۸	 ۳-۲-۳ نمودار سختی در جوش اصطکاکی اغتشاشی
۹۰	 ۴-۲-۳ تنش های پسماند در جوش اصطکاکی اغتشاشی
۹۲	 ۵-۲-۳ خواص خوردگی در جوش اصطکاکی اغتشاشی

- ۶-۲-۳- راندمان اتصال در جوش اصطکاکی اغتشاشی ۹۴
- مراجع ۹۵

فصل چهارم

شبیه سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

- ۱-۴- مقدمه ۹۸
- ۲-۴- تحلیل حرارتی ۹۸
- ۳-۴- تحلیل مکانیکی ۱۰۶
- ۴-۴- تحلیل سیلان ماده ۱۰۷
- ۵-۴- مدل ریاضی ۱۰۸
- ۱-۵-۴- تولید حرارت در اثر اصطکاک ۱۰۸
- ۲-۵-۴- تولید حرارت در اثر کار پلاستیک ۱۱۴
- ۶-۴- روابط حاکم ۱۱۵
- ۷-۴- شرایط مرزی ۱۱۹
- ۱-۷-۴- فصل مشترک ابزار و قطعه کار ۱۱۹
- ۲-۷-۴- اعمال حرارت تولیدی در اثر کار پلاستیک ۱۲۱
- ۳-۷-۴- همرفت در سطوح آزاد ۱۲۱
- ۴-۷-۴- انتقال حرارت در کف قطعه کار ۱۲۱
- ۸-۴- دامنه محاسباتی ۱۲۲
- مراجع ۱۲۴

فصل پنجم

بهینه سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

- ۱-۵- مقدمه ای بر شبکه های عصبی ۱۲۶
- ۱-۱-۵- ساختار شبکه های عصبی مصنوعی ۱۲۶
- ۱-۱-۱-۵- مدل ریاضی نرون ۱۲۶
- ۱-۱-۲-۵- تابع تبدیل ۱۲۷
- ۲-۱-۵- تقسیم بندی شبکه های عصبی بر اساس ساختار ۱۲۷
- ۱-۲-۱-۵- شبکه عصبی تک لایه ۱۲۷
- ۲-۲-۱-۵- شبکه عصبی چند لایه ۱۲۸

۱۲۹	۵-۱-۳- آموزش شبکه‌های عصبی
۱۲۹	۵-۱-۳-۱- آموزش با نظارت
۱۳۰	۵-۱-۳-۲- آموزش بدون نظارت
۱۳۰	۵-۱-۴- قابلیت‌های شبکه عصبی
۱۳۰	۵-۱-۴-۱- قابلیت یادگیری
۱۳۰	۵-۱-۴-۲- پراکندگی اطلاعات
۱۳۱	۵-۱-۴-۳- قابلیت تعمیم
۱۳۱	۵-۱-۴-۴- پردازش موازی
۱۳۱	۵-۱-۴-۵- مقاوم بودن
۱۳۱	۵-۲- مقدمه ای بر الگوریتم ژنتیک
۱۳۳	۵-۲-۱- تکثیر
۱۳۳	۵-۲-۲- تقویم
۱۳۳	۵-۲-۳- جهش
۱۳۴	۵-۲-۴- ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک
۱۳۵	۵-۲-۵- تابع برازندگی
۱۳۶	۵-۳- کاربرد شبکه‌های عصبی در بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
۱۳۶	۵-۳-۱- مقدمه
۱۳۶	۵-۳-۲- جمع‌آوری اطلاعات
۱۳۷	۵-۳-۳- روش‌شناسی کاربرد شبکه عصبی و مدل‌سازی اطلاعات با شبکه
۱۴۰	۵-۴- کاربرد الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
۱۴۰	۵-۴-۱- مقدمه
۱۴۱	۵-۴-۲- مدل‌سازی داده‌ها (جمعیت اولیه)
۱۴۲	۵-۴-۳- تقاطع
۱۴۳	۵-۴-۴- جهش
۱۴۳	۵-۴-۵- برازندگی
۱۴۴	مراجع

فصل ششم

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای مختلف

۱۴۶	۶-۱- مقدمه
۱۴۶	۶-۲- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای هم‌جنس

۱۴۶.....	۱-۲-۶- آلیاژهای آلومینیوم.....
۱۴۶.....	۱-۱-۲-۶- خصوصیات آلیاژهای آلومینیوم.....
۱۴۷.....	۲-۱-۲-۶- روش های سنتی جوشکاری آلومینیوم.....
۱۴۷.....	۳-۱-۲-۶- مشکلات جوشکاری آلومینیوم.....
۱۴۹.....	۴-۱-۲-۶- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم.....
۱۵۳.....	۲-۲-۶- آلیاژهای مس.....
۱۵۵.....	۳-۲-۶- آلیاژ های تیتانیوم.....
۱۵۶.....	۴-۲-۶- فولادها.....
۱۵۷.....	۵-۲-۶- آلیاژهای منیزیم.....
۱۵۸.....	۶-۲-۶- کامپوزیت های فلزی.....
۱۵۹.....	۳-۶- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای غیر همجنس.....
۱۵۹.....	۱-۳-۶- اتصال آلومینیوم به فولاد.....
۱۵۹.....	۱-۱-۳-۶- کاربرد جوشکاری آلومینیوم به فولاد.....
۱۵۹.....	۲-۱-۳-۶- مشکلات جوشکاری آلومینیوم به فولاد.....
۱۶۰.....	۳-۱-۳-۶- روشهای مختلف اتصال آلومینیوم به فولاد.....
۱۶۳.....	۴-۱-۳-۶- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم به فولاد.....
۱۷۱.....	۲-۳-۶- اتصال آلومینیوم به مس.....
۱۷۳.....	۳-۳-۶- اتصال آلومینیوم به منیزیم.....
۱۷۳.....	۴-۳-۶- اتصال آلومینیوم به تیتانیوم.....
۱۷۴.....	مراجع.....

فصل هفتم

مقایسه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با روش های جوشکاری ذوبی

۱۷۸.....	۱-۷- مقدمه.....
۱۷۸.....	۲-۷- مقایسه خواص جوش حاصل از FSW و GMAW.....
۱۷۸.....	۱-۲-۷- خواص کششی.....
۱۷۹.....	۲-۲-۷- نمودار سختی.....
۱۸۱.....	۳-۲-۷- خواص خستگی.....
۱۸۲.....	۴-۲-۷- ریزساختار ایجاد شده.....
۱۸۴.....	۵-۲-۷- خواص خوردگی.....
۱۸۷.....	۳-۷- مقایسه خواص جوش حاصل از FSW و GTAW.....
۱۸۷.....	۱-۳-۷- خواص کششی.....

- ۱۸۸ ۲-۳-۷- نمودار سختی
- ۱۸۸ ۳-۳-۷- خواص خستگی
- ۱۹۰ ۴-۳-۷- خواص خوردگی
- ۱۹۳ مراجع

www.ketab.ir

مقدمه

دشواری‌هایی که برای ایجاد جوش‌های استحکام بالا، مقاوم در مقابل خستگی و شکست در آلیاژهای مورد استفاده در صنایع هوافضا مانند آلیاژهای سری ۲۰۰۰ و ۷۰۰۰ وجود دارد، تا کنون موجب شده است که نتوان در سطح گسترده از جوشکاری برای اتصال سازه‌های فضایی استفاده کرد. این آلیاژهای آلومینیوم به علت ساختار ضعیف پس از انجماد و تخلخل در حوضچه جوش اصولاً به عنوان آلیاژهای غیرقابل جوشکاری شناخته می‌شوند. علاوه بر این کاهش خواص مکانیکی در این اتصالات نسبت به فلز پایه بسیار چشمگیر است. این پارامترها موجب می‌شود که جوشکاری این آلیاژها بوسیله روش‌های ذوبی کمتر صورت گیرد. جوشکاری مقاومتی برای برخی از آلیاژهای آلومینیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد که در این موارد نیز آماده‌سازی سطوح جوشکاری بسیار پر هزینه و وقت گیر می‌باشد و اکسید سطحی آلومینیوم یک مشکل اصلی به حساب می‌آید.

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) در سال ۱۹۹۱ توسط TWI انگلستان و با همکاری دانشگاه کمبریج، به عنوان یک روش اتصال حالت جامد اختراع شد و برای اولین بار برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم به کار برده شد. با ابداع این روش تحول بزرگی در اتصالات آلومینیوم‌های استحکام بالا بوجود آمد و بسیاری از محدودیت‌های جوشکاری این آلیاژها برطرف شد.

ایده‌ی اصلی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بسیار ساده می‌باشد. یک وسیله‌ی دوار مصرف نشدنی به همراه یک پین مخصوص به داخل قطعه کار فرو می‌رود و در راستای خط اتصال حرکت می‌کند. در این فرایند پین دو عمل اصلی گرم کردن قطعه توسط اصطکاک و حرکت دادن مواد به منظور اتصال را انجام می‌دهد. در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مواد در گرمای بالا تغییر شکل زیادی می‌دهند که موجب ایجاد ساختار ریز و دانه‌های هم محور می‌شود. این ریزساختار مناسب موجب خواص مکانیکی مطلوبی در اتصالات ایجاد شده توسط فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیز می‌شود.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان مهم‌ترین پیشرفت در اتصال فلزات در دهه آخر قرن بیستم به حساب می‌آید و با توجه به انرژی مصرفی کم و عدم ایجاد آلودگی به

عنوان یک فن آوری سبز محسوب می‌شود. در این فرایند از گاز یا پوشش محافظ برای حفاظت از حوضچه مذاب استفاده نمی‌شود و همین مساله موجب می‌شود این فرایند در دسته فرایندهای دوستدار محیط زیست قرار گیرد. در این روش برای اتصال نیازی به استفاده از مواد پرکننده (فیلر) نمی‌باشد، بنابراین در آلیاژهای آلومینیوم بدون توجه به پیچیدگی ترکیب فلز جوش که موضوع مهمی در جوشکاری‌های ذوبی نیز می‌باشد، می‌توان اتصال مناسبی ایجاد کرد. در صورت نیاز از این فرایند می‌توان برای اتصالات غیر همجنس آلومینیوم نیز استفاده کرد.

پس از گذشت کمتر از ده سال از ابداع جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، این فرایند به صورت آکادمیک وارد ایران شد. هم اکنون علاوه بر دانشگاه‌های مطرح کشور، در برخی از صنایع‌های زیر مجموعه صنایع دفاع این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه کشور در حال توسعه ایران، در حال پیشرفت در صنایع مختلف می‌باشد، لزوم دستیابی به روش‌های نوین مونتاژ روز به روز در حال افزایش است. با توجه به این مساله، مولفان این کتاب تصمیم گرفتند تا ابعاد مختلف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را در این کتاب به گونه‌ای تشریح کنند که مورد استفاده صنایع مختلف در ایران قرار گیرد. لازم به ذکر است که در تالیف این کتاب از مراجع متعددی استفاده شده است و مراجع هر فصل در انتهای آن فصل آورده شده است تا خواننده بتواند در صورت نیاز به اطلاعات بیشتر به مراجع مربوطه رجوع کند.

خلاصه فصل‌های کتاب به صورت زیر می‌باشد:

فصل اول تحت عنوان "معرفی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و کاربردهای آن" نامگذاری شده است. در این فصل ابتدا معرفی مختصری از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آورده شده است و مزایا و محدودیت‌های این روش بررسی شده‌اند. در بخش بعدی کاربردهای این روش اتصال در صنایع مختلف با مثال‌های متنوعی تشریح شده است و در قسمت پایانی فصل نیز خلاصه‌ای از کارهای صورت گرفته در این زمینه در ایران آورده شده است.

فصل دوم تحت عنوان "پارامترهای موثر بر کیفیت جوش اصطکاکی اغتشاشی" نامگذاری شده است. پارامترهای موثر بر کیفیت جوش در این روش بسیار متنوع می‌باشند

که در این فصل در دودسته پارامترهای جوشکاری و پارامترهای دستگاه قرار داده شده‌اند و به صورت کاملاً مبسوط توضیح داده شده‌اند.

فصل سوم تحت عنوان "مروری بر مکانیزم‌های اصطکاکی اغتشاشی و خصوصیات اتصال" آورده شده است. در بخش اول این فصل فرایندهای مختلفی که از مکانیزم اصطکاکی اغتشاشی استفاده می‌کند تشریح شده‌اند. قابل ذکر است که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از زیر مجموعه‌های این فرایندها می‌باشد. در بخش دوم این فصل نیز ابتدا نواحی مختلف ایجاد شده در جوش اصطکاکی اغتشاشی توضیح داده شده است و سپس خصوصیات اتصال ایجاد شده بررسی شده است.

فصل چهارم تحت عنوان "شبیه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی" نامگذاری شده است. با توجه به اینکه شبیه‌سازی المان محدود فرایندهای جوشکاری، یکی از مباحث جدید و بسیار پر اهمیت در حوزه جوشکاری می‌باشد، در این فصل سعی شده است که چهارچوب کلی شبیه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای خواننده تشریح شود.

فصل پنجم تحت عنوان "بهینه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی" نامگذاری شده است. در این فصل مبانی دو روش بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آورده شده است. در بخش اول بهینه‌سازی فرایند با استفاده از شبکه‌های عصبی و در بخش دوم با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل ششم تحت عنوان "جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای مختلف" نامگذاری شده است. این فصل دارای دو بخش کلی می‌باشد. در بخش اول جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در آلیاژهای همجنس و در بخش دوم این روش برای آلیاژهای غیر همجنس مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل هفتم تحت عنوان "مقایسه خواص جوش اصطکاکی اغتشاشی با روش‌های ذوبی" نامگذاری شده است. با توجه به اینکه در جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم به طور سنتی از روش‌های GTAW و GMAW استفاده می‌شود، در این فصل سعی شده است تا خواص اتصال ایجاد شده در این دو روش ذوبی با روش حالت جامد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مقایسه شوند.

امیدواریم که این کتاب خدمت کوچکی به جامعه علمی و صنعتی کشور عزیزمان ایران و به خصوص خانواده بزرگ صنایع هوایی باشد.

با توجه به اینکه مطالب این کتاب خالی از اشکال نیست، از شما خوانندگان محترم خواهشمندیم که با نظرات و پیشنهادات گرانقدر خود، ما را در تکمیل و اصلاح مطالب این کتاب یاری نمایند. خوانندگان محترم می‌توانند هر پیشنهاد و انتقاد خود را از طریق پست الکترونیکی به آدرس‌های k.malekzadeh@gmail.com، h.mehrali@aut.com، m_m_babakhanzadeh@yahoo.com ارسال نمایند.

در پایان لازم می‌دانیم از زحمات جناب آقای دکتر ایرج ستاری فر، مهندس محمد کاظمی، مهندس امیر راستی و دانشجویان کارشناسی ارشد مهندسی جوش (دانشکده مکانیک، دانشگاه پلی‌تکنیک تهران) که ما را در تهیه این کتاب یاری دادند، تشکر و قدردانی نماییم.

حسین مهرعلی - کرامت ملک زاده فرد - محمد موسی باباخان زاده
(تابستان ۱۳۹۰)