نام خانوادگی دانشجو: دهقانی هزارخانی **نام:** شهریار

عنوان پایان‌نامه: اثرات تنش‌های پسماند روی عمر خستگی اتصالات جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶

استاد راهنما: دکتر سوران حسنی‌فرد

استاد مشاور: دکتر محمد زهساز

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** طراحی کاربردی **دانشگاه:** تبریز **دانشکده:** فنی‌مهندسی مکانیک **تاریخ فارغ‌التحصیلی**: **تعداد صفحه:**

کلید واژه‌ها: جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای، تنش پسماند، عمرخستگی، آزمون تجربی، تحلیل اجزای محدود

چکیده: جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای یک فرایند جدید است که اخیراً توجه صنعت‌های خودروسازی، هوافضا، کشتی‌سازی و غیره را به خود جلب کرده است. این روش جوشکاری یک روش جوشکاری حالت جامد می‌باشد که در آن یک ابزار دوار مصرف نشدنی شامل یک پین متصل به یک شولدر درون دو صفحه‌ای که قرار است به یکدیگر جوش داده شوند فرو می‌رود. حرکت دورانی ابزار و اصطکاک ایجاد شده بین ابزار و صفحات باعث گرم شدن و شارش پلاستیکی فلز شده و نقطه جوش اصطکاکی شکل می‌گیرد. این روش جوشکاری برای آلیاژهای آلومینیم، منیزیم و اخیراً فولاد توسعه یافته است. ویژگی‌هایی هم‌چون جوشکاری صفحات با ضخامت و جنس‌های متفاوت، استحکام و کیفیت بالای جوش از مزایای این روش جوشکاری می‌باشد.

در این تحقیق با شبیه‌سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای در نرم افزار ABAQUS برای آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ -T۶ توزیع درجه حرارت و تنش پسماند به دست می‌آید. برای اطمینان از نتایج حاصل از شبیه‌سازی، تنش پسماند برای یک نمونه با روش آلتراسونیک و هم‌چنین دما نیز برای یک نمونه توسط یک ترموکوپل اندازه‌گیری شده و با نتایج عددی مقایسه شد.

برای تخمین عمر خستگی، لازم است مقادیر بیشینه و کمینه، تنش و کرنش تعیین شوند. برای این منظور از تحلیل اجزای محدود استفاده شده است. مدل اجزای محدود برای تخمین عمر خستگی شامل یک مدل سه بعدی از نمونه آزمون تجربی است که برای جلوگیری از افزایش حجم و زمان محاسبات، با

استفاده از مزیت تقارن طولی نمونه، تنها یک نیمه متقارن از نمونه آزمون مدل‌سازی شده **ادامه چکیده:**

است. نتایج عددی به دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای عمر خستگی به همراه رهیافت کرنش-عمر اسمیت، واتسون و تاپر (SWT) یک‌بار با احتساب اثرات تنش پسماند و یک‌بار بدون در نظر گرفتن این اثرات، با هم مقایسه شد و تطابق خوبی با نتایج تجربی را نشان می‌دهند.

مشاهده شد که با افزایش سرعت دورانی و عمق نفوذ عمر خستگی افزایش پیدا می‌کند زیرا با افزایش سرعت دورانی و عمق نفوذ دما بالا رفته و ناحیه خمیری شکل بیشتر شده و در نتیجه ناحیه اتصال بیشتر می‌شود. با افزایش سرعت پیشروی چون زمان کم می‌شود، زمان کمتری برای افزایش دما و ناحیه خمیری وجود دارد در نتیجه ناحیه اتصال کمتر شده و عمر خستگی کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به این‌که مقدار تنش پسماند در اطرف نقطه جوش به صورت کششی می‌باشد، مشاهده شد که عمر خستگی با تاثیر تنش پسماند کاهش می‌یابد.

۱ مقدمه و پیشینه پژوهش ۱
۱.۱ مقدمه ۱
۲.۱ جوشکاری ۳
۳.۱ تاریخچه جوشکاری ۴
۴.۱ فرایندهای جوشکاری ۴
۱.۴.۱ فرایندهای جوشکاری قوس الکتریکی با محافظت سرباره ۴
۲.۴.۱ فرایندهای جوشکاری مقاومتی ۶
۳.۴.۱ فرایندهای جوشکاری حرارتی-شیمیایی ۷
۴.۴.۱ فرایندهای جوشکاری حالت جامد ۸
۵.۱ جوشکاری اصطکاکی تلاطمی ۹
۱.۵.۱ ریزساختار جوش اصطکاکی تلاطمی ۱۰
۶.۱ جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ۱۱
۱.۶.۱ ریزساختار جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ۱۲
۲.۶.۱ عناصر جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ۱۳
۳.۶.۱ قابلیت‌های جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ۱۴
۴.۶.۱ کاربردهای جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ۱۵
۵.۶.۱ مزایا و معایب جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ۱۷
۷.۱ مروری بر کارهای گذشته ۱۹
۸.۱ اهداف تحقیق ۲۵
۹.۱ ساختار تحقیق ۲۶
۲ مواد و روش‌ها ۲۷
۱.۲ روش‌های طراحی خستگی ۲۷
۱.۱.۲ تعریف خستگی ۲۷
۲.۱.۲ تاریخچه خستگی ۲۷
۳.۱.۲ روش‌های طراحی خستگی ۳۰
۴.۱.۲ روش تنش-عمر ۳۱
۵.۱.۲ رفتار منحنی S-N ۳۲
۶.۱.۲ روش کرنش- عمر ۳۵
۷.۱.۲ مکانیک شکست ۴۴
۸.۱.۲ تنش پسماند ۴۴
۲.۲ آزمون‌های تجربی ۴۵
۲.۲.۱ مواد و خصوصیات آن ۴۵

۲.۳ آماده‌سازی نمونه‌ها ۴۹
۲.۴ آزمون‌های تجربی ۵۰
۱.۴.۲ آزمون تنش پسماند ۵۱
۲.۴.۲ آزمون اندازه گیری دما ۵۲
۵.۲ تحلیل‌های المان‌محدود ۵۳
۶.۲ تحلیل المان‌محدود برای شبیه‌سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ۵۵
۱.۶.۲ هندسه ۵۵
۲.۶.۲ شبکه بندی ۵۶
۲.۶.۳ خواص ماده ۵۶
۴.۶.۲ شرایط مرزی ۵۷
۵.۶.۲ حل ۵۷
۷.۲ تحلیل المان‌محدود برای تخمین عمر خستگی ۵۸
۱.۷.۲ هندسه ۵۸
۲.۷.۲ شبکه بندی ۵۹
۲.۷.۳ خواص ماده ۵۹
۴.۷.۲ شرایط مرزی ۶۰
۵.۷.۲ حل ۶۰
۳ نتایج ۶۲
۳.۱ نتایج تجربی ۶۲
۳.۱.۱ نتایج آزمون کشش خستگی ۶۲
۲.۳ اندازه گیری دما ۶۳
۳.۳ اندازه گیری تنش پسماند ۶۴
۴.۳ نتایج عددی ۶۷
۱.۴.۳ شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ۶۷
۲.۴.۳ تاثیر تنش پسماند روی عمر خستگی ۷۶
۵.۳ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۸۲
۶.۳ پیشنهاد برای کارهای آینده ۸۳
منابع و مراجع ۸۵

شکل ۱-۱: قطعه جوشکاری‌شده به روش جوشکاری اصطکاکی دورانی ۹
شکل ۱-۲: قطعه جوشکاری شده به روش جوشکاری اصطکاکی خطی ۹
شکل ۱-۳:فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی ۱۰
شکل ۱-۴:ریز ساختار جوش اصطکاکی تلاطمی ۱۱
شکل ۱-۵:فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ۱۲
شکل ۱-۶: ریز ساختار جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ۱۳
شکل ۱-۷: پارامترهای فرایند(سرعت دورانی، نیروی محوری، جابجایی ابزار) به عنوان تابعی از زمان برای فرایندهای نیرو-کنترل شده و جابجایی-کنترل شده ۱۴
شکل ۱-۸: نتایج تجربی و المان محدود برای مقایسه بین حالت خواص ماده یکنواخت وغیر یکنواخت ۲۱
شکل ۲-۱: علایم مربوط به بارگذاری چرخ‌های با دامنه ثابت ۳۱
شکل ۲-۲: نمونه‌ای از نمودارهای S-N ۳۳
شکل ۲-۳: اثر تنش میانگین بر روی عمر خستگی ۳۳
شکل ۲-۴: یک منحنی رایج S-N (باسکوئین) ۳۵
شکل ۲-۵: اثر بوشینگر (a) بارگذاری کششی (b) بارگذاری فشاری (c) بارگذاری فشاری بعد از بازگذاری کششی ۳۷
شکل ۲-۶: رفتار تنش-کرنش مس، تحت بار محوری با کرنش کنترل شده. (a)کاملاً تاب‌کاری شده نشان‌دهنده سخت شوندگی تناوبی. (b) سردکاری شده، نشان‌دهنده نرم‌شوندگی تناوبی ۳۷
شکل ۲-۷: پاسخ تنش به کرنش چرخه ای با دامنه ثابت. (a)دامنه کرنش ثابت. (b)سخت شوندگی تناوبی. (c)نرم‌شوندگی تناوبی ۳۸
شکل ۲-۸: حلقه هیسترزیس پایدار تنش-کرنش چرخه‌ای ۳۹
شکل ۲-۹: منحنی تنش-کرنش چرخه‌ای و یکنواخت برای چند ماده ۴۱
شکل ۲-۱۰: منحنی کرنش- عمر و قسمت‌های کرنش کلی، الاستیک و پلاستیک ۴۲
شکل ۲-۱۱: نمودار تنش-کرنش آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T6 ۴۶
شکل ۲-۱۲: نمودار تغییرات ضریب اصطکاک با دمای سطح ۴۷
شکل ۲-۱۳: نمونه آزمون تجربی ۵۰
شکل ۲-۱۴: پیکربندی آزمایش تنش پسماند به روش آلتراسونیک ۵۲
شکل ۲-۱۵: اندازه گیری دما ۵۳
شکل ۲-۱۶:شبیه‌سازی سه بعدی فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای ۵۵
شکل ۲-۱۷:پارتیشن بندی قطعه کار برای گره‌بندی دستی ۵۶
شکل ۲-۱۸:شرایط مرزی اعمال شده روی مدل اجزای محدود ۵۷
شکل ۲-۱۹:شبیه‌سازی فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای(کانتور دما) ۵۸
شکل ۲-۲۰:مدل سه بعدی المان محدود برای تخمین عمر خستگی ۵۹
شکل ۲-۲۱:شرایط مرزی اعمال شده روی مدل المان محدود برای تخمین عمر خستگی ۶۰

شکل ۲-۲۲: کانتور تنش طولی مدل سه بعدی نمونه کشش-برش جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای برای تخمین عمر خستگی..... ۶۱
شکل ۳-۱: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی نتایج تجربی آزمون‌های کشش خستگی نمونه کشش-برش جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶..... ۶۳
شکل ۳-۲:نمودار دما اندازه گیری شده توسط ترموکوپل..... ۶۴
شکل ۳-۳: نمودار $\frac{t_0 - t}{t}$ و تنش..... ۶۵
شکل ۳-۴: مکان‌های اندازه گیری تنش پسماند..... ۶۶
شکل ۳-۵: مقایسه نتایج عددی و تجربی دما..... ۶۸
شکل ۳-۶: نمودار دما در یک مسیر در در صفحه اتصال (الف) سرعت پیشروی ۴/. میلی‌متر در ثانیه (ب) سرعت پیشروی ۰/۸ میلی‌متر در ثانیه (ج) مقایسه بین ماکزیمم حالت (الف) و (ب)..... ۷۰
شکل ۳-۷:توزیع دمای گذرا برای سرعت پیشروی ۰/۴ میلی‌متر در ثانیه..... ۷۱
شکل ۳-۸:توزیع دمای گذرا برای سرعت پیشروی ۰/۸ میلی‌متر در ثانیه..... ۷۱
شکل ۳-۹: توزیع تنش پسماند در اطراف محل جوش..... ۷۳
شکل ۳-۱۰: مقایسه بین سرعت‌های پیشروی ۰/۴و ۰/۸ میلی‌متر در ثانیه در مقدار تنش پسماند..... ۷۳
شکل ۳-۱۱:ناحیه اتصال برای سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور در دقیقه، عمق نفوذ ۳/۴میلی‌متر و سرعت پیشروی ۰/۴میلی‌متر در ثانیه..... ۷۴
شکل ۳-۱۲: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی نیرو-عمر برای حالت سرعت دورانی۲۰۰۰دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۴ میلی‌متر در ثانیه عمق نفوذ ۳/۴ میلی‌متر از نمونه‌های کشش-برش جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶..... ۷۵
شکل ۳-۱۳: مقایسه نمودارهای نیرو-عمر عددی با تاثیر تنش پسماند و بدون تاثیر تنش پسماند با نتایج تجربی..... ۷۸
شکل ۳-۱۴: مقایسه نمودار نیرو-عمر با تاثیر تنش پسماند و بدون تاثیر تنش پسماند(الف) سرعت دورانی ۲۵۰۰دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۴عمق نفوذ ۳میلی‌متر (ب) سرعت دورانی ۲۰۰۰دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۴ میلی‌متر در ثانیه عمق نفوذ ۳میلی‌متر(ج) سرعت دورانی ۱۶۰۰دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۴ میلی‌متر در ثانیه عمق نفوذ ۳/۴ میلی‌متر(د) سرعت دورانی ۱۶۰۰دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۸ میلی‌متر در ثانیه عمق نفوذ ۳/۴ میلی‌متر(ه) سرعت دورانی ۲۰۰۰دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۸ میلی‌متر در ثانیه عمق نفوذ ۳/۴ میلی‌متر..... ۸۰
شکل ۳-۱۵: تاثیر سرعت دورانی روی عمر خستگی..... ۸۱
شکل ۳-۱۶: تاثیر عمق نفوذ روی عمر خستگی..... ۸۱
شکل ۳-۱۷: تاثیر سرعت پیشروی روی عمر خستگی..... ۸۲

جدول ۲-۱:ثوابت تنش-کرنش برلی چندین فلز مهندسی ۴۰
جدول ۲-۲:ثوابت کرنش-عمر برای چندین فلز مهندسی ۴۳
جدول ۲-۳: ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶ ..... ۴۵
جدول ۲-۴: خواص فیزیکی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶ ..... ۴۶
جدول ۲-۵: خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶ ..... ۴۶
جدول ۲-۶: تغییرات خواص آلومینیم ۷۰۷۵-T۶ با دما ۴۸
جدول ۲-۷: ضرایب جانسون –کوک ۴۹
جدول ۲-۸: مشخصات فنی دستگاه فرز FP4M ۴۹
جدول ۳-۱: نتایج تجربی آزمون‌های کشش خستگی نمونه کشش-برش جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶ ..... ۶۲
جدول ۳-۲: مقادیر زمان و تنش ۶۵
جدول ۳-۳: مقادیرتنش برای برای دو نقطه P_1 و P_2 ..... ۶۷
جدول ۳-۴: مقایسه نتایج عددی و تجربی تنش پسماند ۷۲
جدول ۳-۵: نتایج عددی مربوط به تنش بیشینه و کرنش‌های کمینه و بیشینه برای حالت سرعت دورانی ۲۰۰۰دور در دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۴ میلی‌متر در ثانیه و عمق نفوذ ۳/۴ میلی‌متر ۷۵

فهرست علائم

لاتین

A	نسبت تنش بارگذاری متناوب
B	توان تنش-عمر
C	ضریب رشد ترک خستگی
E	مدول الاستیک
H	ضریب استحکام منحنی‌های تنش-کرنش
K	ضریب شدت تنش
P	نیرو
R	نسبت تنش بارگذاری متناوب
S	تنش میانگین
r	شعاع
t	زمان
x,y,z	مختصات فضایی

یونانی

θ	زاویه
ε	کرنش عمودی
σ	تنش عمودی
τ	تنش برشی

زیرنویس

a	دامنه
c	بحرانی
e	الاستیک
f	نهایی
i	آغاز
m	میانگین
max	بیشینه
min	کمینه
p	پلاستیک، انتشار

۱ مقدمه و پیشینه پژوهش

۱.۱ مقدمه

امروزه کاهش وزن وسایل نقلیه یکی از چالش‌های اساسی صنعت حمل‌ونقل برای بهره‌وری در مصرف سوخت و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌رود. براساس گزارش موسسه جهانی انرژی[1] حدود ۱۹٪ از گازهای گلخانه‌ای در بخش حمل‌ونقل تولید می‌شود. در این راستا طراحی سبک وزن وسایل نقلیه با استفاده از آلیاژهای سبک وزن (مانند آلومینیم و منیزیم) مورد توجه صنایع حمل‌ونقل قرار گرفته است. بر اساس تحقیقات موسسه انجمن آلومینیم[2]، ۱۰٪ کاهش وزن وسایل نقلیه منجر به صرفه‌جویی ۶٪ تا ۸٪ در مصرف سوخت می‌شود [۱] . این در حالی است که در صورت طراحی مناسب سازه، آلیاژهای سبک وزن مانند آلومینیم و منیزیم بدون کاهش استحکام، می‌توانند وزن سازه را تا ۵۰٪ نسبت به فولاد کاهش دهند. لزوم اتصال مناسب این آلیاژها، یک روش جوشکاری کارآمد و مقرون‌به‌صرفه را به یکی از راه‌کارهای کلیدی برای کاهش وزن وسایل نقلیه تبدیل می‌کند.

چندین روش جوشکاری وجود دارد که مدت‌ها است در صنایع حمل‌ونقل مانند صنایع خودروسازی، صنایع ترن‌سازی، صنایع کشتی‌سازی و غیره رایج است. جوشکاری قوسی[3] یکی از این روش‌ها است که برپایه ذوب فلز پایه استوار است. با توجه به این که هدایت حرارتی آلومینیم ۳ تا ۵ برابر فولاد است، بنابراین فرایند جوشکاری قوسی برای آلیاژ آلومینیم از مصرف انرژی بالایی برخوردار است. انبساط و انقباض آلومینیم تقریباً دو برابر فولاد است. این عامل در جوشکاری قوسی می‌تواند موجب ایجاد تمرکز تنش شود که منجر به اعوجاج و تاب برداشتن می‌شود [۲]. در جوشکاری قوسی آلیاژهای آلومینیم ترک‌هایی در جوش یا منطقه مجاور آن روی می‌دهد، که یکی از مهم‌ترین مشکلات جوشکاری آلومینیم به شمار می‌رود. لایه نازک اکسید آلومینیم همواره بر روی سطح آن وجود دارد که در حین فرایند جوشکاری با بالا رفتن دما ضخیم‌تر هم می‌شود. این اکسید در آلومینیم جامد یا مایع حل نمی‌شود و

[1] International Energy Agency
[2] The Aluminum Assocation Inc.
[3] Arc Welding

مانع آمیخته شدن لبه جوش و فلز مذاب می‌شود. آلومینیم مذاب قابلیت جذب هیدروژن بالایی دارند که باعث ایجاد خلل‌وفرج یا تخلخل در جوش می‌شود [۳]. یکی دیگر از روش‌ها، جوشکاری لیزر[1] است که با وجود مزایایی چون سرعت و دقت جوشکاری بالا، دارای معایبی برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیم است. مشکلات مربوط به ایجاد ترک در جوش، لایه اکسیدی و جذب گازها، به دلیل ایجاد فلز مذاب در این روش نیز (مشابه روش جوشکاری قوسی) وجود دارد. به علت باریک بودن اشعه لیزر لبه صفحات باید با تلرانس‌های دقیق برش داده شوند. به علاوه در جوشکاری لیزر سختی منطقه جوشکاری بیشتر شده و در زمان فرم‌دهی امکان شکست ترد وجود دارد. گذشته از موارد فوق، دستگاه‌ها و تجهیزات این روش نیز بسیار گران‌قیمت هستند. جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی[2] از دیگر روش‌ها است که با وجود کاربرد فراوان در صنایع حمل‌ونقل با محدودیت‌هایی در اتصال آلیاژهای آلومینیم و منیزیم مواجه است. جوش نقطه‌ای مقاومتی آلیاژهای آلومینیم به دلیل داشتن مقاومت الکتریکی پایین و هدایت حرارتی بالا مشکل‌تر از آلیاژهای آهن است و به جریان الکتریکی بیشتری نیاز دارد. این مسئله باعث انبساط و انقباض سریع فلز بین الکترود شده و لذا نیروی الکترود بیشتری نیز برای جوش مورد نیاز است [۴]. لایه اکسید آلومینیم و دمای ذوب بالای آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای گرمای مقاومتی مورد نیاز در این روش را افزایش می‌دهد [۵]. هم‌چنین الکترود در اثر گرمای زیاد عمر کمتری خواهد داشت [۶].

جوشکاری اصطکاکی تلاطمی(FSW) شیوه نوینی از روش جوشکاری اصطکاکی است که علاوه بر مزیت‌های بسیار در زمینه متالوژی، انرژی، محیط‌زیست و غیره محدودیت‌های دیگر روش‌های جوشکاری برای آلیاژهای آلومینیم و منیزیم را ندارد. جوشکاری اصطکاکی تلاطمی یک فرایند جوشکاری حالت جامد می‌باشد که در آن گرمای اصطکاکی تولید شده توسط یک ابزار دوار مصرف‌نشدنی، موجب شارش پلاستیک در محل جوشکاری می‌شود. بدین ترتیب عدم ایجاد فلز مذاب در ناحیه جوشکاری یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این روش برای جوشکاری آلومینیم و منیزیم به‌شمار می‌رود.

پدیده‌ی خستگی یکی از مهم‌ترین حالت‌های شکست است، به‌طوری که حداقل نیمی از شکست‌های مکانیکی در اثر خستگی است. آمار دقیقی از این نوع شکست در دست نیست، اما بسیاری از کتب و مقالات ۵۰ تا ۹۰ درصد را برای میزان شکست‌های خستگی پیشنهاد نموده‌اند، که بسیاری از این

[1] Laser Welding
[2] Resistance Welding

شکست‌ها ناگهانی هستند. هزینه‌های ناشی از این واماندگی‌ها نیز بسیار زیاد است. یک مطالعه جامع درباره هزینه این شکست‌ها در ایالات متحده نشان داد که این هزینه برابر ۱۱۹ میلیارد دلار در سال ۱۹۷۸ یا در حدود چهار درصد تولید ناخالص ملّی است [۷]. بر این اساس توسعه مدل‌های مناسب برای استحکام خستگی جوش‌های اصطکاکی تحت شرایط بارگذاری پیچیده، به منظور افزایش کارایی و دوام قطعات در صنایع حمل‌ونقل ضروری است.

بسیاری از مطالعاتی که در زمینه جوش‌های اصطکاکی تلاطمی انجام شده است، بر اساس مشاهدات تجربی و نتایج آزمون های تجربی بوده است. با این حال تحقیقات محدودی در زمینه تخمین عمر خستگی اتصالات جوش اصطکاکی تلاطمی انجام شده‌است. در این تحقیق تاثیر تنش‌های پسماند روی عمر خستگی اتصالات جوش اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای(FSSW)، تحت شرایط بارگذاری متناوب، برای آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶ بررسی خواهد شد. تنش‌های پسماند به‌وسیله شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری در نرم افزار ABAQUS به دست می‌آید. تخمین عمر خستگی با بهره‌گیری از تحلیل سه‌بعدی المان‌محدود و مدل‌های تخمین عمر خستگی انجام خواهد شد. برای اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده، از آزمون‌های تجربی و مقایسه نتایج دو روش عددی و روش تجربی استفاده خواهد شد. نشان داده خواهد شد که نتایج عددی سازگاری خوبی با نتایج تجربی تنش پسماند، دما و عمرخستگی دارند.

۲.۱ جوشکاری

جوشکاری به عنوان یک روش متداول اتصال‌دایم متالوژیکی شناخته شده است که می‌تواند در حالت مذاب یا جامد، با استفاده از واسطه یا بدون واسطه و با ایجاد فشار یا بدون فشار صورت گیرد. جوش ایده‌ال به محل اتصالی اطلاق نمود که نتوان آن موضع را از قسمت‌های دیگر قطعه‌های جوش داده شده تشخیص داد. با وجود دست نیافتن به چنین مشخصاتی، می‌توان خواص محل اتصال را چنان بالا برد که در عمل کاملاً رضایت‌بخش باشد. نکته حایز اهمیت در جوشکاری تشخیص و انتخاب روش جوشکاری مناسب است. نوع اتصال، کاربرد قطعه و نوع فلزی که جوشکاری بر روی آن انجام می‌گیرد، به منظور انتخاب روش جوشکاری، مواد لازم و نکات جنبی دیگر از اهمیت زیادی برخوردار است.

۳.۱ تاریخچه جوشکاری

جوشکاری از قدیمی‌ترین دانش‌های بشری است. مشاهدات نشان می‌دهند عمر جوشکاری به دوران آغازین عصر فلز می‌رسد. برای نمونه می‌توان به ظروف مسی جوشکاری شده‌ای اشاره کرد، که قدمت آن‌ها به دوران تمدن سومری‌ها (۱۴ قرن قبل از میلاد مسیح) باز می‌گردد [۸]. رشد دانش جوشکاری در طول قرن‌ها به آرامی صورت می‌گرفت. اما در سال‌های پایانی قرن نوزدهم و سال‌های آغازین قرن بیستم، هنر و دانش جوشکاری با سرعت بیشتری رشد کرده است.

۴.۱ فرایندهای جوشکاری

انرژی مهمترین عامل در روش‌های جوشکاری برای اتصال دو قطعه است که می‌تواند از منابع شعله‌ای، قوس الکتریکی، مقاومت الکتریکی، تشعشعی و یا مکانیکی تامین شده و به‌کار برده شود [۹] در نتیجه می‌توان روش‌های مختلف جوشکاری را به دسته‌های مختلفی طبقه‌بندی کرد:

۱.۴.۱ فرایندهای جوشکاری قوس الکتریکی با محافظت سرباره

قوس الکتریکی در این فرایندها تامین کننده‌ی گرمای لازم برای ذوب است و فلاکس یا سرباره وظیفه‌ی محافظت، تمیز کردن و تمیز نگه‌داشتن مذاب جوش در محل اتصال را بر عهده دارد.

- **جوشکاری قوس الکترود روپوش‌دار دستی**: در این فرایند از جریان الکتریکی مستقیم و یا متناوب برای به وجود آوردن قوس الکتریکی بین الکترود و قطعه‌ها و ایجاد اتصال استفاده می‌شود. الکترودهای مصرف‌شونده‌ی روپوش‌دار در این روش به‌کار برده می‌شود. روپوش الکترودها باعث پایداری بهتر قوس و کیفیت بالاتر جوش می‌شود. جوشکاری با الکترود دستی یکی از متداول‌ترین روش‌های جوشکاری است که می‌تواند در انواع وضعیت‌ها وحالت‌ها برروی انواع فولادها و حتی برخی دیگر از فلزات مورد استفاده قرار گیرد.

- **جوشکاری قوس الکترود روپوش‌دار پیوسته**: در این فرایند سیم الکترود به صورت متوالی از فلاکس پوشیده شده و سیم‌هایی در جهت راست و چپ سیم هسته، فنروار پیچیده شده است تا جریان الکتریکی به سیم هسته از میان پوشش عبور کند. جریان الکتریکی توسط کفشک‌ها به سیم‌پیچ منتقل

می‌شود.

- **جوشکاری قوس-زیرپودری**: در این فرایند قوس تحت پوشش سرباره یا پودر مخصوص مخفی می‌شود. جریان الکتریکی از طریق نازل هدایتی و سیم الکترود به قوس و قطعه کار هدایت می‌شود. حرارت حاصل از قوس الکترود موضع جوش و پودر جوش را ذوب کرده وحوضچه‌ی جوش به‌وجود می‌آید. پودر جوش پیشاپیش قوس ریخته شده و پس از جوشکاری و انجماد، قسمتی از آن که ذوب نشده است جمع‌آوری و بخشی از آن که ذوب شده به صورت قشر شیشه‌ای بر روی جوش باقی می‌ماند که توسط چکش به صورت لایه‌ای از روی جوش جدا می‌شود. این فرایند معمولاً به صورت خودکار و توسط ماشین انجام می‌شود. در جوشکاری قوس-زیرپودری معمولاً عملیات جوشکاری توسط دستگاه انجام می‌شود.

- **جوشکاری سرباره‌ی الکتریکی**: در این روش سرباره که ابتدا در اثر قوس الکتریکی به صورت مذاب در آمده است، نقش مقاومت الکتریکی را ایفا کرده و با عبور جریان الکتریکی از آن، حرارت مورد نیاز برای ذوب الکترود مصرفی و لبه‌های قطعه‌های مورد اتصال فراهم می‌شود. سرباره علاوه بر نقش مقاومت الکتریکی عمل محافظت منطقه‌ی مذاب حوضچه‌ی جوش را هم بر عهده دارد. جوشکاری سرباره الکتریکی یکی از متداول‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین فرایندهای جوشکاری ورق‌های بسیار ضخیم (تا ضخامت ۹۰۰ میلی‌متر) به شمار می‌رود. مسیر پیشروی عملیات جوشکاری سرباره‌ی الکتریکی در امتداد قائم بوده و توسط دستگاه خودکار انجام می‌شود.

- **جوشکاری گاز-الکتریکی**: این فرایند مشابه فرایند جوشکاری سرباه‌ی الکتریکی است با این تفاوت که در این روش فقط جریان یکنواخت مورد استفاده قرار می‌گیرد و حرارت توسط قوس الکتریکی تولید می‌شود (نه مقاومت سرباره). همان‌طور که از نام فرایند برمی‌آید، حوضچه‌ی جوش توسط گاز خنثی مانند آرگون و یا گاز بی‌اثر بر مذاب مانند دی‌اکسیدکربن محافظت می‌شود. امتداد مسیر اتصال به صورت قائم بوده و حوضچه‌ی مذاب بین سطوح اتصال و کفشک‌ها قرار می‌گیرد. عملیات جوشکاری در این روش با سرعت بیشتری نسبت به روش جوشکاری سرباره الکتریکی انجام می‌شود که نتیجه‌ی آن باریک بودن و بهتر بودن خواص ناحیه‌ی متاثر از جوش است.

- **جوشکاری قوس-الکترود تنگستن با گاز محافظ خنثی:** در این فرایند برای ایجاد قوس الکتریکی از الکترود مصرف‌نشدنی تنگستن استفاده می‌شود (می‌توان با و یا بدون مفتول فلز اضافه‌شونده

جوشکاری کرد) و الکترود و حوضچه‌ی مذاب به‌وسیله‌ی گاز خنثی محافظت می‌شود. گاز خنثی بسته به نوع فلز و کیفیت جوش آرگون، هلیوم و یا ترکیبی از این دو گاز است. کاربرد این روش جوشکاری در اتصالات دقیق و فلزات حساس نظیر آلومینیم، منیزیم و فولادهای ضدزنگ می‌باشد. جوشکاری نقطه‌ای الکترود تنگستن با گاز محافظ خنثی یکی از روش‌های منشعب از این فرایند جوشکاری است.

- **جوشکاری قوس-فلز با گاز محافظ خنثی**: این روش برای رفع برخی محدودیت‌های روش جوشکاری قوس-الکترود تنگستن با گاز محافظ خنثی توسعه یافت. در این روش به‌جای الکترود مصرف‌نشدنی تنگستن از الکترود مصرف‌شدنی فولادی یا آلومینیمی استفاده می‌شود که در حین جوشکاری متناسب با نرخ ذوب به طرف حوضچه‌ی جوش هدایت می‌شود تا علاوه بر ایجاد قوس، حوضچه‌ی جوش را پر کند. در این روش معمولاً به‌جای گاز آرگون و هلیوم از گاز دی‌اکسیدکربن که مقرون به صرفه‌تر است، استفاده می‌شود.

۲.۴.۱ فرایندهای جوشکاری مقاومتی

در فرایندهای جوشکاری مقاومتی اتصال دو سطح هم‌زمان توسط گرما و فشار انجام می‌شود. در این روش دو الکترود همانند گیره قطعه را نگه می‌دارند و جریان الکتریکی برای لحظه‌ای برقرار می‌شود. مقاومت الکتریکی فلز سبب ایجاد گرمای موضعی در سطح مشترک دو ورق، زیر دو الکترود شده و پس از قطع جریان الکتریکی و اعمال فشار اتصال صورت می‌گیرد. این فرایند برای اتصال فلزات مختلف به‌کار برده می‌شود و یکی از بهترین روش‌ها برای اتصالات سری است.

- **جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای**: در این روش جوش به صورت دکمه‌هایی بین دو ورق لب‌روی‌هم به وسیله‌ی تمرکز جریان الکتریکی بین الکترودهای استوانه‌ای و اعمال فشار ایجاد می‌شود. این فرایند برای اتصال ورق‌های روی‌هم، یا سیم به ورق و یا سیم بر روی سیم به‌کار برده می‌شود.

- **جوشکاری مقاومتی غلتکی یا نواری**: این فرایند نوع تکمیل شده فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای است. برای اتصال لبه‌های برروی‌هم، ورق‌ها را در زیر دو غلتک قرار می‌دهند. دو غلتک ورق‌ها را در میان خود فشار داده و جریان الکتریکی به طور متناوب از داخل غلتک‌ها عبور می‌کند و دکمه جوش‌ها به صورت متوالی بین سطح مشترک دو ورق ایجاد می‌شود.

- **جوشکاری جرقه‌ای:** در این فرایند دو قطعه‌ای که باید به همدیگر متصل شوند، توسط گیره‌ای

هادی در مقابل هم نگه داشته می‌شوند. ولتاژ الکتریکی لازم به دو گیره متصل می‌شود. سپس دو قطعه آنقدر به هم نزدیک می‌شوند تا قوس بین دو قطعه ایجاد شود. پس از ایجاد مذاب در نوک قطعه، گیره‌ها با فشار معینی به هم فشرده می‌شوند که حاصل این عمل به هم فرو رفتن دو سر میله است. در این لحظه جریان الکتریکی قطع و عمل اتصال انجام می‌گیرد.

- **جوشکاری مقاومتی سربه‌سر**: این فرایند مشابه فرایند جوشکاری جرقه‌ای است با این تفاوت که قوس و جرقه‌ای ایجاد نمی‌شود، بلکه دو سر قطعه‌ها به هم فشرده و در نتیجه عبور جریان الکتریکی از طریق فک‌ها، گرما در محل تماس دو قطعه به وجود آمده و پس از ایجاد مذاب نیروی فشاری اعمال شده باعث فرو رفتن دو سر قطعه‌ها در یکدیگر و انجام عمل اتصال می‌شود.

۳.۴.۱ فرایندهای جوشکاری حرارتی-شیمیایی

در این فرایندها لبه‌های مورد اتصال در نتیجه واکنش‌های شیمیایی گرمازا ذوب شده و به همدیگر متصل می‌شوند. بسته به روش تولید گرما این فرایندها را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد:

- **جوشکاری گاز:** در این فرایند لبه فلز توسط گرمای ناشی از احتراق گاز ذوب و با فلز پرکننده یا بدون آن در هم ادغام شده و پس از انجماد عمل اتصال صورت می‌گیرد. جوشکاری با گاز برای اتصال ورق‌ها و لوله‌های نازک و ظریف برای صاف یا تعمیر کردن جوش‌های خشن مناسب است. وسایل و تجهیزات این فرایند جوشکاری نسبتاً ارزان و اغلب قابل حمل است و علاوه بر جوشکاری می‌توان آن را برای برشکاری نیز به کار برد. این روش برای جوشکاری قطعات و ورق‌های سنگین مقرون به صرفه نیست.

- **جوشکاری ترمیت:** در فرایند ترمیت گرمای حاصل از واکنش‌هایی گرما زا نظیر احیای اکسید آهن به وسیله پودر آلومینیم مستقیماً در موضع موجب ذوب و اتصال می‌گردد. برای آغاز واکنش باید مواد ترمیت توسط پیش گرمایش یا مخلوط‌های محترقه روشن شوند. تکنیک این فرایند تقریباً شبیه ریخته‌گری است. این روش بیش‌تر برای اتصال قطعات سنگین و ثابت مانند ریل‌های قطار و بازوها و کابل‌های پل‌ها کاربرد دارد.

۴.۴.۱ فرایندهای جوشکاری حالت جامد

فرایندهای جوشکاری که در بالا شرح داده شدند، فرایندهای ذوبی هستند که عمل اتصال در نتیجه ذوب موضعی دو قطعه، تداخل آنها و بالاخره انجماد حاصل می‌شود. اما همانطور که از نام این نوع فرایند برمی‌آید عمل اتصال در حالت جامد انجام می‌شود (چنان‌چه ذوبی هم به وجود آید نقش اساسی ندارد). فرایندهای جوشکاری حالت جامد که بیشتر متداول هستند، عبارت هستند از:

- **جوشکاری آهنگری یا پتکه‌ای**: یکی از قدیمی‌ترین روش‌های اتصال دو قطعه گداختن آنها در کوره تا درجه حرارت معین و سپس بر روی هم سوار کردن و کوبیدن یا پتک زدن موضع اتصال می‌باشد. در گذشته عمل کوبیدن با چکش‌ها و پتک‌های دستی و امروزه با انواع چکش‌های بادی و هیدرولیکی انجام می‌شود.

- **جوشکاری فشاری:** عامل اصلی که این فرایند را از فرایندهای دیگر مجزا کرده است، عدم حضور حرارت در حین جوشکاری است. در نتیجه نیازی به هیچ نوع منبع الکتریکی، گاز یا واکنش شیمیایی گرمازا نیست. در این روش دو قسمتی که باید به یکدیگر متصل شوند، تحت فشار زیادی که بالاتر از نقطه‌ی تغییر فرم پلاستیکی آنها است قرار می‌گیرند. فشار مولکول‌ها را در تماس یکدیگر قرارداده و ایجاد یک ذوب درون مولکولی می‌کند که نتیجه‌ی آن یک جوش همگن است. این فرایند برای اتصال فلزات مشابه و غیرمشابه به‌کار گرفته می‌شود. در حال حاضر این روش بیشتر برای فلزات نرم نظیر آلومینیم و مس کاربرد دارد. برای فلزات سخت فشار به همراه گرما نیاز است.

- **جوشکاری اصطکاکی:** جوشکاری اصطکاکی براصل تبدیل انرژی مکانیکی (جنبشی) به انرژی گرمایی استوار است. در این روش یکی از دو قطعه‌ی مورد اتصال همراه با حرکت نسبی به دیگری فشرده می‌شود. اصطکاک ایجاد شده بین دو قطعه، گرمای زیادی تولید کرده و حالت پلاستیسیته یا خمیری در لبه‌های اتصال ایجاد می‌شود که با فشار نهایی دو قطعه در هم فرو رفته و اتصال صورت می‌گیرد. روش‌های متداول جوشکاری اصطکاکی عبارتند از: جوشکاری اصطکاکی دورانی و جوشکاری اصطکاکی خطی. جوشکاری اصطکاکی دورانی قدیمی‌ترین روش جوشکاری اصطکاکی است، که حرکت دورانی یک قطعه بر روی قطعه ثابت دیگر باعث تولید گرمای اصطکاکی و شکل‌گیری اتصال می‌شود. شکل ۱-۱ یک نمونه جوشکاری‌شده به روش جوشکاری اصطکاکی دورانی را نشان می‌دهد.

شکل ۱-۱: قطعه جوشکاری‌شده به روش جوشکاری اصطکاکی دورانی

در روش جوشکاری اصطکاکی خطی یکی از قطعات ثابت است و قطعه دیگر حرکت خطی رفت و برگشتی بر روی دیگری انجام می‌دهد. یک نمونه جوشکاری شده به روش جوشکاری اصطکاکی خطی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.

شکل ۱-۲: قطعه جوشکاری شده به روش جوشکاری اصطکاکی خطی

- **جوشکاری اصطکاکی تلاطمی:** اساس این روش نسبتاً جدید مشابه روش جوشکاری اصطکاکی است، با این تفاوت که وظیفه تولید گرمای اصطکاکی برعهده یک ابزار دوار مصرف‌نشدنی است.

۵.۱ جوشکاری اصطکاکی تلاطمی

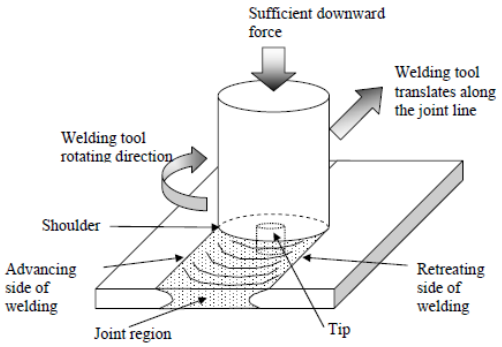
در سال ۱۹۹۱ روش جوشکاری نوینی در موسسه‌ی جوش[1] واقع در کمبریج انگلیس اختراع و با نام جوشکاری اصطکاکی تلاطمی ثبت شد. جوشکاری اصطکاکی تلاطمی[2] یک روش جوشکاری حالت جامد است که در آن برای اتصال دو یا چند قطعه از یک ابزار دورانی مصرف نشدنی استفاده می‌شود [۱۰].

[1] The Welding Instiue
[2] Friction Stir Welding

ابزار دورانی با تولید گرمای اصطکاکی، یک ناحیه پلاستیک در محل اتصال ایجاد می‌کند.

در روش جوشکاری اصطکاکی تلاطمی، ابتدا پین ابزار که با یک سرعت معین دوران می‌کند، با قطعات تماس پیدا می‌کند و سپس ابزار با یک زاویه ثابت تا جایی که لبه شولدر پایین‌تر از سطح بالایی قطعات قرار گیرد درون قطعات فرو می‌رود. پس از این مرحله ابزار با یک سرعت خطی مشخص در راستای لبه اتصال حرکت می‌کند تا اتصال ایجاد شود . اصطکاک ایجاد شده بین ابزار و قطعات تولید گرمای اصطکاکی می‌کند که باعث گرم شدن و نرم شدن فلز می شود ولی آن را ذوب نمی‌کند. فلز اطراف ابزار که به حالت پلاستیک در آمده در حالی به یک فلز واحد تبدیل می‌گردد، که در اصل دو فلز مجزا از دو قطعه بوده است.

برای فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی با سرعت دورانی کم، فشار اصطکاکی باید نسبتاً زیاد باشد تا انرژی لازم برای انجام فرایند تامین گردد. برای این فرایندها ماشین‌های بزرگ و سنگین مورد نیاز است. در مقابل در فرایندهای جوشکاری اصطکاکی تلاطمی با سرعت دورانی زیاد قسمت عمده انرژی مورد نیاز توسط سرعت دورانی تامین می‌شود که منجر به کاهش قابل ملاحظه اندازه و وزن ماشین و ابزار می‌گردد. در بسیار از موارد این روش جوشکاری می‌تواند با استفاده از یک دستگاه فرز معمولی به‌همراه یک ابزار مخصوص که از فلزی سخت‌تر از فلز قطعه‌کار ساخته شده، انجام شود. شکل ۱-۳ فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی را نشان می‌دهد.

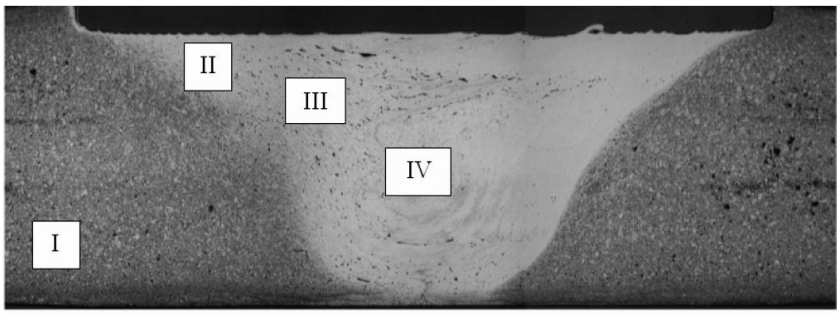


شکل ۱-۳:فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی[۱۱]

۱.۵.۱ ریزساختار جوش اصطکاکی تلاطمی

گرما و تغییرشکل ایجاد شده در حین فرایند جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نواحی ریزساختاری متفاوتی

در ناحیه جوشکاری ایجاد می‌کند. شکل ۱-۴ چهار ناحیه در اطراف جوش اصطکاکی را نشان می‌دهد. ناحیه اول مربوط به فلز پایه است. این ناحیه به اندازه کافی از ناحیه جوشکاری دور است و تحت تاثیر فرایند جوش‌کاری قرار نمی‌گیرد. ناحیه دوم دورترین ناحیه جوش است که تحت تاثیر گرما فرایند جوشکاری قرار گرفته است ولی هیچ تغییر شکلی را تجربه نکرده است. این ناحیه HAZ نام دارد و مشابه ناحیه در جوش ذوبی است. ناحیه سوم TMAZ نام دارد که ماده این ناحیه در حین فرایند جوشکاری تغییرشکل پلاستیک را تجربه می‌کند. مرکز جوش که گرما و تغییرشکل در آن شدید است، ناحیه دکمه جوش نام دارد که تقریباً به اندازه پین ابزار است. در تمام آزمون‌های کشش، بسیاری از آلیاژهای آلومینیم رفتار تسلیم و خستگی مشابهی از خود نشان می‌دهند. در حین این آزمون‌ها کرنش‌های کششی در منطقه HAZ در دو طرف ناحیه جوشکاری روی می‌دهد. در این آزمون‌ها اغلب شکست‌ها در این ناحیه اتفاق می‌افتد. روی دادن شکست و تسلیم در ناحیه HAZ اهمیت این ناحیه را در کنترل رفتار مکانیکی جوش اصطکاکی تلاطمی بیان می‌کند.



شکل ۱-۴:ریز ساختار جوش اصطکاکی تلاطمی[۱۲]

۶.۱ جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای

این روش جوشکاری از تکنولوژی مشابه روش جوشکاری اصطکاکی تلاطمی استفاده می‌کند، با این تفاوت که به‌جای این که ابزار دورانی در طول خط اتصال دو قطعه حرکت کند، درون دو قطعه که روی هم قرار داده شده‌اند فرو می‌رود. در روش جوشکاری اصطکاکی تلاطمی نقطه‌ای مدت زمانی که پین با قطعات تماس پیدا می‌کند طولانی‌تر از زمان تماس شولدر است. در نتیجه نیروی اصطکاک بین پین و قطعه بیشتر انرژی گرمایی مورد نیاز فرایند را تأمین می‌کند. این ویژگی مهم‌ترین تفاوت بین دو روش