دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
دانشکده مهندسی مکانیک

عنوان:

# بررسی خواص مکانیکی و ریز ساختار جوشکاری آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

ارائه شده
جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک – ساخت و تولید

اساتید راهنما :
دکتر محسن شاکری
دکتر سلمان نوروزی

نگارش:
حبیب طاهری آزاد

اردیبهشت ۱۳۹۳

تقدیم به :  همسر و مادر گرامیم که محبت و پایداریشان انگیزه من بود.

تشکر و قدردانی :

در ابتدا از زحمات بی‌دریغ اساتید ارجمندم آقای دکتر شاکری و آقای دکتر نوروزی که هم از نظر علمی و هم از نظر اخلاقی بسیار از ایشان فرا گرفتم، سپاس گزاری می‌کنم.

همچنین از دوستان عزیزم که در بخش های گوناگون مرا یاری کردند، قدردانی می‌کنم.

در نهایت از زحمات فراوان پدر و مادر و همسر مهربانم که با حمایت دلسوزانه خود بهترین مشوق من بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

چکیده :

با توجه به محدودیت‌های فرآیندهای ذوبی اتصال آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴، در پژوهش حاضر از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده شده است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی فرآیند نوینی جهت اتصال‌دهی آلیاژهای فلزی در حالت جامد می‌باشد که اخیرا به منظور اتصال فلزات غیرآهنی نظیر آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم کاربرد ویژه‌ای پیدا نموده است. در این روش جوشکاری سرعت چرخشی ابزار، سرعت پیشروی ابزار، فشار ابزار، زاویه انحراف ابزار و شکل هندسی پین ابزار تاثیر مهمی روی خواص و کیفیت جوش دارند. در تحقیق حاضر خواص کششی، رفتار شکست و ریزساختار اتصال ورق‌های با ضخامت ۳ mm در سرعت‌های چرخشی و پیشروی گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا سعی شد با جوشکاری‌های مقدماتی و تغییر در نسبت پارامترهای سرعت چرخش ابزار و سرعت جوشکاری محدوده پارامترهای لازم برای دستیابی به اتصال جوش مناسب از نظر ظاهری و بدون عیب تونلی معمول بدست آید. سپس تاثیر این متغیرها بر روی خواص مکانیکی اتصالات جوشی حاصل به کمک تست‌های سختی سنجی ، کشش و متالوگرافی بررسی شد. از ابزار با پین استوانه‌ای دارای رزوه و پین استوانه‌ای ساده در این پژوهش استفاده شد. ریزساختار توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی روبشی بررسی شد. آزمایش‌های کشش و سختی در عرض اتصال انجام گرفت. نتایج بیانگر آن است که اتصالات جوشی رفتار مکانیکی ضعیف تری نسبت به فلز پایه داشته اند. همچنین با کاهش نسبت سرعت چرخشی به پیشروی ابزار، خواص مکانیکی اتصالات جوشی افزایش و میزان ازدیاد طول کاهش پیدا می‌کند. مشاهدات ریزساختاری و نتایج ریزسختی در سطح فوقانی اتصال‌ها، نشان از ایجاد دانه‌های هم محور ریز و تبلور مجددیافته‌ای در ناحیه مرکزی جوش دارد که به مراتب از دانه‌های فلز پایه ریزتر است. همچنین بیشترین سختی در منطقه جوش در ناحیه NZ است که سختی این منطقه حدودا ۱۲۵ Hv است. استحکام کششی نهایی و استحکام تسلیم با افزایش نسبت سرعت بهبود می‌یابد و بهترین ترکیب از این دو خاصیت در مقایسه با فلز پایه، در اتصال با سرعت چرخشی ۱۰۴۵rpm و سرعت پیشروی ۱۰۰ mm/min با استفاده از ابزار دارای پین استوانه‌ای رزوه‌دار به دست آمد. با بهبود خواص کششی، محل شکست از ناحیه تلاطم جوش ( در نسبت سرعت‌های کمتر )، به ناحیه TMAZ در سمت RS (در نسبت سرعت‌های بالاتر)، تغییر می‌کند.

**کلمات کلیدی:** جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، هندسه ابزار، سرعت دورانی و سرعت پیشروی

# فهرست مطالب

چکیده ..... ت

فهرست ..... ج

فهرست اشکال ..... ط

فهرست جداول ..... ل

**فصل ۱ مقدمه**

۱ – ۱ مقدمه‌ای بر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ..... ۲

**فصل ۲ جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و متغیرهای آن**

۲ – ۱ تاریخچه‌ای کوتاه از جوشکاری اصطکاکی ..... ۸

۲ – ۲ شرح فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ..... ۱۰

۲ – ۳ مزایا و محدودیت‌های فرآیند ..... ۱۴

۲–۳–۱ مزایای اقتصادی ..... ۱۴

۲–۳–۲ مزایای کیفی جوش ایجاد شده ..... ۱۴

۲–۳–۳ محدودیت‌های فرآیند ..... ۱۵

۲ – ۴ کاربردهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ..... ۱۵

۲ – ۵ متغیرهای فرآیند ..... ۱۶

۲–۵–۱ هندسه ابزار ..... ۱۷

۲–۵–۲ جنس ابزار ..... ۱۹

۲–۵–۳ زاویهٔ انحراف ابزار ..... ۲۰

۲–۵–۴ میزان فرورفتگی یا عمق ابزار ..... ۲۱

۲–۵–۵ سرعت چرخشی و سرعت پیشروی ..... ۲۲

۲–۵–۶ سایر متغیرها ..... ۲۳
۲ – ۶ طراحی اتصال ..... ۲۳
۲ – ۷ تغییرات ریز ساختار ..... ۲۴
۲–۷–۱ منطقه جوش ..... ۲۵
۲–۷–۲ شکل ناحیه جوش ..... ۲۶
۲–۷–۳ اندازه دانه ..... ۲۷
۲–۷–۴ منطقه تحت تأثیر عملیات ترمومکانیکی ..... ۲۸
۲–۷–۵ منطقه تحت تأثیر حرارت ..... ۲۹
۲–۷–۶ ریز ساختار نواری ..... ۳۰
۲ – ۸ توزیع دما در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ..... ۳۱
۲ – ۹ خواص مکانیکی ..... ۳۳
۲–۹–۱ تنش پسماند ..... ۳۳
۲–۹–۲ سختی ..... ۳۴
۲–۹–۳ استحکام و شکل‌پذیری ..... ۳۵

**فصل ۳ روش تحقیق**

۳ – ۱ فلز پایه ..... ۳۹
۳ - ۲ تجهیزات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ..... ۴۰
۳-۲-۱ دستگاه مورد استفاده برای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ..... ۴۰
۳–۲–۲ نحوه تثبیت ورقها برای اتصال ..... ۴۱
۳–۲–۳ ساخت ابزار مورد استفاده برای عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ..... ۴۳
۳ – ۳ پارامترهای بررسی شده ..... ۴۵
۳–۳–۱ سرعت چرخشی ..... ۴۵

۳–۳–۲ سرعت پیشروی ..... ۴۶
۳–۳–۳ هندسه پین ابزار ..... ۴۶
۳–۳–۴ سایر پارامترها ..... ۴۶
۳ – ۴ آزمون کشش ..... ۴۷
۳–۴–۱ ماشین تست کشش ..... ۴۷
۳–۴–۲ آماده‌سازی نمونه‌ها ..... ۴۸
۳ – ۵ تست سختی سنجی ..... ۴۹
۳–۵–۱ آماده‌سازی نمونه‌ها ..... ۴۹
۳–۵–۲ فرآیند آزمایش و دستگاه سختی سنجی ..... ۵۰
۳ – ۶ مطالعه ریز ساختار ..... ۵۰
۳–۶–۱ آماده‌سازی نمونه‌ها ..... ۵۱
۳–۶–۲ مطالعه میکروساختار با میکروسکوپ نوری ..... ۵۲
۳–۶–۲ مطالعه میکروساختار با میکروسکوپ الکترونی ..... ۵۳

**فصل ۴ نتایج و بحث**

مقدمه ..... ۵۵
بررسی‌های مکانیکی ..... ۵۵
۴ - ۱ خواص کششی ..... ۵۶
۴-۱-۱ اثر سرعت پیشروی و چرخشی ابزار بر خواص کششی ..... ۶۲
۴-۱-۲ اثر هندسه ابزار بر خواص کششی ..... ۶۶
۴ - ۲ بررسی میکروسختی ..... ۶۷
۴ - ۳ کیفیت ظاهری سطح ..... ۷۰
۴-۳-۱ اثر سرعت پیشروی و چرخشی ابزار بر کیفیت نمونه ..... ۷۱

۴-۳-۲ اثر هندسه ابزار بر کیفیت نمونه ..... ۷۴

۴ - ۴ بررسی میکروساختار ..... ۷۵

**فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادات**

نتیجه گیری ..... ۸۵

پیشنهادات ..... ۸۶

مراجع ..... ث

شکل ۲-۱ شماتیکی از فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی[۶] ..... ۹
شکل ۲-۲ شماتیکی از فرآیند جوشکاری اصطکاکی غیر دورانی[۶] ..... ۱۰
شکل ۲-۳ نمونه‌ای از ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[۳]..... ۱۰
شکل ۲-۴ نمایی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[۳] ..... ۱۱
شکل ۲-۵ شماتیکی از ناحیه های پیش رو و پس رو[۶]..... ۱۲
شکل ۲-۶ متغیرهای $\omega$ و $v$ و $p$ فرآیند جوشکاری اصطکاکی اعتشاشی ..... ۱۶
شکل ۲-۷ شماتیک ترسیم شده از ابزار جوشکاری FSW[۱۰] ..... ۱۷
شکل ۲-۸ هندسه نمای تحتانی از شانه‌های طراحی شده در انستیتو جوشکاری[۱۲]..... ۱۸
شکل ۲- ۹ تصویر کلی از زاویه انحراف ابزار. ..... ۲۰
شکل ۲-۱۰ ارتباط زاویه انحراف با عمق فرو رفتگی ابزار [۱۵]..... ۲۱
شکل ۲-۱۱ طبقه بندی انواع اتصالات جوش ..... ۲۴
a)لب به لب ،b)لب به لب گوشه ،T(c شکل ،d) و e)لبه روی هم ،T(f شکل روی هم ،g)گوشه ..... ۲۴
شکل ۲-۱۲ شماتیکی از نواحی مختلف جوش اصطکاکی اعتشاشی در مقطع عرضی[۳] ..... ۲۵
شکل ۲-۱۳ شکل منطقه اغتشاش آلیاژ ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ در اثر جوشکاری با سرعت چرخشی $s^{-1}$ ۲۰و سرعت های پیشروی: a ) ۴۰ mm/min و b ) ۲۰۰ mm/min [۲] ..... ۲۵
شکل ۲-۱۴ تصویر SEM میدان روشن از ناحیه تلاطم جوش FSW آلیاژ Al-Cu-Li ..... ۲۶
a ) ساختار شبه سلولی b )دانه‌های فرعی با مرزهای بدون نابجایی[۱۸] ..... ۲۶
شکل ۲-۱۵ (الف) منطقه TMAZ در جوش FSW آلیاژ ۷۰۷۵. (ب) تصویر SEM از رسوبات در داخل دانه و مرز آن در نواحی مشخص شده در شکل الف[۲۰]..... ۲۹
شکل ۲-۱۶ تغییرات ریزساختار بر حسب تابعی از فواصل مختلف در مقطع عمودی در راستای جوش آلیاژ 2024-T3..... ۳۰
شکل ۲-۱۷ تاثیر عمق جاسازی ترموکوپل بر دمای ماکزیمم نسبت به فاصله از مرکز جوش در عمق‌های مختلف از سطح کار[۲۲]..... ۳۲
شکل ۲-۱۸ پروفیل سختی جوش اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ ۶۰۶۳Al-T۵[۳] ..... ۳۵
شکل ۳-۱ دستگاه spectrometry مورد استفاده برای تعیین درصد ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 2024-T3..... ۳۹
شکل ۳-۲ ماشین فرز عمودی برای انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی..... ۴۱
شکل ۳-۳ فیکسچر طراحی شده برای تبدیل ماشین فرز عمودی مرسوم به ماشین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی..... ۴۲

شکل ۳-۴ ابعاد ورق برش داده شده جهت فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ..... ۴۲
شکل ۳-۵ ابزار FSW با پین استوانه‌ای ساده مورد استفاده در این تحقیق ..... ۴۳
شکل ۳-۶ ابعاد هندسی ابزارهای مورد استفاده (۱) با پین استوانه‌ای ساده (۲) با پین استوانه‌ای قلاویز شده ..... ۴۴
شکل ۳-۷ ماشین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حال ایجاد جوش ..... ۴۵
شکل ۳- ۸ تصویری از دستگاه کشش مورد استفاده در این تحقیق ..... ۴۷
شکل ۳-۹ ابعاد نمونه آزمون کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 ..... ۴۸
شکل ۳- ۱۰ برخی از نمونه‌های تست کشش ..... ۴۹
شکل ۳- ۱۱ دستگاه ریزسختی سنج ویکرزLeitz wetzlar ..... ۵۰
شکل ۳-۱۲ تصویر تعدادی از نمونه‌های مانت شده ..... ۵۱
شکل ۳-۱۳ تجهیزات میکروسکوپ نوری مورد استفاده برای عکس برداری از ریزساختار نمونه‌ها ..... ۵۲
شکل ۳-۱۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی مدل VP 1450 مورد استفاده در این پژوهش ..... ۵۳
شکل ۴-۱ نمودار ستونی تنش تسلیم و استحکام نهایی نمونه‌های تست کشش جوشکاری شده با ابزار استوانه ای قلاویز شده ..... ۶۰
شکل ۴-۲ نمودار ستونی درصد ازدیاد طول نمونه‌های تست کشش جوشکاری شده با ابزار استوانه‌ای قلاویز شده ..... ۶۰
شکل ۴-۳ نمودار ستونی تنش تسلیم و استحکام نهایی نمونه‌های تست کشش جوشکاری شده با ابزار استوانه ای ساده ..... ۶۱
شکل ۴-۴ نمودار ستونی درصد ازدیاد طول نمونه‌های تست کشش جوشکاری شده با ابزار استوانه‌ای ساده ۶۱
شکل ۴-۵ تغییرات استحکام نهایی و استحکام تسلیم شکست بر اساس پارامتر نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی برای ابزار مجهز به پین استوانه‌ای قلاویز شده ..... ۶۳
شکل ۴-۶ تغییرات استحکام نهایی و استحکام تسلیم شکست بر اساس پارامتر نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی برای ابزار مجهز به پین استوانه‌ای ساده ..... ۶۴
شکل ۴-۷ تغییرات درصد ازدیاد طول بر اساس پارامتر نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی برای ابزار مجهز به پین استوانه‌ای قلاویز شده ..... ۶۵
شکل ۴-۸ تغییرات درصد ازدیاد طول بر اساس پارامتر نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی برای ابزار مجهز به پین استوانه‌ای ساده ..... ۶۵
شکل ۴-۹ پروفیل میکرو سختی ویکرز در راستای خط جوش نمونه‌های جوشکاری شده با ابزار دارای پین استوانه‌ای قلاویز شده با سرعتهای چرخشی متفاوت و سرعت پیشروی ۱۰۰ mm/min ..... ۶۷

شکل ۴-۱۰ پروفیل میکرو سختی ویکرز در راستای خط جوش نمونه‌های جوشکاری شده با ابزار دارای پین استوانه‌ای قلاویز شده و پین استوانه‌ای ساده در سرعت چرخشیrpm ۱۰۴۵ سرعت پیشروی ۱۰۰mm/min ..... ۶۹
شکل ۴-۱۱ سطح ظاهری نمونه‌های جوشکاری شده با ابزار دارای پین استوانه‌ای قلاویز شده در سرعتهای پیشروی mm/min ۱۶۰-۸۰ و سرعتهای چرخشی rpm ۱۳۰۰-۸۴۰ بر اساس ترکیبات مختلف جدول ۴-۱ ..... ۷۲
شکل ۴-۱۲ سطح ظاهری نمونه‌های جوشکاری شده با ابزار دارای پین استوانه‌ای قلاویز شده و پین استوانه‌ای ساده در سرعت پیشروی mm/min ۱۰۰ و سرعت چرخشی rpm ۱۰۴۵ ..... ۷۴
شکل ۴-۱۳ تصویر نواحی هسته جوش، HAZ و فلز پایه نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی rpm ۱۰۴۵ و سرعت پیشروی mm/min ۱۰۰ ..... ۷۶
شکل ۴-۱۴ تصویر نواحی هسته جوش، TMAZ ، HAZ و فلز پایه نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی rpm ۱۰۴۵ و سرعت پیشروی mm/min ۱۰۰ ..... ۷۷
شکل ۴-۱۵ ریزساختار فلز پایه آلیاژ آلومینیوم 2024 در نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشیrpm ۱۰۴۵ و سرعت پیشروی mm/min ۱۰۰ ..... ۷۷
شکل ۴-۱۶ ریزساختار ناحیه HAZ آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 در نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی rpm ۱۰۴۵ و سرعت پیشروی mm/min ۱۰۰ ..... ۷۸
شکل ۴-۱۷ ریزساختار ناحیه TMAZ آلیاژ آۀومینیوم 2024-T3 در نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی rpm ۱۰۴۵ و سرعت پیشروی mm/min ۱۰۰ ..... ۷۹
شکل ۴-۱۸ ریزساختار منطقه مرکزی آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 در نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی rpm ۱۰۴۵ و سرعت پیشروی mm/min ۱۰۰ ..... ۷۹
شکل ۴-۱۹ تصاویر میکروساختار ناحیه مرکزی جوش اصطکاکی اغتشاشی AL2024-T3 در سرعت پیشروی mm/min ۱۰۰و سرعتهای چرخشی a) ۸۴۰ ، b) ۱۰۴۵ و c) ۱۳۰۰ rpm ..... ۸۰
شکل ۴-۲۰ ساختار حلقه‌های پیازی شکل نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی rpm ۱۰۴۵و سرعت پیشروی mm/min ۱۰۰ ..... ۸۱
شکل ۴-۲۱ عیب تونلی ایجاد شده در نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی rpm ۱۳۰۰و سرعت پیشروی mm/min ۸۰ ..... ۸۱
شکل ۴-۲۲ تصویر مقطع شکست نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت پیشروی mm/min ۱۰۰و سرعت‌های چرخشی a) ۸۴۰ ، b) ۱۰۴۵ و c) ۱۳۰۰ rpm بعد از آزمون کشش ..... ۸۲
شکل ۴-۲۳ تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از سطح شکست نمونه جوشکاری شده با سرعت چرخشی rpm ۱۰۴۵و سرعت پیشروی mm/min ۱۰۰ ..... ۸۳

جدول ۲-۱ .اندازه دانه در ناحیه جوش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم در شرایط جوشکاری مختلف[۱۷] ..... ۲۷
جدول ۲-۲ بازده اتصال FSW در آلیاژهای مختلف آلومینیوم [۳] ..... ۳۶
جدول ۳-۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 ..... ۴۰
جدول ۳-۲ خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 ..... ۴۰
جدول ۳-۳ ترکیب شیمیایی فولاد گرمکار H13 برای ساخت ابزار مورد استفاده در این تحقیق ..... ۴۳
جدول۳-۴ سرعت‌های چرخشی اعمال شده در تست‌های مختلف ..... ۴۵
جدول۳-۵ سرعت‌های پیشروی اعمال شده در تست‌های مختلف ..... ۴۶
جدول ۴-۱ ترکیبات مختلف پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای ابزار با پین استوانه‌ای قلاویز شده ..... ۵۶
جدول ۴-۲ ترکیبات مختلف پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای ابزار با پین استوانه‌ای ساده ..... ۵۷
جدول ۴-۳ نتایج تست کشش شامل استحکام کششی نهایی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نمونه‌های جوشکاری شده با ابزار دارای پین استوانه‌ای قلاویز شده ..... ۵۸
جدول ۴-۴ نتایج تست کشش شامل استحکام کششی نهایی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول نمونه‌های جوشکاری شده با ابزار دارای پین استوانه‌ای ساده ..... ۵۸
جدول ۴-۵ نتایج حاصل از تست کشش نمونه‌های جوشکاری شده با هندسه پین متفاوت ..... ۶۶

# فصل ۱

# مقدمه

## ۱ – ۱ مقدمه‌ای بر فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

در دنیای پیشرفته امروز روشهای جوشکاری متفاوتی برای اتصال فلزات وجود دارد که گستره آنها از جوشکاری اکسی‌استیلن تا جوشکاری لیزر وجود دارد.

دو دسته کلی که تمام انواع جوشکاری را در بر می گیرد عبارتند از:

- جوشکاری ذوبی[۱].
- جوشکاری حالت جامد[۲]. [۱]

جوشکاری حالت جامد فرآیندی است که در آن اتصال در دماهایی زیر دمای ذوب فلز پایه انجام می‌شود و به هیچ ماده پرکننده و یا محیط خنثی نیاز نیست، زیرا فلز به دمای ذوب نمی‌رسد که در آن اکسیداسیون اتفاق بیفتد.

مثال‌های جوشکاری حالت جامد عبارتند از: جوشکاری اصطکاکی[۳]، جوشکاری انفجاری[۴] و جوشکاری اولتراسونیک[۵].

1- Fusion welding
2- Solid state welding
3- Friction Welding
4- Explosion Welding
5- Ultrasonic Welding

سه پارامتر مهم زمان، دما و فشار به طور مجزا یا به صورت ترکیبی اتصال را در فلز پایه ایجاد می‌کنند. از آنجایی که در جوشکاری حالت جامد فلز به دمای ذوب نمی‌رسد، بنابراین عیب هایی که در اثر ذوب شدن و انجماد فلز به وجود می‌آید وجود ندارد. در جوشکاری حالت جامد فلزاتی که به یکدیگر متصل شده‌اند خواص اصلی شان را حفظ می‌کنند چرا که ذوب شدن در ناحیه اتصال رخ نمی‌دهد و هم‌چنین ناحیه متأثر از حرارت در مقایسه با روشهای جوشکاری ذوبی که اغلب باعث کاهش استحکام و شکل پذیری می شود خیلی کوچک است. در جوشکاری حالت جامد، فلزات غیرمشابه می‌توانند به آسانی به یکدیگر متصل شوند ،زیرا در این روش جوشکاری ضرایب انبساط حرارتی و هدایت حرارتی نسبت به جوشکاری ذوبی کمتر اهمیت دارند[۲].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[1] فرآیند توسعه یافته‌ای از جوشکاری اصطکاکی است. در جوشکاری اصطکاکی مرسوم، اتصال قطعات به وسیله حرکت قطعات نسبت به یکدیگر در امتداد یک سطح مشترک و نیز اعمال یک نیروی فشاری به سطح اتصال انجام می‌شود. حرارت اصطکاکی تولید شده در سطح مشترک دو فلز در اثر ساییده شدن سطوح به یکدیگر باعث نرم شدن فلز می‌شود و ماده پلاستیک شده بر اثر اعمال فشار به سمت بیرون اکسترود می‌شود. قبل از سرد شدن جوش باید با نیروی بیشتر دو قطعه را به یکدیگر فشار داد تا جوش مناسبی شکل گیرد[۳،۴].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از فرآیندهای حالت جامد است. این روش جوشکاری اصطکاکی در سال ۱۹۹۱ در انستیتو جوش انگلستان[2] ابداع شد. این فرآیند با نگه داشتن صفحات مورد نظر بر روی یک صفحه پشتی[3] به صورتی که صفحات در حین جوشکاری نتوانند از یکدیگر دور شوند انجام شد. یک ابزار دوار مقاوم در برابر سایش در خط اتصال صفحات تا یک عمق از قبل مشخص شده فرو برده می‌شود و در راستای خط اتصال صفحات حرکت می‌کند تا جوش شکل گیرد[۳،۴].

1-Friction Stir Welding (FSW)
2-The Welding Institute (TWI)
3-Backing plate

مزایای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی عبارتند از: عدم آلودگی محیطی، کاهش مصرف انرژی، عدم نیاز به گاز محافظ برای جوشکاری آلومینیوم، خواص مکانیکی خوب، عدم وجود بخار، جرقه و پاشش، اعوجاج کم فلز به علت جوشکاری در حالت جامد و روش عالی برای اتصال غیر متشابه و جوش ناپذیر.

مزایای ویژه این فرآیند سبب استفاده گسترده از آن در صنعت شده است به گونه‌ای که گفته می شود پس از معرفی این فرآیند به عنوان فرآیند تولیدی جهت اتصال‌دهی آلیاژهای سبک از جمله آلیاژهای آلومینیوم، نسبت تقاضا به عرضه محصولات پایه همانند ورق و شمش به شدت افزایش یافته است و منجر به افزایش قیمت آلومینیوم شده است.

دشواری در ایجاد جوش های با استحکام بالا و مقاوم در برابر خستگی و شکست در آلیاژهای آلومینیوم سری ×××۲ و ×××۷ توسط فرآیندهای جوشکاری ذوبی استفاده از این روش ها را محدود کرده است. این آلیاژهای آلومینیوم به خاطر ایجاد میکروساختار انجمادی و ناخالصی در ناحیه جوش عموماً به عنوان آلیاژهای با جوش‌پذیری محدود طبقه‌بندی می‌شود[۵].

هم‌چنین کاهش خواص مکانیکی جوش در مقایسه با فلزات پایه در این نوع آلیاژها بسیار مهم است. این فاکتورها، اتصال این آلیاژها را از طریق فرآیندهای جوشکاری مرسوم غیر قابل قبول کرده است. بعضی از آلیاژهای آلومینیوم را می‌توان جوش مقاومتی[1] داد، ولی آماده سازی سطح آنها هزینه زیادی را در بردارد و اکسیدهای سطحی ایجاد شده مشکل بزرگ در استفاده از این فرآیند اتصال است[۵].

طبق پیش بینی کارشناسان، در دهه آتی این فرآیند جایگزین بسیاری از فرآیندهای جوشکاری ذوبی و حتی مقاومتی در صنعت خواهد شد و لذا شرکتهای بزرگ تولیدی حجم بالایی از بوجه‌های تحقیقاتی خود را جهت بررسی این فرآیند به دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی سرازیر نموده‌اند.

1-Resistance welding

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به عنوان روشی در حال تحول، به سرعت در حال پیشرفت و فراگیر شدن است و اگرچه توانایی خود را در ایجاد جوش‌هایی با کیفیت بهتر به اثبات رسانده است، انعطاف پذیری کم و برخی موانع و ویژگی‌های نامشخص، هنوز آن را در بکارگیری گسترده در صنایع آماده نکرده است[۶].

فلزات بسیاری که غیرقابل جوشکاری و یا سخت جوش بوده‌اند، با این فرآیند متصل شده‌اند، اما امروزه یکی از چالش‌های موجود برای این فرآیند، دامنه مواد استفاده شده در این روش است.

بنابراین پژوهش در مورد طراحی ابزار و متغیرهای مؤثر در فرآیند، می تواند کلید موفقیت برای به کارگیری این فرآیند در دامنه گسترده‌تری از مواد با ضخامت‌های مختلف و کاربردهای گوناگون باشد. بنابراین ضمن بررسی تحقیقات صورت گرفته در اتصال آلیاژهای آلومینیوم عملیات حرارتی پذیر مانند سری ××۲ و با توجه به اهمیت روزافزون اتصال آنها، برآن شدیم تا در پژوهش حاضر به اثر متغیرهای فرآیند از قبیل سرعت گردش ابزار و سرعت جوشکاری بر روی ریزساختار ایجاد شده و برخی خواص مکانیکی نهایی اتصال پرداخته و به ارتباط میان این متغیرها و خواص نتیجه شده دست یابیم[۶].

در واقع سعی شده است تا با تغییر متغیر مهم نسبت سرعت گردشی به سرعت جوشکاری، اتصال بدون عیب تونلی مرسوم در این روش، به دست آید و ریزساختار و ارتباط آن با خواصی نظیر سختی و استحکام کششی در اتصال‌های به ظاهر موفق بررسی شود تا متغیرهای بهینه جوشکاری آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 حاصل گردد .

در پژوهش حاضر ورق‌های آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 در ابعاد مورد نظر توسط گیوتین برش زده شدند و سپس توسط فیکسچر مخصوصی بر روی میز دستگاه فرز به صورت لب به لب ثابت شدند. عمل جوشکاری به وسیله ابزارارهای با پین استوانه‌ای و پین استوانه‌ای رزوه‌دار در راستای عمود بر جهت نورد ورق بر روی دستگاه فرز انجام شد. پس از جوشکاری‌های مقدماتی و به دست آمدن محدوده پارامترهای جوشکاری، نمونه‌ها با مقادیر مورد نظر جوشکاری شدند.

از اتصالات جوشکاری شده نمونه‌های مورد نظر جهت تست کشش، سختی سنجی و بررسی میکروسکوپی و ماکروسکوپی توسط دستگاه وایرکات برش زده شد.

تست‌های مورد نظر بر روی نمونه‌ها انجام شد و در نهایت با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات،اثر متغیرهای فرآیند بر روی خواص مکانیکی و میکروساختاری آلیاژ مورد آزمایش بررسی شد.

# فصل ۲

## جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و متغیرهای آن

## ۲ – ۱ تاریخچه‌ای کوتاه از جوشکاری اصطکاکی

جوشکاری اصطکاکی یک روش جوشکاری حالت جامد است که در آن دو فلز بدون نیاز به هیچ ماده پرکننده، منبع گرمایی و یا محیط خنثی به یکدیگر متصل می‌شوند. جوشکاری اصطکاکی عموماً به سه دسته تقسیم می‌شود:

- جوشکاری دورانی
- جوشکاری غیر دورانی
- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

تکنولوژیهای جوشکاری اصطکاکی انرژی مکانیکی را به انرژی حرارتی و در نهایت به تغییر شکل پلاستیک مواد تبدیل می‌کنند تا یک جوش خوب ایجاد شود.

جوشکاری دورانی اولین نوع از انواع جوشکاری اصطکاکی است که توسعه یافت و به صورت تجاری مورد استفاده قرار گرفت. در این فرآیند جوشکاری، یک قطعه استوانه‌ای شکل در حال چرخش درمقابل یک قطعه مشابه ثابت تحت یک فشار معین قرار دارد. مواد براثرگرمای اصطکاک نرم می‌شوند و سطوح در هم فورج می‌شوند. فرآیند جوشکاری دورانی می‌تواند برای اتصال فلزات مشابه و یا غیر مشابه استفاده شود (شکل ۲-۱)[۶].