

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - ساخت و تولید

عنوان

جوشکاری اصطکاکی سوپر آلیاژهای ناهمسان پایه نیکل اینکونل ۶۰۰ و پایه آهن کوار

نگارنده

مرتضی رنجکش

استاد راهنما:

سیدهادی قادری

بهمن ۱۳۹۹

فرم شماره ۳: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

شماره:

تاریخ:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **مرتضی رنجکش** با شماره دانشجویی **۹۵۰۷۲۹۴** رشته **مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید** تحت عنوان **جوشکاری اصطکاکی سوپر آلیاژهای ناهمسان پایه نیکل اینکونل ۶۰۰ و پایه آهن کوار** که در تاریخ **۱۳۹۹/۱۱/۲۱** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☐ الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۷/۹۹ - ۱۶	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹ - ۱۴
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر سید هادی قادری	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم			
۳- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر هادی پروز	استادیار	
۴- استاد ممتحن اول	دکتر مهدی گردویی	دانشیار	
۵- استاد ممتحن دوم	دکتر مهدی وحدتی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تقدیم به

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان تقدیم می‌نمایم به:

- روح بلند پدر و مادر و برادر شهیدم به خاطر همه‌ی تلاشهای محبت آمیزی که در دوران مختلف زندگی‌ام انجام دادند و بامهربانی چگونه زیستن را به من آموختند.
- به همسر و دختران مهربانم که در تمام طول تحصیل همراه و همگام من بوده اند .
- به استادان فرزانه و فرهیخته‌ای که در راه کسب علم و معرفت مرا یاری نمودند.
- به آنان که در راه کسب دانش راهنمایم بودند .
- به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه‌ی راهم بود.
- الهها به من کمک کن تا بتوانم ادای دین کنم و به خواسته‌ی آنان جامه‌ی عمل بپوشانم.
- پروردگارا حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای آنان مقدر نما.
- خدایا توفیق خدمتی سرشار از شور و نشاط و همراه و همسو با علم و دانش برای رشد و شکوفایی ایران کهنسال عنایت بفرما.

سپاس گزاری

اکنون که مراحل پژوهش، تدوین و نگارش پایان نامه به پایان رسیده است نمی توانم معنایی بالاتر از تقدیر و تشکر بر زبانم جاری سازم و سپاس خود را در وصف پدر و مادر عزیزم که وجودم جز هدیه وجودشان نیست آشکار نمایم. از خانواده عزیزتر از جانم متشکرم که در طول زندگی و دوران تحصیل همراه و مشوقم بودند و با ایثار و از خودگذشتگی و تحمل زحمات این راه یاری ام نمودند. از استاد گرامی جناب آقای دکتر سید هادی قادری که مرا از علمشان بی نصیب نگذاشتند و همواره راهنما و راهگشای نگارنده در اتمام و اکمال پایان نامه بوده اند تقدیر و تشکر می نمایم.

همچنین از استادان فرهیخته و فرزانه جناب آقایان دکتر حاج مهدی گردویی و دکتر مهدی وحدتی و دکتر سید وحید حسینی که با نکته های دلاویز و گفته های بلند، صحیفه های سخن را علم پرور نمودند و همواره راهنما و دوست عزیز من بوده اند قدردانی و تشکر می نمایم. از جناب آقای دکتر نظری هم بابت همکاری در انجام تست های دستگاه تشکر می نمایم.

از اساتید بزرگوار جناب آقایان دکتر حاج مهدی گردویی و دکتر مهدی وحدتی که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند و نقطه نظرات مفید خود را برای محتوای این پایان نامه ارائه نمودند، کمال تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب **مرتضی رنجکش** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه جوشکاری اصطکاکی سوپرآلیاژهای ناهمسان پایه نیکل اینکونل ۶۰۰ و پایه آهن کوار تحت راهنمایی آقای دکتر سید هادی قادری متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

جوشکاری اصطکاکی دورانی یک روش جوشکاری حالت جامد است که به وسیله آن می‌توان قطعات فلزی گرد را به یکدیگر متصل کرد. مرحله اول جوشکاری شامل اعمال بار محوری فشاری به اجزای در حال دوران با سرعت نسبی است. این باعث ایجاد فشار تماسی و در نتیجه اتلاف اصطکاکی در محل اتصال می‌شود. در نتیجه گرم شدن، دما در نزدیکی منطقه تماس افزایش می‌یابد و مواد فلزی نرم می‌شوند. پس از آن مرحله دوم جوشکاری که در آن یک بار فشاری محوری اعمال می‌شود و منجر به جریان قابل توجهی از فلز به نام پلیسه می‌شود، انجام شده و دو قسمت به هم متصل می‌شوند که به فشار آهنگری معروف است. در این پایان‌نامه، جوشکاری اصطکاکی میله‌هایی از جنس آلیاژ اینکونل ۶۰۰ به قطر ۴ mm و کوار به قطر ۳ mm با استفاده از روش تحلیل المان محدود و مطالعات تجربی بررسی شده است. متغیرهای ورودی فرآیند شامل سرعت دورانی، فشار اصطکاکی و فشار آهنگری می‌باشند. در تحلیل المان محدود، از یک مدل متقارن محوری با در نظر گرفتن پیچش و استفاده از المان CGAX4T در یک روند حل دما-جابجایی کوپل شده در حل گر استاندارد استفاده شد. برای جلوگیری از تغییر شکل شدید المان‌ها، پس از رسیدن جابجایی میله‌ی متحرک به مقداری مشخص، تحلیل متوقف شده و تحلیل جدیدی در ادامه‌ی تحلیل قبل با استفاده از قابلیت نگاشت شبکه به شبکه شروع می‌شود. بر اساس یک جدول طراحی آزمایش، اثر متغیرها تجزیه و تحلیل شد و مقادیر مطلوب برای یک جوش موفق بدست آمد. بر اساس نتایج به دست آمده از تحلیل، یک دستگاه برای انجام فرآیند جوشکاری طراحی و ساخته شد. نمونه‌های جوشکاری شده تحت آزمایش کشش قرار گرفتند و نتایج نشان داد استحکام مکانیکی اتصال با بیشتر شدن فشار اصطکاکی ۳۳٪ افزایش پیدا کرده است. مقدار تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در آزمون عددی برابر ۳/۷ mm و برای نمونه تجربی برابر ۳/۸ mm بدست آمده و لذا مقدار خطای محاسبه شده برابر ۲/۷٪ می‌باشد. مقادیر متغیرهای سرعت دورانی، فشار اصطکاکی و فشار آهنگری اعمال شده به ترتیب ۶۰۰۰ RPM، ۳۰۰ MPa و ۵۰۰ MPa بوده است.

واژگان کلیدی: جوشکاری اصطکاکی دورانی، اینکونل ۶۰۰، کوار، تحلیل المان محدود، استحکام مکانیکی اتصال

فهرست عنوان‌ها

جوشکاری اصطکاکی سوپرآلیاژهای ناهمسان پایه نیکل اینکونل ۶۰۰ و پایه آهن کوار.....	ب
فرم شماره ۳: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد.....	ج
تقدیم به.....	د
سپاس‌گزاری.....	ه
تعهد نامه.....	و
چکیده.....	ز
فهرست عنوان‌ها.....	ح
فهرست شکل‌ها.....	ک
فهرست جدول‌ها.....	م
فهرست نشانه‌ها.....	ن
فصل ۱ مقدمه.....	۱
۱-۱- معرفی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی.....	۲
۱-۱-۱- جوشکاری اصطکاکی دورانی.....	۴
۱-۲- متغیرهای ورودی فرآیند.....	۷
۱-۲-۱- سرعت چرخش.....	۱۰
۱-۲-۲- فشار اصطکاکی.....	۱۰
۱-۲-۳- فشار آهن‌گری.....	۱۰
۱-۳- روابط تحلیلی فرآیند.....	۱۱

۱-۴- بیان مساله و روش حل ۱۴

۱-۵- پیشینه ی تحقیق ۱۵

۱-۶- ساختار پایان نامه ۱۷

فصل ۲ تحلیل المان محدود..... ۱۹

۲-۱- نرم افزار آباکوس ۲۰

۲-۱-۱- کدنویسی در آباکوس ۲۱

۲-۱-۲- اسکریپت چیست ۲۱

۲-۲- مدل سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی ۲۳

۲-۲-۱- مدل سازی قطعات ۲۴

۲-۲-۲- خصوصیات مواد ۲۵

۲-۲-۳- تعیین گام حل ۳۰

۲-۲-۴- تعیین نوع تماس سطوح و برهم کنش آن ها ۳۱

۲-۲-۵- بارگذاری و ایجاد شرایط مرزی ۳۳

۲-۲-۶- شبکه بندی ۳۴

۲-۳- طراحی آزمایش ۳۵

فصل ۳ روش تجربی..... ۳۹

۳-۱- انتخاب مواد و تجهیزات ۳۹

۳-۲- معرفی تجهیزات آزمایشگاهی ۴۱

۳-۳- تست کشش ۴۷

فصل ۴ نتایج و بحث..... ۴۹

۴-۱- نتایج بهینه سازی ۴۹

۴-۱-۱- تحلیل واریانس ۴۹

۴-۱-۲- تاثیر متغیرهای طراحی بر فرایند جوشکاری ۵۴

۴-۱-۳- متغیرهای بهینه فرآیند ۵۸

۴-۲- نتایج تحلیل المان محدود ۵۹

۴-۲-۱- بررسی توزیع دما ۵۹

۴-۲-۲- بررسی نواحی تسلیم ۶۰

۴-۲-۳- بررسی شکل پلیسه های ایجاد شده ۶۱

۴-۳- نتایج آزمون تجربی ۶۴

۴-۳-۱- میزان جابجایی ΔL در تست تجربی ۶۴

۴-۳-۲- مقایسه نمونه تجربی با نمونه عددی ۶۶

۴-۳-۳- بررسی مقاومت کششی محل اتصال نمونه های آزمون تجربی ۶۷

فصل ۵ نتیجه گیری و پیشنهادها ۷۱

۵-۱- نتیجه گیری ۷۱

۵-۲- پیشنهادها ۷۳

پیوست الف - کدهای نرم افزار آباکوس ۷۵

پیوست ب - نقشه دستگاه تجهیز شده: ۸۶

منبع ها ۹۵

چکیده انگلیسی ۹۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ طرح‌واره‌ی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی (a) مرحله چرخش (b) اعمال فشار اصطکاکی و گرم شدن نمونه (c) انتهای مرحله اصطکاکی (d) اعمال فشار آهنگری و تکمیل فرآیند [۱] ۳
- شکل ۲-۱ مراحل چهار گانه فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی [۲] ۴
- شکل ۳-۱ طرح‌واره جوشکاری اصطکاکی درایو مستقیم [۱] ۶
- شکل ۴-۱ طرح‌واره فرآیند جوشکاری اصطکاکی اینرسی [۱] ۷
- شکل ۵-۱ متغیرهای مختلف جوشکاری اصطکاکی درایو مستقیم [۳] ۸
- شکل ۶-۱ متغیرهای مختلف جوشکاری اصطکاکی اینرسی [۳] ۹
- شکل ۷-۱ (a) طرح‌واره تولید گرمای تئوری در فصل مشترک دو سطح در فرآیند RFW (b) گرمای تولید شده در تست تجربی [۸] ۱۲
- شکل ۱-۲ نحوه ارتباط بین Abaqus CAE و Abaqus Scripting [۳۵] ۲۳
- شکل ۲-۲ طرح‌واره مدل المان محدود جوشکاری اصطکاکی دورانی ۲۵
- شکل ۳-۲ (الف) نمودار تنش تسلیم آلیاژ اینکونل ۶۰۰ بر حسب دما در نرخ کرنش‌های مختلف ۲۶
- شکل ۴-۲ (الف) نمودار گرمای ویژه آلیاژهای اینکونل ۶۰۰ بر حسب دما ۲۷
- شکل ۵-۲ منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی آلیاژهای (الف) اینکونل ۶۰۰ (ب) آلیاژ کوار ۲۹
- شکل ۶-۲ برهم‌کنش‌های تعریف شده در محل تماس دو سطح میله ۳۳
- شکل ۷-۲ شرایط مرزی و بارگذاری ۳۴
- شکل ۸-۲ نحوه المان‌بندی قطعات مورد بررسی ۳۵
- شکل ۱-۳ نمونه‌های آماده شده برای انجام عملیات جوشکاری (الف) آلیاژ اینکونل ۶۰۰ (ب) آلیاژ کوار ۴۱
- شکل ۲-۳ دستگاه کشش تک محوره اینسترون ۸۸۰۲ سروهیدرولیک ۴۲
- شکل ۳-۳ طرح‌واره دستگاه ساخته شده برای جوشکاری اصطکاکی دورانی ۴۵

- شکل ۳-۴ دستگاه ساخته شده برای انجام تست جوشکاری اصطکاکی دورانی ۴۶
- شکل ۳-۵ تجهیز مورد استفاده تست کشش نمونه جوشکاری شد ۴۷
- شکل ۴-۱ بررسی فرض نرمال بودن و استقلال داده‌ها در فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی ۵۱
- شکل ۴-۲ تاثیر متغیرهای فشار اصطکاکی، فشار آهنگری و سرعت دورانی در جوشکاری اصطکاکی دورانی ۵۴
- شکل ۴-۳ اثرات متغیرهای طراحی فرآیند جوشکاری در گراف سه بعدی ۵۵
- شکل ۴-۴ اثر متغیر فشار اصطکاکی و فشار آهنگری در سرعت ثابت ۵۶
- شکل ۴-۵ اثر متغیر سرعت دورانی و فشار اصطکاکی در فشار آهنگری ثابت برابر 500 MPa ۵۷
- شکل ۴-۶ اثر متغیر سرعت دورانی و فشار آهنگری در فشار اصطکاکی ثابت ۵۷
- شکل ۴-۷ متغیرهای بهینه فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی ۵۸
- شکل ۴-۸ توزیع دما در کل فرآیند جوشکاری بعد از الف) 0.5 ثانیه ب) 2 ثانیه ج) 4 ثانیه و د) 5 ثانیه ... ۵۹
- شکل ۴-۹ نمودار دمای بیشینه فرآیند در طی زمان جوشکاری ۶۰
- شکل ۴-۱۰ بررسی نواحی تسلیم شده در انتهای فرآیند ۶۱
- شکل ۴-۱۱ توزیع کرنش پلاستیک و شکل پلیسه ایجاد شده الف) ابتدای فرآیند ب) 0.5 ثانیه بعد از اعمال فشار آهنگری ج) 2 ثانیه بعد از فرآیند د) انتهای فرآیند ۶۲
- شکل ۴-۱۲ نمودار جابجایی ΔL (کوتاه‌شوندگی طولی) در سرعت 6000 RPM ۶۳
- شکل ۴-۱۳ تغییرات میزان جابجایی ΔL محوری در فشارهای مختلف اصطکاکی ۶۵
- شکل ۴-۱۴ مقایسه سه آزمون تجربی انجام شده برای بررسی جابجایی ΔL محوری ۶۵
- شکل ۴-۱۵ مقایسه آزمون تجربی و عددی برای بررسی مقدار پلیسه ایجاد شده ۶۶
- شکل ۴-۱۶ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های جوشکاری شده الف) نمونه با فشار اصطکاکی 300 MPa ب) نمونه با فشار اصطکاکی 200 MPa و ج) نمونه با فشار اصطکاکی 100 MPa ۶۸
- شکل ۴-۱۷ الف) نمونه جوشکاری شده اصطکاکی دورانی با کیفیت مناسب ب) نمونه های اولیه دچار شکست شده با کیفیت جوش پایین بعد از فرآیند کشش ۶۹

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی آلیاژهای مورد استفاده در شبیه‌سازی ۲۸
- جدول ۲-۲ ضرایب مدل ساختاری جانسون-کوک برای آلیاژ اینکونل ۶۰۰ و کوآر [۳۶] ۳۰
- جدول ۳-۲ سطوح در نظر گرفته شده برای متغیرهای فرآیند ۳۶
- جدول ۴-۲ آزمون‌های طراحی شده برای فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی ۳۷
- جدول ۱-۳ محدوده ترکیب شیمیایی آلیاژ اینکونل ۶۰۰٪ [۳۶] ۴۰
- جدول ۲-۳ خصوصیات مکانیکی آلیاژ اینکونل ۶۰۰ [۳۶] ۴۰
- جدول ۳-۳ ترکیب شیمیایی آلیاژ کوآر ٪ [۳۶] ۴۰
- جدول ۴-۳ خصوصیات مکانیکی آلیاژ کوآر [۳۶] ۴۰
- جدول ۱-۴ متغیر پاسخ جابجایی ΔL برای آزمون طراحی شده RSM ۵۰
- جدول ۲-۴ تحلیل واریانس برای متغیر پاسخ جابجایی ΔL ۵۳
- جدول ۳-۴ مشخصات آزمون تجربی در فشارهای مختلف ۶۴

فهرست نشانه‌ها

B, A	ضرایب ثابت معادله جانسون-کوک	ρ	چگالی ماده
n	توان کار سختی	C_p	گرمای ویژه
m	ثابت ماده جانسون-کوک	k	رسانایی گرمایی
Δt	زمان لحظه‌ای	T	دما
p	فشار اعمالی	T	زمان
η	نسبت تولید گرما بر اثر اصطکاک	U	کوتاه‌شوندگی
$\dot{s}$	نرخ لغزش لحظه‌ای	$\dot{S}$	نرخ تولید حرارت
		$\bar{\sigma}$	تنش مؤثر
		$\dot{\varepsilon}$	نرخ کرنش مؤثر
		α	بازده حرارتی تغییرشکل
		P_N	فشار محوری
		$\omega(t)$	سرعت چرخش لحظه‌ای
		R	شعاع
		μ	ضریب اصطکاک
		q	نرخ تولید حرارت
		rR	قطر
		τ_y	تنش تسلیم برشی
		τ_f	تنش تسلیم اصطکاکی
		E	انرژی
		I	ممان اینرسی
		S	سرعت چرخ لنگ
		C	ثابت تبدیل
		ε_p	کرنش مومسان
		$\varepsilon_p / \varepsilon_0$	نرخ کرنش مومسان
		Tm	دمای ذوب
		Tr	دمای محیط

مقدمه

جوشکاری اصطکاکی^۱ یک فرآیند جوشکاری حالت جامد است. جوشکاری حالت جامد فرآیندی است که در آن اتصال جوشی زیر درجه حرارت ذوب فلز پایه شکل می‌گیرد، در نتیجه عمل اکسیداسیون رخ نداده و به گاز محافظ، محیط خنثی و مواد مصرفی نیاز نیست. روش‌هایی مانند جوشکاری اصطکاکی، جوشکاری انفجاری، جوشکاری اولتراسونیک و جوشکاری آهنگری از دسته فرآیندهای جوشکاری حالت جامد محسوب می‌شوند. سه پارامتر مهم زمان، درجه حرارت و فشار هر یک به تنهایی یا با هم اتصال جوشی را پدید می‌آورند. با توجه به این که در این فرآیندها ماده‌ی ذوب شده وجود ندارد یا بسیار محدود است، عیوب کمتری در مقایسه با روش‌های ذوبی پیش خواهد آمد. در این روش‌ها منطقه متأثر از حرارت^۲ که منشأ بسیاری از عیوب بوده و از دلایل اصلی کاهش خواص مکانیکی است، بسیار کوچک می‌باشد. مواد ناهمسان به‌راحتی جوش داده می‌شوند و ضریب هدایت گرمایی در مقایسه با روش‌های ذوبی کمتر اهمیت دارد.

^۱ Friction Welding (FW)

^۲ Heat Affected Zone (HAZ)

۱-۱- معرفی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی

فن‌آوری FW، بر اساس تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی گرمایی است که انرژی مکانیکی را هم‌زمان صرف تغییر شکل مومسان و تولید گرما می‌کند. در واقع یک سطح صاف از بسیاری پستی بلندی‌های میکروسکوپی تشکیل شده است. وقتی این سطوح روی هم لغزیده شوند، اصطکاک یا مقاومت در برابر حرکت بین این سطوح باعث گرم شدن منطقه تماس شده و سرانجام موجب افزایش درجه حرارت و خمیری شدن دو سطح در تماس با هم می‌شود. تحقیق بر روی این روش در روسیه، آمریکا و ژاپن حدود سال ۱۹۶۰ آغاز شد و اولین ماشین FW در مقیاس صنعتی در سال ۱۹۶۳ ساخته شد و پس از آن با توجه به مزایای بسیار آن در صرفه جویی در هزینه از طریق کاهش مواد، زمان و انرژی و از طرفی افزایش کیفیت، قابلیت جوش قطعات غیر هم جنس و ... به صورت گسترده ای مورد استفاده قرار گرفت.

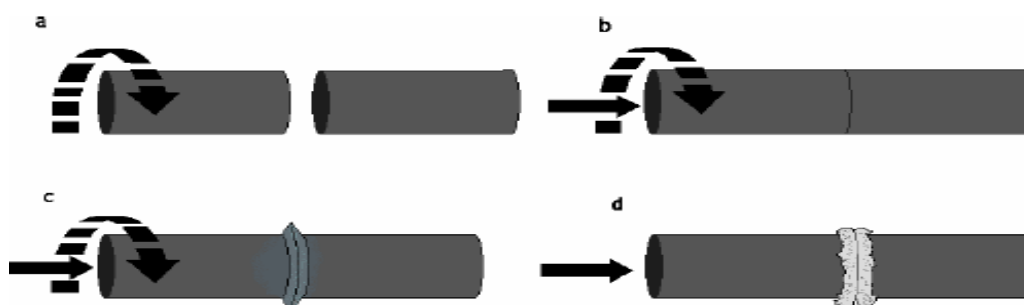
FW عموماً به سه دسته اصطکاکی غیر دورانی، اصطکاکی دورانی و اصطکاکی اغتشاشی تقسیم بندی می‌شود. جوشکاری اصطکاکی دورانی^۱ اولین فرآیند از جوش اصطکاکی بود که به صورت تجاری مورد استفاده قرار گرفت. در این فرآیند حرارت ایجاد شده در اثر حرکت سریع و تحت فشار یک یا هر دو قطعه نسبت به یکدیگر باعث گرم و در نتیجه نرم شدن مواد در محل تماس می‌شود که پس از توقف حرکت و قبل از سرد شدن برای داشتن اتصال جوشی با استحکام مناسب باید با فشار بیشتری موسوم به فشار آهنگری^۲ دو قطعه را به هم فشار داد. نتیجه این عملیات اتصال جوشی خواهد بود که در حالت جامد شکل گرفته و مشکلات جوش‌های ذوبی را نخواهد داشت. این فرآیند برای فلزات همسان و غیر همسان استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱-۱ نشان داده می‌شود، این فرآیند شامل چهار مرحله می‌باشد که عبارتند از: الف) قطعات قرار گرفته در دستگاه جوشکاری که یکی در طرف اسپیندل و دیگری یا به صورت ثابت نگه داشته شده یا در جهتی مخالف با جهت اسپیندل دوران می‌کند؛ ب) دو

^۱ Rotational Frictional Welding (RFW)

^۲ Forging Force

قطعه در سرعت دورانی کنترل شده در تماس با یکدیگر قرار می گیرند؛ ج) دوران و تماس قطعات با یکدیگر سبب تولید گرما و در نهایت خمیری شدن مواد می شود؛ د) فشار آهنگری به صورت محوری با یک مقدار مشخص در زمان کافی اعمال می شود تا اتصالی قابل قبول شکل گیرد.

RFW دارای دو مکانیسم اصلی برای جوشکاری قطعات است که عبارتند از: جوشکاری اصطکاکی مداوم^۱ و جوشکاری اصطکاکی اینرسی^۲. در جوشکاری اصطکاکی مداوم یک قطعه توسط فک دستگاه ثابت نگه داشته می شود و قطعه دوم در تماس با آن و با یک فشار اصطکاکی شروع به چرخیدن می کند. در زمان مشخص و معینی دستگاه متوقف می شود و فشار آهنگری اعمال شده، باعث می شود که دو قطعه در مقیاس میکروسکوپی در هم فرو روند. فشار آهنگری باید بلافاصله پس از توقف اعمال شود. اگر این فشار قبل از توقف اعمال شود ایجاد نیروی پیچشی کرده که این می تواند منجر به شکست اتصال شود.



شکل ۱-۱ طرح‌واره‌ی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی (a) مرحله چرخش (b) اعمال فشار اصطکاکی و گرم شدن نمونه (c) انتهای مرحله اصطکاکی (d) اعمال فشار آهنگری و تکمیل فرآیند [۱]

در این بخش توصیف دقیقی از پدیده جوشکاری اصطکاکی دورانی ارائه می گردد. مسلماً جوشکاری اصطکاکی می‌بایست همانند هر رخداد دیگری بطور کامل و دقیق تعریف شده تا ضمن تفکیک این جوشکاری از سایر موارد

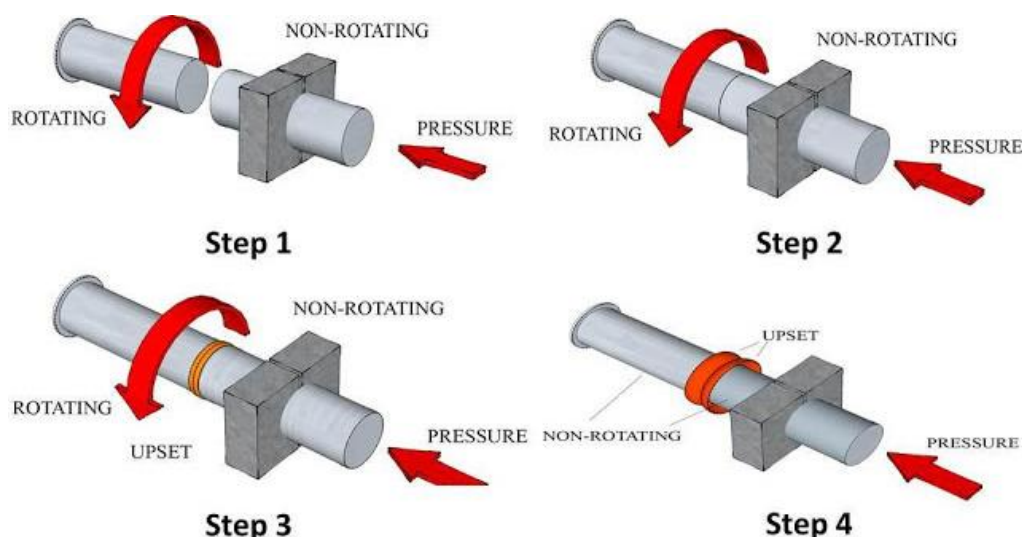
^۱ Continuous FW

^۲ Inertia drive FW

مشابه، امکان دسته‌بندی انواع جوشکاری اصطکاکی دورانی بر اساس معیارهای علمی مهیا گردد. همچنین در این بخش به معادلات مربوط به این فرآیند و روابط مورد استفاده اشاره می‌شود.

۱-۱-۱- جوشکاری اصطکاکی دورانی

یک فرآیند جوشکاری حالت جامد است که از طریق اصطکاک مکانیکی بین دو سطح در تماس با هم، تولید گرما کرده و به کمک یک فشار محوری سطح دو جسم به هم پیوند می‌خورند. جزئیات مشخصی از منطقه‌ی پیوند وجود ندارد ولی سیکل جوشکاری را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد: مرحله‌ی مالش یا اصطکاک و مرحله‌ی اعمال فشار آهنگری. گرمای جوشکاری در مرحله‌ی اول رشد یافته و ادغام و خنک شدن در مرحله‌ی دوم صورت می‌پذیرد. مراحل بالا با اتصال سطوح دو قطعه (همسان یا غیر همسان) آغاز می‌شود. زمانی که قطعات در تماس لب‌به‌لب قرار می‌گیرند با اعمال فشار ثابتی بین دو قطعه، مالش بین سطوح اتفاق می‌افتد، این در حالی است که محور با سرعت مشخصی در حال دوران می‌باشد. شکل ۲-۱ طرح‌واره جوشکاری اصطکاکی دورانی را نمایش می‌دهد.



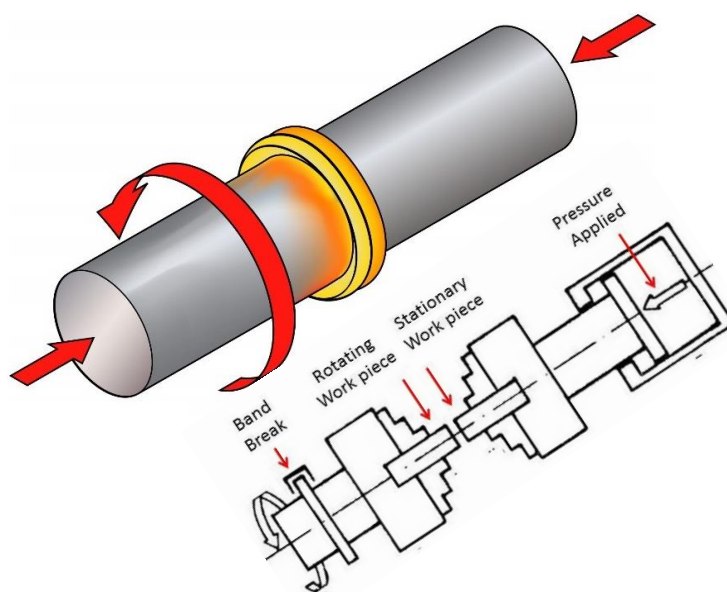
شکل ۲-۱ مراحل چهار گانه فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی [۲]

در طول این مراحل با مکانیزم برشی، سطوح قطعات در مرز مشترکشان در حال انتقال از یک سطح به سطح دیگر اند. همانطور که مالش ادامه دارد، گشتاور و دمای لایه‌ای افزایش می‌یابد. اندازه سطوح در حال انتقال تا زمانی که

به یک لایه پیوسته از فلز پایه تبدیل نشده باشند، در حال رشد می‌باشد. در طی این مرحله، با افزایش گشتاور، فلز در محل تماس گرم می‌شود سپس گشتاور به یک مقدار کمینه‌ای کاهش پیدا می‌کند و ثابت نگه داشته می‌شود و هنگامی که محورها به صورت پیوسته به هم نزدیک می‌شوند، فلز در سطح تماس به بیرون رانده می‌شود. در انتهای فرآیند گرمایشی، فشار آهنگری به قطعه کار اعمال می‌گردد و اتصال دو سطح تماس اتفاق می‌افتد. گشتاور پس از آن کاهش می‌یابد و سرعت چرخش به صفر می‌رسد. عواملی مانند خواص فیزیکی و مکانیکی، انرژی سطح، ساختار بلوری، حلالیت متقابل و ترکیبات بین فلزات در مکانیسم پیوند نقش بسزایی دارند. سه متغیر مهم این فرآیند سرعت دورانی، فشار اصطکاکی و فشار آهنگری می‌باشد. سرعت دورانی به جنس مواد جوشکاری شده و قطر آنها در محل فصل مشترکشان وابسته است. فشار اصطکاکی برای گرم کردن محل اتصال و فشار آهنگری دارای محدوده‌ی گسترده‌ای می‌باشند. انتخاب فشارهای اصطکاکی و آهنگری به عواملی مثل جنس و خواص و ابعاد فلزات جوشکاری شونده و هندسه‌ی جوش وابسته است. زمان حرارت‌دهی، مدت زمانی است که دو سطح در تماس مالشی هستند و هنوز فشار آهنگری اعمال نشده است. این زمان برای ما مهم می‌باشد از این جهت که اگر این زمان زیاد انتخاب گردد باعث کاهش بهره‌وری و افزایش مواد زائد در گرده‌ی جوش شده و همچنین این امکان هم وجود دارد که قطعات در نقاطی به هم جوش نخورند. این زمان را به دو صورت می‌توان کنترل کرد: نخست اینکه با قرار دادن یک دستگاه زمان سنج که در انتهای یک زمان از پیش تعیین شده چرخش محور متوقف شود و دوم این که وقتی کوتاه‌شدگی محور به یک اندازه‌ی از پیش تعیین شده برسد، چرخش محور متوقف می‌شود.

بسته به روشی که انرژی جنبشی به گرمای اصطکاکی تبدیل می‌شود، این فرآیند به دو دسته عمده تقسیم‌بندی می‌شوند. اولین نوع از آن جوشکاری اصطکاکی درایو مستقیم^۱ است. که در شکل ۱-۳ طرح‌واره این فرآیند نمایش داده شده است.

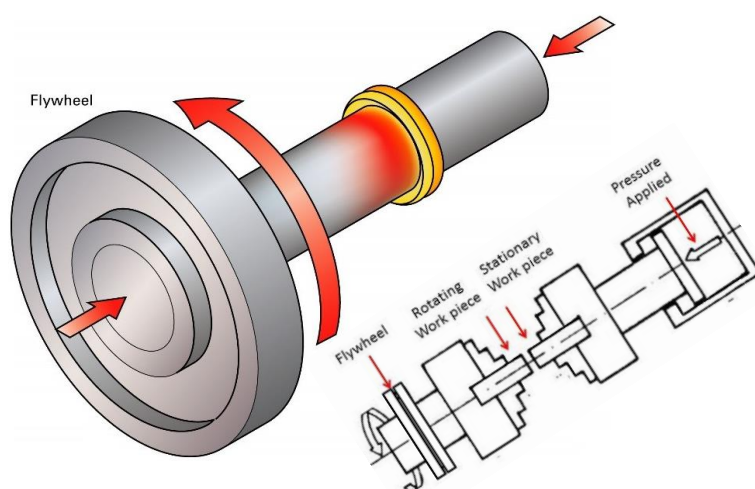
^۱ Continuous/Direct Drive Friction Welding - CDFW



شکل ۳-۱ طرح‌واره جوشکاری اصطکاکی درایو مستقیم^[۱]

دومین نوع از این فرآیند، جوشکاری اصطکاکی اینرسی^۱ می‌باشد. شکل ۴-۱ طرح‌واره فرآیند جوشکاری اصطکاکی اینرسی را نشان می‌دهد.

^۱ Inertia Friction Welding - IFW

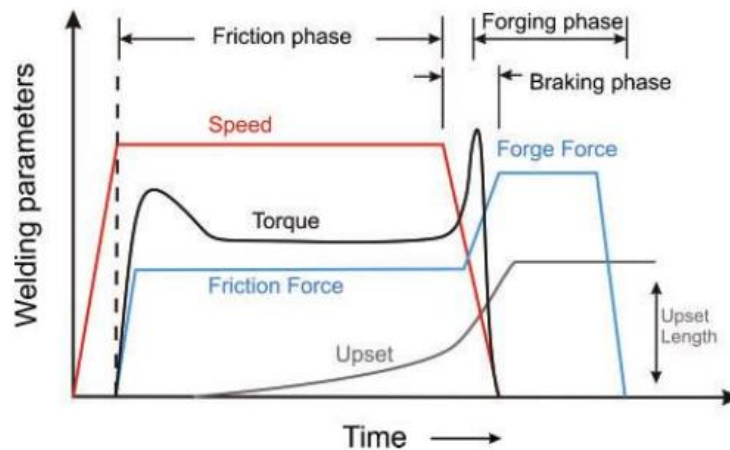


شکل ۱-۴ طرح‌واره فرآیند جوشکاری اصطکاکی اینرسی [۱]

۱-۲- متغیرهای ورودی فرآیند

کیفیت جوش تولید شده به وسیله جوشکاری اصطکاکی توسط تعدادی متغیر تعیین می شود. کیفیت جوش می تواند توسط متغیرهای از پیش تعیین شده کنترل شود. با این وجود بین متغیرهای جوش اصطکاکی درایو مستقیم و جوش اصطکاکی اینرسی تفاوت هایی وجود دارد.

متغیرهای اصلی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی درایو مستقیم سرعت چرخش، فشار اصطکاکی و فشار آهنگری هستند [۲۰]. این متغیرها میزان انرژی ورودی به محل جوش و نرخ تولید گرما در سطح میانی محل جوش را تعیین می کنند. لازم به ذکر است که نرخ تولید گرما در سطح واسط ثابت نیست و در مراحل مختلف چرخه جوش متفاوت است. در حین جوشکاری، کوتاه شونده گی محوری و مقاومت اصطکاکی در برابر نیروی چرخشی دستخوش تغییراتی می شود. رابطه بین متغیرهای مختلف در جوشکاری اصطکاکی درایو مستقیم در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.

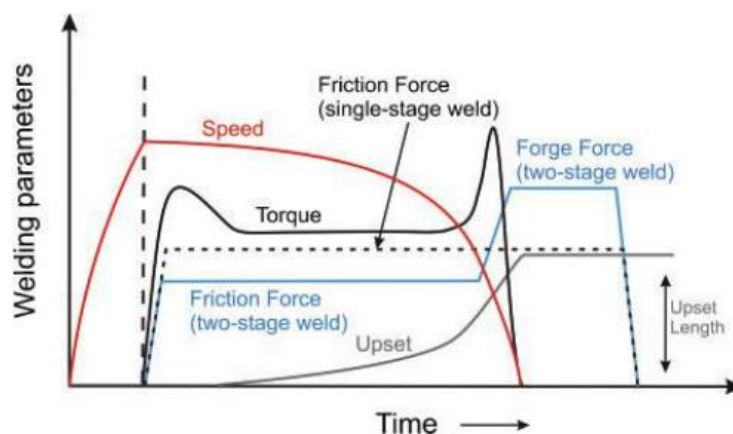


شکل ۱-۵ متغیرهای مختلف جوشکاری اصطکاکی درایو مستقیم [۳]

با توجه به شکل منحنی گشتاور اصطکاک، فرآیند را می‌توان به سه مرحله تقسیم‌بندی کرد [۴]. در فاز اولیه، بعد از شروع فرآیند گشتاور به سرعت به مقدار بیشینه خود می‌رسد. سپس به تدریج به یک مقدار تعادلی کاهش می‌یابد. این بالا رفتن سریع گشتاور و کاهش تدریجی آن، با به هم پیوستن و شکستن اتم‌ها در محل تماس و متعاقباً نرم شدن ماده در سطح تماس در اثر گرمای اصطکاک مالشی همراه است. گشتاور اصطکاکی در فاز دوم تا حدودی ثابت باقی می‌ماند. این نشان دهنده این موضوع است که فرآیند به یک تعادلی بین نرخ کارسختی و دمای نرم‌شوندگی رسیده است. فشرده شدن یا آهنگری در فاز سوم صورت می‌پذیرد که این مرحله از زمان شروع ترمز آغاز می‌شود. نیروی محرکه چرخش اسپیندل بلافاصله قطع می‌شود ولی همچنان چرخش وجود دارد. کاهش سرعت محور بستگی به زمان ترمز دارد. فشار محوری در این مرحله به دلیل بهبود فرآیند فشرده سازی، افزایش می‌یابد. گشتاور اصطکاکی بعد از این مرحله مجدد افزایش می‌یابد و قبل از اینکه به مقدار صفر افت پیدا کند، مقدار بیشینه دیگری به خود می‌گیرد. این مقدار بیشینه در کاربردهای مختلف با فشار محوری و سرعت مختلف، متفاوت است. تحت شرایط خاصی، این قله نهایی را می‌توان با به تأخیر انداختن شروع فشار آهنگری حذف کرد.

در جوشکاری اصطکاکی اینرسی سه متغیر قابل کنترل وجود دارد. جرم چرخ لنگ، سرعت چرخشی و نیروی محوری این سه متغیر می‌باشند. اینرسی حاصل از اجزای چرخشی - ترکیب چرخ و لنگ را می‌توان با تغییر اندازه لنگ تغییر داد. سرعت چرخش به صورت پیوسته در کل فرآیند اصطکاک متفاوت است. نرخ کاهش سرعت به چرخ

لنگ و نیروی محوری بستگی دارد. در ادامه شرح فرآیند همانند فرآیند جوشکاری درایو مستقیم است که در شکل ۶-۱ توضیح داده شد. شکل ۶-۱ رابطه بین متغیرهای مختلف در جوشکاری اصطکاکی اینرسی را نشان می‌دهد.



شکل ۶-۱ متغیرهای مختلف جوشکاری اصطکاکی اینرسی [۳]

در این فرآیند بر خلاف فرآیند درایو مستقیم، مدت زمان چرخش و زمان آهنگری در مرحله سوم از پیش تعیین شده نیست بلکه توسط سه متغیر کنترل می‌شود. اگر نیروی محوری در فازهای ۲ و ۳ متفاوت باشد، فرآیند جوشکاری دو مرحله‌ای نامیده می‌شود، در غیر این صورت فرآیند جوشکاری یک مرحله‌ای است.

هر دو فرآیند (اینرسی و درایو مستقیم) پیوندهای حالت جامد بسیار مناسبی را تولید می‌کنند. استفاده از هر کدام از این فرآیندها دارای مزیت و محدودیت‌هایی است. با این حال این مزیت‌ها عمومی و کلی نیستند بلکه به کاربردها (اندازه، ترکیب مواد و ملاحظات هندسی) بستگی دارند [۵]. به عنوان مثال به سرعت چرخشی و فشار محوری پایین‌تری در جوشکاری درایو مستقیم نسبت به جوشکاری اینرسی نیاز است. در جوشکاری اصطکاکی درایو مستقیم آزادی عمل بیشتری در انتخاب متغیرهای فرآیند است، زیرا زمان آهنگری (زمان چرخش)، یا فاصله کوتاه شوندگی از پیش تعیین شده و مرحله آهنگری (فشرده‌سازی) می‌تواند به وسیله متغیرهایی چون زمان ترمز، نیروی محوری و زمان آهنگری کنترل گردد. از آنجایی که انرژی منتقل شده به سطح مشترک در جوشکاری اصطکاکی اینرسی بسیار سریعتر از جوشکاری درایو مستقیم است، باعث ایجاد شیب حرارتی تندتری در فصل مشترک می‌شود که این خود باعث باریک‌تر شدن منطقه متأثر از حرارت (HAZ) می‌شود.

سایر عوامل مؤثر بر فرآیند جوشکاری اصطکاکی می‌توانند شرایط سطح، هندسه نمونه اولیه، خصوصیات مواد، نرخ کوتاه شونده‌گی محوری و ضریب اصطکاک باشند.

۱-۲-۱- سرعت چرخش

سرعت چرخش حساس‌ترین متغیر فرآیند است زیرا می‌تواند در طیف گسترده‌ای از مقادیر زمان اصطکاکی (زمان گرم‌شدن) و فشار فرآیند تغییر کند. به عنوان مثال برای فولادها، سرعت محیطی بین ۷۵ m/min تا ۲۱۵ m/min پیشنهاد می‌شود [۲۳]. به‌طور کلی سرعت‌های بالا بخاطر ایجاد گرمای جوش پایین، بیشتر برای مواد حساس به گرما مانند فولادهای سخت‌شونده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جوشکاری اینرسی، مقدار انرژی ذخیره شده در فلاویل توسط سرعت مشخص و کنترل می‌شود.

۱-۲-۲- فشار اصطکاکی

معمولاً فشار اصطکاکی به تدریج به محل اتصال دو فلز اعمال می‌شود و هدف آن غلبه بر ماکزیمم گشتاور چرخشی اولیه اعمالی به محل جوش است. به عنوان مثال برای فولادهای کربنی، فشار اصطکاکی در حدود ۷۰ MPa در ناحیه سطح مشترک مورد نیاز است تا یک جوش خوب شکل بگیرد [۲۱].

۱-۲-۳- فشار آهنگری

بعد از جدا شدن موتور محرک از محور چرخش قطعه کار، فشار آهنگری برای تکمیل فرآیند جوش اعمال می‌شود. به عنوان مثال فشار آهنگری برای نمونه‌ای از جنس فولاد کربنی برابر با ۱۴۰ MPa در فصل مشترک سطوح می‌باشد [۲۱].

۳-۱- روابط تحلیلی فرآیند

برای تجزیه و تحلیل جوشکاری اصطکاکی، فرض شده است تولید گرما و فشار در سراسر فصل مشترک دو قطعه یکنواخت هستند. در جوشکاری اصطکاکی، درجه حرارت در منطقه جوش به دلیل اصطکاک و تغییرشکل پلاستیکی به شدت افزایش می‌یابد [۶]. برای محاسبه پروفایل درجه حرارت، تجزیه و تحلیل انتقال حرارت صورت گرفته در سطح تماس دو قطعه با در نظر گرفتن گرمای تولید شده در اثر اصطکاک بین سطوح تماس، گرمای تولید شده در اثر تغییرشکل لایه‌های سطوح در تماس و همچنین گرمای منتقل شده به محیط از سطوح در تماس با هم صورت می‌پذیرد. برای ماده‌ای همگن و همسانگرد با خصوصیات وابسته به دما، معادله انتقال حرارت با فرض پایستاری انرژی به صورت زیر می‌باشد [۶]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x_i} + \dot{S} \quad (1-1)$$

که در این معادله ρ چگالی ماده، C_p گرمای ویژه، k رسانایی گرمایی، T دما، t زمان و x_i با مقادیر $i=1,2$ و ۳ به ترتیب جهات محور مختصات x ، y و z می‌باشد. بخش همرفت در سمت راست معادله کوتاه‌شوندگی نمونه در هنگام جوشکاری اصطکاکی را نشان می‌دهد، که به صورت معمول توسط گرادیان دما و سرعت کوتاه‌شوندگی u قابل محاسبه است. $\dot{S}$ نرخ تولید حرارت به دلیل تغییرشکل پلاستیک در فاصله دورتر از فصل مشترک دو سطح در تماس است که به صورت معادله (۲-۱) محاسبه می‌شود [۶]:

$$\dot{S} = \alpha \bar{\sigma} \dot{\epsilon} \quad (2-1)$$

در این معادله $\bar{\sigma}$ تنش موثر، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش موثر و α بازده حرارتی تغییرشکل پلاستیک است که فرض می‌شود % ۹۵-۹۰ است [۷].

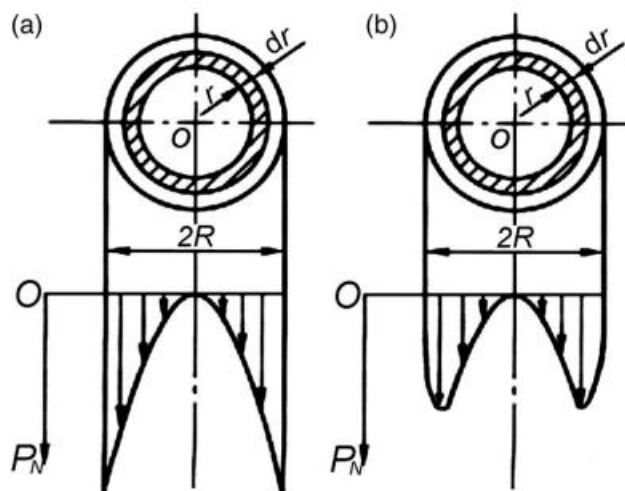
تولید گرما در طی فرآیند RFW معمولاً به عنوان یک فرآیند گرمای اصطکاکی تجربی بیان می‌شود. با توجه به اینکه فشار محوری با P_N مشخص می‌شود، $\omega(t)$ سرعت چرخش لحظه‌ای، نرخ تولید حرارت لحظه‌ای در واحد سطح بین سطوح تماس در فاصله شعاعی r از محور چرخش می‌تواند به شرح زیر باشد [۸]:

$$dq = \mu P_N r \omega(t) \quad (3-1)$$

که در این معادله μ ضریب اصطکاک می‌باشد. از آنجا که سرعت چرخش ω برای CDFW ثابت است، میانگین ورودی حرارت q برای جوشکاری میله به شرح زیر است:

$$q = \frac{2}{3} \pi R^2 \mu P_N \omega \quad (4-1)$$

بر اساس معادله (۴-۱)، حداکثر تولید گرما در سطح مشترک خارجی میله مطابق شکل ۷-۱ خواهد بود.



شکل ۷-۱ (a) طرح‌واره تولید گرمای تئوری در فصل مشترک دو سطح در فرآیند RFW (b) گرمای تولید شده در

تست تجربی [۸]

با این حال، در عمل، فشار اصطکاک اعمال شده به طور مساوی در فصل مشترک سطح تماس توزیع نمی‌شود و همانطور که آزمایشات نشان داده‌اند در مرکز قطعه پایین‌ترین مقدار و فاصله ما بین $1/2R$ تا $2/3R$ حداکثر مقدار تولید گرما شکل ۷-۱ را خواهد داشت [۹]. این اثر باعث کاهش ناهموازی تئوری تولید گرما در RFW می‌شود. در مورد فرآیند IFW، سرعت چرخش ω در طول فرآیند به صورت غیرخطی به دلیل اصطکاک به صفر کاهش می‌یابد.

علاوه بر این، برای ارائه دقیق‌تر فرآیند، ضریب اصطکاک باید به عنوان تابعی غیرخطی از دما، فشار و یا متغیرهای فرآیند بیان شود [۱۰]. روش جایگزین دیگر این است که فرض شود تنش برش اصطکاکی τ_f با تنش تسلیم برشی τ_y برابر است [۱۱]. در چنین حالتی با استفاده از تنش تسلیم فون می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\tau_f = \tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (5-1)$$

از این رو ضریب اصطکاک می‌تواند این گونه بیان شود که:

$$\mu = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}P_N} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (6-1)$$

در صورتی که فرض شود فشار نرمال برابر با تنش تسلیم باشد.

متغیرهای فرآیند که ویژگی‌های یک جوشکاری اینرسی را کنترل می‌کنند، اندازه چرخ لنگ (ممان اینرسی)، سرعت دوران لنگ و فشار محوری است. انرژی جوش به دو متغیر اول وابسته است و بعد از مشخص شدن آن‌ها مقدار آن ثابت باقی می‌ماند. انرژی جنبشی در چرخ لنگ در هر زمان از فرآیند برابر است با:

$$E = \frac{S^2 \cdot I}{C} \quad (7-1)$$

که در این معادله E انرژی بر حسب ژول، I ممان اینرسی بر حسب kg/m^2 ، S سرعت چرخ لنگ بر حسب RPM و C یک ثابت تبدیل است که در یکای SI برابر $182/4$ است.

همانطور که از معادله (۷-۱) مشخص است انرژی با توان دو سرعت متناسب است. از این رو می‌توان سطح انرژی‌های مختلفی را با تغییر دور چرخ‌لنگ بدست آورد. با این ویژگی می‌توان هندسه‌هایی با تفاوت جزئی از هندسه به دست آمده از معادلات را با چرخ‌لنگ موجود جوش داد.

۴-۱- بیان مساله و روش حل

اینکونل ۶۰۰^۱ (Ni ۷۲, Cr ۱۵,۵, Fe ۸) آلیاژی است که در دمای بالا مقاومت به خوردگی بالایی دارد. کوار^۲ (Fe ۵۴, Ni ۲۹, Co ۱۷) آلیاژی است که از آن در اتصالات آب‌بند شده با شیشه استفاده می‌شود. در برخی کاربردهای دما بالا مانند فیدتروهای الکتریکی ولتاژ و دما بالا گاه نیاز به استفاده از قطعاتی است که از اتصال این دو آلیاژ ساخته می‌شود.

زمان کوتاه انجام عملیات جوش و امکان جوش دو ماده غیر همجنس از الزامات انجام این پایان نامه می‌باشد. همچنین نیازمند ساختار محل جوشی با ویژگی‌هایی چون درشت‌دانه نشدن و عدم تشکیل فاز فریت‌دلتا در مرز دانه‌ها از دیگر خصوصیات متالورژیکی مورد نظر در این فرآیند جوشکاری است. پایین نیامدن استحکام مکانیکی اتصال در منطقه HAZ از دیگر ویژگی‌های مکانیکی قطعه تولید شده به روش جوشکاری اصطکاکی دورانی می‌باشد که در عملیات جوشکاری ذوبی شرایط ایجاد شده ماده جوش خورده را از رسیدن به ساختار مورد اطمینان با ویژگی‌های بالا دور می‌کند. در بررسی‌های انجام شده در مورد FRW، قطعات با قطر کم آلیاژهای نیکل اینکونل ۶۰۰ و آهن کوار با این روش انجام نشده است و این پایان نامه در بر دارنده‌ی این روش می‌باشد. همچنین در این پایان نامه برای محاسبه‌ی نرخ تولید گرما در سطح تماس از روش هدایت حرارتی معکوس استفاده می‌شود. محدوده فشار اعمالی برای مرحله‌ی اول یعنی فشار اصطکاکی، بین ۵۰ MPa تا ۱۵۰ MPa می‌باشد که متناسب با جنس قطعه

^۱ Inconel ۶۰۰

^۲ Kovar

کار تعیین می‌شود و محدوده فشار آهنگری در مرحله دوم بین ۲۰۰ MPa تا ۴۰۰ MPa می‌باشد. سرعت چرخشی برای این فرآیند در محدوده‌ی ۴۰۰۰ الی ۶۰۰۰ دور بر دقیقه است که انتخاب آن متناسب با نرخ توزیع حرارت در سطح تماس می‌باشد.

۱-۵- پیشینه ی تحقیق

جوشکاری اصطکاکی مدرن در سال ۱۹۶۰ در ایالات متحده شروع شد. بیشتر تلاش‌های اولیه بر روی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی برای کاربردهایی مثل صنعت خودرو و صنایع هوافضا بوده است. برای محاسبه توزیع دما، ویل [۱۲] در سال ۱۹۵۹ یک مدل تحلیلی برای محاسبه توزیع دما در محل جوش ارائه کرد که در آن ضریب اصطکاک را به صورت معکوس متناسب با مربع سرعت خطی در نظر گرفت. محاسبات او نشان داد که حداکثر دمای ایجاد شده در محل جوشکاری برای فولاد کم کربن برابر 1100°C می‌باشد. او معتقد بود که فلز مذاب در فرآیند جوشکاری اصطکاکی ایجاد نمی‌شود. اسلوتز [۱۳] اظهار داشت که اتصالات پیوندی با فرآیند جوش اینرسی نتیجه‌ای از اختلاط مکانیکی یک لایه نازک از مولکول‌ها در هر طرف رابط است. همچنین وانگ و ناگاپان [۱۴] و چن [۱۵] مفاهیم مکانیک اولیه را برای مدل سازی جوش اصطکاکی اینرسی ایجاد کردند. موال و ماسونی [۱۶] در سال ۱۹۹۵ به بررسی المان محدود جوشکاری اصطکاکی دورانی (اینرسی) دو قطعه مشابه پرداختند. در مدل حرارتی- مکانیکی آن‌ها آلیاژ پایه نیکلی (NK1/CDAT) مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از مقایسه کار خود با نتایج تجربی مشاهده کردند که شبیه‌سازی المان محدود آن‌ها تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. ویکرام و همکاران [۱۷] با استفاده از روش تعادل انرژی به شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی (اینرسی) پرداختند. جنس فلزات مورد استفاده در بررسی آنان اینکونل ۷۱۸ و فولاد ۱۰۴۵ بوده است. ژانگ و همکاران [۱۸] به مدل سازی المان محدود ۳ بعدی جوشکاری اصطکاکی درایو مستقیم پیوسته با استفاده از مدل صلب- ویسکوپلاستیک پرداختند. آنان آزمایشات تجربی خود را بر روی سوپر آلیاژ GH۴۱۶۹ انجام دادند. زیمرمن و همکاران [۱۹] به مدل سازی نفوذ و عملیات ترمومکانیکی جوشکاری اصطکاکی فلز- سرامیک پرداختند. آنان در مطالعه خود دما،

فشار و تغییر شکل منطقه جوش را مورد بررسی قرار دادند. در پایان به این نتیجه رسیدند که با ایجاد یک لایه میانی از اتم‌های فلز و سرامیک باعث ایجاد پیوند بین آن‌ها می‌شود. کان و همکاران [۲۰] به مدل‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی با استفاده از برنامه Quick-Field پرداختند. از فولاد با کربن متوسط ۱۰۴۰ برای شبیه‌سازی و تست تجربی استفاده کردند. مدل‌سازی عددی کوپل حرارتی- مکانیکی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اینرسی اینکونل ۷۱۸ توسط بو و ليو [۲۱] صورت پذیرفت. آنان در مطالعه خود تحول میدان حرارتی و الگوی تغییر شکل محل جوش را پیش‌بینی کردند. ردی و رامانا [۲۲] به بررسی نقش نیکل بین لایه‌ای در جوشکاری اصطکاکی دو فلز ناهم‌جنس فولاد متخلخل و فولاد آلیاژی کم کربن پرداختند. دامادرام و همکاران [۲۳] به بررسی میکروساختار و خواص مکانیکی میله‌های آلیاژی اینکونل ۷۱۸ قبل و بعد از عملیات جوشکاری اصطکاکی پرداختند. لو و همکاران [۲۴] یک روش هیبریدی جدید برای جوشکاری اصطکاکی میله‌های غیر همجنس ابداع کردند. آنان با استفاده از جریان برق باعث شدند که جوش با خواص بهتری ایجاد شود و همچنین تاثیر بین لایه‌ای در یک طرف جوش کاملاً از بین برود. جنس فلزات مورد استفاده آنان سوپر آلیاژ پایه نیکلی K۴۱۸ و فولاد آلیاژی ۴۲CrMo بود. راجش و همکاران [۲۵] به شبیه‌سازی عددی جریان گرمای ایجاد شده در محل جوش اصطکاکی فلز آلومینیوم و فولاد با کربن متوسط پرداختند. آنان بعد از شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار انسیس به تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و عددی خود رسیدند. مورالیموهان و همکاران [۲۶] خواص منطقه جوش اصطکاکی تیتانیوم- فولاد زنگ‌زن را در فلز بین لایه‌ای نیکل مورد بررسی قرار دادند. آنان در بررسی خود مشاهده کردند که با افزایش فشار آهنگری مقاومت کششی منطقه جوش افزایش پیدا می‌کند. شنباغ و راجش [۲۷] مدل‌سازی عددی جوشکاری اصطکاکی فلز آلومینیوم- مس را برای کاربردهای الکتریکی مورد بررسی قرار دادند. آنان برای شبیه‌سازی خود از نرم‌افزار آباکوس استفاده کردند. لوکاس زویچ [۲۸] به بررسی مدل عددی غیرخطی میدان حرارتی ایجاد شده توسط اصطکاک در فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی پرداخت. هدف اصلی ایجاد یک مدل غیرخطی بر اساس روش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس در فرآیندهای اصطکاکی گرمایشی برای فلزاتی که حساسیت به حرارت دارند، بود. نو و همکاران [۲۹] به بررسی امکان تولید اتصالات فلزی استحکام بالا با جنس مشابه (آلیاژ تیتانیوم) با استفاده از فرآیند

جوشکاری اصطکاکی دورانی پرداختند. آنان نتایج عددی خود را با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار دادند و برای هر کدام از متغیرهای جوشکاری دامنه ایمن بدست آوردند. خسروشاهی و همکاران [۳۰] به شبیه‌سازی المان محدود فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی لوله‌های غیرهم‌جنس پرداختند. لوله‌های مورد استفاده در این مطالعه از جنس ASTM A106-B و AISI ۴۱۴۰ بودند. آنان با استفاده از طرح آزمایش کسری، تاثیر متغیرهای اصلی جوشکاری شامل سرعت دورانی، فشار اصطکاکی، زمان اصطکاکی، فشار آهنگری و زمان آهنگری بر میزان کوتاه‌شوندگی نمونه‌ها بعد از عملیات جوشکاری را مورد بررسی قرار دادند. برای این کار نرم‌افزار المان محدود آباکوس مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی المان محدود تحولات ایجاد شده در سطح تماس نمونه تحت جوشکاری اصطکاکی دورانی با فشار کم توسط لیا و همکاران [۳۱] انجام شده است. آنان از یک روش جدیدی برای بررسی رفتار تماس دینامیکی در سطح تماس مشترک دو میله استفاده کردند. جین و همکاران [۳۲] به بررسی پاسخ سازه فوق آلیاژی A۲۸۶ در برابر فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی پرداختند. آنان در این بررسی به تاثیر سرعت‌های مختلف دورانی پرداختند. محدوده سرعت انتخابی آنان بین ۳۰۰ تا ۲۱۰۰ دور بر دقیقه بود که در این سرعت‌ها خطوط لغزش و متالوژی سطح مورد توجه آنان قرار گرفت. دانگ و همکاران [۳۳] در مطالعه‌ای به بررسی خواص کششی و سطح تماس اتصال آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ و فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ توسط جوشکاری اصطکاکی دورانی پرداختند. این بررسی‌ها روی نمونه جوشکاری شده بعد از انجام عملیات حرارتی صورت گرفته است که ناهمگونی خواص کششی نمونه در راستای شعاع کاملاً مشهود بود. لیو و فوجی [۳۴] به بررسی اتصال دو فلز ناهمسان از جنس آلیاژ تجاری تیتانیوم (Ti-۶Al-۴V) و فولاد زنگ‌زن ۳۱۶ (SUS ۳۱۶L) در سرعت‌های فوق پایین پرداختند. آنان در بررسی خود توانستند به کیفیت بالای اتصال در فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی برسند.

۱-۶- ساختار پایان نامه

این پایان‌نامه در شش فصل ارائه شده است. گام اول در مطالعه هر فرآیند، شناخت و آشنایی با مفاهیم اولیه آن فرآیند است، از این رو در فصل دوم به شناخت دقیق‌تر جوشکاری اصطکاکی دورانی، ویژگی‌های آن و متغیرهای مختلف توصیف‌کننده‌ی خصوصیات این روش پرداخته می‌شود. در فصل سوم مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار

المان محدود آباکوس شرح داده شده است. همچنین مدل ساختاری، نوع المان بکار رفته در فضای نرم افزار توصیف شده است. همچنین در مورد جزئیات مسأله مورد بررسی و ساده سازی ها و فرضیات مورد استفاده بحث شده است. در فصل چهارم به توضیح پیاده سازی مسأله برای تست تجربی پرداخته می شود. در این بخش به نحوه ساخت دستگاه و چگونگی کار با دستگاه برای انجام تست پرداخته می شود. در فصل پنجم به بررسی نتایج بدست آمده از تأثیر متغیرهای مختلف جوشکاری بر روی منطقه جوش پرداخته شده است. در فصل ششم به بیان نتیجه های بدست آمده از این پایان نامه پرداخته شد و در ادامه چند پیشنهاد به منظور بررسی کامل تر این موضوع ارائه شده است.

تحلیل المان محدود

امروزه برای همه مهندسين استفاده از فضای مدل سازی و شبیه سازی یک ضرورت است. انتظار می رود یک مهندس بتواند از بسته های نرم افزاری در حوزه های مختلف علوم مهندسی استفاده کند. چه بسا در گذشته هزینه های زیادی را متحمل می شدند زیرا که ابزارهای شبیه سازی در اختیار نبود. امروزه با استفاده از روش های عددی می توان اولاً با سرعت بیشتر و ثانياً با هزینه های کمتر یک پدیده یا فرآیند را مورد بررسی قرار داد.

حوزه جوشکاری پیچیدگی خود را دارد. این حوزه به دلیل تاثیر عامل حرارت و فشار به طور همزمان باعث پیچیدگی در حل عددی این فرآیند شده است. در حوزه مکانیک نرم افزارهای مختلفی وجود دارد که از جمله می توان به نرم افزارهای المان محدود آباکوس، انسیس، ال اس داینا و ... اشاره کرد که یک مسأله پیچیده را با روش گسسته سازی های موجود به یک مدل ساده تر تبدیل کرده و به حل آن می پردازد. نرم افزار آباکوس با توجه به قابلیت های خاص و متفاوت آن و همچنین قدرت حل مسائل با درجه غیر خطی بالا و حرارتی و نیز با الگوریتم های عددی مختلف بکار رفته در آن، برای شبیه سازی در این پایان نامه انتخاب شده است.

با بیان مقدمه فوق، در این فصل با استفاده از اسکریپت که قابل فراخوانی توسط نرم‌افزار آباکوس می‌باشد به بررسی و تحلیل فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی دو میله با قطر و جنس متفاوت پرداخته می‌شود. این دو میله یکی از جنس اینکونل ۶۰۰ و دیگری کوار می‌باشد.

۲-۱- نرم‌افزار آباکوس

این نرم‌افزار برای اولین بار در صنعت هسته‌ای و اتمی در سال ۱۹۷۸ مورد استفاده قرار گرفت. نرم‌افزار آباکوس^۱ از جمله نرم‌افزارهای قدرتمند مهندسی به کمک رایانه در زمینه تحلیل به روش اجزاء محدود^۲ در بازار است. آباکوس قابلیت حل مسائل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدلسازی غیر خطی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار دارای مجموعه المان‌های بسیار گسترده‌ای است که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این المان‌ها مدل کرد. نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس محصولات مختلفی از جمله آباکوس استاندارد^۳، آباکوس صریح^۴، Abaqus/CAE^۵، شبیه‌سازی دینامیک سیالات^۶ را در دل خود جای داده است:

آباکوس استاندارد می‌تواند طیف وسیعی از مسائل خطی و غیرخطی از جمله مسائل استاتیکی، انتقال حرارت و الکترونیک را تحلیل کند.

آباکوس صریح امکانات بی‌نظیری برای تحلیل مسائل غیرخطی با شرایط متغیر تماس دارد که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائل دینامیکی گذرا همچون ضربه، انفجار، برخورد و موارد شبه‌استاتیک کارگشا خواهد بود.

^۱ Abaqus

^۲ Finite Element Method - FEM

^۳ Abaqus/Standard

^۴ Abaqus/Explicit

^۵ Complete Abaqus Environment

^۶ Abaqus/CFD

Abaqus/CAE نیز رابط کاربری گرافیکی است که به راحتی و با صرف کمترین زمان، مدل هندسی مناسبی از مسأله ایجاد می‌کند.

۲-۱-۲- کدنویسی در آباکوس

وقتی از محیط کاربری Abaqus/CAE برای ایجاد مدل هندسی و مشاهده نتایج استفاده می‌کنید (در اصطلاح GUI)، دستورات اجرا شده توسط شما پس از هر عملی به شکل یک کد ایجاد و ذخیره خواهد شد. این دستورات حاوی اطلاعاتی از نحوه ایجاد مدل هندسی و تغییر تنظیمات مربوطه در تمامی پنجره‌هایی است که در هر ماژول از آن استفاده کرده‌اید. GUI یا رابط کاربری آباکوس، تمامی دستورات مورد نظر را در یک زبان برنامه‌نویسی شی‌گرا به نام Python ایجاد خواهد کرد. تمامی دستورات ایجاد شده توسط هسته مرکزی یا Kernel آباکوس ترجمه شده و بر اساس تنظیمات ایجاد شده در آن، کاربر نمایش بصری از دستور صادر شده را مشاهده می‌کند. در واقع Kernel مغز متفکر پشت پرده Abaqus/CAE و GUI رابط کاربری بین کاربر و Kernel است.

۲-۱-۲- اسکرپت چیست

مطابق توضیحات بالا اکنون قابل فهم است که تمامی اعمال و دستورات در آباکوس در قالب خطوط دستوری ذخیره می‌شود. به عبارت بهتر، رابط کاربری که از آن استفاده می‌شود تنها یک محیط بصری و گرافیکی است که تبدیل آن به کد پایتون و تفسیر کد ایجاد شده بر عهده هسته مرکزی یا همان مغز متفکر آباکوس است. محیط اسکرپت‌نویسی آباکوس این امکان را برای شما فراهم می‌کند تا به شکل مستقیم با Kernel نرم‌افزار ارتباط برقرار کرده و به نوعی GUI تعبیه شده را فراموش کنید. فایلی که حاوی دستورات محیط اسکرپت‌نویسی آباکوس است یک اسکرپت نامیده می‌شود که می‌توانید از یک اسکرپت در موارد زیر استفاده کنید:

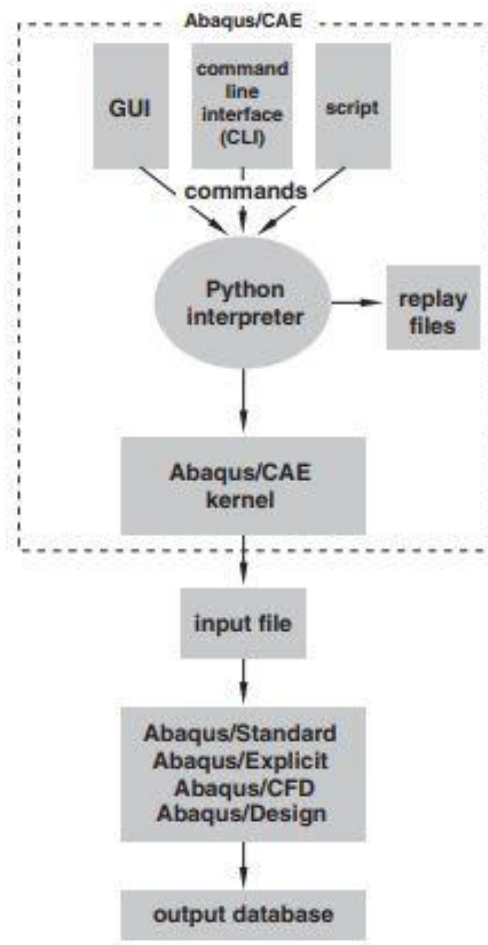
- انجام یک عمل یا دستور تکراری: برای مثال می‌توانید اسکرپتی ایجاد کرد که به محض آغاز Abaqus/CAE کتابخانه کاملی از مواد مهندسی مورد نظر و پرکاربرد را ایجاد کند تا با ورود به ماژول

Property در اختیار کاربر قرار گیرد. همچنین می‌توان اسکریپتی نوشت که در ماژول Job به اجرای حل بپردازد.

- ایجاد یک مسأله پارامتریک: برای مثال، می‌توان اسکریپتی نوشت که به شکل گام به گام به اصلاح مدل هندسی پرداخته و نتایج تحلیل را آنالیز کند. این اسکریپت می‌تواند به نحوی نوشته شود تا به اطلاعات خروجی دسترسی داشته، نتایج مورد نظر را نمایش دهد و داده‌های خاص مورد نظر کاربر را نیز ثبت نماید.
- می‌توان از طریق اسکریپت‌نویسی به ایجاد و اصلاح مدل‌هایی پرداخت که به شکل مستقیم در Abaqus/CAE در حال ایجاد کردن آن می‌باشید. در واقع رابط کاربری اسکریپت‌نویسی در آباکوس، یک API^۱ برای مدل‌های ایجاد شده توسط کاربر است.
- دسترسی به داده‌های خروجی: برای مثال، ممکن است نیاز باشد تا به کمک نتایج تحلیل، پس‌پردازش دلخواهی را ایجاد نمود. می‌توان داده‌های دلخواه خود را در Output Database ثبت کرده و از طریق ماژول Visualization به مشاهده نتایج دلخواه پرداخت.

شکل ۱-۲ نشان دهنده نحوه ارتباط Abaqus CAE و Abaqus Scripting می‌باشد.

^۱ Application Programming Interface - API



شکل ۲-۱ نحوه ارتباط بین Abaqus CAE و Abaqus Scripting [۳۵]

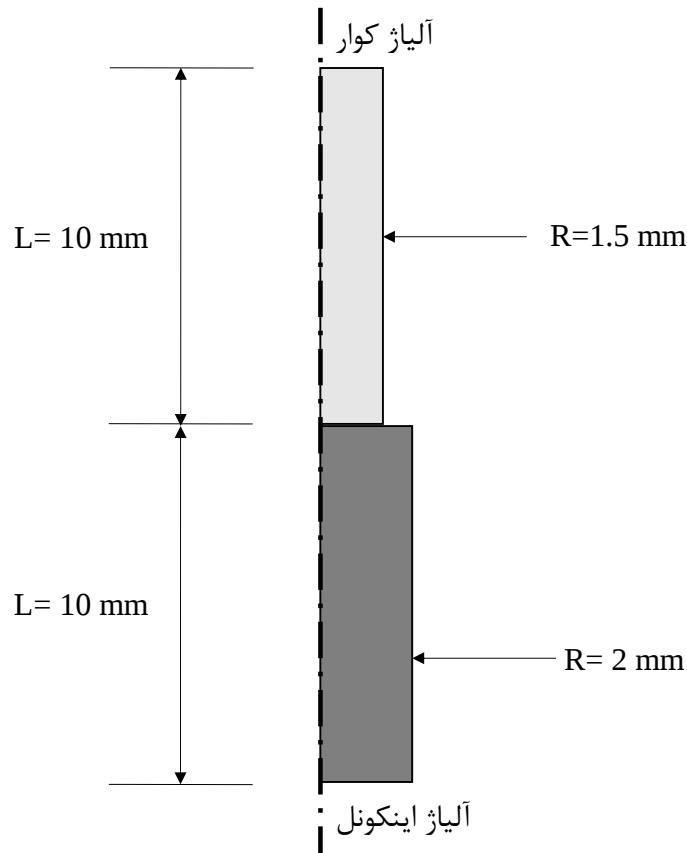
۲-۲- مدل سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی

در این فرآیند جوشکاری، انرژی جنبشی در سطح مشترک بوسیله اصطکاک به سرعت به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. در نتیجه افزایش سریع دمای سطح مشترک برای تولید جوش با کیفیت بالا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این بررسی فرآیند جوشکاری شبیه‌سازی می‌شود و افزایش درجه حرارت و جریان پلاستیک مواد مشاهده می‌شود. یک عامل مهم در طراحی این فرآیند، کنترل سرعت اولیه است به طوری که در هنگام متوقف کردن سرعت دورانی، دما در این هنگام تا زیر نقطه ذوب بالا رفته که به نوبه خود منجر به جریان قابل توجهی از مواد در ناحیه اتصال جوش می‌شود. درک واضحی از اصطکاک در سطح مشترک، خصوصیات مواد و انتقال حرارت در سطح مشترک از جنبه‌های مهم در طراحی یک فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی است. بنابراین، شبیه‌سازی ابزاری مفید در

طراحی این فرآیند است. به منظور شبیه‌سازی فرآیند مذکور به روش المان محدود از نرم‌افزار Abaqus ۶,۱۴-۲ استفاده شده است. با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون، اسکریپت این فرآیند نوشته شده و در محیط Command این نرم‌افزار به حل عددی آن پرداخته شده است. مدل‌سازی به صورت متقارن محوری با در نظر گرفتن پیچش در یک روند حل دما - جابجایی کوپل شده در حل گر استاندارد برای انجام محاسبات عددی استفاده شده است.

۲-۲-۱- مدل سازی قطعات

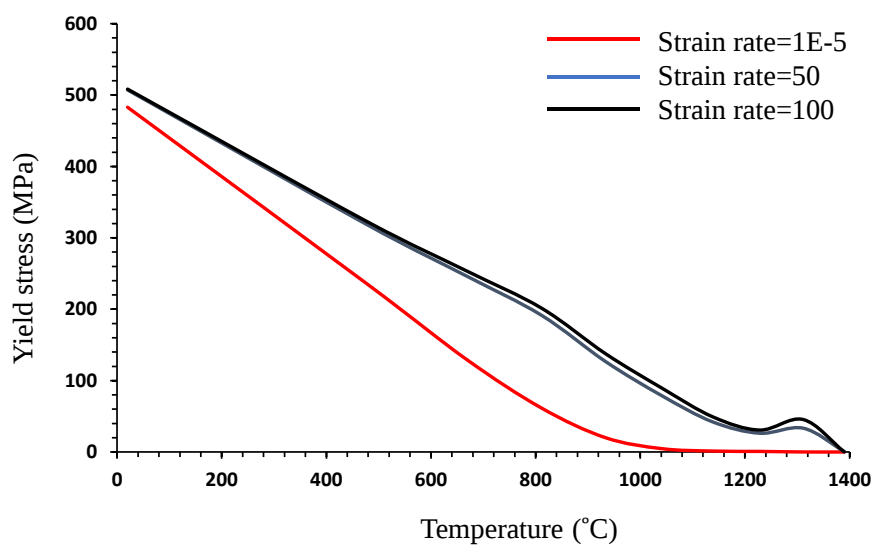
به منظور شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری، نمونه‌های مورد استفاده همانند شکل ۲-۲ نشان داده شده است. در این شکل دو میله غیر همسان با قطرهای مختلف برای اتصال جوش محوری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این دو میله نشان داده شده، هر کدام دارای طول ۱۰ mm و قطرهای ۳ mm و ۴ mm می‌باشد. قرار گیری این دو میله به نحوی است که در پیشانی خود با یکدیگر در تماس هستند.



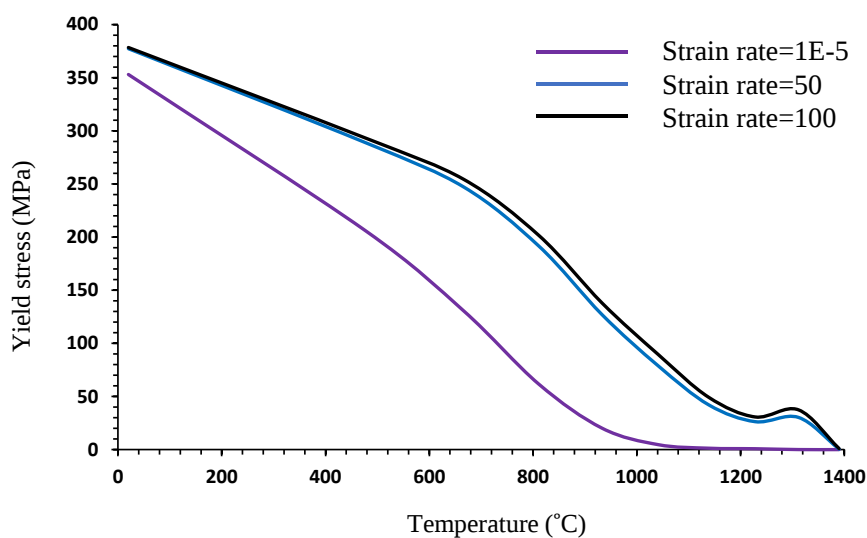
شکل ۲-۲ طرحواره مدل المان محدود جوشکاری اصطکاکی دورانی

۲-۲-۲- خصوصیات مواد

سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل ۶۰۰ آلیاژی است که در دمای بالا مقاومت به خوردگی بالایی دارد و آلیاژ کوار آلیاژی است که معمولاً از آن در اتصالات آببند شده با شیشه استفاده می‌شود. در برخی از کاربردهای دما بالا مانند فیدتروهای الکتریکی ولتاژ و دما بالا نیاز به استفاده از قطعاتی هستند که از دو آلیاژ ذکر شده ساخته می‌شوند. شکل ۳-۲ منحنی تنش تسلیم برحسب تابعی از دما را برای آلیاژهای اینکونل ۶۰۰ و کوار نشان می‌دهد که مدلسازی‌ها بر اساس مقادیر این نمودارها ایجاد شده است.



(الف)

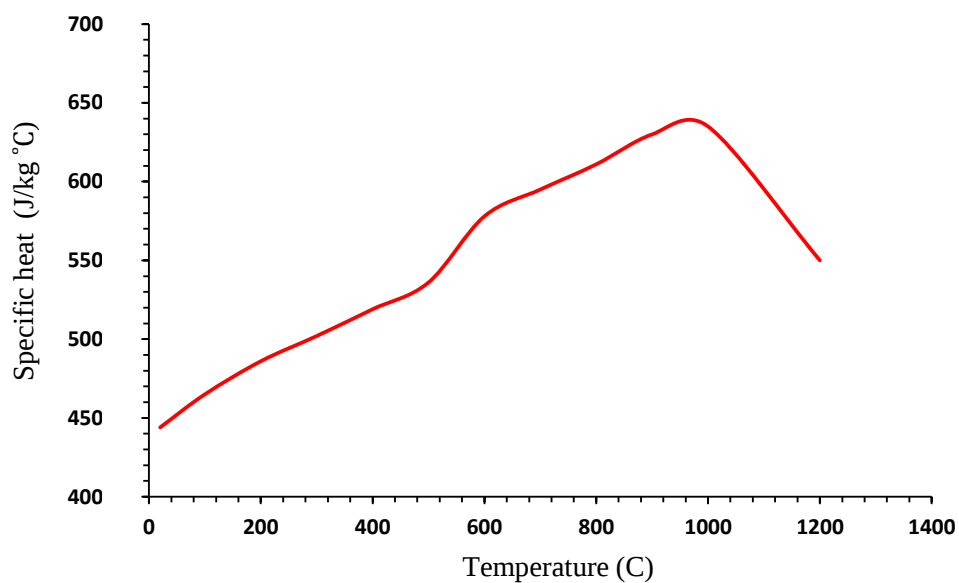


(ب)

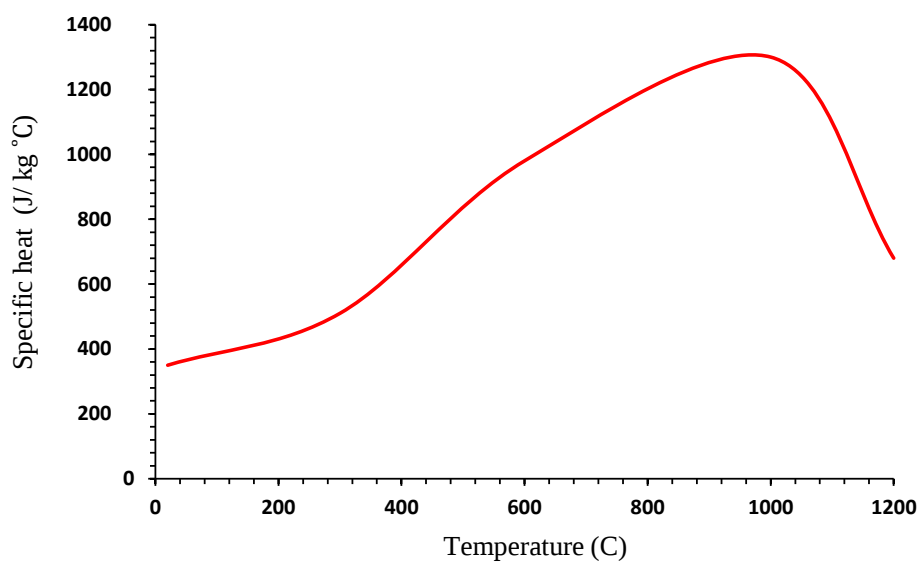
شکل ۲-۳ الف) نمودار تنش تسلیم آلیاژ اینکونل ۶۰۰ بر حسب دما در نرخ کرنش‌های مختلف

ب) تنش تسلیم آلیاژ کووار بر حسب دما در نرخ کرنش‌های مختلف [۳۶]

به‌طور مشابه نمودار گرمای نهان ویژه آلیاژهای اینکونل ۶۰۰ و کووار بر حسب دما (°C) در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

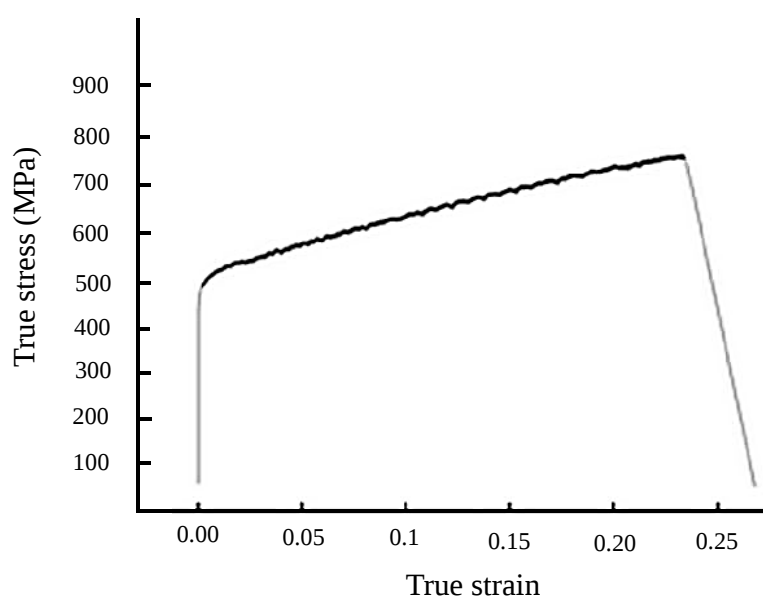
شکل ۲-۴ الف) نمودار گرمای ویژه آلیاژهای اینکونل ۶۰۰ بر حسب دما

ب) گرمای ویژه آلیاژ کوار بر حسب دما [۳۶]

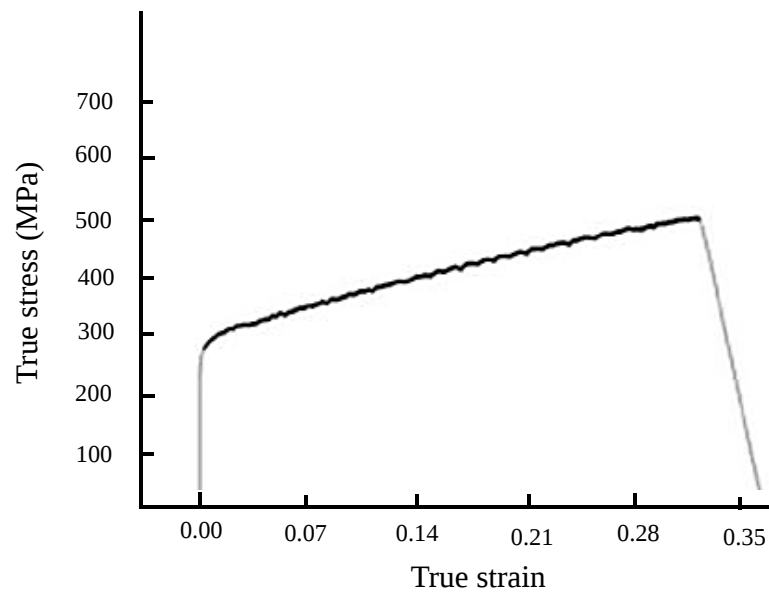
دیگر خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی در دمای محیط آلیاژ اینکونل ۶۰۰ و آلیاژ کوار در **Error! Reference source not found.** جدول ۱-۲ خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی آلیاژهای مورد استفاده در شبیه‌سازی آورده شده است. همچنین منحنی‌های تنش-کرنش مومسان حقیقی برای آلیاژ اینکونل ۶۰۰ و کوار در شکل ۵-۲ نشان داده شده است.

جدول ۱-۲-۱ خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و حرارتی آلیاژهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

ماده	چگالی (Kg/m ^۳)	ضریب پواسون	مدول الاستیک (MPa)	ضریب انبساط حرارتی (μm/m°C)	رسانای حرارتی (W/mm°C)
اینکونل ۶۰۰	۸/۴۷ E +۳	۰/۳	۲۱۴۰۰۰	۱/۰۴ E -۵	۱۴/۹
کوار	۸/۳ E +۳	۰/۳	۱۸۰۰۰۰	.	۱۴/۷



(الف)



(ب)

شکل ۲-۵ منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی آلیاژهای الف) اینکونل ۶۰۰ ب) آلیاژ کوار

تغییر شکل مومسان مواد در نرخ کرنش‌های بالا اغلب با استفاده از معادلات بنیادینی که تنش را به کرنش، نرخ کرنش و دما مربوط می‌سازد، توصیف می‌شود. جوشکاری اصطکاکی دورانی با توجه به ماهیتی که دارد یعنی اعمال تنش ناشی از فشار و دوران همراه با اصطکاک که سبب تولید حرارت می‌شود از مدل ساختاری جانسون-کوک به صورت رابطه (۱-۲) پیروی می‌کند. بخش اول معادله جانسون-کوک رفتار الاستو-پلاستیک ماده را نشان می‌دهد. بخش دوم این معادله رفتار ویسکوزیته ماده را مشخص می‌کند که در آن سختی حاصل از نرخ کرنش وجود دارد و نهایتاً بخش سوم معادله نرم شدن ماده را به خاطر حرارت دیدن ماده نمایان می‌سازد.

$$\sigma = \left[A + B \varepsilon_p^n \right] \left[1 + C \ln \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} \right] \left[1 - (T^*)^m \right] \quad (1-2)$$

$$T^* := \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$$

در رابطه بالا σ تنش جریان، ϵ_p کرنش مومسان، $\dot{\epsilon}_p/\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش مومسان بی‌بعد شده، T^* حرارت تولیدی، T دما، T_m دمای ذوب ماده و Tr دمای محیط است. ضرایب A ، B ، C ، m و n ثوابت جنس ماده می‌باشند. در جدول ۲-۲ ثوابت مدل ساختاری جانسون-کوک آلیاژهای اینکونل ۶۰۰ و کوار [۳۶] ارائه شده است.

جدول ۲-۲ ضرایب مدل ساختاری جانسون-کوک برای آلیاژ اینکونل ۶۰۰ و کوار [۳۶]

دمای گذرا	دمای ذوب	m	n	B (MPa)	A (MPa)	ماده
۹۴۳	۱۸۰۰	۱/۰۳	۰/۵۸۸	۸۰۵	۵۵۰	اینکونل ۶۰۰
۷۲۷	۱۴۰۰	۱/۰۳	۰/۶۲۲	۵۱۸/۵	۲۷۶	کوار

۲-۲-۳- تعیین گام حل

در این شبیه‌سازی، تکنیک تجزیه و تحلیل عددی به صورت شبه استاتیک^۱ غیرخطی با ترکیب تحلیل حرارتی-مکانیکی می‌باشد. در این تکنیک از روش عددی نیوتن استفاده شده است و همچنین نوع آنالیز به صورت کوپل حرارتی-جابجایی^۲ است. در این روش آنالیز حرارتی و جابجایی به موازات یکدیگر انجام می‌گیرند بدین صورت که پس از انجام آنالیز حرارتی در یک بازه زمانی کوچک داده‌های مربوط به آنالیز حرارتی به آنالیز جابجایی اضافه می‌شود و آنالیز جابجایی صورت می‌گیرد و این روند تا کامل شدن حل مسأله ادامه پیدا می‌کند. یک بار حرارتی که ناشی از اصطکاک ایجاد شده بین سطوح دو میله در اثر بار دورانی است به مدل اعمال شده است. برای مدل کردن این بار حرارتی مدلی که توسط موال و ماسونی [۱۶] ارائه شده مورد استفاده قرار گرفت که به صورت یک بار حرارتی متحرک به قطعه اعمال شده است. دمای اولیه محیط و قطعه 20°C در نظر گرفته شده است.

ویژگی اصلی مورد نیاز برای شبیه‌سازی موفق این فرآیند، استفاده از قابلیت نگاشت شبکه به شبکه است. در این فرآیند، به دلیل تغییر شکل زیاد در نزدیکی منطقه جوش، از تکنیک‌های تحلیل مختلفی برای محدود کردن اعوجاج

^۱ quasi-static

^۲ Coupled Temp-Displacement

المان‌ها استفاده شده است. این تکنیک‌های حل با استفاده از قابلیت نگاشت شبکه به شبکه بین هر اجرا به ترتیب انجام می‌پذیرد که اسکریپت‌های پایتون این امکان را برای ما عملی می‌سازد. هر یک از تحلیل‌ها، از تعداد زیادی گام‌های حل تشکیل شده است که در این گام‌ها با استفاده از قابلیت نگاشت شبکه به شبکه آنالیز حرارت-جابجایی^۱ انجام می‌شود. برای حل غیرخطی مسأله از الگوریتم حل نیوتن-رافسون^۲ استفاده شده است. پله زمانی در اینکریمنت^۳ بصورت خودکار بر اساس حداکثر تغییرات دما تنظیم می‌شود. نتایج حاصل از اینکریمنت قبلی به عنوان حدس اولیه در اینکریمنت بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در نهایت با استفاده از درونیابی سهموی نتایج مرحله قبل به عنوان ورودی مرحله جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲-۴- تعیین نوع تماس سطوح و برهم‌کنش آن‌ها

در ایجاد و حل مسأله حاضر، ۴ برهم‌کنش^۴ تعریف شده است که ۲ برهم‌کنش تماسی^۵ و دو برهم‌کنش محرک/حسگر^۶ می‌باشد.

برهم‌کنش تماسی برای دو سطح در تماس با هم تعریف می‌شود و سطح قابل تغییرشکل (نرم) و سطح ثابت (سخت) در سطوح جوشکاری بین میله‌ها را تعریف می‌کند. این دو برهم‌کنش تماسی بین میله بالایی و میله پایینی تعریف شده است. در میله بالایی یعنی آلیاژ کوار سطح در تماس در محل جوش به عنوان سطح سخت^۷ و سطح در تماس در محل جوش آلیاژ اینکونل به عنوان سطح قابل تغییرشکل^۸ تعریف شده است و برای میله پایینی یعنی

^۱ temperature-displacement

^۲ Newton-Raphson method

^۳ Increment

^۴ Interaction

^۵ contact interaction

^۶ actuator-sensor interaction

^۷ Master

^۸ Slave

آلیاژ اینکونل نیز به صورت مشابه آلیاژ کوار تعریف شده است. در این تعاریف برهم‌کنشی بین سطوح جوش، از تکنیک نگه‌دارندگی برهم‌کنش^۱ در نزدیکی نواحی جوش نیز استفاده شده است. از این تکنیک برای حفظ برهم‌کنش بین میله‌ها بعد از ایجاد پلیسه جوش بهره گرفته شده است. در حقیقت یک فشار 0.01 MPa در این قسمت به میله‌ها اعمال شده است تا اتصال سطوح را تا پایان گام تحلیل حفظ کند.

برهم‌کنش محرک/حسگر از طریق اسکریپت نوشته شده اجرا می‌شود و شبیه‌سازی مکانیزم محرک متصل شده بر میله بالایی برای ایجاد دوران را عملی می‌کند. همچنین این مکانیزم نقش حسگر در تجزیه و تحلیل را دارد که میزان آشفستگی جوش یا کوتاه شدگی محوری را در مجموعه در حال جوش اندازه‌گیری می‌کند. بدین منظور در دو محل یکی در نقطه مرجع^۲ تعریف شده برای میله‌های بالایی و دیگری در نقطه مرجع تعریف شده در میله پایینی در نظر گرفته شده است که هنگامی که فاصله تعریف شده برای این حسگر بیشتر از مقدار تعیین شده شود، اسکریپت تحلیل را متوقف کرده و نقطه جدیدی را برای حسگر تعریف می‌کند. این پارامتر، فاصله تعریف شده مجاز محل جوشکاری^۳، با تغییر شکل ایجاد شده در المان‌ها و میزان کوتاه شوندگی ارتباط دارد.

دو تکنیک برهم‌کنشی دیگر به نام تماس جوشکاری^۴ با روش گره به سطح^۵ بین سطوح تماس دو میله پایین و بالا تعریف شده است که در این تکنیک رفتار مماسی^۶، رفتار عمود بر سطح^۷ و رسانایی گرمایی^۸ بین سطوح در هنگام فرآیند جوشکاری تعریف می‌شود.

^۱ Self-contact

^۲ Reference point

^۳ Upset distance

^۴ Weld contact

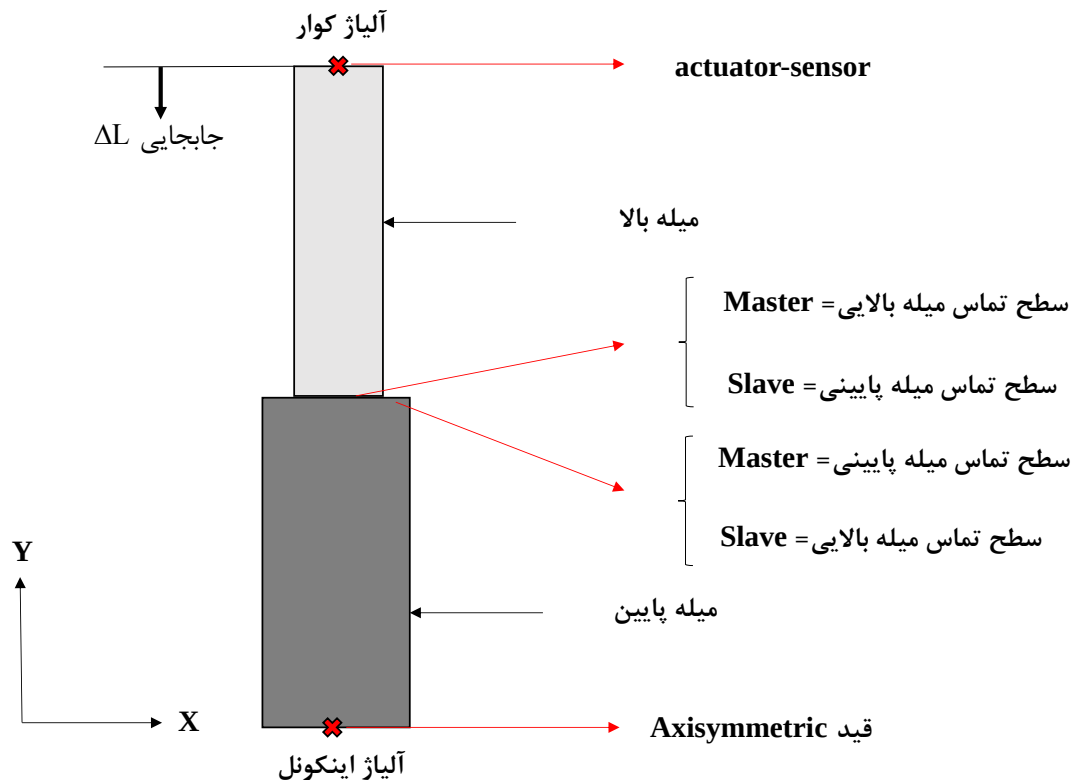
^۵ Node to surface

^۶ Tangential behavior

^۷ Normal behavior

^۸ Thermal conductance

شکل ۲-۶ برهم کنش‌های تعریف شده در سطح مشترک میله‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۶ برهم کنش‌های تعریف شده در محل تماس دو سطح میله

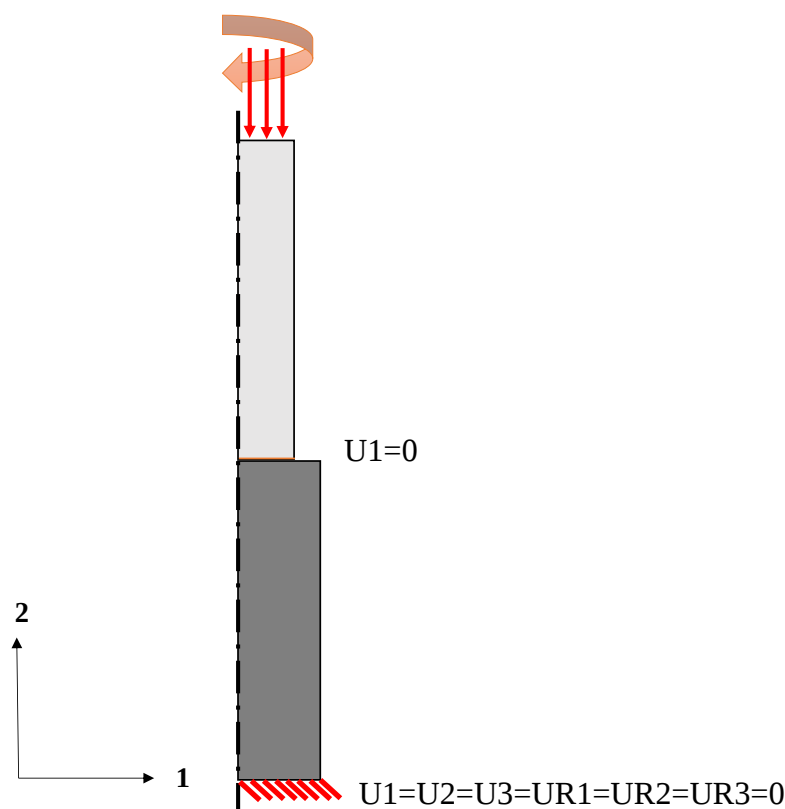
۲-۲-۵- بارگذاری و ایجاد شرایط مرزی

فشار اعمالی در نظر گرفته شده به مقدار ۵۰۰ MPa می‌باشد که بصورت لحظه‌ای^۱ در هنگام توقف دوران اعمالی به میله بالایی در مرحله تماس جوشکاری به میله اعمال می‌گردد تا فرآیند جوشکاری انجام پذیرد.

شرایط مرزی اعمالی تماماً در مرحله initial فعال بوده و تا پایان تحلیل ادامه خواهد داشت. این شرایط برای میله پایینی از نوع Symmetry/Antisymmetry/Encastre است که باعث می‌شود که مجموعه در ۶ درجه آزادی یعنی $U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$ مقید شود.

^۱ Instantaneous

شرط مرزی دیگری که باید تعریف شود در محل تماس دو میله می باشد که باید از نوع جابجایی-چرخشی^۱ باشد که از مرحله ابتدای حل فعال بوده و حرکت در جهت طولی برای آن مقید شده ($U_1=0$) ولی حرکت در جهت محوری و همچنین چرخش حول هر دو محور طولی و عمود بر صفحه (U_2, U_3, U_{R2}, U_{R3}) برای آن آزاد در نظر گرفته شده است. شکل ۷-۲ شرایط مرزی و بار اعمالی به مجموعه مورد بررسی را نشان می دهد.

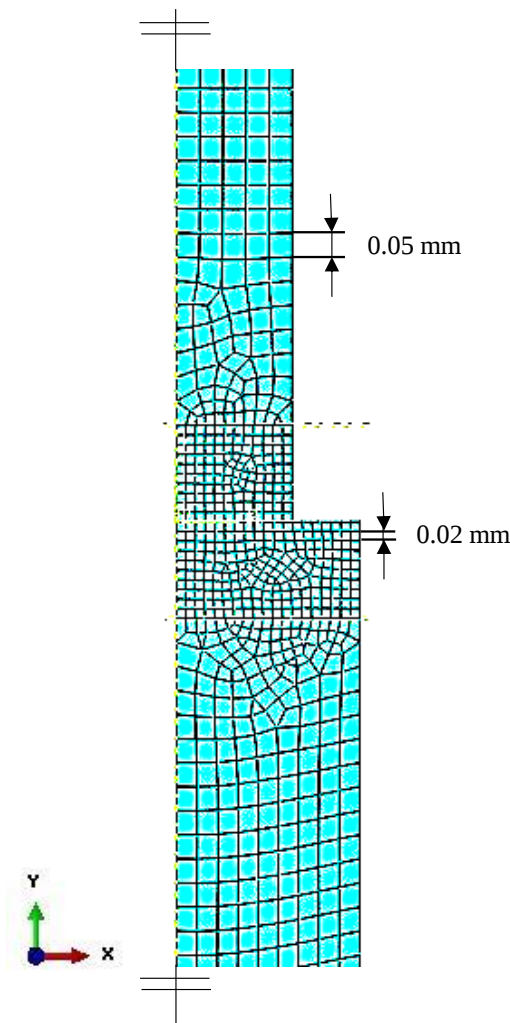


شکل ۷-۲ شرایط مرزی و بارگذاری

۲-۲-۶- شبکه بندی

به منظور تسریع فرآیند حل در نرم افزارهای المان محدود، قطعه مورد تحلیل را به شبکه های کوچکی تقسیم کرده تا بعد از اعمال بار حل عددی در هر کدام از این شبکه ها انجام شده و در نهایت به کل قطعه بسط داده شود. بدین منظور دو میله مورد تحلیل در فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی به صورت شکل ۸-۲ شبکه بندی شده است.

^۱ Displacement/Rotation



شکل ۲-۸ نحوه المان بندی قطعات مورد بررسی

با استفاده خانواده المان های حل استاندارد و گام تعریف شده جابجایی - حرارتی، المان مرتبه اول ۴ گرهی مربع متقارن محوری پیچشی برای این مش بندی استفاده شده است که به صورت اختصار CGAX4T تعریف می شود.

۲-۳- طراحی آزمایش

طراحی آزمایش شامل یکسری آزمایش ها می باشد که فرآیند انتخاب تصادفی متغیرها انجام شده تا بتوان به وسیله این روش پاسخ خروجی فرآیند را شناسایی و مشاهده نمود. برای این منظور با استفاده از نرم افزار مینی تب با کمک

روش سطح پاسخ^۱ به کمک روش طرح مرکب مرکزی^۲ با در نظر گرفتن تعداد سه متغیر به نام‌های سرعت دورانی، فشار اصطکاکی و فشار آهنگری محدوده مورد نظر هر کدام مشخص شده است. در این روش بهینه‌سازی بر مبنای مقادیر مختلف α ، سطوح مختلف برای هر متغیر ایجاد می‌شود. با در نظر گرفتن $\alpha = ۱$ تعداد ۳ سطح برای هر کدام از متغیرها انتخاب شده است. دلیل انتخاب مقدار ۱ برای α بخاطر سه سطحی بودن و همچنین بررسی درون بازه تعریف شده برای متغیرهای مورد بررسی است. **جدول ۳-۲** سطوح در نظر گرفته شده برای متغیرهای فرآیند در این پایان نامه را نشان می‌دهد که شامل ۳ سطح برای هر کدام از متغیرها است.

جدول ۳-۲ سطوح در نظر گرفته شده برای متغیرهای فرآیند

متغیرهای مستقل	سطوح		
	پایین (۱-)	مرکزی (۰)	بالا (۱+)
سرعت دورانی (RPM)	۵۵۰۰	۶۰۰۰	۶۵۰۰
فشار اصطکاکی (MPa)	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰
فشار آهنگری (MPa)	۴۰۰	۵۰۰	۶۰۰

در ادامه آزمون‌های طراحی شده با روش RSM برای فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی در **جدول ۴-۲** نشان داده شده است. در این طراحی تعداد ۶ آزمایش به صورت تکرار انجام می‌شود تا در حد امکان از خطای محاسباتی جهت پیش‌بینی معادلات ارائه شده بکاهد و به اطلاعات بدست آمده اطمینان بیشتری حاصل شود.

^۱ Response surface methodology (RSM)

^۲ Central composite

جدول ۴-۲ آزمون‌های طراحی شده برای فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی

آزمون	عامل		
	سرعت دورانی ω (RPM)	فشار اصطکاکی P_{fr} (MPa)	فشار آهن‌گری P_{fo} (MPa)
۱	۶۰۰۰	۳۰۰	۵۰۰
۲	۵۵۰۰	۳۰۰	۵۰۰
۳	۶۰۰۰	۳۰۰	۴۰۰
۴	۶۰۰۰	۳۰۰	۵۰۰
۵	۶۰۰۰	۳۰۰	۵۰۰
۶	۶۰۰۰	۳۰۰	۵۰۰
۷	۵۵۰۰	۲۰۰	۴۰۰
۸	۶۰۰۰	۳۰۰	۵۰۰
۹	۶۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰
۱۰	۶۵۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۱۱	۵۵۰۰	۲۰۰	۶۰۰
۱۲	۵۵۰۰	۴۰۰	۴۰۰
۱۳	۶۵۰۰	۲۰۰	۶۰۰
۱۴	۶۰۰۰	۳۰۰	۵۰۰
۱۵	۵۵۰۰	۴۰۰	۶۰۰
۱۶	۶۰۰۰	۳۰۰	۶۰۰
۱۷	۶۵۰۰	۴۰۰	۶۰۰
۱۸	۶۵۰۰	۲۰۰	۴۰۰
۱۹	۶۰۰۰	۴۰۰	۵۰۰
۲۰	۶۵۰۰	۳۰۰	۵۰۰

روش تجربی

در این فصل به تشریح نحوه طراحی و ساخت دستگاه جوش اصطکاکی دورانی پرداخته می‌شود. همچنین نحوه مونتاژ و هم راستایی فک‌ها و سیستم محرک مورد استفاده توضیح داده می‌شود. تست‌های مختلفی با استفاده از دستگاه ساخته شده گرفته شده است و میزان استحکام مکانیکی اتصال محل جوش بعد از فرآیند جوشکاری نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. این بررسی توسط دستگاه تست کشش موجود در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شده است.

۳-۱- انتخاب مواد و تجهیزات

میله‌های انتخابی برای جوشکاری اصطکاکی دورانی از جنس اینکونل ۶۰۰ به قطر ۴ mm و کوآر به قطر ۳ mm می‌باشد. در جدول ۳-۱ ترکیب شیمیایی فلز اینکونل ۶۰۰ و در جدول ۳-۲ خصوصیات مکانیکی آن متناسب با استاندارد نشان داده شده است. همچنین جدول ۳-۳ ترکیب شیمیایی فلز کوآر و جدول ۳-۴ خصوصیات مکانیکی آن متناسب با استاندارد موجود در مراجع را نشان می‌دهد.

جدول ۱-۳ محدوده ترکیب شیمیایی آلیاژ اینکونل ۶۰۰٪ [۳۶]

نیکل (مقدار بسیار کمی کبالت)	۷۲/۰ min
کروم	۱۴/۰-۱۷/۰
آهن	۶/۰-۱۰/۰
کربن	۰/۱۵ max
منگنز	۱/۰ max
سولفور	۰/۰۱۵ max
سیلیکون	۰/۵ max
مس	۰/۵ max

جدول ۲-۳ خصوصیات مکانیکی آلیاژ اینکونل ۶۰۰٪ [۳۶]

میزان سختی (Rockwell)	درصد تغییر طول، %	تنش تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)
-	۲۰-۴۵	۲۴۰-۵۲۰	۵۵۰-۸۳۰

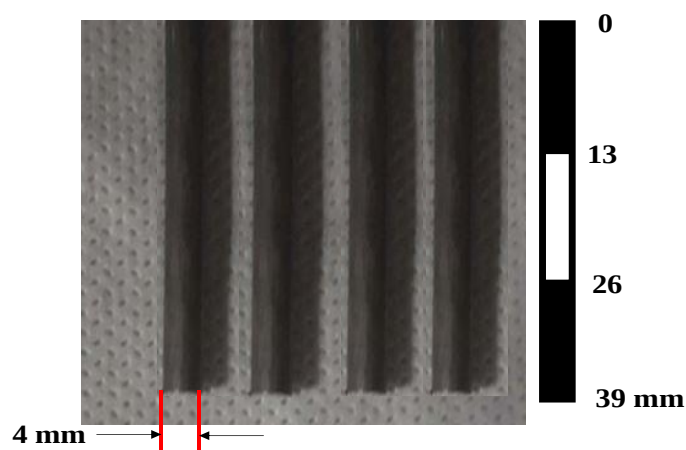
جدول ۳-۳ ترکیب شیمیایی آلیاژ کوار ۶۰۰٪ [۳۶]

نیکل	۲۹
کبالت	۱۷
سیلیکون	۰/۲
کروم	۰/۲
کربن	۰/۰۲
آهن	۵۳/۵۸

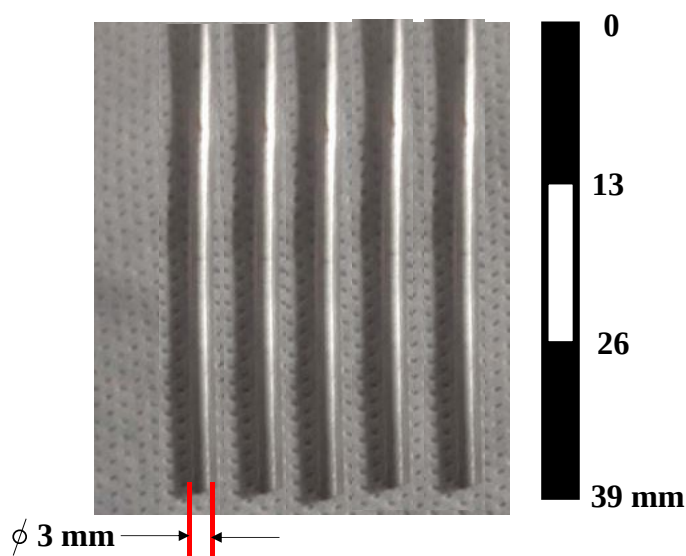
جدول ۴-۳ خصوصیات مکانیکی آلیاژ کوار [۳۶]

میزان سختی (Rockwell)	درصد تغییر طول، %	تنش تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)
۸۰	۳۰	۲۷۶	۵۱۸

نمونه‌های آماده شده از هر دو آلیاژ در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. نمونه‌ها بگونه‌ای آماده شده‌اند که بتوان آن‌ها را در سه نظام مجموعه تجهیز شده که بصورت طرح‌واره در شکل ۳-۳ نشان داده شده بست و نیز عملیات جوشکاری مورد نظر بتواند انجام شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱-۳ نمونه‌های آماده شده برای انجام عملیات جوشکاری (الف) آلیاژ اینکونل ۶۰۰ (ب) آلیاژ کوار

۳-۲- معرفی تجهیزات آزمایشگاهی

به منظور مطالعه تجربی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی اینکونل ۶۰۰ و کوار از تجهیزات آزمایشگاهی استفاده شده که در ادامه به آنها اشاره می‌شود:

الف) دستگاه کشش برای اعمال فشار محوری

به منظور اعمال فشار اصطکاکی و فشار آهنگری از دستگاه کشش تک محوره استفاده می‌شود. این دستگاه می‌تواند فشار محوری را تا ماکزیمم مقدار $250 \pm \text{KN}$ اعمال نماید. در شکل ۲-۳ نمونه‌ای از دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ سروهیدرولیک^۱ آورده شده است.



شکل ۲-۳ دستگاه کشش تک محوره اینسترون ۸۸۰۲ سروهیدرولیک

ب) دستگاه تست جوشکاری اصطکاکی دورانی

برای انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی دستگاهی با در نظر گرفتن قابلیت‌های ویژه ساخته شده است که به کمک آن بتوان قطعات را در آن نگه داشته تا فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی قابل انجام گردد. نحوه ساخت دستگاه بدین صورت است که با استفاده از موتور الکتریکی ۳ فاز با قدرت ۱ hp و دوران ۳۰۰۰ RPM و با کمک گرفتن از چرخ تسمه‌های تایمینگ دقیق و مناسب، نسبت دور افزایش داده شده و به ۶۰۰۰ RPM رسیده است.

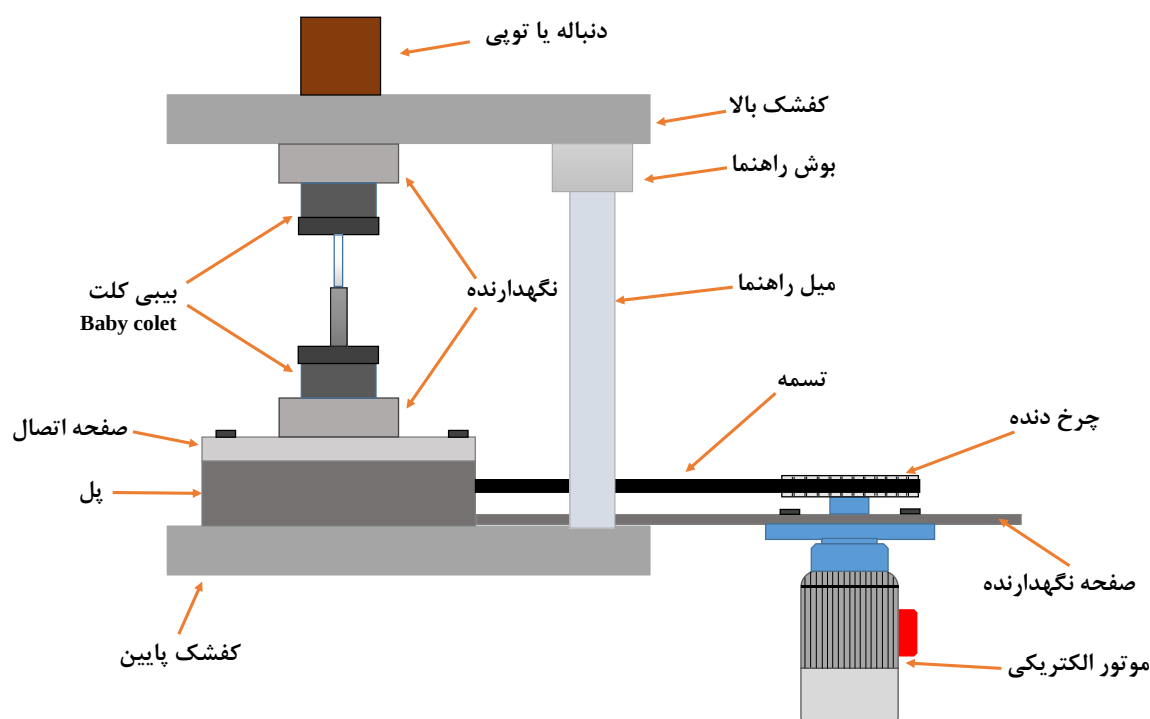
^۱ INSTRON ۸۸۰۲

تسمه تایمینگ و چرخ تسمه‌های تایمینگ برای انتقال دقیق‌تر گشتاور بکار گرفته شده است. از کفشک با میل راهنماهای قطر بالا و ضخامت کفشک بالا برای بستن کل مکانیزم استفاده شد تا هم‌راستایی میله‌های مورد نظر برای جوشکاری ایجاد شود. برای نگه داشتن میله‌های مورد نظر جوشکاری هم از بیبی کلت‌های^۱ دقیق استفاده شد که بتوانند قطرهای ۲ mm تا ۵ mm را در خود جای دهد. از دنباله دستگاه نیز برای بستن فک و کفشک بالایی به دستگاه دریل ستونی یا دستگاه کشش اینسترون استفاده شد. بلبرینگ و رولبرینگ‌های مورد استفاده در مکانیزم علاوه بر انتقال نیرو، وظیفه جلوگیری از حرکتهای اضافی در مکانیزم را دارند. از موتور فلنچ‌دار برای دقیق‌تر بودن کوپل استفاده شد و فاصله موتور تا مکانیزم دوران نیز در حداقل مقدار ممکن در نظر گرفته شده است. برای شروع فرآیند جوشکاری ابتدا موتور الکتریکی شروع به حرکت کرده و از طریق تسمه تایمینگ و چرخ تسمه‌های تایمینگ، دوران از موتور به مکانیزم انتقال می‌یابد و با حرکت کفشک بالا توسط دستگاه اینسترون یا دریل ستونی دو میله با هم تماس داده می‌شوند و در اثر اصطکاک گرم شده و به حالت خمیری می‌رسند. در این حالت ترمز لحظه‌ای با فشار دادن کلید، فعال شده و دوران مکانیزم به طور کامل متوقف می‌شود و فشار آهنگری اعمال می‌گردد تا عملیات جوشکاری انجام شود. از جمله ویژگی‌های این دستگاه عبارتند از:

- امکان بستن و تعویض راحت قطعات با قطرهای کم در محدوده ۲ mm تا ۵ mm.
- نگه داشتن قطعات مورد نظر به شکلی که در زمان ترمز سیستم چرخش در جای خود ثابت بمانند.
- امکان قرار دادن قطعات با قطرهای مختلف در یک راستا جهت یکنواختی جوشکاری اصطکاکی (عدم هم‌راستایی قابل قبول کمتر از ۰/۱ mm).
- امکان باز شدن فک‌های دستگاه بعد از عملیات جوشکاری به شکلی که قطعات جوشکاری شده از نگهدارنده‌های خود خارج شوند و به جوش لطمه‌ای وارد نشود.
- استفاده از کفشک قوی با میل راهنماهای قطر بالا و طول بلند خارج از استاندارد موجود بازار
- قابلیت ایجاد دور بالا در حد ۶۰۰۰ RPM به قطعات مورد نظر جهت جوشکاری

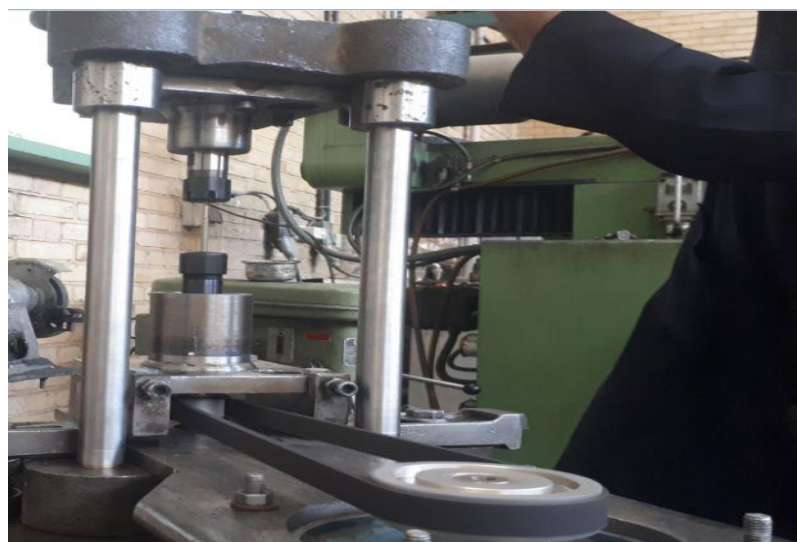
^۱ Baby colets

- استفاده از موتور الکتریکی ۳۰۰۰ RPM و مکانیزم تبدیل دور با نسبت یک به دو
 - قابلیت ایست لحظه‌ای (ترمز ناگهانی با کمترین لغزش) در سرعت دورانی مورد نظر (ترمزدار بودن موتور الکتریکی)
 - امکان انتقال دور از موتور الکتریکی به مکانیزم دوران بدون لغزش با استفاده از چرخ دنده‌های تایمینگ دقیق و تسمه تایمینگ با پهنای مناسب.
 - شروع و توقف سریع و راحت سیستم دوران از نظر الکتریکی با مد نظر قرار دادن هزینه‌های مرتبط و ایمنی کامل (کلید قطع و وصل).
 - عدم تغییر شکل یا صلبیت مناسب مکانیزم در فشار آهنگری اعمال شده بر سیستم و استفاده از صفحات با ضخامت و اندازه های مناسب
 - رعایت حداقل فاصله موتور الکتریکی و سیستم دوران در محل مورد نظر جوشکاری
 - استفاده از موتور فلنچ‌دار جهت کوپل دقیق‌تر موتور و مکانیزم‌های طراحی شده دوران
 - استفاده از بلبرینگ‌ها و رولبرینگ‌های مناسب که حرکت‌های اضافی در مکانیزم ایجاد نکرده و نیرو به طور کامل از موتور به مکانیزم و از مکانیزم به قطعات مورد نظر جوشکاری منتقل شود.
- البته لازم به ذکر است که برای اعمال فشار محوری از دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ استفاده می‌شود. در شکل ۳-۳ طرح‌واره دستگاه تجهیز شده برای اجرای عملیات جوشکاری اصطکاکی دورانی نشان داده شده است.



شکل ۳-۳ طرحواره دستگاه ساخته شده برای جوشکاری اصطکاکی دورانی

در شکل ۳-۴ دستگاه تجهیز شده برای انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی که بر روی دریل ستونی سوار شده است را مشاهده می‌کنید. با توجه به آن که استفاده از دستگاه اینسترون باعث صرف هزینه زیاد می‌شد، مقرر گردید تست‌های اولیه بر روی دریل ستونی کارگاه ماشین ابزار دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شود و پس از برطرف کردن عیوب دستگاه طراحی شده و بررسی دقت متغیرهای بدست آمده از تحلیل المان محدود، تست‌های نهایی با دستگاه اینسترون انجام شود.



شکل ۳-۴ دستگاه ساخته شده برای انجام تست جوشکاری اصطکاکی دورانی

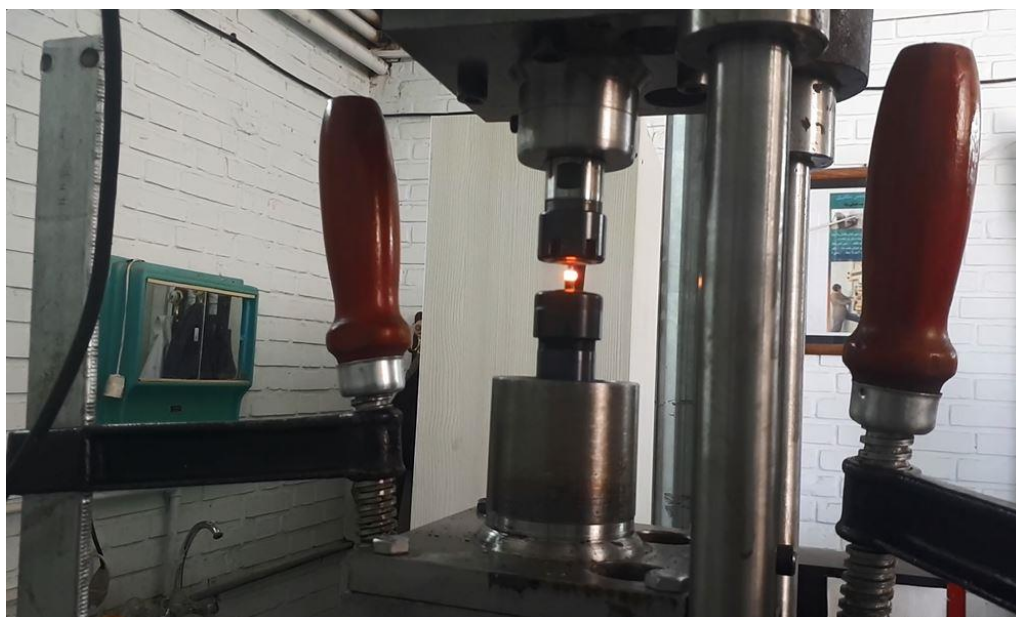
اجزای مختلف این دستگاه در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. قسمت‌های مختلف این دستگاه عموماً بصورت پیش ساخته بوده و یا اینکه توسط فرآیند سوراخکاری و یا براده برداری به شکل مورد نظر تبدیل شده‌اند. قابل ذکر است که سطح میل راهنماها سختکاری شده است تا در اثر حرکت درون بوش راهنما دچار خوردگی نشده و از عدم هم محوری سه نظام‌های بالا و پایین جلوگیری شود. سه نظام پایین متحرک بوده و دوران آن توسط تسمه‌ای که از محور موتور الکتریکی بدان متصل شده است، تامین می‌شود. حرکت عمودی با حرکت کفشک بالا درون میل

راهنماها امکان پذیر می‌شود. دنباله یا توپی برای اتصال کفشک بالا به گلویی دستگاه کشش تک محوره مورد استفاده قرار می‌گیرد. فشار محوری به وسیله حرکت گلویی دستگاه کشش به سمت پایین و با استفاده از سه نظام بالا به نمونه اعمال می‌گردد. کفشک پایین توسط روبند به میز دستگاه بسته می‌شود تا از حرکت اضافی آن جلوگیری شود.

لازم به ذکر است که محاسبات انجام شده برای استخراج فشار بین سطوح جوشکاری حاصل از تقسیم نیروی فشاری بر سطح مقطع میله جنس کوار با قطر ۳ mm می‌باشد.

۳-۳- تست کشش

به منظور بررسی مقاومت کششی نمونه جوش خورده، بعد از انجام فرآیند جوشکاری نمونه بدون آن که نمونه از دستگاه باز شود زیر دستگاه کشش اینسترون فرآیند تست کشش را انجام داده تا نمودار تنش- کرنش نمونه جوشکاری شده استخراج شود. شکل ۳-۵ فرآیند انجام تست کشش نمونه جوشکاری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵ تجهیز مورد استفاده تست کشش نمونه جوشکاری شده

نتایج و بحث

در این فصل نتایج حاصل از بهینه سازی ، شبیه سازی عددی و آزمون های تجربی ارائه می گردد. در بخش اول نتایج بهینه سازی با استفاده از نرم افزار مینی تب شامل تحلیل واریانس، تاثیر متغیرهای طراحی بر فرآیند جوشکاری و نیز متغیرهای بهینه فرآیند ارائه می شود. همچنین به ارائه نتایج شبیه سازی عددی که شامل تاثیر فشار اصطکاکی، فشار آهنگری و سرعت دورانی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی دو میله از جنس آلیاژ کوار و آلیاژ اینکونل ۶۰۰ می باشد، پرداخته می شود. در انتها به ارائه نتایج بدست آمده از آزمون تجربی که شامل اثر فشار اصطکاکی و فشار آهنگری در سرعت ثابت ۶۰۰۰ RPM می باشد نیز اشاره می شود.

۴-۱- نتایج بهینه سازی

۴-۱-۱- تحلیل واریانس

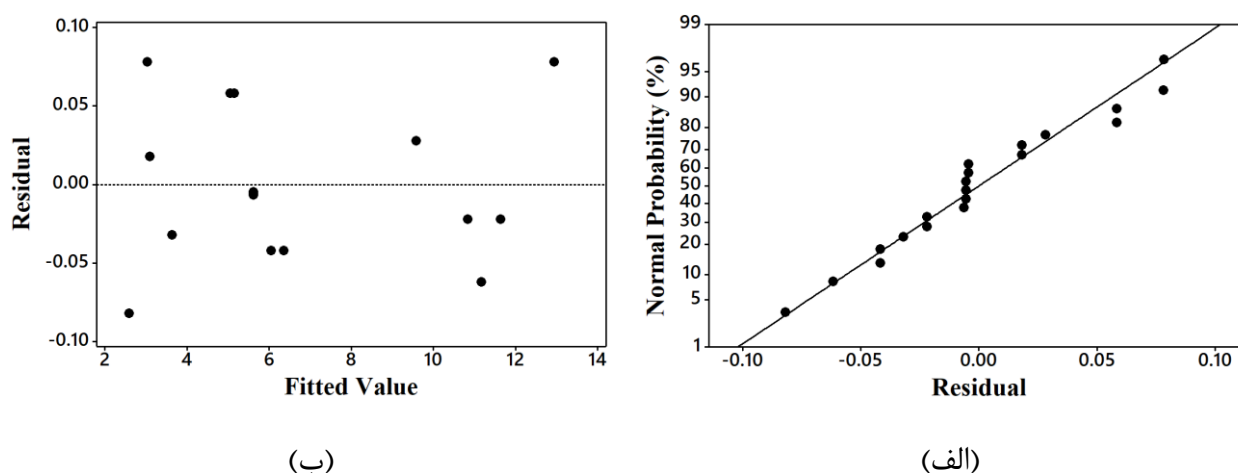
بر اساس متغیرها و سطوح مشخص شده در **جدول ۲-۳** آزمون های طراحی شده در **جدول ۲-۴** در نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه سازی شد و نتایج بر حسب متغیر پاسخ جابجایی ΔL به شرح **جدول ۴-۱** بدست آمده است.

جدول ۱-۴ متغیر پاسخ جابجایی ΔL برای آزمون طراحی شده RSM

آزمون	عامل			پاسخ
	سرعت دورانی ω (RPM)	فشار اصطکاکی P_{fr} (MPa)	فشار آهنگری P_{fo} (MPa)	جابجایی ΔL (mm)
۱	۶۰۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۳/۸
۲	۵۵۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۳/۵
۳	۶۰۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۳/۷
۴	۶۰۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۳/۸
۵	۶۰۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۳/۸
۶	۶۰۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۳/۸
۷	۵۵۰۰	۲۰۰	۴۰۰	۳/۰
۸	۶۰۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۳/۸
۹	۶۰۰۰	۲۰۰	۵۰۰	۳/۵
۱۰	۶۵۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۳/۷۵
۱۱	۵۵۰۰	۲۰۰	۶۰۰	۳/۰
۱۲	۵۵۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۲/۹
۱۳	۶۵۰۰	۲۰۰	۶۰۰	۳/۹
۱۴	۶۰۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۳/۸
۱۵	۵۵۰۰	۴۰۰	۶۰۰	۲/۹
۱۶	۶۰۰۰	۳۰۰	۶۰۰	۳/۷

۳/۷۵	۶۰۰	۴۰۰	۶۵۰۰	۱۷
۳/۶	۴۰۰	۲۰۰	۶۵۰۰	۱۸
۳/۷۶	۵۰۰	۴۰۰	۶۰۰۰	۱۹
۳/۷۸	۵۰۰	۳۰۰	۶۵۰۰	۲۰

نتیجه‌گیری مطمئن از نمودارهای ارائه شده در بخش بهینه‌سازی نیازمند تایید اثرات نشان داده شده متغیر با استفاده از تحلیل واریانس است. این تحلیل با در نظر گرفتن نرمال بودن توزیع داده‌ها، گوسی بودن توزیع خطا و استقلال آن و ثابت بودن واریانس با استفاده از آزمون فرضیه تهی با استفاده از مقدار P پرداخته می‌شود. بررسی در مورد رد فرض‌های اصلی و کفایت مدل، به‌وسیله بررسی باقیمانده‌ها امکان پذیر می‌شود. عدم وجود نقاط دورافتاده از میانگین پیش‌بینی شده توسط مینی‌تب در شکل ۴-۱ الف نشان از برقرار بودن فرض نرمال بودن^۱ داده است. همین‌طور پیروی نکردن باقیمانده‌ها از هیچ الگوی مشخصی در شکل ۴-۱ ب نشان دهنده برقراری فرض استقلال^۲ است.



شکل ۴-۱ بررسی فرض نرمال بودن و استقلال داده‌ها در فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی

^۱ Normality assumption

^۲ Independence assumption

برای تحلیل واریانس متغیرها، توجه به این نکته لازم است که متغیرهایی در فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی تاثیر بیشتری خواهند داشت که مقدار P-Value آنها با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان ۹۵٪، کمتر از ۰/۰۵ باشد. نتایج تحلیل واریانس برای پاسخ جابجایی ΔL در **جدول ۲-۴** آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود از بین عوامل مختلف، عامل سرعت دورانی بیشترین تاثیر را با داشتن مقدار P-Value برابر صفر در فرآیند جوشکاری دارد.

جدول ۴-۲ تحلیل واریانس برای متغیر پاسخ جابجایی ΔL

Source	DF	Adj SS	Adj MS	Contribution	P-Value
Linear	۳	۱/۲۲۰۴۰	۰/۴۰۶۸۰	۹۲/۵۹ %	۰/۰۰۰
(ω) سرعت دورانی	۱	۱/۲۱۱۰۴	۱/۲۱۱۰۴	۵۶/۴۴ %	۰/۰۰۰
(P_{fr}) فشار اصطکاکی	۱	۰/۰۰۰۳۶	۰/۰۰۰۳۶	۵۶/۰ %	۰/۸۸۴
(P_{fo}) فشار آهنگری	۱	۰/۰۰۹۰۰	۰/۰۰۹۰۰	۰/۰۲ %	۰/۴۷۱
Square	۳	۰/۷۵۴۲۵	۰/۲۵۱۴۲	۰/۴۲ %	۰/۰۰۰
سرعت دورانی*سرعت دورانی	۱	۰/۰۷۶۹۵	۰/۰۷۶۹۵	۳۴/۸۸ %	۰/۰۵۳
فشار اصطکاکی*فشار اصطکاکی	۱	۰/۰۸۶۴۲	۰/۰۸۶۴۲	۲۶/۴۲ %	۰/۰۴۳
فشار آهنگری*فشار آهنگری	۱	۰/۰۳۱۶۵	۰/۰۳۱۶۵	۷/۰ %	۰/۱۹۰
۲-Way Interaction	۳	۰/۰۲۷۵۰	۰/۰۰۹۱۷	۱/۴۶ %	۰/۶۴۶
سرعت دورانی*فشار اصطکاکی	۱	۰/۰۰۵۰۰	۰/۰۰۵۰۰	۱/۲۷ %	۰/۵۸۹
سرعت دورانی*فشار آهنگری	۱	۰/۰۱۱۲۵	۰/۰۱۱۲۵	۰/۲۳ %	۰/۴۲۲
فشار اصطکاکی*فشار آهنگری	۱	۰/۰۱۱۲۵	۰/۰۱۱۲۵	۰/۵۲ %	۰/۴۲۲
Error	۱۰	۰/۱۶۰۲۷	۰/۱۶۰۲۷	۷/۴۱ %	۰/۰۱۶۰۳
خطای برازش	۵	۰/۱۶۰۲۷	۰/۱۶۰۲۷	۷/۴۱ %	
خطای خالص	۵	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰	
Total	۱۹	۲/۱۶۲۴۲		۱۰۰ %	

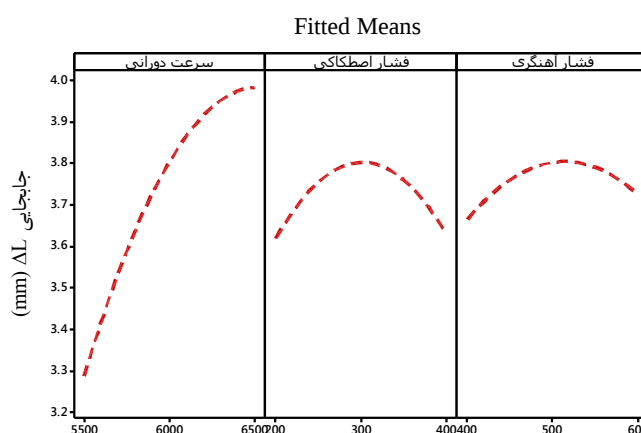
سرعت دورانی در عوامل خطی و از بین متغیرهای مرتبه دوم متغیر فشار اصطکاکی با توجه به اینکه مقدار P-Value آن‌ها از ۰/۰۵ کمتر است، بیشترین عوامل تاثیرگذار در فرآیند جوشکاری بوده‌اند.

رابطه (۴-۱) معادله رگرسیونی تابع پاسخ بر اساس تحلیل واریانس را بیان می‌کند. مقادیر $R-Sq(adj)=85/92\%$ و $R-Sq=92/59\%$ برای جابجایی ΔL در فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی، نشان دهنده دقت بالای مدل‌سازی به روش سطح پاسخ به کار رفته می‌باشد.

$$\Delta L = -26.3 + 0.00820(\omega) + 0.00957(P_{fr}) + 0.00765(P_{fo}) + 0.000001(\omega^2) - 0.000018(P_{fr}^2) - 0.00001(P_{fo}^2) \quad (4-1)$$

۴-۱-۲- تاثیر متغیرهای طراحی بر فرایند جوشکاری

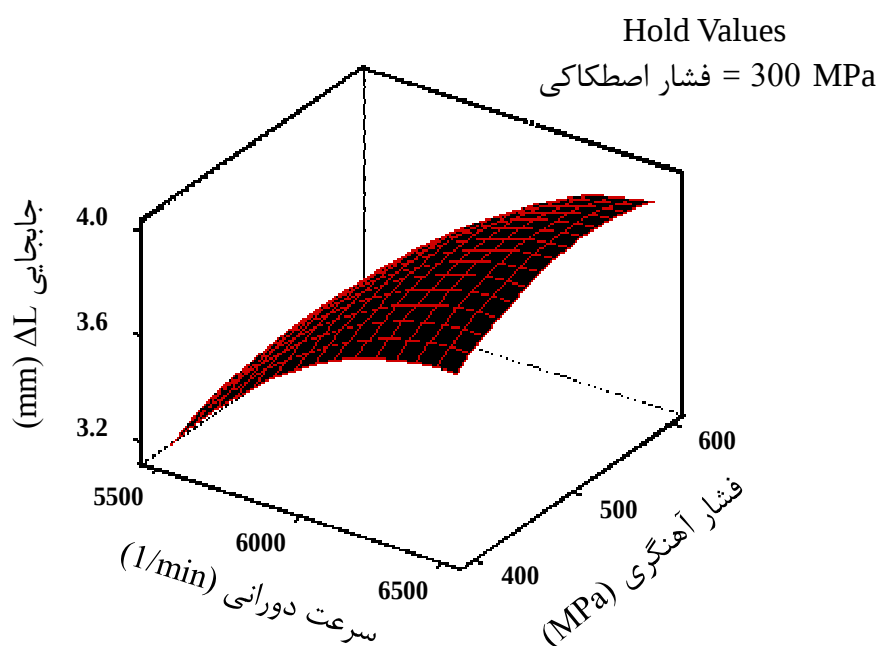
با توجه به تحلیل واریانس سرعت دورانی بیشترین تاثیر را در فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی دارد. این موضوع به وضوح در شکل ۴-۲ قابل مشاهده است. این تاثیر به گونه‌ای است که با افزایش سرعت دورانی ۲۲٪ جابجایی ΔL در فرآیند افزایش یافته است. قابل ذکر است که هرچقدر مقدار جابجایی ΔL بیشتر باشد اثر بهتری در استحکام ناحیه جوش دارد به طوری که ناخالصی‌های سطح، چربی‌ها، خشنی سطح و اکسیدها زدوده شده و در بخش پلیسه جمع می‌شود و همین‌طور فلز خالص در تماس با یکدیگر قرار گرفته و اتصال از کیفیت بالاتری برخوردار خواهد بود.



شکل ۴-۲ تاثیر متغیرهای فشار اصطکاکی، فشار آهنگری و سرعت دورانی در جوشکاری اصطکاکی دورانی

در نمودار تاثیر متغیرهای فرایند، جابجایی ایجاد شده با افزایش فشار اصطکاکی تا ۳۰۰ MPa افزایشی بوده و بعد از این مقدار کاهش می‌شود که دلیل این امر بدین خاطر است که با افزایش فشار، حرارت ایجاد شده در سطح مشترک میله‌ها کاهش یافته و در نتیجه درصد کمتری از سطوح به حالت خمیری می‌رسد که باعث کاهش جابجایی ΔL می‌شود.

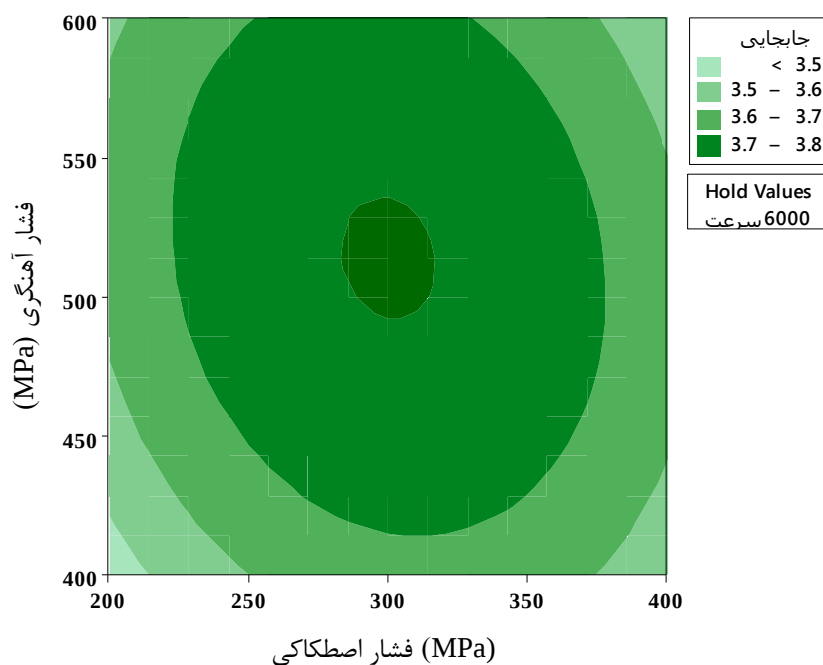
اثرات سه بعدی متغیرهای ورودی فرایند جهت بررسی بهتر و دقیق‌تر مربوط به تاثیر سرعت دورانی و فشار آهنگری در جابجایی ΔL فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی در شکل ۳-۴ ارائه شده است. در این شکل متغیر فشار اصطکاکی ثابت در نظر گرفته شده است تا بتوان تاثیر دو متغیر دیگر را در متغیر پاسخ بررسی کرد.



شکل ۳-۴ اثرات متغیرهای طراحی فرایند جوشکاری در گراف سه بعدی

با توجه به شکل ۳-۴، مشاهده می‌شود که وقتی سرعت دورانی به صورت تقریبی از مقدار ۶۰۰۰ RPM بیشتر می‌شود تاثیر زیادی بر متغیر پاسخ نداشته و بیشترین تاثیر این متغیر تا مقدار حدود ۶۰۰۰ RPM بوده است که این دور ملاک انجام آزمون‌های تجربی ما شده است. همچنین قابل مشاهده است که فشار آهنگری ۵۰۰ MPa بالاترین نقطه در نمودار می‌باشد که ملاک انتخاب این مقدار برای تست تجربی بوده است.

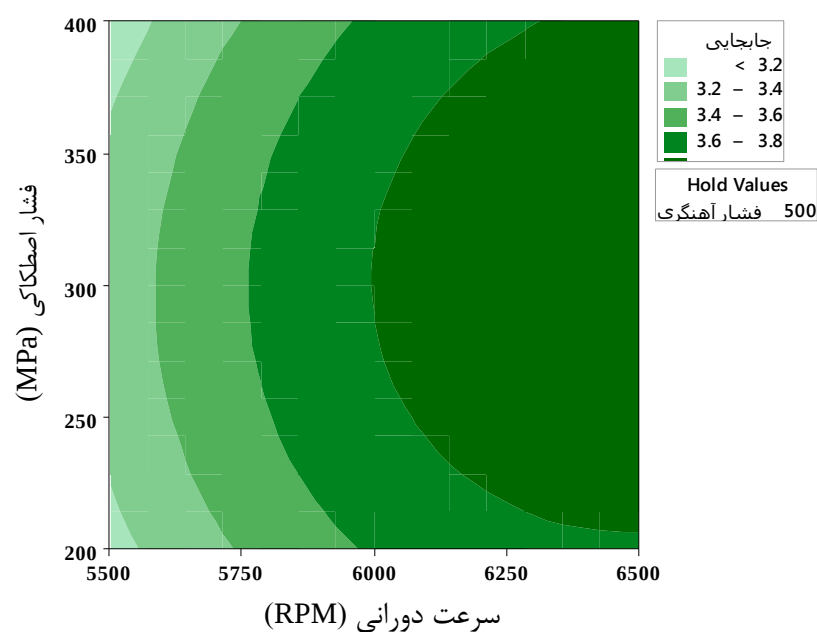
نمودارهای دو بعدی^۱ اثر متغیرهای مختلف در ادامه آمده است. در شکل ۴-۴ نمودار دوی بعدی اثر متغیر فشار آهنگری و فشار اصطکاکی را در سرعت دورانی ثابت ۶۰۰۰ RPM نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴ اثر متغیر فشار اصطکاکی و فشار آهنگری در سرعت ثابت

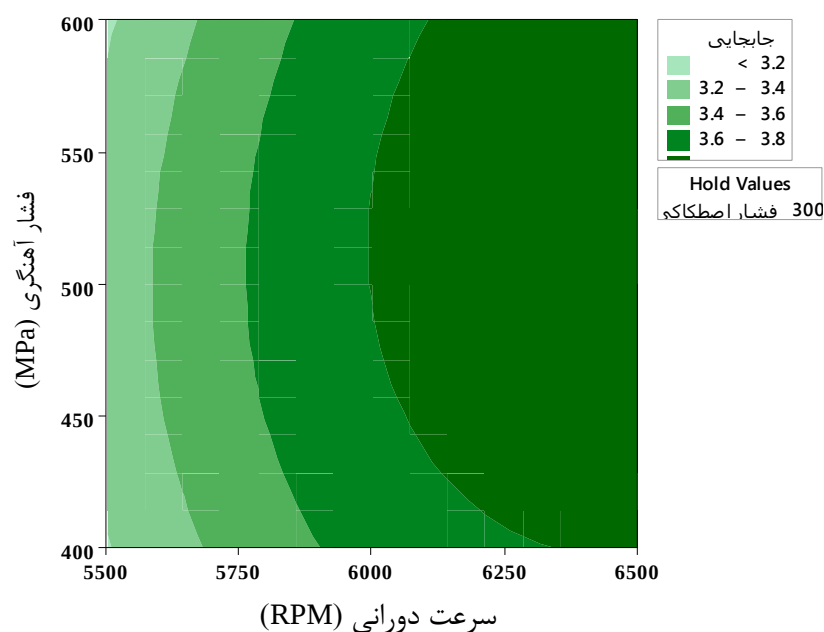
همچنین اثر دو بعدی متغیرهای سرعت دورانی و فشار اصطکاکی بر هم را در فشار آهنگری ثابت برابر ۵۰۰ MPa در شکل ۴-۵ مشاهده می‌کنید.

^۱ Contour plot



شکل ۴-۵ اثر متغیر سرعت دورانی و فشار اصطکاکی در فشار آهنگری ثابت برابر ۵۰۰ MPa

همینطور اثر سرعت دورانی و فشار آهنگری بر یکدیگر در یک نمودار دوبعدی در فشار اصطکاکی ثابت ۳۰۰ MPa در شکل ۴-۶ نشان داده شده



است.

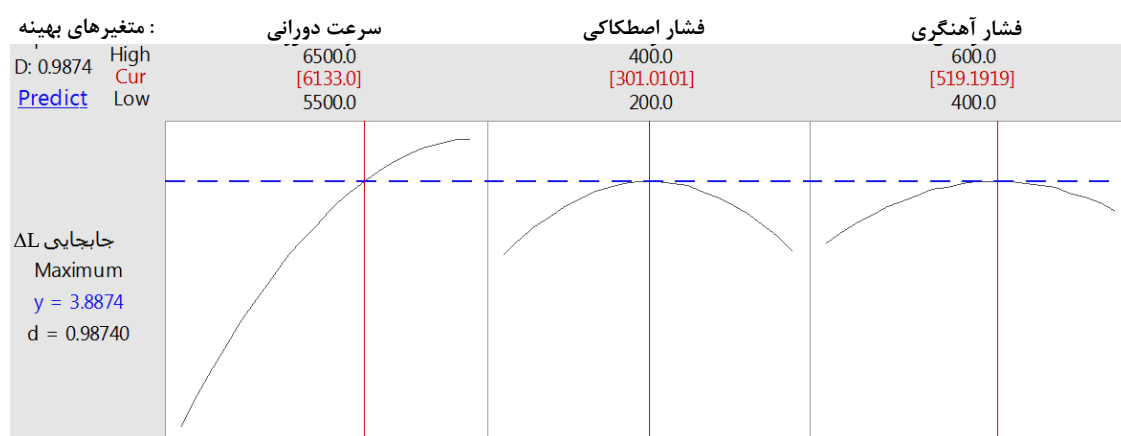
شکل ۴-۶ اثر متغیر سرعت دورانی و فشار آهنگری در فشار اصطکاکی ثابت

۴-۱-۳- متغیرهای بهینه فرآیند

بهینه‌سازی متغیرهای فرآیند جوشکاری برای رسیدن به کیفیت مطلوب جوشکاری یکی از اهداف مورد بررسی در این پایان نامه است. لذا هدف مطلوب در این بررسی رسیدن به بیشینه مقدار پلیسه یا همان جابجایی ΔL است. برای این کار از بخش بهینه‌ساز پاسخ^۱ نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است. جهت دستیابی به حداکثر کیفیت جوش با بیشینه مقدار جابجایی ΔL ، مقادیر بهینه برای متغیرهای طراحی سرعت دورانی، فشار اصطکاکی و فشار آهنگری به ترتیب ۶۱۳۳ RPM، ۳۰۱ MPa و ۵۱۹ MPa بدست آمده است که در شکل ۷-۴ قابل مشاهده است.

لازم به ذکر است که مقادیر مورد استفاده در آزمون تجربی برای متغیرهای سرعت دورانی، فشار اصطکاکی و فشار آهنگری به ترتیب ۶۰۰۰ RPM، ۳۰۰ MPa و ۵۰۰ MPa بوده است. همانطور که مشخص است این مقادیر انتخابی مقداری انحراف از مقادیر بهینه بدست آمده در نرم افزار دارد که این اختلاف بخاطر سختی تنظیم این مقادیر در آزمون عملی می باشد. به عنوان مثال سرعت انتخابی ۶۰۰۰ RPM در آزمون تجربی بوده که این بخاطر سختی تنظیم دستگاه برای ایجاد چنین دوری است.

تابع مطلوبیت پیش‌بینی شده توسط بهینه‌ساز پاسخ ۹۸٪ است که این مقدار در شکل ۷-۴ قابل مشاهده است.



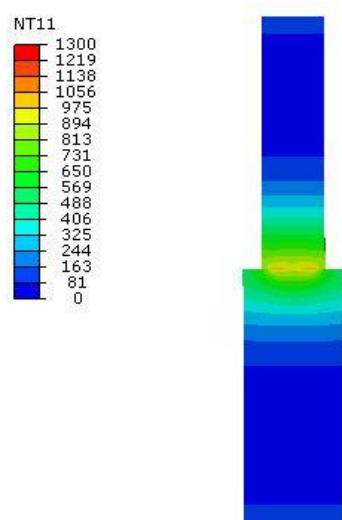
شکل ۷-۴ متغیرهای بهینه فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی

^۱ Response optimizer

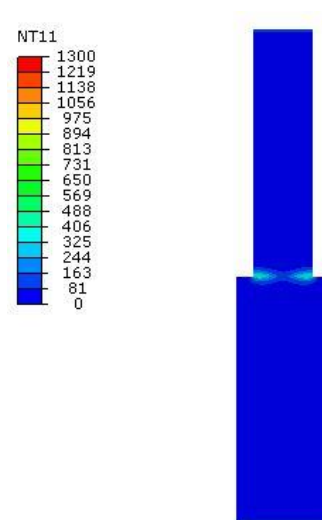
۴-۲- نتایج تحلیل المان محدود

۴-۲-۱- بررسی توزیع دما

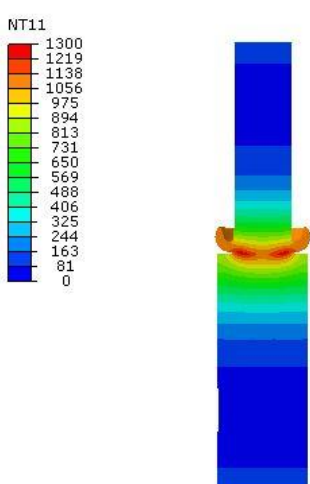
شکل ۴-۸ نحوه توزیع دما در دو میله مورد بررسی در حین فرآیند جوشکاری در سرعت دورانی ۶۰۰۰ RPM ، فشار اصطکاکی ۳۰۰ MPa ، فشار آهنگری ۵۰۰ MPa و در بازه زمانی (۰ تا ۵ ثانیه) را نشان می‌دهد.



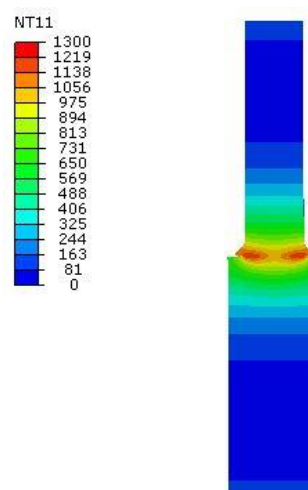
(ب)



(الف)



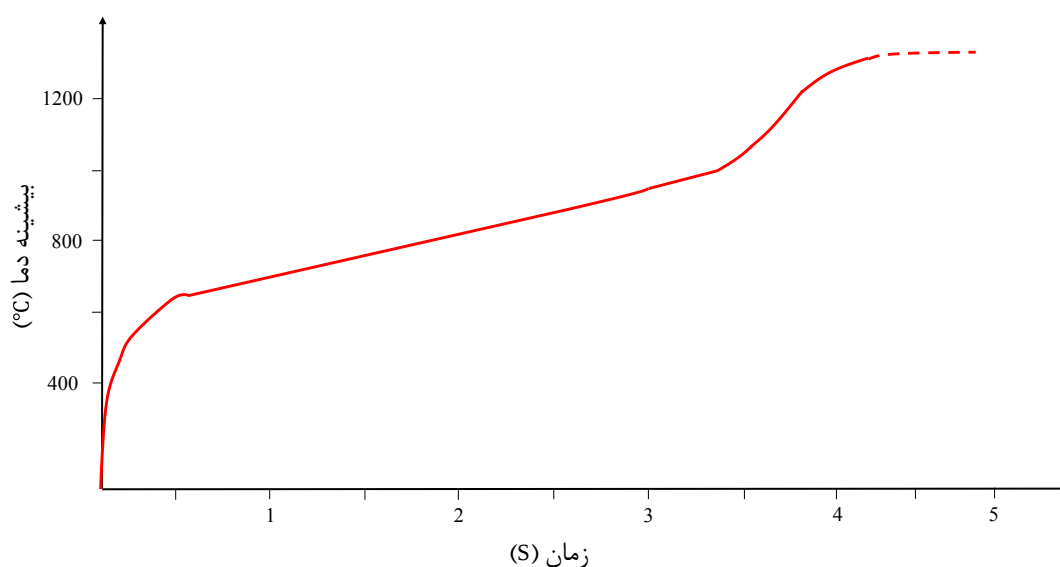
(د)



(ج)

شکل ۴-۸ توزیع دما در کل فرآیند جوشکاری بعد از (الف) ۰/۵ ثانیه (ب) ۲ ثانیه (ج) ۴ ثانیه و (د) ۵ ثانیه

نمودار توزیع دمای بیشینه بر حسب زمان در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. در این شکل افزایش دما بر حسب زمان‌های مختلف فرآیند جوشکاری نشان داده شده است. همانطور که در نمودار مشخص است در یک چهارم زمان پایانی فرآیند دما به بیشترین مقدار خود رسیده است و این امر باعث شده است که قسمتی از مواد به حالت خمیری رسیده و عملیات جوش به خوبی انجام پذیرد.



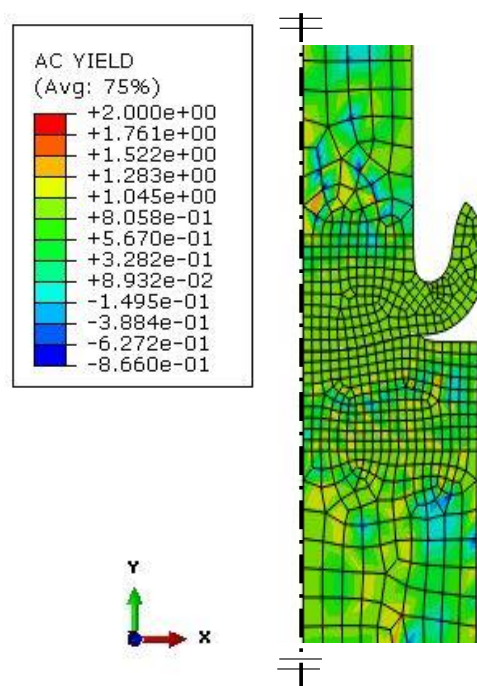
شکل ۴-۹ نمودار دمای بیشینه فرآیند در طی زمان جوشکاری

با افزایش فشار اصطکاکی دما با سرعت بیشتری نسبت به فشارهای پایین‌تر افزایش می‌یابد و باعث می‌شود که سطوح در تماس زودتر به مرحله خمیری شکل برسند که این امر مطابقت خوبی در بررسی‌های تجربی لی [۳۷] دارد. با افزایش فشار، سرعت نرخ تولید گرما افزایش می‌یابد.

۴-۲-۲- بررسی نواحی تسلیم

برای اینکه فرآیند اتصال به خوبی انجام شود، نیاز است که در محل جوش دما به اندازه‌ای بالا برود که مواد وارد منطقه تغییرشکل پلاستیک شود. ورود مواد به منطقه پلاستیک موجب می‌شود که سیلان به راحتی صورت پذیرد و با اعمال فشار آهنگری دو میله در هم فرو رفته و مواد به یکدیگر متصل شود. به عبارت دیگر تا ماده در محل

اتصال تسلیم نشده باشد عملیات جوش انجام نمی‌پذیرد. در شکل ۴-۱۰ نواحی از دو میله که در انتهای بازه زمانی دچار تسلیم شده‌اند، نشان داده شده است.

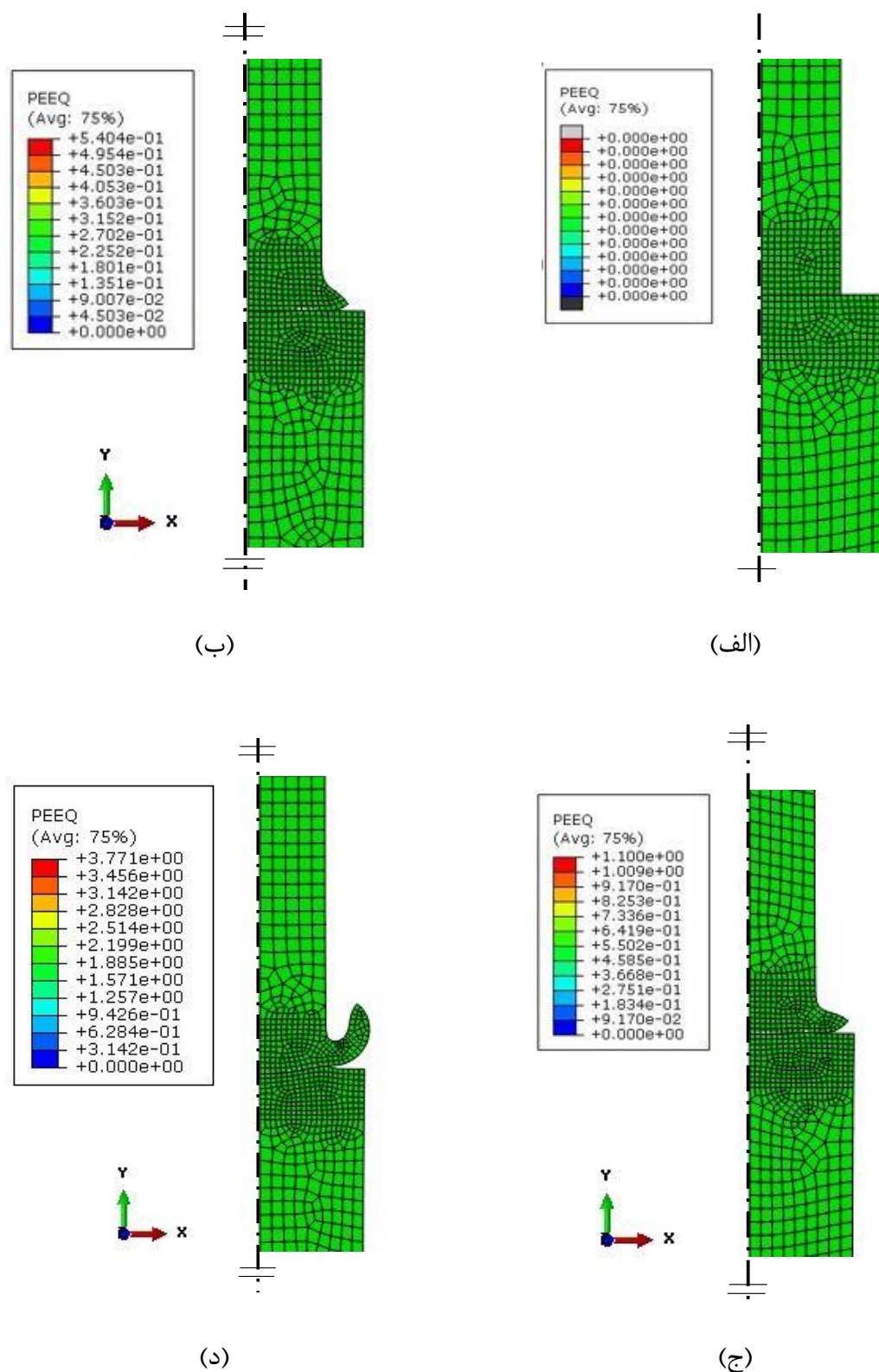


شکل ۴-۱۰ بررسی نواحی تسلیم شده در انتهای فرآیند

همچنین از شکل ۴-۱۰ مشخص است در میله از جنس آلیاژ کوار به دلیل ضریب انتقال حرارت بالا بخش بیشتری از ماده وارد منطقه پلاستیک شده است و در میله از جنس اینکونل ۶۰۰ به دلیل ضریب انتقال حرارت پایین‌تر بخش کمتری از آن وارد ناحیه پلاستیک شده است.

۴-۲-۳- بررسی شکل پلیسه‌های ایجاد شده

شکل ۴-۱۱ توزیع کرنش پلاستیک موثر و شکل پلیسه‌های ایجاد شده در فشار ۳۰۰ MPa و سرعت دورانی RPM ۶۰۰۰ را نشان می‌دهد. به خاطر استفاده از قابلیت نگاشت شبکه به شبکه، شکل پلیسه‌ها به صورت پیوسته می‌باشد.



شکل ۴-۱۱ توزیع کرنش پلاستیک و شکل پلیسه ایجاد شده (الف) ابتدای فرآیند (ب) 0.5 ثانیه بعد از اعمال فشار

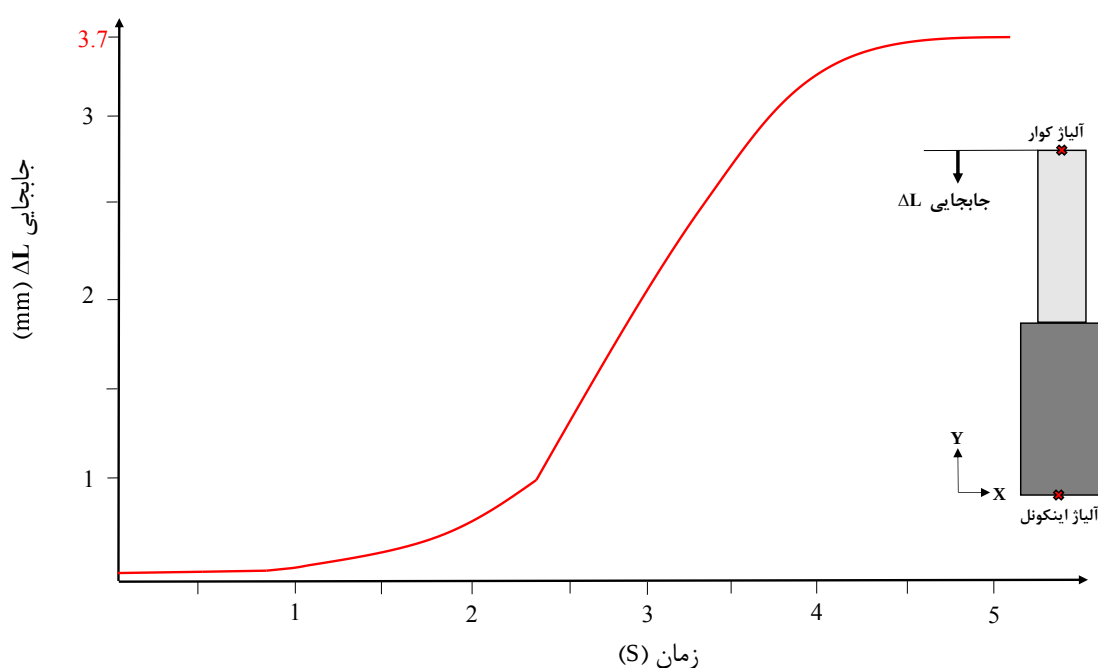
آهنگری (ج) 2 ثانیه بعد از فرآیند (د) انتهای فرآیند

با توجه به معادله (۲-۴) [۳۸] با افزایش میزان لغزش در مرحله فشار آهنگری و زمان فرآیند، نرخ تولید حرارت بیشتر شده یعنی پارامتر $(\Delta s/\Delta t)$ افزایش یافته و در نتیجه مقدار ماده خمیری ایجاد شده افزایش می‌یابد که باعث افزایش مقدار بیرون زدگی پلیسه می‌شود.

$$q = \eta \tau \dot{s} = \eta \tau \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (۲-۴)$$

که در این معادله، τ تنش اصطکاکی، $\dot{s}$ میزان لغزش لحظه‌ای و Δt مدت زمان لحظه‌ای فرآیند و q نرخ تولید حرارت می‌باشد. همچنین تنش اصطکاکی نیز وابسته به فشار اعمالی p ، ضریب اصطکاک μ و دمای دو سطح تحت لغزش روی همدیگر است. ضریب η نسبت گرمای تولید شده در اثر سایش به کار اصطکاکی انجام شده در سطح مشترک دو میله را نشان می‌دهد.

نمودار جابجایی ΔL برای نمونه مورد بررسی با مشخصات: فشار اصطکاکی ۳۰۰ MPa و فشار آهنگری ۵۰۰ MPa بعد از اتمام فرآیند جوشکاری در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲ نمودار جابجایی ΔL (کوتاه‌شوندگی طولی) در سرعت ۶۰۰۰ RPM

بعد از اتمام فرآیند جوشکاری میله کوآر به اندازه ۳/۷ mm کوتاه شده است. همچنین مشاهده می‌شود مقدار این کاهش بعد از اتمام زمان اصطکاکی با شیب بیشتری بوده است و در انتهای فرآیند مقدار آن ثابت مانده و تغییری نمی‌کند.

۳-۴ نتایج آزمون تجربی

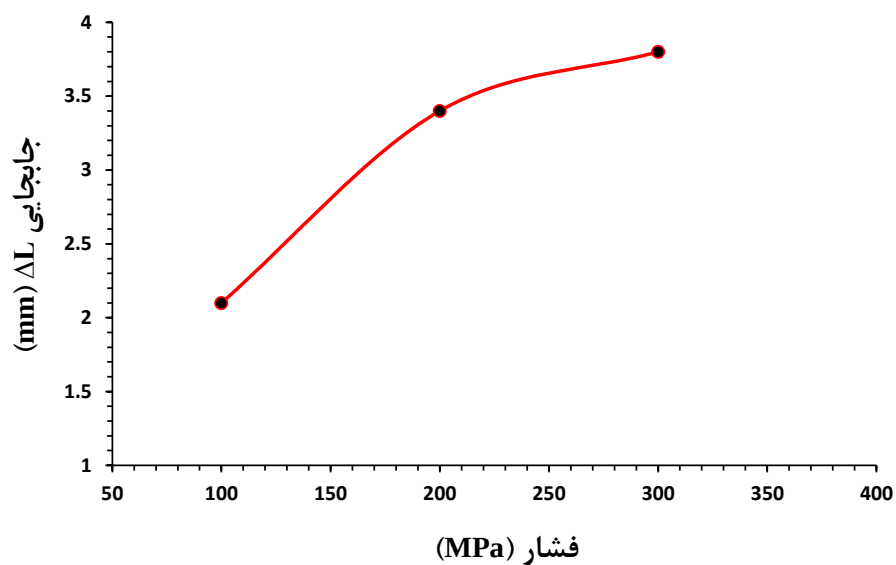
۳-۴-۱ میزان جابجایی ΔL در تست تجربی

برای بررسی تاثیر فشار آهنگری بر مقدار کوتاه‌شدگی محوری فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی، سه آزمون تجربی انجام پذیرفته است. مشخصات این سه آزمون تجربی در مقادیر مختلف فشار اصطکاکی و آهنگری در جدول ۳-۴ آورده شده است. قابل ذکر است که برای کنترل فشار اعمالی به نمونه‌ها، از دستگاه تست کشش تک محوره اینسترون ۸۸۰۲ استفاده شده است.

جدول ۳-۴ مشخصات آزمون تجربی در فشارهای مختلف

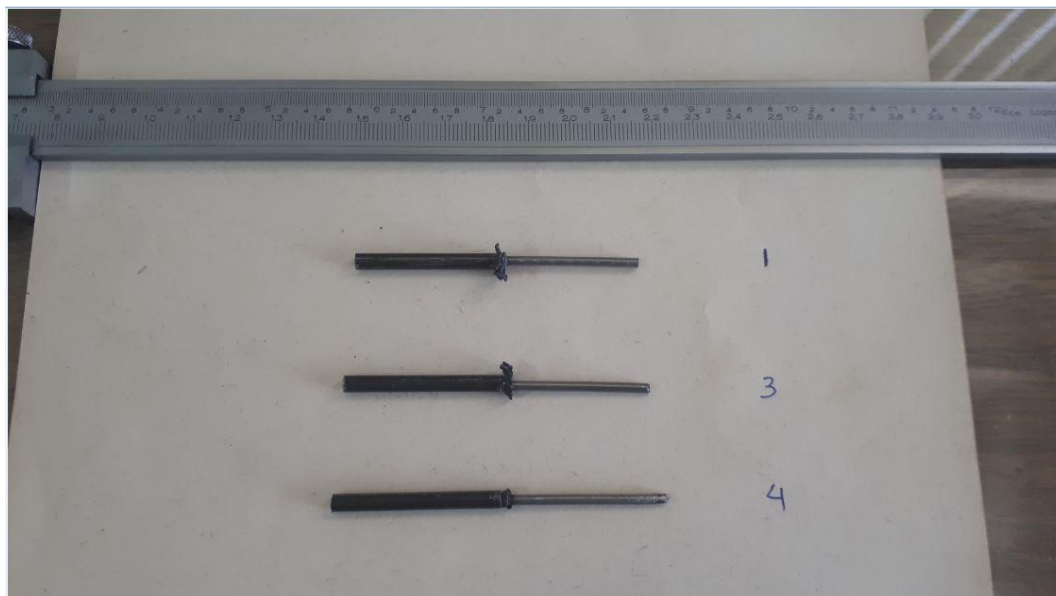
سرعت دورانی (RPM)	زمان آهنگری (S)	زمان اصطکاکی (S)	فشار آهنگری (MPa)	فشار اصطکاکی (MPa)	شماره آزمون
۶۰۰۰	۰/۰۲	۵	۵۰۰	۳۰۰	۱
۶۰۰۰	۰/۰۲	۵	۵۰۰	۲۰۰	۲
۶۰۰۰	۰/۰۲	۵	۵۰۰	۱۰۰	۳

نمودار میزان جابجایی ΔL سه آزمون اشاره شده در جدول ۳-۴ در شکل ۱۳-۴ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش فشار اصطکاکی از ۱۰۰ MPa به ۳۰۰ MPa، میزان جابجایی ΔL محوری از ۲/۱ mm به ۳/۸ mm تغییر پیدا کرده است که به اندازه ۸۱٪ افزایش در جابجایی ΔL محوری با افزایش فشار اصطکاکی مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۳ تغییرات میزان جابجایی ΔL محوری در فشارهای مختلف اصطکاکی

مقایسه‌ای از میزان جابجایی ΔL محوری نمونه‌های انجام شده در آزمون تجربی انجام شده بر روی دستگاه اینسترون در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۴ مقایسه سه آزمون تجربی انجام شده برای بررسی جابجایی ΔL محوری

۴-۳-۲- مقایسه نمونه تجربی با نمونه عددی

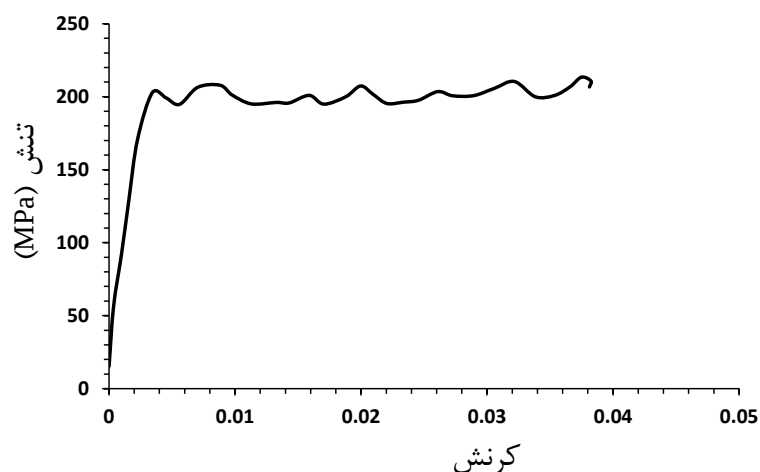
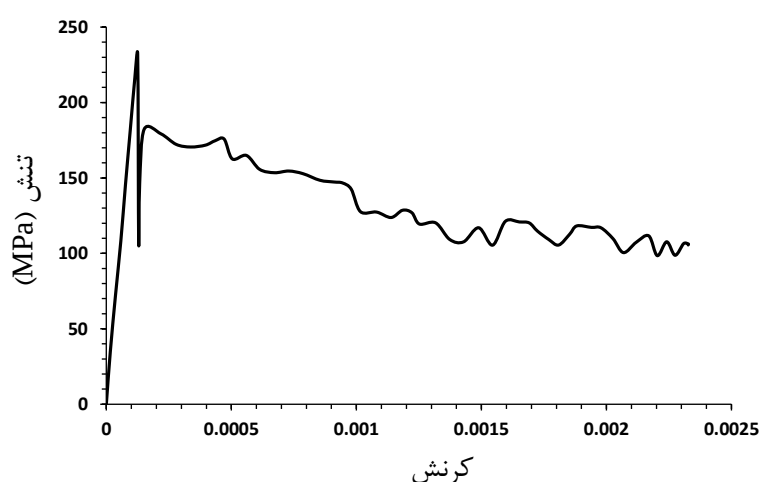
در این قسمت به مقایسه یک آزمون تجربی با نمونه عددی پرداخته می‌شود. مقدار جابجایی ΔL در هر دو آزمون با مشخصات برابر همچون فشار ۳۰۰ MPa و سرعت دورانی ۶۰۰۰ RPM با هم مقایسه شده است که در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. مقدار تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده در آزمون عددی فوق برابر ۳/۷ mm بدست آمده است که این مقدار برای نمونه تجربی برابر ۳/۸ mm بدست آمده است. مقدار خطای محاسبه شده برابر ۲/۷٪ می‌باشد.

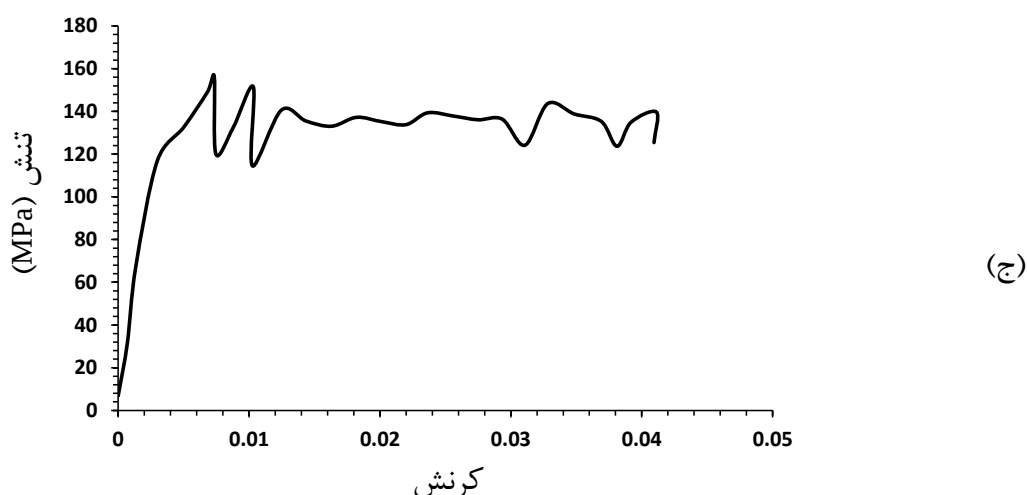


شکل ۴-۱۵ مقایسه آزمون تجربی و عددی برای بررسی مقدار پلیسه ایجاد شده

۴-۳-۳- بررسی مقاومت کششی محل اتصال نمونه های آزمون تجربی

به منظور بررسی مقاومت کششی قطعات جوش کاری شده به روش اصطکاکی دورانی، نمونه های با نرخ کرنش $1/s$ تحت کشش قرار گرفته و نتایج آزمون کشش نمونه ها که به صورت نمودار تنش-کرنش می باشد در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که هر کدام از نمودارها مربوط به قطعات جوشکاری شده با فشار اصطکاکی اشاره شده در جدول ۴-۳ می باشد.





شکل ۴-۱۶ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های جوشکاری شده (الف) نمونه با فشار اصطکاکی ۳۰۰ MPa (ب) نمونه با فشار اصطکاکی ۲۰۰ MPa (ج) نمونه با فشار اصطکاکی ۱۰۰ MPa

همان‌طور که از شکل ۴-۱۶ مشخص می‌شود در شکل (الف)، ناحیه جوش نمونه با فشار اصطکاکی ۳۰۰ MPa تا مقدار تنش ۲۳۲ MPa مقاومت کرده و بعد از این تنش تسلیم شده است به عبارتی جوش بریده شده است. در شکل (ب)، ناحیه جوش نمونه با فشار اصطکاکی ۲۰۰ MPa در تنش برابر با ۲۱۳/۵ MPa تسلیم شده است و در شکل (ج)، نمونه جوشکاری شده در فشار ۱۰۰ MPa در تنشی برابر با ۱۵۶ MPa تسلیم در آن اتفاق افتاده است. در نمونه‌ی جوشکاری شده در فشار اصطکاکی ۱۰۰ MPa به دلیل فشار کم در هنگام اتصال دو میله به هم باعث شده که اولاً مقدار پلیسه ایجاد شده کم باشد و همچنین اتم‌های کمتری در محل اتصال با هم در ارتباط باشند و این امر باعث شده که جوش مقاومت کمتری نسبت به دو نمونه اول داشته باشد. همچنین با کم شدن فشار اصطکاکی از مقدار ۳۰۰ MPa به ۱۰۰ MPa، استحکام مکانیکی اتصال به مقدار ۳۳٪ کاهش یافته است.

همین‌طور یک نمونه از قطعات تولید شده توسط تجهیز مورد استفاده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی شکل ۴-۱۷ (الف) و یک نمونه از قطعات دچار شکست شده در حین فرآیند کشش در شکل ۴-۱۷ (ب) نشان داده شده است. نمونه‌هایی که از محل جوش دچار شکست شده اند همان نمونه های اولیه جوشکاری بودند که کیفیت مناسب نداشتند و لذا با نیروی پایینی از محل جوش دچار شکست شدند. اما سایر نمونه های جوشکاری شده در اثر

کشش از محل جوش دچار شکست نشدند که بیانگر کیفیت مناسب جوش می باشد. میله‌ها بعد از فرآیند جوشکاری از روی تجهیز باز نشده و تنظیمات دستگاه اینسترون به نحوی اعمال شد که نمونه‌ها را تحت کشش قرار دهد. فرآیند کشش تا آنجایی ادامه داده شده که میله‌ها بریده شوند و کامل از هم جدا شوند اما به دلیل استفاده از بیبی کلت در فیکسچر، لغزش (سر خوردن) قطعه شروع شده و به مرحله شکست نرسیده است که در نمودارهای تنش - کرنش هم حالت زیکزاک دیده می شود.



(الف)



(ب)

شکل ۴-۱۷ الف) نمونه جوشکاری شده اصطکاکی دورانی با کیفیت مناسب ب) نمونه های اولیه دچار شکست

شده با کیفیت جوش پایین بعد از فرآیند کشش

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان نامه با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و آزمون تجربی به بررسی فرآیند جوشکاری اصطکاکی دورانی بر روی دو آلیاژ ناهم جنس به نام‌های آلیاژ اینکونل ۶۰۰ و آلیاژ کوار پرداخته شده است. به منظور انجام تست تجربی طراحی و ساخت دستگاهی انجام شد که بتواند این دو آلیاژ که قطر کمتر از ۵ mm دارند را تحت عملیات جوشکاری اصطکاکی با تعداد دور بالا با موفقیت به هم جوش دهد. مهمترین نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

- در آزمون عددی مشاهده شد که با کاهش سرعت دورانی، سطوح تماس دو میله به یکدیگر اتصال پیدا نمی‌کند که این امر به دلیل عدم ایجاد گرمای لازم برای خمیری شدن فلز در منطقه سطح تماس دو میله می‌باشد.

- همچنین در سرعت دورانی ثابت (۶۰۰۰ RPM)، با کاهش فشار اصطکاکی، فرآیند اتصال به خوبی انجام نمی‌شود زیرا که پلیسه ایجاد شده خیلی کم بوده و محل جوش از مقاومت کافی برخوردار

نبوده است. با کاهش فشار اصطکاکی، ناحیه متأثر از حرارت کم شده و در نتیجه عمق کمتری از ماده به حالت خمیری رسیده و اتصال از مقاومت کافی برخوردار نیست.

- در سرعت دورانی ثابت، با افزایش فشار آهنگری کمانش در میله از جنس آلیاژ کوار ایجاد شده و باعث می‌شود که فرآیند اتصال ناموفق باشد. بخاطر بالاتر بودن ضریب انتقال حرارت در این آلیاژ منطقه متأثر از حرارت بزرگ‌تر بوده و به عبارتی با افزایش فشار آهنگری میله کج شده و اتصال انجام نمی‌شود.

- با کاهش زمان اصطکاکی نیز فرآیند جوشکاری ناموفق بود. با کاهش این زمان حرارت ایجاد شده در محل اتصال دو میله کاهش یافته به عبارتی مناطق وارد فاز خمیری نمی‌شوند و با وجود این شرایط اتصالی صورت نمی‌پذیرد.

- در فشار آهنگری ثابت، با افزایش زمان و فشار اصطکاکی میزان پلیسه ایجاد شده در محل جوش افزایش یافته و در نتیجه جابجایی ΔL نیز افزایش می‌یابد و محل اتصال از کیفیت جوش بالایی برخوردار خواهد بود.

- با افزایش بیش از حد فشار اصطکاکی به دلیل آنکه فقط دمای ناحیه تماس بالا رفته و سایر نقاط اجازه تغییر شکل خمیری پیدا نمی‌کنند مقدار جابجایی ΔL کاهش می‌یابد.

- استحکام کششی نمونه با فشار اصطکاکی ۳۰۰ MPa برابر با ۲۳۲ MPa بوده که این مقدار بیشترین مقاومت در بین نمونه‌ها بوده است و نمونه بعد از این تنش تسلیم شده است یا به عبارتی جوش بریده است. استحکام کششی نمونه‌ی جوشکاری شده در فشار اصطکاکی ۱۰۰ MPa به دلیل فشار کم در هنگام اتصال باعث شده که اولاً مقدار پلیسه ایجاد شده کم باشد و همچنین اتم‌های کمتری در محل اتصال با هم در ارتباط باشند و باعث شده که جوش مقاومت کمتری نسبت به نمونه‌های

دیگر داشته باشد. با کم شدن فشار اصطکاکی از مقدار ۳۰۰ MPa به ۱۰۰ MPa ، استحکام مکانیکی اتصال به مقدار ۳۳٪ کاهش یافته است.

۵-۲- پیشنهادها

در این بخش به ذکر چند پیشنهاد برای ادامه کار و همچنین بهبود این پایان نامه به شرح زیر پرداخته می‌شود.

- استفاده از گیرنده‌هایی در اطراف میله‌ها که از کمانش آن‌ها هنگام اعمال فشار آهنگری جلوگیری شود.
- سطح تماس میله‌ها قبل از انجام فرآیند جوشکاری کاملاً پرداخت سطحی شده و از تفرانس تختی قابل قبولی برخوردار باشند.
- استفاده از موتور الکتریکی که دارای دوره‌های متفاوتی باشد یا مجهز به اینورتر و کنترل دور باشد تا بتوان در دوره‌های مختلف آزمون تجربی را انجام داد.
- استفاده از فیکسچر مناسب به جای بیبی کلت جهت جلوگیری از لغزش در زمان کشش
- بررسی مدل با استفاده از زیربرنامه DFLUX
- بررسی مدل در سرعت‌های دورانی بیشتر از ۶۰۰۰ RPM و بررسی تاثیر سرعت‌های خیلی بالا
- بررسی مدل در فشار اصطکاکی و آهنگری کمتر از مقادیر مورد بررسی در این پایان نامه

پیوست الف – کدهای نرم افزار آباکوس

کدهای مورد استفاده در شبیه سازی عددی فرایند جوشکاری اصطکاکی دورانی میله های مورد بررسی در زیر

آورده شده است.

```

1
2
3 # -----
4 # Moal and Massoni pipe inertia weld with remeshing
5 # Axisymmetric model using axisymmetric twist element (CGAX4HT and CGAX3T)
6 # -----
7
8 import os, sys, re, osutils
9 import driverUtils, sys
10 from driverConstants import *
11 from abaqusConstants import *
12 from driverExceptions import *
13 from driverStandard import StandardAnalysis
14 from analysis import AnalysisApplication
15 sys.path.append(os.getcwd())
16 from inertiaiweld_utils import *
17 import uti
18
19 print "start inertiaiweld.py"
20 platform = uti.getPlatform()
21
22 # Setup user subroutine file name
23
24 userSubFileName = "inertiaiweld_sub.for"
25 command = "abaqus make library="+userSubFileName
26 os.popen(command)
27 #userSubFileName = "inertiaiweld_sub-std.obj"
28 # define basic job parameters
29
30 execfile('inertiaiweld_job_param.py')
31
32 # define initial solver parameters
33
34 execfile('inertiaiweld_solver_param.py')
35
36 # define utility functions
37
38 execfile('inertiaiweld_utils.py')
39
40 # Start from the beginning
41
42 logFile = openLogFile(primaryJobName)
43 writeHeading(logFile)
44 totalTime = 0.0
45 HeatingTimeRemaining = HeatingTime - totalTime
46 timeRemaining = HeatingTimeRemaining
47 totalTimeRemaining = HeatingTimeRemaining+ForgingTime
48 appliedPressure = HeatingPressure
49
50 # Create the original analysis model
51
52 execfile('inertiaiweld_original_build.py')
53
54 # Run the original analysis
55
56 #bad
57 #options = baseOptions
58 #options['job'] = primaryJobName
59 #options['input'] = primaryJobName
60 #options['user'] = userSubFileName
61 cmd = []
62 cmd.append('-job')
63 cmd.append('%s' % primaryJobName)
64 cmd.append('-input')
65 cmd.append('%s' % primaryJobName)
66 cmd.append('-user')
67 cmd.append('%s' % userSubFileName)
68 cmd.append('-interactive')
69 cmd.append('-cpus')

```

```

70 cmd.append('10')
71 sys.stdout = sys.__stdout__
72 job = AnalysisApplication(cmd)
73 writeModelInfo(logFile,primaryJobName,timeRemaining,
74 try:
75     job.run()
76 except:
77     print "Oops..."
78
79 #analysis = StandardAnalysis(options)
80 #status = analysis.run()
81 #plotShape(primaryJobName)
82 totalTime = totalTime + elapsedTime(primaryJobName)
83 timeRemaining = simulationTime - totalTime
84 writeAnalysisInfo(logFile,primaryJobName,totalTime,t
85 heatingTimeRemaining = HeatingTime - totalTime
86 if HeatingTimeRemaining>1.e-5:
87     timeRemaining = HeatingTimeRemaining
88     totalTimeRemaining = HeatingTimeRemaining+ForgingT
89     appliedPressure = HeatingPressure
90 else:
91     timeRemaining = ForgingTime - totalTime + HeatingT
92     totalTimeRemaining = timeRemaining
93     appliedPressure = ForgingPressure
94     flywheelStartVelocity = 0.0
95
96 # add U to odb for 2D plot
97
98 #add_unew_odb(primaryJobName)
99
100 # Remesh, if necessary
101
102 remeshStart = 0
103 timeRemaining0 = timeRemaining
104
105 if timeRemaining >= 1.e-6:
106     for remeshIndex in range(remeshStart,maxRemeshings):
107         remeshNumber = remeshIndex + 1
108         cleanupOldFiles(logFile,primaryJobName,remeshNumber)
109         remeshJobName = newJobName(primaryJobName,remeshNumber)
110         ancestorJobName = priorJobName(primaryJobName,remeshNumber)
111         execfile('inertiaweld_remesh_build.py')
112         writeModelInfo(logFile,remeshJobName,timeRemaining,remeshNumber)
113
114         # bad
115         options = baseOptions
116         options['job'] = remeshJobName
117         options['input'] = remeshJobName
118         options['user'] = userSubFileName
119         options['rezone'] = ON
120         options['oldjob'] = ancestorJobName
121
122         cmd = []
123         cmd.append('-job')
124         cmd.append('%s' % remeshJobName)
125         cmd.append('-input')
126         cmd.append('%s' % remeshJobName)
127         cmd.append('-oldjob')
128         cmd.append('%s' % ancestorJobName)
129         cmd.append('-user')
130         cmd.append('%s' % userSubFileName)
131         cmd.append('-interactive')
132         cmd.append('-cpus')
133         cmd.append('10')
134         sys.stdout = sys.__stdout__
135         remeshJob = AnalysisApplication(cmd)
136         try:
137             remeshJob.run()
138         except:
139             print "Oops..."
140             remeshAnalysis = StandardAnalysis(options)

```

```

140 #         remeshAnalysis.run()
141 #         plotShape(remeshJobName)
142         totalTime = totalTime + elapsedTime(remeshJobName)
143         timeRemaining = simulationTime - totalTime
144         HeatingTimeRemaining = HeatingTime - totalTime
145         if HeatingTimeRemaining > 1.e-5:
146             timeRemaining = HeatingTimeRemaining
147             totalTimeRemaining = HeatingTimeRemaining + ForgingTime
148             appliedPressure = HeatingPressure
149         else:
150             timeRemaining = ForgingTime - totalTime + HeatingTime
151             totalTimeRemaining = timeRemaining
152             appliedPressure = ForgingPressure
153             flywheelStartVelocity = 0.0
154         writeAnalysisInfo(logFile, remeshJobName, totalTime, totalTimeRemaining)
155         #add_unew_odb(remeshJobName)
156         if timeRemaining < 1.e-6:
157             break
158     # cleanup the last few files before exit
159     Filename = primaryJobName + "_remesh_" + '%i' % remeshNumber
160     cleanupOldFiles(logFile, Filename, 2)
161     remeshNumber = remeshNumber - 1
162     Filename = primaryJobName + "_remesh_" + '%i' % remeshNumber
163     cleanupOldFiles(logFile, Filename, 2)
164     writeEnding(logFile)
165     print "Job completed successfully!"
166     sys.exit()

```

پارامترهای مورد استفاده:

```

1  # define job control parameters
2
3  primaryJobName      = 'RodInertiaWeld'
4  meshSize            = 0.25
5  nearWeldMeshSize    = 0.1
6  distortionLimit      = 0.8
7  nearWeldZone        = 1.0
8  remeshFeatureAngle  = 10.0
9  HeatingTime         = 4
10 ForgingTime         = 0.2
11 simulationTime       = HeatingTime+ForgingTime
12 maxRemeshings        = 9999
13 maxUpset             = 0.05
14 outputFrequency      = 0.02
15
16 flywheelInertia      = 0.05
17 flywheelStartVelocity = 6000
18 HeatingPressure       = 300
19 ForgingPressure      = 500
20
21 selfContactDistance  = 0.01
22 selfContactPressure  = 10000.
23
24 weldContactDistance  = 0.1
25 weldContactPressure  = 18000.0
26
27 #Top Rod
28 RodTopR              = 1.2
29 RodTopL              = 10.
30 # Bot Rod
31 RodBotR              = 1.9
32 RodBotL              = 10.
33
34 #Time Incrementation Parmeters
35 TimeIncini=0.00001
36 TimeIncMax=0.02

```

ورودی آباکوس:

```

1 from abaqus import *
2 from abaqusConstants import *
3 import odbAccess
4 import annotationToolset
5 from odbAccess import *
6 from caeModules import *
7 from driverUtils import executeOnCaeStartup
8 executeOnCaeStartup()
9
10 def MakeXY(baseName,historyVariable,remeshPoints):
11     remeshNumber = 0
12     totalTime = 0.0
13     totalUpset = 0.0
14     cont = True
15     totalList = []
16     remeshPointsList = []
17     while cont:
18         print "Processing remesh number ",remeshNumber
19         if remeshNumber == 0:
20             fileName = baseName + ".odb"
21         else:
22             fileName = baseName + "_remesh_" + "%i" % (remeshNumber) + ".odb"
23         try:
24             odb = session.openOdb(name=fileName)
25             frameCount = 0
26             for frame in odb.steps['Weld step'].frames:
27                 maxTemp = 0.0
28                 stepTime = frame.frameValue
29                 for value in frame.fieldOutputs['NT11'].values:
30                     thisTemp = value.data
31                     if thisTemp > maxTemp:
32                         maxTemp = thisTemp
33                 if frameCount != 0: # The first frame is redundant with the previous job's last frame
34                     totalList.append((stepTime+totalTime,maxTemp))
35                 if frameCount == 1 and remeshNumber > 0:
36                     remeshPointsList.append((stepTime+totalTime,maxTemp))
37                 frameCount = frameCount + 1
38                 remeshNumber = remeshNumber + 1
39                 totalTime = totalTime + stepTime
40             session.odbs[fileName].close()
41         except:
42             cont = False
43
44         xQuantity = visualization.QuantityType(type=NONE)
45         yQuantity = visualization.QuantityType(type=NONE)
46         session.XYData(name=historyVariable, data=tuple(totalList),
47             axis1QuantityType=xQuantity,
48             axis2QuantityType=yQuantity, )
49         if remeshPoints == True:
50             session.XYData(name='RemeshPoints', data=tuple(remeshPointsList),
51                 axis1QuantityType=xQuantity,
52                 axis2QuantityType=yQuantity, )
53
54     baseName = "RodInertiaWeld"
55     xyPlotName = 'XYPlot-1'
56
57     viewport = session.viewports['Viewport: 1']
58     viewport.makeCurrent()
59     viewport.restore()
60
61     MakeXY(baseName,'maxTemp',True)
62
63
64     try:
65         xyp = session.XYPlot(xyPlotName)
66     except:
67         xyp = session.xyPlots[xyPlotName]
68     chartName = xyp.charts.keys()[0]
69     chart = xyp.charts[chartName]

```

```

70 xy0 = session.xyDataObjects['maxTemp']
71 c0 = session.Curve(xyData=xy0)
72 xy2 = session.xyDataObjects['RemeshPoints']
73 c2 = session.Curve(xyData=xy2)
74 chart.setValues(curvesToPlot=(c0, c2, ), )
75 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=xyp)
76 session.curves['RemeshPoints'].symbolStyle.setValues(show=True)
77 session.curves['RemeshPoints'].lineStyle.setValues(show=False)
78 session.curves['RemeshPoints'].symbolStyle.setValues(size=2)
79 session.charts['Chart-1'].axes1[0].axisData.setValues(useSystemTitle=False,
80 title='Time (s)')
81 session.charts['Chart-1'].axes2[0].axisData.setValues(useSystemTitle=False,
82 title='Maximum Temperature (C)')
83 session.charts['Chart-1'].axes2[0].axisData.setValues(maxValue=1400,
84 maxAutoCompute=False)
85 session.charts['Chart-1'].axes2[0].axisData.setValues(minValue=0,
86 minAutoCompute=False)
87 session.charts['Chart-1'].axes2[0].axisData.setValues(labelFormat=DECIMAL)
88 session.charts['Chart-1'].axes2[0].axisData.setValues(labelNumDigits=0)
89 session.printToFile(fileName=baseName + '_maxtemp_plot', format=PNG,
90 canvasObjects=(session.viewports['Viewport: 1'], ))
91

```

کد مورد استفاده برای المان بندی مجدد:

```

1  # create remeshed model and restart input file
2
3
4  import os, sys
5  sys.path.append(os.getcwd())
6  from inertiaWeld_utils import *
7
8  vp1 = session.Viewport(name='Viewport: 1')
9  vp1.makeCurrent()
10 session.viewports['Viewport: 1'].maximize()
11
12
13 Mdb()
14 #ancestorJobName = primaryJobName
15 openMdb(primaryJobName + '.cae')
16 mdb.saveAs(remeshJobName + '.cae')
17 openMdb(remeshJobName + '.cae')
18
19
20 model=mdb.models['Model-1']
21 a = model.rootAssembly
22 try:
23     a.deleteFeatures(('Datum plane-2', 'Partition face-2', ))
24     a.deleteFeatures(('Datum plane-1', 'Partition face-1', ))
25 except:
26     pass
27 a.regenerate()
28
29
30 # Replace the Rods with the deformed configuration outlines
31
32 updateGeometry('bottomRod_weld','BOTTOMROD_WELD-1',ancestorJobName + '.odb',remeshFeatureAngle)
33 updateGeometry('topRod_weld', 'TOPROD_WELD-1', ancestorJobName + '.odb',remeshFeatureAngle)
34 p = model.parts['bottomRod_weld']
35 p.ReferencePoint(point=(0.0, -RodBotL, 0.0))
36 p = model.parts['topRod_weld']
37 p.ReferencePoint(point=(0.0, RodTopL, 0.0))
38 from part import *
39 from assembly import *
40 a = model.rootAssembly
41 a.backup()
42 a.regenerate()
43
44
45 # Re-establish attributes
46
47
48 # materials
49
50 from caeModules import *
51 p = model.parts['bottomRod_weld']
52 f = p.faces
53 faces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
54 region = regionToolset.Region(faces=faces)
55 p = model.parts['bottomRod_weld']
56 p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Rod material', offset=0.0)
57 p = model.parts['topRod_weld']
58 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
59 p = model.parts['topRod_weld']
60 f = p.faces
61 faces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
62 region = regionToolset.Region(faces=faces)
63 p = model.parts['topRod_weld']
64 p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Rod material', offset=0.0)
65
66 # sets
67 from assembly import *
68 lowestEdgeSet(model.rootAssembly,'bottomRod_weld-1','bottomAttachment')
69 highestEdgeSet('topRod_weld-1','topAttachment')

```

```

70 refSet('topRod_weld-1','topFlywheelAttachment')
71 refSet('bottomRod_weld-1','bottomFlywheelAttachment')
72
73
74 # surfaces
75 highestSurface('topRod_weld-1','pressureSurface')
76 perimeterSurface('topRod_weld-1','topWeldSurface')
77 perimeterSurface('bottomRod_weld-1','bottomWeldSurface')
78
79
80
81
82
83
84
85 # Redefine the step
86
87
88 from step import *
89 model.steps['Weld step'].setValues(
90     description='Weld step', timePeriod=timeRemaining,
91     maxInc=timeRemaining, initialInc=1.e-5, minInc=2e-08)
92 try:
93     del model.predefinedFields['Predefined Field-1']
94 except:
95     pass
96
97
98 # Remesh
99
100
101 # Apply partitions
102 #
103 # Find the lowest point on the top Rod
104 e = a.instances['topRod_weld-1'].edges
105 v = a.instances['topRod_weld-1'].vertices
106 upperCutPosition = 0
107 lowestLocation = 99999
108 for k in range(len(v)):
109     ((x,y,z),) = v[k].pointOn
110     if y < lowestLocation:
111         lowestLocation = y
112 upperCutPosition = nearWeldZone+lowestLocation
113 upperCutPosition = sliceTopInstance('topRod_weld-1',upperCutPosition)
114 #surfaceNearBottom('topRod_weld-1','topWeldSurface',upperCutPosition - 0.001)
115
116 # Find the highest point on the lower Rod
117
118 e = a.instances['bottomRod_weld-1'].edges
119 v = a.instances['bottomRod_weld-1'].vertices
120 highestLocation = -99999
121 for k in range(len(v)):
122     ((x,y,z),) = v[k].pointOn
123     if y > highestLocation:
124         highestLocation = y
125 lowerCutPosition = highestLocation-nearWeldZone
126 lowerCutPosition = sliceBottomInstance('bottomRod_weld-1',lowerCutPosition)
127 #surfaceNearTop('bottomRod_weld-1','bottomWeldSurface',lowerCutPosition + 0.001)
128
129 removeEdgeSeeds('topRod_weld-1')
130 removeEdgeSeeds('bottomRod_weld-1')
131 seedNearZero('topRod_weld-1',nearWeldMeshSize,(0.25*nearWeldZone) + upperCutPosition)
132 seedNearZero('bottomRod_weld-1',nearWeldMeshSize,abs(lowerCutPosition - (0.25*nearWeldZone)))
133
134 a = model.rootAssembly
135 f1 = a.instances['topRod_weld-1'].faces
136 faces1 = f1.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]',), )
137 f2 = a.instances['bottomRod_weld-1'].faces
138 faces2 = f2.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]',), )
139 pickedRegions = faces1+faces2
140 a.setMeshControls(regions=pickedRegions, elemShape=QUAD, technique=FREE,

```

```

141     allowMapped=True)
142     partInstances =(a.instances['topRod_weld-1'],
143                     a.instances['bottomRod_weld-1'], )
144     a.generateMesh(regions=partInstances)
145
146
147     mdb.save()
148     # Find the lowest central point on the top Rod
149     a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
150     ylowestLocation = 99999
151     v = a.instances['topRod_weld-1'].vertices
152     for k in range(len(v)):
153         ((x,y,z),) = v[k].pointOn
154         if y < ylowestLocation and x==0:
155             ylowestLocation = y
156             zlowestLocation = z
157     v1 = v.findAt(((0, ylowestLocation, 0.0), ))
158     a.Set(vertices=v1, name='RodTopBotCenter')
159
160     # Find the highest central point on the lower Rod
161     a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
162     yhighestLocation = -99999
163     v = a.instances['bottomRod_weld-1'].vertices
164     for k in range(len(v)):
165         ((x,y,z),) = v[k].pointOn
166         if y > yhighestLocation and x==0:
167             yhighestLocation = y
168     v1 = v.findAt(((0.0, yhighestLocation, 0.0), ))
169     a.Set(vertices=v1, name='RodBotTopCenter')
170
171     mdb.save()
172     #Create assembly set Centre and apply X symmetry BC
173     a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
174     e1 = a.instances['bottomRod_weld-1'].edges
175     edges1 = e1.getByBoundingBox(xMin=-0.01, xMax=0.01,yMin=-9999., yMax=9999.)
176     e2 = a.instances['topRod_weld-1'].edges
177     edges2 = e2.getByBoundingBox(xMin=-0.01, xMax=0.01,yMin=-9999., yMax=9999.)
178     a.Set(edges=edges1+edges2, name='Center')
179     a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
180     region = a.sets['Center']
181
182     ##
183     mdb.models['Model-1'].rootAssembly.SetByBoolean(name='Attachments', sets=(
184         mdb.models['Model-1'].rootAssembly.sets['bottomAttachment'],
185         mdb.models['Model-1'].rootAssembly.sets['topAttachment']))
186     mdb.models['Model-1'].TemperatureBC(amplitude=UNSET, createStepName='Weld step',
187         distributionType=UNIFORM, fieldName='', fixed=OFF, magnitude=100.0, name=
188         'Attachments', region=
189         mdb.models['Model-1'].rootAssembly.sets['Attachments'])
190     mdb.models['Model-1'].ActuatorSensorProp(name='flywheel inertia',
191         realProperties=(flywheelInertia, maxUpset,flywheelStartVelocity
192         ), integerProperties=())
193
194     region = a-surfaces['pressureSurface']
195     mdb.models['Model-1'].Pressure(name='Load-1', createStepName='Weld step',
196         region=region, distributionType=UNIFORM, field='', magnitude=appliedPressure,
197         amplitude=UNSET)
198
199
200     ## Add additional keywords
201     ##
202
203     import job
204     from job import *
205     model.keywordBlock.synchVersions()
206     model.keywordBlock.setValues(edited = 0)
207     model.keywordBlock.synchVersions()
208     modelBlock = whereIsLastBlock("Step") - 1
209     model.keywordBlock.insert(modelBlock, """map solution""")
210     historyBlock = whereIsLastBlock("End Step") - 1

```

```

211 model.keywordBlock.insert(historyBlock, """controls,analysis=discontinuous""")
212 model.keywordBlock.insert(historyBlock, """,,,8.26e5""")
213 model.keywordBlock.insert(historyBlock, """controls,parameters=field,field=rotation""")
214 model.keywordBlock.insert(historyBlock, """contact controls,frictiononset=delayed,automatictolerances""")
215 mdb.models['Model-1'].setValues(noPartsInputFile=OFF)
216 mdb.jobs.changeKey(fromName=primaryJobName, toName=remeshJobName)
217 mdb.jobs[remeshJobName].writeInput()
218 mdb.save()

```

کد مورد استفاده در حفظ فاصله بین دو میله:

```

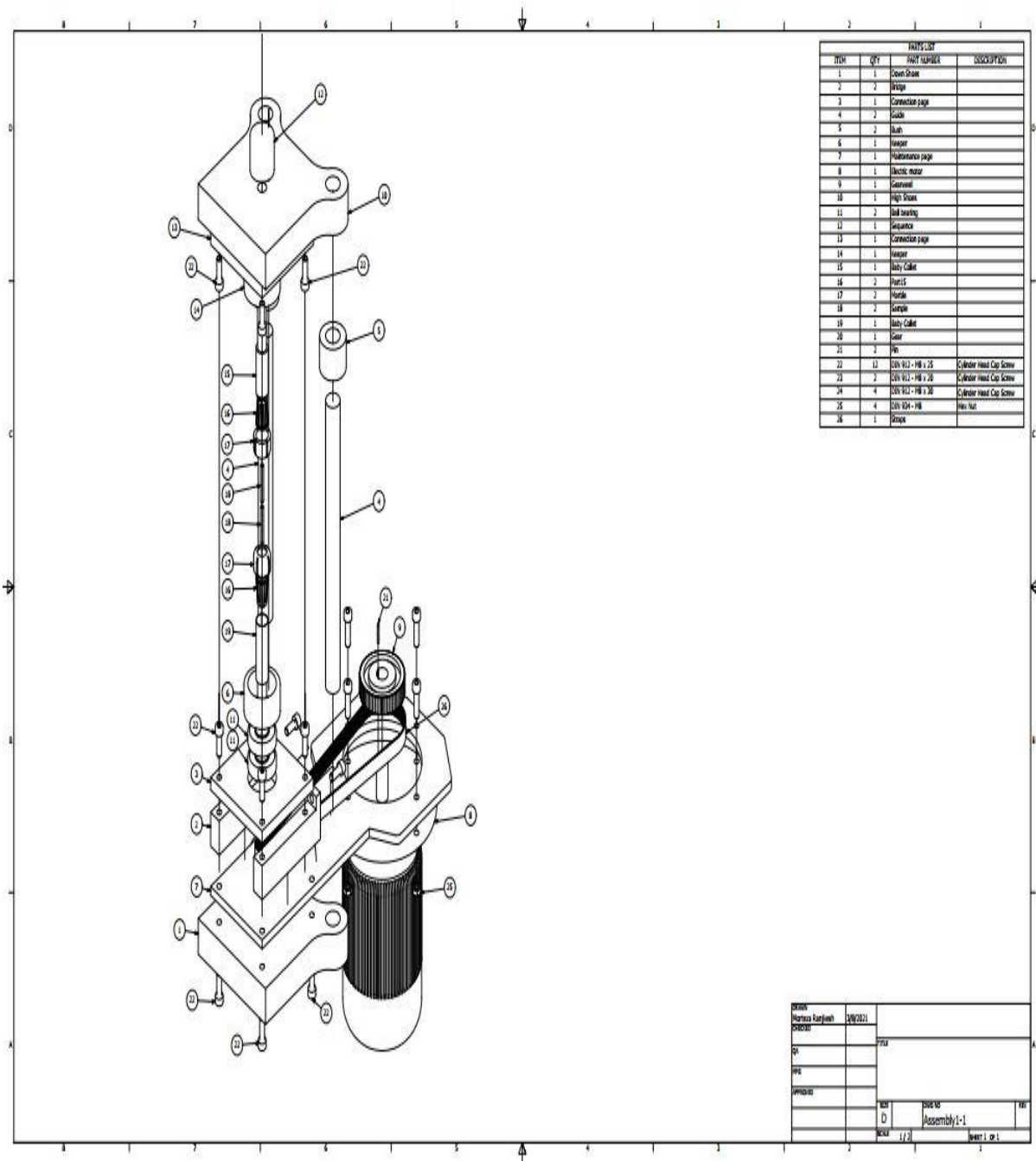
1  from abaqus import *
2  from abaqusConstants import *
3  import odbAccess
4  import annotationToolset
5  from odbAccess import *
6  from caeModules import *
7  from driverUtils import executeOnCaeStartup
8  executeOnCaeStartup()
9
10 def MakeXY(baseName,historyVariable,remeshPoints):
11     remeshNumber = 0
12     totalTime = 0.0
13     totalUpset = 0.0
14     cont = True
15     totalList = []
16     remeshPointsList = []
17     while cont:
18         if remeshNumber == 0:
19             fileName = baseName + ".odb"
20         else:
21             fileName = baseName + "_remesh_" + "%i" % (remeshNumber) + ".odb"
22         try:
23             odb = session.openOdb(name=fileName)
24             for key in odb.steps['Weld step'].historyRegions.keys():
25                 if key.find('TOPROD') != -1:
26                     dataObject = odb.steps['Weld step'].historyRegions[key].historyOutputs['U2'].data
27             xyName = baseName + "_remesh_" + "%i" % (remeshNumber)
28             frameCount = 0
29             for xyPair in dataObject:
30                 jobUpset = -xyPair[1]
31                 if frameCount != 0: # The first frame is redundant with the previous job's last frame
32                     totalList.append((xyPair[0]+totalTime,totalUpset + jobUpset))
33                 if frameCount == 1 and remeshNumber > 0:
34                     remeshPointsList.append((xyPair[0]+totalTime,totalUpset + jobUpset))
35                 frameCount = frameCount + 1
36                 stepTime = xyPair[0]
37             del session.xyDataObjects[xyName]
38             remeshNumber = remeshNumber + 1
39             totalTime = totalTime + stepTime
40             totalUpset = totalUpset + jobUpset
41             session.odbs[fileName].close()
42         except:
43             cont = False
44
45     xQuantity = visualization.QuantityType(type=NONE)
46     yQuantity = visualization.QuantityType(type=NONE)
47     session.XYData(name=historyVariable, data=tuple(totalList),
48                   axis1QuantityType=xQuantity,
49                   axis2QuantityType=yQuantity, )
50
51     if remeshPoints == True:
52         session.XYData(name='RemeshPoints', data=tuple(remeshPointsList),
53                       axis1QuantityType=xQuantity,
54                       axis2QuantityType=yQuantity, )
55
56     baseName = "RodInertiaWeld"
57     xyPlotName = 'XYPlot-1'
58
59     viewport = session.viewports['Viewport: 1']
60     viewport.makeCurrent()
61     viewport.restore()
62
63     MakeXY(baseName,'Upset',True)
64
65 try:
66     xyp = session.XYPlot(xyPlotName)
67 except:
68     xyp = session.xyPlots[xyPlotName]
69 chartName = xyp.charts.keys()[0]
70 chart = xyp.charts[chartName]
71 xy0 = session.xyDataObjects['Upset']

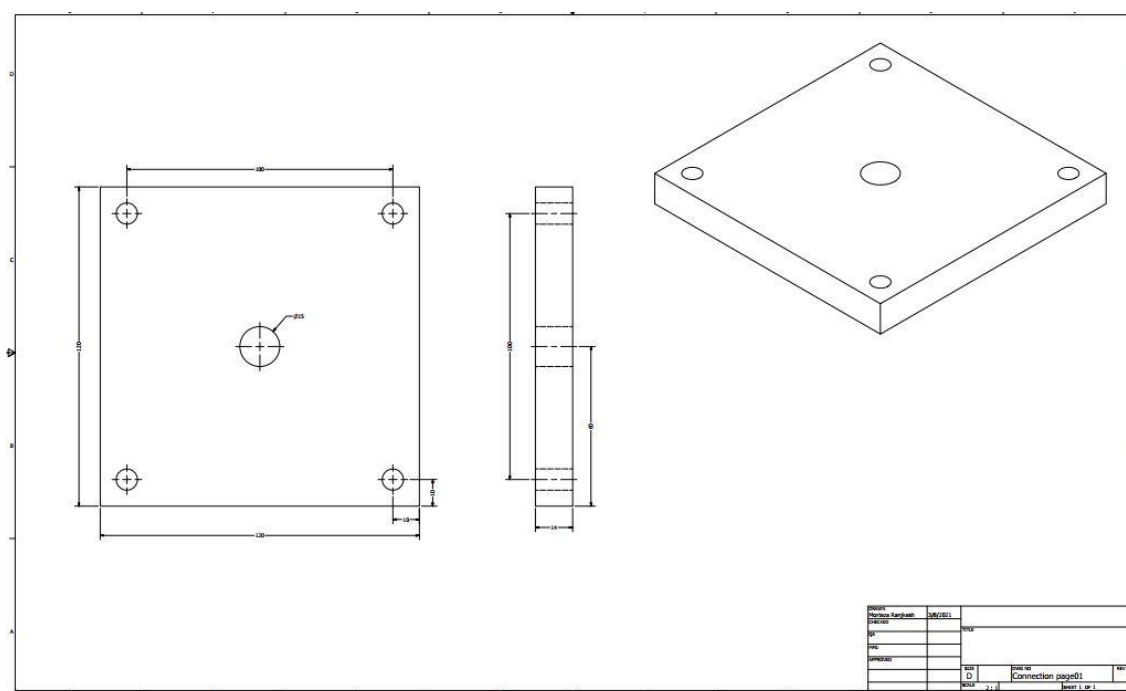
```

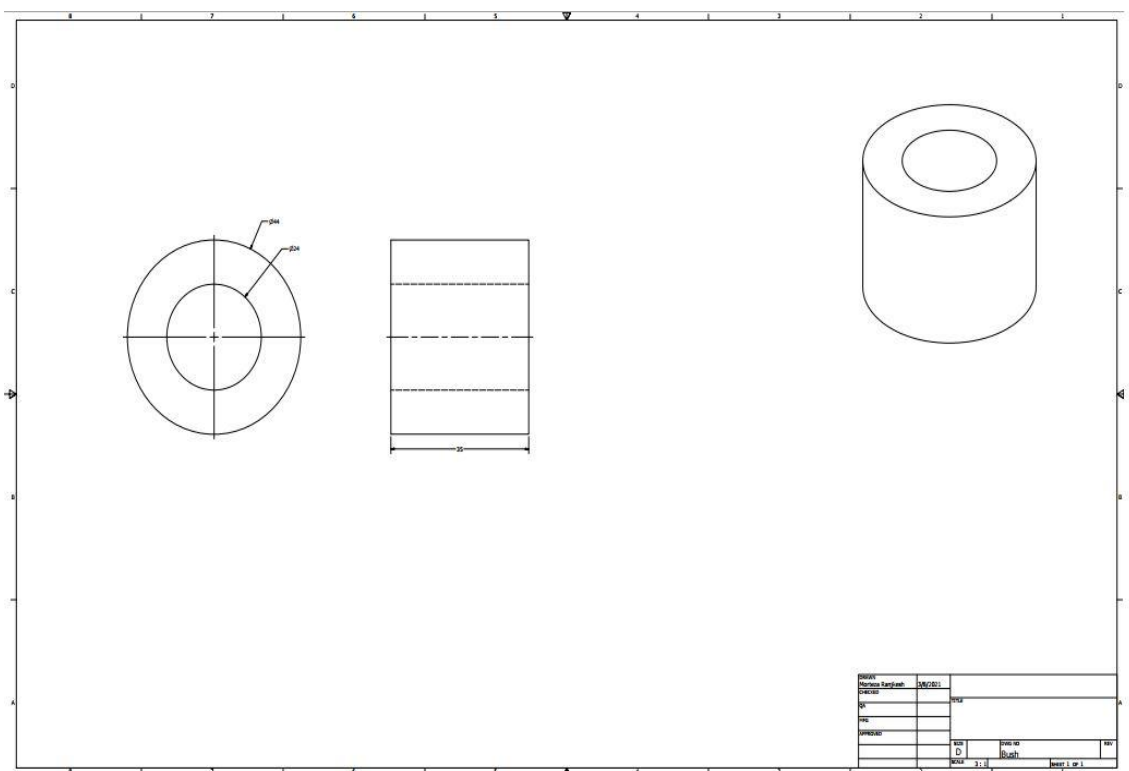
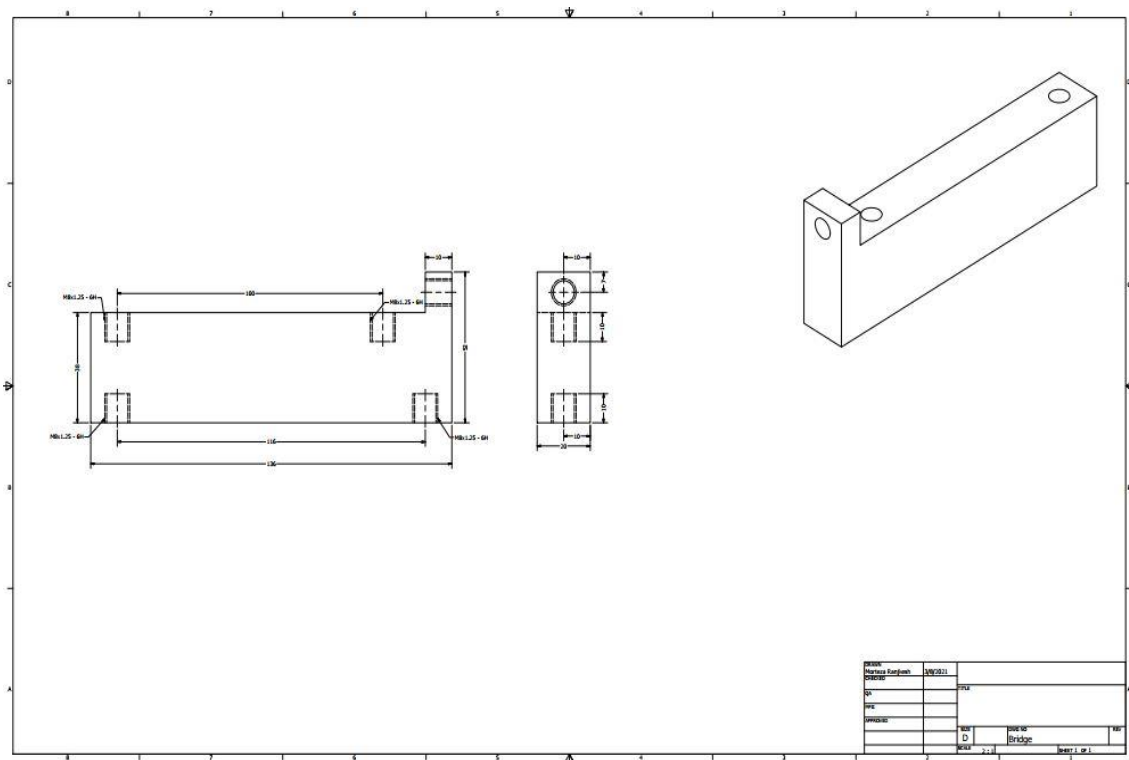
```

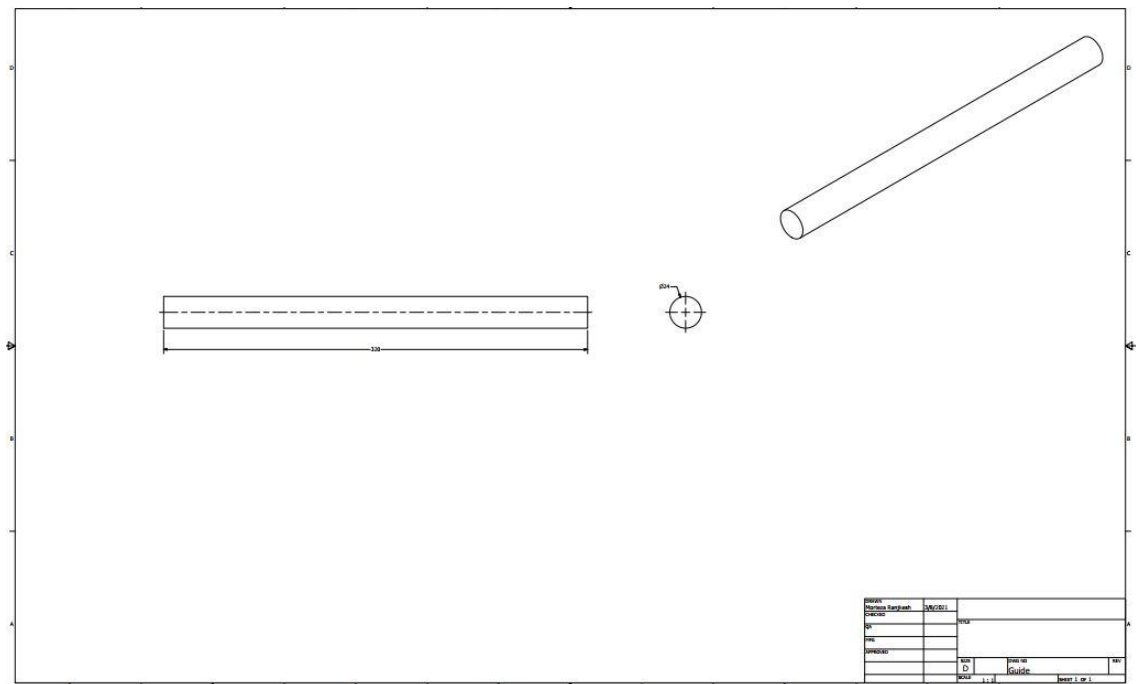
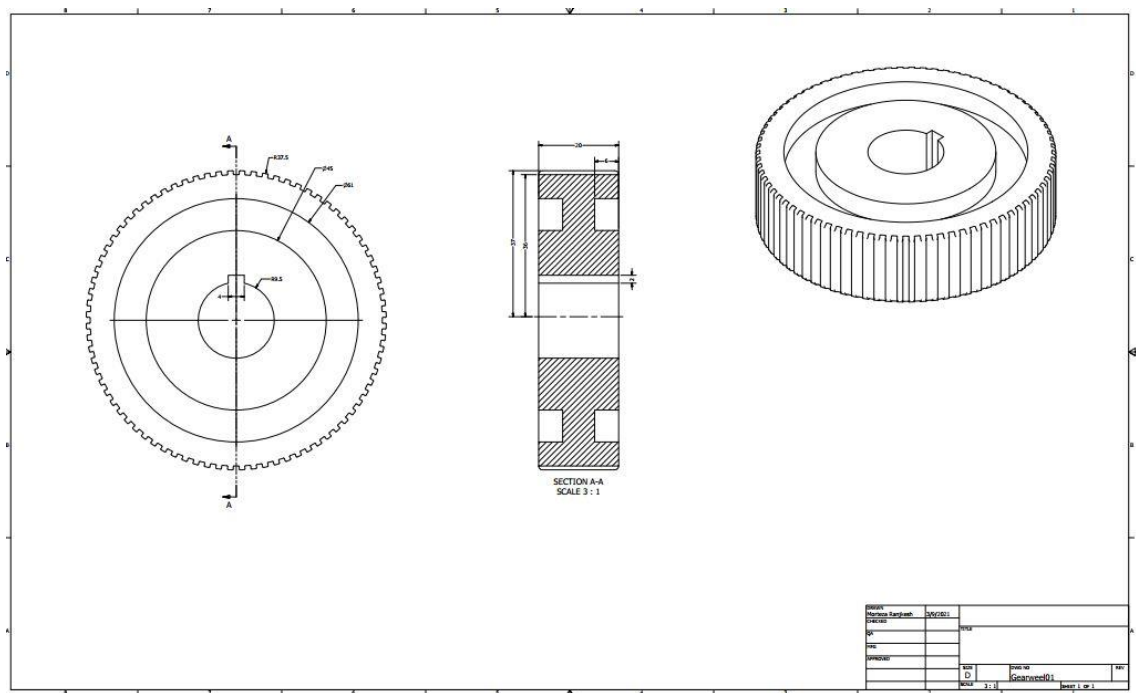
72 c0 = session.Curve(xyData=xy0)
73 xy2 = session.xyDataObjects['RemeshPoints']
74 c2 = session.Curve(xyData=xy2)
75 chart.setValues(curvesToPlot=(c0, c2, ), )
76 session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=xyp)
77 session.curves['RemeshPoints'].symbolStyle.setValues(show=True)
78 session.curves['RemeshPoints'].lineStyle.setValues(show=False)
79 session.curves['RemeshPoints'].symbolStyle.setValues(size=2)
80 session.charts['Chart-1'].axes1[0].axisData.setValues(useSystemTitle=False,
81 title='Time (s)')
82 session.charts['Chart-1'].axes2[0].axisData.setValues(useSystemTitle=False,
83 title='Axial shortening (mm)')
84 session.printToFile(fileName=baseName + '_upset_plot', format=PNG,
85 canvasObjects=(session.viewports['Viewport: 1'], ))
86

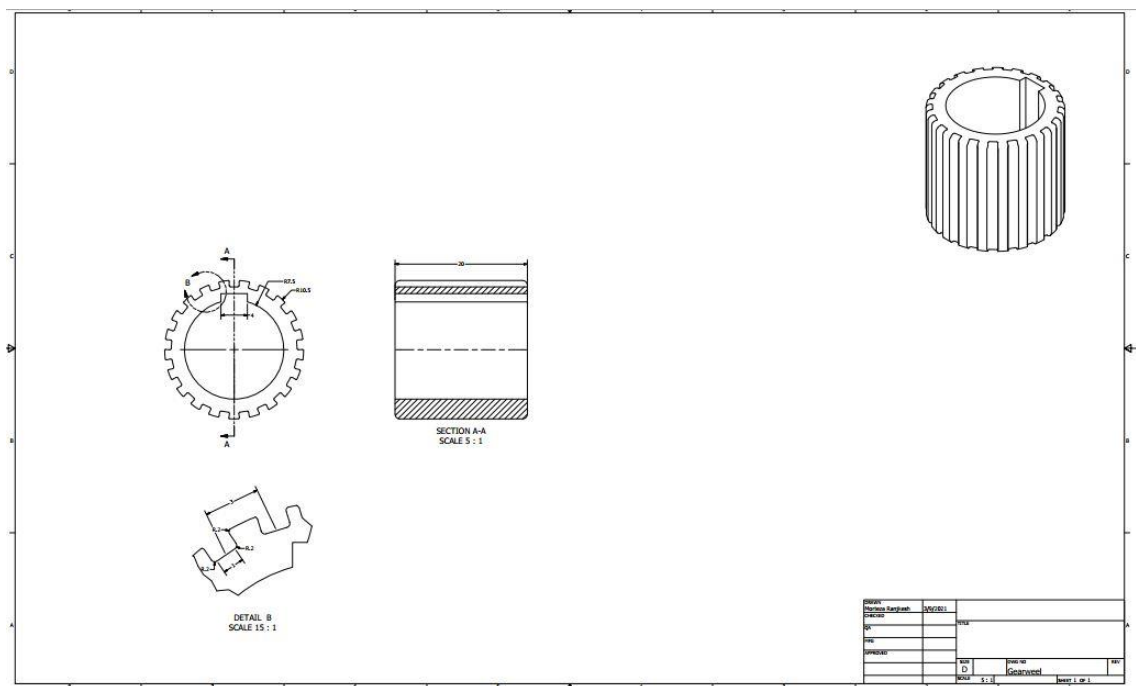
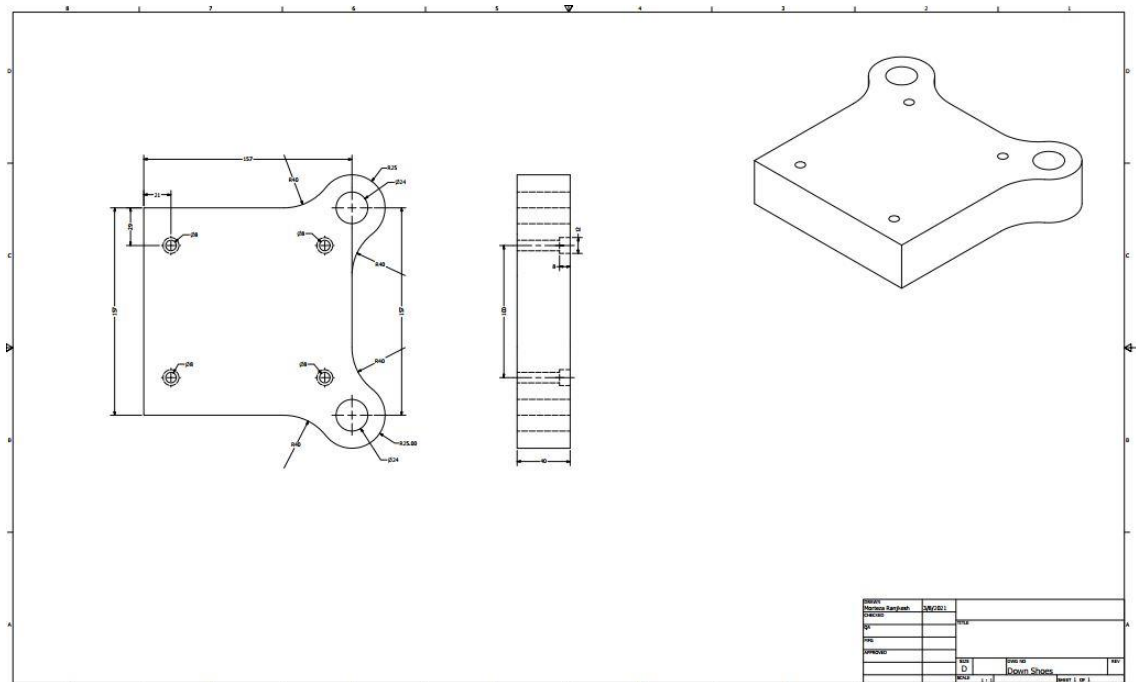
```

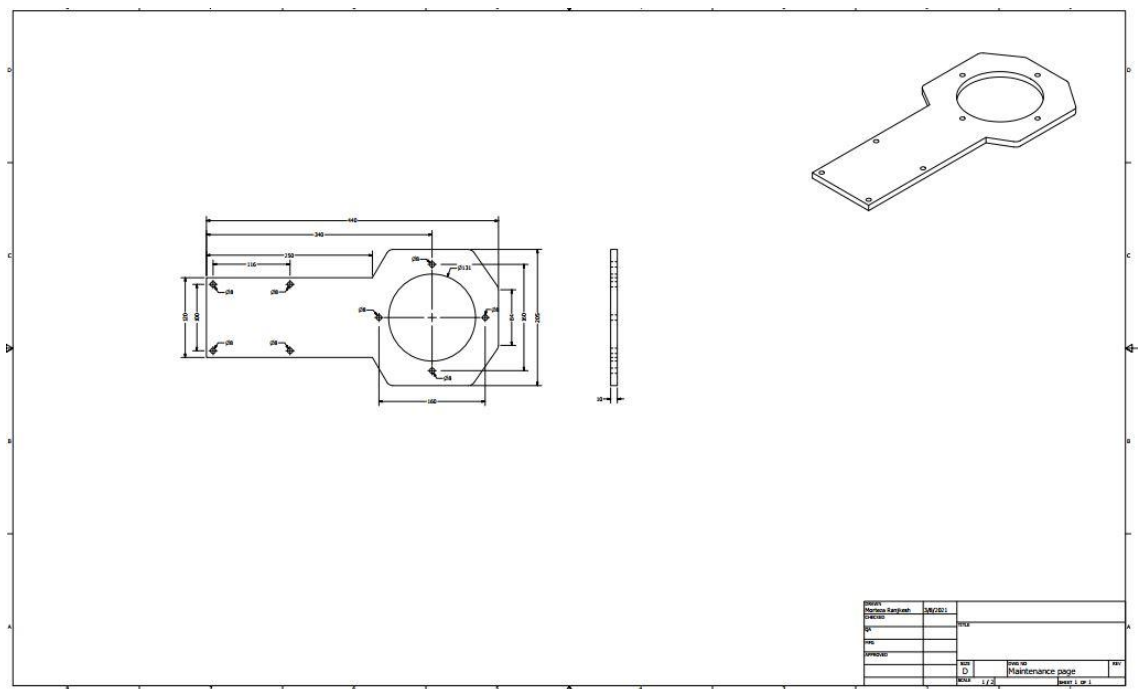
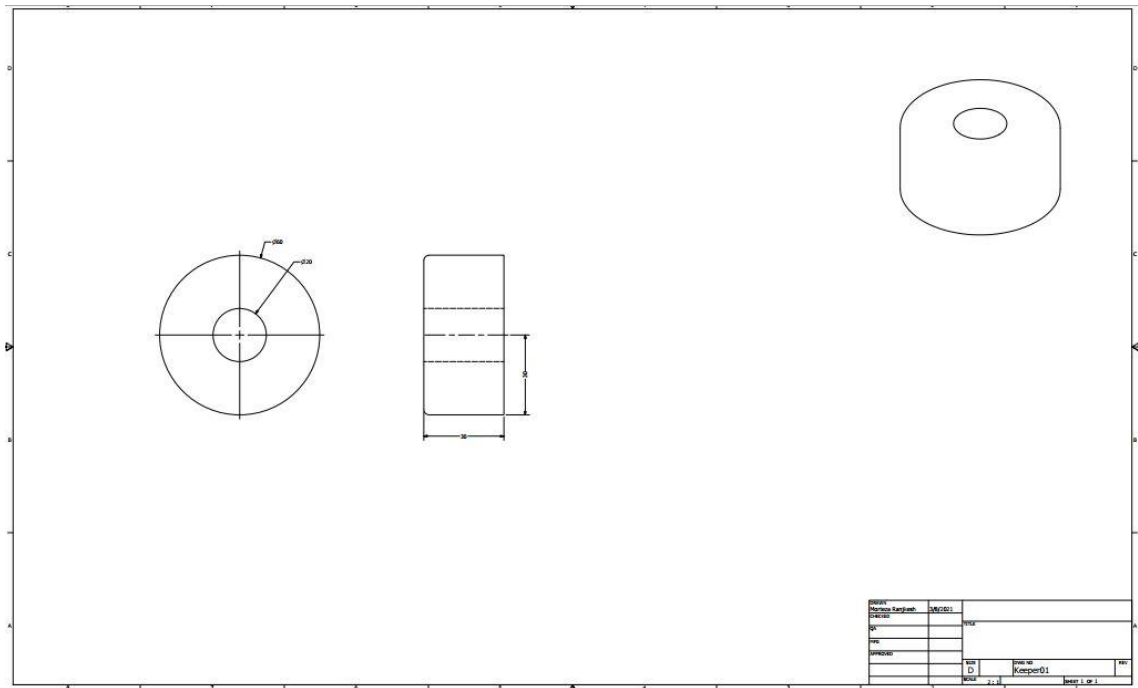



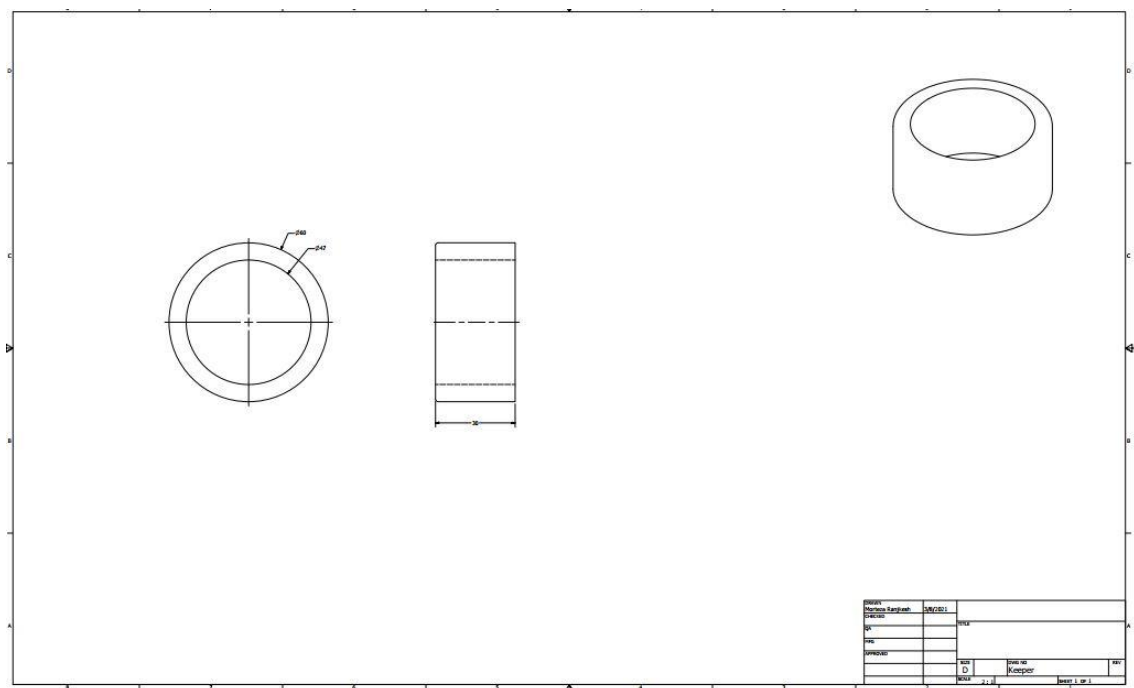


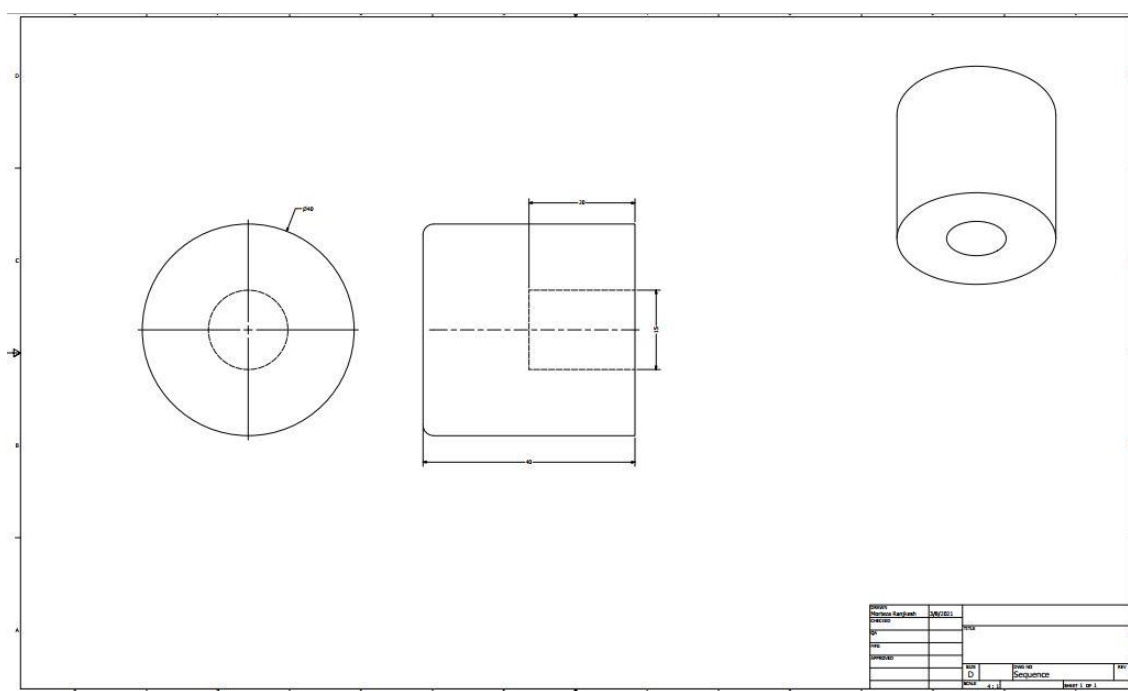












منبع‌ها

- [١] G. Park, G. Abington, and Cambridge, 'Rotary friction welding', ٢٠١٥.
- [٢] A. Mateo, *Advances in Gas Turbine Technology*. ٢٠١١.
- [٣] M. Maalekian, 'Friction welding – critical assessment of literature', *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. ١٢, no. ٨, pp. ٧٣٨–٧٥٩, ٢٠٠٧.
- [٤] A. S. M. Handbook, 'Welding, brazing and soldering', *ASM Int.*, vol. ٦, p. ١١٨٧, ١٩٩٣.
- [٥] D. E. Spindler, 'What industry needs to know about friction welding', *Weld. J. (Miami);(United States)*, vol. ٧٣, no. ٣, ١٩٩٤.
- [٦] M. Maalekian, E. Kozeschnik, H. P. Brantner, and H. Cerjak, 'Comparative analysis of heat generation in friction welding of steel bars', *Acta Mater.*, vol. ٥٦, pp. ٢٨٤٣–٢٨٥٥, ٢٠٠٨.
- [٧] W. F. Hosford and R. M. Caddell, *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge University Press, ٢٠١١.
- [٨] W. Li, A. Vairis, M. Preuss, and T. Ma, 'Linear and rotary friction welding review', *Int. Mater. Rev.*, vol. ٢, pp. ١–٣١, ٢٠١٦.
- [٩] V. I. Vill, *Friction welding of metals*, vol. ١. American Welding Society; trade distributor: Reinhold Pub. Co., ١٩٦٢.
- [١٠] X. X. Zhang, B. L. Xiao, and Z. Y. Ma, 'A Transient Thermal Model for Friction Stir Weld. Part I: The Model', *Metall. Mater. Trans. A*, vol. ٤٢, no. ٣٢١٨–٣٢٢٨, ٢٠١١.
- [١١] C. J. Bennett, M. M. Attallah, M. Preuss, P. H. Shipway, and T. H. Hyde, 'FiniteElementModelingoftheInertiaFrictionWeldingofDissimilarHigh-StrengthSteels.pdf', *Metall. Mater. Trans. A*, pp. ١–١١, ٢٠١٣.
- [١٢] V. I. Vill, 'Energy distribution in the friction welding of steel bars', *Weld. Prod.*, pp. ٣١–٤١, ١٩٥٩.
- [١٣] E. J. Sluetz, T. L. Oberle, and B. C. Brosheer, 'Inertia Welding', ١٩٦٨.

- [۱۴] K. K. Wang, 'Transient temperature distribution in inertia welding of steels', *Weld. J.*, vol. ۴۹, p. ۴۱۹s-۴۲۶s, ۱۹۷۰.
- [۱۵] C. J. Cheng, 'Transient temperature distribution during friction welding of two similar materials in tubular form', *Weld. J.*, vol. ۴۱, p. ۵۴۲-۵۵۰s, ۱۹۶۲.
- [۱۶] A. Moal and E. Massoni, 'Finite Element Simulation of the Inertia Welding of Two Similar Parts', *Eng. Comput.*, vol. ۱۲, pp. ۴۹۷-۵۱۲, ۱۹۹۵.
- [۱۷] V. Balasubramanian, Y. Li, Y. Stotler, J. Crompton, N. Katsube, and W. Soboyejo, 'An Energy Balance Method for the Numerical Simulation of Inertia Welding', *Mater. Manuf. Process.*, vol. ۱۴, no. ۵, pp. ۷۵۵-۷۷۳, ۱۹۹۹.
- [۱۸] Q. Z. Zhang, L. W. Zhang, W. W. Liu, X. G. Zkang, W. H. Zhu, and S. Qu, '3D Rigid Viscoplastic FE Modelling of Continuous Drive Friction Welding Process', *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. ۱۱, no. ۶, pp. ۷۳۷-۷۴۳, ۲۰۰۶.
- [۱۹] J. Zimmerman, W. Wlosinski, and Z. R. Lindemann, 'Thermo-mechanical and diffusion modelling in the process of ceramic-metal friction welding Jolanta', *J. Mater. Process. Technol.*, vol. ۲۰۹, pp. ۱۶۴۴-۱۶۵۳, ۲۰۰۹.
- [۲۰] A. CAN, M. SAHIN, and M. KUCUK, 'Modelling of Friction Welding', *Int. Sci. Conf.*, no. ۱۹, pp. ۱۳۵-۱۴۲, ۲۰۱۰.
- [۲۱] W. Bu and J. Liu, 'The coupled thermal-mechanical modeling of the inertia friction welding process', *Mater. Sci. Forum*, vol. ۷۰۴, pp. ۷۱۰-۷۱۶, ۲۰۱۲.
- [۲۲] G. M. Reddy and P. V. Ramana, 'Role of nickel as an interlayer in dissimilar metal friction welding of maraging steel to low alloy steel', *J. Mater. Process. Technol.*, vol. ۲۱۲, pp. ۶۶-۷۷, ۲۰۱۲.
- [۲۳] R. Damodaram, S. G. S. Raman, and K. P. Rao, 'Microstructure and mechanical properties of friction welded alloy ۷۱۸', *Mater. Sci. Eng. A*, vol. ۵۶۰, pp. ۷۸۱-۷۸۶, ۲۰۱۳.
- [۲۴] L. Jian, L. Longfei, D. Yaling, and X. Xiaoling, 'A new current hybrid inertia friction welding for nickel-based superalloy K۴۱۸-alloy steel ۴۲CrMo dissimilar metals', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. ۷۰, pp. ۱۶۷۳-۱۶۸۱, ۲۰۱۴.

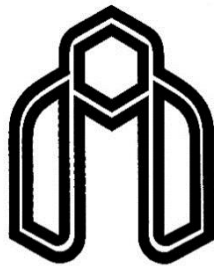
- [٢٥] N. Rajesh, P. Nagaraj, and R. Palanichamy, 'Numerical Simulation of Heat Flow in Friction StudWelding of Dissimilar Metals', *Arab J. Sci. Engeneering*, pp. ١-٨, ٢٠١٤.
- [٢٦] C. Muralimohan, V. Muthupandi, and K. Sivaprasad, 'Properties of friction welding titanium-stainless steel joints with a nickel interlayer', *Procedia Mater. Sci.*, vol. ٥, pp. ١١٢٠-١١٢٩, ٢٠١٤.
- [٢٧] P. Shenbaga and N. Rajeh, 'Numerical modeling of friction welding of bi-metal joints for electrical applications', *Am. Inst. Phesics*, pp. ١-٥, ٢٠١٨.
- [٢٨] A. Lukaszewicz, 'Nonlinear Numerical Model of Friction Heating during Rotary Friction Welding', *J. Frict. Wear*, vol. ٣٩, no. ٦, pp. ٤٧٦-٤٨٢, ٢٠١٨.
- [٢٩] H. T. M. Nu, T. T. Le, L. Phuong, and N. Huu, 'A Study on Rotary Friction Welding of Titanium Alloy (Ti-٦Al-٤V)', *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. ٢٠١٩, pp. ١-٩, ٢٠١٩.
- [٣٠] J. H. Khosrowshahi, M. H. Sadeghi, A. Rasti, and S. S. Farshi, 'Finite element modeling of rotary friction welding of dissimilar pipes', *Modares Mech. Eng.*, vol. ١٨, no. ١, pp. ٤٢٣-٤٣٢, ٢٠١٨.(in Persian)
- [٣١] B. Leia, Q. Shi, Likun Yang, C. Liu, J. Pan, and G. Chen, 'Evolution of interfacial contact during low pressure rotary friction welding: A finite element analysis', *J. Manuf. Process.*, vol. ٥٦, pp. ٦٤٣-٦٥٥, ٢٠٢٠.
- [٣٢] F. Jin *et al.*, 'Structural response of A٢٨٦ superalloy to rotary friction welding at different rotation speed', *Mater. Res. Express Pap.*, vol. ٧, ٢٠٢٠.
- [٣٣] H. Dong *et al.*, 'Evolution of interface and tensile properties in ٥٠٥٢ aluminum alloy/٣٠٤ stainless steel rotary friction welded joint after post-weld heat treatment', *J. Manuf. Process.*, vol. ٥١, no. January ٢٠٢١, pp. ١٤٢-١٥٠, ٢٠٢٠.
- [٣٤] H. Liu and H. Fujii, 'Ultralow rotation speed produces high-quality joint in dissimilar friction welding of Ti-٦Al-٤V alloy and SUS٣١٦L stainless steel', *Mater. Sci. Eng. A*, vol. ٨٠٠, no. July ٢٠٢٠, p. ١٤٠٣٠٣, ٢٠٢١.
- [٣٥] M. Manjunath, 'Finite-Element Project ABAQUS Tutorial', ٢٠٠٩.
- [٣٦] 'www.specialmetals.com'.

- [۳۷] P. Li, J. Li, X. Li, J. Xiong, F. Zhang, and L. Liang, 'A study of the mechanisms involved in initial friction process of continuous drive friction welding', *J. Adhes. Sci. Technol.*, vol. ۲۹, no. ۱۲, pp. ۱۲۴۶–۱۲۵۷, ۲۰۱۵.
- [۳۸] W. Li, F. Wang, S. Shi, and T. Ma, 'Numerical simulation of linear friction welding based on ABAQUS environment: Challenges and perspectives', *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. ۲۳, no. ۲, pp. ۳۸۴–۳۹۰, ۲۰۱۴.

Abstract

Rotational friction welding, is a solid state welding method, applied to join axial metallic components. The first stage of welding involves applying a compressive axial load to the components spinning at a relative speed. This produces a contact pressure and thus a frictional dissipation at the interface. As a result of heating, temperature increases near the contact zone and the metallic materials soften. This is followed by a second stage in which an axial forging load is applied and which leads to considerable flow of metal, called flash, and the two parts are joined. In this dissertation, friction welding of Inconel 600 rod 4 mm in diameter and Kovar alloy rod 3 mm in diameter, is studied through finite element and experimental studies. The parameters considered include heating time, spin speed and forging load. For finite element analysis, an axially symmetric model including twist effects is employed in a fully implicit coupled temperature-displacement analysis. The bodies were discretized using GGAX4T finite elements. To avoid severe distortion of the elements, the analysis is stopped after the moving rod displacement reaches a specified value. Subsequently, the analysis restarts with the fresh mesh using the “mesh to mesh solution mapping capability of Abaqus/standard. Due to large number of restarts required, a python script was developed for convenient. Based on a table of experiment design, effect of parameters were analysed and optimum values for a successful weld were obtained. Based on these results, a welding setup was designed and employed for experimental studies. Friction welding experiments were carried out on the samples successfully. The recovered samples were subjected to tensile test and the results showed that the joint strength was larger than the weaker base metal.

Keywords: Rotary Friction Welding, Abaqus scripted, Inconel and Kovar alloys, Tensile strength of the weld



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Manufacturing and Production Engineering

Title

Friction welding of dissimilar super alloys Inconel 600 and Kovar

Written by

Morteza Ranjkesh

Supervisor

Dr. Seyed Hadi Ghaderi

January ۲۰۲۱