



Available in:
Journal.isrc.ac.ir

Journal of Space Science,
Technology & Applications
(Persian)

Vol. 6, No. 1, pp.: 36-49
2026

DOI:

[10.22034/jssta.2025.506404.1232](https://doi.org/10.22034/jssta.2025.506404.1232)

Article Info

Received: 2025-02-17
Accepted: 2025-05-31

Keywords

Welding, Friction stir,
Residual stress, Finite
element, Aluminum

How to Cite this article

A. Rasfijani, Y. Vahidshad, A. Abasi, "The Effect of FSW Parameters on Residual Stresses in Aluminum Alloy Using Finite Element Analysis", *Journal of Space Science, Technology & Applications*, Vol. 6, No. 1, pp. 36-49, 2026.

The Effect of FSW Parameters on Residual Stresses in Aluminum Alloy Using Finite Element Analysis

Amirhossein Rasfijani¹, Yasser Vahidshad^{2*}, Arash Abasi³
amirhosseinrasfijani@gmail.com

¹ Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran
y.vahidshad@isrc.ac.ir

^{2*} Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran
y.vahidshad@isrc.ac.ir

³ Space Transportation Research Institute, Iranian Space Research Center, Tehran, Iran
arabbasi57@gmail.com
* Corresponding Author

Abstract

The purpose of this study is to investigate the parameters affecting Friction Stir Welding (FSW) of aluminum alloy, based on previous research, numerical method and finite element analysis. In this study, FSW welding was simulated by the sequential couple method in ABAQUS software, and then the residual stresses caused by welding were extracted. Also, friction stir welding parameters were investigated by finite element methods and other researches. The analytical parts were made of 6061 aluminum alloy. The heat resulting from FSW welding in this study is the result of the heat produced due to the friction of the tool shoulder with the surface of the part, the rotation of the pin inside the material and the flow of the material in the welding area. The parameters investigated in this research are tool rotation speed, welding speed, tool axial force, pin diameter, and tool material, and their effect on the quality of friction stir welding and residual stress has been investigated. The results showed that the values of axial force, rotation speed and welding speed have the greatest effect on the values of residual stresses and their increase causes a significant increase in residual stresses.

تأثیر پارامترهای FSW بر تنش‌های پسماند در آلیاژ آلومینیوم با استفاده از المان محدود

امیرحسین رسفجانی^۱، یاسر وحیدشاد^{۲*}، آرش عباسی^۳

۱- پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل، تهران، ایران - amirhosseinrasfijani@gmail.com

۲* پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل، پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران - y.vahidshad@isrc.ac.ir

۳- پژوهشکده سامانه‌های حمل و نقل، تهران، ایران - arabbasi57@gmail.com

نویسنده مسئول *

چکیده

هدف از این مطالعه، بررسی پارامترهای مؤثر بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW) آلیاژ آلومینیوم، مبتنی بر تحقیقات پیشین، روش عددی و تحلیل المان محدود است. در این مطالعه، جوشکاری FSW توسط روش کوپل متوالی در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده است و از کدنویسی زیرروال DFLUX برای اعمال شار حرارتی استفاده شده است. در نهایت تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری استخراج شد. همچنین پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، توسط روش‌های المان محدود و تحقیقات سایرین مورد بررسی قرار گرفتند. جنس قطعات تحلیلی از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ بود. گرمای حاصل از جوشکاری FSW در این مطالعه، حاصل از گرمای تولید شده ناشی از اصطکاک شانه ابزار با سطح قطعه، گردش پین در داخل مواد و جریان مواد در ناحیه جوشکاری است. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل: سرعت چرخشی ابزار، سرعت جوشکاری، نیروی محوری ابزار، قطر پین و جنس ابزار می‌شود و تأثیر آن‌ها بر کیفیت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و تنش‌های پسماند مورد بررسی قرار گرفته است. در مجموع، ۹ حالت مختلف شامل ترکیب‌هایی از پارامترهای کلیدی نظیر: نیروی محوری ابزار (۳۰۰ و ۴۰۰ نیوتن)، سرعت جوشکاری (۸۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه)، سرعت چرخش ابزار (۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ دور بر دقیقه) و قطر پین (۴ و ۶ میلی‌متر) مدل‌سازی شده‌اند. نتایج نشان داد که افزایش نیروی محوری ابزار از ۳۰۰ به ۴۰۰ نیوتن منجر به افزایش ۶۶ درصدی تنش پسماند شد. همچنین، با افزایش سرعت جوشکاری به میزان ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه، تنش پسماند حدود ۳۱ درصد افزایش یافت. سرعت چرخش ابزار نیز با افزایش ۱۰۰ دور بر دقیقه، باعث رشد ۱۷ درصدی تنش‌های پسماند شد. توزیع تنش‌های پسماند به‌صورت کششی و با شدت حداکثر تا حدود ۹۶ درصد تنش تسلیم ماده پایه در ناحیه جوش مشاهده شد. این مدل عددی قابلیت پیش‌بینی رفتار تنش پسماند را پیش از اجرای فرآیند واقعی دارا است و می‌تواند در بهینه‌سازی پارامترهای FSW در کاربردهای صنعتی و فضایی مورد استفاده قرار گیرد.



دسترس پذیر در نشانی:
Journal.isrc.ac.ir

دوفصلنامه علوم، فناوری و
کاربردهای فضایی

سال ششم، شماره ۱، صفحه ۳۶-۴۹
بهار و تابستان ۱۴۰۵

DOI:

10.22034/jssta.2025.506404.1232

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

واژه‌های کلیدی

جوشکاری، اصطکاکی اغتشاشی، تنش
پسماند، المان محدود، آلومینیوم

نحوه استناد به این مقاله

امیرحسین رسفجانی، یاسر
وحیدشاد، آرش عباسی، "تأثیر
پارامترهای FSW بر تنش‌های
پسماند در آلیاژ آلومینیوم با استفاده
از المان محدود"، دوفصلنامه علوم،
فناوری و کاربردهای فضایی، جلد ششم،
شماره اول، صفحات ۳۶-۴۹، ۱۴۰۵.

۱- مقدمه

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سال ۱۹۹۱ توسط موسسه جوشکاری کمبریج انگلستان [۱] توسعه یافت. این جوشکاری یک روش اتصال پیشرفته است که به تازگی در بسیاری از کاربردها در صنایع خودروسازی و هوافضا استفاده شده است [۱]. برخی از مهم‌ترین مزیت‌های این روش جوشکاری عبارتند از: جوشکاری موادی که جوشکاری آن‌ها مشکل است، اعوجاج اندک، افزایش یکپارچگی اتصال جوشکاری و خواص مکانیکی خوب. در این روش، خواص مکانیکی منطقه جوشکاری به علت ایجاد حرارت کمتر در مقایسه با روش جوشکاری ذوبی و شکل‌گیری دانه‌های ریزتر بهبود یافته است [۱]. FSW در مقایسه با جوشکاری ذوبی در دمای کمتری صورت گرفته و جوشکاری حالت جامد است؛ لذا مشکلات مرتبط با جوشکاری ذوبی مانند: تخلخل، ترک خوردگی انجمادی و تخریب را ندارد [۲]. FSW در حال حاضر، تحت تحقیق و توسعه برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم در صنایع فضایی است [۳-۶].

در روش جوشکاری FSW از یک ابزار استوانه‌ای چرخان دارای پین، برای ایجاد حرارت ناشی از اصطکاک استفاده می‌شود. در آغاز فرایند، ابزار با سطح قطعه کار تماس پیدا می‌کند و همزمان با حرکت چرخشی خود، نیرویی رو به پایین برای تولید گرمای اصطکاکی کافی اعمال می‌کند [۷]. در این فرایند باید مدت زمان معینی صبر کرد تا دما به حد کافی برسد. سپس ابزار در امتداد خط اتصال حرکت می‌کند تا مواد را مخلوط کند [۷]. پارامترهای فرایند مانند: سرعت جوشکاری، سرعت دورانی و نیروی محوری در تعیین کیفیت جوش بسیار مهم هستند [۷، ۸].

چرخش ابزار و ایجاد اصطکاک بین سطح ماده و ابزار، سبب گرمای اصطکاکی می‌شود. این گرمای ایجاد شده، سبب افزایش دمای ماده بین ۰/۸ تا ۰/۹۵ برابر دمای ذوب ماده گشته و مواد را خمیری می‌کند [۹، ۱۰]. مواد به سبب چرخش پین ابزار، دچار تغییر شکل پلاستیک شده و مخلوط می‌شوند. همچنین ریز ساختار اولیه مواد دچار تغییر می‌شود. مواد پلاستیک، توسط پین، مخلوط شده و با حرکت خطی ابزار در امتداد خط اتصال دو فلز پایه، دو قطعه به هم جوش می‌خورند [۱۱، ۱۲].

در جوشکاری FSW، گرمای ناشی از اصطکاک بین ابزار و ماده و همچنین حرارت ناشی از تغییر شکل پلاستیک ماده، سبب ایجاد اتصال جوشی در دمایی کمتر از نقطه ذوب قطعه می‌شود. تغییرات

دمایی در جوشکاری FSW تحت تأثیر پارامترهای جوشکاری است و به طور مستقیم بر رفتار و ریز ساختار اثر می‌گذارد.

در فرایند جوشکاری به علت توزیع غیر یکنواخت حرارت و خنک‌سازی غیر یکنواخت، ناگزیر تنش‌های پسماند و تغییر شکل در قطعه ایجاد می‌شود [۱۳، ۱۴]. یکی از چالش‌های مهم در این فرایند، تنش‌های پسماند باقی‌مانده در ناحیه جوش است که می‌تواند بر استحکام، دوام و عملکرد سازه تأثیرگذار باشد [۱۳]. پژوهشگران زیادی [۱۵-۱۸] تأثیر تنش‌های پسماند را بر سازه‌های جوشی مورد بررسی قرار داده‌اند و دریافتند در سازه‌های تحت بارگذاری خستگی و یا تحت خوردگی میزان تنش‌های پسماند بایستی حداقل میزان ممکن باشد؛ زیرا تنش‌های پسماند می‌تواند به کمک سایر بارگذاری‌ها منجر به شکست زود هنگام سازه شوند. پارامترهای جوشکاری FSW بر تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری تأثیرگذار است.

یکی از روش‌های پیش‌بینی تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری، شبیه‌سازی فرایند جوشکاری و تنش‌های پسماند حاصل از آن توسط نرم‌افزارهای المان محدود است [۱۹، ۲۰]. از آن جایی که توسط روش المان محدود، گستره تکرارپذیری وسیعی بدون صرف هزینه زیاد وجود دارد؛ به وسیله این روش می‌توان میزان تنش‌های پسماند و تأثیر پارامترهای مختلف جوشکاری بر تنش‌های پسماند را قبل از انجام جوشکاری پیش‌بینی کرد و در نتیجه بهینه‌ترین حالت جوشکاری را با توجه به مواردی همچون استحکام جوش، تنش پسماند، اعوجاج و... با صرف هزینه کمتری تعیین کرد.

هدف از این پژوهش، مطالعه پارامترهای جوشکاری FSW بر تنش‌های پسماند، خواص مکانیکی و یکپارچگی اتصال، توسط روش المان محدود برای دستیابی به بهینه‌ترین کیفیت جوش است. نوآوری این پژوهش در بهره‌گیری از یک مدل عددی کوپل‌شده حرارتی- مکانیکی در محیط نرم‌افزار ABAQUS برای تحلیل اثرات چندگانه پارامترهای فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاش بر توزیع تنش‌های پسماند در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ است. برخلاف مطالعات پیشین که تمرکز محدودی بر یک یا دو پارامتر فرایند داشته‌اند، در این پژوهش، مجموعه‌ای از پارامترهای کلیدی شامل: نیروی محوری ابزار، سرعت چرخش، سرعت خطی جوش، قطر پین و جنس ابزار به‌صورت هم‌زمان مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. همچنین با استفاده از این مدل عددی، امکان پیش‌بینی

شد. در راستاهای ضخامت و طول، از المان‌های یکنواخت استفاده شد، در حالی‌که در راستای عرض قطعه، از المان‌های bias بهره‌برداری شد. با کوچک‌تر شدن اندازه المان‌ها، دقت تحلیل افزایش می‌یابد، اما به همان نسبت زمان محاسباتی طولانی‌تر می‌شود. برای حفظ دقت تحلیل و جلوگیری از افزایش غیرضروری زمان محاسبات، در راستای عرض ورق‌های جوشکاری، از المان‌های bias استفاده شد. این روش موجب شد که نواحی نزدیک به خط جوش با المان‌های ریزتر شبیه‌سازی شوند و به تدریج با دور شدن از خط جوش، اندازه المان‌ها بزرگ‌تر شود. در راستای ضخامت و طول قطعه به ترتیب ۵ و ۱۵۰ ردیف المان یکنواخت اعمال شد. با توجه به ابعاد ورق‌ها، اندازه هر المان در راستای خط جوش (طول ورق) و ضخامت قطعه معادل ۱ میلی‌متر انتخاب شد. در راستای عرض ورق‌ها، استفاده از المان‌های bias، به‌گونه‌ای تنظیم شد که در هر لبه ورق (عمود بر خط جوش و در راستای عرض ورق)، تعداد ۲۵ المان در نظر گرفته شد. همچنین، نسبت اندازه بزرگ‌ترین به کوچک‌ترین المان‌ها برابر با ۵ در نظر گرفته شد. جهت المان‌بندی المان‌های فلز جوش، از المان‌های یکنواخت استفاده شد. اندازه کوچک‌ترین المان در فلز جوش تقریباً $0.798 \times 1 \times 1$ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

نوع المان‌ها در تحلیل حرارتی از نوع heat transfer (DC3D8) است. تعداد کل المان‌ها و گره‌ها در هر نمونه به ترتیب ۳۷۵۰۰ و ۴۶۲۰۶ است. به‌منظور دستیابی به تعادل مناسب میان دقت نتایج و زمان محاسبه، تحلیل حساسیت مش به‌صورت مقدماتی انجام شد. برای این منظور، مدل با چند اندازه مش متفاوت حل شد و نتایج تنش پسماند در ناحیه جوش مورد مقایسه قرار گرفت. مشاهده شد که افزایش تعداد المان‌ها از حدود ۳۷۵۰۰ به بالا تأثیر قابل توجهی بر دقت نتایج ندارد اما زمان محاسباتی به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. بر این اساس، تعداد ۳۷۵۰۰ المان به‌عنوان حالت بهینه انتخاب و در تمامی تحلیل‌ها استفاده شد. هندسه ابزار، هندسه اتصال و شرایط شبیه‌سازی جوشکاری مدل‌ها در جدول (۱) و شکل (۱) قابل مشاهده است. محدوده تغییرات پارامترهای فرآیند (از جمله سرعت چرخشی، سرعت جوشکاری، نیروی محوری و قطر پین) بر اساس مرور منابع پیشین مرتبط با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ ۶۰۶۱ آلومینیوم و همچنین مشاوره با متخصصین صنعتی فعال در حوزه ساخت و

شرایط بهینه‌ی جوشکاری جهت کاهش تنش‌های پسماند پیش از اجرای فرآیند واقعی فراهم شده است، که می‌تواند به کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت اتصالات در کاربردهای صنعتی، به‌ویژه در صنایع هوافضا، منجر شود. به علاوه در این پژوهش به بررسی پژوهش‌های پیشین، بررسی تعداد زیادی از پارامترهای جوشکاری و همچنین رسیدن به نتایج بهینه جهت مصارف صنعتی و فضایی با استفاده از المان محدود به صورت هم‌زمان و یکجا پرداخته شده است. در صورتی که در سایر پژوهش‌ها، فقط یک یا دو مورد از موارد مطرح شده مورد مطالعه قرار گرفته است و تعداد پارامترهای بررسی شده در هر یک از پژوهش‌ها نیز کمتر هستند. اگرچه اثر برخی از پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پیش‌تر در مقالات متعدد به‌صورت جداگانه بررسی شده‌اند، اما نوآوری و ارزش افزوده این پژوهش در بررسی هم‌زمان و سیستماتیک چند پارامتر کلیدی و مدل‌سازی عددی کوپل‌شده‌ی دقیق با قابلیت پیش‌بینی تنش پسماند است. در پژوهش حاضر، با استفاده از یک مدل عددی یکپارچه در محیط ABAQUS، نه تنها اثرات مستقل هر پارامتر (مانند نیروی محوری، سرعت چرخش، سرعت جوش و قطر پین) بلکه اثر ترکیبی و متقابل این پارامترها در قالب یک چارچوب تحلیلی منسجم بررسی شده است. این امر به شناسایی شرایط بهینه برای کاهش تنش پسماند منجر می‌شود که در منابع قبلی به‌صورت مجزا و محدود به یک یا دو پارامتر بیان شده بودند.

۲- شبیه‌سازی عددی

تحلیل عددی توسط روش المان محدود و شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری FSW، با استفاده از یک مدل کوپل متوالی حرارتی- مکانیکی در نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. در این پژوهش ۹ نمونه جوشکاری، مدل شده‌اند تا تأثیر پارامترهای سرعت چرخشی ابزار، سرعت جوشکاری، نیروی محوری ابزار، جنس ابزار و قطر پین بر تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری مورد بررسی قرار گیرد. در هر یک از مدل‌ها، دو ورق با ابعاد $5 \times 50 \times 150$ میلی‌متر و از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ جهت اتصال به هم در نرم‌افزار مدل‌سازی شده‌اند. خواص حرارتی و مکانیکی به‌صورت تابعی از دما، مطابق با مرجع [۲۱] در نرم‌افزار ABAQUS وارد شد و سپس المان‌بندی مدل‌ها انجام می‌شود. در تحلیل حرارتی، فرآیند المان‌بندی قطعه در سه بعد ضخامت، طول (راستای خط جوش) و عرض قطعه انجام

نتایج آن به‌عنوان ورودی در تحلیل مکانیکی استفاده و تحلیل مکانیکی نیز انجام شد.

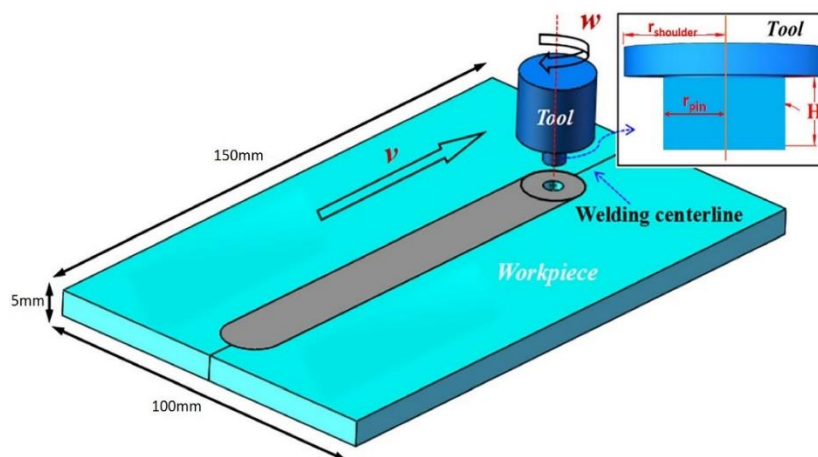
برای تحلیل مکانیکی مدل جوشکاری، فرایند شبیه‌سازی قطعه و تعیین خواص همانند تحلیل حرارتی است و تفاوتی با مدل حرارتی ندارد. المان‌بندی در تحلیل مکانیکی نیز به‌صورت مشابه تحلیل حرارتی انجام شده است، به‌طوری که تعداد، ابعاد و نحوه المان‌بندی در هر دو تحلیل مشابه است. تنها تفاوت در نوع المان‌ها است؛ در تحلیل مکانیکی از المان‌های 3D stress (C3D8R) استفاده شده است. در طی تحلیل مکانیکی، دو انتهای ورق‌ها در برابر حرکت در تمامی جهات طی فرآیند جوشکاری و خنک‌سازی مقید شده و گیره‌ها تعریف شده‌اند. سپس تاریخچه حرارتی که از تحلیل حرارتی به‌دست آمده، وارد مدل تحلیل مکانیکی شد. در نهایت، با انجام تحلیل مکانیکی، امکان استخراج تنش‌های پسماند در تمامی بخش‌های قطعه فراهم می‌شود. سپس میدان تنش‌های پسماند طولی پس از سرد شدن قطعه از نمونه‌های مدل‌سازی شده استخراج شد (شکل (۴) تا شکل (۱۲)).

تولید انتخاب شده‌اند. به‌طور خاص، بازه انتخابی برای سرعت چرخشی (1200–1000 rpm)، سرعت پیشروی (mm/min) 150–80، نیروی محوری (3000–4000 N) و قطر پین (6–mm) (۴) از مقادیر رایج در تحقیقات مشابه و کاربردهای صنعتی واقعی الهام گرفته شده است [۲۲، ۲۳].

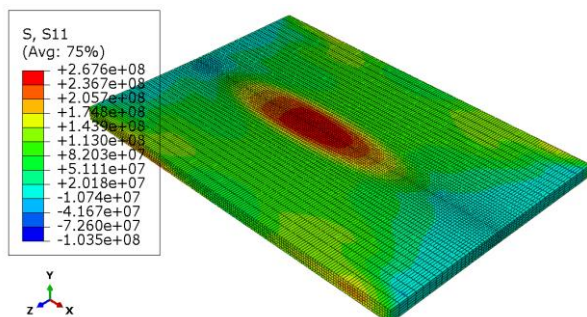
در تحلیل حرارتی تمامی سطوح باز، قطعات در طی مراحل جوشکاری و خنک شدن با محیط اطراف، انتقال حرارت جابه‌جایی (convection) و تشعشعی (radiation) دارند. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (W/(m²K)) 30 و ضریب تشعشع سطح 0/6 در نظر گرفته شد [۲۴]. همچنین رسانش گرمایی بین سطح زیرین قطعه کار و نگهدارنده زیر قطعه کار در نظر گرفته شد. جهت اعمال بار حرارتی وارد بر قطعه توسط جوشکاری، از زیرروال DFLUX نوشته شده در نرم‌افزار FORTRAN استفاده شد. بار حرارتی در طی جوشکاری مطابق با شکل (۲) در محل اتصال اعمال شده است و سپس در مرحله خنک‌سازی، مدل‌ها در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) خنک شده‌اند شکل (۳). پس از حل تحلیل حرارتی، از

جدول (۱): شرایط جوشکاری مدل‌های شبیه‌سازی شده

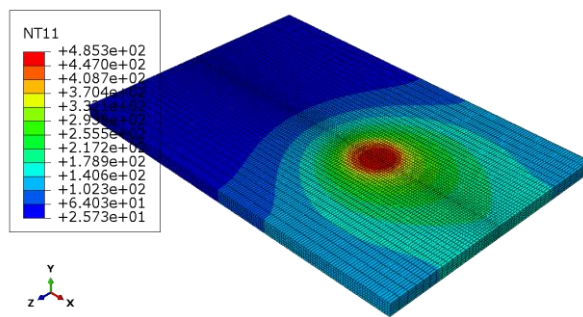
شماره نمونه	ابعاد ورق (mm)	جنس ورق‌ها	قطر شانه (mm)	قطر پین (mm)	ارتفاع پین (mm)	سرعت چرخشی ابزار (rev/min)	ضریب اصطکاک ابزار (μ)	سرعت جوشکاری (mm/min)	نیروی ابزار (N)
۱	۱۵۰*۵۰*۵	Al۶۰۶۱	۲۰	۶	۴/۷	۱۲۰۰	۰/۳	۱۵۰	۳۰۰۰
۲	۱۵۰*۵۰*۵	Al۶۰۶۱	۲۰	۶	۴/۷	۱۲۰۰	۰/۳	۱۵۰	۴۰۰۰
۳	۱۵۰*۵۰*۵	Al۶۰۶۱	۲۰	۶	۴/۷	۱۰۰۰	۰/۴	۱۵۰	۴۰۰۰
۴	۱۵۰*۵۰*۵	Al۶۰۶۱	۲۰	۶	۴/۷	۱۰۰۰	۰/۳	۱۵۰	۴۰۰۰
۵	۱۵۰*۵۰*۵	Al۶۰۶۱	۲۰	۴	۴/۷	۱۰۰۰	۰/۳	۱۰۰	۴۰۰۰
۶	۱۵۰*۵۰*۵	Al۶۰۶۱	۲۰	۶	۴/۷	۱۰۰۰	۰/۳	۱۰۰	۴۰۰۰
۷	۱۵۰*۵۰*۵	Al۶۰۶۱	۲۰	۶	۴/۷	۱۱۰۰	۰/۳	۱۵۰	۴۰۰۰
۸	۱۵۰*۵۰*۵	Al۶۰۶۱	۲۰	۶	۴/۷	۱۲۰۰	۰/۳	۱۰۰	۴۰۰۰
۹	۱۵۰*۵۰*۵	Al۶۰۶۱	۲۰	۶	۴/۷	۱۲۰۰	۰/۳	۸۰	۴۰۰۰



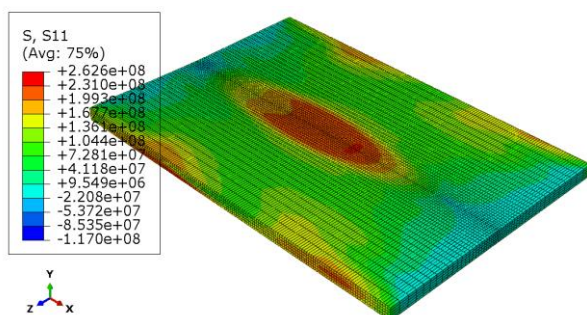
شکل (۱): هندسه ابزار و اتصال FSW نمونه‌ها



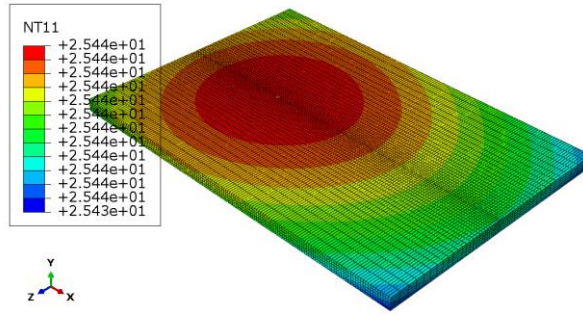
شکل (۶): شبیه‌سازی جوشکاری FSW و تنش‌های پسماند طولی ناشی از جوشکاری در نمونه شماره ۳



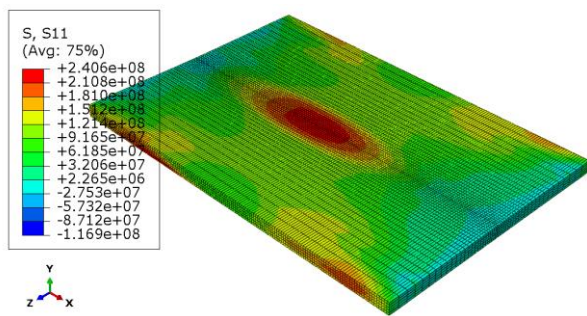
شکل (۲): انجام تحلیل حرارتی، اعمال شار حرارتی و خنک شدن نمونه‌ها پس از جوشکاری



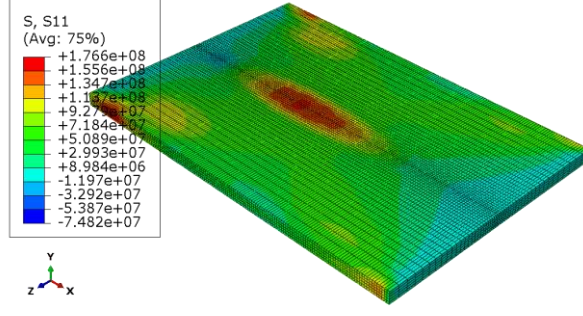
شکل (۷): شبیه‌سازی جوشکاری FSW و تنش‌های پسماند طولی ناشی از جوشکاری در نمونه شماره ۴



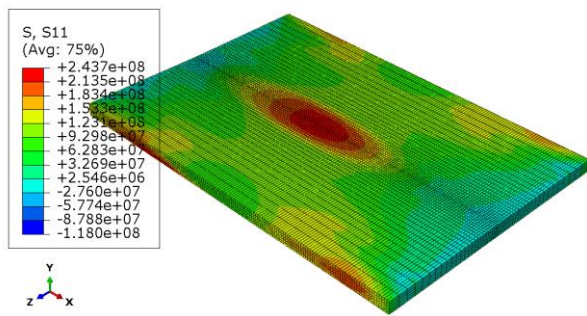
شکل (۳): انجام تحلیل حرارتی، اعمال شار حرارتی و خنک شدن نمونه‌ها پس از جوشکاری



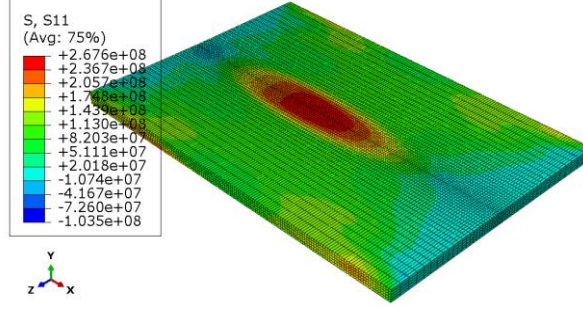
شکل (۸): شبیه‌سازی جوشکاری FSW و تنش‌های پسماند طولی ناشی از جوشکاری در نمونه شماره ۵



شکل (۴): شبیه‌سازی جوشکاری FSW و تنش‌های پسماند طولی ناشی از جوشکاری در نمونه شماره ۱



شکل (۹): شبیه‌سازی جوشکاری FSW و تنش‌های پسماند طولی ناشی از جوشکاری در نمونه شماره ۶



شکل (۵): شبیه‌سازی جوشکاری FSW و تنش‌های پسماند طولی ناشی از جوشکاری در نمونه شماره ۲

بخش، به منظور محاسبه دقیق نرخ تولید گرما ناشی از اصطکاک بین ابزار و قطعه کار در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه شده‌اند. این روابط در پیاده‌سازی زیرروال DFLUX در محیط ABAQUS استفاده شده‌اند تا شار حرارتی به صورت واقع‌گرایانه به مدل عددی اعمال شود. بنابراین، این معادلات پایه محاسبه بار حرارتی ورودی در مرحله تحلیل حرارتی هستند و نقش مهمی در دقت شبیه‌سازی حرارتی دارند.

کل گرمای ورودی توسط جوشکاری را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۲۹، ۲۴، ۲۲]:

$$Q_{total} = \eta(Q_s + Q_p) \quad (1)$$

$$Q_s = \frac{2}{3} \pi \tau \omega (r_{shoulder}^3 - r_{pin}^3) \quad (2)$$

$$Q_p = 2\pi \tau \omega r_{pin}^2 H_{pin} + \frac{2}{3} \pi \tau \omega r_{pin}^3 \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\mu F}{\pi r_{shoulder}^2} \quad (4)$$

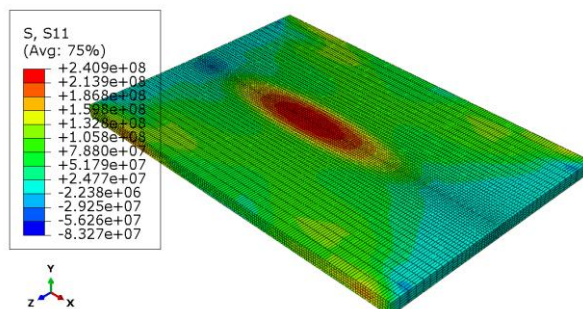
Q_{total} کل گرمای ورودی توسط FSW است. $\eta = 0.95$ بازده انرژی مکانیکی تبدیل شده به انرژی گرمایی است [۳۰]. Q_p و Q_s به ترتیب، گرمای ورودی از طریق شانه و پین هستند. τ تنش برشی بین ابزار و قطعه کار است. ω سرعت زاویه ای ابزار است. $\mu = 0.3$ ضریب اصطکاک بین قطعه کار و ابزار [۲۹]، F نیروی عمودی ابزار، r_{pin} و $r_{shoulder}$ به ترتیب شعاع شانه ابزار و شعاع پین و H_{pin} طول پین است. توزیع حرارت شانه و پین را می‌توان به ترتیب با شار حرارتی سطحی و شار حرارتی حجمی، توسط زیرروال Dflux در Abaqus شبیه‌سازی کرد. محاسبه شار حرارتی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۲۲]:

$$q_s = \frac{3\eta Q_s r_{shoulder}}{2\pi(r_{shoulder}^3 - r_{pin}^3)} \quad (5)$$

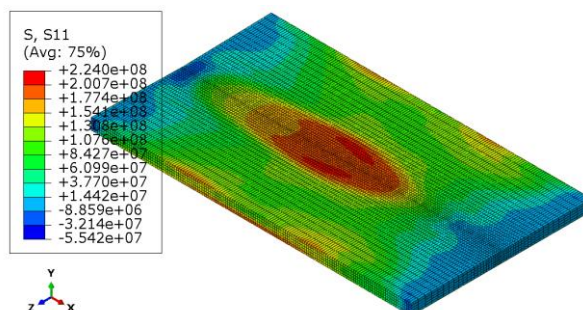
شار حرارتی حجمی:

$$q_p = \frac{\eta Q_p}{\pi r_{pin}^2 H} \quad (6)$$

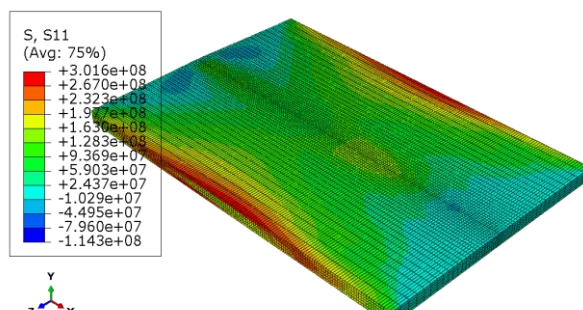
q_p و q_s به ترتیب شار حرارتی ناشی از شانه ابزار و پین هستند.



شکل (۱۰): شبیه‌سازی جوشکاری FSW و تنش‌های پسماند طولی ناشی از جوشکاری در نمونه شماره ۷



شکل (۱۱): شبیه‌سازی جوشکاری FSW و تنش‌های پسماند طولی ناشی از جوشکاری در نمونه شماره ۸



شکل (۱۲): شبیه‌سازی جوشکاری FSW و تنش‌های پسماند طولی ناشی از جوشکاری در نمونه شماره ۹

۳- شار حرارتی

تولید گرمای وارد بر قطعه کار توسط FSW به‌طور عمده از اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک مواد حاصل می‌شود [۲۵]. اتلاف گرما، مستقل از پارامترهای جوشکاری، تنها ۵ درصد از کل گرمای تولید شده است [۲۶]. مطابق با تحقیقات گذشته، چنانچه مدل منبع گرمای شبیه‌سازی شده جهت شبیه‌سازی میدان دما در FSW، ترکیبی از منبع حرارت سطح و منبع گرمای حجمی باشد، نتایج شبیه‌سازی، نزدیک‌تر به میدان دمای واقعی جوشکاری است و نتایج دقیق‌تری به‌دست می‌آید [۲۷، ۲۸]. روابط ارائه‌شده در این

۴- نتایج و بحث

سایر نواحی است و با توجه به یکسان بودن تأثیر فرایند جوشکاری بر روی دو ورق به دلیل همجنس بودن ورق‌های جوشکاری شده، منحنی و بزرگی تنش‌های پسماند در دو طرف به صورت متقارن است. منحنی توزیع تنش‌های پسماند طولی در مدل‌ها به شکل "M" است. بیشترین میزان تنش‌های پسماند طولی در نمونه‌های مدل‌سازی شده، به صورت کششی است و میزان آن بین ۵۸ تا ۹۶ درصد تنش تسلیم فلز پایه (۲۷۶ مگاپاسکال) است. پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه به شرح ذیل هستند.

۴-۱- سرعت جوشکاری

نی و همکاران مدل المان محدود جوشکاری FSW را با بررسی حرارت ایجاد شده ناشی از اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک مواد توسعه داد [۲۲]. نتیجه مطالعات وی بیانگر این بود که تنش پسماند طولی با افزایش سرعت جوشکاری افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که تنش پسماند طولی در ناحیه جوش با افزایش سرعت چرخش ابزار افزایش می‌یابد. قهرمانی مقدم و همکاران [۳۴] به شبیه‌سازی المان محدود و اندازه‌گیری تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴-۳۵۱ T که کاربرد قابل توجهی در صنایع هوافضا دارد، پرداخته است. وی تأثیر سرعت جوشکاری و چرخش ابزار بر تنش‌های پسماند را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخش ابزار، مقادیر میانگین تنش‌های پسماند طولی افزایش می‌یابد. همچنین در یک سرعت چرخشی ثابت، افزایش سرعت جوشکاری منجر به ایجاد تنش‌های پیک نزدیک‌تر به خط جوش می‌شود و مقادیر تنش پسماند افزایش می‌یابد. این مسئله می‌تواند نتیجه افزایش گرادیان حرارتی در طول سرعت جوشکاری بالاتر باشد.

در این مطالعه و با توجه به شکل (۱۳)، افزایش سرعت جوشکاری از ۸۰ میلی‌متر بر دقیقه به ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه (در شرایطی که سایر پارامترهای جوشکاری ثابت باشند)، باعث افزایش بزرگی تنش‌های پسماند طولی به میزان حداکثر ۹ مگاپاسکال شده است. با ادامه یافتن این افزایش در سرعت جوشکاری از ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه به ۱۵۰ میلی‌متر بر دقیقه، افزایش بزرگی تنش‌های پسماند طولی به میزان حداکثر ۶۲ مگاپاسکال است. مشاهده می‌شود که سرعت جوش، تأثیر قابل توجهی بر تنش

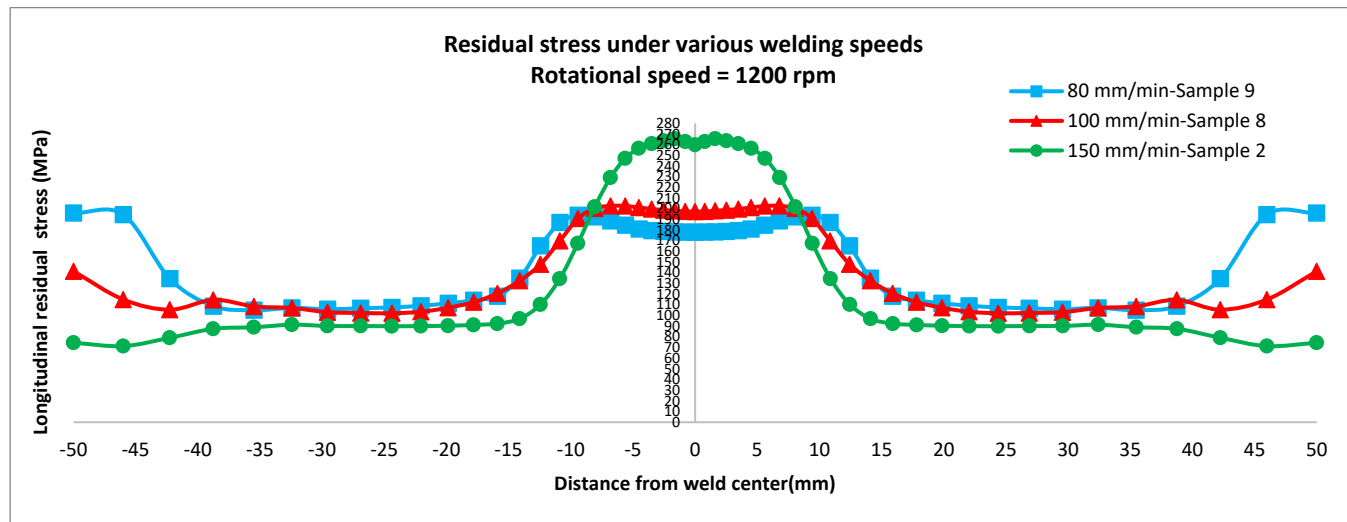
در این پژوهش، تأثیر پارامترهای جوشکاری FSW بر تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری، با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه پژوهش‌های متعددی به بررسی جداگانه اثر پارامترهای FSW پرداخته‌اند، اما در این پژوهش، اثر مجموعه‌ای از پارامترها در یک مدل عددی یکپارچه بررسی شده است تا ارتباط و برهم‌کنش آن‌ها در تولید تنش پسماند بهتر شناسایی شود. این رویکرد می‌تواند به تعیین شرایط بهینه جوشکاری پیش از اجرای آزمایش‌های عملی کمک کند. به علاوه، با استخراج کمی تنش‌های پسماند در شرایط مختلف و تحلیل تطبیقی آن‌ها، این پژوهش می‌تواند در صنایع حساس به اعوجاج یا استحکام بالا (مانند: هوافضا و خودروسازی) راهنمای دقیقی برای تنظیم پارامترهای FSW قبل از آزمون‌های عملی فراهم کند. لذا نتایج این مطالعه، یک گام کاربردی در جهت کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت جوشکاری در کاربردهای واقعی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تنش‌های پسماند در شکل (۱۳) تا شکل (۱۷) قابل مشاهده است.

پژوهشگران بسیاری از تحلیل‌های عددی و المان محدود، جهت پیش‌بینی ویژگی‌های مهم جوشکاری FSW استفاده کرده‌اند [۳۱، ۳۲]. یو و همکاران [۲۶] جهت مطالعه اثر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر تنش‌های پسماند، از تحلیل المان محدود استفاده کرد. تحقیقات وی نشان داد، در منطقه فلز جوش و نواحی متأثر از حرارت، تنش‌های پسماند کششی است. جاتا و همکاران [۳۳] تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۵۰-۷۴۵۱ TV را در نمونه‌هایی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری کرد و دریافتند که بزرگی تنش‌های پسماند طولی بیشتر از تنش‌های عرضی است.

از آن جایی که در این پژوهش نیز مؤلفه طولی تنش‌های پسماند از سایر مؤلفه‌های تنش پسماند بیشتر بود، فقط نتایج تنش‌های پسماند طولی گزارش شده است. با توجه به نتایج حاصل، بیشترین میزان تنش‌های پسماند طولی ناشی از جوشکاری FSW، در منطقه فلز جوش و به صورت کششی بوده و با فاصله گرفتن از فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت به سمت لبه‌های ورق‌ها میزان تنش‌های پسماند طولی کاهش می‌یابد. مشخص است که میزان این تنش‌ها در ناحیه فلز جوش و ناحیه متأثر از حرارت بیشتر از

واحد طول جوش وارد می‌شود؛ لذا گرادیان دما بین هر قسمت از ماده افزایش می‌یابد. افزایش گرادیان حرارتی بین هر قسمت از مواد، سبب انبساط و انقباض حرارتی غیر یکنواخت بیشتری در زمان گرمایش و سرمایش ناحیه جوشکاری می‌شود و در نتیجه تنش‌های پسماند افزایش می‌یابند.

پسماند دارد. در شرایطی که سایر پارامترهای جوشکاری ثابت باشند، تنش پسماند طولی با افزایش سرعت جوشکاری افزایش می‌یابد. علت این افزایش در تنش پسماند این است که حرارت ورودی در واحد طول خط جوش، توسط سرعت خطی جوشکاری تعیین می‌شود. هرچه سرعت خطی جوشکاری بیشتر باشد، ابزار سریع‌تر از هر ناحیه جوشکاری عبور می‌کند و گرمای کمتری در



شکل (۱۳): تنش‌های پسماند طولی حاصل از تحلیل‌های المان محدود در سرعت‌های جوشکاری متفاوت-نمونه‌های: ۲، ۸ و ۹

آلیاژهای AA۶۰۶۱ و AA۶۱۱۱ بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که پارامتر سرعت چرخش ابزار تأثیر قابل‌توجهی بر FSW داشته و افزایش آن، سبب افزایش تنش‌های پسماند می‌شوند. ژانگ و همکاران [۳۸-۴۰] مدل‌های ترمومکانیکی را توسعه داده‌اند. نتایج ایشان نشان داد که برای جلوگیری از عیوب احتمالی، در صورت افزایش سرعت جوشکاری لازم است سرعت چرخشی ابزار نیز افزایش یابد. همچنین با افزایش همزمان سرعت جوشکاری و سرعت چرخشی ابزار، تنش‌های پسماند نیز افزایش می‌یابند. یکی دیگر از نتایج پژوهش‌های وی این بود که با افزایش سرعت چرخشی ابزار، حداکثر دمای جوشکاری نیز افزایش می‌یابد.

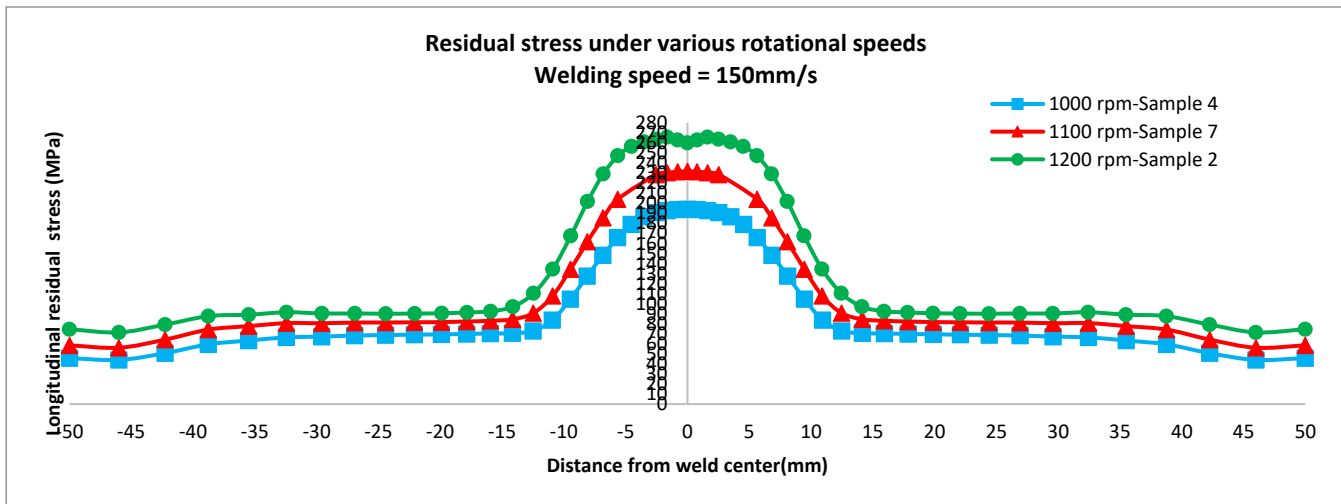
در این پژوهش همان‌طور که در شکل (۱۴) مشخص است، تأثیر سرعت چرخشی ابزار در جوشکاری FSW مورد بررسی قرار گرفته است و مشخص است که افزایش سرعت چرخشی ابزار از ۱۰۰۰ دور بر دقیقه به ۱۱۰۰ دور بر دقیقه (در شرایطی که سایر پارامترهای جوشکاری ثابت بوده‌اند)، باعث افزایش بزرگی تنش‌های پسماند طولی به میزان حداکثر، ۳۳ مگاپاسکال شده است. با افزایش سرعت چرخشی ابزار از میزان ۱۱۰۰ دور بر دقیقه به میزان

۴-۲- سرعت چرخشی ابزار

لیما و همکاران [۳۵] تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری FSW را در نمونه‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۱۳-T۶ ارزیابی کرد. نتایج نشان داد، با کاهش سرعت جوشکاری و کاهش سرعت چرخشی ابزار، مقدار تنش‌های پسماند کششی حاصل در ناحیه تحت تأثیر حرارت کاهش می‌یابد. مطالعات وی نشان داد که تنش‌های پسماند طولی، بیشتر از تنش‌های پسماند در راستای ضخامت و عرضی است؛ لذا در بررسی تنش‌های پسماند، مؤلفه طولی، بحرانی‌تر از سایر مؤلفه‌ها است و از درجه اهمیت بیشتری برخوردار است. پژوهش وی و مطالعات پیشین بیانگر این است که بیشترین میزان تنش‌های پسماند طولی، به صورت کششی است و در محدوده ۳۰ تا ۱۰۰ درصد استحکام تسلیم ماده است. دوبورگ و همکاران [۳۶] تأثیر پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر ماده جوشکاری شده و خواص جوش مورد مطالعه قرار داد. وی به این نتیجه رسید که افزایش سرعت چرخش ابزار به طور قابل‌توجهی منجر به افزایش تنش پسماند می‌شود. پانزر و همکاران [۳۷] تأثیر پارامترهای جوشکاری FSW را بر روی

انقباض حرارتی موضعی تقویت می‌شود که باعث افزایش تنش پسماند کششی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سرعت‌های دورانی و سرعت جوشکاری تأثیر زیادی بر تنش‌های پسماند دارد و افزایش آن‌ها منجر به تنش پسماند کششی بزرگتر می‌شود. بنابراین، زمانی که پارامترهای فرآیند برای FSW طراحی می‌شوند، بایستی بر میزان بهینه سرعت جوشکاری و سرعت دورانی ابزار تمرکز کرد تا از تنش‌های پسماند کششی زیاد جلوگیری شود.

۱۲۰۰ دور بر دقیقه، میزان افزایش بزرگی تنش‌های پسماند طولی حداکثر ۳۴ مگاپاسکال است. مشاهده می‌شود که وقتی سایر پارامترهای جوشکاری FSW ثابت است، تنش پسماند طولی در ناحیه جوش با افزایش سرعت چرخش ابزار افزایش می‌یابد. علت این افزایش تنش این است که دمای پیک، حرارت ورودی و عمل همزدن در ناحیه جوش با افزایش سرعت چرخش افزایش می‌یابد. سپس پلاستیک شدن و جریان فلز افزایش می‌یابد و انبساط و



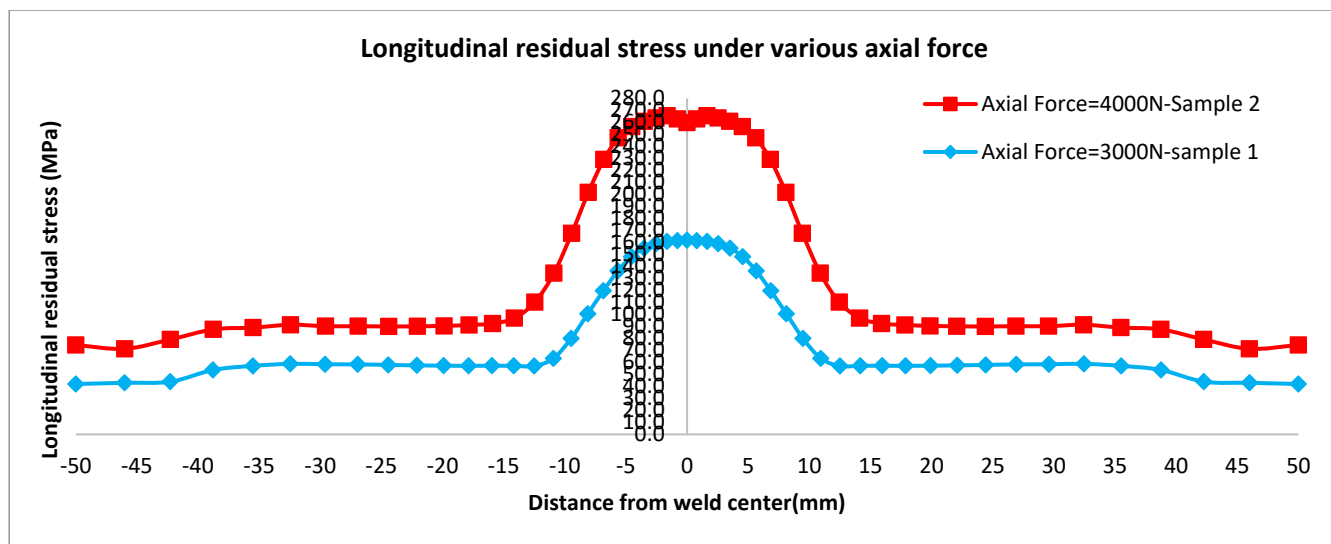
شکل (۱۴): تنش‌های پسماند طولی حاصل از تحلیل‌های المان محدود در سرعت‌های چرخشی متفاوت-نمونه‌های ۲، ۴ و ۷

۴-۳- نیروی محوری

اغتشاشی توسعه داده‌اند [۲۲]. شبیه‌سازی المان محدود وی به صورت کوپل متوالی انجام شد. پژوهش آن‌ها نشان داد که نیروی محوری بزرگتر باعث افزایش اصطکاک بین شانه، پین و ماده می‌شود. در نتیجه تنش برشی افزایش خواهد یافت؛ لذا تغییر شکل پلاستیک در ناحیه جوش افزایش می‌یابد و منجر به افزایش تنش پسماند می‌شود.

مطابق با نتایج حاصل از این مطالعه در شکل (۱۵) قابل مشاهده است که افزایش نیروی محوری ابزار از ۳۰۰۰ نیوتون به ۴۰۰۰ نیوتون (در شرایطی که سایر پارامترهای جوشکاری ثابت باشند) سبب افزایش تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری به میزان حداکثر، ۱۰۶ مگاپاسکال می‌شود. با توجه به شرایط جوشکاری در نمونه‌های ۱ و ۲، نیروی محوری کمتر از ۳۰۰۰ نیوتون دمای ناحیه جوشکاری را به حداقل دمای لازم جهت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نرسانده و منجر به جوش با کیفیتی نمی‌شود.

یکی از پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت جوش، میزان نیروی محوری وارد شده به فلزات پایه از جانب ابزار FSW است. به طور کلی می‌توان بیان داشت که یک میزان بهینه برای نیروی محوری وجود دارد. اگر نیروی محوری کمتر از این میزان باشد، جریان عمودی ماده به خوبی صورت نمی‌گیرد و عیوب ترک مانند در جوش ایجاد می‌شود. در صورتی که میزان این نیرو از مقدار بهینه بیشتر باشد، موجب نازک شدن مقطع جوش و پاشش بیش از حد در اطراف جوش می‌شود [۷]. تحقیقات نشان می‌دهد که نیروی محوری یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان استحکام کششی جوش است. یکی از بهترین راه‌های تعیین نیروی محوری بهینه، استفاده از پیش‌بینی المان محدود، روش‌های تجربی، تکنیک تاگوشی یا روش‌های مشابه است [۴۱] نی و همکاران یک مدل المان محدود را با در نظر گرفتن گرمای تولید شده توسط اصطکاک و تغییر شکل پلاستیک برای جوشکاری اصطکاکی

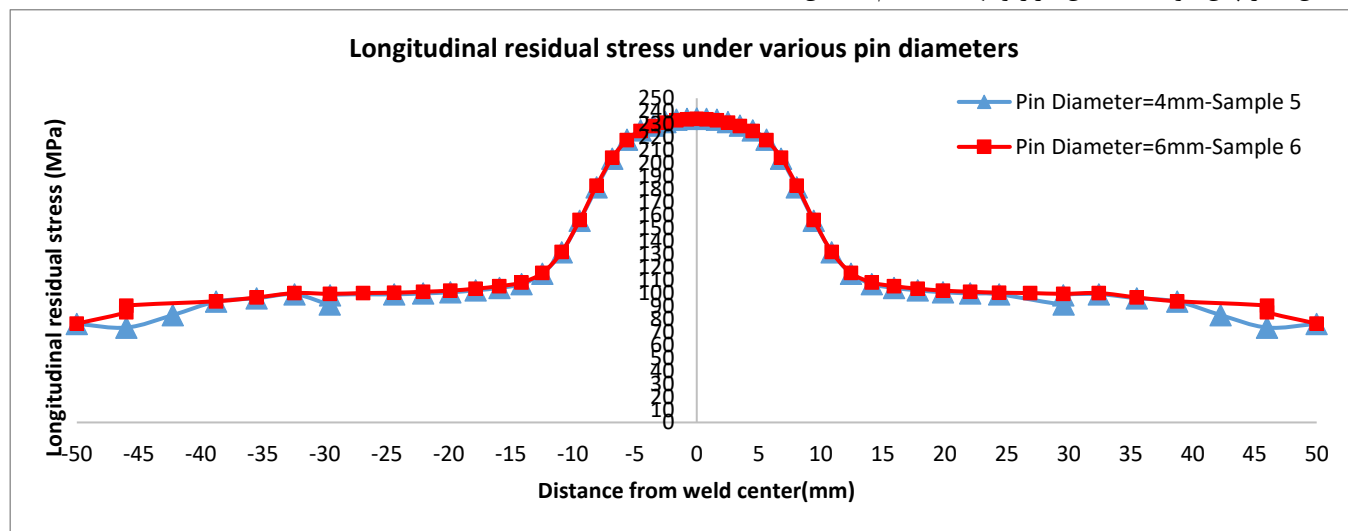


شکل (۱۵): تنش‌های پسماند طولی حاصل از تحلیل‌های المان محدود در نیروهای محوری متفاوت-نمونه‌های ۱ و ۲

۴-۴- قطر پین

می‌شود. از طرف دیگر، افزایش قطر پین نیز تأثیر قابل توجهی بر دمای پیک، کیفیت اتصال و تنش‌های پسماند نخواهد داشت؛ لذا می‌توان گفت که پین با قطری در حدود ضخامت ورق، می‌تواند بهترین گزینه جهت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باشد [۷، ۴۲، ۴۳].

مطابق با شکل (۱۶) قابل مشاهده است که تغییر قطر پین از ۴ میلی‌متر به ۶ میلی‌متر تأثیر محسوسی بر میزان تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری ندارد. به طور کلی می‌توان بیان داشت کاهش قطر پین موجب سایش ابزار و نهایتاً عدم اتصال مناسب

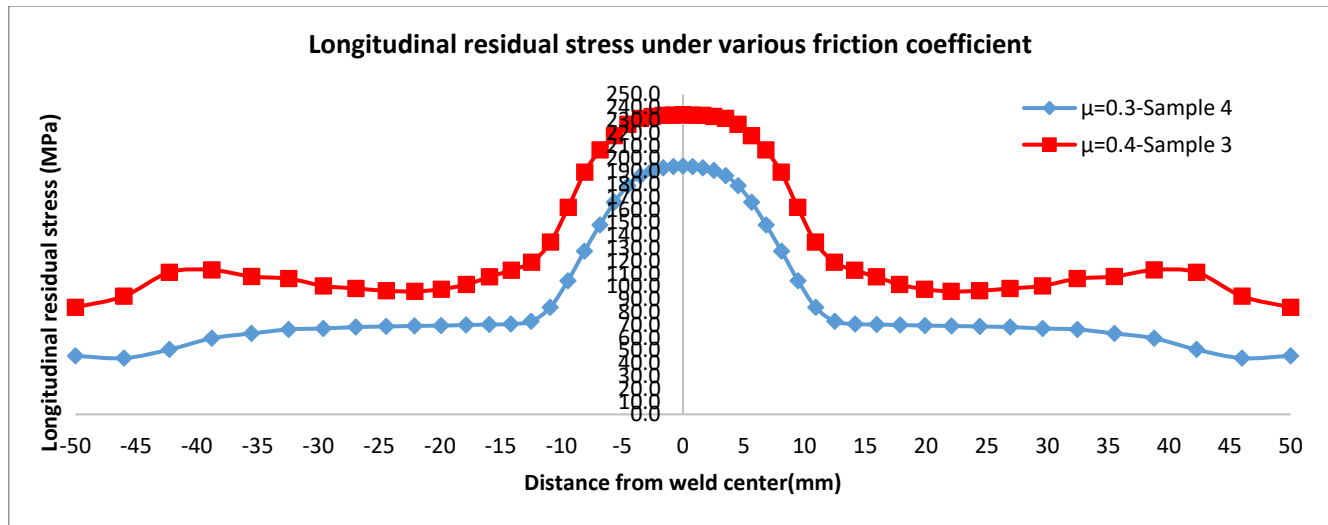


شکل (۱۶): تنش‌های پسماند طولی حاصل از تحلیل‌های المان محدود در قطر پین‌های متفاوت ابزار-نمونه‌های ۵ و ۶

۴-۵- جنس ابزار

افزایش یافته و مطابق با معادلات ۲ و ۳ گرمای تولیدی نیز بیشتر می‌شود. به طور معمول برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم‌ها از پین با جنس فولاد پر کربن استفاده می‌شود [۷]. مطابق با نتایج این مطالعه شکل (۱۷) افزایش ضریب اصطکاک بین ابزار و قطعه کار (ناشی از تغییر جنس ابزار) از ۰/۳ به ۰/۴، در شرایطی که سایر پارامترهای جوشکاری ثابت باشند، منجر به افزایش تنش‌های پسماند کششی به میزان ۱۸ درصد می‌شوند.

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، اصطکاک میان ابزار جوشکاری و فلز پایه موجب تولید حرارت جوشکاری می‌شود. افزایش ضریب اصطکاک بین ابزار و فلز پایه، سبب افزایش گرمای تولیدی می‌شود. این ضریب اصطکاک با سختی ابزار رابطه مستقیم دارد. هر چه سختی ابزار بیشتر باشد، مقدار ضریب اصطکاک نیز



شکل (۱۷): تنش‌های پسماند طولی حاصل از تحلیل‌های المان محدود در ضریب اصطکاک‌های متفاوت ابزار، ناشی از تفاوت جنس ابزار-نمونه‌های: ۳ و ۴

۵- نتیجه گیری

۵. تنش‌های پسماند در ناحیه جوشکاری به صورت کششی است و میزان بزرگی آن‌ها می‌تواند تا حدود ۹۶ درصد تنش تسلیم فلز پایه نیز برسد.

۶. حداکثر میزان تنش‌های پسماند در ناحیه فلز جوش و نواحی نزدیک به ابزار جوشکاری اتفاق افتاده است و با فاصله گرفتن از فلز جوش، تنش‌های پسماند کمتر می‌شود. مؤلفه طولی تنش‌های پسماند از سایر مؤلفه‌های آن بیشتر است.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از جناب آقای دکتر محمد نوقابی، برای مشاوره و راهنمایی موضوع تحقیق در زمینه انجام شبیه‌سازی کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] "T. WM, 'Friction stir butt welding,' International Patent Application, vol. 9125978.8., 1991."
- [2] P. Kah, R. Rajan, J. Martikainen, and R. Suoranta, "Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys," *Int. J. Mech. Mater. Eng.*, vol. 10, no. 1, p. 26, Dec. 2015, doi: 10.1186/s40712-015-0053-8.
- [3] M. R. Mohammadaliha and S. A. Pur-Kasgari, "Optimal

نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای نیروی محوری ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و سرعت‌های خطی و چرخشی ابزار، تأثیر قابل توجهی بر تنش‌های پسماند دارد و افزایش آن‌ها، سبب افزایش چشمگیر تنش‌های پسماند می‌شوند. در این پژوهش، با استفاده از یک مدل عددی کوپل حرارتی-مکانیکی در محیط ABAQUS، تأثیر پارامترهای مختلف فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شامل: نیروی محوری ابزار، سرعت چرخش، سرعت جوشکاری، قطر پین و جنس ابزار بر توزیع تنش‌های پسماند در آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد:

۱. افزایش نیروی محوری ابزار از ۳۰۰۰ به ۴۰۰۰ نیوتن موجب افزایش حدود ۶۶ درصدی تنش‌های پسماند می‌شود.
۲. افزایش سرعت جوشکاری به میزان ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه منجر به افزایش حدود ۳۱ درصدی تنش‌های پسماند می‌شود.
۳. با افزایش سرعت چرخشی ابزار به میزان ۱۰۰ دور بر دقیقه، تنش‌های پسماند به میزان ۱۷ درصد افزایش می‌یابند.
۴. توسط روش المان محدود می‌توان قبل از اجرای فرآیند جوشکاری و با صرف هزینه کمتر، پارامترهای بهینه جوشکاری را جهت اجرای جوش با کیفیت به همراه حداقل تنش‌های پسماند تعیین کرد.

- vol. 86, pp. 691–696, 1986.
- [16] Y. Z. Itoh, S. Suruga, and H. Kashiwaya, “Prediction of fatigue crack growth rate in welding residual stress field,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 33, no. 3, pp. 397–407, 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(89\)90089-1](https://doi.org/10.1016/0013-7944(89)90089-1).
- [17] G. BUSSU and P. IRVING, “The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints,” *Int. J. Fatigue*, vol. 25, no. 1, pp. 77–88, Jan. 2003, doi: [10.1016/S01421123\(02\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S01421123(02)00038-5).
- [18] M.T. Milan and P. Bowen, “Fracture toughness of selectively reinforced Al2124 alloy: Precrack tip in the composite side,” *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 35, no. 4, pp. 1393–1401, 2004, doi: [10.1007/s11661-004-0314-2](https://doi.org/10.1007/s11661-004-0314-2).
- [19] V. Mishin *et al.*, “Numerical Simulation of the Thermo-Mechanics Behavior of 6061 Aluminum Alloy during Friction-Stir Welding,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 6, no. 4, 2022, doi: [10.3390/jmmp6040068](https://doi.org/10.3390/jmmp6040068).
- [20] H. Mohammadi. and S. Naderi. , “Modeling Elastic–Plastic Residual Stresses Induced by Laser Welding in Aerospace Structures,” *J. Space Sci. Technol. Appl.*, vol. 5, no. 2, pp. 153–162, Jun. 2015.”.
- [21] K. N. Salloomi, “Full coupled thermomechanical simulation of friction stir welding of aluminum 6061-T6 alloy T-joint,” *J. Manuf. Process.*, vol. 45, pp. 746–754, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.06.030>.
- [22] L. Nie, Y. X. Wu, and H. Gong, “Prediction of temperature and residual stress distributions in friction stir welding of aluminum alloy,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 106, no. 7, pp. 3301–3310, 2020, doi: [10.1007/s00170-019-04826-4](https://doi.org/10.1007/s00170-019-04826-4).
- [23] M. Bevilacqua, F. E. Ciarapica, A. D’Orazio, A. Forcellese, and M. Simoncini, “Sustainability Analysis of Friction Stir Welding of AA5754 Sheets,” *Procedia CIRP*, vol. 62, pp. 529–534, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.081>.
- [24] S. Ji, Y. Jin, Y. M. Yue, S. Gao, and L. Wang, “Effect of Temperature on Material Transfer Behavior at Different Stages of Friction Stir Welded 7075-T6 Aluminum Alloy,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 29, pp. 955–960, 2013, doi: [10.1016/j.jmst.2013.05.018](https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.05.018).
- [25] X. He, F. Gu, and A. Ball, “A review of numerical analysis of friction stir welding,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 65, pp. 1–66, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.003>.
- [26] H. Yu, B. Zheng, and X. Lai, “A modeling study of welding stress induced by friction stir welding,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 254, pp. 213–220, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.022>.
- [27] Z. Zhang and H. W. Zhang, “Solid mechanics-based Eulerian model of friction stir welding,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 72, no. 9, pp. 1647–1653, 2014, doi: [10.1007/s00170-014-5789-4](https://doi.org/10.1007/s00170-014-5789-4).
- [28] Q. Wen, W. Y. Li, Y. J. Gao, J. Yang, and F. F. Wang, “Numerical simulation and experimental investigation of band patterns in bobbin tool friction stir welding of aluminum alloy,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 100, no. 9, pp. 2679–2687, 2019, doi: [10.1007/s00170-018-2750-y](https://doi.org/10.1007/s00170-018-2750-y).
- [29] H. Schmidt, J. Hattel, and J. Wert, “An analytical model for the heat generation in friction stir welding,” *Model. Simul. Parameters for Joining Polymer and Aluminum with an Adhesive Layer Using Friction Stir Welding in Aerospace Industry*,” *J. Space Sci. Technol. Appl.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–15, 2023.”.
- [4] S. W. Williams, “Welding of airframes using friction stir,” *Air Sp. Eur.*, vol. 3, no. 3–4, pp. 64–66, May 2001, doi: [10.1016/S1290-0958\(01\)90059-0](https://doi.org/10.1016/S1290-0958(01)90059-0).
- [5] A. Heinz, A. Haszler, C. Keidel, S. Moldenhauer, R. Benedictus, and W. . Miller, “Recent development in aluminium alloys for aerospace applications,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 280, no. 1, pp. 102–107, Mar. 2000, doi: [10.1016/S0921-5093\(99\)00674-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00674-7).
- [6] X.-L. Wang, Z. Feng, S. David, S. Spooner, and C. Hubbard, “Neutron Diffraction Study of Residual Stresses In Friction Stir Welds,” In Proc. 6th Int. Conf. on ‘Residual stresses’, Oxford, UK. 2000.
- [7] M. Baba Khanzadeh, K. Malekzadeh, and H. Mehrli, *Design, simulation and optimization of friction stir welding*, 1st ed. Iran: Akhavan, 1390.
- [8] R. Ben Khalifa and O. Toumi, “Prediction of the friction stir welding temperature and ultimate tensile stress for 6061 T6 aluminum,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C*, vol. 239, issue. 14, pp. 5622–5635, 2025, doi: [10.1177/09544062251327542](https://doi.org/10.1177/09544062251327542).
- [9] C. A. Charitidis, D. A. Dragatogiannis, E. P. Koumoulos, and I. A. Kartsonakis, “Residual stress and deformation mechanism of friction stir welded aluminum alloys by nanoindentation,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 540, pp. 226–234, Apr. 2012, doi: [10.1016/j.msea.2012.01.129](https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.129).
- [10] Z. Y. Ma, A. Feng, D. Chen, and J. Shen, “Recent Advances in Friction Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys: Microstructural Evolution and Mechanical Properties,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 43, pp. 1–65, 2017, doi: [10.1080/10408436.2017.1358145](https://doi.org/10.1080/10408436.2017.1358145).
- [11] T. DING, H. ge YAN, J. hua CHEN, W. jun XIA, and B. SU, “Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of Al–Mg–Mn–Zr–Ti alloy sheet during friction stir welding,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China (English Ed.)*, vol. 31, no. 12, pp. 3626–3642, 2021, doi: [10.1016/S1003-6326\(21\)65753-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65753-9).
- [12] M. Saad, R. Reda, M. Ahmed, and H. Abdelkader, “Influence Of Tool Rotational Speed And Axial Load In Friction Stir Welding (FSW) of High Strength Aluminum Alloys,” *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 2, pp. 114–120, 2017.
- [13] T. Sun, M. J. Roy, D. Strong, C. Simpson, P. J. Withers, and P. B. Prangnell, “Weld zone and residual stress development in AA7050 stationary shoulder friction stir T-joint weld,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 263, pp. 256–265, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.08.022>.
- [14] Z. Sun, C.S. Wu, and S. Kumar, “Determination of heat generation by correlating the interfacial friction stress with temperature in friction stir welding,” *J. Manuf. Process.*, vol. 31, pp. 801–811, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.01.010>.
- [15] T. Inoue and Z. G. Wang, “Coupling between Temperature, Stress and Metallic Structures during Phase Transformation and the Analysis of Carburized Quenching of a Steel Gear,” in *Computational Mechanics, Theory and Applications*,

- [37] F. Panzer, M. Werz, and S. Weihe, "Experimental investigation of the friction stir welding dynamics of 6000 series aluminum alloys," *Prod. Eng.*, vol. 12, no. 5, pp. 667–677, 2018, doi: 10.1007/s11740-018-0834-z.
- [38] Z. Zhang and H. W. Zhang, "A fully coupled thermo-mechanical model of friction stir welding," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 37, no. 3, pp. 279–293, 2008, doi: 10.1007/s00170-007-0971-6.
- [39] Z. Zhang and H. W. Zhang, "Numerical studies on controlling of process parameters in friction stir welding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 1, pp. 241–270, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.01.044>.
- [40] Z. Zhang and H. W. Zhang, "Numerical studies on the effect of transverse speed in friction stir welding," *Mater. Des.*, vol. 30, no. 3, pp. 900–907, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.05.029>.
- [41] A. K. Lakshminarayanan and V. BALASUBRAMANIAN, "Process parameters optimization for friction stir welding of RDE-40 aluminium alloy using Taguchi technique," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 18, no. 3, pp. 548–554, 2008, doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60096-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60096-5).
- [42] V. V. Ramalingam, P. Ramasamy, D. A. Moganraj, T. Subramaniam, J. Gokulachandran, and M. Ram, "Numerical Modelling of Thermal Phenomenon in Friction Stir Welding of Aluminum plates," 2016, doi: 10.13140/RG.2.2.22558.43845/1.
- [43] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 50, no. 1, pp. 1–78, Aug. 2005, doi: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
- Mater. Sci. Eng.*, vol. 12, p. 143, 2003, doi: 10.1088/0965-0393/12/1/013.
- [30] D. Yan, W. Aiping, J. Silvanus, and Q. Shi, "Predicting residual distortion of aluminum alloy stiffened sheet after friction stir welding by numerical simulation," *Mater. Des.*, vol. 32, pp. 2284–2291, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.11.032.
- [31] K. N. Salloomi and S. Al-Sumaidae, "Coupled Eulerian–Lagrangian prediction of thermal and residual stress environments in dissimilar friction stir welding of aluminum alloys," *J. Adv. Join. Process.*, vol. 3, pp. 100052, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100052>.
- [32] Z. Sarfaraz, Y. R. Awan, H. A. Saeed, R. Khan, M. Wiczorowski, and N. A. Din, "Residual Stress in Friction Stir Welding of Dissimilar Aluminum Alloys: A Parametric Study," *Materials (Basel)*, vol. 18, no. 2, 2025, doi: 10.3390/ma18020316.
- [33] K. V. Jata, K. K. Sankaran, and J. J. Ruschau, "Friction-stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050-T7451," *Metall. Mater. Trans. A*, vol. 31, no. 9, pp. 2181–2192, Sep. 2000, doi: 10.1007/s11661-000-0136-9.
- [34] D. G. Moghadam, K. Farhangdoost, and R. M. Nejad, "Microstructure and Residual Stress Distributions Under the Influence of Welding Speed in Friction Stir Welded 2024 Aluminum Alloy," *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 47, no. 3, pp. 2048–2062, 2016, doi: 10.1007/s11663-016-0611-3.
- [35] C. Dalle Donne, E. Lima, J. Wegener, A. Kaysser-Pyzalla, and T. Buslaps, "Investigations on Residual Stresses in Friction Stir Welds," 2001, pp. 1–10.
- [36] F. Gemme, Y. Verreman, L. Dubourg, and M. Jahazi, "Numerical analysis of the dwell phase in friction stir welding and comparison with experimental data," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 527, no. 16, pp. 4152–4160, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.03.026>.