

بررسی استحکام برشی در جوش لبه در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۷۰۷۵

حجت ثمری خلج^۱، علی نیک‌بخت^{۲*}، مجتبی صدیقی^۱، سجاد شیخان^۱

^۱دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
^۲پژوهشکده فناوری‌های نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۰ دی ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۶ اسفند ۱۳۹۴
پذیرش: ۹ خرداد ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۸ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
شبیه‌سازی اجزا محدود
استحکام برشی

چکیده: استفاده روزافزون در صنایع مانند هوافضا، اتومبیل و حمل و نقل، منجر به ساخت سازه‌ها و توسعه گستره‌ی تحقیقات در زمینه ساخت و تولید آلومینیوم و آلیاژهای آن شده است. از طرفی جوشکاری ذوبی آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل مشکلاتی که در خصوصیات فیزیکی، حرارتی و متالورژیکی قطعه نهایی ایجاد می‌کند، یکی از موانع بر سر راه استفاده از آلومینیوم می‌باشد. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک روش غیر ذوبی است که با تولید گرمای اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیکی در موقعیت اتصال، مزیت‌هایی مانند اعوجاج پایین، فقدان عیوب مربوط به ذوب و استحکام اتصال بالا را دارا می‌باشد. در این مقاله، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم AA7075-O در حالت لبه روی هم با هدف مطالعه استحکام برشی ناحیه جوش به روش المان محدود توسط دو نرم‌افزار دفرم و آباکوس به صورت متوالی شبیه‌سازی شده و به صورت تجربی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی استحکام برشی میزان اختلاف شبیه‌سازی با آزمون تجربی % ۱۴-۱۵ اندازه‌گیری شده که نشان‌دهنده دقت مناسب شبیه‌سازی المان محدود فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. همچنین، نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که بیشینه تنش برشی ناحیه اتصال برابر ۱۶۵Mpa است که در سرعت دورانی ۱۲۵۰rpm، سرعت خطی ۵۰mm/min و زاویه انحراف ۳° حاصل می‌گردد.

۱- مقدمه

آلومینیوم و آلیاژهای آن به علت داشتن خواص مطلوب مانند نسبت استحکام به وزن بالا، انعطاف‌پذیری و شکل‌پذیری مناسب، مقاومت به خوردگی بالا و بالا بودن هدایت الکتریکی و حرارتی، به طور گسترده در صنایع مختلف به کار گرفته می‌شوند. استفاده روزافزون در صنایع مانند هوافضا، اتومبیل و حمل و نقل، منجر به ساخت سازه‌ها و توسعه گستره تحقیقات در زمینه ساخت و تولید آلومینیوم و آلیاژهای آن شده است.

جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم با استفاده از روش‌های مختلف جوش کاری (ذوبی و غیرذوبی) امکان‌پذیر است. با توجه به مشکلاتی که در زمینه جوشکاری آلومینیوم و آلیاژهای آن وجود دارد، روش‌های متنوعی برای انجام جوشکاری این ماده پیشنهاد شده است که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:

۱. جوشکاری مقاومتی^۱
۲. جوشکاری با پرتو لیزر
۳. جوشکاری با گاز محافظ
۴. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

وجود برخی شرایط خاص در جوشکاری آلومینیوم و آلیاژهای آن، مانند آماده‌سازی سطح جوشکاری (که هزینه‌های زیادی را در بردارد) و اکسیدهای سطحی ایجاد شده (که یک مشکل بزرگ در استفاده از روش‌های ذوبی اتصال است)، باعث شده تا فرآیندهای ذوبی در جوشکاری آلومینیوم و

آلیاژهای آن کمتر مورد استفاده قرار گیرند.

حتی با استفاده از گازهای محافظ خنثی یا شارهای خاص در برخی آلیاژهای آلومینیوم مانند ۷۰۷۵ و ۲۰۲۴ به راحتی نمی‌توان اتصال مطلوب را به دست آورد. در نتیجه ضرورت بررسی و پژوهش در زمینه جوشکاری حالت جامد برای غلبه بر مشکلات مذکور و افزایش کیفیت فرآیند جوشکاری، در صنایع مرتبط با کاربردهای آلومینیوم بیش از پیش احساس می‌شود. یکی از این فرآیندهای جایگزین، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به‌عنوان یک روش حالت جامد و مستعد برای انجام جوشکاری در اتصالات آلومینیوم می‌باشد.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)^۲ یک روش نسبتاً جدید است که اولین بار توسط انجمن جوش (TWT)^۳ انگلستان و در سال ۱۹۹۱ برای جوشکاری آلومینیوم‌هایی که جوش‌پذیر نبوده (گروه ۲xxx و ۷xxx) و با روش‌های مرسوم امکان جوشکاری آن‌ها وجود نداشته به‌عنوان یک روش جوشکاری حالت جامد معرفی شده است [۱-۳]. از این بین می‌توان به گروه ۷xxx از آلیاژهای آلومینیوم اشاره نمود که به دلیل ساختار انجماد ضعیف و وجود عیوبی مانند تخلخل در منطقه ذوب، به‌طور کلی به عنوان آلیاژهای غیرقابل جوش‌پذیر طبقه‌بندی شده بودند.

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از یک ابزار چرخشی غیر مصرفی به نام پین (برای تولید گرمای اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک موضعی در

1 Resistance welding

2 Friction Stir Welding
3 The Welding Institute

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: anikbakht@aut.ac.ir

شبیه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، مدلی عددی با در نظر گرفتن نیروهای اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک به منظور استخراج گرمای تولید شده در حین فرآیند را مورد استفاده قرار داده‌اند [۹].

ماندال و همکاران در سال ۲۰۰۷ یک مدل سه بعدی اجزا محدود را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۲ ارائه کرده و به مطالعه فرآیندهای حرارتی درگیر در مرحله غوطه‌وری پرداخته‌اند. در این مدل نرخ کرنش و قانون مواد جانسون-کوک^۳ که وابسته به دما است به کار گرفته شده است. همچنین برای کاهش به هم خوردگی و اعوجاج مش‌ها از تحلیل اولیری-لاگرانژی اختیاری استفاده شده است. اما همچنان اثر پین ابزار در تداخل بین ابزار و قطعه کار در نظر گرفته نشده است [۱۰].

چاو و همکاران در سال ۲۰۰۸ یک مدل عددی را توسعه داده‌اند. در این مدل حرارتی-مکانیکی، نیروهای اصطکاکی و تغییر شکل پلاستیک در حین فرآیند به منظور استخراج گرمای تولید شده لحاظ شده است [۱۱].

بویا و همکاران در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ [۱۳-۸،۱۲] و صادقی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۳ شبیه‌سازی فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را از طریق نرم‌افزار دفرم^۴ انجام داده‌اند. این نرم‌افزار با کاهش زمان فرآیند شبیه‌سازی، مشکلات تحلیل الاستیک-پلاستیک در جوش اصطکاکی اغتشاشی را حل می‌نماید. در مدل‌سازی با دفرم قطعه کار به عنوان یک قطعه ویسکوپلاستیک^۵ مدل شده و ابزار جوشکاری آن نیز صلب در نظر گرفته شده است. همچنین بویا و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از نرم‌افزار دفرم یک شبیه‌سازی حرارتی-مکانیکی بر مبنای تحلیل لاگرانژی صریح^۶ برای مدل‌سازی اتصال حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حالت لبه روی هم انجام داده‌اند که در آن قطعه به صورت جسم صلب ویسکوپلاستیک و ابزار جوشکاری نیز به صورت جسم صلب مدل شده است [۱۵].

در سال ۲۰۱۲ مردانی جز مطالعه‌ای تجربی و تحلیلی دربارهٔ مبحث انتقال حرارت در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در منطقه جوش داشته است [۱۶].

در سال ۲۰۱۳ محمدی‌صفت به بررسی تجربی و عددی خواص مکانیکی اتصالات ایجاد شده از طریق جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در آلیاژ آلومینیوم استحکام بالا در حالت لبه‌ای پرداخته است. وی مطالعه تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و بهینه‌سازی این پارامترها را با استفاده از طراحی آزمایش مد نظر قرار داده است [۱۷].

زیرینی در سال ۲۰۱۴ به بررسی تجربی و عددی اعوجاج در ورق‌های آلومینیومی ۵۰۵۲ در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته است. وی همچنین تأثیر سرعت دورانی، سرعت پیشروی و تأثیر هندسه ابزار بر روی

موقعیت ناحیه جوش) بهره می‌برد که در یک دستگاه مشابه دستگاه فرز با اعمال فشار و حرکت هم‌زمان دورانی و خطی، در طول محور تماس دو قطعه ایجاد حرارت نموده و منطقه اتصال را به حالت خمیری درمی‌آورد. بدین وسیله شکل‌گیری اتصال هنگامی که ماده در فاز جامد است صورت می‌گیرد [۳]. در این فرآیند، ابزار دو کار انجام می‌دهد [۳]:

۱. گرم کردن قطعه کار
 ۲. ایجاد اغتشاش و حرکت دادن مواد برای ایجاد اتصال
- در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با توجه به هندسه‌های مختلف ابزار، حرکت مواد در اطراف پین می‌تواند کاملاً پیچیده باشد. بر این اساس مواد دست‌خوش تغییر شکل پلاستیک شدید در درجه حرارت بالا شده و در نتیجه تبلور مجدد، دانه‌های مطلوب از لحاظ ساختاری تولید می‌شوند [۴-۷]. این امر از این جهت حائز اهمیت است که ساختار مناسب در ناحیه اتصال حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باعث ایجاد خواص مکانیکی بهینه می‌گردد [۳].

دستاوردهای اصلی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که یک فرآیند حالت جامد می‌باشد؛ عبارت‌اند از: اعوجاج پایین، فقدان عیوب مربوط به ذوب و استحکام اتصال بالا. با استفاده از این روش حتی موادی که با استفاده از تکنیک‌های معمولی غیرقابل جوش فرض می‌شوند، قابل جوشکاری می‌باشند [۳].

یکی از حالت‌های مهم و پرکاربرد در جوشکاری اصطکاکی، حالت لبه روی هم می‌باشد. در این حالت، استحکام برشی ناحیه اتصال به عنوان معیاری برای ارزیابی ناحیه اتصال شناخته می‌شود. محققین مطالعات مختلفی را با استفاده از روش‌های تجربی و عددی به منظور سنجش استحکام برشی ناحیه اتصال حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و کیفیت مکانیکی یک جوش لبه روی هم انجام داده‌اند.

روش‌های حل عددی از دههٔ هفتاد میلادی برای شبیه‌سازی فرآیندهای جوشکاری مورد استفاده قرار گرفته است. به دلیل ماهیت فیزیکی منطقه جوش حاصله از فرآیندهای مختلف جوشکاری، مدل‌سازی‌های ساده برای فرآیند مذکور پاسخ مناسبی به همراه نداشته و به همین دلیل برای شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری روش‌های عددی به کار گرفته شده‌اند. اکثر محققان در این زمینه، از روش اجزا محدود^۱ در مدل‌سازی بهره برده‌اند.

از آن‌جا که فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، فرآیندی نسبتاً جدید است، مدل‌سازی عددی این فرآیند دارای عمر کوتاهی می‌باشد. بدین منظور دو نگرش برای شبیه‌سازی این فرآیند وجود دارد [۸]:

۱. استفاده از مدل‌های تحلیلی و تولید شار حرارتی در حین فرآیند
۲. استفاده از شبیه‌سازی مکانیکی-حرارتی به کمک روش اجزا محدود

نخستین تلاش‌ها در زمینهٔ مدل‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به‌وسیلهٔ سانگ و کواچویچ در سال ۲۰۰۳ انجام شده است. ایشان برای

2 ABAQUS
3 Johnson-Cook Law
4 DEFORM
5 Rigid Viscoplastic
6 Lagrangian implicit approach

صورتی که این شبیه‌سازی با دقت و با در نظر گرفتن پارامترهای مهم فرآیند صورت گیرد، می‌توان از نتایج آن به عنوان وسیله‌ای در راستای کاهش هزینه‌های آزمایش تجربی و طراحی قطعات مهندسی استفاده نمود.

در این پژوهش، فرآیند شبیه‌سازی جوشکاری اصطکاکی با هدف ارزیابی استحکام برشی جوش حاصله مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا و به منظور اعمال اثر بین ابزار بر روی استحکام برشی ناحیه جوش، کاهش زمان محاسبات و شبیه‌سازی عوجاج شدید مش‌ها در حین تداخل ابزار با قطعه کار از دو نرم‌افزار دفرم و آباکوس استفاده شده است. بدین منظور فرآیند جوشکاری به صورت یک تحلیل مکانیکی و حرارتی در نرم‌افزار دفرم شبیه‌سازی شده و خروجی حرارتی این نرم‌افزار به عنوان ورودی در نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفته است. مرحله خنک‌سازی در آباکوس مدل و استحکام برشی از این نرم‌افزار استخراج شده است. با توجه به کاربرد گسترده در صنعت و به منظور تولید نتایج عددی، آلومینیوم ۷۰۷۵ به عنوان ماده به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. برای صحت‌گذاری نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۷۰۷۵ به صورت تجربی نیز انجام شده و تاریخچه حرارتی و استحکام برشی به دست آمده از نتایج تجربی و شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مدل نرم‌افزاری به وجود آمده برای بررسی اثر زاویه انحراف، سرعت دورانی و سرعت حرکت خطی ابزار بر استحکام برشی جوش حاصله مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- آزمایش تجربی

شماتیک فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حالت لبه روی هم و همچنین پارامترهای فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل، R سرعت دورانی، V_f سرعت انتقالی و θ زاویه انحراف ابزار می‌باشد. در راستای انجام آزمایش‌های تجربی، ابتدا ورق‌های آلومینیوم ۷۰۷۵ با ضخامت ۳ میلی‌متر تهیه شده است. برای بررسی خواص ورق تهیه شده و در راستای انجام آزمایش‌ها با دقت بالاتر، ورق آلومینیومی آنالیز جنس شده است. ترکیب شیمیایی ورق آلومینیومی در جدول ۱ لیست شده است.

دستیابی به جوش سالم مستلزم داشتن ابزاری با مشخصات هندسی، فیزیکی و متالورژیکی مناسب است. لذا ساخت ابزار در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این فرآیند، جنس ابزار با توجه به جنس ماده پایه جوشکاری تعیین می‌گردد. در واقع با توجه به این که دمای تولید شده در فرآیند از طریق اصطکاک بین ابزار و قطعه کار

اعواج به وجود آمده در قطعات جوشکاری شده را با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بررسی نموده است. نتایج کار ایشان اهمیت تأثیر پارامترهای فرآیند بر عوجاج حاصله را به ترتیب سرعت خطی جوشکاری، سرعت دورانی و قطر شانه ابزار دسته‌بندی می‌کند [۱۸].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حالت لبه روی هم یک حالت خاص از اتصالات است که به طور گسترده‌ای در مونتاژ قطعات و محصولات صنایع هوانوردی استفاده می‌شود [۱۳]. این حالت از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (شکل ۱)، اغلب برای اتصال مواد غیرهم‌جنس مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳].

بویا و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی تجربی و عددی تأثیر پارامترهای فرآیند بر روی خواص متالورژیکی و مکانیکی در اتصال لبه روی هم آلیاژ آلومینیوم AA2198-T4 حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته‌اند. ایشان اثر تغییر شکل اتصال، تغییر هندسه ابزار و سرعت دورانی بر استحکام و خواص متالورژیکی جوش را مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۳].

در سال ۲۰۱۱ بابو و همکاران، پژوهشی درباره جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لبه روی هم در ورق آلومینیوم روکش شده با آلیاژهای آلومینیوم AA2014-T4 انجام داده و اثر هندسه ابزار را در ساختار جوش، عملکرد استحکام برشی لبه و شکست آن مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۹].

ژیدونگ و همکاران در سال ۲۰۱۲، ویژگی‌های میکروساختاری و خواص خستگی اتصال حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لبه روی هم آلیاژ AA6061-T6 را مورد بررسی قرار داده و اثر جوش تک پاس و جوش دو پاس، نقص اتصال و نسبت تنش بر خواص خستگی را مطالعه کرده‌اند [۲۰]. فدائی‌فرد و همکاران در پژوهشی در سال ۲۰۱۳، اثر سرعت دورانی را بر ماکرو و میکرو ساختار، سختی، عملکرد برشی اتصال لبه روی هم و حالت شکست آن در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ AA6061-T6 از آلیاژهای آلومینیوم مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۱].

سالاری و همکاران در سال ۲۰۱۴، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم AA5456 در اتصال لبه روی هم را بررسی و تأثیر هندسه ابزار و سرعت‌های مختلف چرخشی را بر ماکرو ساختار، میکرو ساختار و استحکام اتصال ارائه کرده‌اند. در این تحقیق، ارتفاع قلاب و ضخامت مؤثر صفحه پایینی به عنوان معیار کیفیت برای اتصالات جوش داده شده مورد استفاده قرار گرفته است [۲۲].

با توجه به مطالعات انجام شده در حوزه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم و آلیاژهای آن، می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی این فرآیند در حالت لبه روی هم تاکنون مورد توجه محققان قرار نگرفته است. از طرفی، در

جدول ۱: ترکیب شیمیایی آلومینیوم AA7075-O به کار رفته در آزمایش‌ها

Table 1. AA7075-O chemical composition

AL	Ti	Si	Cr	Mn	Fe	Cu	Mg	Zn	عناصر
مابقی	۰/۰۲	۰/۴۲	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۳	۱/۳۷	۱/۸۷	۶/۳۲	%

جدول ۲: مشخصات ابعادی ابزار

Table 2. Dimensions of the tool

۱۶ mm	قطر شانه
۶ mm	قطر بالایی پین
۴/۸ mm	قطر پایینی پین
۵/۴ mm	طول پین
۱۴°	زاویه مخروط
۵°	زاویه سطح مقعر
۰/۷	گام رزوه

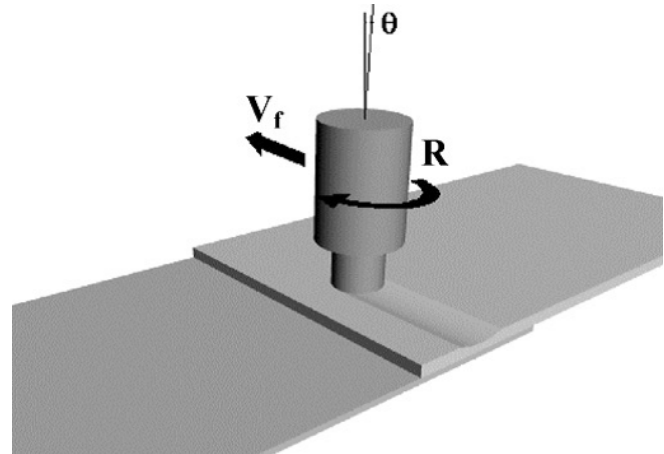


Fig. 1. Schematic of friction stir lap welding

شکل ۱: شماتیک جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لبه روی هم

پس از فرورفتگی ابزار تا تماس سطح شانه به قطعه و در ناحیه اتصال، برای جلوگیری از به وجود آمدن عیب تونلی، ابزار به مقدار ۰/۸ میلی‌متر داخل قطعه کار فرورده شده تا سطح مقعر طراحی شده روی پین به خوبی با سطح قطعه کار در تماس قرار گیرد (عمل فورجینگ^۲). برای جلوگیری از شکل‌گیری عیب پس از فرورفتن، ابزار بدون حرکت در راستای خط جوش و در نقطه شروع به مدت ۶۰ ثانیه دوران داده شده است. پس از طی این مراحل، ابزار مسافت ۶۰ میلی‌متری در راستای عرض قطعه را طی نموده و بدین ترتیب اتصال ایجاد می‌شود. شکل ۳ نمایی از قطعات بسته شده و ابزار را نشان داده است.



Fig. 3. Experimental demonstration of friction stir lap welding

شکل ۳: نمایی از عملیات جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حالت لبه روی هم

با توجه به مطالعات انجام شده درباره پارامترهای فرآیند حاضر، سرعت دورانی، سرعت خطی ابزار و زاویه انحراف ابزار به‌عنوان پارامترهای تحقیق انتخاب شده‌اند. اثر این پارامترها با استفاده از شبیه‌سازی بر تاریخچه حرارتی و استحکام برشی جوش حاصله، در سطوح مختلف بررسی شده‌اند؛ اما برای خلاصه کردن نتایج و با توجه به روند مشاهده شده ناشی از تغییر هر یک از این پارامترها بر نتایج حاصله، سطوح مشخصی از پارامترها برای ارائه نتایج نهایی انتخاب شده که مقدار عددی هر کدام در جدول ۳ لیست شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نتایج به‌دست آمده بر اساس سطوح بیان شده در

به‌وجود آمده و منجر به اتصال در ناحیه جوش می‌شود، جنس ابزار با توجه به دمای کاری که متناسب با جنس قطعه کار است، مشخص می‌گردد. علاوه بر این، در این فرآیند که ابزار تحت تأثیر همزمان تنش‌های حرارتی و مکانیکی است، انتخاب جنس مناسب که بتواند خواص مکانیکی و متالورژیکی خوبی در دماهای بالا از خود نشان دهد، از ملزومات انجام فرآیند است. در این پژوهش، جنس ابزار فولاد گرم‌کار [DIN 1.2344] یا (H13) انتخاب شده است [۲۳]. برای افزایش سختی و مقاومت سایشی، ابزار تحت عملیات حرارتی قرار گرفته که طی آن به علت تشکیل کارباید کروم و کارباید مولیبدن، سختی و مقاومت سایشی افزایش می‌یابد. مشخصات ابعادی ابزار در جدول ۲ ارائه شده است. برای اغتشاش و به هم خوردن بهتر در ناحیه جوش و جریان بهتر مواد، پین ابزار به‌صورت رزوه مخروطی طراحی و ساخته شده است (شکل ۲). این امر سبب جلوگیری از ایجاد عیوب جوشی، نظیر ترک یا عیب تونلی^۱ می‌گردد [۲۴، ۲۵].



Fig. 2. The tool of friction lap welding

شکل ۲: ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

شوند (شکل ۴). برای جلوگیری یا به حداقل رساندن تنش‌های خمشی در حین اجرای آزمون کششی برشی، قطعات اضافی مانند شکل ۵ در نواحی خالی بین گیره‌ها قرار داده می‌شوند. این کار باعث یکسان شدن فاصله بین گیره‌ها و قرارگیری آنها در یک راستا می‌گردد. سرعت جابه‌جایی فک در این آزمایش برابر $0/05$ میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

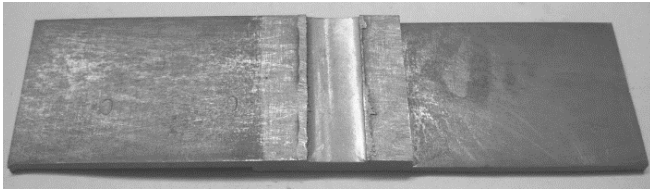


Fig. 4. The prepared sample for tension test

شکل ۴: نمونه قطعه آماده شده برای آزمون کششی برشی

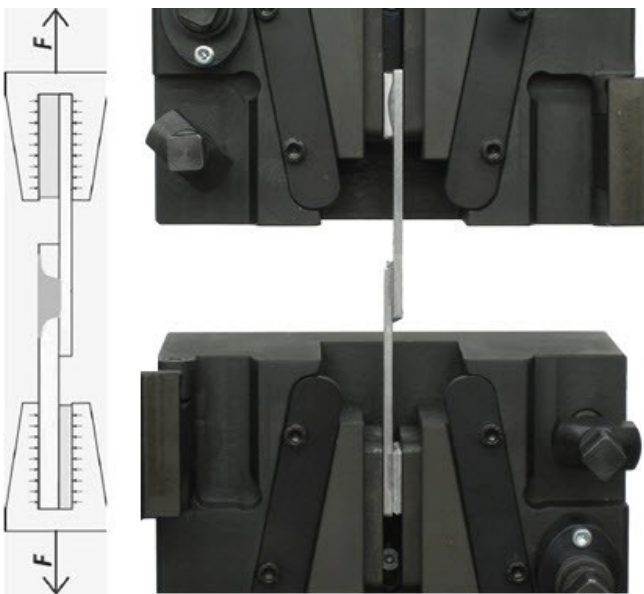


Fig. 5. The schematic of the manner in which the samples are fixed in the shear test instrument

شکل ۵: شماتیک نحوه قرارگیری نمونه در دستگاه آزمون کششی برشی

۳- شبیه‌سازی

در این بخش به تشریح رویه شبیه‌سازی اجزا محدود در جهت بررسی استحکام برشی ناحیه اتصال حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حالت لبه روی هم پرداخته شده است.

در این پژوهش، شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری با استفاده از دو نرم‌افزار دفرم و آباکوس (به صورت متوالی) صورت گرفته است. ابتدا توزیع درجه حرارت در نرم‌افزار دفرم به دست آمده و سپس این توزیع حرارتی به عنوان ورودی در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده تا استحکام برشی قطعه حاصل از جوشکاری بررسی شود.

در شبیه‌سازی انجام شده، اثر ابزار جوش (شانه و پین ابزار) و تداخل بین ابزار و قطعه کار لحاظ شده تا مدل ایجاد شده برای شبیه‌سازی هر چه بیشتر به واقعیت نزدیک باشد. علاوه بر این، در جهت کاهش زمان فرآیند

جدول ۳ کلی بوده و می‌توان از آنها نتیجه‌گیری و برداشت کلی داشت. از طرفی برای کاهش هزینه‌های آزمون تجربی، ۸ ترکیب مختلف از داده‌های جدول ۳ انتخاب شده و آزمون‌های تجربی براساس آنها انجام گرفته است. مشخصات سطوح انتخاب شده در جدول ۴ ارائه شده است. فرآیند جوشکاری به صورت تجربی برای هر ۸ حالت ممکن از ترکیب پارامترهای جدول ۴ به تعداد هر آزمایش دو مرتبه صورت گرفته است.

جدول ۳: سطوح پارامترهای به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها

Table 3. Different levels of the parameters which are used in the simulations

سطوح	سرعت دورانی (rpm)	سرعت خطی (mm/min)	زاویه انحراف ابزار (Degree)
۱	۶۳۰	۱۰۰	۳
۲	۸۰۰	۵۰	۰
۳	۱۰۰۰		
۴	۱۲۵۰		

جدول ۴: سطوح پارامترهای به کار رفته در آزمون‌های تجربی

Table 4. Different levels of the parameters which are used in the experimental tests

سرعت دورانی (rpm)	سرعت خطی (mm/min)	زاویه انحراف ابزار (Degree)
۱۰۰۰	۱۰۰	۰
۱۲۵۰	۵۰	۳

لازم به ذکر است که عدم اتصال کافی سطح شانه ابزار در حین فرآیند و خمیری نشدن اتصال باعث ایجاد عیب تونلی خواهد شد. عدم نفوذ کافی ابزار در قطعه کار در آزمایش‌های ابتدایی این پژوهش باعث ایجاد عیب مذکور و عدم ایجاد اتصال در ناحیه جوش شده است. بنابراین در این پژوهش با استفاده از آزمون سعی و خطا، با افزایش مقدار فورجینگ به $0/3$ میلی‌متر (نسبت به تحقیقات پیشین)، اتصال مناسب حاصل شده است. همچنین، برای داشتن جوشی با کیفیت مناسب بهتر است زاویه انحراف ابزار بیشتر از 3° نباشد.

برای صحت‌گذاری نتایج حرارتی به دست آمده از مدل عددی، تغییرات دمایی قطعه در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با به کارگیری ترموکوپل سیمی نوع K و ترمومتر LUTRON-TM-946 و با استفاده از نرم‌افزار LUTRON-801 اندازه‌گیری شده است. بدین منظور، ابتدا ترموکوپل به وسیله خمیر سیلیکون روی قطعه کار چسبانده می‌شود، به طوری که نوک ترموکوپل در فاصله ۱۵ میلی‌متری از مرکز خط جوش و در وسط راستای خط جوش قرار می‌گیرد. پس از انجام فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و به منظور بررسی استحکام برشی اتصال حاصل، قطعات جوش خورده در ابعاد 40×180 میلی‌متر مربع بریده شده تا برای انجام آزمون کشش آماده

1 Thermocouple

۱۵,۰۰۰ مش و صفحه پستی ۲۰,۰۰۰ مش از نوع مش تتراهدرال را شامل شده‌اند.

برای انجام شبیه‌سازی در دفرم با استفاده از اطلاعات پیش فرض و موجود مربوط به مواد در این نرم‌افزار، ورق آلومینیومی، ابزار و صفحه پستی به ترتیب از جنس آلیاژ AA7075، فولاد گرم کار (H13) و فولاد استحکام بالا انتخاب شده‌اند. قطعه کار به صورت جسم ویسکوپلاستیک و ابزار و صفحه پستی هر دو به صورت جسم صلب در نظر گرفته شده‌اند.

تبادل دما با محیط با ضریب همرفتی (N/s. °C) ۰/۰۲ برای هر سه قطعه (قطعه کار، ابزار و ورق پستی) در نظر گرفته شده است. با توجه به این که در اجرای آزمایش از فیکسچر^۱ برای نگهداری قطعه و جلوگیری از حرکت آن استفاده می‌شود، قطعه کار در سه جهت برای نزدیک کردن هرچه بیش‌تر شرایط شبیه‌سازی به شرایط آزمایش، ثابت فرض شده است. همچنین سطوح و نواحی که قطعه کار با ابزار و صفحه پستی در تماس هستند، مشخص شده تا تماس بین آنها معنا گیرد. تماس بین قطعه کار با ابزار و قطعه کار با صفحه پستی تعریف شده است. این تماس شامل تعریف ضریب اصطکاک بین بخش‌های نام‌برده و همچنین میزان تبادل حرارتی بین آنها است. میزان تبادل حرارتی بین قطعه کار و صفحه پستی (N/s. °C) ۱ در نظر گرفته شده است.

چهار مرحله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که در شرایط آزمایشی تجربه می‌شوند، در نرم‌افزار دفرم انجام شده‌اند. این چهار مرحله در شکل ۶ نشان داده شده است. به منظور شباهت هرچه بیشتر شبیه‌سازی به فرآیند واقعی، در مرحله فرورفتگی ابزار در داخل قطعه کار، ابزار تا مقدار تعیین شده برای ایجاد نیروی اولیه فرو رفته است. این مقدار برابر حالتی است که کف ابزار مماس با سطح بالایی قطعه باشد. پس از این مرحله، برای رساندن دما به دمای کاری، برای ابزار به مدت ۶۰ ثانیه فقط حرکت دورانی (بدون حرکت انتقالی در راستای خط جوش) تعریف شده است. در مرحله سوم، ابزار با حفظ حرکت دورانی، حرکت خطی خود را شروع و تا پایان خط جوش و پایان فرآیند جوشکاری ادامه خواهد داد. پس از پایان مرحله جوشکاری و طی مسافت از پیش تعیین شده روی قطعه، ابزار رو به بالا حرکت داده می‌شود تا از قطعه کار بیرون بیاید. در انتهای این فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در نرم‌افزار دفرم پایان خواهد یافت.

از آنجایی که دمای کار در فرآیند جوشکاری حالت جامد مانند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پایین‌تر از جوشکاری در حالت ذوبی است، مشکلات تعریف خواص مواد در دماهای بالا (عدم دسترسی به خواص دقیق در دماهای بالا)، به خودی خود رفع شده و خطای مربوط به این امر در نتایج شبیه‌سازی به حداقل مقدار ممکن می‌رسد.

خواص قطعه کار (به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها) و مقادیر شرایط مرزی مربوط به انتقال حرارت بین قطعه و محیط اطراف در جدول ۵ ارائه شده است. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته ضریب اصطکاک سطح تماس بین

شبیه‌سازی ابتدا در نرم‌افزار دفرم یک تحلیل برای ایجاد تداخل بین ابزار و قطعه کار، انجام گرفته است. به دلیل مشکلات موجود در مورد تداخل بین ابزار و قطعه کار، قطعه کار به صورت یک جسم ویسکوپلاستیک در نظر گرفته شده است. استفاده از این نوع جسم به جای جسم الاستیک-پلاستیک ضمن حفظ اعتبار نتایج، منجر به کاهش شدید زمان تحلیل از چند ماه به چند روز می‌گردد [۲۵]. با گرفتن خروجی‌ها از دفرم و تبدیل آن به داده‌های ورودی به صورت شرایط مرزی اولیه در آباکوس، قطعه به صورت واقعی خود، یعنی الاستیک-پلاستیک، در نظر گرفته شده تا تحلیل مکانیکی برای بررسی استحکام برشی انجام شود [۸].

به طور خلاصه در این پژوهش، ابتدا یک شبیه‌سازی کوپل مکانیکی-حرارتی در نرم‌افزار دفرم، برای ایجاد تأثیر شکل و هندسه شانه و پین ابزار جوش انجام شده است. سپس از نرم‌افزار مذکور خروجی‌های حرارتی در هر گره با توجه به مختصات هر گره در زمان‌های مختلف گرفته شده و این داده‌ها به عنوان شرایط مرزی اولیه در نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفته است. در محیط آباکوس، ابتدا مرحله خنک کردن قطعه تا دمای محیط انجام و خروجی این بخش به عنوان شرایط مرزی برای انجام کشش قرار داده شده است. در بخش نهایی قطعه کار از دو انتها تحت کشش قرار گرفته و نمودار تنش-کرنش قطعه به عنوان استحکام برشی در شبیه‌سازی ناحیه جوش حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استخراج شده است.

۳-۱- شبیه‌سازی با نرم‌افزار دفرم

نرم‌افزارهای قدرتمندی مثل آباکوس قابلیت شبیه‌سازی تداخل مناسب ابزار و قطعه کار بر اثر چرخش ابزار در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به دلیل به هم خوردگی مش‌ها را ندارند و اعوجاج مش‌ها مانع از اجرای کامل شبیه‌سازی و در نهایت توقف آن می‌گردد. پس برای شبیه‌سازی اغتشاش در فرآیند، نیاز به مش‌زنی مجدد به صورت خودکار می‌باشد. مش‌زنی مجدد به صورت خودکار یکی از قابلیت‌هایی است که در جهت سهولت کار، اجرای دقیق شبیه‌سازی و گستردگی فرآیندها برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار دفرم قرار داده شده است. در شبیه‌سازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در نرم‌افزار دفرم برای اتخاذ تبادل حرارتی (موجود بین ورق و میز دستگاه در واقعیت) و جلوگیری از پارگی ورق (در اثر تغییر شکل شدید که به واسطه تداخل بین ابزار و قطعه کار می‌باشد) از صفحه پستی استفاده می‌شود. با استفاده از پنجره تعریف مش در نرم‌افزار دفرم، قطعه کار به نواحی مختلف تقسیم و مش‌زنی شده است. دلیل این امر حساسیت برخی نواحی نسبت به توزیع تنش و حرارت‌های موجود و همچنین بیشتر بودن چگالی حرارتی در آنها است. از این رو استفاده از مش ریز برای نواحی نزدیک به خط جوش با توجه به حساسیت‌های موجود در آن و مش درشت‌تر برای نواحی دورتر در جهت کاهش زمان تحلیل، لازم است. برای اطمینان از همگرایی جواب‌ها، اندازه اجزا در هر بخش به تدریج کوچک‌تر شده تا اندازه بهینه مش به دست آید. برای اجرای شبیه‌سازی، قطعه کار در حدود ۲۳,۰۰۰ مش، ابزار

1 Fixture

تعیین خواص مواد و ایجاد شرایط مرزی در راستای نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی جوشکاری، گام‌هایی ایجاد شده است. گام‌ها به گونه‌ای تعریف شده‌اند که هر گام متأثر از گام‌های قبلی می‌باشد.

ناحیه جوش، ناحیه متصل به گیره و ناحیه کشش، نواحی مختلف قطعه را تشکیل می‌دهند. در مش‌بندی ناحیه جوش به علت حساسیت این قسمت، اندازه مش‌ها ریزتر در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که پس از انجام تجزیه و تحلیل مش تعداد ۲۳/۲۳۴ جز انتخاب و در تمامی مراحل شبیه‌سازی با نرم‌افزار آباکوس در نظر گرفته شده است.

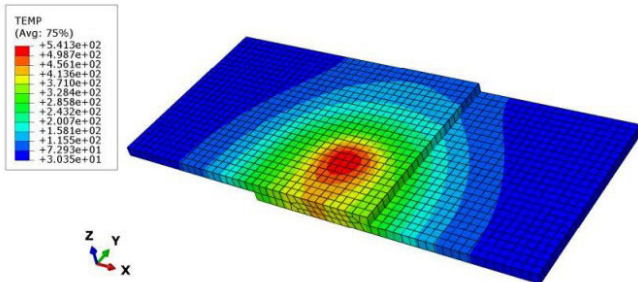


Fig. 7. Temperature distribution for 1250 rpm, transverse speed of 50mm per second and tilt angle of 0 degree

شکل ۷: توزیع دمایی از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای حالتی با سرعت دورانی ۱۲۵۰ rpm و سرعت خطی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و انحراف زاویه ابزار ۰°

پس از اجرای این تحلیل حرارتی، داده‌های مرحله جوشکاری به عنوان شرایط مرزی اولیه در مرحله خنک‌سازی قرار داده شده‌اند. توزیع حرارتی برای حالتی که سرعت دورانی ۱۲۵۰ rpm، سرعت خطی جوش ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف ابزار ۳° باشد در شکل ۷ نشان داده شده است. در مرحله خنک‌سازی، ابتدا قیود مرحله قبلی از روی قطعه کار برداشته شده است. با توجه به ضریب انتقال حرارت ماده و گذشت زمان، دمای قطعه به دمای محیط بازمی‌گردد. پس از رسیدن به دمای محیط داده‌های این مرحله به عنوان شرایط مرزی برای مرحله کشش قطعه قرار داده شده است. در مرحله کشش با توجه به شرایط آزمایش کشش، نواحی مختلف قطعه کار تعیین شده و خواص مواد در این نواحی مختلف تعریف شده‌اند [۲۴]. همچنین قیودی با توجه به شرایط آزمون کششی برشی روی قطعه تعریف شده است. نواحی مختلف قطعه و قیود تعیین شده در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. برای جلوگیری از هرگونه بار خمشی در شبیه‌سازی مقدار U_2 (جابه‌جایی در راستای Y) و U_3 (جابه‌جایی در راستای Z) در تمامی قطعه صفر در نظر گرفته شده است.

۴- نتایج

نتایج شبیه‌سازی و فعالیت‌های تجربی برای بررسی استحکام برشی در ناحیه اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی آلیاژ آلومینیوم AA7075-O در این بخش ارائه شده است. در شبیه‌سازی‌ها، بیشینه تنش

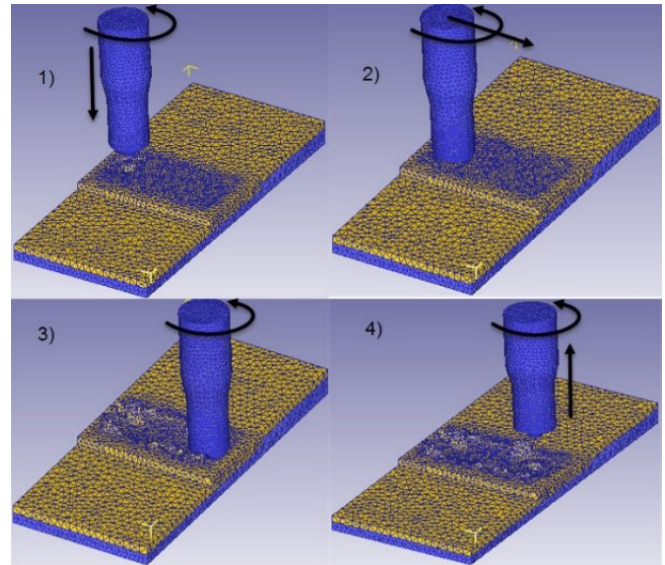


Fig. 6. Friction stir lap welding steps in DEFORM

شکل ۶: مراحل جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در نرم‌افزار دفرم

ابزار و قطعه در طول فرآیند جوشکاری ۰/۴۶ لحاظ شده است [۲۶]. با توجه به این که تاریخچه دمایی فرآیند، حاصل تأثیرات تمامی پارامترها را در خود دارد، می‌توان نتیجه گرفت که خروجی گرفته شده از نرم‌افزار دفرم اثر تمامی پارامترها را در خود دارد.

جدول ۵: خواص آلیاژ AA7075 در نرم‌افزار دفرم

Table 5. The properties of AA7075-O which are used in simulations by DEFORM

مقدار (واحد)	خواص ماده
۷۱/۷ (GPa)	مدول یانگ
۰/۳۳	ضریب پواسون
۱۸۰ (N/s. °C)	ضریب هدایت حرارتی
۲/۴ (N/mm ² . °C)	گرمای ویژه حرارتی
۱۱ (N/s. °C)	تبادل حرارتی بین قطعه و ابزار
۰/۰۲ (N/s. °C)	جابه‌جایی حرارتی قطعه کار با هوا

۳-۲- شبیه‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

شبیه‌سازی استحکام برشی ناحیه جوش در نرم‌افزار آباکوس در سه مرحله انجام شده است. این مراحل عبارت‌اند از:

۱. مرحله جوشکاری
۲. مرحله خنک‌سازی
۳. مرحله کشش

در مرحله جوشکاری داده‌های خروجی از نرم‌افزار دفرم به صورت توابع دمایی در هر گره در نرم‌افزار آباکوس وارد شده است. خواصی از مواد از قبیل تنش نهایی، تنش تسلیم، ضریب انبساط حرارتی، ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت ویژه گرمایی با توجه به مراجع معتبر تعریف شده است [۲۷]. پس از

۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان درصد اختلاف محاسباتی مدل به کار گرفته شده و نتایج تجربی، حداکثر ۱۵ درصد می‌باشد. این میزان اختلاف نشان‌دهنده مطلوب بودن نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌باشد. همچنین مقدار ۱۶۵ مگاپاسکال به عنوان بیشینه تنش برشی محاسبه شده در شبیه‌سازی‌ها به دست آمده است. علاوه بر این، برای این دو آزمایش کرنش اندازه‌گیری شده به روش تجربی به ترتیب ۰/۰۲۴ و ۰/۰۷ می‌باشد. از طرفی با استفاده از مدل عددی، بیشینه کرنش قابل محاسبه نمی‌باشد؛ زیرا در مدل اجزا محدود به کار گرفته شده معیاری برای شکست و یا از کار افتادگی در نظر گرفته نشده است.

جدول ۶: میزان اختلاف بیشینه تنش برشی موجود در شبیه‌سازی نسبت به کار تجربی

Table 6. The maximum difference of shear stress obtained by simulations and experimental data

آزمایش ۲	آزمایش ۱	
۱۹۲	۸۱	نتایج تجربی
۱۶۵	۷۰	نتایج شبیه‌سازی
۱۵٪	۱۴٪	میزان اختلاف

نمودارهای تنش-کرنش تجربی و عددی برای این دو آزمون به ترتیب در شکل ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در این دو شکل مشخص است، در حالت کلی در یک کرنش برابر نتایج حاصل از شبیه‌سازی تنش کمتری نسبت به نتایج تجربی را پیش‌بینی می‌کنند؛ اما اختلاف نتایج شبیه‌سازی و تجربی اندک می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج عددی و تجربی، نشان می‌دهد که مدل اجزا محدود می‌تواند با دقتی مناسب روند کلی تغییرات و اثر پارامترها بر یافته‌های حرارتی و نتایج مربوط به

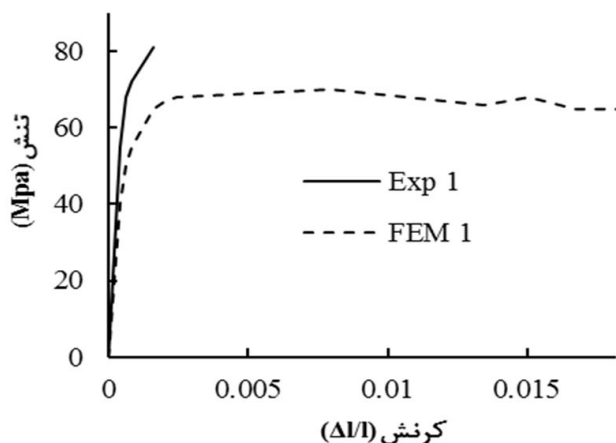


Fig. 10. Comparison between simulation and experimental data for shear stress; 1000 rpm, transverse speed of 100 mm per second and tilt angle of 0 degree

شکل ۱۰: مقایسه استحکام برشی آزمون تجربی و شبیه‌سازی آزمایش شماره ۱ با سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm، سرعت خطی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف ابزار ۰°

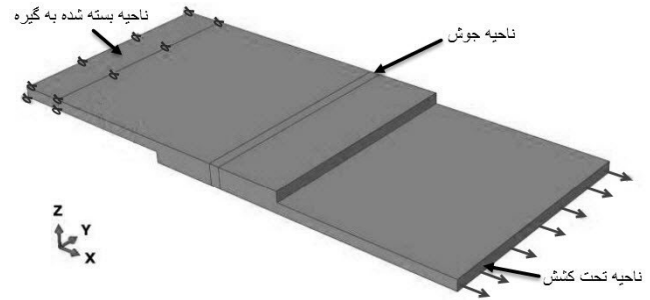


Fig. 8. Different regions which are assumed in ABAQUS simulations

شکل ۸: نواحی مختلف قطعه در شبیه‌سازی با آباکوس

برشی به‌عنوان استحکام برشی لحاظ شده و معیار سنجش برای مقایسه نتایج آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است.

مقایسه توزیع درجه حرارت در آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در حالتی با سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm، سرعت خطی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف ابزار ۰° در شکل ۹ نشان داده شده است. مقایسه یافته‌های حاصله از آزمون تجربی و شبیه‌سازی نشان‌دهنده دقت مناسب نتایج مدل اجزا محدود به‌وجود آمده می‌باشد. مقدار اختلاف محاسبه شده بین آزمایش تجربی و شبیه‌سازی برابر ۵/۳۶ درصد اندازه‌گیری شده است.

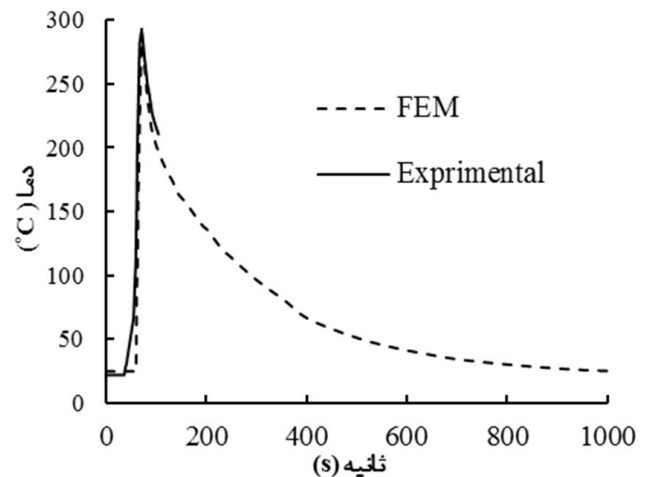


Fig. 9. Comparison between the temperature distribution obtained by simulations and experimental data; 1000 rpm, transverse speed of 100 mm per second and tilt angle of 0 degree

شکل ۹: مقایسه توزیع درجه حرارت تجربی و شبیه‌سازی در حالتی با سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm و سرعت خطی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و انحراف زاویه ابزار ۰°

به منظور بررسی مدل، مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی برای دو آزمایش با شرایط مندرج در جدول ۴ صورت گرفته است. در اینجا ردیف اول جدول ۴ با سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm و سرعت خطی ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف ابزار ۰° آزمایش ۱ و ردیف دوم که حالتی با سرعت دورانی ۱۲۵۰ rpm و سرعت خطی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف ابزار ۳° است، آزمایش ۲ نامگذاری شده‌اند. مقایسه بیشینه تنش برشی حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای این دو حالت در جدول

میلی‌متر بر دقیقه و 4° در نظر گرفته است. بررسی یافته‌های این شکل نشان می‌دهد که افزایش سرعت دورانی ابزار باعث افزایش استحکام برشی قطعه جوشکاری شده می‌باشد. علاوه بر این می‌توان نتیجه گرفت که رابطه استحکام برشی و سرعت دورانی تقریباً خطی است.

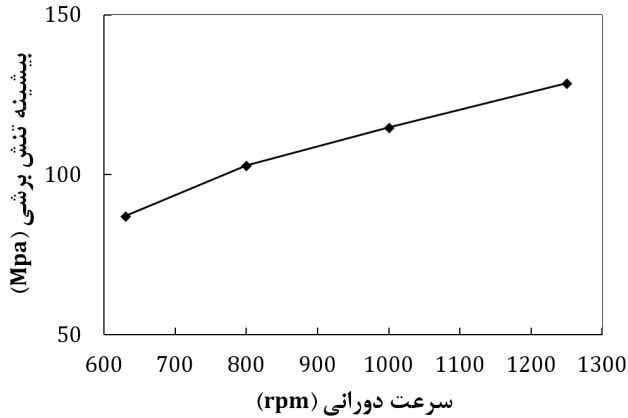


Fig. 13. The effect of rotational speed on the maximum shear strength of the welded specimen (constant transverse speed of 50 mm per second and the tilt angle of 3 degrees are assumed)

شکل ۱۳: اثر سرعت دورانی ابزار بر استحکام برشی قطعه جوشکاری شده (سرعت خطی 50 میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف ابزار 3° ثابت در نظر گرفته شده‌اند)

شکل ۱۴ اثر سرعت خطی ابزار بر استحکام برشی قطعه جوشکاری شده را نشان می‌دهد. همان‌گونه که پیداست، افزایش سرعت خطی باعث کاهش استحکام برشی قطعه می‌گردد.

دقت در نتایج شکل‌های ۱۲ الی ۱۴ نشان می‌دهد که سرعت خطی ابزار بیشترین و زاویه انحراف ابزار کمترین اثر را بر استحکام برشی قطعه دارند. علاوه بر این، افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت خطی باعث افزایش استحکام برشی می‌شود. علت این امر را باید در تغییر تنش پسماند در قطعه جستجو نمود. افزایش سرعت دورانی، کاهش سرعت خطی و افزایش زاویه انحراف ابزار در این فرآیند باعث کاهش تنش پسماند در ناحیه اتصال می‌شود. از طرفی کاهش تنش پسماند، استحکام اتصال را افزایش می‌دهد [۲۸، ۲۹]. این بدین معنی است که افزایش سرعت دورانی، کاهش سرعت خطی و افزایش زاویه انحراف ابزار باعث افزایش استحکام اتصال شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در حالت لبه روی هم با استفاده از دو نرم‌افزار فرم و آباکوس شبیه‌سازی شده است. پژوهش‌های پیشین در این زمینه به بررسی اغتشاش پرداخته‌اند، ولی در این مقاله ضمن شبیه‌سازی اغتشاش، تاریخچه حرارتی و استحکام برشی جوش حاصله توسط مدل اجزا محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. ماده مورد استفاده به عنوان قطعه کار، آلومینیوم ۷۰۷۵ بوده و نتایج شبیه‌سازی مربوط به تاریخچه حرارتی و استحکام برشی قطعه جوشکاری شده با استفاده از تست

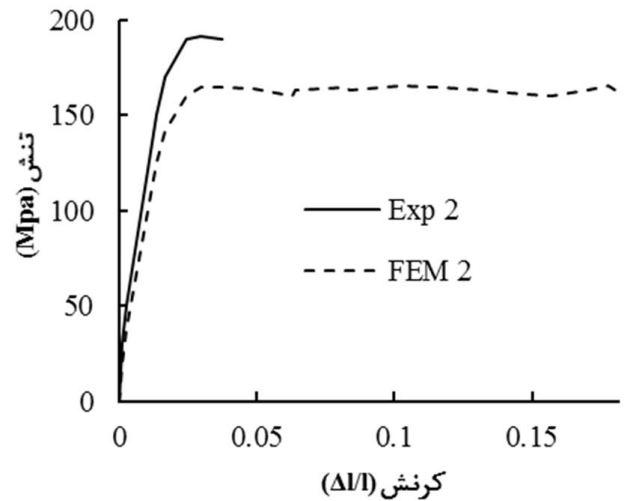


Fig. 11. Comparison between simulation and experimental data for shear stress; 1250 rpm, transverse speed of 50 mm per second and tilt angle of 3 degrees

شکل ۱۱: مقایسه استحکام برشی آزمون تجربی و شبیه‌سازی آزمایش شماره ۲ با سرعت دورانی 1250 rpm و سرعت خطی 50 میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف ابزار 3°

تنش برشی را بررسی نماید. در نتیجه می‌توان با دقتی مناسب از این مدل برای بررسی اثر پارامترهای جوشکاری، بر تنش‌ها و تاریخچه حرارتی قطعه استفاده نمود که در ادامه به این مهم پرداخته شده است.

شکل ۱۲ اثر زاویه انحراف ابزار را بر بیشینه تنش برشی قطعه جوشکاری شده نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل پیداست، تغییر این پارامتر اثر بسیار کمی بر تنش برشی قطعه دارد؛ به طوری که با افزایش و یا کاهش مقدار این پارامتر، تغییر قابل توجهی در مقدار بیشینه تنش برشی ایجاد نشده است.

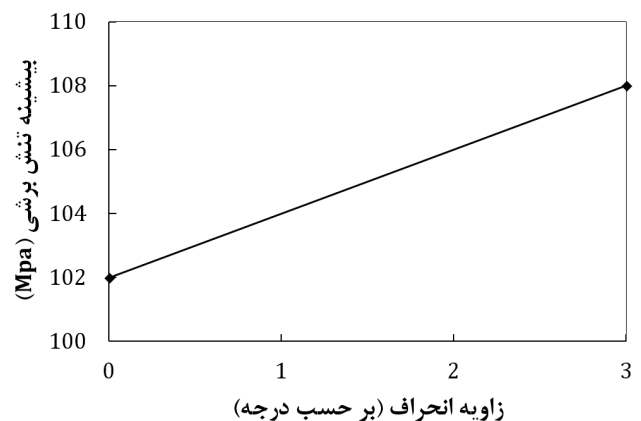


Fig. 12. The effect of tilt angle on the maximum shear strength of the welded specimen

شکل ۱۲: اثر زاویه انحراف ابزار بر بیشینه تنش برشی قطعه جوشکاری شده

شکل ۱۳ نشان‌دهنده اثر سرعت دورانی بر بیشینه تنش برشی است. در این شکل سرعت خطی و زاویه انحراف ابزار ثابت و به ترتیب برابر 100

microstructure of 7075 aluminum, *Scripta Matereriala*, 36 (1997) 69-75.

- [8] G. Liu, L. Murr, C. Niou, J. McClure, F. Vega, Microstructural aspects of the friction stir welding of 6061 T6 aluminum, *Scripta Material*, 37 (1997) 355-361.
- [9] S. Benavides, Y. Li, L. Murr, D. Brown, J. McClure, Low temperature friction stir welding of 2024 aluminum, *Scripta Material*, 41 (1999) 809-815.
- [10] K. Jata, S. Semiatin, Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys, *Scripta Material*, 43 (8) (2000) 743-749.
- [11] G. Buffa, A. Ducato, L. Fratini, Numerical procedure for residual stresses prediction in friction stir welding, *Finite Elements in Analysis and Design*, 47 (2011) 470-476.
- [12] M. Song, R. Kovacevic, Thermal modeling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43 (6) (2003) 605-615.
- [13] S. Mandal, J. Rice, A. Elmustafa, Experimental and numerical investigation of the plunge stage in friction stir welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 203 (2007) 411-419.
- [14] Y. Chao, X. Qi, W. Teng, Heat transfer in friction stir welding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 105 (2008) 138-45.
- [15] G. Buffa, L. Fratini, S. Pasta, Residual Stresses in FSW Numerical Simulation & Experimental Verification, *International Centre for Diffraction Data*, 23 (2009) 1097-2002.
- [16] G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini, A. Prisco, Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties, *Materials Science and Engineering A*, 519 (2009) 15-26.
- [17] A. Sadeghi, M. Ahmadi Najafabadi, Y. Javadi, M. Mohammadisefat, Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates, *Materials & Design*, 52 (2013) 870-880.
- [18] G. Buffa, L. Fratini, M. Schneider, M. Merkleinb, Micro and macro mechanical characterization of friction stir welded Ti-6Al-4V lap joints through experiments and numerical simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (2013) 2312-2322.
- [19] M. Mardanijoz, MSc thesis, *Experimental & mathematical investigation on heat transfer in friction stir welding*, MSc Thesis, Amirkabir University of

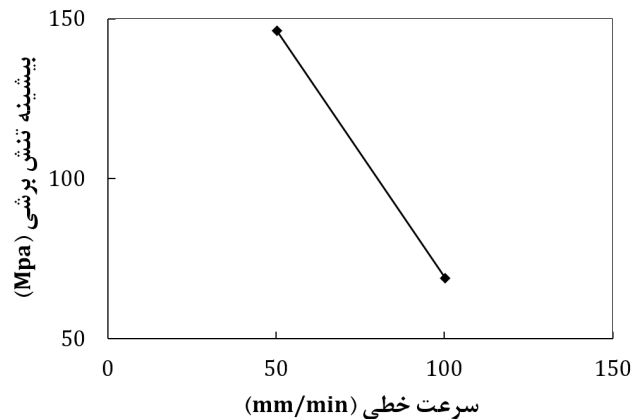


Fig. 14. The effect of transverse speed on the maximum shear strength of the welded specimen (constant rotational speed of 1000 rpm and the tilt angle of 3 degrees are assumed)

شکل ۱۴: اثر سرعت خطی ابزار بر استحکام برشی قطعه جوشکاری شده (سرعت دورانی ۱۰۰۰ rpm و زاویه انحراف ابزار ۳° ثابت در نظر گرفته شده‌اند)

تجربی صحت‌گذاری شده‌اند. بر این اساس، بیشینه اختلاف استحکام برشی به‌دست آمده از شبیه‌سازی و تست تجربی برابر ۱۵ درصد بوده که این امر حاکی از دقت مناسب مدل اجزا محدود به‌کار رفته می‌باشد. نتایج تجربی این تحقیق نشان می‌دهد که برای جلوگیری از به‌وجود آمدن عیب در اتصال، میزان فرورفتگی بهینه ابزار در قطعه کار برابر ۰/۳ میلی‌متر می‌باشد که این مقدار بیشتر از میزان فرورفتگی بهینه برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم ۷۰۷۵ در حالت لبه روبه‌روی هم است. همچنین، براساس آزمون‌های تجربی انجام شده، نتیجه شده که برای داشتن جوشی با کیفیت مناسب بهتر است زاویه انحراف ابزار بیشتر از ۳° نباشد. شبیه‌سازی اجزا محدود فرآیند جوشکاری برای ترکیب‌های متنوع از سطوح مختلف پارامترهای مؤثر بر تاریخچه حرارتی و استحکام نهایی قطعه جوشکاری شده صورت گرفته است. نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان می‌دهند که افزایش سرعت دورانی، کاهش سرعت خطی و افزایش زاویه انحراف ابزار باعث افزایش استحکام برشی قطعه می‌گردد؛ به طوری که بیشینه تنش برشی در شبیه‌سازی برای حالتی با سرعت دورانی ۱۲۵۰ rpm، سرعت خطی ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه و زاویه انحراف ۳° به مقدار ۱۶۵ مگاپاسکال حاصل می‌شود.

منابع

- [4] W. Thomas, E. Nicholas, E. Needham J, M. Murch, P. Templesmith, C. Dawes, *Patent Application No. 9125978.8*, (1991).
- [5] C. Dawes, W. Thomas, Friction stir joining of aluminum alloys, *TWI Bulletin*, 6 (1995) 124-128.
- [6] R. Mishra, Z. MA, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering R*, 50 (2005) 1-78.
- [7] C. Rhodes, M. Mahoney, W. Bingel, R. Spurling, C. Bampton, Effects of friction stir welding on

- and Design*, 58 (2014) 381–389.
- [26] M. Miles, T. Nelson, B. Decker, Formability and strength of FSWed aluminum sheets, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35 (2004) 3461–3468.
- [27] M. Bahrami, MSc thesis, *An investigation the effect of SiC particles on mechanical properties in friction stir butt joint AA7075*, MSc Thesis, Amirkabir University, Tehran, Iran, (2012).
- [28] A. Sadeghi, MSc thesis, *An investigation on residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates with ultrasonic waves*, MSc Thesis, Amirkabir University, Tehran, Iran, (2012).
- [29] G. Buffa, J. Hua, R. Shivpuri, L. Fratini, A continuum based FEM model for friction stir welding-model development, *Materials Science and Engineering A*, 419 (2006) 389–396.
- [30] Tech report, A., 2015. *ASM Aerospace Specification Material Inc. ASM material sheet data*, Oct 2015. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA7075O>
- [31] K. Deplus, A. Simar, W. Van Haver, Residual stresses in aluminium alloy friction stir weld, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56 (2006) 493–504.
- [32] J. Zapata, M. Toro, D. Lopez, Residual stresses in friction stir dissimilar welding of aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 229 (2015) 121–127.
- Technology, Tehran, Iran, (2012).
- [20] M. J. Mohamadi Sefat, MSc thesis, *Investigation on mechanical properties of friction stir welding in high strength aluminium alloy*, MSc Thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, (2013).
- [21] A. Zarini, MSc thesis, *Numerical and experimental analysis of distortion in friction stir welding (FSW) of aluminium sheets*, MSc Thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, (2013).
- [22] S. Babu, D. G. Janaki Ram, V. P. Venkitakrishnan, G. Madhusudhan, K. Prasad Rao, Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded Aluminum Alloy AA2014, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28 (2012) 414–426.
- [23] X. Xu, X. Yang, G. Zhou, J. Tong, Microstructures and fatigue properties of friction stir lap welds in aluminum alloy AA6061-T6, *Materials and Design*, 35 (2012) 175–183.
- [24] F. Fadaeifard, K. A. Matori, M. Toozandehjani, A. R. Daud, M. Ariffin, N. Othman, F. Gharavi, A. Ramzani, F. Ostovan, Influence of rotational speed on mechanical properties of friction stir lap welded 6061-T6 Al alloy, *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*, 24 (2014) 1004–1011.
- [25] E. Salari, M. Jahazi, A. Khodabandeh, H. Ghasemi-Nanasa, Influence of tool geometry and rotational speed on mechanical properties and defect formation in friction stir lap welded 5456 aluminum alloy sheets, *Materials*

Please cite this article using:

H. Samarikhalaj, A. Nikbakht, M. Sadighi, S. Sheikhan, Investigating the Shear Strength of Friction Stir Lap Welded 7075 Aluminum Alloy, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(4) (2018) 863–873.
DOI: 10.22060/mej.2016.743

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

