

# اثر زاویه سطح شانه ابزار روی خواص اتصال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲

ابراهیم نیکی نجف آبادی<sup>۱</sup>، فرهاد غروی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مواد، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، اصفهان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، واحد سیرجان، دانشگاه آزاد اسلامی، سیرجان، کرمان، ایران

\*fgharavi@iausirjan.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۱۹)

## چکیده

در این تحقیق، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با طرح اتصال لبه روی هم آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ اجرا گردید و اتصالات جوش لبه روی هم توسط سرعت پیشروی ۶۳ میلیمتر بر دقیقه و سرعت چرخش ابزار ۱۴۵۰ دور بر دقیقه ساخته شدند. سه نوع ابزار با زاویه سطح شانه متفاوت (صفر، ۵ و ۱۰ درجه) طراحی و استفاده شد. تاثیر زاویه سطح شانه بر خواص اتصال جوش بوسیله میکروسکوپ نوری و آزمون کشش-برش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که در زاویه سطح شانه صفر درجه، یک کانال پیوسته در سمت پیشرونده نزدیک به دکمه جوش ایجاد و در طول خط جوش گسترده شد. اتصال لب روی هم با بیشترین استحکام شکست، کوچکترین اندازه قلاب و در طی آزمون برشی کششی، شکست از محل عیب قلاب نبوده و در فصل مشترک ورق ها رخ داده است. اندازه عیب قلاب (Hook) و ضخامت موثر ورق (EPT) با زیاد شدن زاویه سطح شانه به ترتیب از ۴/۵ به ۲ و از ۲/۲۵ به ۱ کاهش یافتند در حالی که بالاترین خواص کششی-برشی در زاویه سطح شانه برابر با ۱۰ درجه به ۴۶۵۰ نیوتن بر میلیمتر رسید.

## کلمات کلیدی:

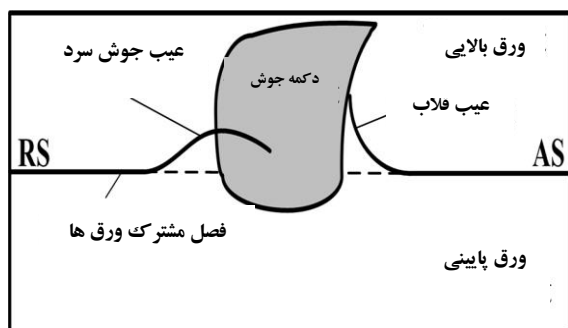
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، آلومینیوم ۵۰۵۲، اتصالات لبه روی هم، عیب قلاب، خواص کششی-برشی.

## ۱- مقدمه

کاربردهای بسیاری از جمله اتصال لبه روی هم و یا انواع اتصال پیچیده استفاده می شود که می تواند به صورتی ترکیبی از اتصالات لبه روی هم<sup>۲</sup> و لب به لب توصیف شود [۷]. در حقیقت، بر اساس این موارد، انجام دادن جوش لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی، سخت تر از جوش لب به لب اصطکاکی اغتشاشی است چرا که [۸]:

به عنوان یک روش اتصال حالت جامد برجسته، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)<sup>۱</sup> برای اتصال مواد با نقطه ذوب کم، مخصوصا آلیاژهای آلومینیوم در نظر گرفته شده است [۱-۳]. آلیاژهای Al-Mg متعلق به گروه 5-XXX به عنوان مواد بالقوه در بیشتر صنایع کاربرد گسترده داشته اند از جمله: صنایع حمل و نقل، هوانوردی، کشتی سازی [۴-۶]. فرآیند FSW در

درصد پایین تر از حالت T4 بود. علاوه بر این، غروی و همکاران [۱۴] ورق های از جنس آلومینیوم ۶۰۶۱ با طرح اتصال لبه روی هم را جوش دادند و تاثیر پارامتر سرعت پیشروی ابزار روی ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش شده مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که با افزایش سرعت پیشروی ابزار، استحکام برشی-کششی و راندمان اتصالات جوشکاری شده افزایش یافت. در فرآیند FSLW، دو قطعه جوشکاری با عرض مشخصی همپوشانی دارند. ابزار چرخشی به صفحه بالایی متصل می شود و در طول خط مرکزی همپوشانی حرکت می کند. بعد از خارج کردن ابزار، جوش خطی لبه روی هم ایجاد می گردد. در مقایسه با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، عیوب FSLW، ایجاد شده از حرکت سطح تماس اولیه در طی اغتشاش ایجاد شده در اطراف پین ابزار، در سطوح پیشرونده و پسرونده اتصالات لبه روی هم وجود دارند [۱۵]. در سمت پیشرونده (AS)، سطح تماس اتصالات لبه روی هم معمولاً بیرون دکه جوش باقی می ماند و در طول مرز دکه جوش به سمت بالا تا (پپیچیده) می شود، که به عنوان عیب قلاب<sup>۵</sup> شناخته شده اند. در سمت پسرونده (RS)، سطح تماس ابتدا به سمت بالا حرکت می کند و سپس وارد دکه جوش می شود که به عنوان عیب جوش سرد شناخته شده است. شماتیک این دو عیب در شکل ۱ ارائه شده است. عیوب اتصالات لبه روی هم اصطکاکی اغتشاشی اغلب در این موارد اتفاق می افتد [۱۶-۱۸].



شکل (۱): شمایی از عیوب قلاب و جوش سرد در جوش لبه روی هم اصطکاکی اغتشاشی

۱- منطقه متصل شده در فصل مشترک، محدود به پین های با قطرهای کوچکتر است.

۲- تخریب اکسید در فصل مشترک ورق ها و ترکیب فصل مشترک عمودی بین ورق های بالایی و پایینی به دلیل جهت سرعت خطی در ابزار چرخشی با فصل مشترک اتصال، سخت تر است چون تقریباً موازی با فصل مشترک است.

۳- تشکیل قشرهای پیوسته با طول های مشخص و فضاهای خالی بزرگ که در منطقه مرکزی دکه جوش مشاهده می شود.

باید اشاره کرد که اتصالات لبه روی هم در اتصال سازه های آلیاژ آلومینیوم، مخصوصاً در صنایع خودروسازی و هوانوردی کاربرد گسترده ای دارند. اگرچه تمرکز تحقیقات قبلی بر FSW عمدتاً درباره اتصالات لبه به لب بود که بعنوان مثال صادقی و همکاران [۹] بررسی نسبت سرعت دوران به پیشروی ابزار در جوشکاری همزن اصطکاکی اتصال غیر هم جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به تیتانیوم خالص تجاری پرداختند و نتایج نشان داد که نسبت سرعت دورانی به سرعت پیشروی ابزار پارامتر اساسی در تعیین استحکام و ریزساختار نهایی جوش می باشد و بهترین نتیجه برای ریزساختار، سختی و نتایج آزمون کشش در نسبت بهینه ۲۲/۴، که مربوط به سرعت دورانی ۱۱۲۰ و سرعت پیشروی ۵۰ می باشد، حاصل شد و کاهش یا افزایش از این نسبت بهینه باعث کاهش استحکام و سختی می گردد، ولی تعدادی مطالعه درباره جوش لبه روی هم اصطکاکی اغتشاشی (FSLW)<sup>۲</sup> آلیاژهای آلومینیوم انجام شده اند [۱۰-۱۱]. در این راستا میثرا و

همکاران [۱۲] بعد از اتصال لبه روی هم ورق های آلومینیوم AA6111 گزارش دادند که با کاهش سرعت چرخش ابزار، میزان اندازه قلاب افزایش یافته و استحکام شکست اتصالات کاهش پیدا کرد و نیز زاویه انحراف ابزار هیچ گونه تاثیری بر میزان اندازه قلاب نداشت. همچنین بابو و همکاران [۱۳] با مطالعه روی اتصال لبه روی هم آلیاژ آلومینیوم ۲۰۱۴ در دو حالت تمپر حرارتی شده T6 و T4 نتیجه گرفتند که اتصالات ایجاد شده با پین مثلی استحکام شکست برشی برابر با فلز پایه داشت و نیز استحکام شکست برشی در حالت T6 در حدود ۴۳

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ با ضخامت ۵ میلیمتر برای صفحات بالایی و پایینی اتصالات لبه روی هم استفاده شد که ترکیب شیمیایی و ویژگی های مکانیکی آن در جداول ۱ و ۲ فهرست شده اند.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ (درصد وزنی)

Mn	Fe	Cu	Si	Mg	Al
۰/۳	۰/۴۰>	۰/۱۰>	۰/۲۵>	۲/۵	Base

جدول (۲): خواص مکانیکی فلز پایه

فلز پایه	استحکام تسلیم (مگا پاسکال)	استحکام کششی (مگا پاسکال)	درصد ازدیاد طول
آلومینیوم ۵۰۵۲	۹۰	۱۹۳	۲۵

صفحات بالایی و پایینی، ۳۰۰ میلیمتر طول و ۱۰۰ میلیمتر عرض داشت. جهت افقی صفحات موازی با جهت نورد بود. به دلیل عدم تقارن در نمایه های عیب روی AS و RS، جهت اتصال با جوش لبه روی هم اصطکاکی اغتشاشی را می توان به دو روش متفاوت تعیین کرد یعنی پیکربندی بارگذاری AS و پیکربندی بارگذاری RS [۲۴]، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است. همه اتصالات لبه روی هم در این پژوهش در پیکربندی بارگذاری AS انجام شدند تا بین اندازه قلاب و ویژگی های اتصال، همبستگی ایجاد شود.

بعد از پاکسازی با استون، دو قطعه جوشکاری روی میز کار، روی هم قرار گرفتند و با گیره محکم شدند. فرآیند FSLW در طول خط مرکزی همپوشانی با استفاده از دستگاه فرز CNC انجام شد. در این مطالعه، سه ابزار متفاوت ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) طراحی شد که شماتیک هندسه و ابعاد آنها در شکل ۳ نشان داده شده است. قطر شانه هر سه ابزار، ۲۵ میلیمتر و طول بین پیچ مخروطی، ۹/۵ میلیمتر برابر با عمق جوش لب روی هم در نظر گرفته شد. سطح زیرین شانه (یعنی زاویه سطح شانه)، مقعر با زوایای متفاوت صفر ( $T_1$ )، ۵ ( $T_2$ ) و ۱۰ ( $T_3$ ) درجه بود. زاویه انحراف ابزار برای همه آزمایشات ۳ درجه انتخاب گردید. شانه

تا وقتی فرایند FSLW در نظر گرفته می شود، شکل ابزار و ابعاد آن (قطر شانه، زاویه سطح شانه مقعر، قطر و ارتفاع پین)، پارامترهای مهم در تعیین پیکربندی عیب و ویژگی های اتصال هستند [۱۹ و ۲۰].

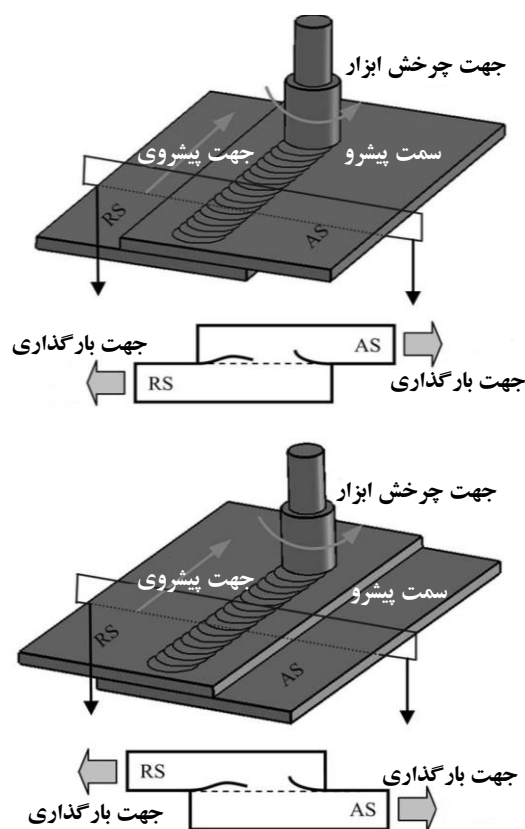
عیوب قلاب و جوش سرد<sup>۷</sup>، در واقع انحراف الگوهای جریان ماده در سطح تماس اتصال لبه روی هم است و بنابراین نمایه آنها تحت تاثیر شکل ابزار و ابعاد. برای جوش لبه روی هم اصطکاکی اغتشاشی، توسعه و گسترش شکل های هندسی ویژه ای برای ابزارها مخصوصاً زاویه سطح شانه ابزار (ASS)<sup>۸</sup> می تواند منجر به کاهش و به حداقل رساندن میزان عیوب در اتصالات لبه روی هم باشد [۲۱]. واضح است که وجود عیوب قلاب و جوش سرد، اثر ضخامت موثر ورق (EPT)<sup>۹</sup> را کاهش داده و منجر به جهت گیری مناسب رشد ترک شده است. سبب تمرکز تنش در محل اتصال جوش خواهد شد و در نهایت میزان نیروی شکست در اتصالات جوش لبه روی هم کاهش می یابد [۲۲].

باید اشاره کرد که شانه ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، به صورت مستقیم و غیرمستقیم، بر ویژگی های مختلف منطقه جوش خورده از لحاظ ظاهر تا ریزساختار داخلی و مشخصات و نقص ها تاثیر می گذارد [۲۳]. بررسی جوش های ایجاد شده آلیاژهای آلومینیوم با ابزار با شانه های مختلف می تواند تأیید کند که تغییر شکل فلز در بالاترین لایه های جوش ها و ایجاد عیب، تحت تاثیر طراحی شانه هستند [۲۳].

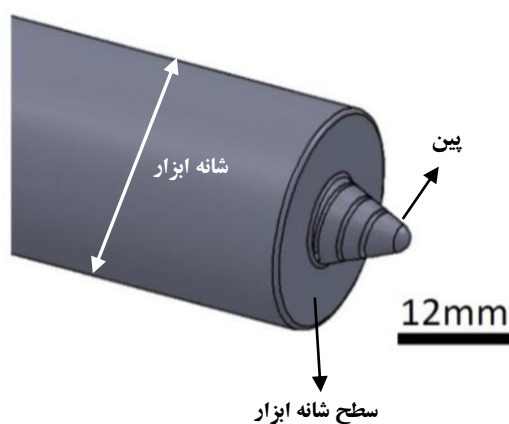
برای FSLW آلیاژهای آلومینیوم، اگرچه تلاش هایی برای یافتن تاثیر هندسه ابزار و ویژگی های پین بر مشخصات اتصال انجام شده است، اما مطالعه ای از تاثیر مکانیزم های شانه ابزار مخصوصاً زاویه سطح شانه، بر اندازه قلاب و ویژگی های اتصال وجود ندارد. بنابراین هدف این مطالعه، ساخت جوش لب روی هم اصطکاکی اغتشاشی از آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ با هدف مشخص کردن تاثیر زاویه سطح شانه بر اندازه قلاب و ویژگی های اتصال است. تمرکز بر تشکیل جوش، خواص کششی و ویژگی های شکست اتصالات لبه روی هم است.

برای ایجاد اتصالات لبه روی هم بصورت تک پاس انجام شد. عمق فروروی شانه،  $0/3$  میلیمتر و همه اتصالات لبه روی هم با استفاده از سرعت پیشروی  $63 \text{ mm/min}$  و سرعت چرخش  $1450 \text{ rpm}$  جوشکاری شد.

و پین از فولاد H13 برای تضمین ثبات ابعاد پین در طی فرایند FSLW ساخته شد. لازم به ذکر است ابزار مورد استفاده در این تحقیق بر اساس استاندارد ASM جلد ۵ تحت عملیات حرارتی قرار گرفت بطوریکه در روغن کوئنچ گردید و بعد از سه مرحله تمپر کردن سختی کل ابزار به  $63$  ویکرز رسید. جهت جوشکاری موازی با جهت نورد صفحات بود و فرایند FSLW

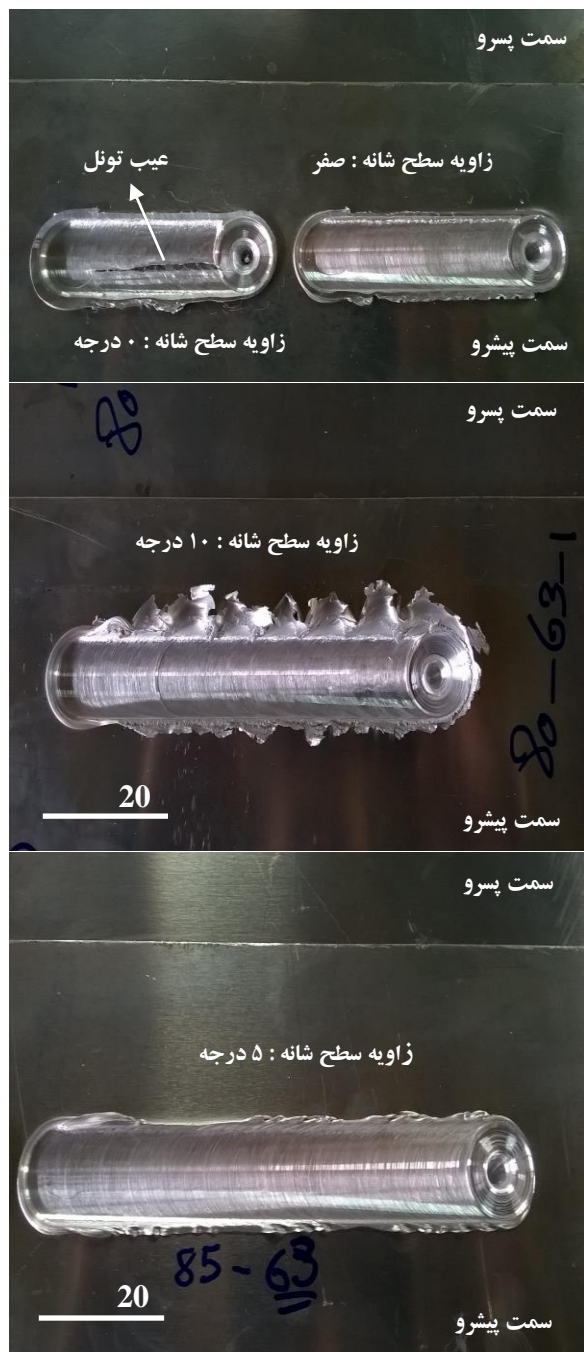


شکل (۲): شمایی از پیکربندی های جوش لبه روی هم اصطکاکی اغتشاشی: (الف): پیکربندی بارگذاری AS و (ب): پیکربندی بارگذاری RS



شکل (۳): شمایی از پین طراحی شده جهت جوشکاری

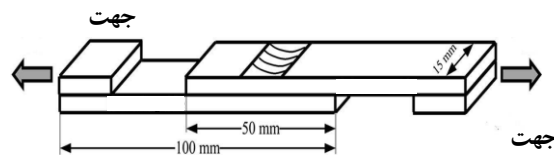
پیوسته در سمت پیشرونده نزدیک دکه جوش ایجاد و در طول مسیر جوشکاری گسترده شد (شکل ۵).



شکل (۵): تصاویر ماکروسکوپی از ظاهر اتصالات جوشکاری شده

گزارش شده است که در زاویه صفر درجه، سطح زیرین شانه می تواند اصطکاک بالا ایجاد کند و مقداری گرمای اضافی که

بعد از جوشکاری، نمونه هایی برای آنالیزهای متالوگرافی و آزمون برشی کششی، از مقطع عرضی و عمود بر جهت جوشکاری آماده شد. مقاطع عرضی نمونه های متالوگرافی با استفاده از خمیر الماس پرداخت شد، با محلول Keller حکاکی شدند و با میکروسکوپ نوری و استریو مشاهده شدند. نمونه های آزمون مستطیلی، بر طبق استاندارد AWS D17.3M:200X، عمود بر جهت جوشکاری بریده شدند. این قطعات، نمونه هایی با عرض ۲۵/۴ میلی متر و طول اتصال کلی تقریباً ۲۵۰ میلی متر را فراهم می کند. برای متعادل کردن محورهای انحراف نمونه های لبه روی هم و حداقل کردن اثرات خمیدگی، دو فاصله انداز با ضخامت مناسب (۵ میلی متر) در طی آزمایش برشی - کششی<sup>۱۰</sup> استفاده شد (شکل ۴).



شکل (۴): شمایی از ابعاد نمونه های آزمون برشی - کششی

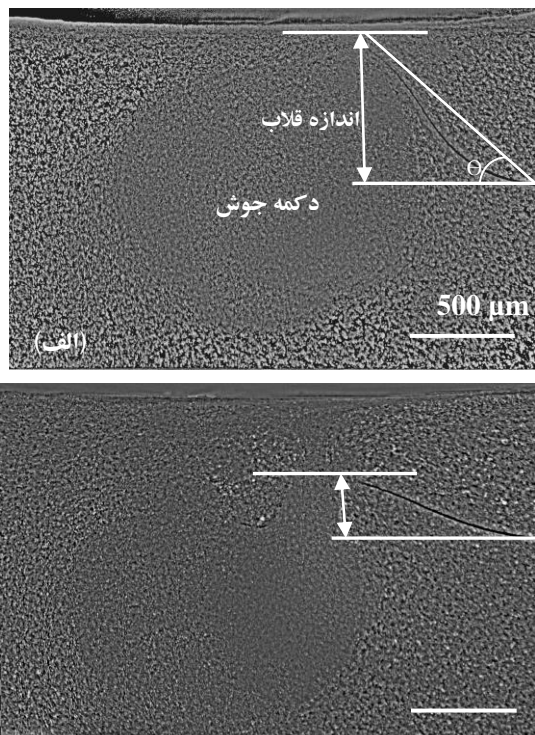
آزمایش برشی - کششی در دستگاه آزمایش Instron-5569 با سرعت ۲mm/min انجام شد. برای هر نمونه آزمون برش کششی، بار شکست و محل شکست ثبت شد. استحکام شکست یک نمونه، با تقسیم بار منجر به شکست بر عرض نمونه (N/mm) تعریف می شود که عموماً در آزمون مکانیکی اتصال جوشکاری لبه روی هم اصطکاکی اغتشاشی به کار می رود [۲۷-۲۵].

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- ظاهر اتصالات جوشکاری شده

تصاویر ماکروسکوپی برای بررسی مشخصات اتصالات بدون عیب در نظر گرفته شد. در این رابطه، بازرسی چشمی برای ارزیابی ظاهر سطحی اتصالات جوشکاری شده انجام شد. مشاهده شد که فقط در زاویه سطح شانه صفر درجه، یک کانال

جدول ۳، میزان اندازه قلاب و ضخامت موثر ورق (EPT) محاسبه شده در زاویه متفاوت سطح شانه را نشان می دهد.



شکل (۷): محل محاسبه اندازه عیب قلاب تولید شده و زاویه قلاب  $\theta$  در زوایای متفاوت سطح شانه: (الف): ۱۰ درجه و (ب): ۵ درجه

جدول (۳): اندازه عیب قلاب تولید شده ، ضخامت موثر ورق و زاویه (شیب) قلاب در زوایای متفاوت سطح شانه: (الف): ۵ درجه و (ب): ۱۰ درجه

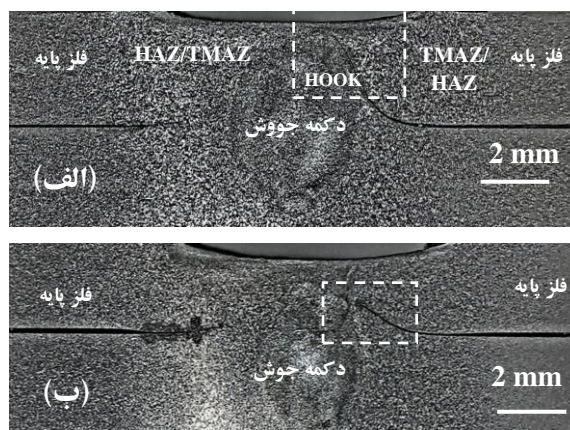
زاویه سطح شانه	اندازه قلاب (mm)	ضخامت موثر ورق (EPT) (mm)	زاویه (شیب) قلاب (درجه)
۵ درجه	۴/۵۰	۲/۲۵	۴۷
۱۰ درجه	۲	۱	۲۵

برای هر مجموعه پارامترهای فرایند، وقتی زاویه سطح شانه از ۵ به ۱۰ درجه افزایش می یابد، اندازه قلاب کاهش می یابد. به علاوه، در شکل ۷، ضخامت موثر ورق، ET (تعریف شده به صورت فاصله بین نقطه ارتفاع میانی قلاب و موقعیت فصل مشترک بین دو صفحه) گزارش می شود. این پارامتر، تاثیر تعیین کننده بر ویژگی های مکانیکی اتصال دارند. در واقع، بالا بودن

نتیجه اصطکاک بین ابزار و مواد در زمان جوشکاری است. این مقدار گرمای اضافی، سیالیت مواد را افزایش می دهد و جریان توربولانس شدیدی را در ناحیه جوش تولید می کند که منجر به احتمال تشکیل حفرات می گردد [۲۸]. بنابراین، به منظور ایجاد اتصالات عاری از عیب با زاویه سطح شانه ۵ و ۱۰ درجه، اثر زاویه سطح شانه روی اندازه قلاب و خواص اتصال در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لبه روی هم آلیاژ آلومینیوم ۵۰۵۲ در این دو زاویه مورد ارزیابی قرار گرفت.

### ۳-۲- تاثیر زاویه سطح شانه بر اندازه قلاب

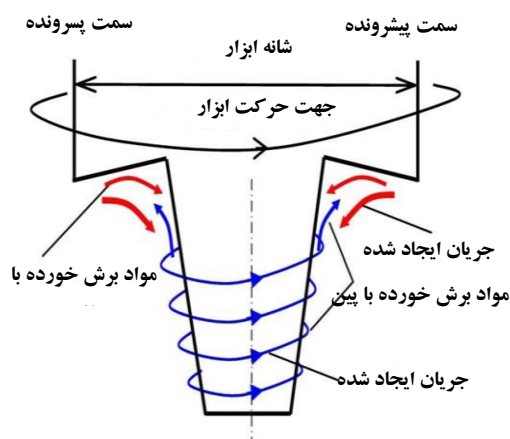
شکل ۶ مقاطع اتصالات لبه روی هم به دست آمده در زوایای متفاوت سطح شانه را نشان می دهد. همانطور که با مشاهدات قبلی مشخص شد، دو نوع عیب جوشکاری در اتصالات لبه روی هم در طی فرآیند FSLW بخاطر جابجایی سطح تماس اولیه ایجاد می گردد، که عیب قلاب و عیب جوش سرد نامیده می شوند، همانطور که در شکل ۶ (الف) مشخص است. مشخصا عیب قلاب نوک تیز ، در تضاد با عیب جوش سرد لبه، میزان بیشتری از ضخامت موثر ورق (EPT) را ایجاد می کند.



شکل (۶): مقاطع عرضی اتصالات لبه روی هم به دست آمده در زوایای متفاوت سطح شانه: (الف): ۵ درجه و (ب): ۱۰ درجه

در مطالعه حاضر، اندازه عیب قلاب به فاصله عمودی از بالای عیب به سطح تماس ارجاع داده می شود (شکل ۷).





شکل (۸): شمایی از الگوی جریان مواد در طی فرآیند FSLW

از این نقطه نظر، تغییرات زاویه سطح شانه می تواند نه تنها بر جریان حاصل از پین بلکه بر جریان حاصل از شانه تاثیر بگذارد. از یک سو، افزایش زاویه سطح شانه به طور متناهی مقدار ماده بریده شده با پین را افزایش می دهد که تاثیر مثبتی بر بهبود جریان بالا رونده ماده برش خورده با پین دارد و بنابراین سائز قلاب را افزایش می دهد. از سوی دیگر، از آنجایی که افزایش در زاویه سطح شانه منجر به افزایش جریان بالا رونده ماده بریده شده با پین در شانه مقعر می شود، سبب بهبود جریان حاصل از شانه می گردد. این کار اندازه عیب قلاب را کاهش می دهد. در نتیجه، اندازه عیب قلاب در AS در واقع با اقدام ترکیبی جریان ایجاد شده از شانه و جریان ایجاد شده از پین تعیین می شود. وقتی زاویه سطح شانه افزایش می یابد، تغییر اندازه قلاب وابسته به الگوی جریان غالب بر جابه جایی سطح تماس است. با افزایش زاویه سطح شانه از ۵ تا ۱۰ درجه، جریان ایجاد شده از شانه بهتر می شود که باعث کاهش اندازه قلاب می گردد. این یعنی ماده برش شده به وسیله پین بیشتری به سطح مقعر شانه اکستروود می شود، در نتیجه جریان ایجاد شده از شانه تقویت شده و تبدیل به الگوی جریان غالب می گردد که بر اندازه قلاب تاثیر گذاشته و در نتیجه کاهش اندازه قلاب مشاهده می شود [۲۹ و ۳۲].

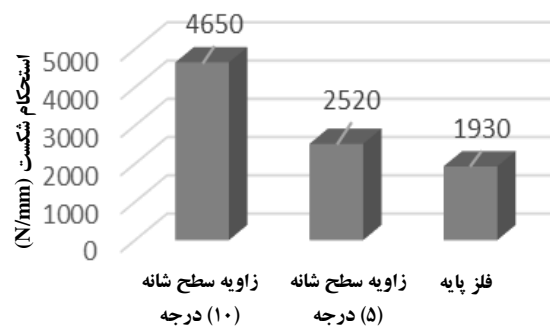
مقدار ET نشان می دهد که عیب قلاب دارای اندازه بیشتر و بنابراین تاثیر منفی بیشتر بر خواص مکانیکی را دارد (شکل ۷). بررسی داده ها در جدول ۳ نشان می دهد که ضخامت موثر (ET) ورق، ثابت نیست و با زاویه سطح شانه بطور قابل ملاحظه ای تغییر می کند، که تائید می کند زاویه سطح شانه بر حرکت یا جابجایی ماده تاثیر می گذارد و تغییر شکل مومسان اعمال شده را افزایش می دهد. بنابراین تغییر ارتفاع قلاب و ضخامت موثر ورق، در نهایت بر استحکام اتصال تاثیر می گذارد. بر طبق شکل ۷، شیب قلاب را می توان به عنوان پارامتر ارزیابی برای کیفیت جوش لب به لب در نظر گرفت. در حقیقت، در طی آزمایش برشی - کششی، زاویه بین محور قلاب و جریان ایجاد شده با بار کششی به کار رفته (شیب قلاب)، تاثیر تعیین کننده ای بر خواص مکانیکی اتصال ایفا می کند [۲۹].

برای درک بهتر نقش جریان ماده بر تشکیل عیب قلاب و تاثیر زاویه سطح شانه بر الگوهای جریان ماده، باید اشاره کرد عیب قلاب، که از جریان عمودی ماده مومسان در طی جوشکاری ایجاد می شود، در حقیقت انحراف از الگوهای جریان ماده نزدیک سطح تماس در طی فرآیند FSLW است. جریان ماده در طی فرآیند FSW ایجاد شده با ابزار جوشکاری را می توان به دو بخش تقسیم کرد که جریان ایجاد شده از شانه<sup>۱۲</sup> و جریان ایجاد شده از پین<sup>۱۳</sup> هستند [۲۹-۳۲] (شکل ۸). در کل، در طی فرآیند FSW، بخش بالایی ماده بین برشی به بخش مقعر شانه اکستروود می شود. این بخش از ماده، همراه با ماده شانه-برشی، اطراف RS با شانه جریان می یابد و حفره عقبی ابزار جوشکاری را پر می کند. این الگوی جریان بسیار مهم است چون بر استحکام استاتیکی اتصال جوش لبه روی هم تاثیر می گذارد [۲۹ و ۳۲].

باقیمانده ماده ای که به وسیله پین برش خورده<sup>۱۴</sup> و نمی تواند به داخل شانه مقعر اکستروود شود تحت جریان گردشی و بالا رونده قرار می گیرد که بخاطر برش رزوه های پین اتفاق می افتد [۳۲] و این الگوی جریان جایگزین جریان مشتق از پین می شود که در شکل ۸ نشان داده شده است.

### ۳-۳- خواص مکانیکی اتصالات لبه روی هم

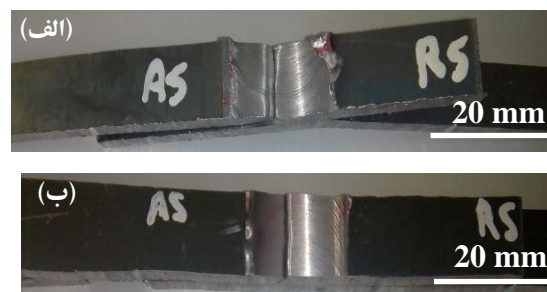
شکل ۹، استحکام شکست اتصالات لبه روی هم در برابر زاویه سطح شانه ابزار جوشکاری را نشان می دهد. برای هر شرایط، حداقل سه نمونه آزمایش شد و نتایج متوسط ارائه گردید.



شکل (۹): اثر زاویه سطح شانه بر استحکام شکست اتصالات جوش لبه روی هم

نتایج نشان می دهد که اتصالات ایجاد شده توسط ابزار با زاویه ۱۰ درجه، استحکام شکست بیشتری در مقایسه با اتصالات دیگر نشان می دهد. این بدین معنی است که وقتی زاویه سطح شانه از ۵ به ۱۰ درجه افزایش می یابد، خواص برشی - کششی اتصالات بهتر می شود. باید اشاره کرد که با افزایش زاویه شانه از ۵ به ۱۰ درجه، استحکام شکست از ۲/۵۲ تا ۴/۸۵ KN/mm تقریباً دو برابر افزایش می یابد.

طبق شکل ۱۰، مشخص است که یک حالت شکست در طی آزمون برشی کششی مشاهده می شود. برای این حالت شکست، ترک در عیب قلاب در سمت پیشرونده اتفاق می افتد و مسیر شکست نهایی تقریباً نزدیک به سطح بالایی جوش است [۳۳].



شکل (۱۰): محل شکست در نمونه های جوشکاری شده در بار گذاری AS: (الف): زاویه سطح شانه ۵ درجه و (ب): زاویه سطح شانه ۱۰ درجه

باید اشاره کرد که وقتی زاویه سطح شانه به ۱۰ درجه افزایش می یابد، تاثیر ترکیبی جریان ایجاد شده از شانه و پین، کوچک ترین اندازه قلاب را نتیجه می شود که بیشترین استحکام شکست اتصالات لبه روی هم را ایجاد می کند. بر اساس نتایج به دست آمده، هندسه قلاب را می توان به عنوان یک پارامتر مهم جهت توصیف مکانیزم شکست در اتصالات جوش لبه روی هم اصطکاکی اغتشاشی در نظر گرفت [۳۱]. در کل، این مورد را می توان به ارتفاع عیوب فصل مشترک در اتصالات نسبت داد، چون حضور عیب قلاب می تواند ضخامت موثر صفحه بالایی را کاهش دهد. عیب قلاب، که بین صفحات همپوشان وجود دارد، پیوند فلزی - ضعیفی را ایجاد می کند و می تواند به عنوان ترک عمل کند، همانطور که قبلاً توسط سایرین پیشنهاد شده است [۳۴-۳۶]. در این راستا می توان عنوان نمود که در ابتدا، در سطوح پایین بارهای اعمالی خارجی، ترک در طول قلاب در جوش منتشر می شود. در سمت پیشرونده، باعث شکست نمی شود، محدود به مرز بین ناحیه متأثر از ترمومکانیکال و دکمه جوش است.

### ۴- نتیجه گیری

بر اساس ارزیابی حاضر، نتایج مهم ذیل بیان می شوند:

۱- اتصال به دست آمده در زاویه سطح شانه ۱۰ درجه، افزایش در خواص برشی - کششی را نشان می دهد و حداکثر بار شکست به ۴/۸۵ KN/mm می رسد.

۲- اندازه عیب قلاب اتصالات لبه روی هم با افزایش زاویه سطح شانه افزایش می یابد. علت اصلی این است که الگوی جریان ماده تاثیرگذار بر اندازه قلاب، با افزایش زاویه سطح شانه، بین جریان ایجاد شده با قلاب و جریان ایجاد شده با پین، تغییر کند.

۳- اتصال لبه روی هم با بیشترین استحکام شکست، کوچک ترین اندازه قلاب و در طی آزمون برشی کششی، شکست از محل عیب قلاب نبوده و در فصل مشترک ورق ها رخ داده است.



فرآیند های نوین در مهندسی مواد ، سال نهم، شماره سوم، صفحات ۲۶۶-۲۵۷، پاییز ۱۳۹۴.

[10] L. Cederqvist & A. P. Reynolds, "Factors Affecting the Properties of Friction Stir Welded Aluminum Lap Joints", *Weld. J. Res. Suppl.*, Vol. 80, pp. 281-287, 2001.

[11] Y. C. Chen & K. Nakata, "Friction Stir Lap Joining Aluminum and Magnesium Alloys", *Scr. Mater.*, Vol. 58, pp. 433-436, 2008.

[12] M. K. Yadava, R. S. Mishra, Y. L. Chen, B. Carlson, & G. J. Grant, "Study of Friction Stir Joining of Thin Aluminium Sheets in Lap Joint Configuration", *Sci. Technol. Welding. Joining.* Vol. 15, pp. 70-75, 2010.

[13] S. Babu, G. D. J. Ram, P. V. Venkitakrishnan, G. M. Reddy & K. P. Rao, "Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded Aluminum Alloy AA2014", *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 28, pp. 414-426, 2012.

[۱۴] ف. غروی، ا. ابراهیم زاده و ع. سهیلی، "ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لبه روی هم جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در سرعت های پیشروی متفاوت"، فصلنامه فرآیند های نوین در مهندسی مواد ، سال دهم، شماره دوم، صفحات ۱۱۵-۱۲۹، تابستان ۱۳۹۵.

[15] G. M. D. Cantin, S. A. David, W. M. Thomas, E. Lara-Curzio & S. S. Babu, "Friction Skew-Stir Welding of Lap Joints in 5083-O Aluminium", *Sci. Technol. Welding. Joining*, Vol. 10, pp. 268-280, 2005.

[16] L. Dubourg, A. Merati & M. Jahazi, "Process Optimization and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welds of 7075-T6 Stringers on 2024-T3 Skin", *Mater. Design*, Vol. 31, pp. 3324-3330, 2010.

[17] G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini & A. Prisco, "Friction Stir Welding of Lap Joints: Influence of Process Parameters on the Metallurgical and Mechanical Properties", *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 519A, pp. 19-26, 2009.

[18] Q. Yang, X. Li, K. Chen & Y. J. Shi, "Effect of Tool Geometry and Process Condition on Static Strength of a Magnesium Friction Stir Lap Linear Weld", *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 528A, pp. 2463-2478, 2011.

۴- اندازه عیب قلاب و ضخامت موثر ورق با زیاد شدن زاویه سطح شانه به ترتیب از ۴/۵ به ۲ و از ۲/۲۵ به ۱ کاهش یافتند در حالی که بالاترین خواص کششی-برشی در زاویه سطح شانه برابر با ۱۰ درجه به ۴۶۵۰ نیوتن بر میلیمتر رسید.

۵- ارتفاع عیب قلاب و ضخامت موثر ورق به عنوان پارامتر های کیفی برای اتصالات جوش لبه روی هم استفاده شد.

## ۵- مراجع

[1] M. R. Johnsen, "Friction Stir Welding Takes off at Boeing", *Weld. J.*, Vol. 78, pp. 35-39, 1999.

[2] D. Joelj, "The Friction Stir Welding Advantage", *Weld. J.*, Vol. 80, pp. 30-34, 2001.

[3] R. S. Mishra & Z. Y. Ma, "Friction Stir Welding and Processing", *Mater. Sci. Eng. Rep.*, Vol. 50, pp. 1-78, 2005.

[4] C. Menzemer & T. S. Srivatsan, "The effect of environment on fatigue crack growth behaviour of Aluminum alloy 5456", *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 271A, pp. 188-195, 1999.

[5] S. W. Lee & J. W. Yeh, "Microstructural Evolution and super plasticity of Al-5.8Mg-0.23Mn alloys processed by reciprocating extrusion", *Metall. Mater. Trans.*, Vol. 36A, pp. 2225-2234, 2005.

[6] W. P. Schonberg, "Aluminum 2219-T87 and 5456-H116: A comparative study of spacecraft walls materials in dual-wall structures under hypervelocity", *Acta Astronautica*, Vol. 26, pp. 799-812, 1992.

[7] M. Ericsson, L. Z. Jin & R. Sandstrom, "Fatigue properties of friction stir overlap welds", *Int J Fatigue*, Vol. 29, pp. 57-69, 2007.

[8] G. F. Zhang, W. Su, J. Zhang, Z. X. Wei & J. X. Zhang, "Effects of shoulder on interfacial bonding during friction stir lap welding of aluminium thin sheets using tool without pin", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol. 20, pp. 2223-2228, 2010.

[۹] م. صادقی گوغری، م. کتیری و ک. امینی، "بررسی نسبت سرعت دوران به پیشروی ابزار در جوشکاری هم‌زن اصطکاکی اتصال غیر هم‌جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به تیتانیوم خالص تجاری"، فصلنامه

- welding”, Arch. Metal. Mat., Vol. 58, pp. 595-599, 2013.
- [29] M. Wang, H. Zhang, X. Zhang & J. Zhang, “Effect of Pin Length on Hook Size and Joint Properties in Friction Stir Lap Welding of 7B04 Aluminum Alloy”, JMEPEG, Vol. 23, pp. 1881–1886, 2014.
- [30] K. Kumar & S. V. Kailas, “The Role of Friction Stir Welding Tool on Material Flow and Weld Formation”, Mater. Sci. Eng, Vol. 485A, pp. 367–374, 2008.
- [31] H. J. Zhang & H. J. Liu, “Characteristics and Formation Mechanisms of Welding Defects in Underwater Friction Stir Welded Aluminum Alloy”, Metallo. Microstructure. Anal, Vol. 1, pp. 269–281, 2012.
- [32] H. Liu, Y. Zhao, Y. Hu & SH. Chen, “Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir lap welding of AL clad 7B04-T74 aluminium alloy”, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 78, pp. 1415-1425, 2015.
- [33] L. Dubourg, A. Merati & M. Jahazi, “Process Optimization and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welds of 7075-T6 Stringers on 2024-T3 Skin”, Materials and Design, Vol. 31, No. 7, pp. 3324-30, 2010.
- [34] S. K. Chionopoulos, C. H. I. Sarafoglou, D. I. Pantelis & V. J. Papazoglou, “Effect of tool pin and welding parameters on friction stir welded (FSW) marine aluminium alloys”, Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), Chalkidiki, Greece, 2008.
- [35] H. Badarinarayan, Y. Shi, X. Li & K. Okamoto, “Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminium 5754-O sheets”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 49, pp. 814-23, 2009.
- [36] X. Cao & M. Jahazi, “Effect of tool rotational speed and probe length on lap joint quality of a friction stir welded magnesium alloy”, Materials and Design, Vol. 32, pp. 1-11, 2011.
- [19] S. Yazdaniyan, Z. W. Chen & G. Littlefair, “Effects of Friction Stir Lap Welding Parameters on Weld Features on Advancing Side and Fracture Strength of AA6060-T5 Welds”, J. Mater. Sci., Vol. 47, pp. 1251–1261, 2012.
- [20] X. Cao & M. Jahazi, “Effect of Tool Rotational Speed and Probe Length on Lap Joint Quality of a Friction Stir Welded Magnesium Alloy”, Mater. Design, Vol. 32, pp. 1–11, 2011.
- [21] H. Liu, Y. Hu, Y. Peng, C. Dou & Z. Wang, “the effect of interface defect on mechanical properties and its formation mechanism in friction stir lap welded joints of aluminum alloys”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 238, pp. 244–254, 2016.
- [22] H. Zhang, M. Wang, X. Zhang, Z. Zhu & T. Yu, “Effect of welding speed on defect features and mechanical performance of friction stir lap welded 7B04 aluminium alloy”, Metal, Vol. 6, pp. 1-11, 2016.
- [23] D. A. Burford, B. M. Tweedy & C. A. Widener, “Influence of Shoulder Configuration and Geometric Features on FSW Track Properties”, 6<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, Saint-Sauveur, Nr Montréal, Canada, October 10-13, 2006.
- [24] L. Cederqvist & A. P. Reynolds, “Factors Affecting the Properties of Friction Stir Welded Aluminum Lap Joints”, Weld. J. Res. Suppl., Vol. 80, pp. 281–287, 2001.
- [25] G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini & A. Prisco, “Friction Stir Welding of Lap Joints: Influence of Process Parameters on the Metallurgical and Mechanical Properties”, Mater. Sci. Eng, Vol. 519A, pp. 19–26, 2009.
- [26] C. Y. Lee, W. B. Lee, J. W. Kim, D. H. Choi, Y. M. Yeon & S. B. Jung, “Lap Joint Properties of FSWed Dissimilar Formed 5052 Al and 6061 Al Alloys with Different Thickness”, J. Mater. Sci., Vol. 43, pp. 3296–3304, 2008.
- [27] V. Soundararajan, E. Yarrapareddy & R. Kovacevic, “Investigation of the Friction Stir Welding of Aluminum Alloys AA 5182 and AA 6022”, JMEPEG, Vol. 16, pp. 477–484, 2007.
- [28] P. Lacki, Z. Kucharczyk & R. E. Sliwa, “Effect of tool shape on temperature field in friction stir spot

#### ۶- بی نوشت ها

[1] Friction stir welding

[2] Lap Joints

- [3] Friction Stir Lap Welding
- [4] Advancing Side
- [5] Hook Defect
- [6] Retreating Side
- [7] Cold Lap Defect
- [8] Angle of Shoulder Surface
- [9] Effective Plate Thickness
- [10] Tensile-Shear Test
- [11] Hook Slope
- [12] Shoulder Driven Flow
- [13] Pin Driven Flow
- [14] Pin-Sheared Materials