



بررسی تجربی میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم به مس

علی مهدیانی خطبه سرا¹، محمد جعفر حداد^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک - ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 515-14395، mjhadad@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 1 خرداد 1401

داوری اولیه: 18 خرداد 1401

پذیرش: 7 تیر 1401

کلیدواژگان:

میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

ریزسختی

مقاومت کششی

ترکیبات بین فلزی

هدف از پژوهش حاضر امکان سنجی تولید اتصالات مستحکم و بدون عیب بین ورق‌های آلومینیوم 1050 و مس خالص به روش میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به کمک ابزارهای عادی و جدید می‌باشد. با تحلیل نتایج حاصل از آزمون کشش و تحلیل سیگنال به نویز، میانگین بیشینه مقاومت کششی نهایی اتصالات مقدار 88 MPa گزارش شده است که به هنگام استفاده پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و آفست ابزار با سطوح به ترتیب 2400 rpm، 40 mm/min و 0/25 mm بدست آمده است. همچنین نتایج تحلیل واریانس مشخص کرد که به ترتیب پارامترهای سرعت دورانی و سرعت پیشروی، بیشترین میزان اثرگذاری روی مقاومت کششی اتصالات را عهده‌دار بوده‌اند. مقادیر بیشینه و کمینه ناشی از آزمون ریزسختی سنجی نیز به ترتیب برای ناحیه مرکزی جوش و منطقه متأثر از حرارت آلومینیوم ثبت شده است که برابر با 192 HV و 21 HV می‌باشند. نتایج آزمون پراش اشعه ایکس روی نمونه‌های بهینه وجود ترکیبات بین فلزی Cu_9Al_4 و CuAl_2 در منطقه جوشکاری را نشان داد. مقاومت کششی اتصالات ایجاد شده به شدت تابع میزان تشکیل این ترکیبات بین فلزی می‌باشد.

Experimental Investigation on Micro Friction Stir Welding of Al-Cu

Ali Mahdianikhotbesara, Mohammadjafar Hadad*

Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*P.O.B. 14395-515 Tehran, Iran, mjhadad@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 22 May 2022

First Decision: 8 June 2022

Accepted: 28 June 2022

Keywords:

Micro friction stir welding

Microhardness

Tensile strength

Intermetallic compounds

Abstract

The present study investigated the feasibility of producing strong and defect-free joints between 1050 aluminum and pure copper sheets by micro friction stir welding using ordinary and new tools. By analyzing the results of the tensile test and signal to noise analysis, the average maximum ultimate tensile strength of the joints is reported to be 88 MPa, when using the parameters of rotational speed, traverse speed, and offset of the tool with levels of 2400 rpm, 40 mm/min and 0.25 mm. The variance analysis also showed that the parameters of rotational speed and traverse speed had the most significant effect on the joints' tensile strength. The maximum and minimum values obtained from the microhardness test were recorded for the weld nugget zone and the heat-affected aluminum zone, respectively, equal to 192 HV and 21 HV. The X-ray diffraction test results on optimal samples showed intermetallic compounds such as CuAl_2 and Cu_9Al_4 in the welding area. The tensile strength of the joints created is strongly dependent on the formation of these intermetallic compounds.

1- مقدمه

اصطکاکی اغتشاشی به منظور اتصال مواد با ضخامت کمتر از 1000 میکرومتر (1 میلی‌متر) می‌باشد. تمامی مسائل مربوط به جنس قطعات، عیوب جوش، ابزار مورد استفاده و ... در میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیز باید در نظر گرفته شوند.

جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم به روش ذوبی همواره با مشکلات زیادی روبه‌رو بوده است. جوشکاری به همراه گاز محافظ خنثی و جوشکاری قوس تنگستن با پوشش گاز محافظ از جمله فرایندهایی هستند که در صنعت اغلب برای اتصال آلیاژهای آلومینیوم عملیات حرارتی پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرند، هرچند که در این نوع اتصالات عیوبی نظیر تخلخل،

فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی¹ یک روش اتصال مواد در حالت جامد است که برای اتصال مواد اعم از هم‌جنس و غیر هم‌جنس بکار می‌رود. این فرایند پنجره‌ای را برای بهبود اتصالاتی که با روش‌های معمول جوشکاری امکان ایجاد اتصال مطلوب ندارند، باز کرده است که می‌تواند برای اتصال مواد با خواص فیزیکی مختلف که در صنایع گوناگون نیاز فراوانی به آن‌ها می‌باشد، بکار رود [1، 2]. فرایند میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در واقع بسطی از فرایند جوشکاری

¹ Friction Stir Welding (FSW)

ذوب ناقص (به دلیل وجود لایه‌های اکسیدی)، نفوذ ناقص، ترک، ناخالصی و ... وجود دارند. استفاده از سایر روش‌های معمول جوشکاری و یا حتی روش‌های پیشرفته‌ای مانند جوش لیزر برای ایجاد اتصال بین ورق‌های آلومینیوم و مس به دلیل ایجاد ترکیبات بین فلزی زیاد در ناحیه جوشکاری شده توصیه نمی‌شود [3]. این ترکیبات بین فلزی بسیار سخت و شکننده می‌باشند که به شدت منجر به افت کیفیت منطقه جوشکاری می‌شوند و استفاده از این اتصالات در صنایع مختلف را با خطر مواجه می‌سازد. در پژوهش حاضر تمامی چالش‌هایی که در جوشکاری ورق‌های نازک آلومینیوم 1050 و مس خالص با ضخامت 0/8 میلی‌متر به روش اصطکاکی اغتشاشی با آن مواجه هستیم را بررسی خواهیم کرد و به کمک دو نوع ابزار پین‌دار و فاقد پین امکان سنجی ایجاد جوش انجام خواهد پذیرفت.

در طول فرایند جوشکاری فازهای مختلفی با ترکیب شدن مواد مختلف به دلیل حرارت ورودی بالا و نیز جریان مواد پایه و تحت فشار بودن آن‌ها شکل می‌گیرد. این فازها در اصطلاح همان ترکیبات بین فلزی نامیده می‌شوند. این ترکیبات در جوشکاری آلومینیوم و مس با روش‌های جدید از قبیل اصطکاکی اغتشاشی یا انفجاری نیز تشکیل می‌شوند. از رایج‌ترین ترکیبات بین فلزی در جوشکاری آلومینیوم و مس می‌توان به CuAl_2 و Cu_6Al_4 اشاره کرد [4]. این ترکیبات بین فلزی بسیار ترد می‌باشند و برای دستیابی به یک اتصال خوب بین آلومینیوم و مس در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باید از تشکیل بیش از حد این ترکیبات جلوگیری به عمل آید [5]. تا حد امکان این ترکیبات باید نازک و یکنواخت و به صورت یک لایه پیوسته باشد [6]. فرمول شیمیایی فازهای مختلف آلومینیوم و مس در جدول 1 گزارش شده است.

جدول 1 فرمول شیمیایی ترکیبات بین فلزی

ترکیب شیمیایی	فاز
Cu_6Al_4	γ_1
Cu_3Al_2	δ
CuAl	η_1 & η_2
Cu_4Al_3	ζ_1 & ζ_2
CuAl_2	θ

1-1- مروری بر مطالعات انجام شده

رودریگز و همکاران [7] در تحقیقات خود به بررسی تأثیر پارامترهای فرایند میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات آلومینیومی به ضخامت 1

2-1- ابزارهای طراحی شده

برای انجام فرایند میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در پژوهش حاضر از دو نوع هندسه ابزار عادی (پین‌دار) و جدید (بدون پین) استفاده شده است. در تعیین ابزار مورد استفاده برای جوشکاری انواع ورق در فرایند میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی همواره نکات متعددی مطرح می‌باشد که با توجه به ضخامت قطعات و جنس آن‌ها لازم است مورد توجه قرار گیرند. قطر شانه ابزار عموماً به صورت سعی و خطا و با توجه به میزان گرمای مورد نیاز برای هرچه بهتر انجام شدن عملیات جوشکاری تعیین می‌شود. همچنین می‌توان با انجام آزمایش‌های تجربی مقدماتی و استفاده از منابع موجود در این زمینه از هدر رفت زمان و هزینه جلوگیری کرد و به یک مقدار بهینه برای قطر شانه ابزار دست یافت. میزان گرمای ورودی و نرم شدن و جریان یافتن مواد در منطقه جوشکاری به شدت تابع قطر شانه ابزار می‌باشد که یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی هندسه ابزار می‌باشد.

در تحقیق پیش‌رو با انجام آزمایش‌های مقدماتی و بررسی چشمی کیفیت اتصالات انجام شده، برای انجام آزمایش‌های نهایی قطر شانه 14 میلی‌متر برای ابزار پین‌دار و قطر شانه 10 میلی‌متر برای ابزار بدون پین در نظر گرفته شده است. همچنین برای ابزار پین‌دار از پین با هندسه استوانه‌ای و قطر 2 میلی‌متر استفاده شده است. عمق نفوذ ابزار یکی از مهم‌ترین پارامترهای وابسته به طول پین ابزار می‌باشد که بایستی به دقت کنترل شود. بنابراین لازم است مقدار طول پین به دقت تعیین شود. پس از انجام آزمایش‌های مقدماتی و مشاهدات چشمی کیفیت جوش‌های حاصل، از پین به طول 0/6 میلی‌متر برای انجام آزمایش‌های نهایی استفاده شده است. برای ابزار بدون پین نیز به منظور جلوگیری از افزایش نیروها و تغییر شکل‌های بزرگ در منطقه جوشکاری از یک ابزار مخروطی با زاویه 20 درجه نسبت به محور ابزار استفاده شده است. هندسه ابزارهای مورد استفاده برای انجام آزمایش‌های موردنظر در شکل 1 نشان داده شده است.

2-2- خواص مواد اولیه

به منظور اینکه بتوان ارزیابی خوبی از میزان استحکام کششی اتصالات نهایی داشت لازم است در ابتدا استحکام کششی هر یک از مواد پایه به طور جداگانه مورد بررسی قرار گیرد. نمونه برداری از مواد پایه و اتصالات بر اساس استاندارد ASTM¹ E8 انجام شده است که ابعاد نمونه‌ها در شکل 2 قابل مشاهده می‌باشد.

کلی ضعیف و وابسته به دما و نرخ کرنش می‌باشد. بر اساس هدف این تحقیق آزمایش‌های کشش در دماهای بالا به منظور بررسی قابلیت تغییر شکل این اتصالات در فرایندهایی مانند کشش عمیق و یا فرایندهای مشابه صورت پذیرفت.

در پژوهشی که توسط لیو و همکاران [12] تحت عنوان شکل ظاهری و خواص مکانیکی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم و مس انجام شد، نشان داده شد که خواص متفاوت فلز پایه و جوش ایجاد شده می‌تواند منجر به تولید تنش‌های پسماند در مناطق متأثر از حرارت و مناطق مجاور جوش گردد. این تنش‌ها موجب ایجاد خستگی در جوش گردیده که در نهایت ایجاد و گسترش ترک‌ها و تخریب اتصال را در پی خواهد داشت. از آن‌جا که خواص گوناگون فلز با دما تغییر می‌کند، پیش‌بینی رفتار اتصالات غیر هم‌جنس در شرایط کاربردی با محاسبات ریاضی مشکل است. در این شرایط، فقط آزمایش‌های تجربی می‌توانند بیانگر عمر اتصالات باشند. بامجی و همکاران [13] در پژوهشی تحت عنوان جوشکاری اصطکاکی خطی آلومینیوم به مس موفق به اتصال آلومینیوم 1050 به مس با استفاده از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شدند. آن‌ها فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را روشی مناسب برای اتصال فلزات غیر هم‌جنس معرفی کردند، به گونه‌ای که اتصالات بدست آمده خواص الکتریکی و مکانیکی بسیار خوبی را از خود نشان می‌دهند.

2- مواد و روش‌ها

هدف از انجام پژوهش حاضر ایجاد اتصالات لب‌به‌لب بین ورق‌های آلومینیوم 1050 H14 و مس خالص 99/99% به ضخامت 0/8 میلی‌متر و طول و عرض به ترتیب 130 و 50 میلی‌متر به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد. همچنین به بررسی تأثیر پارامترهای درگیر در فرایند بر روی استحکام و ریزساختار اتصالات پرداخته شده است. پارامترهای مختلفی از قبیل سرعت‌های دورانی و پیشروی، زاویه انحراف ابزار، زمان تاخیر، آفست پین ابزار، هندسه ابزار و ... بر روی کیفیت اتصالات حاصل از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تأثیرگذار است که در این پژوهش تمرکز بیشتر بر روی سرعت‌های دورانی و پیشروی و هندسه‌های مختلف ابزار بوده است. در ادامه به جزئیات بهینه‌سازی پارامترهای فرایند میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای ایجاد اتصالات مطلوب بین آلومینیوم 1050 و مس خالص پرداخته شده است.

¹ American Society for Testing and Materials

2-3- طراحی آزمایش

در پژوهش حاضر پارامترهای سرعت دورانی و پیشروی و نیز آفست ابزار (به سمت آلومینیوم) به عنوان اصلی ترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت اتصالات آلومینیوم-مس مورد بررسی قرار گرفته اند. با توجه به تعداد زیاد حالات ممکن آزمایش ها و به منظور صرفه جویی در زمان و هزینه از روش تاگوچی برای طراحی آزمایش ها استفاده شده است. همچنین به منظور تحلیل آماری نتایج و ایجاد جدول طراحی آزمایش از نرم افزار مینی تب استفاده شده است. ماتریس طراحی آزمایش برای ابزار پین دار در جدول 4 قابل مشاهده می باشد.

جدول 3 میکروسختی ویکرز مواد پایه

ماده	میکروسختی
Al 1050	41/2±6/1
Cu	78/2±3/9

جدول 4 ماتریس طراحی آزمایش برای ابزار پین دار

آزمایش	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	آفست پین ابزار (mm)
1	1600	20	0
2	1600	40	0/25
3	1600	60	0/5
4	2000	20	0/25
5	2000	40	0/5
6	2000	60	0
7	2400	20	0/5
8	2400	40	0
9	2400	60	0/25

با توجه به اهمیت میزان نفوذ ابزار در فرایند میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار بدون پین، در این دسته از آزمایش ها علاوه بر پارامترهای سرعت دورانی و پیشروی و آفست ابزار، میزان نفوذ ابزار در ناحیه جوشکاری نیز به عنوان یکی از پارامترهای اصلی فرایند در نظر گرفته شده است. ماتریس طراحی آزمایش برای ابزار بدون پین نیز در جدول 5 قابل مشاهده می باشد.

3- بحث و نتایج

3-1- مقدمه

در این بخش به ارائه کلیه نتایج حاصل از آزمایش های تجربی

همچنین مقاومت کششی و درصد افزایش طول هر یک از مواد پایه در جدول 2 گزارش شده است. برای بالا بردن دقت نتایج حاصل از آزمون کشش برای هر نمونه سه آزمون انجام و مقدار میانگین آن ها گزارش شده است. کلیه نمونه برداری ها در جهت عرضی مواد پایه انجام شده است.

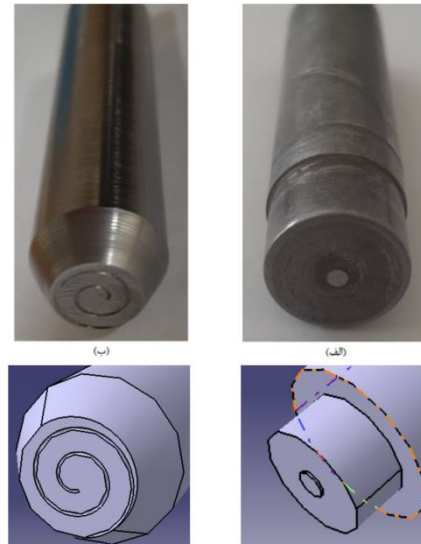


Fig. 1 Tools used for experiments: (a) pinned tool; (b) pinless tool

شکل 1 ابزارهای مورد استفاده برای انجام آزمایش های تجربی (الف) ابزار پین دار، (ب) ابزار بدون پین

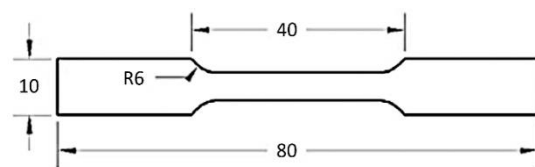


Fig. 2 Dimensions of the tensile test specimen (mm)

شکل 2 ابعاد نمونه آزمون کشش (میلی متر)

جدول 2 خواص مکانیکی مواد پایه

Cu	Al 1050	خواص مکانیکی
215	112	مقاومت کششی نهایی (MPa)
28	11	درصد افزایش طول (%)

سختی سطح مقطع مواد پایه با استفاده از روش میکروسختی ویکرز بررسی شدند. سختی ویکرز با میزان نفوذ ماده تست کننده با نیروی مشخص که به شکل هرمی می باشد در ماده تست شونده اندازه گیری می شود. برای بالا بردن دقت و صحت در این آزمون، سختی نقاط مختلفی از ماده مورد نظر در فواصل معین اندازه گیری شده که میانگین آن ها در جدول 3 گزارش شده است.

بوده است از نوع تحلیل "هرچه بزرگتر بهتر" بهره گرفته شده است.

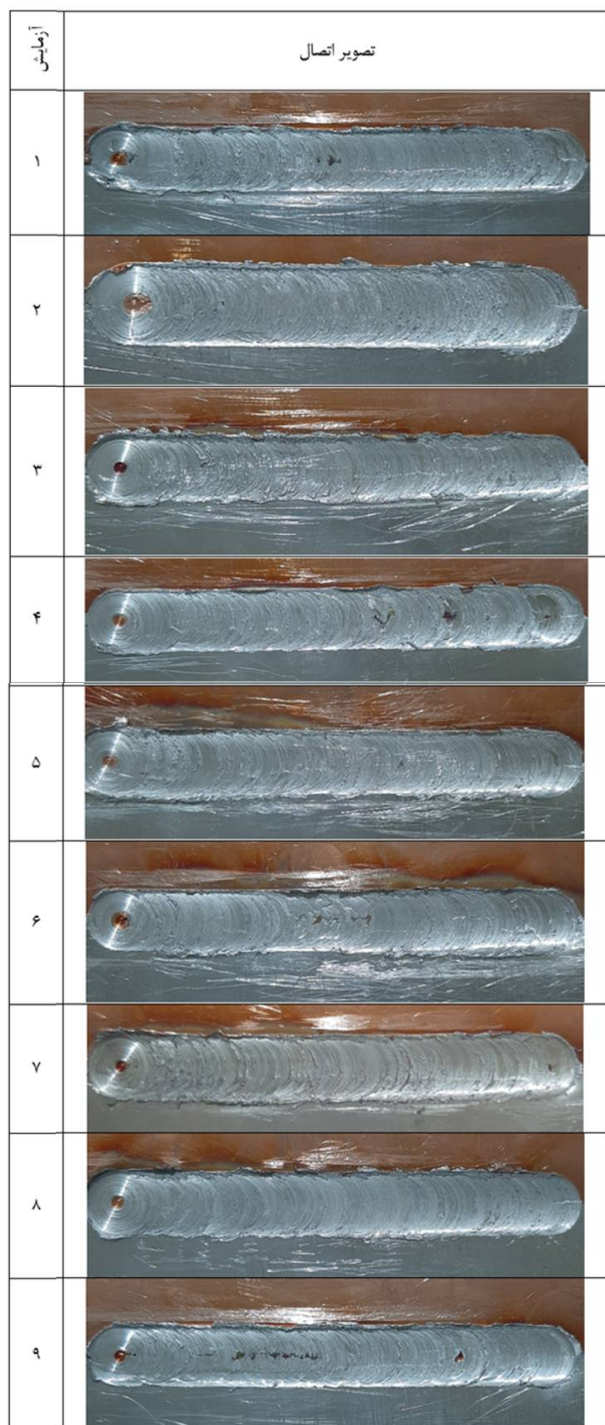


Fig. 3 joints created with the pinned tool

شکل 3 اتصالات ایجاد شده با ابزار پین دار

به منظور افزایش دقت محاسبات، برای هر نمونه دو آزمون کشش انجام شده و میانگین آن‌ها گزارش شده است. بعد از انجام آزمون‌های کششی روی کلیه نمونه‌ها و بدست آوردن

پرداخته شده است. در ابتدا به بررسی ویژگی‌های سطحی اتصالات و بررسی عملکرد طراحی آزمایش انجام شده و نیز تحلیل واریانس آزمایش‌ها پرداخته شده است و پس از بدست آوردن بهترین سطوح هریک از پارامترها برای ایجاد بهترین اتصال ممکن، کلیه آزمون‌های مکانیکی بر روی اتصالات بهینه انجام شده است. همچنین مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از شبیه سازی فرایند و کار تجربی انجام شده و در انتها به بررسی مباحث متالورژیکی درگیر در فرایند پرداخته شده است.

3-2- اتصالات ایجاد شده با ابزار پین دار

در این قسمت پس از بررسی ویژگی‌های سطحی اتصالات ایجاد شده با ابزار پین دار به تحلیل سیگنال به نویز و واریانس آن‌ها و همچنین محاسبه حالت بهینه جوشکاری پرداخته شده است.

3-2-1- ویژگی‌های سطحی

در ابتدا به بررسی سطح ظاهری اتصالات ایجاد شده از نه آزمایش طراحی شده برای ابزار پین دار پرداخته شده است. کلیه این اتصالات از سطح ظاهری نسبتاً خوبی برخوردار بودند که تصاویر هریک از آن‌ها در شکل 3 قابل مشاهده می‌باشد.

جدول 5 ماتریس طراحی آزمایش برای ابزار بدون پین

Table 5 Design of experiments matrix for pinless tool

آزمایش	پارامتر		
	سرعت دورانی (rpm)	سرعت پیشروی (mm/min)	آفست ابزار (mm)
1	1600	20	0
2	1600	40	0/25
3	1600	60	0/75
4	2000	20	0/75
5	2000	40	0/25
6	2000	60	0/5
7	2400	20	0/5
8	2400	40	0/75
9	2400	60	0/25

3-2-2- نسبت سیگنال به نویز

با توجه به اهمیت مقاومت کششی اتصالات ناشی از فرایندهای جوشکاری، این مولفه به عنوان تابع هدف برای بررسی پارامترهای درگیر در فرایند انتخاب شده است. با توجه به ایده آل آزمایش‌ها که دستیابی به اتصالات با حداکثر مقاومت کششی

همچنین در شکل 6 نمودار سیگنال به نویز هر یک از پارامترها برای مقاومت کششی نشان داده شده است که در ادامه به تحلیل هر یک از آنها پرداخته شده است.

با توجه به نمودارهای نشان داده شده می توان دریافت هر یک از پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و آفست بین تأثیرات متفاوتی بر روی کیفیت اتصالات داشته اند، به گونه ای که به طور کلی با افزایش سرعت دورانی خواص اتصالات بهبود یافته و همچنین برای سرعت پیشروی و آفست بین مقدار بهینه ای وجود دارد که برای مقادیر بالاتر از آنها انتظار کاهش کیفیت اتصالات را می توان داشت. در ادامه به بررسی دقیق تر نمودارهای سیگنال به نویز استخراج شده و تأثیرگذاری هر یک از پارامترها بر روی استحکام اتصالات پرداخته شده است.

3-2-3- تحلیل واریانس

تحلیل واریانس برای نتایج بدست آمده از آزمون کشش بر اساس مقادیر سیگنال به نویز در جدول 7 گزارش شده است. مقادیر F در این جدول نشان دهنده میزان تأثیرگذاری هر پارامتر روی نتایج کسب شده از آزمون کشش می باشد. هنگامی که مقدار F برای یک متغیر زیاد باشد بدین معنا می باشد که اعمال کوچک ترین تغییر در آن پارامتر می تواند اثرات قابل توجهی روی نتایج مورد نظر داشته باشد.

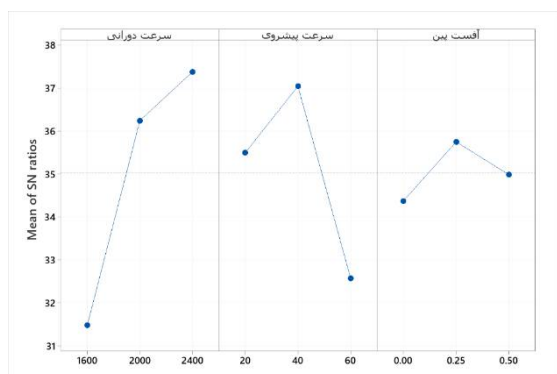


Fig. 6 Diagram of signal to noise ratio of each parameter for tensile strength

شکل 6 نمودار سیگنال به نویز هر یک از پارامترها برای مقاومت کششی

جدول 7 تحلیل واریانس مقاومت کششی برای مقادیر سیگنال به نویز

Table 7 ANOVA for ultimate tensile strength based on signal to noise values

پارامتر	درجات آزادی	نسبت F	درصد توزیع
سرعت دورانی	2	1919/26	63/44
سرعت پیشروی	2	1011/94	33/45
آفست بین	2	93/27	3/08
خطا	2	-	0/03
جمع کل	8	-	100

نتایج، به بررسی نقش هر یک از پارامترهای درگیر در فرایند پرداخته شده است. نحوه نمونه برداری از اتصالات برای انجام آزمون های کشش و بررسی های متالورژیکی در شکل 4 نشان داده شده است.

نتایج حاصل از آزمون کشش در جدول 6 گزارش شده است و تصویر نمونه آزمون کشش پس از شکست در شکل 5 نشان داده شده است که شکست نمونه ها عمدتاً از محل خط اتصال دو ماده رخ داده است.

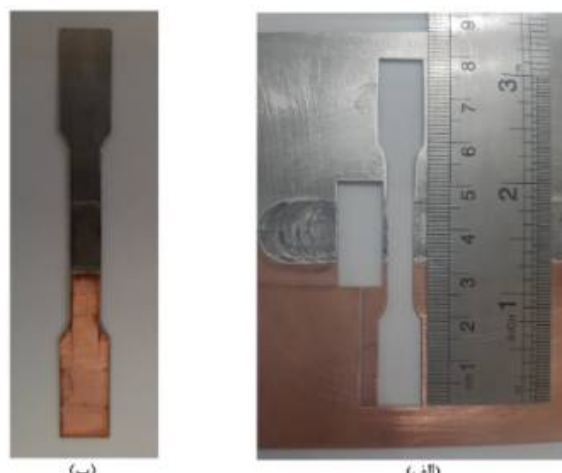


Fig. 4 a) Sampling of joints, b) Tensile test specimen

شکل 4 الف) نمونه برداری از اتصالات، ب) نمونه آزمون کشش

جدول 6 مقاومت کششی و محل شکست اتصالات با ابزار بین دار

Table 6 Ultimate tensile strength and failure location of joints created with the pinned tool

آزمایش	مقاومت کششی نهایی (MPa)	محل شکست نمونه کشش
1	37	خط اتصال
2	51	خط اتصال
3	28	خط اتصال
4	74	HAZ آلومینیوم
5	82	خط اتصال
6	45	خط اتصال
7	77	HAZ آلومینیوم
8	86	خط اتصال
9	61	خط اتصال



Fig. 5 Tensile test sample after failure

شکل 5 نمونه کشش پس از شکست از خط اتصال

منظور بررسی دقت تخمین صورت گرفته با حالت واقعی، سه اتصال یکسان با سطوح بهینه هریک از پارامترها ایجاد شد و برای اندازه گیری مقاومت کششی این اتصالات سه نمونه آزمون کشش بر روی آن‌ها انجام شد که میانگین مقاومت کششی این سه نمونه 88 MPa گزارش شده است که نزدیک بودن مقدار تخمینی با حالت واقعی نشان دهنده دقت بالای استفاده از روش تاگوچی در طراحی آزمایش‌های این پژوهش می‌باشد. نمونه‌ای از اتصالات ایجاد شده با پارامترهای بهینه حاصل از تحلیل سیگنال به نویز در شکل 8 نشان داده شده است.

3-4- اتصالات ایجاد شده با ابزار بدون پین

نکته قابل توجه در این دسته از آزمایش‌ها عدم دستیابی به اتصالات با کیفیت برای عمق‌های نفوذ 0/25 و 0/75 میلی‌متر می‌باشد. همانطور که در شکل 9 مشخص است در آزمایش‌های 1، 5 و 9 به دلیل عدم عمق نفوذ کافی اتصالات مناسبی ایجاد نشده است و سطح جوش پر از عیوب مختلفی چون ایجاد حفره‌های فراوان و عدم اختلاط کافی بین آلومینیوم و مس می‌باشد. همچنین در آزمایش‌های 3، 4 و 8 به دلیل افزایش بیش از حد نفوذ ابزار در منطقه جوشکاری، سوراخ‌ها و عیوبی در برخی مناطق ایجاد شده است.



Fig. 8 An example of optimal joints

شکل 8 نمونه‌ای از اتصال بهینه ایجاد شده



Fig. 9 Defective joints made with pinless tools

شکل 9 اتصالات معیوب ایجاد شده با ابزار بدون پین

به دلیل عدم دستیابی به اتصالات با کیفیت در این شش آزمایش هیچگونه آزمونی روی آن‌ها انجام نشده است و تنها برای نمونه‌های حاصل از آزمایش‌های 2، 6 و 7 که در شکل 10 نشان داده شده است آزمون مقاومت کششی انجام شده است که نتایج آن در جدول 8 گزارش شده است.

با توجه به مقادیر F می‌توان دریافت که به ترتیب پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و آفست پین بیشترین سهم تأثیرگذاری را روی مقاومت کششی اتصالات دارا می‌باشند. همچنین برای درک هرچه بهتر، نمودار سهم تأثیرگذاری هریک از پارامترها بر روی مقاومت کششی اتصالات در شکل 7 نشان داده شده است که همانطور که در نمودار مشخص است پارامتر آفست پین تأثیر جزئی در ارزیابی انجام شده دارد.

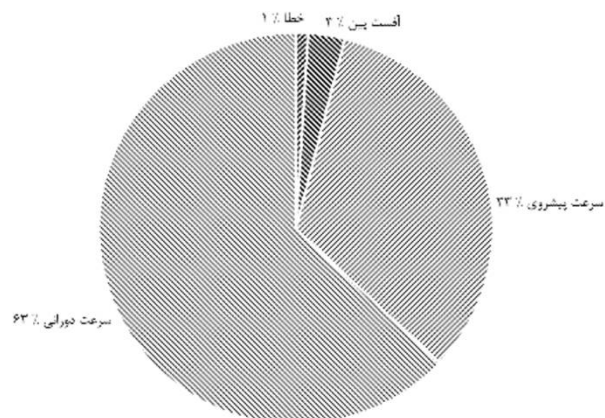


Fig. 7 The contribution of each parameter to the tensile strength of the joints

شکل 7 سهم تأثیرگذاری هر پارامتر بر روی مقاومت کششی اتصالات

3-3- محاسبه حالت بهینه

به کمک نتایج حاصل از تحلیل واریانس و میزان تأثیرگذاری هریک از پارامترها روی مقاومت کششی اتصالات و استفاده از سطوح بهینه بدست آمده از نمودارهای سیگنال به نویز می‌توان بیشترین مقدار مقاومت کششی ممکن را پیش‌بینی کرد. با توجه به مقادیر سیگنال به نویز بدست آمده مقادیر بهینه برای هریک از پارامترهای سرعت دورانی و پیشروی و آفست پین به ترتیب برابر 2400 rpm، 40 mm/min و 0/25 mm می‌باشد. برای تخمین مقدار مقاومت کششی بهینه از رابطه (1) استفاده شده است:

$$TS = \bar{A}3 + \bar{B}2 + \bar{C}2 - 2T \quad (1)$$

که در آن $\bar{A}3$ میانگین مقاومت کششی به ازای سطح سوم سرعت دورانی، $\bar{B}2$ میانگین مقاومت کششی به ازای سطح دوم سرعت پیشروی و $\bar{C}2$ میانگین مقاومت کششی به ازای سطح دوم آفست پین می‌باشد. همچنین T نیز میانگین کل مقاومت‌های کششی بدست آمده می‌باشد. در نهایت با توجه به مقادیر مقاومت کششی بدست آمده و انجام محاسبات مقدار مقاومت کششی برای حالت بهینه در حدود 89 MPa تخمین زده شد. به

اتصالات همواره کمتر از مقاومت کششی مواد پایه می باشد.

جدول 9 خواص مکانیکی و محل شکست نمونه های آزمون کشش

Table 9 Mechanical properties and failure location of tensile test specimens

نمونه	مقاومت کششی (MPa)	% افزایش طول	محل شکست
1	86	3/79	خط اتصال
2	90	3/85	خط اتصال
3	87	3/81	خط اتصال

میانگین مقاومت کششی نهایی بدست آمده برای اتصالات بهینه برابر با 88 MPa می باشد که در حدود 78% مقاومت کششی آلومینیوم 1050 بکار رفته در فرایند می باشد. از دیگر دلایل کاهش مقاومت کششی اتصالات نسبت به مواد پایه تشکیل عیوب مختلف در حین فرایند جوشکاری می باشد. بیشتر عیوب ایجاد شده در ناحیه جوش به دلیل جریان نامطلوب ذرات شکسته شده مس در زمینه آلومینیومی شکل می گیرند. بنابراین می توان گفت که اندازه ذرات مسی جدا شده در اثر تغییر شکل های پلاستیک در منطقه جوشکاری نقش مهمی را در جریان هرچه مطلوب تر مواد و افزایش استحکام اتصالات ایفا می کند. خواص کششی و محل شکست اتصالات شکل گرفته به شدت تابع میزان عیوب ایجاد شده و نیز سختی اتصالات می باشد. شکست نمونه های آزمون کشش حاصل از آزمایش های انجام شده با ابزار پین دار عمدتاً از منطقه مرکزی جوش رخ می دهد که نشان از تردی بیش از حد این ناحیه می باشد. همچنین در برخی از اتصالات شکست نمونه ها از ناحیه HAZ در سمت آلومینیوم رخ داده است که نشان از استحکام کمتر این ناحیه نسبت به سایر نواحی ایجاد شده در طول فرایند می باشد که می توان دلیل اصلی آن را ایجاد تنش های پسماند در اثر بارهای حرارتی در این ناحیه و نیز مقاومت کششی کمتر آلومینیوم نسبت به مس دانست.

مقاومت کششی در اتصالات بین آلومینیوم و مس وابستگی زیادی به توزیع ذرات مس در زمینه آلومینیومی و ایجاد ترکیبات بین فلزی با ضخامت کم در منطقه جوشکاری و به خصوص در ناحیه مرکزی آن دارد. در اثر اغتشاش ایجاد شده در طول عملیات جوشکاری ذرات ریز مس وارد زمینه آلومینیومی شده و انجام واکنش بین آن ها منجر به تولید ترکیبات بین فلزی می گردد که از مهم ترین دلایل ایجاد ترک حین آزمون کشش می باشد. کنترل ضخامت این ترکیبات بین فلزی از نکات اساسی برای دستیابی به یک اتصال مستحکم می باشد.

با توجه به تحلیل سیگنال به نویز انجام شده و مقایسه

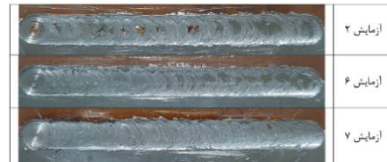


Fig. 10 Optimal joints made with the pinless tool

شکل 10 اتصالات مطلوب ایجاد شده با ابزار بدون پین

جدول 8 مقاومت کششی و محل شکست اتصالات با ابزار بدون پین

Table 8 Tensile strength and failure location of joints created with the pinless tool

آزمایش	مقاومت کششی نهایی (MPa)	محل شکست
2	47	خط اتصال
6	53	خط اتصال
7	75	خط اتصال

با توجه به کیفیت ظاهری و مقاومت کششی بدست آمده برای این اتصالات می توان دریافت که استفاده از ابزار بدون پین به شرط اعمال صحیح سطوح پارامترهای مختلف می تواند منجر به ایجاد اتصالات با کیفیتی در حد اتصالات ایجاد شده با ابزار پین دار شود. نکته قابل توجه در این دسته از اتصالات کاهش پلیسه ایجاد شده در حین فرایند نسبت به حالت جوشکاری با ابزار پین دار و نیز امکان استفاده از ابزارهایی با قطر شانه کم می باشد که با توجه به ماهیت حساس و ظریف فرایند میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می تواند بسیار با اهمیت و پرکاربرد باشد.

3-5- خواص اتصال بهینه

در این بخش به جزئیات خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصالات بهینه بدست آمده به کمک روش تاگوچی اشاره شده است.

3-5-1- مقاومت کششی

به منظور بررسی دقیق تر مقاومت کششی اتصالات بهینه سه نمونه آزمون کشش آماده و مورد بررسی قرار گرفت که در جدول 9 خواص مکانیکی و محل شکست این نمونه ها گزارش شده است. با توجه به مقادیر بدست آمده می توان دریافت هر سه نمونه کشش یافته انعطاف پذیری اندکی دارند که دلیل اصلی آن تشکیل ترکیبات ترد بین فلزی در ناحیه اتصال و همچنین کاهش ضخامت جوش ها نسبت به ورق ها به دلیل فشار وارد شده از طرف شانه ابزار می باشد که منجر به شکست ترد نمونه ها شده است.

با توجه به ریزساختار غیر همگن اتصالات غیر هم جنس ناشی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، مقاومت کششی این

برای میزان آفست اعمالی به ابزار با وجود اینکه تأثیر این پارامتر به اندازه دو پارامتر قبلی نمی‌باشد، اما تا حدودی می‌توان کاهش مقاومت کششی اتصالات قبل از مقدار بهینه بدست آمده را مربوط به عدم اختلاط مطلوب مواد و عدم تولید حرارت کافی در منطقه جوش به دلیل بالا بودن دمای ذوب مس نسبت به آلومینیوم و کاهش مقاومت کششی اتصالات بعد از مقدار بهینه را به دلیل عدم مشارکت کافی ماده مسی در عملیات جوشکاری دانست. به طور کلی برای ایجاد یک جوش با کیفیت به کمک فرایند میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی انتخاب دقیق سطوح کلیه پارامترها در کنار یکدیگر اهمیت می‌یابد و بررسی هر پارامتر به صورت جداگانه کارایی لازم را نخواهد داشت.

3-5-2- سختی

به منظور بررسی سختی اتصالات بهینه، مقادیر ریزسختی ویکرز برای سه نمونه در جهت عمود بر سطح مقطع جوش و در فواصل مشخص اندازه‌گیری شده است که بیشترین و کمترین مقادیر سختی به ترتیب برابر 192 HV و 21 HV گزارش شده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقادیر ریزسختی این سه نمونه در شکل 11 نشان داده شده است.

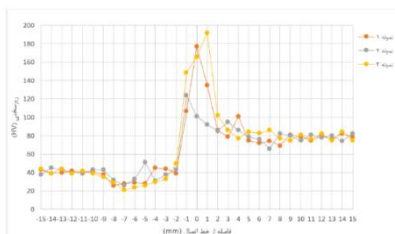


Fig. 11 Microhardness diagram of the weld cross-section

شکل 11 نمودار ریزسختی سطح مقطع جوش

با توجه به تغییرات مقادیر ریزسختی در نواحی مختلف جوش می‌توان دریافت که افزایش ناگهانی مقادیر سختی در منطقه مرکزی جوشکاری در نتیجه تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد و سخت و ساختارهای کامپوزیتی و لایه‌ای و همچنین تشکیل ذرات فوق ریز دانه در ناحیه مرکزی جوش تحت تأثیر حرارت بالا و تغییر شکل‌های پلاستیک ایجاد شده در حین جوشکاری می‌باشد. نتایج حاصل از آزمون ریزسختی نشان می‌دهد که سختی مناطق HAZ و TMAZ نسبت به خط مرکزی جوش کاهش یافته است. حتی مقادیر سختی در ناحیه HAZ در سمت آلومینیوم از سختی ماده پایه آلومینیوم نیز کمتر شده است که این کاهش سختی را می‌توان در اثر وارد

مقادیر مقاومت کششی و سطح ظاهری آزمایش‌های انجام شده با ابزار پین‌دار می‌توان دریافت که با افزایش سرعت دورانی ابزار و به تبع آن افزایش گرمای ورودی به منطقه جوشکاری، به دلیل ایجاد پدیده تبلور مجدد دینامیکی در منطقه مرکزی جوش و همچنین جریان مطلوب‌تر مواد، شاهد ایجاد اتصالات با سطوح یکنواخت‌تر و عیوب سطحی کمتری می‌باشیم که می‌تواند از دلایل اصلی افزایش استحکام در این دسته از اتصالات تلقی گردد. در سرعت‌های دورانی پایین به دلیل عدم ایجاد گرمای کافی و اغتشاش مناسب، جریان پلاستیک به نحو مطلوبی در منطقه جوشکاری صورت نمی‌پذیرد که منجر به ایجاد یک اتصال ضعیف در سطح و ریشه جوش می‌گردد.

همچنین با توجه به کاهش شیب نمودار سیگنال به نویز در سرعت‌های دورانی بالا می‌توان انتظار داشت که با افزایش بیش از حد سرعت دورانی پس از یک مقدار بهینه، پدیده نرم شدن بیش از حد و ذوب موضعی مواد و در نتیجه عدم ایجاد جوش در حالت جامد رخ دهد که می‌تواند منجر به خرابی سطوح جوشکاری در اثر پرتاب مواد نرم شده به اطراف و تشکیل پلیسه زیاد و نیز افزایش بیش از حد ترکیبات بین فلزی و حل شدن نابه‌جایی‌ها در منطقه جوشکاری و همچنین گسترش ناحیه HAZ به دلیل تحمل حرارت بیش از حد گردد. بنابراین می‌توان استنباط کرد که افزایش سرعت دورانی تا یک مقدار بهینه منجر به افزایش گرمای ورودی به منطقه جوشکاری و کاهش اندازه دانه در این منطقه می‌گردد، اما افزایش بیش از حد این سرعت به دلایل اشاره شده می‌تواند اثرات مخربی روی کیفیت اتصالات بگذارد.

در رابطه با سرعت پیشروی نیز مطابق با تحلیل سیگنال به نویز انجام شده، مقاومت کششی اتصالات با افزایش سرعت پیشروی تا یک مقدار بهینه بهبود یافته و پس از آن مقاومت کششی شروع به افت می‌کند. در رابطه با تغییرات سرعت پیشروی می‌توان نتایجی تقریباً مشابه با حالت قبل گرفت. بدین صورت که با افزایش سرعت پیشروی تا یک حد بهینه علی‌رغم اینکه زمان اختلاط مواد کاهش می‌یابد، اما از طرفی از رشد اندازه دانه و همچنین تولید گرمای بیش از اندازه در ناحیه جوشکاری جلوگیری به عمل می‌آید که منجر به افزایش استحکام کششی اتصالات می‌گردد. از طرفی نیز با افزایش بیش از حد سرعت پیشروی به دلیل عدم تولید حرارت کافی برای ایجاد اتصال و همچنین عدم اختلاط مطلوب مواد، شاهد کاهش مقاومت کششی اتصالات می‌باشیم.

همچنین با توجه به تحلیل سیگنال به نویز و واریانس

ناحیه اتصال پی برد که کنترل این پارامترها از مهم‌ترین نکات به منظور دستیابی به فازهای دلخواه می‌باشد.

3-5-4- تحلیل ساختار

تحلیل ساختاری جوش به کمک میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور اینکه بتوان تحلیل دقیقی از نوع جریان مواد در منطقه جوشکاری داشت تصاویر SEM از سطح مقطع جوش تهیه و جزئیات هریک از نواحی مختلف آن در شکل 13 نشان داده شده است. همچنین تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع جوش در شکل 14 نشان داده شده است.

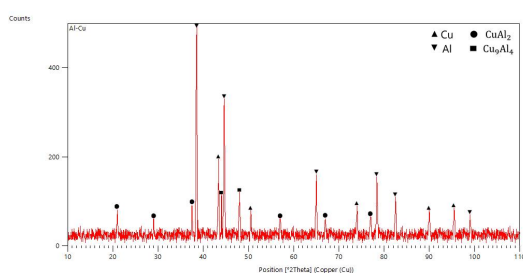


Fig. 12 X-ray diffraction pattern of Optimal sample

شکل 12 الگوی پراش اشعه ایکس نمونه بهینه

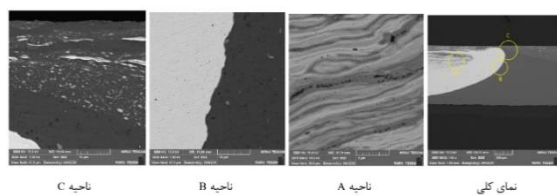


Fig. 13 SEM image of the weld cross-section with different magnifications

شکل 13 تصویر SEM از سطح مقطع جوش با بزرگ‌نمایی‌های متفاوت

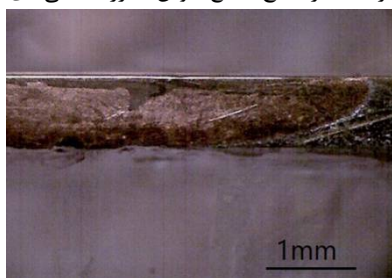


Fig. 14 Optical microscope image of the weld cross section

شکل 14 تصویر میکروسکوپ نوری از سطح مقطع جوش

ناحیه A ساختار لایه به لایه ایجاد شده در منطقه مرکزی جوش را نشان می‌دهد که به دلیل جریان یافتن آلومینیوم در قسمت بالایی ناحیه جوش ایجاد شده است که منجر به نفوذ مس به سمت آلومینیوم از سمت پیش‌رونده در اثر چرخش پین ابزار می‌شود. ناحیه B لایه بین فلزی پیوسته و نازک در محل

آمدن بارهای حرارتی ناشی از عملیات جوشکاری دانست. توزیع غیر یکنواخت سختی در منطقه جوش نشان از ناهمگن بودن ماهیت این فرایند دارد. نتایج ناشی از برخی نمونه‌های آزمون کشش نیز که در آن‌ها گسیختگی نمونه‌های کشش از ناحیه HAZ در سمت آلومینیوم رخ داده است را می‌توان با کاهش سختی در این ناحیه که تحت تاثیر بارهای حرارتی می‌باشد مطابقت داد.

3-5-3- تحلیل فازی

به منظور تحلیل فازی و شناخت ترکیبات بین فلزی تشکیل شده، آزمون پراش اشعه ایکس از منطقه مرکزی جوش برای اتصال بهینه انجام شده است. در شکل 12 نتایج تحلیل XRD برای اتصال بهینه نشان داده شده است. با توجه به حرارت ایجاد شده در طول فرایند جوشکاری، سیلان مواد در منطقه جوشکاری به نحو مطلوبی انجام شده است که منجر به ایجاد یک ساختار تقریباً یکنواخت در منطقه جوشکاری می‌شود و احتمال تشکیل ترکیبات بین فلزی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به پیک‌های نمودار مهم‌ترین فازهای شناسایی شده برای این نمونه $CuAl_2$ و پس از آن Cu_9Al_4 می‌باشد.

با توجه به خواص مواد در فرایند میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تنها نیاز به شرکت اندکی ماده مس در عملیات جوشکاری می‌باشیم، زیرا با افزایش ذرات مسی در منطقه جوشکاری شاهد ایجاد عیوب مختلفی مانند حفره‌های تونلی در منطقه جوشکاری خواهیم بود. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم به مس جریان مواد به دلیل دمای ذوب پایین‌تر آلومینیوم بر عهده این ماده می‌باشد و یکی از دلایل اصلی افزایش استحکام اتصالات با آفست دهی ابزار به سمت آلومینیوم، بهبود جریان مواد در منطقه جوشکاری می‌باشد. پس می‌توان پی برد هنگامی که در تحلیل XRD پیک‌های ناشی از ترکیبات $CuAl_2$ بیشتر از پیک‌های Cu_9Al_4 باشد، می‌توان انتظار خواص مطلوب‌تری را به دلیل مشارکت بیشتر آلومینیوم نسبت به مس در منطقه جوشکاری داشت.

در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مواد غیر هم‌جنس گرچه یکی از عوامل اصلی استحکام و سختی اتصالات تشکیل ترکیبات بین فلزی می‌باشد، اما به دلیل ماهیت ترد این ترکیبات تشکیل بیش از حد آن‌ها می‌تواند منجر به کاهش استحکام و نیز ایجاد ترک‌هایی در منطقه اتصال گردد. با توجه به دمای تشکیل ترکیبات بین فلزی مختلف می‌توان به تأثیر پارامترهای سرعت دورانی و پیشروی در تشکیل این ترکیبات در

پیوستن این ترک‌ها منجر به شکست نمونه می‌شود. همچنین در تصویر بزرگ‌نمایی شده از ناحیه 3 ملاحظه می‌شود که گودال‌های ریزی در این ناحیه به دلیل تغییر شکل‌های پلاستیک بالا قبل از شکست نمونه به وجود آمده است که نشان از تمایل اندک به شکست نرم در این ناحیه می‌باشد.

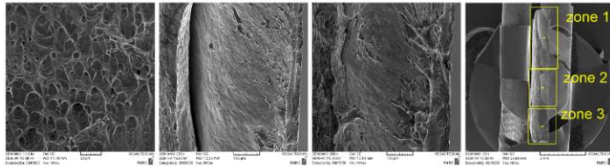


Fig. 16 SEM images of the failure surface of the tensile specimen
شکل 16 تصاویر SEM از مورفولوژی سطح شکست نمونه کشش

تشکیل ترکیبات ترد بین فلزی در منطقه مرکزی جوش مهم‌ترین دلیل انعطاف‌پذیری اندک نمونه‌های آزمون کشش می‌باشد که منجر به شکست ترد در تمامی نمونه‌های مورد بررسی شده است. عوامل دیگری از قبیل حضور ناخالصی‌ها، میزان اغتشاش مواد، حرارت ایجاد شده در منطقه جوشکاری و نیز هرگونه ساختار غیر همگن در ناحیه اتصال، رفتار شکست نمونه‌ها را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد.

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر امکان سنجی فرایند میکرو جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ورق‌های آلومینیوم 1050 و مس خالص به ضخامت 0/8 میلی‌متر به کمک ابزارهای پین‌دار و بدون پین مورد بررسی قرار گرفت. تمامی اتصالات به غیر از اتصالاتی که با ابزار بدون پین و با عمق‌های نفوذ ابزار 0/25 و 0/75 میلی‌متر ایجاد شدند از سطح ظاهری خوبی برخوردار بودند. نتایج حاصل از تحلیل سیگنال به نویز مشخص کرد که بیشینه مقاومت کششی اتصالات هنگام استفاده از پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و آفست ابزار با سطوح به ترتیب 2400 rpm، 40 mm/min و 0/25 mm بدست می‌آید که میانگین مقاومت کششی این اتصالات بهینه برابر با 88 MPa می‌باشد که در حدود 78% مقاومت کششی آلومینیوم 1050 می‌باشد. همچنین نتایج تحلیل واریانس برای مقادیر سیگنال به نویز نشان داد که هریک از پارامترهای سرعت دورانی، سرعت پیشروی و آفست پین ابزار به ترتیب به میزان 63%، 33% و 3% روی مقاومت کششی اتصالات تأثیرگذار بوده‌اند. با انجام آزمون میکرو سختی سنجی بر روی اتصالات بیشترین و کمترین مقادیر

اتصال آلومینیوم و مس را نشان می‌دهد. همچنین با دقت در ناحیه C می‌توان پراکنده شدن ذرات مس جدا شده در اثر حرارت و تغییر شکل‌های پلاستیک و حرکت آن به سمت آلومینیوم را به وضوح مشاهده کرد که نشان از یک ساختار کامپوزیتی از ذرات مس در زمینه آلومینیوم در این ناحیه می‌باشد.

در شکل 15 تصویر¹ FESEM از لایه بین فلزی با بزرگنمایی 35000 برابر ارائه شده است که با توجه به شکل می‌توان به وضوح تشکیل ترکیبات بین فلزی در این ناحیه را مشاهده کرد. این لایه پیوسته بسیار نازک برای رسیدن به یک جوش مطلوب ضروری می‌باشد. ترکیبات ایجاد شده در این لایه ارتباط مستقیمی با میزان نفوذ آلومینیوم در مس دارند. با توجه به شرایط جوشکاری و میزان حرارت در سطح اتصال این دو ماده اتم‌های جدا شده از دو ماده مستعد انجام واکنش با یکدیگر و تشکیل ترکیبات بین فلزی هستند. همچنین با دقت در کنتراست تصویر و با توجه به ترکیبات بین فلزی شناسایی شده می‌توان دریافت که لایه شماره 1 به دلیل مجاورت با آلومینیوم و تیرگی بیشتر نشان دهنده ترکیب $CuAl_2$ و لایه شماره 2 نشان دهنده ترکیب Cu_9Al_4 می‌باشد.

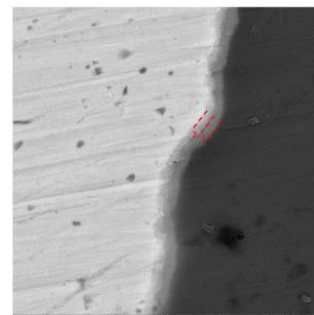


Fig. 15 Thin intermetallic layer created at the junction of aluminum and copper

شکل 15 لایه بین فلزی نازک ایجاد شده در محل اتصال آلومینیوم و مس

3-5-5- سطح شکست

تصاویر سطح شکست نمونه آزمون کشش اتصال بهینه برای سه ناحیه 1، 2 و 3 در شکل 16 نشان داده شده است. با توجه به تصاویر می‌توان دریافت که ناحیه عظیمی از سطح شکست (نواحی 1 و 2) دارای حالت تقریباً تخت می‌باشند که حاکی از وقوع شکست ترد در این نواحی می‌باشد. با افزایش نیروی کشش، حفره‌های ریز به وجود آمده در این نواحی به سرعت گسترش یافته و تبدیل به ترک‌های ریزی می‌شوند که به هم

¹ Field Emission Scanning Electron Microscope

- properties and microstructure of dissimilar aluminum to copper joint, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 51-63, 2015 (in Persian فارسی)
- [6] P. Xue, D. R. Ni, D. Wang, B. L. Xiao, and Z. Y. Ma, Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints, *Materials Science and Engineering*, Vol. 528, No. 13-14, pp. 4683-4689, 2011.
- [7] D. M. Rodrigues, A. Loureiro, C. Leitao, R. M. Leal, B. M. Chaparro, and P. Vilaça, Influence of friction stir welding parameters on the microstructural and mechanical properties of AA 6016-T4 thin welds, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 6, pp. 1913-1921, 2009.
- [8] E. M. Olsen, Friction Stir Welding of High-Strength Automotive Steel, *Brigham Young University*, 2007.
- [9] A. Landau, *Micro-Friction Stir Welding of Aluminum Alloys: Process Characterization and Optimization of Parameters*, 2009.
- [10] A. Scialpi, L. A. C. De Filippis, P. Cuomo, and P. Di Summa, Micro friction stir welding of 2024-6082 aluminium alloys, *Welding International*, Vol. 22, No. 1, pp. 16-22, 2008.
- [11] E. Cerri, P. Leo, X. Wang, and J. D. Embury, Mechanical properties and microstructural evolution of friction-stir-welded thin sheet aluminum alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 42, No. 5, pp. 1283-1295, 2011.
- [12] H. J. Liu *et al.*, Weld appearance and microstructural characteristics of friction stir butt barrier welded joints of aluminium alloy to copper, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 17, No. 2, pp. 104-110, 2012.
- [13] I. Bhamji, R. J. Moat, M. Preuss, P. L. Threadgill, A. C. Addison, and M. J. Peel, Linear friction welding of aluminium to copper, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 17, No. 4, pp. 314-320, 2012.
- ریزسختی به ترتیب برای مناطق مرکزی جوش و HAZ آلومینیوم ثبت شد که برابر با 192 HV و 21 HV می‌باشند. نتایج آزمون XRD حضور ترکیبات بین فلزی Cu_9Al_4 و CuAl_2 در منطقه اختلاط را مشخص کرد که میزان تشکیل این ترکیبات، مقاومت کششی اتصالات را کنترل می‌کنند. همچنین سطح شکست کلیه نمونه‌ها از نوع ترد و محل شکست نمونه‌ها عمدتاً از ناحیه مرکزی جوش بود.

5- مراجع

- [1] M. Dorudgar, S. M. H. Seyedkashi, M. Sajed, Experimental study on manufacturing of bi-metal sandwiches with aluminum foam core and copper layers using friction stir welding, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 7, No. 12, pp. 1-9, 2021 (in Persian فارسی)
- [2] M. Mehri, M. R. Khanzadeh, H. Bakhtiari, Study of the effect of instrument pin geometry on mechanical and microstructural properties of the welding region in the process of friction stir butt welding of AlMg6, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 6, No. 9, pp. 25-36, 2019 (in Persian فارسی)
- [3] I. Galvao, J. C. Oliveira, A. Loureiro, and D. M. Rodrigues, Formation and distribution of brittle structures in friction stir welding of aluminium and copper: influence of process parameters, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 16, No. 8, pp. 681-689, 2011.
- [4] H. Berekatain, M. Kazeminezhad, and A. H. Kokabi, Microstructure and mechanical properties in dissimilar butt friction stir welding of severely plastic deformed aluminum AA 1050 and commercially pure copper sheets, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 30, No. 8, pp. 826-834, 2014.
- [5] J. Jahangiri, A. Fallahi Arezoudar, Effect of friction stir welding process parameters on mechanical