مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 14، ص‌ص 148-154

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی خواص حرارتی، مکانیکی و ریزساختار اتصالات آلیاژ آلومینیوم سری 7000 جوشکاری شده توسط فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

عبدالحمید عزیزی[1*]، محمدابراهیم اعلمی آل آقا[2]، حمید مرادی[3]

1- استادیار، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه ایلام، ایلام
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه
3- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه
*ایلام، صندوق پستی 516-69315، ah.azizi@ilam.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 18 خرداد 1393
پذیرش: 14 تیر 1393
ارائه در سایت: 23 مهر 1393

کلید واژگان:
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
خواص متالوژیکی
آلیاژ آلومینیوم
خواص مکانیکی

چکیده

در بررسی روش‌های جوشکاری و اتصال قطعات به یکدیگر روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یکی از روش‌های نوینی است که در جوشکاری قطعات آلومینیومی به‌عنوان روشی اقتصادی و باکیفیت مطرح می‌شود. در مقاله حاضر سعی شده است تا با معرفی این روش به بررسی تاثیر پارامترهای گوناگون بر روی خواص حرارتی، ریزساختاری و مکانیکی اتصالات آلومینیوم آلیاژ سری 7000 پرداخته شود. نتایج به‌دست آمده از این آزمایش نشان می‌دهد که اندازه دانه‌ها در ناحیه ناگت در حدود 5 تا 12 میکرومتر است و کمترین اندازه دانه در ناحیه ناگت تشکیل می‌شود. به کمک مدل حرارتی ارائه شده و انجام آزمایش‌های تجربی می‌توان به تخمینی از میزان انرژی تلف شده در حین فرایند و تاثیر پارامترهای مختلف جوشکاری روی این میزان انرژی دست پیدا کرد. دمای مناسب، در نزدیک‌ترین فاصله به شانه ابزار، برای پیکربندی استفاده شده در تحقیق در هنگام شروع به جوشکاری و نیز هنگام جوش 330 درجه سانتی‌گراد است که به‌عنوان معیاری برای کنترل جوش از آن استفاده می‌شود. همچنین، ابزار استوانه‌ای با پین سطح صاف در بهترین وضعیت قادر به ایجاد جوشی با استحکامی حدود 80 درصد فلز پایه است و عیوب ناشی از انتخاب پارامترهای مختلف به‌شدت بر روی کیفیت جوش تاثیرگذار است.

Investigation of thermal, mechanical and microstructural properties of 7000 series Aluminum alloys welding using friction stir welding process

Abdolhamid Azizi[1*], Mohamad Ebrahim Aalami Aleagha[2], Hamid Moradi[3]

1- Department of Mechanical Engineering, University of Ilam, Ilam, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
*P.O.B. 69315-516 Ilam, Iran, ah.azizi@ilam.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 June 2014
Accepted 05 July 2014
Available Online 15 October 2014

Keywords:
Friction Stir Welding, FSW
Metallurgical Properties
Aluminum Alloy
Mechanical Properties

ABSTRACT

Friction stir welding is a novel, economical and high quality technique among aluminum welding and joining methods. In the present paper, by introducing the friction stir welding the affecting parameters on thermal, micro structural and mechanical properties of 7000 series aluminum aerospace alloys joining using Friction Stir Welding is investigated. Results show that the sizes of nugget grains are between 5 and 12 micrometer and the least grain size is constructed in nugget zone, which the thermal effect is responsible for. By using thermal analysis and experimental results, the amount of energy lost during FSW process can be drawn. Furthermore the effect of process parameters on loosed energy can be investigated. In this work and in the beginning and during welding, the appropriate temperature near to the tool shoulder is 330 ˚C which can be used as a norm for quality control of weld ability. Cylindrical tool with plain pine surface produced a welding joint with strength up to 80 percent of base metal. Welding quality is strongly affected by defects in joining zone which came from selecting non proper welding parameters.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، در بحث اتصالات آلومینیوم به‌دلیل داشتن برخی خواص توجه خاصی شده است. با توجه به پیشرفت علم در زمینه جوشکاری قطعات آلومینیوم می‌توان به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اشاره کرد. البته، باید به برخی ویژگی‌ها نظیر ضریب انبساط حرارتی بالای آلومینیوم که موجب انبساط حجمی واعوجاج غیرقابل قبولی در حین جوشکاری می‌شود توجه خاصی داشت. به‌عنوان نمونه، ضریب هدایت حرارتی بالای آلومینیوم نیازمند وجود منبع حرارتی قوی‌تر و متمرکزتری است. علاوه‌بر آن، به‌علت بالا بودن ظرفیت حرارتی آلومینیوم، برای افزایش دمای آلومینیوم حرارت بیشتری مورد نیاز است. رسانش الکتریکی بالای آن نیز محدودیت‌هایی را در

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Azizi, M. E. Aalami Aleagha, H. Moradi, Investigation of thermal, mechanical and microstructural properties of 7000 series Aluminum alloys welding using friction stir welding process, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 14, pp. 148-154, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.28.3]

استفاده از جوشکاری مقاومتی که در آن حرارت در نتیجه مقاومت الکتریکی به وجود می‌آید به‌همراه خواهد داشت[1]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در سال 1991 به‌عنوان یک روش جوش حالت جامد در موسسه جوش انگلستان ابداع شد و در ابتدا برای آلیاژهای آلومینیوم استفاده شد. مفهوم پایه این نوع جوشکاری، بسیار ساده است. یک ابزار چرخنده غیرمصرفی با طراحی مخصوص پین و شانه ابزار به درون لبه‌های دو ورق نفوذ می‌کند و در طول خط جوش پیش می‌رود[2]. این ابزار جوش دو وظیفه اصلی را بر عهده دارد. الف) گرم کردن قطعه کار. ب) حرکت مواد به منظور ایجاد اتصال. اصطکاک بین ابزار جوش و قطعه گرما را ایجاد می‌کند. این تولید گرمای موضعی، باعث نرم شدن مواد اطراف پین می‌شود. در بخش اول این تحقیق با انجام کار آزمایشگاهی و تحلیلی به بررسی پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی روی خواص حرارتی و ریزساختار اتصالات ورق آلومینیوم آلیاژی پرداخته شده است و در بخش دوم خواص مکانیکی این اتصالات مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. بررسی آزمایشگاهی بهترین راه حل برای بررسی فرآیند و مطالعه خواص آن است. به‌عنوان مثال، در گزارش‌های مختلف ناحیه‌های متفاوتی را به‌عنوان محل شکست تعریف نموده‌اند که نشان‌دهنده وابستگی کیفیت نهایی جوش به تمام متغیرهای اثرگذار فرایند است[2]. کارهای مختلفی از محققان بر روی بررسی فرایند انجام شده است. توماس و همکارانش، در سال 2003، با انجام آزمایش‌های مختلف هندسه‌ای برای یک ابزار ایده‌آل جهت جوشکاری پیشنهاد کردند[2]. در بررسی کیفیت خواص جوشکاری نیز، توسط محققان مختلف، روابط و مدل‌سازی‌های متعددی انجام شده است. رینولدز و همکارانش، در سال 1999، رفتار جریان ماده را در جوشکاری آلومینیوم 2195Al-T8، با استفاده از روش نشانگرگذاری، مورد مطالعه قرار دادند[3]. گورا، در سال 2001، جریان ماده را برای جوشکاری آلومینیوم 6061 مورد بررسی قرار داد. اربگست، در سال 2003، نواحی پنج‌گانه‌ای را برای فرآیند تعریف نموده است که عبارت‌اند از نواحی پیش گرم، تغییر شکل اولیه، اکستروژن، فورجینگ و سرد شدن پس از جوش[4]. ابری، در سال 2006، مدل ریاضی برای توصیف شرایط حرارتی گذرا با قابلیت پیش‌بینی توزیع دما در قطعه کار را تعریف کرد. در سال 2005، رایکوتی مدلی برای جوشکاری در سرعت بالا با منبع حرارت متحرک در راستای خط جوش تعریف کرد[5]. در سال 2005، مدلی تحلیلی حرارتی به‌نام iSTIR توسط ویلاکا ارائه شد که برای شرایط دوبعدی و سه‌بعدی و برای آلیاژهای هم‌جنس و غیرهم‌جنس می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که در آن از پارامتری به‌نام گشتاور مجموع نام برده می‌شود که مجموع گشتاور اعمالی از ابزار جوش به قطعه کار است[6].

2- کار تجربی و آزمایشگاهی

با توجه به افزایش دانش و انجام آزمایش‌های گوناگون، ابزارهایی طراحی شده‌اند که نیروی لازم را کاهش داده و نیز مخلوط شدن بهتر و جریان مناسب ماده را ایجاد می‌کنند که در نتیجه منجر به جوشی بهتر می‌شوند[7]. هندسه ابزار از بخش‌های مهم موثر در این نوع جوشکاری است. یک ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شامل پین و شانه ابزار می‌شود که در شکل 1 نمایی از ابزار نشان داده شده است. در این تحقیق، از ابزارهای بدون رزوه با قطر پیشانی‌های متفاوت و از یک ابزار با پین رزوه‌دار استفاده شده است. در تمامی ابزارها طول پین و قطر پین یکسان است. جزییات مربوط به ابزارهای مورد استفاده در این تحقیق در جدول 1 نشان داده شده است.

شکل 1 تصویری از ابزارهای جوشکاری مورد استفاده در این تحقیق

جدول 1 هندسه ابزارهای آماده شده برای فرآیند جوش

شماره ابزار	گام رزوه (mm)	طول پین (mm)	قطر پین (mm)	قطر پیشانی(mm)
ابزار 1	-	5/8	6	26
ابزار 2	-	5/8	6	20
ابزار 3	-	5/8	6	15
ابزار 4	1	5/8	6	20

ابعاد ورق‌های آلومینیوم سری 7000 به‌کار رفته، به‌عنوان قطعه کار در این تحقیق، 150×300×6 میلی‌متر است و هیچ گونه عملیات حرارتی بر روی ورق‌ها انجام نگرفته است. برای ایجاد حرکت دورانی مورد نیاز پین در درون قطعه از یک دستگاه فرز استفاده شده است. همچنین، دستگاه قابلیت ارائه سرعت دورانی 250، 500، 1500، 2200 دور بر دقیقه را دارا است. جنس ابزار جوشکاری از فولاد ابزار AISI H13 انتخاب شده است. این نوع فولاد از انواع گرمکار فولاد ابزار است که در جدول 2 ترکیب شیمیایی و در جدول 3 خصوصیات مکانیکی آن ارایه شده است.

عملیات حرارتی سخت کردن ابزار مطابق با استانداردهای ASTM انجام شده است. در این عملیات مشخصات فولاد مورد استفاده بعد از بازپخت به‌صورت جدول 4 به‌دست آمده است. همچنین، در جدول 5 ترکیب شیمیایی ورق‌های آلومینیوم مورداستفاده در این تحقیق بیان شده است.

جدول 2 درصد وزنی ترکیب فولاد ابزار

نام تجاری	ترکیب شیمیایی، درصد وزنی					
	C	Mn	Si	Cr	V	Mo
H13	0/35	0/4	0/96	4/8	0/95	1/13

جدول 3 خصوصیات مکانیکی فولاد ابزار

گرمای ویژه J/g-°C	سختی (برینل)	چگالی (kg/m³)	هدایت حرارتی W/m-K	ضریب پواسن	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	مدول یانگ (GPa)
0/461	180	7580	25	0/30	1810	1520	210

جدول 4 خواص فولاد بعد از بازپخت شدن

سختی HRC	درصد کاهش سطح(A%)	درصد تغییر طول (E%)	مقاومت تسلیم (Mpa)	مقاومت کششی (Mpa)	دمای بازپخت (C)
52	46/2	13/0	1570	1960	527
50	50/1	13/1	1530	1835	555
48	52/4	13/5	1470	1730	575
46	53/7	14/4	1365	1580	593

جدول 5 مقادیر آلیاژهای موجود در نمونه مورد استفاده

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
فلز پایه	0/293	0/416	1/3	0/021	1/93	0/254	/0027
Zn	Ti	Be	Pb	Sb	Sn	V	Zr
4/86	/0169	/0003	/01	/0041	/0013	/0045	/0014

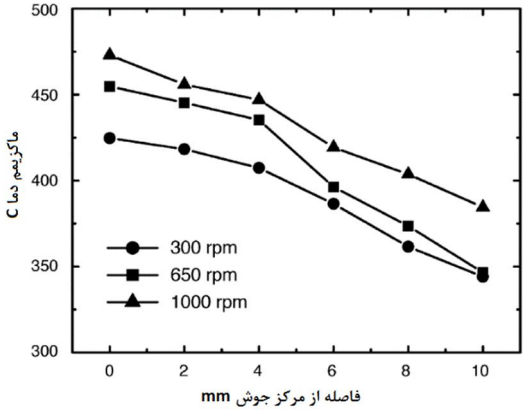
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.28.3]

3- بحث و نتایج

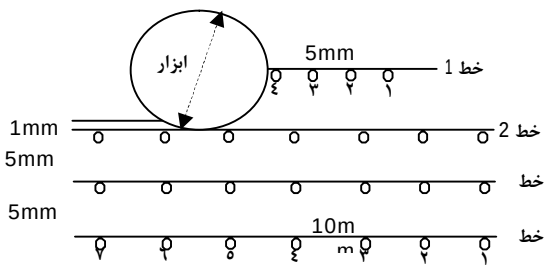
3-1- توزیع دما

دو عامل تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک بین ابزار و قطعه کار موجب افزایش دما درون ناحیه اغتشاشی و اطراف آن می‌شود[8]. همچنین، افزایش دما بر ریزساختار ماده مانند: اندازه دانه، مرز دانه‌بندی، حل شدن رسوبات و در نتیجه خصوصیات مکانیکی جوش تأثیرگذار است. در تحقیقات انجام شده بیشینه دما در این ناحیه با استفاده از ریزساختار جوش پیش‌بینی شده است[4]. در مواردی نیز از ترموکوپل تعبیه شده در پین برای اندازه‌گیری دما در این ناحیه استفاده شده است. رودز و همکارانش بیشینه دمای فرآیند جوشکاری برای Al7075-T651 را 400 تا 480 درجه سانتی‌گراد تخمین زدند. در شکل 2، نتایج توزیع دما در فواصل مختلف و در سرعت‌های دورانی متفاوت نشان داده شده است[9].

با توجه به نمودار ارایه شده افزایش سرعت دورانی از 300 به 650 بیشینه دما را 40 درجه افزایش داده است و افزایش آن از 650 به 1000 فقط 20 درجه بیشینه دما را افزایش داده است. در این تحقیق، ورق‌های جوش داده شده تحت عملیات حرارتی قرار نگرفته‌اند، اما ورق کار شده به‌عنوان آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر دسته‌بندی می‌شود. سیکل‌های حرارتی، که در حین فرآیند جوشکاری اعمال می‌شود، منجر به درشت شدن رسوبات و نابه‌جایی می‌شود. برای اینکه فرآیند از لحاظ دمایی کنترل شود و نیز تاریخچه دمایی آن به‌دست آید، از حسگر دماسنج مولتی‌متر GDM394 GWINSTEK استفاده شده است. مکان‌های مورد نظر برای اندازه‌گیری دما بسته به قطر شانه ابزار در فواصل 1، 5 و 10 میلیمتری از لبه ابزار درنظر گرفته شده‌اند. در شکل 3، نقاطی که اندازه‌گیری دما در آن‌ها اتفاق افتاده نشان داده شده است. پارامترهای آزمایش عبارت‌اند از سرعت دورانی 2200 دور بر دقیقه، سرعت پیشروی 4 میلی‌متر بر دقیقه، زاویه انحراف 3/5 درجه و ابزار با قطر شانه 20 میلی‌متر استفاده شده است.



شکل 2 تأثیر سرعت دورانی بر روی بیشینه دما



شکل 3 میزان دما در نواحی مختلف

باید توجه داشت که این اندازه‌گیری دما هم‌زمان انجام نگرفته است، اما به‌علت سرعت پایین پیشروی می‌توان آن را هم‌زمان درنظر گرفت. در جدول 6، نتایج حاصل از اندازه‌گیری دما در نقاط نشان داده شده و همچنین تغییرات آن‌ها در قسمت جانبی و جلویی پین در شکل 4 آورده شده است.

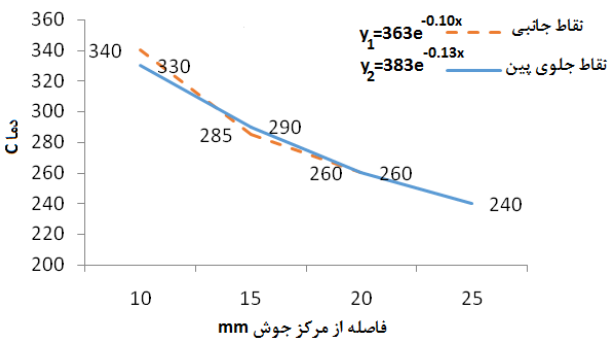
در این شکل تقریبی از تغییرات دما برحسب فاصله از مرکز جوش در سمت جانبی (منحنی y1) و در سمت جلوی ابزار (منحنی y2) نشان داده شده است. در هر دو رابطه با صفر قرار دادن مقدار x می‌توان به دمای پیش‌بینی شده برای مرکز جوش رسید. با توجه به این تقریب می‌توان گفت که دمای مرکز در حدود 360 تا 380 درجه است. البته، به‌علت اینکه در فاصله‌های کمتر از 10 میلی‌متر تماس شانه ابزار با سطح قطعه را داریم و گرمای وارده بر اثر اصطکاک در آن ناحیه ایجاد می‌شود، دمای واقعی از این مقدار قاعدتاً بیشتر است و همچنین داده‌های دمایی برای سطح قطعه است و تقریب دمای ناحیه ناگت جوش با دمای سطح غیرواقعی خواهد بود[10]. برای بررسی بیشتر توزیع دمایی با توجه به پارامترهای فرآیند، از مدل توزیع دمای رزنتال برای یک منبع حرارتی متحرک در صفحه دوبعدی استفاده می‌شود. این مدل برای ورق نازک به‌صورت رابطه (1) بیان شده است[11].

$$\frac{2\pi(T-T_0)kg}{Q} = K_0\left(\frac{vr}{2\alpha}\right).e^{\frac{vx}{2\alpha}} \qquad (1)$$

که در این رابطه Q شار حرارتی تولیدی از فرآیند، k ضریب هدایت حرارتی، α ضریب پخش حرارت، x فاصله نسبت به منبع حرارت متحرک و در راستای حرکت، دمای اولیه T_0، v سرعت پیشروی و r فاصله قطبی از مرکز حرکت، g ضخامت ورق و K_0 تابع بسل تغییر یافته نوع دوم مرتبه صفر است. یکی از محدودیت‌های توزیع دمای بیان شده، میل کردن دما به‌سمت بینهایت در حالتی است که r به‌سمت صفر میل کند و جواب‌های ارایه شده در نزدیکی مرکز حرارت غیرواقعی خواهند بود. حال برای محاسبه دما در نقاط مختلف، به‌عنوان مثال نقطه جلوی شانه ابزار از رابطه (1) که توزیع دما با منبع متحرک است استفاده می‌شود. دمای به‌دست آمده 796 درجه سانتی‌گراد محاسبه می‌شود. این دما از دمای ذوب آلومینیوم نیز بیشتر است. دلیل اختلاف دمای واقعی اندازه‌گیری شده و دمای محاسباتی اتلاف انرژی

جدول 6 اندازه‌گیری دما در نقاط مختلف نشان داده شده

نقاط از راست	دمای نقطه 1	دمای نقطه 2	دمای نقطه 3	دمای نقطه 4	دمای نقطه 5	دمای نقطه 6
خط 1	240	260	290	330	-	-
خط 2	210	240	280	340	285	240
خط 3	200	230	249	285	241	235
خط 4	176	180	220	260	220	182



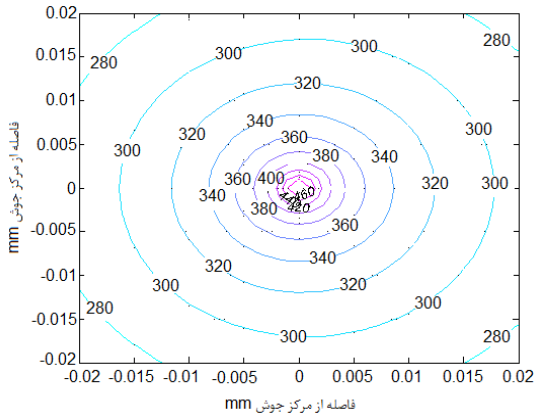
شکل 4 نمودار رابطه تغییرات دما برحسب فاصله

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.28.3]

است که وجود دارد و در محاسبات لحاظ نشده است. البته، اگر سرعت پیشروی بسیار بیشتر از مقادیری بود که در فرآیند لحاظ شده است، اتلاف انرژی در واحد زمان خطای کمتری ایجاد می‌کرد. از این رو می‌توان یکی از نقاط ضعف پیشروی در سرعت پایین را اتلاف انرژی زیاد عنوان نمود. در یک حالت خاص و با توجه به رابطه (1)، جهت ثبت دمایی برابر با 330 درجه سانتیگراد در نزدیک‌ترین فاصله به شانه ابزار، نیاز به گرمایی معادل 335 وات است. خطوط هم‌دما با فرض اعمال فقط 335 وات انرژی در شکل 5 نشان داده شده است. با توجه به شکل 5 تقریب دمایی در حدود 400 درجه سانتی‌گراد برای مرکز جوش به‌دست می‌آید. از این دماهای گزارش شده می‌توان به‌عنوان معیاری برای بررسی وضعیت فرآیند در هنگام جوشکاری استفاده نمود. می‌توان به کمک این مدل تحلیلی و نتایج تجربی به‌دست آمده از اندازه‌گیری دما، به تخمینی از میزان انرژی تلف شده در طول فرایند دست پیدا کرد و علاوه‌بر آن می توان تاثیر پارامترهای مختلف روی انرژی تلف شده را مورد بحث و بررسی قرار داد.

2-3- ریزساختار جوش

شکل سه‌بعدی یک دانه بسیار پیچیده است و لذا تعیین دقیق اندازه هر دانه کار دشواری است. به همین دلیل معمولا اندازه متوسط دانه‌ها در ریزساختار یک فلز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این بررسی برای مشاهده دانه‌بندی نمونه‌ها از محلول اچ کلر تغییر یافته منطبق بر استاندارد ASTM E 3-01 (2007) استفاده شده است. عملیات اچ نمودن منطبق بر استاندارد ASTM E 407-07 انجام شده سپس تصاویر میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ نوری منطبق بر استاندارد ASTM E 883-02 (2007) ثبت شده است. در انتها نیز با استفاده از این تصاویر اندازه‌های دانه‌ها به‌دست آمده که این عملیات نیز منطبق بر استاندارد ASTM E 112-96 (2004) انجام شده است. ترکیب مواد مختلف در محلول اچ کلر تغییر یافته به‌صورت جدول 7 است. مقطع جوش پس از سنباده و پولیش چند بار آغشته به محلول ذکر شده می‌شود و پس از شستشو مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در مجموع نمونه به مدت 15 ثانیه در این محلول قرار داده می‌شود. برای بررسی دانه‌بندی و اندازه دانه‌ها، نمونه‌هایی که مقطع جوشکاری شده بدون عیب و نیز دارای استحکام کششی بیشینه بودند، مورد فرآیند اچ قرار گرفته است. در شکل 6 و 7 نمونه‌های مقطع جوش انجام شده با شانه ابزار 20 و 26 میلی‌متر نشان داده شده است.

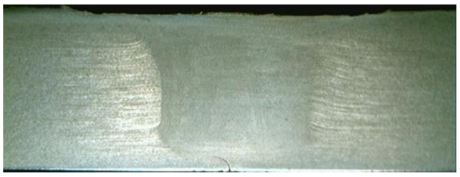


شکل 5 توزیع دما و خطوط هم‌دما در محدوده جوشکاری

جدول 7 حجم مواد مختلف در محلول اچ

H_20 (ml)	HNO_3 (ml)	HCL (ml)	HF (ml)
175	20	3	2

شکل 6 مقطع جوش برای ابزار با شانه 20 میلی‌متر

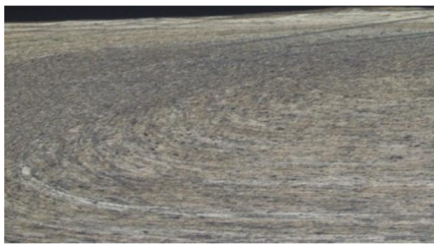


شکل 7 مقطع جوش برای ابزار با شانه 26 میلی‌متر

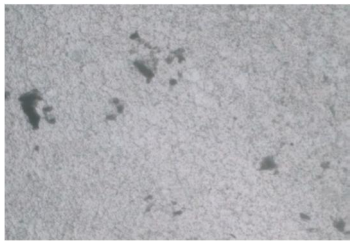
همان‌طور که مشاهده می‌شود ناحیه جوش به‌خوبی از فلز پایه متمایز است. ضخامت کم ناحیه تغییر ساختار یافته در زیر شانه ابزار در هر دو مقطع نشان‌دهنده کم بودن نیروی محوری در فرآیندها است. در شکل 8، ساختار ناحیه زیر شانه ابزار با بزرگنمایی 100 برابر نشان داده شده است. در این تصویر جریان حرکت مواد به داخل ناحیه جوش که موجب تغییر جهت ساختار موازی فلز پایه شده است؛ مشخص است که ناحیه متاثر از حرارت و کار مکانیکی را نشان می‌دهد. همچنین، می‌توان ریز شدگی ساختار فلز را در ناحیه جوش مشاهده نمود.

برای مشاهده دانه‌ها از بزرگنمایی 400 و 1000 برابر استفاده شده است. در شکل 9، بزرگنمایی 400 برابر ناحیه جوش و در شکل 10 ناحیه متاثر از حرارت و کار مکانیکی نمایش داده شده است. عیوب ریز موجود در ساختار جوش نیز در این بزرگنمایی‌ها به‌خوبی مشخص هستند که بیانگر وجود حفره‌های ریز در ناحیه جوش است. مرز دانه‌ها نیز مشخص شده است. توزیع یکنواختی برای دانه‌ها نداریم و اندازه دانه‌ها در قسمت‌های مختلف تصویر متغیر است.

در تصاویر ارایه شده ریز بودن ساختار فلز در ناحیه جوش مشخص است. متاسفانه مرز دانه مشخصی در این تصاویر مشاهده نمی‌شود. برای مشاهده دانه‌ها در ناحیه ناگت، تصویری در بزرگنمایی 1000 برابر تهیه شده است. در شکل 11، دانه‌بندی ناحیه ناگت جوش مشخص شده است. در این ناحیه

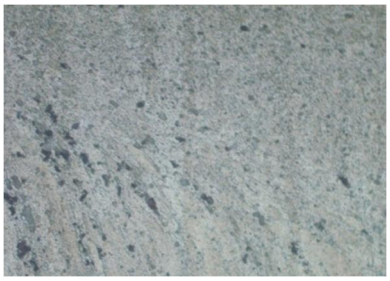


شکل 8 ناحیه زیر شانه ابزار با بزرگنمایی 100برابر



شکل 9 بزرگنمایی 400 برابر ناحیه جوش

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.28.3]



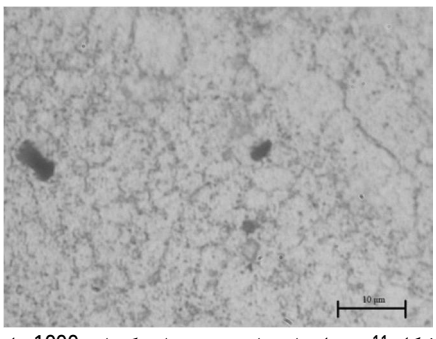
شکل 10 بزرگنمایی 400برابر از ناحیه متاثراز حرارت و کار مکانیکی

دانه‌هایی از سایز 12 تا 5 میکرومتر یافت می‌شود. ریز بودن دانه‌ها همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد به‌دلیل تجربه دمایی بالاتر و همچنین کار پلاستیک بیشتر ناشی از اغتشاش در این ناحیه است. اندازه دانه‌ها در ناحیه فلز پایه نیز بزرگ‌تر از دیگر نواحی بوده است. این موضوع موجب شده که سختی ناحیه جوش نسبت به فلز پایه بیشتر باشد. بین ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه جوش که ناحیه ترمومکانیکی است، مرز مشخصی یا دانه‌بندی با خصوصیت خاصی دیده نمی‌شود.

3-3- استحکام جوش

استحکام کششی نمونه تهیه شده از ورق آلومینیوم پایه برابر با 289/6 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. استحکام کششی آلیاژ سری 7075، درصورتی که عملیات حرارتی شده و رده T6 باشد، در حدود 570 مگاپاسکال است، اما اگر بدون عملیات حرارتی باشد، در حدود 276 مگاپاسکال است که نتایج آزمون کشش برای فلز پایه با خطای 4 درصد مطابقت دارد. برای آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر دامنه نسبت اثربخشی بین 65 تا 96 درصد گزارش شده است[12]. در جدول 8، استحکام کششی نمونه‌ها با توجه به شرایط حاکم نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول مشخص می‌شود عدم و کاهش وجود عیب در مقطع باعث افزایش استحکام نهایی جوش می‌شود.

با توجه به استحکام کششی نمونه‌ها، در جوش‌های سالم، درجه اثربخشی اتصال به حدود 84 درصد رسیده است که با توجه به محدوده 65 تا 96 درصدی گزارش شده، نتیجه قابل قبولی خواهد بود[13]. همچنین، با هر دو ابزار با قطر شانه 20 و 26 میلی‌متری و در سرعت پیشروی 4 میلی‌متر، استحکام کششی یکسانی به‌دست آمده است. به‌علت محدودیت دستگاه امکان پیشروی با سرعت بالاتر برای ابزار با قطر شانه 26 میلی‌متر موجود نبود، اما پیش‌بینی می‌شود که با استفاده از ابزار با قطر شانه 26 میلی‌متر می‌توان به‌سرعت بالاتری از جوشکاری و جوش بدون عیب دسترسی پیدا کرد. دلیل آن نیز افزایش سطح تماس و افزایش اصطکاک و گرمای دریافتی بالاتر خواهد بود. در بررسی انجام شده بر روی نمونه 3 و نمونه 5 نمودارهای تنش-کرنش

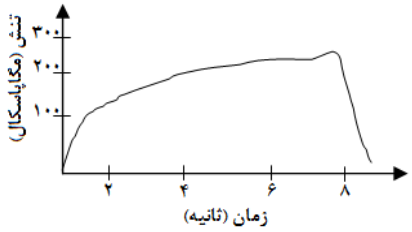


شکل 11 مرز دانه‌ها در ناحیه جوش با بزرگنمایی 1000 برابر

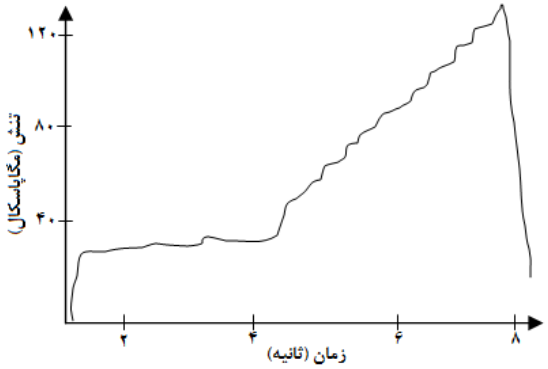
جدول 8 بررسی استحکام جوش با توجه به شرایط حاکم بر روی نمونه

شماره	خصوصیات ابزار	خصوصیات فرآیند	عیوب در مقطع	استحکام (مگاپاسکال)
1	فلز پایه	-	-	289/6
2	D=26، بدون رزوه	V=4، W=2200	بدون عیب	247
3	D=20، بدون رزوه	V=4، W=2200	بدون عیب	245
4	D=20، بدون رزوه	V=8، W=2200	عیب تونلی	140
5	D=20، بدون رزوه	V=12، W=2200	عدم مقطع همگن و نفوذ کافی جوش	133
6	D=20، بدون رزوه و کوتاه	V=8، W=2200	عدم نفوذ جوش تا ریشه	76/5

قطر شانه ابزار (میلی‌متر)=D، سرعت پیشروی (میلی‌متر بر دقیقه)=V و سرعت دورانی (دور بر دقیقه)=W



شکل 12 نمودار تنش-کرنش به‌دست آمده برای نمونه 3

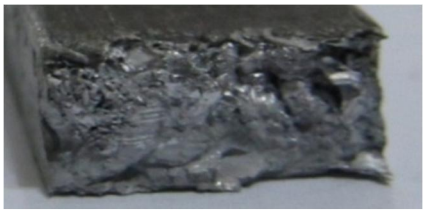


شکل 13 نمودار تنش-کرنش به‌دست آمده برای نمونه 5

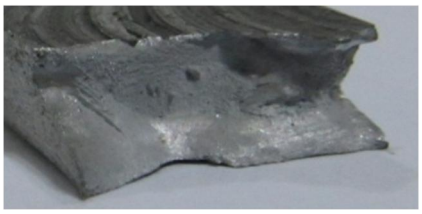
به‌دست آمده است که شکل 12 مربوط به نمونه 3 و همچنین شکل 13 مربوط به نمونه 5 است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مقطع نمونه 5، به‌علت ناهمگنی و وجود نواحی دارای تمرکز تنش، شکست ناگهانی نمونه در آزمون کشش بدون مشاهده کاهش در مقدار تنش اتفاق افتاده است. نمونه‌های 4 و 7، که دارای عیب تونلی بوده‌اند، استحکام پایینی دارند. همچنین، عدم نفوذ جوش تا ریشه جوش، در نمونه‌های 5 و6 استحکام کششی را کاهش داده است. نتایج بیانگر آن است که استحکام کششی به‌شدت وابسته به کیفیت جوش حاصله و عدم وجود عیوب در آن است. وجود عیوب تونلی باعث تمرکز تنش در مقطع می‌شود و عدم نفوذ کافی در ریشه جوش، باعث کاهش سطح مقطع حامل بار می‌شود. در شکل 14، مقطع شکست در نمونه 3 و در شکل 15 مقطع نمونه 5 مشاهده می‌شود.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.28.3]



شکل 14 سطح مقطع شکست نمونه 3



شکل 15 سطح مقطع شکست نمونه 5

4-3- محل شکست نمونه‌ها

دو عامل محل عیب و محل مینیمم سختی به‌عنوان عامل‌های اصلی تعیین کننده محل شکست در اتصالات هستند، به‌طوری که در نمونه‌هایی که عیبی دیده نشود، محل مرتبط با مینیمم سختی عامل شکست است. شکست در آزمون کشش در اتصالات لب به لب جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معمولا در محل‌های با کمترین سختی روی می‌دهد، اما در جوش‌های معیوب دو عامل تعیین کننده محل شکست هستند: 1) تمرکز تنش در محل عیب 2) توزیع سختی در مقطع جوش، که غلبه هرکدام با توجه به شرایط حاکم بر روی نمونه عامل بروز شکست می‌شود[14]. در جوش‌های معیوب بزرگ بودن عیب تمرکز تنش زیادی به‌دنبال خواهد داشت و در نتیجه تمرکز تنش در عیب بر عامل سختی غلبه کرده و باعث بروز شکست در منطقه عیب می‌شود. ولی، در مناطقی که اندازه عیوب خیلی کم هستند، این امکان وجود دارد که تمرکز تنش در محل عیب غالب نبوده و شکست در محل کمترین سختی رخ دهد. در شکل 16، نواحی شکست در نمونه نشان داده شده است. در تمام نمونه‌ها محل شکست در ناحیه جوش بوده است.

5-3- سختی سنجی

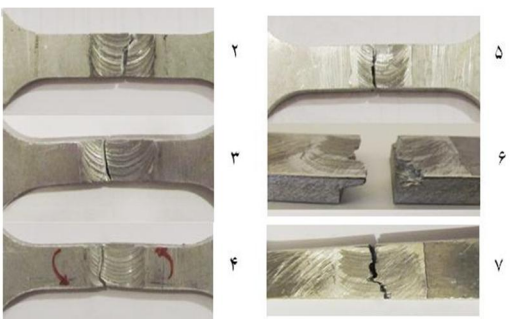
از آنجایی که ماده در فرآیند جوشکاری تحت تغییر شکل بسیار زیاد و دماهای نسبتا بالا قرار می‌گیرد، تغییرات ریزساختاری از قبیل تبلور مجدد و درشت شدن رسوبات در موضع اتصال قابل پیش‌بینی است. در منطقه ناگت جوش تغییر شکل زیاد با حرارت اعمالی باعث تبلور مجدد دینامیکی و تشکیل دانه‌های ریز در این ناحیه می‌شود. در مورد آلیاژهای عملیات حرارتی‌پذیر آلومینیوم، وجود دماهای کاری بالا حین فرآیند در ناحیه ناگت و مقدار جزئی در ناحیه متاثر از حرارت و کار مکانیکی موجب انحلال بخشی از فازهای رسوبی می‌شوند. در نتیجه مقداری نرم‌شدگی در ناحیه جوش در فلزات عملیات حرارتی‌پذیر، که در حالت T6 عملیات حرارتی شدند، انتظار می‌رود. از آنجا که بین فلز پایه و ناگت جوش به ترتیب ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه متاثر از حرارت-کارمکانیکی قرار دارد، لذا، در نهایت توزیع سختی در مقطع اتصال به‌صورت w شکل خواهد شد که ناحیه متاثر از حرارت کمترین مقدار را در این بین خواهد داشت[14،13]. برای نمونه‌های 2 و 3 که متفاوت در قطر شانه ابزار در حین جوشکاری و فاقد عیب نیز هستند، مقادیر سختی در مقطع آماده‌سازی شده، به روش میکروویکرز و با نیروی 100 گرم اندازه-گیری شده است. در شکل 17، مقدار سختی در فواصل مختلف از مرکز جوش نشان داده شده است.

نکته‌ای که در مورد آلیاژهای عملیات حرارتی پذیر وجود دارد این است که اندازه و پراکندگی رسوبات در این آلیاژها در مقایسه با اندازه دانه نقش بیشتری را در سختی این فلزات ایفا می‌کنند؛ در این تحقیق ورق‌های جوش داده شده تحت عملیات حرارتی قرار نگرفته‌اند، اما ورق کار شده جز آلیاژهای عملیات حرارت‌پذیر دسته‌بندی می‌شود. اختلاف حداکثر سختی در نمونه‌ها که برای نمونه با شانه ابزار 26 میلی‌متری سختی بیشتر است را می‌توان به این دلیل دانست که در ابزار شانه 26 میلی‌متری دمای مرکز جوش از حالت ابزار 20 میلی‌متری بیشتر است و موجب ریزدانگی بیشتر شده است. در نمونه‌های 2 و 3 سختی ناگت بیشترین مقدار را دارد و با فاصله گرفتن از مرکز جوش به تدریج از میزان آن کاسته می‌شود تا در ناحیه متاثر از حرارت به کمترین مقدار می‌رسد و سپس مجددا کاهش می‌یابد تا به سختی فلز پایه برسد. علت کاهش سختی بزرگ بودن دانه‌ها در فلز پایه است که در ادامه ساختار دانه‌بندی نیز این موضوع را تایید می‌کند.

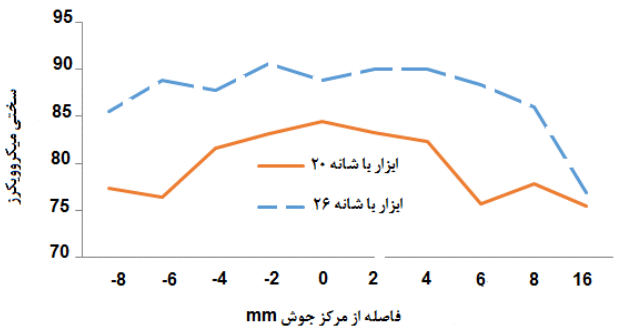
4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی تجربی و تحلیلی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلومینیوم سری 7000 مورد کاربرد در صنایع هوافضا پرداخته شد که در رابطه با خصوصیات اتصالات ایجاد شده می توان نتایج زیر را دسته‌بندی کرد:

- در نیروی عمودی پایین افزایش سرعت دورانی، با تامین کار پلاستیک کافی برای انجام فرآیند و کاهش سرعت پیشروی با جبران کاهش حرارت ناشی از اصطکاک، به بهبود خواص مکانیکی جوش کمک می‌کند.
- زاویه انحراف مناسب در این تحقیق 3/5 درجه بوده که باعث حذف عیب لایه‌برداری از سطح قطعه، کمک به اکستروژن فلز در ناحیه پشتی در زیر ابزار و جبران نیروی عمودی شده است.



شکل 16 نواحی بروز شکست در نمونه



شکل 17 توزیع سختی در مقطع جوش

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.28.3]

- استحکام کششی نمونه جوشکاری بدون عیب 80 درصد فلز اولیه است. از این نسبت به‌عنوان بهره‌وری اتصال نام برده می شود که در بیشتر مطالعات انجام شده به‌طور متوسط 75 درصد گزارش شده است. در صورت عیب در مقطع جوش استحکام کششی به شدت افت می‌کند.
- سختی ناحیه جوش در نمونه بدون عملیات حرارتی از فلز پایه بیشتر است که دلیل آن تجربه سیکل حرارتی و کار مکانیکی است که منجر به تبلور مجدد در ناحیه متاثر از حرارت و رسوب سختی در ناحیه جوش می‌شود و همچنین ریز شدن ساختار در این ناحیه می‌شود.
- اندازه دانه‌ها در ناحیه ناگت در حدود 5 تا 12 میکرومتر است و کمترین اندازه دانه در ناحیه ناگت مشاهده شده است.
- جوشکاری در سرعت پایین موجب اتلاف بالای انرژی می‌شود.
- دمای مناسب در نزدیک‌ترین فاصله به شانه ابزار، برای پیکربندی استفاده شده در تحقیق در هنگام شروع به جوشکاری و نیز هنگام جوش 330 درجه سانتی‌گراد است که می توان به‌عنوان معیاری برای کنترل جوش از آن استفاده نمود.
- به کمک مدل‌های حرارتی ارائه شده و اندازه‌گیری دما می‌توان به تخمینی از میزان انرژی تلف شده در حین فرایند دست پیدا کرد و تاثیر پارامترهای مختلف جوشکاری را روی این انرژی مورد بررسی قرار داد.
- استفاده از ابزاری با اندازه شانه ابزار بزرگ‌تر باعث تولید گرمای بیشتر می شود که همین امر موجب افزایش تشکیل ریزدانه در مقطع شده و کیفیت و مقاومت آن را افزایش می‌دهد.

5- تقدیر و تشکر

نویسندگان از آزمایشگاه مقاومت مصالح امیرکبیر و کارگاه ماشین ابزار دانشگاه رازی جهت کمک در انجام آزمایش‌های تجربی و بررسی آن‌ها تشکر و قدردانی می‌نمایند.

6- مراجع

[1] M. gharache, *Experimental Investigation of FSW Joining of Aluminum Alloy,* Msc Thesis, Mech Eng Dept, IUST, 2010. (In Persian)
[2] H. Rezaei, *Experimental Investigation of FSW Joining of Aluminum Alloy,* Msc Thesis, Mech Eng Dept, IUST, 2010. (In Persian)
[3] A. P. Reynolds, T. Seidel, Thermal modeling of FSW, *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding,* Thousand Oaks, CA, USA, June 14–16, 1999
[4] M. Guerra, J. C. McClure, L. E. Murr, A. C. Nunes, in: K. V. Jata, M. W. Mahoney, R. S. Mishra, S. L. Semiatin, D. P. Filed, *Friction Stir Welding and Processing,* Vols. Warrendale, PA, USA:TMS, p. 25, 2001.
[5] A. Abri, *Thermal modeling of FSW,* Msc Thesis, Mech Eng Dept, Sharif University Of Technology, 2006. (In Persian)
[6] P. Vilaca, L. Quintino, J. F. Santos, iSTIR–Analytical thermal model for friction stir welding, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 169, pp. 452-465, 2005.
[7] G. Mathers, *The welding of aluminium and its alloys,* Abington, Cambridge, UK: Woodhead Publishing Ltd, pp. 10-11, 2002.
[8] R. Rao, H. Raikoty, G. talia, High speed friction stir welding using rotating and non-rotating shoulder tool, *in Structural Dynamics and Materials Conference, Proc. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ ASC Structures,* April 2005.
[9] Q. Su, Microstructural of investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminum, *Acta Materialia,* Vol. 51, pp. 713-729, 2003.
[10] R. Rai, H. Bhadeshia, T. DebRoy, Review: friction stir welding tools, *Science and Technology of Welding and Joining,* Vol. 16, NO 4, pp. 325, 2011.
[11] R. S. Mishra, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering,* Vol. R 50, pp. 1-7, 2005.
[12] J. Adamowski, C. Gambaro, E. Lertora, M. Ponte, M. Szkodo,, Analysis of FSW welds made of aluminium alloy AW6082-T6, *Journal of Material Science and Technology,* Vol. 28, No. 8, pp. 453-460, 2007.
[13] P. Bahemmat, et al., Mechanical, micro, and macrostructural analysis of AA7075–T6 fabricated by friction stir butt welding with different rotational speeds and tool pin profiles, *Journal of Engineering Manufacture,* Vol. 224, pp. 419-433, 2010.
[14] A. J. Leonard, Friction Stir Welding of Aluminum Alloyes, *Proc. 2nd Int. Symp. on Friction stir welding,* in TWI, Gothenburg, Sweden, 2009.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-18]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.14.28.3]