ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir

بررسي هندسه سطح مقطع قطعه کار در دما و خواص منطقه جوش آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 در جوش کاری اصطکا کی دورانی

مهدي ظهور 1*، سيد مسعود سيد اميرخاني²

1 - دانشيار، مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي خواجهنصيرالدين طوسي، تهران 2- دانشجوى كارشناسى ارشد، مهندسى مكانيك، دانشگاه صنعتى خواجەنصيرالدين طوسى، تهران

* تهران، صندوق پستى mzohoor@kntu.ac.ir ،19395-1999

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله به بررسی تأثیر هندسه سطح مقطع قطعه کار در جوش کاری اصطکاکی دورانی برای آلیاژ آلومینیوم T6-7075 پرداخته شده است. جوش کاری از نوع اصطکاکی دورانی پیوسته بوده و قطعات مورد بررسی دارای طول 75 میلیمتر، و قطر 25 میلیمتر بودهاند. جوشکاری اصطکاکی دورانی این آلیاژ تحت تغییر متغیرهای سرعت چرخشی (N) و زمان اصطکاکی (t ₁) در دو سطح و با ثابت نگهداشتن فشار اصطکاکی	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 12 خرداد 1395 پذیرش: 06 تیر 1395 ارائه در سایت: 16 مرداد 1395
— (P1)، فشار آهنگری (P2) و زمان آهنگری (t2) انجام گرفت. سرعتهای چرخشی مورد انتخاب مقادیر 2000 دور بر دقیقه و 2500 دور بر دقیقه بوده و هندسه قطعات مورد بررسی در سه شکل متفاوت در پیشانی قطعه کار و بهصورت استوانهای در نظر قرار گرفته است. نتایج حاصل از	کلید <i>واژگان:</i> جوش کاری اصطکاکی
آزمایشها و نتایج شبیهسازی حرارتی- مکانیکی با استفاده از روش المان محدود در ناحیه جوش مقایسه گردید. برای تأیید روش آنالیز و صحت نتایج شبیهسازی فرایند جوش کاری اصطکاکی، مقایسهای بین نتایج شبیهسازی با نتایج آزمایشگاهی انجام شد و همسانی خوبی را نشان داد. نظر	سرعت دورانی دما
به این که نتایج تجربی متنوع، زمان بر و پرهزینه است، لذا تصمیم گرفته شد تا به کمک یک روش دیگر مثل شبیهسازی به کمک المان محدود، نتایج بیشتری ارائه گردد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد تغییر در هندسه سطح مقطع قطعه کار در استحکام کششی، طول قطعات و پلیسه تشکیل شده در ناحیه حوش یک عامل مؤثر بوده و با تغییر هندسه سطح مقطع قطعه کار، می توان خواص ناحیه حوش را بهبود بخشید.	المان محدود

Investigation of cross sectional geometry on temperature and properties of welded area in the rotational friction welding process for AL-7075-T6

Mehdi Zohoor*, Seyed Masoud Seyed Amirkhani

Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran * P.O.B. 19395-1999, Tehran, Iran, mzohoor@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	ABSTRACT
Original Research Paper Received 01 June 2016 Accepted 26 June 2016 Available Online 06 August 2016	In this paper, the effect of different workpiece geometries on the properties of welded Al-7075-T6 parts in rotational friction welding process has been investigated by using experimental and finite element approaches. Welding process is continuous drive friction welding. In this research, the samples diameter was selected equal to 25 mm and the samples length was selected equal to 75 mm. The process
Keywords: Friction Welding Rotational Speed Temperature Element Method	variables such as friction time (t1), forging time (t2), friction pressure (P1) and forging pressure (P2) were assumed to be constant, whereas rotational speeds were variable and selected equal to 2000 rpm and 2500 rpm. Three cylindrical parts with different cross sectional geometries were adopted as three samples. Finally, to verify the accuracy of numerical analysis, the experimental and thermo-mechanical simulation results were compared and good agreement was found between them. Since an experimental test is a time consuming and a costly process, it was decided to obtain more results by using an alternative method such as finite element simulation technique. Results of this study showed that changing in front geometric of workpiece is an effective factor for tensile strength, length of workpiece
	and generated flash in welded area and by changing this factor, properties of welded area can be

1- مقدمه

یکی از زیرمجموعههای جوش کاری، جوش کاری حالت جامد نامیده می شود. در جوشهای حالتجامد برخلاف فرآیندهای حالت ذوبی که محل اتصال در نتيجه ذوب موضعى دو قطعه و تداخل أنها و عمل انجماد انجام مىشد، اتصال بدون تشکیل مذاب انجام می شود. ممکن است فیلمی از فلز مذاب در

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید: M. Zohoor, S. M. Seyed Amirkhani, Investigation of cross sectional geometry on temperature and properties of welded area in the rotational friction welding process for AL-

7075-T6, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 13-20, 2016 (in Persian)

نقش مفیدی را در انجام جوش ایفا می کند.

یک مرحله میانی از عملیات بین سطوح اتصال ایجاد گردد. اگرچه فلز مذاب

معمولا، بهطور كامل از جوش جدا مى شود. اما، در حضور كوتاهمدت خود

براساس تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی گرمایی استوار است. با این روش، دو

جوش کاری اصطکاکی بهعنوان یکی از روش های جوش کاری حالت جامد

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.8.11.8



قسمت مورد اتصال را به هم نزدیک کرده و با ایجاد حرکت دورانی سریع یکی از آنها بر روی دیگری و مالش و اصطکاک دو قطعه، گرمای زیادی تولید میکند و موجب حالت پلاستیسیته در لبههای اتصال میشود. سپس، با فشار اعمال شده نهایی قطعات در هم فرو میروند و اتصال ایجاد میشود.

درحالی که جوش کاری اصطکاکی جزء فرایندهای حالت جامد در نظر گرفته شده است، با این وجود در بعضی موارد ممکن است لایهای مذاب در محل اتصال تولید شود. به هر صورت حتی در این حالت نیز جوش نهایی با وجود کار گرم شدید حالت مذاب را نشان نمیدهد. فلز پرکننده، روانساز و گاز محافظ در این فرایند مورد لزوم نیست. در این روش، ابتدا یک قطعه دوران کرده و دیگری ساکن است. هنگامی که سرعت قطعه به حد لازم رسید، دو قطعه به یکدیگر نزدیک و فشاری محوری وارد می شود. اصطکاک در محل اتصال، قطعه را به طور موضعی گرم می کند [1].

همزمان با افزایش درجه حرارت، استحکام فشاری کاهشیافته و تغییر شکل راحت ر انجام می گیرد. نقاط بلند (برآمدگیها) به سرعت محوشده و سطوح در حالت چسبندگی کامل قرار می گیرند. با فرض این که نرخ حرارت ورودی بیشتر از حرارت انتقال یافته به خارج از سطح تماس (حرارت فروکشی) باشد، درجه حرارت سطح به تدریج بالاتر رفته و حالت پلاستیکی نیز بیشتر می شود تا جایی که استحکام فشاری قطعه قادر به تحمل نیروی فشاری اعمال شده نیست و سطح زیر فشار وسیع تر شده و لبه ها در هم فرو می روند و حتی کمی به بیرون برمی گردند.

جوش کاری اصطکاکی دورانی دارای دو مکانیسم اصلی برای جوش کاری قطعات است که عبارتاند از: جوش کاری اصطکاکی مداوم و جوش کاری اصطکاکی لحظهای. در جوش کاری اصطکاکی مداوم یک قطعه توسط فک دستگاه ثابت نگه داشته میشود و قطعه دوم در تماس با آن و با یک نیروی اصطکاکی شروع به چرخیدن میکند. در زمان مشخص و معینی دستگاه متوقف میشود و یک نیروی اضافی به نام نیروی آهنگری اعمال شده و باعث می شود که دو قطعه در هم فروروند. نیروی آهنگری باید بلافاصله پس از توقف اعمال شود و اگر قبل از توقف اعمال گردد ایجاد نیروی پیچشی کرده و می تواند منجر به شکست شود [2].

در سالهای اخیر، آزمایشها و مدلهای المان محدود بسیاری درزمینه بررسی، توسعه و بهبود فرایند جوش کاری اصطکاکی دورانی انجام گرفته است که در هرکدام از آنها، یک یا چند عامل از پارامترهای مؤثر مورد بحث قرار گرفته است. وایریس و فراست [3] جوشکاری اصطکاکی خطی تیتانیم را شبیه سازی کرده و روند افزایش دما را در فاز اولیه پیشبینی کردند. کامار [4] به بررسی جوش کاری اصطکاکی دو فلز با جنس های آلیاژ تیتانیوم و فولاد ضدزنگ در حضور یکلایه واسط از جنس آلیاژ مس پرداخته و نتایج آزمون کشش و سختیسنجی فرایند را با مدل حرارتی المان محدود و نتایج ریزساختار جوش مقایسه کرده است. سینگ و همکاران [5] به بررسی تجربی و عددی جوشکاری دو آلیاژ آلومینیوم متفاوت پرداخته و نقش دما و ریزساختار جوش در استحکام کششی و سختیسنجی را بررسی کردهاند. الویس و ماسونی [6] جوش کاری اصطکاکی لحظه ای را بین دو قطعه نامتشابه مدل کردهاند اما اشارهای به جنس قطعات نکردهاند. همچنین مدل آنها دوبعدی بوده است آرچتا و همکاران [7] به بررسی پارامترهای مؤثر جوش کاری المان محدود در تنش پسماند جوش و سختی سنجی ناحیه جوش پرداخته و مراحل جوش کاری را به دو مرحله زمان جوش کاری و زمان خنککاری تقسیم نموده. پاونتان و همکارانش [8] به بهینهسازی پارامترهای

جوش برای اتصال آلیاژ فولاد کربن و آلیاژ فولاد ضدزنگ پرداخته و استحکام کششی نمونههای جوش داده شده را بررسی کردهاند.

در این مقاله به بررسی هندسه پیشانی قطعه کار در سه شکل متفاوت و جوش کاری قطعات در دو سطح سرعت دورانی برای آلیاژ آلومینیوم -7075 T6 پرداخته و به بررسی خواص جوش از جمله استحکام کششی، سختی و دمای تولید شده در ناحیه جوش در راستای بهبود و مطالعه جوش کاری اصطکاکی با توجه به نقش هندسه پیشانی قطعه کار در این فرایند پرداخته شده است.

2- کار تجربی و آزمایشگاهی

نوع جوش کاری انتخابی از نوع جوش کاری اصطکاکی دورانی پیوسته بوده و قطعات مورد بررسی در این پژوهش دارای مشخصات هندسی به شرح جدول 2 بودهاند. جوش کاری اصطکاکی دورانی این آلیاژ تحت تغییر هندسه قطعه کار در سه هندسه متفاوت با شناسه (S) با هندسه ساده، (F) با هندسه دارای سوراخ در پیشانی قطعه کار و (M) با هندسه پین در پیشانی قطعه کار مطابق "شکل2" بوده است. همچنین سرعت چرخشی (N) در دو سطح و با ثابت نگهداشتن فشار اصطکاکی (P1)، فشار آهنگری (P2)، زمان اصطکاکی (t) و زمان آهنگری (t) مطابق جدول 1 در نظر گرفته شد. تمامی قطعات این تحقیق دارای هندسه مشترک در ارتفاع آنها (a) بهاندازه 75 میلی متر و قطر آنها (b)، بهاندازه 25 میلی متر مطابق "شکل2" بود.

1-2- دستگاه جوش کاری

دستگاه مورد استفاده در جوش کاری نمونهها از نوع نیرومحر که مستقیم بوده که اعمال دوران توسط یک الکتروموتور تأمین می شود. همچنین یک سیلندر هیدرولیکی در قسمت ثابت دستگاه و پشت قطعه ثابت وجود داشته که نقش اعمال فشار اصطکاکی و فشار آهنگری را برعهده دارد. انتقال نیرو از الکتروموتور به قطعه کار توسط اسپیندل دستگاه صورت می گیرد. در "شکل 1" شمای کلی دستگاه و قسمتهای مختلف آن مشاهده می شود. در آزمایشهای انجام گرفته و نمونههای جوش داده شده به علت محدودیت در بازه کاری دستگاه، دسترسی محدود به امکانات و همچنین هزینههای انجام فرایند، جوش کاری قطعات مطابق پارامترهای ذکر شده در جدول 1 انجام گرفته است.

نوع آزمایشها به این صورت بوده که دو آزمایش جوش کاری قطعات با هندسه ساده (S-S)، دو آزمایش قطعات با هندسه سوراخ در پیشانی قطعه کار (F-F) و دو آزمایش بهصورت یک قطعه پیندار با یک قطعه سوراخدار در پیشانی قطعه کار (F-M) مطابق "شکل3" انجام گرفت. همچنین ترکیب



Fig. 1 Rotational friction welding machine overview [1]. شکل 1 شمای کلی دستگاه جوش کاری اصطکاکی دورانی [1]



Fig. 2 Geometries o welded samples.

bla 1 Walding a

شکل 2 هندسه نمونههای آماده شده برای جوشکاری

جدول 1 پارامترهای استفاده شده در جوش کاری قطعات

Table 1	weiding	process parame	eters.		
<i>t</i> ₂ (s)	<i>t</i> ₁ (s)	P_2 (MPa)	P_1 (MPa)	N (rpm)	آزمايش
1.5	3	40	20	2000	سطح 1
1.5	3	40	20	2500	سطح 2

جدول 2 پارامترهای هندسی نمونه های جوش کاری

Table 2 The s	sample details in v	welding proce	SS.	
قطر سوراخ	ارتفاع سوراخ	قطر پين	ارتفاع پين	هندسه
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	قطعهكار
-	-	-	-	سادہ
-	-	10	5	پيندار
10	5	-	-	سوراخدار

جدول 3 درصد وزنی ترکیب شیمیایی آلومینیوم T075-T6

Table .	3 Chemical composition of	r 7075-16 alloy	(wt. %)		
Mn	Mg	Fe	Cu	Cr	Al
0.1	2.87	0.35	1.31	0.21	88.5
-	ساير عناصر (مجموع)	ساير عناصر	Zn	Ti	Si
-	0.14	0.03	5.94	0.17	0.38



Fig. 3 Three types of samples prepared for welding: (1) Simple geometry (S-S); (2) Geometry with hole on the workpiece (F-F); (3) Geometry with pin and hole on the workpiece (F-M) شکل 3 نمونههای آماده شده برای جوش کاری در سه نوع (S-S) جوش کاری با هندسه ساده، (F-F) نمونههای با هندسه سوراخ در پیشانی قطعه کار و (F-M) نمونههای با هندسه پیندار و هندسه سوراخ در پیشانی قطعه کار

شيميايي آلومينيوم T6-7075 مورد استفاده در اين تحقيق بهصورت جدول 3 بەدست آمدە است.

2-2- نتايج و تحليل 1-2-2 - طول نمونهها

پس از جوش کاری قطعات با شرایط ذکر شده شکل نهایی قطعات متصل شده بهصورت "شکل4" بهدست آمد. در اندازه گیری طول کلی قطعات بیشترین کاهش طول و پلیسه تشکیل شده در ناحیه جوش مربوط به جوش کاری نمونه F-F در سرعت دورانی 2500 دور بر دقیقه بود. دلیل اصلی آن هم کمتر بودن سطح مقطع جوش و در نتیجه تحمل نیرو بیشتر بوده است. در "شکل5" طول اندازه گیری شده در هر آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان میدهد که پس از آزمایشهای با هندسه F-F بیشترین کاهش طول مربوط به نمونههای S-S بوده و درنهایت کمترین کاهش طول در آزمایش نمونههای F-M مشاهده شده است. دلیل اصلی این کمترین کاهش طول با توجه به برابر بودن تمامی شرایط حتی در سطح مقطع نمونهها می تواند جریان یافتن سخت تر فلز در هنگام فرایند جوش باشد که در منطقه بین پین و سوراخ قرار گرفته است. در تائید این گفته میتوان به کمتر بودن ناحیه پلیسه در جوش کاری نمونه های F-M نسبت به نمونه های S-S و F-F اشاره کرد. نکته دیگر در بررسی ظاهر نمونه های جوش داده شده وجود داشت هم محوری بسیار خوب در نمونههای F-M بوده که دلیل اصلی آن، رفتار پین قطعه و عدم اجازه حرکت در راستاهای غیر از محور نمونهها بود. درواقع وجود پین و سوراخ در این نمونهها نقش قید را ایفا می کند.



Fig. 4 The welded samples.



Fig. 5 The length of welded samples.

شکل 5 طول اندازه گیری شده نمونه های جوش داده شده

شکل 4 شکل نهایی نمونههای جوش داده شده

2-2-2 - استحكام جوش

بهمنظور بررسی خواص ناحیه جوش در هر نمونه، آزمایش کشش (مطابق استاندارد ASTM-E8) با سرعت کشش 1 میلیمتر بر دقیقه انجام گرفت. نتایج استخراج شده از آزمون کشش مطابق "شکل 6" نشان داد استحکام کششی نمونههای نوع M-F و S-S بسیار نزدیک به هم بوده و در نمونههای نوع F-T در مجموع استحکام کششی بالاتری مشاهده میشود. نمونههای نوع F-F دارای کمترین استحکام کششی بودند که دلیل اصلی آن در است. همچنین تغییرات دما در ناحیه جوش با توجه به مدل المان محدود که است. همچنین تغییرات دما در ناحیه جوش با توجه به مدل المان محدود که نمونههای شکسته شده پر نشدن کامل منطقه حفرهها مطابق "شکل 7" نمونههای شکسته شده پر نشدن کامل منطقه حفرهها مطابق "شکل 7" است. همچنین تغییرات دما در ناحیه جوش با توجه به مدل المان محدود که نمونههای F-F بود. درمجموع تمامی نمونهها دارای استحکام کششی نمونههای F-T بود. درمجموع تمامی نمونهها دارای استحکام کششی نمونههای F-T بود. درمجموع تمامی نمونهها دارای استحکام کششی نمونههای جوش داین 2000 دور بر دقیقه دارای استحکام بیشتر در مقایسه با نمونههای با سرعت 2000 دور بر دقیقه بودهاند که نشان بیشتر در مقایسه با نمونههای با سرعت است.

3-2-2 - محل شكست نمونهها

دو عامل اصلی تعیین کننده محل شکست نمونهها در اتصالات جوش کاری محل عیب و محل مینیمم سختی است، به طوری که اگر عیبی وجود نداشته باشد محل مرتبط با مینیمم سختی عامل اصلی شکست است. شکست در



شکل 6 استحکام کششی نمونههای جوش داده شده



Fig. 7 The cross section of broken welded part in 2500 rpm. شکل 7 سطح مقطع شکست نمونههای جوش کاری شده در سرعت دورانی 2500 دور بر دقیقه

اتصالات جوش کاری عمدتا در منطقهای رخ میدهد که کمترین سختی را داشته باشد، اما در جوش های معیوب دو عامل اصلی تعیین کننده محل شکست هستند: 1) تمرکز تنش در محل عیب 2) توزیع سختی در منطقه جوش، که امکان اتفاق افتادن هرکدام وابسته به شرایط موجود در نمونهها است [10]. در جوش هایی که عیب موجود در ناحیه جوش بزرگ باشد، عامل اصلی شکست تمرکز تنش ناشی از عیب خواهد بود، اما در اتصالاتی که عیوب بسیار ریز و کم هستند شکست ناشی از توزیع سختی در منطقه جوش است. همان گونه که در "شکل 8" مشاهده میشود در تمامی این نمونه ها شکست در ناحیه جوش رخ داده است.

2-2-4 - سختى سنجى

در جوش کاری، ماده تحت تغییر شکل بسیار زیاد و دماهای نسبتا بالا قرار می گیرد. تغییراتی از قبیل تبلور مجدد که عامل ریزساختاری ماده و بزرگ شدن رسوبات در محل اتصال می شود، قابل پیش بینی است. در سطح منطقه جوش تغییرشکلهای بزرگ با دمای بالا سبب تبلور مجدد دینامیکی و تشکیل دانههای ریز در این ناحیه می شود. در مورد آلیاژهای آلومینیوم که امکان عملیات حرارتی را دارا میباشند، وجود دمای بالا حین فرایند در ناحیه سطح مقطع قطعات و مقدار بسیار کم در منطقه متأثر از حرارت و کار مكانيكي، موجب انحلال بخشى از رسوبات مىشوند [11]. بەمنظور انجام آزمایش سختی سنجی از روش سختیسنجی ویکرز¹ استفاده شد. دستگاه مورد استفاده دارای دندانه الماس-هرم مربعالقاعده با زاویه رأس 136 درجه بود. روش کار به این صورت بود که برشی در راستای محور نمونههای جوشخورده و بر روی قطر سطح مقطع قطعات انجام شده و هر نمونه جوشخورده به دو بخش تقسیم شد. توزیع سختی نمونهها در فواصل 2 میلیمتری از یکدیگر و بر روی محور قطعات مطابق "شکل 9" انجام شد. انتخاب فاصله نقاط با توجه به توانایی دستگاه در ارائه کمترین فاصله بین دونقطه متوالى بود. نتايج حاصل از سختى سنجى نمونهها مطابق "شكل 10" بهدست آمد. همان گونه که انتظار میرفت سختی در ناحیه جوش به دلیل ریز



Fig. 8 The failure of welded samples شکل 8 محل شکست نمونههای جوش داده شده

16

بودن دانه اکه ناشی از زمان کوتاه برای تبلور مجدد است سختی بیشتری داشته و هرچه از منطقه جوش فاصله گرفته سختی در نمونه ها کاهش می باید. همچنین مطابق "شکل 10"، بیشترین سختی مربوط به نمونه های F-M بوده است. توضیح مناسب برای آن کمتر بودن ناحیه در تماس با هوا برای انتقال حرارت و در نتیجه دمای بالاتر منطقه جوش و ریزدانگی بیشتر دانه ها ناشی از این حرارت است. همان گونه که مشاهده میشود توزیع سختی در مقطع اتصال و در طول محور نمونه ها تا حدی به صورت ۳ شکل بوده که ناحیه متأثر از حرارت دارای کمترین مقدار بوده و پس از آن روند کاهشی تا آلیاژ پایه ادامه یافته که کمترین سختی مربوط به این ناحیه است [10,21]. کمترین مقدار سختی دارای توزیعی با کمترین تغییرات نیز هستند. به دلیل تر مقده و مرکز این قطعات با توجه به ماهیت هندسی که دارند در طول فرایند چندان در معرض فرایند جوش قرار نگرفته اند و تغییرات سختی نیز در آنها کمتر از سایر نمونهها بوده است.

3- شبيهسازي المان محدود

1-3- توصيف مدل

بهمنظور مدلسازی اجزا محدود فرایند هندسه قطعات طراحی شده بهصورت آنچه در کار آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت بوده و فرایند شامل سه



Fig. 9 Measured points of hardness distribution along the axis. شکل 9 نقاط اندازه گیری شده توزیع سختی در راستای محور



Fig. 10 Hardness distribution along the axis.

مرحله است. در مرحله اول دو قطعه با فشار اصطکاکی اولیه داخل هم پرس می شود. در مرحله دوم یکی از قطعات ثابت بوده و قطعه دوم با سرعت دورانی مشخص شروع به دوران می کند. در سطح مقطع، دو قطعه در تماس با هم قرار گرفته و وجود فشار اصطکاکی سبب ایجاد حرارت در ناحیه تماس می شود. در مرحله سوم سرعت دورانی قطعه دوار صفر شده و دو قطعه با فشار آهنگری مشخص داخل هم پرس می شوند. برای مدل سازی فرایند از روش مدل سازی سه بعدی مشابه کار پژوهشی آقای محمد اسیف و همکاران استفاده شده است [13]. در "شکل 11" رابطه بین متغیرهای جوش کاری در جوش کاری اصطکاکی دورانی پیوسته با زمان مشاهده می شود.

2-3- مدل مکانیکی حاکم بر جوش کاری اصطکاکی

جوش کاری اصطکاکی دورانی با توجه به ماهیتی که دارد یعنی اعمال فشار ناشی از نیروی هیدرولیکی و دوران همراه با اصطکاک که سبب تولید حرارت میشود از مدل جانسون- کوک پیروی مینماید.

در مدل جانسون - کوک، تنش جریان تابعی از کرنش، نرخ کرنش و دما است. این مدل نهتنها نرخ کرنش را در دامنه گستردهای به حساب می آورد، بلکه تغییرات دما را که ناشی از نرمی حرارتی تغییر شکل پلاستیک است، در محاسبه در نظر می گیرد. معادله مدل جانسون - کوک براساس تئوری پلاستیسیته سنتی بنا نشده، بلکه براساس کار تجربی تعریف شده است. کاربرد این مدل برای آنالیز موادی توصیه می شود که در معرض کرنش بزرگ، نرخ کرنش بالا و دمای بالا قرار می گیرند.

در این معادله، سه پاسخ کلیدی مواد عبارتاند از: کرنش سختی، نرخ کرنش مؤثر و نرمی حرارتی. این سه متغیر در معادله جانسون-کوک ادغام شدهاند. بنابراین مقاومت یک ماده تابعی است از کرنش، نرخ کرنش و دما. در مدل جاسون-کوک فرض شده است که مقاومت ماده دارای خواص فیزیکی مشابه و مستقل از تنش میانگین است. طبق معادله جانسون-کوک، تنش جریان ون میسز¹ در قطعه کار به صورت معادله (1) محاسبه می شود [14].

 $\sigma_{Y} = \left[A + B\left(\bar{\varepsilon}_{p}\right)^{n}\right] \left[1 + C \ln \dot{\varepsilon}\right] \left[1 - (T_{H})^{m}\right]$ (1)

در معادله (1) سه عبارت وجود دارد. به ترتیب از سمت چپ به راست، عبارت اول رفتار الاستو- پلاستیک ماده را نشان میدهد « $\left[A + B(ar{e_p})^n
ight]$ ». در این عبارت، تنش تسلیم اولیه بهعلاوه اثر کرنش سختی حاصل از کرنش وجود دارد. عبارت دوم رفتار ویسکوزیته ماده را مشخص میکند که در آن



Fig. 11 The relationship between the variables in continuous rotational friction welding [1].

شکل 11 رابطه بین متغیرهای در جوش کاری اصطکاکی دورانی پیوسته

شکل 10 توزیع سختی در راستای محور از سطح مقطع جوش

¹ Von Mises





شکل 12 مقایسه طول کوتاه شدگی نمونههای جوش داده شده از نتایج آزمایشگاهی و نتایج شبیهسازی المان محدود

شبیه سازی نیز میانگین بیشترین دما را برای نمونه های F-M نشان می دهد. همچنین مطابق "شکل 14" تغییرات دمایی برای نمونه های F-M کمتر از سایر نمونه ها بوده و این بیانگر این نکته است که ساختار جوش یکنواخت تر بوده و از استحکام بیشتری مطابق نتایج استحکام کششی نمونه های آزمایشگاهی برخوردار است. نمونه های F-F در مقدار بیشترین دما به دلیل سطح مقطع تماس کمتر و اعمال تنش بیشتر از سایر نمونه ها بالاتر بوده، اما تغییرات دمایی شدیدی داشته که این سبب ساختار غیریکنواخت تری شده است که در تائید آن می توان به استحکام کششی کمتر این نمونه ها نیز اشاره کرد. نمونه های S-S حد وسط میان دو نمونه ذکر شده در "شکل 14" قرار دارند و منطقه دمایی یکنواخت کمتری دارند اما به دلیل فشرده تر بودن نمودار دمایی آن ها و امکان انتقال حرارت سریع تر بعد از انجام فرایند ریز ساختار یکنواختی را داشته که سبب استحکام کششی مناسب آن ها شده است.

نمودارهای "شکل 14" همچنین بیانگر نکتهای دیگر است که مطابق نمودار فاصله بین کمینه دما با تغییر سرعت دورانی در نمونههای F-F و F-M بیشتر بوده و نمونههای S-S بهطورکلی به هم نزدیکتر هستند. درنتیجه تغییر در هندسه پیشانی قطعهکار سبب افزایش تأثیر سرعت دورانی در تغییرات کمینه دما میگردد. در بحث بیشینه دما نیز نمودار نشان میدهد



Fig. 13 (a) The results of finite element simulation, (b) The experimental results. (b) در کنار نتیجه نمونه آزمایشگاهی (a) شکل 13 نتیجه نمونه آزمایشگاهی

سختی حاصل از نرخ کرنش وجود دارد «**[1 + Cln**ɛ]». عبارت سوم، نرم شدن ماده را به خاطر حرارت دادن ماده نمایان می سازد «**[m(T_{H}) – 1]**». در مدل سازی المان محدود ضرایب مدل جانسون کوک برای آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 مطابق جدول 4 تعریف گردید. همچنین سایر خصوصیات حرارتی و مکانیکی این آلیاژ با توجه به دماهای مختلف مطابق جدول 5 تعریف گردید.

دمای اولیه هر دو قطعه 300 کلوین و برابر دمای محیط فرض می شود تمامی سطوح دو قطعه دارای انتقال حرارت کنوکسیونی¹ آزاد با هوای محیط فرض می شود فرض کنوکسیونی به صورت یک مقدار متوسط و برابر 15 فرض می شود فرض کنوکسیونی به دلیل تغییرات اندک دمای سطوح دورتر W/m²K در نظر گرفته می شود. به دلیل تغییرات اندک دمای سطوح دورتر از سطوح تماس، فرض یک مقدار ثابت و مستقل از دما برای ضریب کنوکسیون، فرض معقولی است.

3-3- مدل المان محدود

برای انجام تحلیلها از نرمافزار تجاری آباکوس نسخه 14-6 استفاده شد. نوع المانهای به کاررفته در مدل با توجه به این که فرایند یک فرایند حرارتی-مکانیکی است از نوع 3D8RT است. همچنین در بخش شرایط مرزی نوع اصطکاک از مدل کولومب² بوده که از رایجترین فرضها برای سادهسازی به شمار می آید. تحلیلها در تعداد 6 عدد و با توجه به هندسه نمونهها انجام شد. طول کوتاه شدگی قطعات جوش دادهشده از نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج شبیه سازی المان محدود مطابق "شکل 12" است. این نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد همچنین مقایسه پلیسه تشکیل شده در ناحیه آزمایشگاهی نشان می دهد همچنین مقایسه پلیسه تشکیل شده در ناحیه مطابق "شکل 13" بوده که تقارن بسیار خوبی با نمونه جوش داده شده دارد. نمودارهای خروجی دما برای نمونهها در راستای شعاع پروفیل نمونهها از مدل سازی المان محدود استخراج گردیده و نتایج به دست آمده در "شکل 14

مدلسازی المان محدود استحراج کردیده و نتایج بهدست مده در مشکل ۱4 مشاهده می شود. همان گونه که در بخش آزمایشگاهی پیش بینی شد دادههای

جدول 4 ضرایب مدل جانسون-کوک برای آلیاژ T6-7075 [15]

Table 4	The Johns	on-Cook m	odel coef	ficients for	r 7075-T6	alloy.
T_m (°C)	A (MPa)	B (MPa)	n	С	т	نام ضريب
600	546	678	0.71	0.024	1.56	مقدار

[16] 7075-T6	برای آلیاژ	-مکانیکی	حرارتي	خصوصيات	ح 5	جدوا
--------------	------------	----------	--------	---------	-----	------

Table 5 N	Material pro	operties of	aluminum	alloy 7075-T6	
<i>T</i> =480 °С	<i>T</i> =300 °С	<i>T</i> =200 °С	<i>T</i> =100 °С	<i>T</i> =20 °C	Al 7075-T6
-	-	-	-	71.7	مدول يانگ
					(MPa)
0.12	0.18	0.23	0.65	0.6	ضريب اصطكاك
96	98	100	120	130	رسانندگی گرمایی (Wm ⁻¹ c ⁻¹)
-	-	-	-	14.7×10 ⁻⁶	انبساط حرارتي
2585	2630	2760	2790	2810	چگالی(kgm ⁻³)
1245	1200	1125	1020	960	گرمای ویژہ (JkgK ⁻¹)
-	-	-	-	0.33	ضريب پواسون

¹ Convection ² Coulomb

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.8.11.8



Fig. 14 Temperature diagram of welded samples (simulation results). شكل 14 نمودار دمايى نمونههاى جوشكارى شده (نتايج شبيهسازى)

که در راستای شعاعی این مقدار در نمونههای F-F بیش از سایر نمونهها به سمت محیط قطعهکار بوده و این خود میتواند دلیل دیگری برای وجود پلیسه بیشتر در این نمونهها باشد. نمونههای F-M دارای بیشینه دما در نواحی داخلی تر محیط بوده و دارای کمترین پلیسه تشکیل شده هستند.

در "شكل 15" تنش وارد شده به نمونهها در سطح مقطع هر قطعه براى سرعت دورانی 2500 دور بر دقیقه مشاهده می شود. نتایج نشان می دهد فشار آهنگری در نمونه F-F مطابق پیشبینی آنچه در بخش آزمایشگاهی به آن اشاره شد دارای حداکثر تأثیر در تنش وارد شده بوده و در دو نمونه S-S و F-M مقادیر بیشینه تنش بسیار نزدیک است. وجود این تنش در کنار حرارت تولیدشده در ناحیه محیطی نمونه F-F سبب ایجاد پلیسه بیشتر شده که مطلوب نیست. توزیع تنش در نمونه F-M نسبت به دو نمونه دیگر دارای یکنواختی بهتری بوده و تغییرات در بازه کمتری قرار دارد. در تمامی نمونهها تنش در ناحیه محیطی کمترین مقدار را داشته که دلیل اصلی آن تماس کمتر دو قطعه با یکدیگر بهدلیل ایجاد پلیسه در این ناحیه است و بیشینه تنش وارد شده در منطقه میانی شعاع نمونهها مشاهده می گردد. تنش ایجاد شده در نمونه F-F با اختلاف نسبت به نمونههای دیگر دارای بیشترین مقدار است که با توجه به سطح مقطع کمتر تماس در این نمونه این اتفاق بدیهی است. بهطورکلی وجود پلیسه بیشتر بعد از فرایند جوشکاری سبب کاهش طول بیشتر نمونهها در کنار نیاز به عملیات جانبی همچون ماشین کاری برای آمادهسازی نهایی قطعه کار میشود.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تجربی و عددی تأثیر هندسه سطح مقطع قطعه کار در فرایند جوش کاری اصطکاکی دورانی در مورد دما، سختی و استحکام کششی جوش برای آلیاژ آلومینیوم TO75-76 مورد استفاده در صنایع هوافضا پرداخته شد. در رابطه با خصوصیات اتصالات ایجاد شده، نتایج ذیل استنتاج گردید:

1- در هندسه نمونههای F-M کمترین تغییر در طول نمونهها مشاهده شد و همچنین پلیسه تولیدشده در ناحیه جوش کمتر از سایر نمونهها بود. بیشترین تغییر در طول و پلیسه تولیدشده برای نمونههای F-F بود که دلیل اصلی آن سطح مقطع کمتر در تماس و تحمل فشار بیشتر در ناحیه جوش توضیح داده شد.



Fig. 15 Stress distribution across the cross-section of three samples at a rotational speed of 2500 rpm.

شکل 15 تنش وارد شده به نمونهها در سطح مقطع هر قطعه برای سرعت دورانی 2500 دور بر دقیقه

- -2 سطح مقطع در تماس مستقیم نمونههای F-M و S-S برابر بود اما بااینوجود پلیسه تشکیل شده در نمونههای F-M کمتر بود که دلیل اصلی آن منطقه پین و سوراخ بوده که امکان جریان فلز را کندتر کرده و نمونهها پلیسه کمتری داشتند.
- هم محوری قطعات جوش خورده در نمونه های F-M به دلیل نقش پین و سوراخ به عنوان قید در شروع فرایند بسیار عالی بود و نسبت به دو نوع نمونه F-F و S-S هم محوری دقیق تر کاملا مشهود بود.
- 4- استحکام کششی نمونه ها در کل از استحکام کششی آلیاژ پایه کمتر بوده و این جوش پذیری ضعیف آلومینیوم To75- 70 را تأیید میکند. همچنین نمونه های S-S و M-F دارای بیشترین استحکام کششی بوده که در سرعت دورانی 2500 دور بر دقیقه بهبود استحکام کششی برای تمامی نمونه ها نسبت به سرعت دورانی 2000 دور بر دقیقه مشاهده شد. نمونه های F-F کمترین استحکام کششی را داشته که در توضیح آن پر نشدن کامل حفره ها بیان شد.
- -5 محل شکست نمونهها برای تمامی نمونهها در ناحیه جوش بوده که
 F-F حاکی از توزیع سختی در ناحیه جوش است. البته در نمونههای
 عامل تمرکز تنش ناشی از حفرهها موجب شکست جوش بوده است.
- 6- سختی نمونهها بر روی محور قطعه کار و در فواصل معینی اندازه گیری شد و نمونه F-F به دلیل در گیری کمتر ناشی از وجود سوراخها در ناحیه مرکزی، تغییر چندانی با فلز پایه نداشته است. در نمونههای -F M و S-S سختی بسیار به هم نزدیک بوده و تغییرات بیشتری بافاصله از سطح مقطع جوش مشاهده میشود.

6- مراجع

- K. Weman, 8 Pressure welding methods, in: Welding Processes Handbook, pp. 80-92,: Woodhead Publishing, 2003.
- [2] A. O'Brien, 6 Friction Welding, in: Welding Handbook, pp. 184-208, Miami: American Welding Society, 2007.
- [3] A. Vairis, M. Frost, Modelling the linear friction welding of titanium blocks, Materials Science and Engineering: A, Vol. 292, No. 1, pp. 8-17, 2000.
- [4] R. Kumar, M. Balasubramanian, Experimental investigation of Ti-6Al-4V titanium alloy and 304L stainless steel friction welded with copper interlayer, *Defence Technology*, Vol. 11, No. 1, pp. 65-75, 2015.
- [5] S. K. Singh, K. Chattopadhyay, G. Phanikumar, P. Dutta, Experimental and numerical studies on friction welding of thixocast A356 aluminum alloy, *Acta Materialia*, Vol. 73, pp. 177-185, 2014.
 [6] L. D'Alvise, E. Massoni, S. J. Walløe, Finite element modelling of the inertia
- [6] L. D'Alvise, E. Massoni, S. J. Walløe, Finite element modelling of the inertia friction welding process between dissimilar materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125–126, pp. 387-391, 2002.
- [7] O. Iracheta, C. J. Bennett, W. Sun, A sensitivity study of parameters affecting residual stress predictions in finite element modelling of the inertia friction welding process, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 71, pp. 180-193, 2015.
- [8] R. Paventhan, P. R. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian, Optimization of Friction Welding Process Parameters for Joining Carbon Steel and Stainless Steel, *Journal of Iron and Steel Research, International*, Vol. 19, No. 1, pp. 66-71, 2012.
- [9] G. E. Dieter, H. A. Kuhn, S. Lee Semiatin, 7 Hot-Tension Testing, in: Handbook of Workability and Process Design, pp. 68-80: ASM International, 2003.
- [10] P. L. Threadgill, A. J. Leonard, H. R. Shercliff, P. J. Withers, Friction stir welding of aluminium alloys, *International Materials Reviews*, Vol. 54, No. 2, pp. 49-93, 2009.
- [11] 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 فارسي)
- [12] P. Bahemmat, M. Haghpanahi, M. K. Besharati Givi, K. Reshad Seighalani, Study on dissimilar friction stir butt welding of AA7075-O and AA2024-T4 considering the manufacturing limitation, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 9, pp. 939-953, 2012.
 [13] M. Asif, M, K. A. Shrikrishana, P. Sathiya, Finite element modelling and
- [13] M. Asif. M, K. A. Shrikrishana, P. Sathiya, Finite element modelling and characterization of friction welding on UNS S31803 duplex stainless steel joints, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 18, No. 4, pp. 704-712, 2015.
- [14] M. Zohoor, 2-Theory of elasticity and plasticity, in: Metal Forming, 3nd edition, pp. 65-68, Tehran: Khaje Nasir Toosi University of Technology Press, 2015. (in Persian فارسی)
- [15] N. S. Brar, V. S. Joshi, B. W. Harris, CONSTITUTIVE MODEL CONSTANTS FOR AI7075-T651 and AI7075-T6, AIP Conference Proceedings, Vol. 1195, No. 1, pp. 945-948, 2009.
- [16] K. M. Zwilsky, ASM International. Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, in: ASM Handbook, pp. 69-222: ASM International Handbook Committee, 1992.

- 7- مدلسازی المان محدود فرایند نشان داد که تغییرات دمایی در نمونههای F-F بسیار زیاد بوده و برای توضیح این پدیده کم بودن سطح در تماس و کانتور تنش بالا در ناحیه تماس بیان شد.
- 8- مطابق نتایج دمایی در سطح مقطع نمونهها تغییر هندسه سبب تغییر در تأثیر سرعت دورانی در کمینه دمای قطعات گردیده بهطوریکه نمونههای F-F و F-M نسبت به نمونههای S-S در تغییر سرعت دورانی دارای اختلاف دمایی بیشتری بودند.
- 9- تنش وارد به نمونه در مدل سازی المان محدود وجود پلیسه بیشتر در نمونه های F-F را تائید کرده و نشان داد فشار وارد به منطقه جوش در این نمونه ها بیشتر بوده و سبب جریان ماده در هر دو زمان فشار اصطکاکی و فشار آهنگری شده است.
- 10- توزیع تنش یکنواخت تر در مدل سازی المان محدود نمونه F-M سبب اتصالی یکنواخت تر و استحکام تسلیم بهتر این نمونه نسبت به نمونههای دیگر شد.

5- فهرست علائم

A	تنش تسليم اوليه ماده (MPa)
В	ضریب مقاومت یا مدول سختی ماده (MPa)
С	ضریب وابستگی به نرخ کرنش
n	توان کرنش سختی
m	ضریب نرمی حرارتی
$T_H = \frac{T - T_R}{T_M - T_R}$	دمای بدون بعد هومولوگوس
T_m	دمای نقطه ذوب ماده (K)
T_R	دمای مرجع (دمای اتاق) (K)
Т	دمای جاری قطعهکار (K)
علائم يونانى	
σ_Y	تنش معادل یا تنش جریان (MPa)
$\overline{\mathcal{E}_n}$	کرنش بلاستیک معادل

کرنش پلاستیک معادل
$$ar{ar{c}_p}$$
 نرخ کرنش پلاستیک مغادل $\dot{ar{c}_p}$