



## بررسی هندسه سطح مقطع قطعه کار در دما و خواص منطقه جوش آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 در جوش کاری اصطکاکی دورانی

مهدی ظهور<sup>1\*</sup>، سید مسعود سید امیرخانی<sup>2</sup>

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

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

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 خرداد 1395

پذیرش: 06 تیر 1395

ارائه در سایت: 16 مرداد 1395

کلید واژگان:

جوش کاری اصطکاکی

سرعت دورانی

دما

المان محدود

### چکیده

در این مقاله به بررسی تأثیر هندسه سطح مقطع قطعه کار در جوش کاری اصطکاکی دورانی برای آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 پرداخته شده است. جوش کاری از نوع اصطکاکی دورانی پیوسته بوده و قطعات مورد بررسی دارای طول 75 میلی متر، و قطر 25 میلی متر بوده اند. 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 ( $P_1$ )، فشار آهنگری ( $P_2$ ) و زمان آهنگری ( $t_2$ ) انجام گرفت. سرعت های 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 به صورت استوانه ای در نظر قرار گرفته است. نتایج حاصل از آزمایش ها و نتایج شبیه سازی حرارتی - مکانیکی با استفاده از روش المان محدود در ناحیه جوش مقایسه گردید. برای تأیید روش آنالیز و صحت نتایج شبیه سازی فرایند جوش کاری اصطکاکی، مقایسه ای بین نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی انجام شد و همسانی خوبی را نشان داد. نظر به این که نتایج تجربی متنوع، زمان بر و پرهزینه است، لذا تصمیم گرفته شد تا به کمک یک روش دیگر مثل شبیه سازی 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 جوش یک عامل مؤثر بوده و با تغییر هندسه سطح مقطع قطعه کار، می توان خواص ناحیه جوش را بهبود بخشید.

## 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

Original Research Paper

Received 01 June 2016

Accepted 26 June 2016

Available Online 06 August 2016

### Keywords:

Friction Welding

Rotational Speed

Temperature

Element Method

### ABSTRACT

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 variables such as friction time ( $t_1$ ), forging time ( $t_2$ ), friction pressure ( $P_1$ ) and forging pressure ( $P_2$ ) 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 improved.

### 1- مقدمه

یک مرحله میانی از عملیات بین سطوح اتصال ایجاد گردد. اگرچه فلز مذاب معمولاً، به طور کامل از جوش جدا می شود. اما، در حضور کوتاه مدت خود نقش مفیدی را در انجام جوش ایفا می کند. جوش کاری اصطکاکی به عنوان یکی از روش های جوش کاری حالت جامد براساس تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی گرمایی استوار است. با این روش، دو

یکی از زیرمجموعه های جوش کاری، جوش کاری حالت جامد نامیده می شود. در جوش های حالت جامد برخلاف فرآیندهای حالت ذوبی که محل اتصال در نتیجه ذوب موضعی دو قطعه و تداخل آن ها و عمل انجماد انجام می شود، اتصال بدون تشکیل مذاب انجام می شود. ممکن است فیلمی از فلز مذاب در

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.SJW.ir

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 "شکل 2" بوده است. همچنین سرعت چرخشی ( $N$ ) در دو سطح و با ثابت نگهداشتن فشار اصطکاکی ( $P_1$ )، فشار آهنگری ( $P_2$ )، زمان اصطکاکی ( $t_1$ ) و زمان آهنگری ( $t_2$ ) مطابق جدول 1 در نظر گرفته شد. تمامی قطعات این تحقیق دارای هندسه مشترک در ارتفاع آن‌ها ( $a$ ) به اندازه 75 میلی‌متر و قطر آن‌ها ( $b$ )، به اندازه 25 میلی‌متر مطابق "شکل 2" بود.

## 2-1- دستگاه جوش کاری

دستگاه مورد استفاده در جوش کاری نمونه‌ها از نوع نیرومحرکه مستقیم بوده که اعمال دوران توسط یک الکتروموتور تأمین می‌شود. 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 می‌گیرد. در "شکل 1" شمای کلی دستگاه و قسمت‌های مختلف آن مشاهده می‌شود. در آزمایش‌های انجام گرفته و نمونه‌های جوش داده شده به‌علت 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 "شکل 3" انجام گرفت. همچنین ترکیب

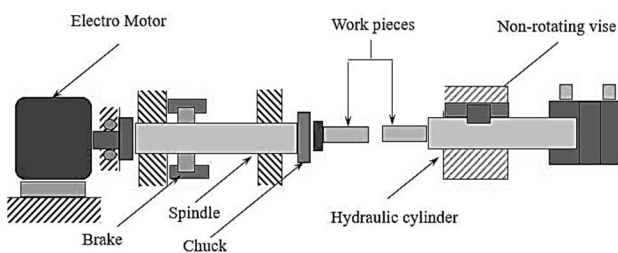


Fig. 1 Rotational friction welding machine overview [1].

شکل 1 شمای کلی دستگاه جوش کاری اصطکاکی دورانی [1]

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.

درحالی‌که جوش کاری اصطکاکی جزء فرایندهای حالت جامد در نظر گرفته شده است، با این وجود در بعضی موارد ممکن است لایه‌های 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 می‌شود. اصطکاک در محل اتصال، قطعه را به‌طور موضعی گرم می‌کند [1].

هم‌زمان با افزایش درجه حرارت، استحکام فشاری کاهش یافته و تغییر شکل راحت‌تر انجام می‌گیرد. نقاط بلند (برآمدگی‌ها) به‌سرعت محو شده و سطوح در حالت چسبندگی کامل قرار می‌گیرند. با فرض این‌که نرخ حرارت ورودی بیشتر از حرارت انتقال یافته به خارج از سطح تماس (حرارت فروکشی) باشد، درجه حرارت سطح به‌تدریج بالاتر رفته و حالت پلاستیکی نیز بیشتر می‌شود تا جایی که استحکام فشاری قطعه قادر به تحمل نیروی فشاری اعمال شده نیست و سطح زیر فشار وسیع‌تر شده و لبه‌ها در هم فرو می‌روند و حتی کمی به بیرون برمی‌گردند.

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 می‌شود 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 می‌تواند منجر به شکست شود [2].

در سال‌های اخیر، آزمایش‌ها و مدل‌های المان محدود بسیاری در زمینه بررسی، توسعه و بهبود فرایند جوش کاری اصطکاکی دورانی انجام گرفته است که در هر کدام از آن‌ها، یک یا چند عامل از پارامترهای مؤثر مورد بحث قرار گرفته است. وایریس و فراست [3] جوش کاری اصطکاکی خطی تیتانیوم را شبیه‌سازی کرده و روند افزایش دما را در فاز اولیه پیش‌بینی کردند. کامار [4] به بررسی جوش کاری اصطکاکی دو فلز با جنس‌های 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 جوش کاری 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 لحظه‌ای 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 سختی‌سنجی ناحیه جوش پرداخته و مراحل جوش کاری را به دو مرحله زمان جوش کاری و زمان خنک کاری تقسیم نموده. پاونتان و همکارانش [8] به بهینه‌سازی پارامترهای

شیمیایی آلومینیوم 7075-T6 مورد استفاده در این تحقیق به صورت جدول 3 به دست آمده است.

2-2- نتایج و تحلیل

1-2-2- طول نمونه‌ها

پس از جوش کاری قطعات با شرایط ذکر شده شکل نهایی قطعات متصل شده به صورت "شکل 4" به دست آمد. در اندازه‌گیری 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 "شکل 5" طول اندازه‌گیری 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 در نهایت کمترین کاهش طول در آزمایش‌های F-M مشاهده شده است. دلیل اصلی این کمترین کاهش طول با توجه به برابر بودن تمامی شرایط حتی در سطح مقطع نمونه‌ها می‌تواند جریان یافتن سخت‌تر 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 نمونه‌های F-M نسبت به نمونه‌های S-S و F-F اشاره کرد. نکته دیگر در بررسی ظاهر نمونه‌های جوش داده شده وجود داشت هم‌محوری 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. در واقع وجود پین و سوراخ در این نمونه‌ها نقش قید را ایفا می‌کند.

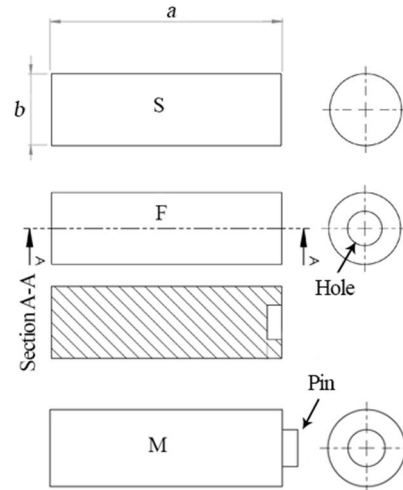


Fig. 2 Geometries of welded samples.

شکل 2 هندسه نمونه‌های آماده شده برای جوش کاری

جدول 1 پارامترهای استفاده شده در جوش کاری قطعات

Table 1 Welding process parameters.

آزمایش	$t_2$ (s)	$t_1$ (s)	$P_2$ (MPa)	$P_1$ (MPa)	$N$ (rpm)
سطح 1	1.5	3	40	20	2000
سطح 2	1.5	3	40	20	2500

جدول 2 پارامترهای هندسی نمونه‌های جوش کاری

Table 2 The sample details in welding process.

هندسه قطعه کار	ارتفاع پین (mm)	قطر پین (mm)	ارتفاع سوراخ (mm)	قطر سوراخ (mm)
ساده	-	-	-	-
پین دار	5	10	-	-
سوراخ دار	-	-	5	10

جدول 3 درصد وزنی ترکیب شیمیایی آلومینیوم 7075-T6

Table 3 Chemical composition of 7075-T6 alloy (wt. %)

Mn	Mg	Fe	Cu	Cr	Al
0.1	2.87	0.35	1.31	0.21	88.5
-	سایر عناصر (مجموع)	سایر عناصر	Zn	Ti	Si
-	0.14	0.03	5.94	0.17	0.38

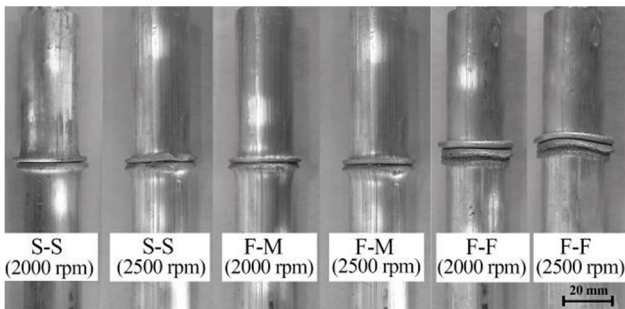


Fig. 4 The welded samples.

شکل 4 شکل نهایی نمونه‌های جوش داده شده

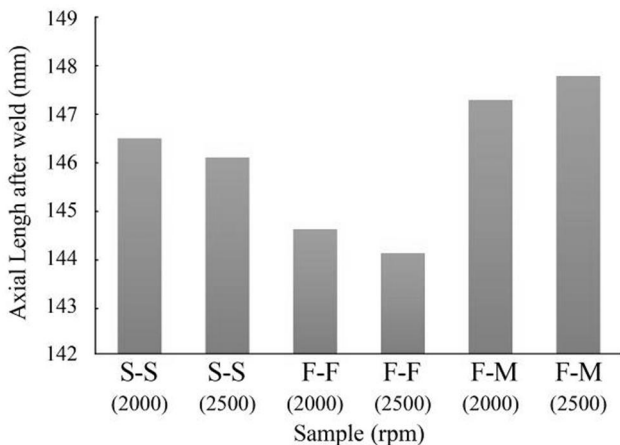


Fig. 5 The length of welded samples.

شکل 5 طول اندازه‌گیری شده نمونه‌های جوش داده شده

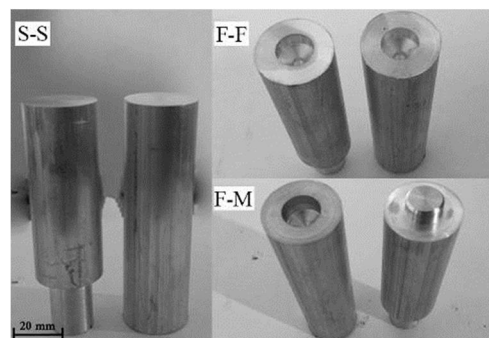


Fig. 3 Three types of samples prepared for welding: (1) Simple geometry (S-S); (2) Geometry with hole on the workpiece (F-F); (3) Geometry with pin and hole on the workpiece (F-M)

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 پین دار و هندسه سوراخ در پیشانی قطعه کار

2-2-2- استحکام جوش

اتصالات جوش کاری عمدتاً در منطقه‌ای رخ می‌دهد که کمترین سختی را داشته باشد، اما در جوش‌های معیوب دو عامل اصلی تعیین‌کننده محل شکست هستند: 1) تمرکز تنش در محل عیب 2) توزیع سختی در منطقه جوش، که امکان اتفاق افتادن هر کدام وابسته به شرایط موجود در نمونه‌ها است [10]. در جوش‌هایی 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. همان‌گونه که در "شکل 8" مشاهده می‌شود در تمامی این نمونه‌ها شکست در ناحیه جوش رخ داده است.

4-2-2- سختی‌سنجی

در جوش کاری، ماده تحت تغییر شکل بسیار زیاد و دماهای نسبتاً بالا قرار می‌گیرد. تغییراتی از قبیل تبلور مجدد که عامل ریزساختاری ماده و بزرگ شدن رسوبات در محل اتصال می‌شود، قابل پیش‌بینی است. در سطح منطقه جوش تغییرشکل‌های بزرگ با دمای بالا سبب تبلور مجدد دینامیکی و تشکیل دانه‌های ریز در این ناحیه می‌شود. 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 مکانیکی، موجب انحلال بخشی از رسوبات می‌شوند [11]. به‌منظور انجام آزمایش سختی‌سنجی از روش سختی‌سنجی ویکرز<sup>1</sup> استفاده شد. دستگاه مورد استفاده دارای دندان‌ه‌الماس-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 دو نقطه متوالی بود. نتایج حاصل از سختی‌سنجی نمونه‌ها مطابق "شکل 10" به‌دست آمد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت سختی در ناحیه جوش به دلیل ریز

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 F-M و S-S بسیار نزدیک به هم بوده و در نمونه‌های نوع F-M در مجموع استحکام کششی بالاتری مشاهده می‌شود. نمونه‌های نوع F-F دارای کمترین استحکام کششی بودند که دلیل اصلی آن در 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 در بخش بعد مورد بررسی قرار می‌گیرد عامل دیگر کم بودن استحکام کششی نمونه‌های F-F بود. در مجموع تمامی نمونه‌ها دارای استحکام کششی پایین‌تری نسبت به فلز پایه بودند. جوش‌پذیری ضعیف آلیاژ 7075-T6 اصلی‌ترین دلیل کم بودن استحکام کششی نمونه‌های جوش داده شده بود [9]. در کل نیز نمونه‌های با سرعت دورانی 2500 دور بر دقیقه دارای استحکام بیشتر در مقایسه با نمونه‌های با سرعت 2000 دور بر دقیقه بوده‌اند که نشان از جوش‌پذیری بهتر آلیاژ در این سرعت است.

3-2-2- محل شکست نمونه‌ها

دو عامل اصلی تعیین‌کننده محل شکست نمونه‌ها در اتصالات جوش کاری محل عیب و محل مینیمم سختی است، به‌طوری‌که اگر عیبی وجود نداشته باشد محل مرتبط با مینیمم سختی عامل اصلی شکست است. شکست در

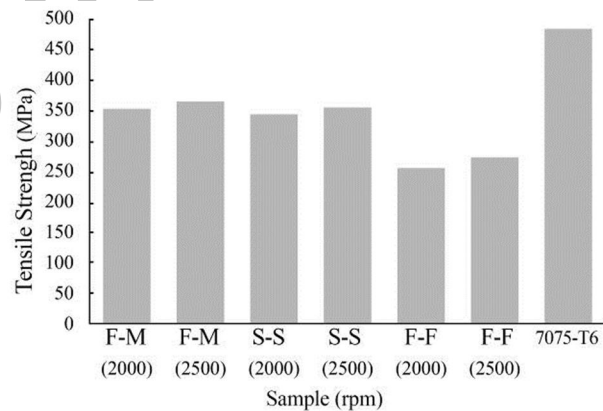


Fig. 6 The tensile strength of welded samples.

شکل 6 استحکام کششی نمونه‌های جوش داده شده

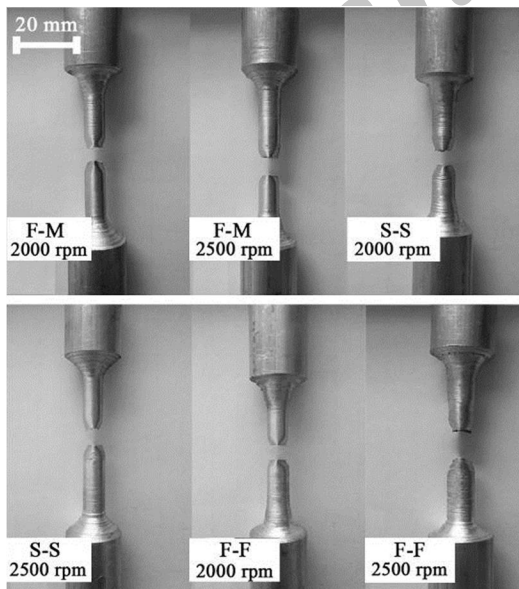


Fig. 8 The failure of welded samples

شکل 8 محل شکست نمونه‌های جوش داده شده

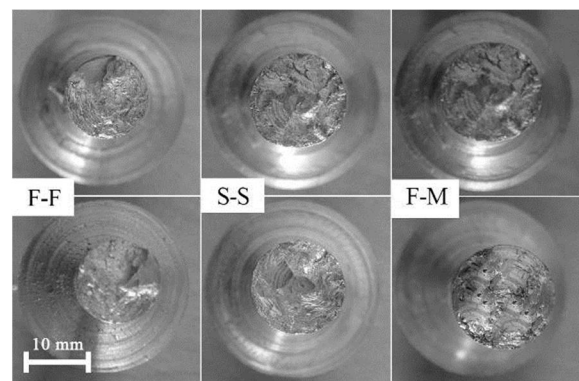


Fig. 7 The cross section of broken welded part in 2500 rpm.

شکل 7 سطح مقطع شکست نمونه‌های جوش کاری شده در سرعت دورانی 2500 دور بر دقیقه

<sup>1</sup> Vickers

مرحله است. در مرحله اول دو قطعه با فشار اصطکاکی اولیه داخل هم پرس می‌شود. در مرحله دوم یکی از قطعات ثابت بوده و قطعه دوم با سرعت دورانی مشخص شروع به دوران می‌کند. در سطح مقطع، دو قطعه در تماس با هم قرار گرفته و وجود فشار اصطکاکی سبب ایجاد حرارت در ناحیه تماس می‌شود. در مرحله سوم سرعت دورانی قطعه دوار صفر شده و دو قطعه با فشار آهنگری مشخص داخل هم پرس می‌شوند. برای مدل‌سازی فرایند از روش مدل‌سازی سه‌بعدی 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 می‌شود.

### 3-2- 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 نه تنها نرخ کرنش را در دامنه گسترده‌ای به حساب می‌آورد، بلکه تغییرات دما را که ناشی از نرمی حرارتی تغییر شکل پلاستیک است، در محاسبه در نظر می‌گیرد. معادله مدل جانسون-کوک براساس تئوری پلاستیسیته سنتی بنا نشده، بلکه براساس کار تجربی تعریف شده است. کاربرد این مدل برای آنالیز موادی توصیه می‌شود که در معرض کرنش بزرگ، نرخ کرنش بالا و دمای بالا قرار می‌گیرند.

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 جانسون-کوک فرض شده است که مقاومت ماده دارای خواص فیزیکی مشابه و مستقل از تنش میانگین است. طبق معادله جانسون-کوک، تنش جریان ون میسر<sup>1</sup> در قطعه کار به صورت معادله (1) محاسبه می‌شود [14].

$$\sigma_{\dot{\gamma}} = [A + B(\dot{\epsilon}_p)^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}][1 - (T_H)^m] \quad (1)$$

در معادله (1) سه عبارت وجود دارد. به ترتیب از سمت چپ به راست، عبارت اول رفتار الاستو-پلاستیک ماده را نشان می‌دهد « $[A + B(\dot{\epsilon}_p)^n]$ ». 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

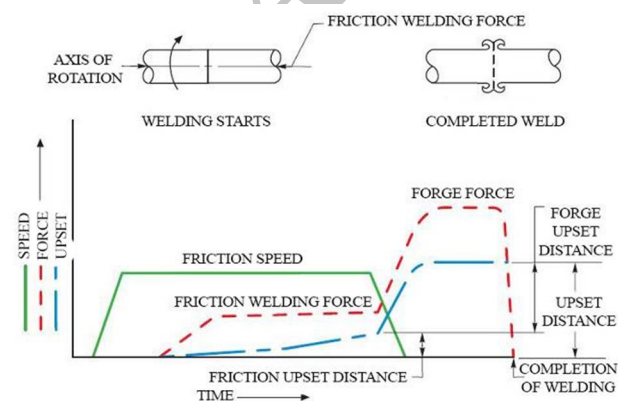


Fig. 11 The relationship between the variables in continuous rotational friction welding [1].

شکل 11 رابطه بین متغیرهای در جوش کاری اصطکاکی دورانی پیوسته

بودن دانه‌ها که ناشی از زمان کوتاه برای تبلور مجدد است سختی بیشتری داشته و هرچه از منطقه جوش فاصله گرفته سختی در نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین مطابق "شکل 10"، بیشترین سختی مربوط به نمونه‌های 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 ریزدانه‌گی بیشتر دانه‌ها ناشی از این حرارت است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود توزیع سختی در مقطع اتصال و در طول محور نمونه‌ها تا حدی به صورت W 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 [12,10]. در مقایسه نمودارها کمترین سختی مربوط به نمونه‌های F-F بوده که در کنار کمترین مقدار سختی دارای توزیعی با کمترین تغییرات نیز هستند. به دلیل آن که سختی سنجی نمونه‌ها در راستا و بر روی محور طولی قطعات انجام شده و مرکز این قطعات با توجه به ماهیت هندسی که دارند در طول فرایند چندان در معرض فرایند جوش قرار نگرفته‌اند و تغییرات سختی نیز در آن‌ها کمتر از سایر نمونه‌ها بوده است.

### 3- شبیه‌سازی المان محدود

#### 1-3- توصیف مدل

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

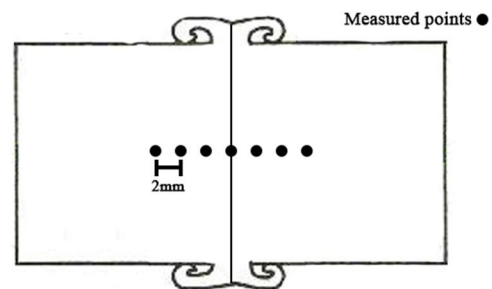


Fig. 9 Measured points of hardness distribution along the axis.

شکل 9 نقاط اندازه‌گیری شده توزیع سختی در راستای محور

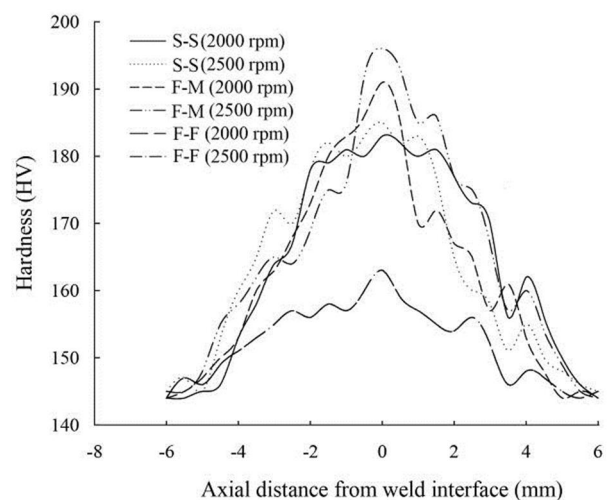


Fig. 10 Hardness distribution along the axis.

شکل 10 توزیع سختی در راستای محور از سطح مقطع جوش

<sup>1</sup> Von Mises



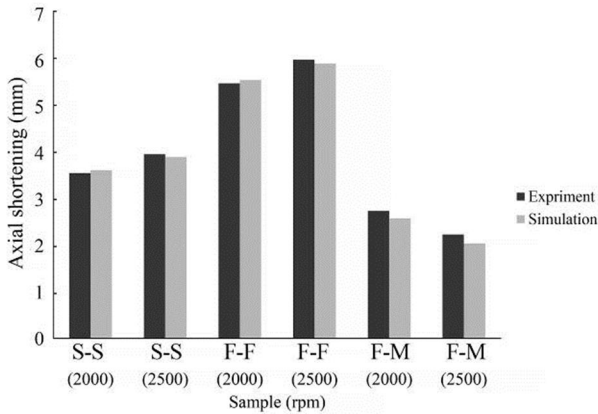


Fig. 12 Axial Shortening of samples in experiment result and simulation result.

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

شبیه‌سازی نیز میانگین بیشترین دما را برای نمونه‌های F-M نشان می‌دهد. همچنین مطابق "شکل 14" تغییرات دمایی برای نمونه‌های F-M کمتر از سایر نمونه‌ها بوده و این بیانگر این نکته است که ساختار جوش یکنواخت‌تر بوده و از استحکام بیشتری مطابق نتایج استحکام کششی نمونه‌های آزمایشگاهی برخوردار است. نمونه‌های F-F در مقدار بیشترین دما به دلیل سطح مقطع تماس کمتر و اعمال تنش بیشتر از سایر نمونه‌ها بالاتر بوده، اما تغییرات دمایی شدیدی داشته که این سبب ساختار غیریکنواخت‌تری شده است که در تأیید آن می‌توان به استحکام کششی کمتر این نمونه‌ها نیز اشاره کرد. نمونه‌های S-S حد وسط میان دو نمونه ذکر شده در "شکل 14" قرار دارند و منطقه دمایی یکنواخت کمتری دارند اما به دلیل فشرده‌تر بودن نمودار دمایی آن‌ها و امکان انتقال حرارت سریع‌تر بعد از انجام فرایند ریزساختار یکنواختی را داشته که سبب استحکام کششی مناسب آن‌ها 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 به‌طور کلی به هم نزدیک‌تر هستند. در نتیجه تغییر در هندسه پیشانی قطعه کار سبب افزایش تأثیر سرعت دورانی در تغییرات کمینه دما می‌گردد. در بحث پیشینه دما نیز نمودار نشان می‌دهد

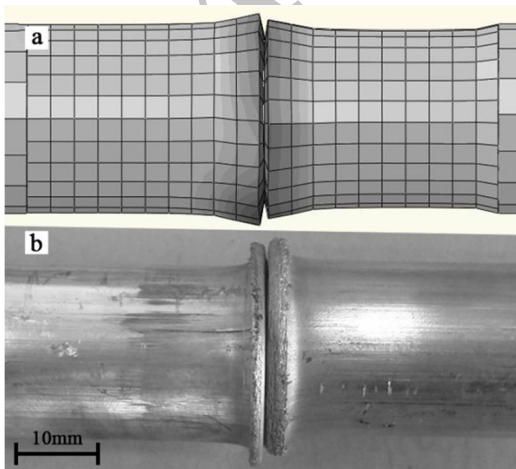


Fig. 13 (a) The results of finite element simulation, (b) The experimental results.

شکل 13 نتیجه مدل‌سازی المان محدود (a) در کنار نتیجه نمونه آزمایشگاهی (b)

سختی حاصل از نرخ کرنش وجود دارد « $[1 + Cln\dot{\epsilon}]$ ». عبارت سوم، نرم شدن ماده را به خاطر حرارت دادن ماده نمایان می‌سازد « $[1 - (T_H)^m]$ ». در مدل‌سازی 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 می‌شود تمامی سطوح دو قطعه دارای انتقال حرارت کنوکسیونی<sup>1</sup> آزاد با هوای محیط فرض می‌شود فرض کنوکسیونی به صورت یک مقدار متوسط و برابر 15 W/m<sup>2</sup>K در نظر گرفته می‌شود. 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 6-14 استفاده شد. نوع المان‌های به‌کاررفته 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 کولومب<sup>2</sup> بوده که از رایج‌ترین فرض‌ها برای ساده‌سازی به شمار می‌آید. تحلیل‌ها در تعداد 6 عدد و با توجه به هندسه نمونه‌ها انجام شد. طول کوتاه شدگی قطعات جوش داده شده از نتایج آزمایشگاهی در مقایسه با نتایج شبیه‌سازی المان محدود مطابق "شکل 12" است. این نتایج بسیار به هم نزدیک بوده و همسانی مناسبی را بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد همچنین مقایسه پلیسه تشکیل شده در ناحیه جوش برای مدل‌سازی نوع S-S و در سرعت دورانی 2000 دور بر دقیقه 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 مدل‌سازی المان محدود استخراج گردیده و نتایج به‌دست‌آمده در "شکل 14" مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در بخش آزمایشگاهی پیش‌بینی شد داده‌های

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

Table 4 The Johnson-Cook model coefficients for 7075-T6 alloy.

نام ضریب	$T_m$ (°C)	A (MPa)	B (MPa)	n	C	m
مقدار	600	546	678	0.71	0.024	1.56

جدول 5 خصوصیات حرارتی-مکانیکی برای آلیاژ 7075-T6 [16]

Table 5 Material properties of aluminum alloy 7075-T6.

	$T=480$ °C	$T=300$ °C	$T=200$ °C	$T=100$ °C	$T=20$ °C	Al 7075-T6
مدول یانگ (MPa)	-	-	-	-	71.7	
ضریب اصطکاک	0.12	0.18	0.23	0.65	0.6	
رسانندگی گرمایی (Wm <sup>-1</sup> c <sup>-1</sup> )	96	98	100	120	130	
انبساط حرارتی	-	-	-	-	14.7×10 <sup>-6</sup>	
چگالی (kgm <sup>-3</sup> )	2585	2630	2760	2790	2810	
گرمای ویژه (JkgK <sup>-1</sup> )	1245	1200	1125	1020	960	
ضریب پواسون	-	-	-	-	0.33	

<sup>1</sup> Convection  
<sup>2</sup> Coulomb

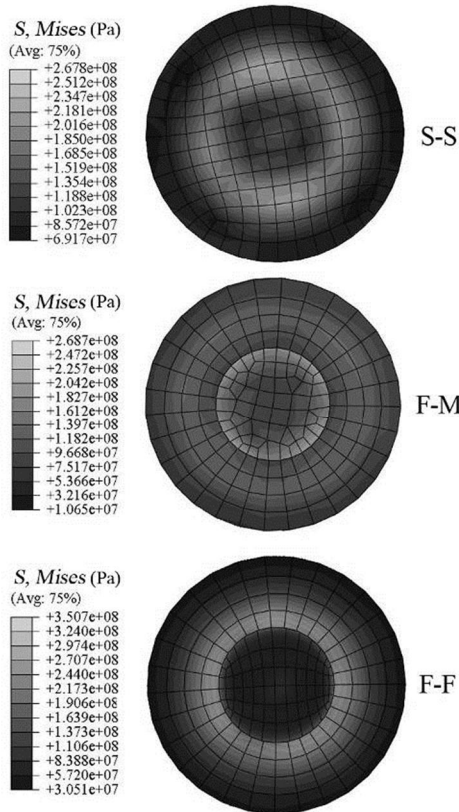


Fig. 15 Stress distribution across the cross-section of three samples at a rotational speed of 2500 rpm.

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 S-S و F-M برابر بود اما با این وجود 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.
- 3- هم‌محوری قطعات جوش خورده در نمونه‌های F-M به دلیل نقش پین و سوراخ به‌عنوان قید در شروع فرایند بسیار عالی بود و نسبت به دو نوع نمونه S-S و F-F هم‌محوری دقیق‌تر کاملاً مشهود بود.
- 4- استحکام کششی نمونه‌ها در کل از استحکام کششی آلایز پایه کمتر بوده و این جوش‌پذیری ضعیف آلومینیوم 7075-T6 را تأیید می‌کند. همچنین نمونه‌های S-S و F-M دارای بیشترین استحکام کششی بوده که در سرعت دورانی 2500 دور بر دقیقه بهبود استحکام کششی برای تمامی نمونه‌ها نسبت به سرعت دورانی 2000 دور بر دقیقه مشاهده شد. نمونه‌های F-F کمترین استحکام کششی را داشته که در توضیح آن پر نشدن کامل حفره‌ها بیان شد.
- 5- محل شکست نمونه‌ها برای تمامی نمونه‌ها در ناحیه جوش بوده که حاکی از توزیع سختی در ناحیه جوش است. البته در نمونه‌های F-F عامل تمرکز تنش ناشی از حفره‌ها موجب شکست جوش بوده است.
- 6- سختی نمونه‌ها بر روی محور قطعه کار و در فواصل معینی اندازه‌گیری شد و نمونه F-F به دلیل درگیری 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 با فاصله از سطح مقطع جوش مشاهده می‌شود.

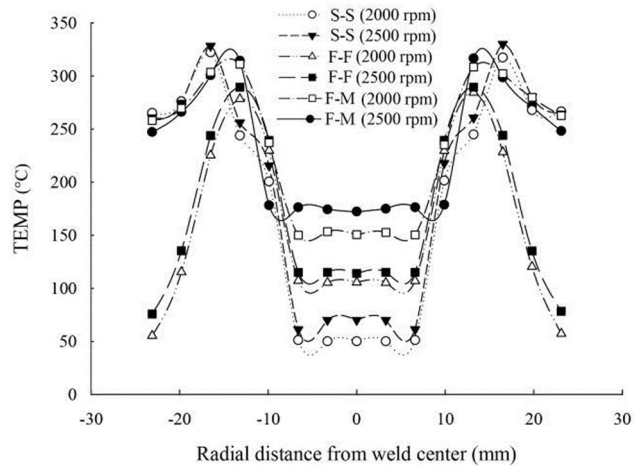


Fig. 14 Temperature diagram of welded samples (simulation results).

شکل 14 نمودار دمایی نمونه‌های جوش کاری شده (نتایج شبیه‌سازی)

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

در "شکل 15" تنش وارد شده به نمونه‌ها در سطح مقطع هر قطعه برای سرعت دورانی 2500 دور بر دقیقه مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد 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 به دلیل ایجاد پلیسه در این ناحیه است و بیشینه تنش وارد شده در منطقه میانی شعاع نمونه‌ها مشاهده می‌گردد. 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. به‌طور کلی وجود پلیسه بیشتر بعد از فرایند جوش کاری سبب کاهش طول بیشتر نمونه‌ها در کنار نیاز به عملیات جانبی همچون ماشین‌کاری برای آماده‌سازی نهایی قطعه کار می‌شود.

#### 4- نتیجه‌گیری

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 آلایز آلومینیوم 7075-T6 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.

6- مراجع

[1] 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 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 aluminum 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 فارسی)

[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 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*, 3rd 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 Al7075-T651 and Al7075-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- مدل سازی المان محدود فرایند نشان داد که تغییرات دمایی در نمونه های 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 نمونه ها تغییر هندسه سبب تغییر در تأثیر سرعت دورانی در کمینه دمای قطعات گردیده به طوری که نمونه های F-F و F-M نسبت به نمونه های S-S در تغییر سرعت دورانی دارای اختلاف دمایی بیشتری بودند.

9- تنش وارد به نمونه ها در مدل سازی المان محدود وجود پلیسه بیشتر در نمونه های F-F را تأیید 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 نمونه های دیگر شد.

5- فهرست علائم

A	تنش تسلیم اولیه ماده (MPa)
B	ضریب مقاومت یا مدول سختی ماده (MPa)
C	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)
T	دمای جاری قطعه کار (K)
علائم یونانی	
$\sigma_Y$	تنش معادل یا تنش جریان (MPa)
$\bar{\epsilon}_p$	کرنش پلاستیک معادل
$\xi$	نرخ کرنش پلاستیک مؤثر