



## امکان سنجی اتصال T شکل آلومینیوم 7075 به روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

حامد آقاجانی درازکلا<sup>1</sup>، حامد رحمانی<sup>2</sup>، مصطفی حبیب‌نیا<sup>3\*</sup>، محمدباقر لیمویی<sup>4</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

2- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری، ساری

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جویبار، جویبار

4- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد آیت الله آملی، آمل

\* مازندران، جویبار، 163378، m.habibnia@joubariau.ac.ir

### چکیده

### کلیدواژگان

توسعه تحقیقات بر روی اتصالات سبک آلومینیومی، یکی از راه‌کارهای مؤثر در کاهش مصرف سوخت، افزایش استحکام و توسعه سازه‌های هوایی است. در این تحقیق امکان‌سنجی اتصال T شکل فلزی آلیاژ آلومینیوم 7075 با استفاده از فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی مورد مطالعه قرار گرفت. به همین منظور، اتصال آلومینیوم 7075 با افست، عمق نفوذ، سرعت‌های خطی و سرعت‌های دورانی مختلف ابزار مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور درک بهتر تولید و توزیع حرارت، فرایند جوش کاری با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلونت شبیه‌سازی شد. با توجه به پارامترهای انتخاب شده در این فرایند مستحکم‌ترین اتصال در افست 1/5 در سمت پیشرو، عمق نفوذ 0/4، زاویه انحراف 2 درجه و سرعت دورانی 1325 دور بر دقیقه و سرعت خطی 69 میلی‌متر بر دقیقه بدست آمد. محل شکست تمامی نمونه‌های تست کشش، در سمت زائده T شکل آلومینیوم قرار داشت. عمده عیوب داخلی ایجاد شده در درون اتصالات عیب تونلی بود که با افزایش حرارت ورودی و سرعت خنک شوندگی همزمان به منطقه اتصال، از بین رفتند. بیشینه استحکام تولید شده در این آزمایش‌ها 181 مگاپاسکال بود که نزدیک به 80 درصد فلز پایه آلومینیومی استحکام داشت. ازدیاد طول این اتصال پس از تست کشش نزدیک به 11 میلی‌متر بود.

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی

آلومینیوم 7075

اتصال T شکل

خواص مکانیکی

خواص متالورژیکی

## The feasibility study on AA7075 T-joint via friction stir welding process

Hamed Aghajani Derazkola<sup>1</sup>, Hamed Rahmani<sup>2</sup>, Mostafa Habibnia<sup>3\*</sup>, Mohammad Bagher Limoie<sup>4</sup>

1-Young Researchers and Elite Club, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Sari Branch, Sari, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Jouybar Branch, Jouybar, Iran

4- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University of Ayatollah Amoli Branch, Amol, Iran

\* P.O.B. 163378 Joubar, Iran, m.habibnia@joubariau.ac.ir

### Keywords

Friction stir welding  
AA7075 aluminum alloy  
T-Joint  
Mechanical properties  
Metallurgical properties

### Abstract

Development of research on aluminum light joints is one of the most effective ways to reduce fuel consumption, increase strength and development of aerial structures. In this study, the feasibility of T-joint AA7075 aluminum alloy with using friction stir welding process was studied. For this purpose the AA7075 aluminum joint with different tool offset, plunge depth, linear and rotational speeds were studied. In order to better understanding the production and distribution of heat, welding process was simulated using commercial fluent package software. Depending on the selected parameters in the process, the strongest connection was produced in the 1.5mm tool offset on advancing side, the 0.4 mm plunge depth, 2° tool tilt angle, and 1325 rpm rotational speed and 69 mm/min linear velocity, respectively. The failure position of all tensile samples was located on the T appendage. Tunnel void was the major defect in the joints which disappeared with increased heat input and cooling rate. The strongest connection which produced in these experiments had 181 MPa strength that nearly 80% of the aluminum base metal. The connection elongation after the tensile test was close to 11 mm.

### 1- مقدمه

آلومینیم و آلیاژهای آن اختراع شد [1]. با توسعه این فرایند انعطاف‌پذیر، اتصالات همجنس و غیر همجنس بسیاری از فلزات دیگر مانند فولاد، مس، برنز و آلیاژهای تیتانیوم هم با این روش

روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی فرایند توسعه یافته‌ای از جوش کاری اصطکاکی است که در سال 1991 برای اتصال

### Please cite this article using:

H. Aghajani Derazkola, H. Rahmani, M. Habibnia, M. B. Limoie, The feasibility study on AA7075 T-joint via friction stir welding process, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 21-32, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

می‌شود [10]. دووس و همکاران به بررسی و تحلیل عیوب به وجود آمده در منطقه جوش اتصال T شکل آلیاژ آلومینیوم AA5456 پرداختند. اثرات پارامترهای جوش کاری مانند سرعت-چرخش، سرعت خطی، عمق غوطه‌وری ابزار بر روی کیفیت جوش آلیاژ آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت. آنها نتیجه گرفتند که عیب بوسه‌ای در سرعت پیشروی بالاتر از 110 میلی‌متر بر دقیقه به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همچنین جوش ناقص در ابتدای کار وقتی رخ می‌دهد که حرارت ورودی کم است. این عیوب را می‌توان با تاخیر در حرکت ابتدای جوش کاری و ثابت ماندن ابزار در شروع حرکت خطی به 30 ثانیه، کاهش سرعت پیشروی و افزایش سرعت دورانی برطرف کرد [11]. هدف مؤلفان در این پژوهش بررسی امکان‌سنجی اتصال T شکل آلومینیوم 7075 به روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی است که کاربرد فراوانی در سازه‌های هوایی دارد.

## 2- شبیه‌سازی فرایند

### 2-1- معادلات حاکم بر فرایند

در تحلیل ریاضی جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، گرمای اصطکاکی تولید شده توسط ابزار، نیروهای وارد شده بر قطعه-کارها و آمیختن جریان مذاب اصلی ترین معادلات حاکم بر فرایند به‌شمار می‌روند. اگر سرعت خطی و سرعت دورانی ابزار در طول فرایند ثابت باشد مقدار گرمای تولید شده نیز در خط جوش پایدار می‌ماند. در شبیه‌سازی فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی به روش مکانیک سیالات محاسباتی، جریان و دمای مذاب با حل معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی برای مذابی که به عنوان سیالات غیر نیوتنی (تراکم ناپذیر) فرض شده است، بدست می‌آید. بر اساس فرضیات فوق معادله پیوستگی را می‌توان بصورت فرمول (1) نوشت [12]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

در معادله فوق  $i$  بیانگر جهت‌های اصلی  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  است و پارامتر  $U$  به سرعت جریان مواد خمیری اشاره دارد. معادله بقای مومنتم ابزار که در خط اتصال (محور  $x$ ) دارای سرعت ثابت رو به جلو می‌باشد، بصورت فرمول (2) تعریف می‌شود [12]:

$$\rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho U_1 \frac{\partial u_j}{\partial x_1} \quad (2)$$

در معادله (2)،  $U_1$  سرعت خطی ابزار در خط جوش،  $\rho$  چگالی و  $P$  فشار حرکت دهنده جریان تعریف می‌شود. در این معادله

به یکدیگر پیوند داده شدند [2]. در این فرایند، ابتدا قطعه‌کارها توسط نگهدارنده‌ای که صفحه‌ی پشتی نامیده می‌شود، مهار می‌شوند تا از حرکت آنها در جهات مختلف در حین جوش کاری جلوگیری شود. سپس ابزار چرخان در فصل مشترک قطعات تا جایی که شانه سطح قطعه کار را لمس کند، نفوذ کرده و پس از گرم شدن قطعه کار در امتداد فصل مشترک پیشروی می‌کند [3]. با این روش جوش کاری انواع طرح‌های اتصال را می‌توان تولید کرد. یکی از حساس‌ترین نوع اتصال که در بدنه و بال انواع هواپیماها کاربرد دارد، اتصال T شکل است [4].

در زمینه اتصالات T شکل به روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی تحقیقات زیادی انجام نگرفته است. فراتینی و همکاران به تأثیر پارامترهای هندسی و تکنولوژیکی بر جریان مواد در اتصال T شکل آلومینیوم 6082 به روش جوش کاری اصطکاکی-اغتشاشی و مدل‌سازی المان محدود پرداختند. در پژوهشی که توسط آنها انجام گرفت، تأثیر پارامترهای هندسی و تکنولوژیکی با شبیه‌سازی عددی و آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفت [5]. بویا و همکاران، به تجزیه و تحلیل تجربی و عددی جریان مواد در اتصال T شکل آلیاژ آلومینیوم AA2024-T4 به روش FSW پرداختند [6]. آنها اعلام کردند خط اتصال واقعی در قسمتی مرز بین ورق افقی و عمودی در اتصال T به‌وجود می‌آید و جریان موادی که در پوسته اتفاق افتاد شبیه اتصال لب به لب در FSW بود. دوناتی موفق به تولید مفصل T شکل آلیاژ آلومینیوم AA6082-T6 توسط FSW با استفاده از فلز پرکننده شد [7].

استاریا و همکاران، اتصال T شکل آلیاژهای ناهمسان آلومینیوم AA2198-T3 و AA6056T4 به روش FSW مورد آزمایش قرار دادند. نتایج حاصل از کار آنها نشان داد که هندسه و زاویه انحراف ابزار نقش مهمی در ایجاد یک اتصال سالم و باکیفیت ایفا می‌کند [8]. در پژوهشی دیگر ژو و همکاران به بررسی ساختار میکروسکوپی و رفتار کششی اتصال T شکل ورق 3 میلی‌متری آلیاژ AA6061-T4 به روش FSW پرداختند و تأثیر پارامترهای فرایند بر ساختار میکروسکوپی، عیوب، سختی پروفیل و استحکام کششی بطور خاص مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آنها نشان داد پارامترها مختلف فرایندهای تأثیر زیادی در ساختار میکروسکوپی و خواص مکانیکی اتصال ندارند [9]. کراسنوفسکی به بررسی تجربی اتصال T شکل جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی از آلیاژ آلومینیوم AA6082-T6 رفتار آنها تحت بارهای استاتیک پرداخت. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که در سرعت‌های پایین ابزار و تولید حرارت کم، مشابه با اتصالات لب‌به‌لب عیوب قابل توجهی مانند حفره، تشکیل

معادله بقای جرمی هر کدام از قطعه کارها در غلظت پایین بصورت فرمول (11) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(u_j C_i)}{\partial x_j} = -V \frac{\partial C_i}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left( D \frac{\partial C_i}{\partial x_j} \right) \quad (11)$$

در عبارت بالا اشاره به نفوذ شیمیایی وابسته به حرارت دارد که با فرمول (12) تعریف می‌شود [12]:

$$D = Ae^{\left(-\frac{Q}{RT}\right)} \quad (12)$$

معادلات فوق پس از کد نویسی، توسط سربرگ Define و User-Defined Function به نرم‌افزار فلونتت وارد شد.

در این مدل‌سازی، دمای هوا و دمای اولیه سیال 300 درجه کلوین در نظر گرفته شده است. ورود و خروج هریک از سیال‌ها از نوارهای مرزی ورودی و نوارهای خروجی تعیین شده است. شرایط مکانیکی بین قطعه‌کارها و ابزار تنها در فصل مشترک بین آنها حاکم است و بقیه مرزها از این قانون مستثنی هستند. در طول فرایند سرعت‌های دورانی ابزار 980، 720، 500 و 1320 دور بر دقیقه و سرعت خطی جوش کاری 32، 45، 69 و 108 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شدند. گرمای اصطکاکی تولید شده در فصل مشترک ابزار و قطعه کارها ( $Q_i$ ) بصورت فرمول (13) تعریف شد [12]:

$$Q_i = [(1 - \delta)\eta\tau + \delta\mu_f P_N](\omega r - U_1 \sin \theta) \quad (13)$$

در معادله (13)،  $\tau$  بیشینه تنش برشی در تسلیم و  $\theta$  زاویه با جهت منفی در راستای خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت تعریف می‌شود.  $\eta$  راندمان مکانیکی است که بر اساس پژوهش‌های قبلی 0/5 در نظر گرفته می‌شود [12].  $\delta$  نسبت سرعت چرخش مواد به سرعت چرخشی در فصل مشترک ابزار و قطعه کار،  $\mu_f$  ضریب اصطکاک است که در این پژوهش 0/5 در نظر گرفته شده است.  $P_N$  نیز فشار عمودی وارد بر سطح است.

در طول فرایند مقداری از گرمای تولید شده در فصل مشترک ابزار و قطعه کار به هدر می‌رود. این پدیده ناشی از انتقال حرارت بین ابزار و قطعه کار است. به منظور بالا بردن دقت شبیه سازی، این پارامتر به صورت یک ضریب در معادله (13) قرار می‌گیرد. در نهایت معادله (13) در فصل مشترک ابزار و قطعه کارها با فرمول (14) توصیف می‌شود [12]:

$$q = \frac{(\sqrt{k\rho C_p})_{workpiece}}{(\sqrt{k\rho C_p})_{workpiece} + (\sqrt{k\rho C_p})_{tool}} Q_i \quad (14)$$

در معادله (14)،  $Q_b$  برابر نرخ گرمای تولید شده در واحد حجم می‌باشد که از تغییر شکل پلاستیک مواد در ناحیه خارج از فصل مشترک قطعه کار و ابزار تولید می‌شود [12]. این مقدار گرما در حدود 4/4 درصد حرارت کل فرایند است که بصورت

یک ضریب برای سیال غیر نیوتنی است. این ضریب نسبت تنش سیلان مؤثر ( $\sigma_e$ ) به نرخ کرنش مؤثر ( $\dot{\epsilon}$ ) را نشان می‌دهد و بصورت فرمول (3) تعریف می‌شود [12]:

$$\mu = \frac{\sigma_e}{3\dot{\epsilon}} \quad (3)$$

همان‌طور که گفته شد تنش سیلان مؤثر  $\dot{\epsilon}$  و نرخ کرنش مؤثر است که با توجه به خواص ماده بصورت فرمول (4) تعریف می‌شوند [12]:

$$\sigma_e = \frac{1}{\alpha} \operatorname{arc} \sinh \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

در رابطه (4)،  $A$ ،  $\alpha$  و  $n$  ضرایب ثابت مربوط به فلز پایه می‌باشند که در مورد آلیاژ آلومینیوم AA1100 به ترتیب برابر 1،  $5/18 \times 10^{10}$  و 5/66 هستند [12]. پارامتر  $Z$  ضریب زلز- هولومن است که بصورت فرمول (5) تعریف می‌شود [12]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (5)$$

در معادله (5)،  $Q$  انرژی اکتیواسیون است.  $R$  ثابت گازه است و  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش مؤثر است.

با توجه به تغییرات خواص فیزیکی فلزات با بالا رفتن دما، دستیابی به پارامترهای مکانیکی و حرارتی وابسته به دما برای فلز پایه و ابزار مورد استفاده در طول شبیه‌سازی ضروری به نظر می‌رسد. با توجه به توضیحات فوق ضرایب گرمای ویژه و انتقال حرارت فلز AA1100 را بصورت فرمول‌های (6،7) می‌توان تعریف کرد [12]:

$$C_p = 929.3 - 0.627T + 1.48 \times 10^{-3}T^2 \quad (6)$$

$$K = 25.2 + 0.398T + 7.36 \times 10^{-6}T^2 - 2.52 \times 10^{-7}T^3 \quad (7)$$

و بطور مشابه برای ابزار فولادی می‌توان فرمول‌های (8،9) را نوشت [12]:

$$C_p = 468.3 - 8.5T + 3.0 \times 10^{-4}T^2 + 1.8 \times 10^{-7}T^3 \quad (8)$$

$$K = 3.8 + 0.092T - 1.8 \times 10^{-4}T^2 + 7.8 \times 10^{-8}T^3 \quad (9)$$

معادله بقای انرژی حرارتی برای سیال غیر نیوتنی در جهت‌های  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  بصورت فرمول (10) معرفی می‌شود [12]:

$$\rho C_p \frac{\partial(u_i T)}{\partial x_1} = -\rho C_p U_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_i + Q_b \quad (10)$$

در معادله فوق  $\rho$  چگالی سیال،  $c_p$  ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت،  $u_i$  سرعت مواد در جهت‌های  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  دما،  $T$  دما،  $U_1$  سرعت جوش کاری و  $k$  ضریب انتقال حرارت تعریف می‌شوند. در معادله (12) مجموع گرمای تولید شده از تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک در دو مؤلفه  $Q_i$  و  $Q_b$  خلاصه می‌شوند.

فرمول (15) تعریف می‌شود [12]:

$$Q_v = \frac{d\dot{\epsilon}_p}{dV} = \beta\mu\phi \quad (15)$$

در معادله (15)،  $\mu$  ضریب اصطکاک بین سطوح،  $\beta$  کسری از کار تغییر شکل پلاستیک است که به صورت گرما تلف می‌شود و  $\epsilon$  نرخ کرنش مؤثر است که بصورت فرمول (16) تعریف می‌شود [12]:

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\epsilon_{ij}\epsilon_{ij}\right)} \quad (16)$$

که در آن  $\epsilon_{ij}$  تانسور نرخ کرنش است که بصورت فرمول (17) تعریف می‌شود:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (17)$$

و  $\phi$  نیز با فرمول (18) تعریف می‌شود [12]:

$$\phi = 2 \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3}\right)^2 \quad (18)$$

انتقال حرارت بین سطح قطعه کارها و محیط اطراف ابزار به صورت تشعشعی و رسانایی انجام می‌شود که آنها را نیز به صورت فرمول (19) می‌توان تعریف کرد:

$$-k \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Top} = B\epsilon(T^4 - T_a^4) + h(T - T_a) \quad (19)$$

ضریب Stefan-Boltzmann است.  $T_a$  دمای محیط و  $h$  ضریب انتقال حرارت در سطح است که در این شبیه‌سازی،  $300 \frac{W}{m^2 \cdot 20^\circ C}$  در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال حرارت در کف نیز با فرمول 20 تعریف می‌شود که در آن  $h_b$  بیانگر ضریب انتقال حرارت در کف قطعه کار است که  $300 \frac{W}{m^2 \cdot 20^\circ C}$  در نظر گرفته شد.

$$k \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Bottom} = h_b(T - T_a) \quad (20)$$

در طول شبیه‌سازی، سرعت دورانی و خطی پین و شانه ابزار بصورت جداگانه انجام شد. به همین منظور مجموع سرعت‌های دورانی و خطی بصورت مؤلفه‌های جداگانه در سیستم مختصاتی کارتزین تعریف شدند. شکل 1 تجزیه نیروهای دورانی و خطی را به یک سیستم واحد نشان می‌دهد. با توجه به شکل فوق سرعت پین ابزار به مؤلفه‌های فرمول‌های (21) تا (23) تقسیم‌بندی می‌شوند [12]:

$$u = (\omega R_p \sin \theta - U_1) \quad (21)$$

$$v = (\omega R_p \cos \theta) \quad (22)$$

$$w = k \left(\frac{\omega}{2\pi}\right) R_p \quad (23)$$

$K$  در معادله (23)، بیانگر گام رزوه روی پین ابزار است که در صورت رزوه دار بودن پین در معادله اعمال می‌شود. بطور مشابه می‌توان مؤلفه‌های سرعت شانه ابزار را نیز می‌توان با فرمول‌های (24) و (25) نوشت [12]:

$$u = (\omega r \sin \theta) \quad (24)$$

$$v = (\omega r \cos \theta) \quad (25)$$

با توجه به یکپارچگی ابزار تعریف شده در این مدل، می‌توان مقدار  $r$  را فاصله بین سطح خارجی پین تا سطح خارجی ابزار در نظر گرفت.

## 2-2- مش‌بندی فرایند

بر اساس تعریف فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، ابزار این فرایند با حرکت دورانی، ابتدا در خط اتصال نفوذ کرده و پس از آن حرکت روبه جلو را در امتداد خط جوش آغاز می‌کند و در انتها از محل اتصال خارج می‌شود. در این مقاله از حالت‌های اولیه و انتهایی ابزار صرف‌نظر شده است و تحلیل فرایند در زمان پیشروی رو به جلوی ابزار انجام شد. در حالت پایدار و در هنگامی که ابزار رو به جلو حرکت می‌کند، گرمای اصطکاکی بطور یکنواخت و منسجم در سطح و درون دو قطعه کار ایجاد می‌شود. در این وضعیت شانه و پین ابزار به طور همزمان، با سرعت برابر و در خلاف جهت حرکت عقربه‌های ساعت می‌چرخند. در این مدل یک ابزار با پین مخروطی شکل که دارای 2 درجه انحراف نسبت به بردار نرمال فلزات پایه است، مورد استفاده قرار گرفته شد. موقعیت کف ابزار 0/2 میلی‌متر بالاتر از کف قطعه کار قرار گرفت. فلز پایه به عنوان سیال غیرنیوتنی، تراکم ناپذیر، با رفتار ویسکو پلاستیک و چگالی مطابق با آلیاژ آلومینیوم 7075 تعریف شد.

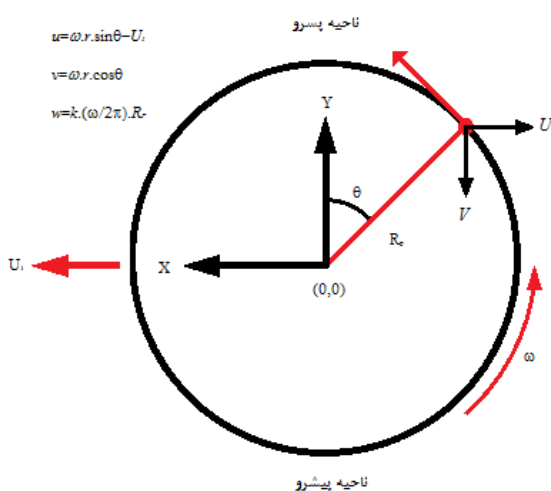


Fig. 1 Dismember of Velocity vectors on tool  
شکل 1 تجزیه بردارهای سرعت در ابزار

1320 دور در دقیقه نیز به دلیل ارتعاش بیش از حد ابزار، فرایند جوش کاری قابل انجام نبود. شکل 3 ابزار فرایند را در حین جوش کاری نشان می‌دهد.

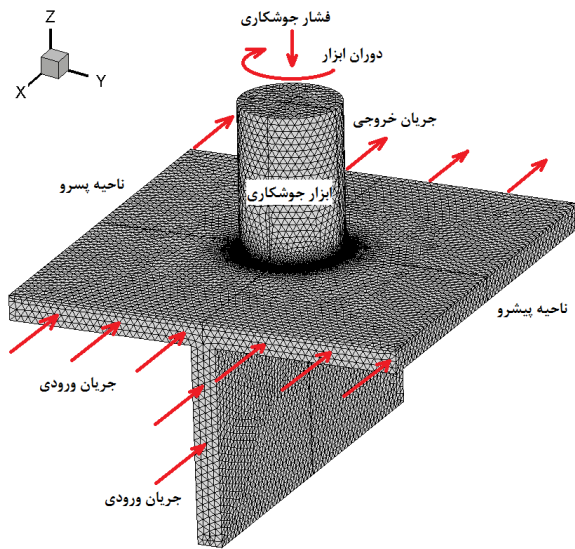


Fig. 2 Meshed process model

شکل 2 مدل مش بندی شده فرایند

جدول 1 پارامترهای انتخاب شده در طول فرایند شبیه‌سازی

Table 1 selected parameters in the simulation process

پارامتر	مقدار
سرعت دورانی ابزار (دور در دقیقه)	1320, 980, 720, 500
سرعت خطی ابزار (میلی‌متر بر دقیقه)	108, 69, 45, 32
زاویه انحراف ابزار (درجه)	3, 2, 1
عمق فروروی ابزار (میلی‌متر)	0,4, 0,3, 0,2, 0,1
افست ابزار (میلی‌متر)	2,5, 2, 1,5, 1, 0,5, 0
قطر شانه ابزار (میلی‌متر)	18
قطر پین ابزار (میلی‌متر)	6
طول پین ابزار (میلی‌متر)	6

جدول 2 درصد ترکیب شیمیایی آلومینیوم 7075

Table 2 Chemical Composition of AA7075 Aluminum Alloy

عنصر	Al	Cr	Cu	Mg	Mn, Si, Ti, Fe	Zn
درصد	87/1	0,28-0,18	2-1,2	2,9-2,1	0,7	0,7

جدول 3 خواص فیزیکی آلومینیوم 7075

Table 3 physical properties of AA7075 Aluminum Alloy

خواص مکانیکی	آلومینیوم 7075
$\sigma_{UTS}$ (MPa)	228
$\sigma_Y$ (MPa)	103
Shear Strength (MPa)	153
Elongation (%)	17
Hardness (HV)	60
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	2796

برای تولید المان‌های حجمی از دانه‌های Tetrahedral/Hybrid با شکل T-grid combination استفاده شد. با توجه به اهمیت فصل مشترک ابزار و قطعه‌کارها، فضای اطراف ابزار و خود ابزار نیاز به تعریف دقیق‌تری نسبت به دیگر نقاط داشت. به همین خاطر، یک تابع اندازه که دارای اندازه کمینه، نرخ رشد و اندازه بیشینه است در تولید المان‌ها استفاده شد. پس از چندین مرتبه شبیه‌سازی به روش آزمون و خطا، بهترین حالت مش‌بندی برای انجام تحلیل نهایی مورد استفاده قرار گرفت. حجم کوچکترین المان تولید شده در مدل، 0/1 میلی‌متر مکعب و حجم بزرگترین المان 2/0 میلی‌متر مکعب بود. در نهایت عدد المان 3864200 با نرخ رشد 1/2 جهت شبیه‌سازی تولید شد. شکل 2 مدل مش‌بندی شده فرایند را نشان می‌دهد. اطلاعات مربوط به پارامترهای فرایند در جدول 1 گنجانده شده است.

### 3- مراحل آزمایشگاهی

در این پژوهش، 30 عدد ورق آلومینیوم 7075 به ابعاد 100 میلی‌متر در 50 میلی‌متر با ضخامت 4 میلی‌متر تهیه شد و بعد از اندازه‌گذاری و خط کشی توسط دستگاه گیوتین به ابعاد 10×15 و 5×15 در خلاف جهت نورد بریده و آماده سازی گردید. قبل از انجام تست لبه‌های قطعه‌کارها با فرچه‌ی سیمی، اکسیدزدایی کاملاً تمیز شد.

برای اعتبارسنجی رفتار مکانیکی و متالورژیکی آلومینیوم 7075 از لحاظ، درصد ترکیبات شیمیایی فلزات پایه با استفاده از دستگاه آنالیز مواد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی و نیز خواص فیزیکی این آلیاژ در جدول‌های 2 و 3 آورده شده است.

ابزار مورد استفاده در این فرایند دارای پین مخروطی با 6 میلی‌متر ارتفاع تهیه گردید. قطر کف ابزار 6 میلی‌متر، قطر نوک آن 2 میلی‌متر همچنین شانه ابزار 18 میلی‌متر و زاویه تقعر شانه ابزار 2 درجه در نظر گرفته شده است. جهت دوران ابزار خلاف جهت گردش عقربه‌های ساعت بود. زاویه ابزار 2 درجه انحراف نسبت به بردار نرمال صفحات داشت. برای بدست آوردن افست مناسب، ابزار جوش کاری به اندازه‌های 0, 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 میلی‌متر در سمت پیشرو افست داده شد. با توجه به امکانات دستگاه فرز انتخاب شده، ابزار فرایند دارای سرعت‌های دورانی 500، 720، 980 و 1320 دور بر دقیقه و سرعت خطی 32، 45، 69 و 108 میلی‌متر بر دقیقه بود.

قابل ذکر است که در سرعت‌های دورانی کمتر از 500 دور در دقیقه، فرایند جوش قابل انجام نبود و در دورهای بالای

حجم زیاد بود که نمونه‌ای از آن که در سرعت دورانی 500 دور در دقیقه و سرعت خطی 32 میلی‌متر بر دقیقه و عمق فروروی 0/4 میلی‌متر تولید شد در شکل 6 نشان داده شده است. علت رخداد این پدیده گرمای ورودی بیش از حد در سرعت دورانی کم و همچنین نفوذ زیاد شانه ابزار در قطعه کار بود که منتج به پرنشیدن خط جوش در منطقه پسرو شد.



Fig. 4 Tensile strength samples

شکل 4 نمونه‌های آماده سازی شده جهت تست کشش

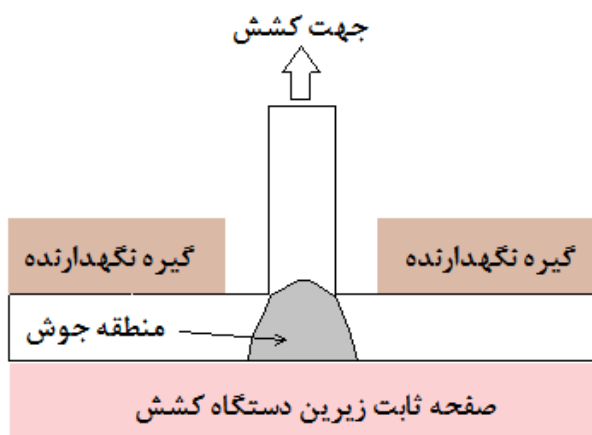


Fig. 5 Schematic setup of samples in tensile test

شکل 5 شماتیک قرارگیری نمونه‌ها در تست کشش



Fig. 6 Side flash on joint surface

شکل 6 پلیسه کناره در سطح اتصال



Fig. 3 FSW tool in welding progress

شکل 3 ابزار فرایند در حین جوش کاری

به‌منظور بررسی رفتار منطقه جوش در آزمون کشش، نمونه‌های تست کشش عمود بر خط جوش مطابق با استاندارد ASTM/E8-M03 آماده سازی شدند. از هر ورق جوش کاری شده 3 نمونه تست کشش توسط دستگاه وایرکات بریده شد و نتایج میانگین 3 نمونه در این پژوهش گزارش شد که در شکل 4 نشان داده شده است.

نمونه‌ها به گونه‌ای در دستگاه قرار گرفت که تیغه T رو به بالا باشد و فک دستگاه کشش آن را به سمت بالا بکشد و صفحه بالایی اتصال توسط دو گیره ثابت محار شدند. شکل 5 شماتیکی از نحوه تست کشش نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مطالعات جهت بررسی عیوب داخلی منطقه جوش آنالیزهای رادیوگرافی استفاده شد.

برای ثبت حرارت از دوربین حرارت‌سنج Raytec-Rauenger (TS) استفاده شد. برای ثبت داده‌های دما، گرمای ایجاد شده در پیشروی پس از مدت یک دقیقه اندازه‌گیری شد.

#### 4- بحث و نتایج

4-1- بررسی اثر تولید حرارت بر شکل‌گیری عیوب سطحی جوش

بر اساس پارامترهای انتخاب شده در فرایند در این پژوهش، عیوب گوناگونی در سطح اتصال مشاهده شد که کیفیت اتصال را لحاظ کیفی معیوب می‌کرد. مهمترین نوع این عیوب پلیسه با

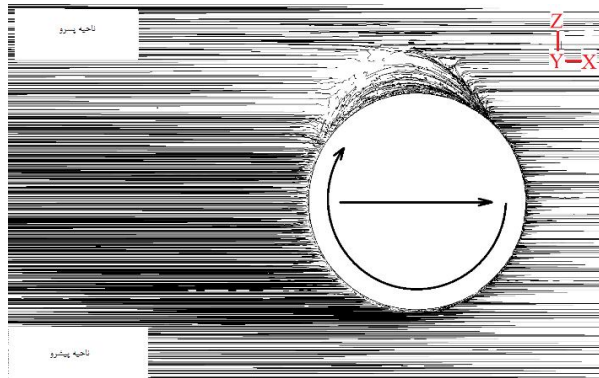


Fig. 7 Surface defect prediction on simulation

شکل 7 پیش بینی شکل گیری عیوب سطحی در شبیه‌سازی



Fig. 8 Surface defect which formed in joint with 108 mm/min travelling speed

شکل 8 عیب سطحی اتصال که در سرعت خطی 108 میلی‌متر در دقیقه شکل گرفت

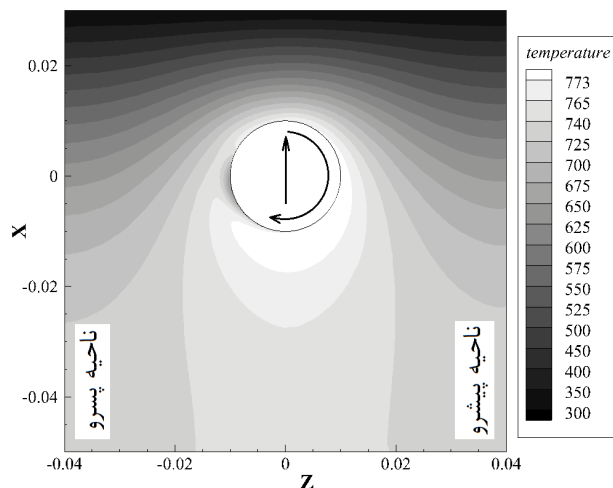


Fig. 9 Simulation results of surface head distribution in 1320rpm and 32 mm/min tool speed (Kelvin degree)

شکل 9 نتیجه شبیه‌سازی جریان حرارت سطحی در سرعت دورانی 1320 دور در دقیقه و سرعت خطی 32 میلی‌متر در دقیقه (دما بر حسب درجه کلوین)

شکل 11 نمونه‌ای از سطح جوش کاری شده را نشان می‌دهد که در سرعت‌های دورانی 720 و 980 دور در دقیقه و سرعت خطی 69 میلی‌متر بر دقیقه با استفاده از تکنیک رادیو گرافی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان مواد در پارامترهای مذکور که در شکل 7 به نمایش در آمده است، حاکی از جدایش مواد در سمت پیشرو می‌باشد. سرعت دورانی کم و عمق فروروی زیاد سبب می‌شود تا مواد همراه با دوران ابزار نتوانند به گردش درآیند و نوار توخالی در قسمت پیشرو تولید شود.

افزایش سرعت خطی در جوش کاری اتصال T شکل آلومینیوم 7075 می‌تواند عیوب سطحی فراوانی تولید کند. با افزایش سرعت پیشروی ابزار در طول فرایند، قطعه‌کار چرخه مکانیکی و حرارتی کمتری را در واحد طول تجربه می‌کند و این مساله سبب می‌شود تا تمامی مناطق سطح جوش به خوبی پر نشوند. از طرف دیگر با افزایش زیاد سرعت خطی ابزار، ماده‌ی تغییر شکل یافته زودتر سرد می‌شود و نمی‌تواند به راحتی توسط ابزار تحت فشار قرار بگیرد که مهمترین نتیجه آن شکل‌گیری حفره‌های سطحی به خصوص در ناحیه پیشرو خواهد بود. شکل 8 نمونه‌ای از عیب تونل سطحی را نشان می‌دهد که در سرعت خطی 108 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی 720 دور در دقیقه در سطح بالایی اتصال و در سمت پیشرو به وجود آمد.

با انتخاب پارامتر بهینه سرعت خطی و دورانی ابزار می‌توان حرارت سطحی خط جوش را کنترل کرد و عیوب سطحی جوش را از بین برد. کیفیت ظاهری جوش وابسته به انتخاب درست گرمای ورودی جوش و نرخ خنک شونده‌ی آن است که با سرعت دورانی و خطی ابزار کنترل می‌شود.

شکل 9 نمونه‌ای از جریان سطحی حرارت را در طول اتصال نشان می‌دهد که در عمق فروروی 0/4 میلی‌متر، سرعت خطی 32 میلی‌متر در دقیقه و سرعت دورانی 1320 دور در دقیقه حاصل شد. همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود، ناحیه پیشرو دمای کمتری نسبت به ناحیه پیشرو دارد. این رفتار در اتصالات لب به لب به کمی متفاوت‌تر است. وجود تیغه T، سبب می‌شود تا جریان مواد و حرارت از ناحیه پیشرو به سمت پیشرو با تاخیر انجام شود. همین مساله انتخاب پارامترهای مناسب جهت تولید حرارت و جریان مناسب را مشکل می‌کند.

شکل 10 مقدار دمای ثبت شده فرایند را در سرعت‌های دورانی و خطی مختلف در عمق فروروی 0/4 میلی‌متر نشان می‌دهد. منطقه مشخص شده با خط چین حاکی از پارامترهایی است که در آن عیوب سطحی رخ نداده است. با مقایسه دماهای ثبت شده می‌توان به این نتیجه رسید که پارامتر مناسب جهت ایجاد جریان سطحی بدون عیب در اتصال T شکل آلومینیوم 7075 سرعت دورانی بین 720 تا 1320 دور در دقیقه و سرعت خطی 32 تا 69 میلی‌متر در دقیقه است.

گرفته شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با کنترل سرعت خطی و دورانی هیچ عیبی در سطح اتصال دیده نمی‌شود.

حفره‌های سطحی در سطح اتصال به وجود می‌آید. شکل 12 سطح نمونه اتصالی را نشان می‌دهد که با سرعت خطی 69 میلی‌متر بر دقیقه و سرعت دورانی 980 دور در دقیقه در زاویه انحراف 1 درجه جوش کاری شده است. با توجه به زوایای انحراف انتخاب شده در این پژوهش، بهترین زاویه انحراف ابزار 2 درجه بود که در آن اتصال بی عیب تولید شد. شکل 13 سطح اتصالی که در زاویه انحراف 2 درجه تولید شد را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سطح این اتصال دارای خروج مواد از خط جوش و عیوب سطحی نیست. اما در زاویه انحراف 3 درجه فلش و عیوب سطحی زیادی در سطح جوش به وجود آمد. در اتصالات همجنس افست ابزار می‌تواند سبب کاهش عیوب سطحی شود. البته این اثرات با جابجایی در منطقه پیشرو قابل انجام است.



Fig. 12 Surface material flow in joint which welded by 1° tool tilt angle  
شکل 12 جریان سطحی اتصال در زاویه انحراف 1 درجه



Fig. 13 Surface material flow in joint which welded by 2° tool tilt angle  
شکل 13 جریان سطحی اتصال در زاویه انحراف 2 درجه

در اتصال T شکل آلومینیوم 7075 افست‌های 0، 0/5، 1، 1/5، 2 و 2/5 میلی‌متر در ناحیه پیشرو انتخاب شد. با توجه به افست‌های انتخاب شده بهترین کیفیت سطحی در افست 1/5 میلی‌متر ایجاد شد. در افست‌های 0 و 0/5 میلی‌متر ایجاد خط ناپیوستگی در منطقه پسرو دیده می‌شود. دلیل این مسأله در عدم توانایی انتقال مواد از ناحیه پیشرو به سمت پسرو با وجود زائده T در اتصال است. با جابجایی ابزار به سمت پیشرو این پدیده کم رنگ تر می‌شود. ولی با افزایش افست ابزار تا 2/5 میلی‌متر سطح کمتری از ناحیه پسرو تحت کار مکانیکی-

گرفته شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با کنترل سرعت خطی و دورانی هیچ عیبی در سطح اتصال دیده نمی‌شود.

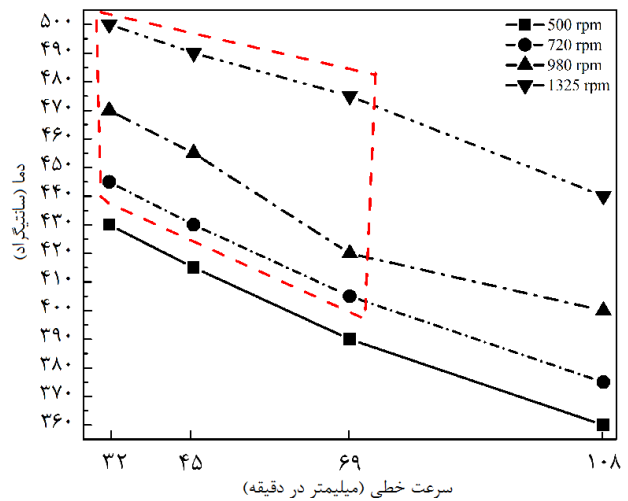


Fig. 10 Recorded temperature during process

شکل 10 دمای ثبت شده در طول فرایند

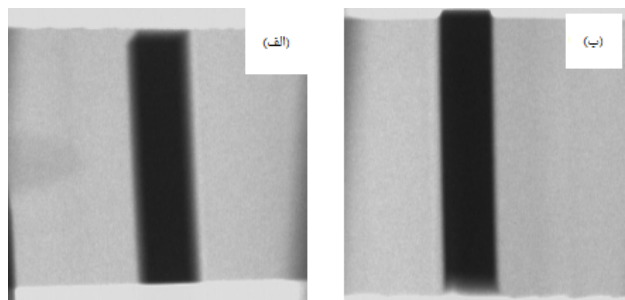


Fig. 11 Radiograph picture from top surface of joints which welded by (a) 720 rpm and (b) 980 rpm and 69 mm/min traveling speed

شکل 11 تصویر رادیوگرافی از سطح اتصالی که با سرعت دورانی (الف) 720 و (ب) 980 دور در دقیقه و سرعت خطی 69 میلی‌متر بر دقیقه گرفته شد

#### 4-2- بررسی زاویه انحراف و افست ابزار بر روی شکل‌گیری عیوب سطحی

زاویه انحراف ابزار و افست ابزار از پارامترهای مهم جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی به شمار می‌روند که می‌توانند تأثیر زیادی بر روی جریان مواد و شکل‌گیری عیوب سطحی داشته باشند. مهمترین اثر زاویه انحراف ابزار اعمال نیروی فورج به مواد خمیری و اکستروژن آنها از جلوی ابزار به محل اغتشاش است [13]. کم بودن زاویه انحراف ابزار سبب عدم فورج مناسب ماده و در پی آن عدم امتزاج مناسب می‌شود. با افزایش زاویه انحراف ابزار، بدلیل فرار ماده خمیری شده از زیر شانه ابزار، افزایش تولید حرارت، عدم تمرکز حرارت در زیر شانه ابزار و اعمال نیروی فورج زیاد فرار مواد از مرز اتصال، عدم پیوستگی و



اثر عمق نفوذ ابزار بر روی جریان سطحی اتصال نیز مشهود است. شکل 16 تصویر جریان سطحی اتصال را در عمق‌های نفوذ 0/2 و 0/4 میلی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مهمترین عیب موجود در عمق نفوذ کم ایجاد حفره و عدم پرشدن ریشه جوش در قسمت پسرو است.

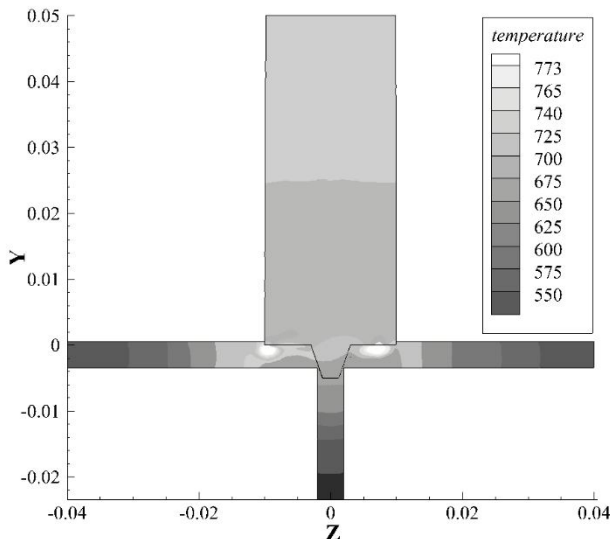


Fig. 15 Simulation results of internal head distribution in 0.4 mm tool plunge depth (Kelvin degree)

شکل 15 نتیجه شبیه‌سازی جریان داخلی حرارت در عمق نفوذ 0/4 میلی‌متر (دما بر حسب درجه کلوین)



Fig. 16 Surface material flow in joint which welded by (a) 0.2 and (b) 0.4 mm tool plunge depth

شکل 16 جریان سطحی در اتصال جوش کاری شده با عمق نفوذ (الف) 0/2 و (ب) 0/4 میلی‌متر

#### 4-4- بررسی ریزساختار اتصال

در فرایند FSW تحت تغییر شکل مومسان بسیار شدید و تجربه دمای بالای ناشی از اصطکاک سبب تغییرات شدید در ریز ساختار محل اتصال می‌شود. بیشترین تغییر ساختار در فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی در محل اغتشاش رخ می‌دهد. شکل 17 ریزساختار محل اغتشاش را در منطقه اغتشاش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود دانه‌های آلومینیوم تحت تبلور مجدد در محل اغتشاش قرار گرفتند.

حرارتی قرار می‌گیرد و کیفیت اتصال کاهش می‌یابد. شکل 14 تصویر رادیوگرافی از سطح مقطع عرضی اتصالاتی که در افست‌های 0، 0/5، 1 و 1/5 میلی‌متر گرفته شد را نشان می‌دهد.

#### 3-4- بررسی عمق نفوذ ابزار بر جریان داخلی مواد

ایجاد جوش بی نقص نیاز به تولید حرارت مناسب و فشار جوش کاری مناسب دارد. عدم تولید حرارت مناسب و سبب ایجاد حفره و تونل درون اتصال می‌شود. مواد خمیری بین پین و فلز پایه که دمای کمتری دارد اغتشاش کمتری می‌یابند، و چنانچه دمای تولید شده توسط ابزار کم باشد مقاومت مواد اطراف پین در مقابل تغییر شکل زیاد می‌شود و در اثر اغتشاش ناقص حفره و تونل در درون اتصال ایجاد می‌شود. تغییر در فشار جوش کاری سبب تغییر در جریان مواد می‌شود. با افزایش فشار محوری ابزار دما نیز افزایش می‌یابد. بطور کلی در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی فشار جوش کاری با مقدار عمق نفوذ مشخص می‌شود. بهترین فشار محوری در این آلیاژها فشار لازم برای ایجاد جوش بدون نقص است و فشار نامناسب به ایجاد حفره‌های گودالی شکل کمک می‌کند.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی افزایش عمق نفوذ ابزار نشان می‌دهد که مقدار دمای ثبت شده در عمق‌های نفوذ 0/1، 0/2، 0/3 و 0/4 میلی‌متر (در سرعت دورانی 1320 دور در دقیقه، سرعت خطی 32 میلی‌متر در دقیقه و زاویه انحراف 2 درجه) به اندازه 440، 451، 473 و 500 درجه سانتی‌گراد است. نمونه‌ای از نتیجه شبیه‌سازی جریان داخلی دما در عمق نفوذ 0/4 در درون اتصال در شکل 15 نشان داده شده است.

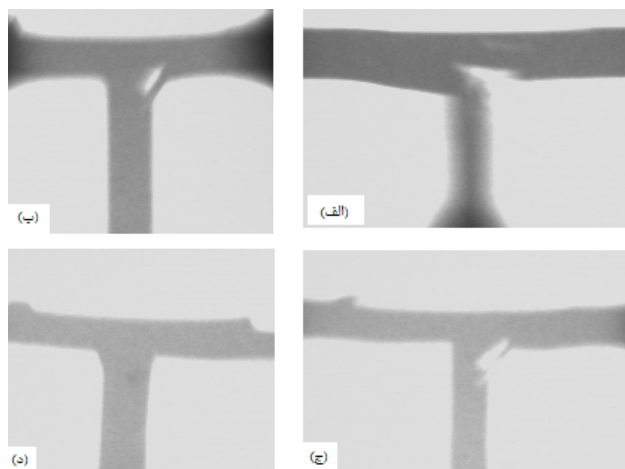


Fig. 14 Radiograph picture from top surface of joints which welded by (a) 0, (b) 0.5, (c) 1 and (d) 1.5 mm tool offset

شکل 14 تصویر برداری رادیوگرافی از سطح مقطع اتصالاتی که با (الف) 0، (ب) 0/5، (ج) 1 و (د) 1/5 میلی‌متر افست جوش کاری شدند

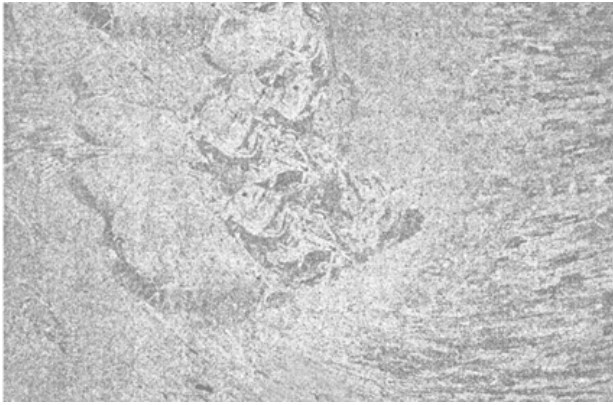


Fig. 19 Microstructure of lower area of stir zone

شکل 19 ریز ساختار زیرین منطقه اغتشاش

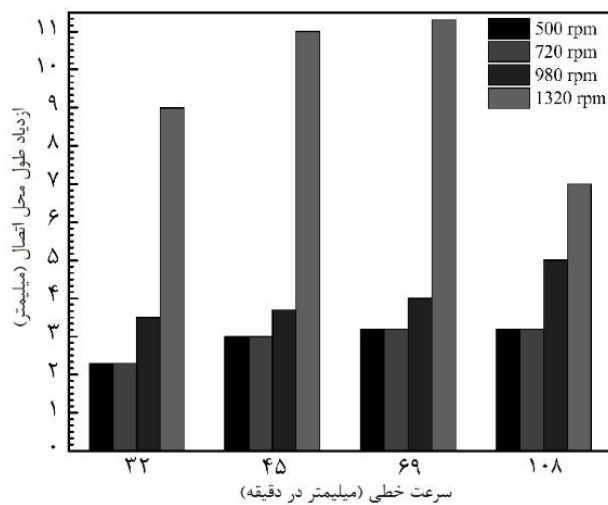


Fig. 20 Joint area Elongation

شکل 20 ازدیاد طول محل اتصال

همان‌طور که در شکل 20 مشاهده می‌شود، میانگین بیشینه ازدیاد طول در اتصالاتی رخ می‌دهد که سرعت خطی 69 میلی‌متر در دقیقه به هم جوش شدند و کمترین ازدیاد طول در تست کشش مربوط به نمونه‌هایی است که در سرعت خطی 32 میلی‌متر در دقیقه به هم جوش داده شدند. از طرف دیگر با افزایش سرعت دورانی درصد تغییر طول محل اتصال پس از آزمون کشش نیز افزایش می‌یابد. اتصالاتی که در سرعت دورانی 500 دور بر دقیقه به هم جوش داده شدند کمترین تغییر طول را پس از آزمون کشش دارند. علت این امر وجود عیوب تونلی و حفره شکل است که در مقطع اتصال وجود دارد. با افزایش سرعت خطی عیوب درون محل اتصال کوچکتر می‌شوند. با کوچک شدن عیوب، ناحیه ی مرکزی اتصال بزرگتر می‌شود و این مساله سبب بیشتر شدن استحکام و تغییر طول محل اتصال می‌شود.

بیشترین تغییر طول در محل اتصال در این سرعت دورانی

شکل ناحیه تلاطم در منطقه مکانیکی - حرارتی کمی متفاوت است. نحوه سیلان ماده در منطقه اغتشاش حین فرایند سبب می‌شود تا ریزساختار محل اتصال در منطقه مکانیکی - حرارتی تاثیر می‌گذارد. شکل 18 ریزساختار محل اتصال را در منطقه مکانیکی - حرارتی نشان می‌دهد.

سیلان مواد در قسمت زیرین بین ابزار نسبت به اطراف آن کمتر است این امر به دلیل تولید دمای کمتر در این منطقه و کاهش اندازه دانه‌ها در این منطقه نسبت به مناطق مرکز و نزدیک به سطح اطراف پین است. این پدیده در تصویر بزرگنمایی شده از منطقه زیرین محل اتصال که با میکروسکوپ نوری گرفته شد نیز قابل مشاهده است. این تصویر در شکل 19 قابل مشاهده است.

#### 4-5- بررسی استحکام اتصال

یکی از مهمترین تست‌ها در بررسی اتصال جوش، آزمون کشش می‌باشد. شکل 20 نتایج ازدیاد طول محل اتصال حاصل از تست کشش اتصال T شکل آلومینیوم 7075 را نشان می‌دهد.

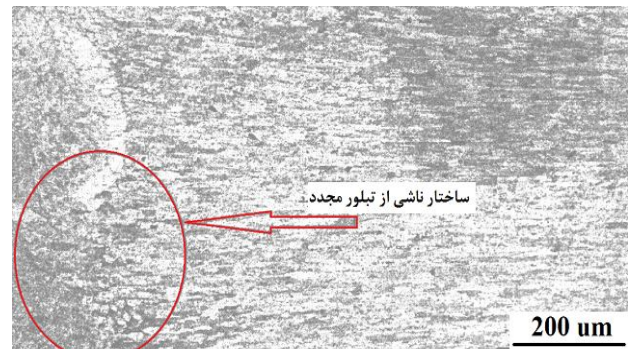


Fig. 17 Microstructure of stir zone

شکل 17 ریز ساختار محل اغتشاش

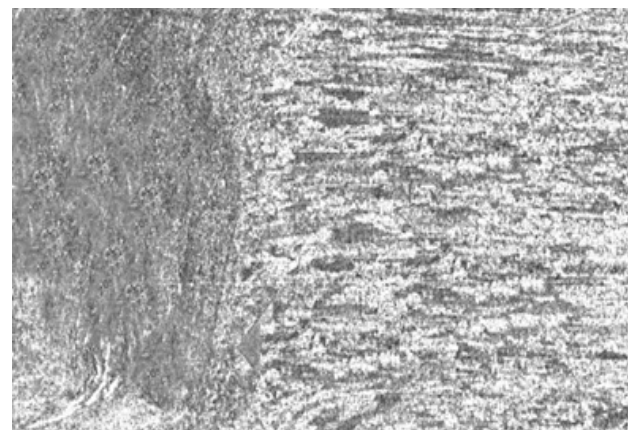


Fig. 18 Microstructure of thermos-mechanical affected zone

شکل 18 ریز ساختار منطقه مکانیکی - حرارتی

مقدار استحکام تسلیم نهایی این اتصالات به ترتیب 69، 75، 80 و 78 مگاپاسکال است که مربوط به سرعت‌های خطی 32، 45، 69، 108 می باشد.

با افزایش سرعت دورانی و کوچک شدن عیوب در محل اتصال استحکام جوش‌هایی که با سرعت دورانی 720 دور بر دقیقه به هم جوش داده شدند هم بالاتر می رود. این جوش‌ها دارای استحکام تسلیم نهایی 137 و 140 و 131 و 127 مگاپاسکال هستند که در سرعت‌های خطی 32، 45، 69 و 108 میلی‌متر در دقیقه تولید شدند. با افزایش سرعت خطی، استحکام جوش در سرعت‌های دورانی نیز بیشتر می‌شود، به‌طوریکه استحکام تسلیم نهایی اتصالاتی که با سرعت دورانی 980 و 1320 دور بر دقیقه به هم جوش داده شدند برابر با 117 و 177 مگاپاسکال است. استحکام این اتصالات در سرعت خطی 69 میلی‌متر در دقیقه به ترتیب 127 و 187 مگاپاسکال است. ورق‌هایی که با سرعت خطی 108 میلی‌متر بر دقیقه و با سرعت‌های دورانی 980 و 1320 دور بر دقیقه به هم جوش داده شدند دارای 121 و 184 مگاپاسکال استحکام تسلیم نهایی هستند.

### 5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اتصال T شکل آلومینیوم 7075 با استفاده از روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با موفقیت انجام شد. نتایج حاصل از تأثیر پارامترهای مکانیکی فرایند بر روی خواص مکانیکی و متالورژیکی این اتصال در زیر ارائه می‌شوند:

- با توجه به پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق، اغتشاش مواد خمیری و جریان مواد درونی و سطحی اتصال در سرعت‌های دورانی بین 720 تا 1320 دور در دقیقه و سرعت خطی 32 تا 69 میلی‌متر در دقیقه شکل مناسب‌تری به خود گرفت و عیوب سطحی اتصالات نیز از بین رفتند.

- با جابجایی پین ابزار در سمت پیشرو فلز پایه آلومینیومی و بررسی افستهای گوناگون مشخص شد که بهترین افسست مورد استفاده 1/5 میلی‌متر در سمت پیشرو است. در افستهای کمتر 1/5 میلی‌متر گرمای تولید شده و سیلان آلومینیوم خمیری مناسب نیست و در افسست بیش از آن عیوب سطحی زیادی در اتصال شکل می‌گیرد.

- در میان عمق نفوذهای انتخاب شده در این پژوهش، مناسب‌ترین جریان مواد و بالاترین استحکام در عمق نفوذ 0/4 میلی‌متر بدست آمد. اتصالاتی که در عمق نفوذ کمتر از 0/4 میلی‌متر تولید شدند، دارای عیب عدم پرشدن ریشه جوش در قسمت پسرو بودند.

مربوط به اتصالاتی است که در سرعت 69 میلی‌متر در دقیقه ایجاد گردید. (11/1 میلی‌متر) و کمترین آن مربوط به اتصالاتی است که در سرعت 32 میلی‌متر در دقیقه ایجاد گردید. (2/5 میلی‌متر) روند افزایشی تغییر طول در جوش‌هایی که با سرعت خطی 25 میلی‌متر در دقیقه تا 69 میلی‌متر در دقیقه به هم پیوند خوردند بر روی تمامی اتصالات حاکم است. با افزایش سرعت دورانی اندازه ی تغییر طول هم بیشتر می شود اندازه تغییر طول محل اتصال در سرعت خطی 69 میلی‌متر در دقیقه برای سرعت‌های دورانی 500، 720 و 980 دور بر دقیقه به ترتیب 3، 3 و 4 میلی‌متر می باشد. با افزایش سرعت خطی این روند رو به کاهش می رود. مقدار تغییر طول در سرعت 108 میلیمتر در دقیقه کاهش می‌یابد.

نتایج حاصل از بررسی استحکام نهایی اتصالات انجام شده در شکل 21 به نمایش درآمده است. همان‌طور که در شکل مشخص است، بیشترین مقدار استحکام تسلیم مربوط به اتصال 69 میلی‌متر در دقیقه و 1320 دور در دقیقه می‌باشد که مقدار آن 187 مگاپاسکال است. در شکل 21 می‌توان مشاهده کرد که استحکام جوش از سرعت خطی 32 میلی‌متر در دقیقه تا 69 میلی‌متر در دقیقه برای تمامی سرعت‌های دورانی، روند افزایشی دارد اما بر خلاف تغییر طول محل اتصال، استحکام تسلیم نهایی در سرعت خطی 108 میلی‌متر در دقیقه اختلاف زیادی با سرعت خطی 69 میلی‌متر در دقیقه ندارد. البته کاهش مقدار استحکام نهایی تمامی اتصالات، مشابه با تغییر طول محل اتصال وجود دارد. اتصالاتی که با سرعت دورانی 500 دور در دقیقه به یکدیگر جوش داده شده اند، دارای کمترین استحکام تسلیم در مقایسه با دیگر اتصالات هستند.

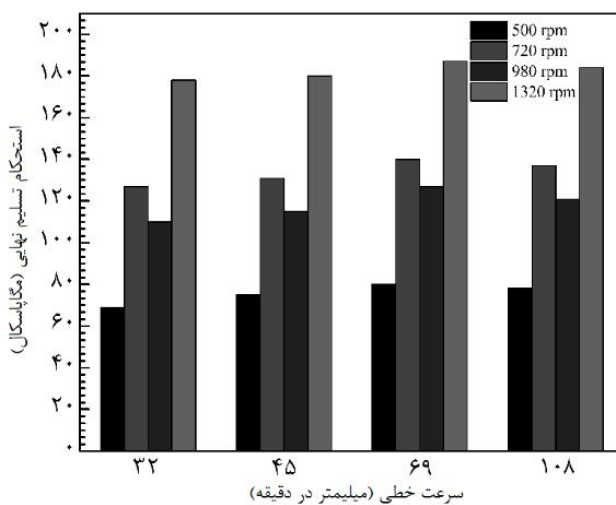


Fig. 21 Joints ultimate tensile strength

شکل 21 استحکام تسلیم اتصال

- International Journal of Advance Manufacturing and Technology*, Vol. 44, pp. 570–578, 2009.
- [6] G. Buffa, L. Fratini, F. Micari, R. Shivpuri, Material Flow in FSW of T-joints: Experimental and Numerical Analysis, *International Journal of Material Forming*, Vol. 1, pp. 1283–1286, 2008.
- [7] L. Donati, L. Tomesani, A. Morri, structural T-joint produced by means of friction stir welding (FSW) with filling material, *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, pp. 295–298, 2009.
- [8] A. Astarita, A. Squillace, A. Scala, A. Prisco, On the Critical Technological Issues of Friction Stir Welding T-Joints of Dissimilar Aluminum Alloys, *Journal of Material Engineering and Performance*, Vol. 21, pp. 1763–1771, 2012.
- [9] G. Zhou, X.Q. Yang, L. Cui, Z.H. Zhang, and X.D. Xu, Study on the Microstructures and Tensile Behaviors of Friction Stir Welded T-joints for AA6061-T4 Alloys, *Journal of Material Engineering and Performance*, Vol. 21, pp. 2131–2139, 2012.
- [10] K. Krasnowski, Experimental Study of FSW T-joints of EN-AW 6082-T6 and Their Behaviour under Static Loads, university of petroleum and minerals, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 39, Issue 12, pp 9083-9092, 2014.
- [11] Q. M. Doos, K. S. Makki, Defects Analysis of Tee-Section Welding Using Friction Stir Welding Process of Aluminum, *Journal of Engineering*, Vol. 20, No. 10, 2014.
- [12] H. Aghajani Derazkola, M. Habibnia, H. Jamshidi Aval, Study on Frictional Heat Behavior and Material Flow during Friction Stir Welding Of AA1100 Aluminum Alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, Issue 14, pp. 251-261, 2015. (in Persian فارسی)
- [13] G. F. Zhang, W. Su, J. Zhang and J. X. Zhang, Visual observation of effect of tilting tool on forging action during FSW of aluminium sheet, *Science and Technology of Welding and Joining*, VOL 16, NO 1, pp. 87-91, 2011.
- در این پژوهش، مناسب‌ترین استحکام و جریان سطحی در اتصالی ایجاد شد که در آن ابزار دارای زاویه 2 درجه بود. در زاویه انحراف‌های 1 درجه جریان سطحی مناسب نبود و در زاویه انحراف 3 درجه خروج مواد از سطح اتصال و ایجاد فلش در کناره‌های سطح اتصال مشاهده شد.
- مستحکم‌ترین اتصال تولید شده در این فرایند 181 مگاپاسگال استحکام داشت که در سرعت دورانی 1320 دور در دقیقه، سرعت خطی 69 میلی‌متر در دقیقه، زاویه انحراف 2 درجه، عمق نفوذ 0/4 میلی‌متر و افست 1/5 میلی‌متر در سمت پیشرو ایجاد شد.
- ### 6- مراجع
- [1] M. Elyasi, H. Aghajani Derazkola, M. Hossinzadeh, Study on joint zone Microstructure Evolution and Hardness in Friction Stir welding of AA1100 Aluminum alloy to A441 AISI steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, Issue 14, pp. 97-107, 2015. (in Persian فارسی)
- [2] M. Elyasi, H. Aghajani Derazkola, M. Hossinzadeh, Effects of friction stir welding parameters on mechanical quality of AA1100 aluminum alloy to A441 AISI steel joint, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 251-261, 2015. (in Persian فارسی)
- [3] H. Aghajani Derazkola, H. Jamshidi Aval, M. Elyasi, Analysis of process parameters effects on dissimilar friction stir welding of AA1100 and A441 AISI steel, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 20, Issue 7, pp. 553-562, 2015.
- [4] A. Đurđević, D. Živojinović, A. Grbović, A. Sedmak, M. Rakin, H. Dascau, S. Kirin, Numerical simulation of fatigue crack propagation in friction stir welded joint made of Al 2024-T351 alloy, *Engineering Failure Analysis*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.028>.
- [5] L. Fratini, G. Buffa, F. Micari, R. Shivpuri, on the material flow in FSW of T-joints: Influence of geometrical and technological parameters,