



## بررسی خواص متالورژیکی و مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با بکارگیری طراحی آزمایش به شیوه ترکیب مرکزی

امیرحسین لطفی<sup>۱</sup>، سلمان نوروزی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

۲- دانشیار مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

\* بابل، صندوق پستی ۴۸۴، s-nourouzi@nit.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ با داشتن ویژگی‌هایی نظیر مقاومت به خوردگی مناسب، نسبت استحکام به وزن بالا و هدایت حرارتی خوب در مقابل روش‌های جوش کاری ذوبی قابلیت جوش‌پذیری ضعیفی از خود نشان می‌دهد. جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، یک فرایند جوش کاری نوین در حالت جامد بوده که پارامترهای مختلفی در آن تأثیر دارند. در این تحقیق به بررسی تأثیر پارامترهای مهم جوش کاری نظیر سرعت دورانی، سرعت پیش‌روی و قطر شانه ابزار بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات جوش کاری شده با بکارگیری روش طراحی آزمایش به شیوهی رویه پاسخ پرداخته شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که برای دستیابی به خصوصیات مکانیکی مطلوب، کلیه پارامترها باید در مقدار بهینه خود مورد استفاده قرار گیرند زیرا مقدار نامناسب پارامترها باعث بروز مشکلاتی از جمله تشکیل عیوب، انحلال ذرات رسوب، رشد دانه و در نهایت افت خواص مکانیکی خواهد شد. از مجموع بیست اتصال ایجاد شده، جوش تولیدی در سرعت دورانی ۱۰۵۰ rpm، سرعت پیش‌روی ۱۰۰ mm/min و قطر شانه ابزار ۱۴ mm بهترین خواص مکانیکی و متالورژیکی را در مقایسه با سایر جوش‌ها از خود نشان داد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۲  
پذیرش: ۱۵ تیر ۱۳۹۲  
ارائه در سایت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳  
کلید واژه‌گان:  
جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی  
آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶  
خواص مکانیکی  
طراحی آزمایش به روش ترکیب مرکزی

## The microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075-T6 aluminum alloy by the use of design of experiment

Amirhossein Lotfi, Salman Nourouzi\*

Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran  
\* P.O.B. 484, Babol, s-nourouzi@nit.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 20 April 2013  
Accepted 06 July 2013  
Available Online 11 May 2014

Keywords:  
Friction Stir Welding  
AA7075-T6  
Mechanical Properties  
Central Composite Design

### ABSTRACT

The zinc containing aluminum alloy 7075-T6 is one of the strongest aluminum alloys that possess excellent combination of mechanical properties such as high strength to weight ratio, fatigue strength properties and good thermal conductivity. Generally the 7xxx series aluminum alloys are considered to be unweldable by traditional welding methods. Friction stir welding is a relatively new solid state process which is under the influence of different process parameters. In the current study, to investigate the effect of several main welding parameters such as rotational speed, traverse speed and tool shoulder diameter on mechanical and metallogical properties of the joints, a Design of Experiment (DOE) was used with a Response Surface Methodology (RSM) approach to find the ideal process settings and achieve optimal performance. Results showed that to achieve sound defect free joints parameters should be optimized. When improper welding parameters are used, problems such as defect formation, precipitates dissolution and grain growth can deteriorate the mechanical properties of the joint. So, of the twenty joints fabricated using various welding parameters, the joint fabricated at a rotational speed of 1050 rpm, welding speed of 100 mm/min and shoulder diameter of 14 mm exhibited superior mechanical and metallurgical properties in comparison to other fabricated joints.

### ۱- مقدمه

نمونه باعث تغییر شکل مواد و ایجاد اتصال بین دو صفحه فلزی می‌شود [۱،۲]. سرعت جوش کاری بالا، خصوصیات مکانیکی و متالورژیکی خوب، نیاز به مهارت کم، اعوجاج ناچیز و کاهش قابل توجه تنش پسماند از جمله مهم‌ترین مزایای جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی در مقایسه با جوش کاری ذوبی می‌باشد. امروزه این فرایند با توجه به مزایای منحصر به فرد کاربرد وسیعی در صنایع هوا فضا، کشتی‌سازی، اتومبیل‌سازی و نظامی پیدا کرده است [۳،۴]. فرایند

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>۱</sup> (FSW) که برای اولین بار در سال ۱۹۹۱ توسط انجمن جوش کاری انگلستان ابداع شد، یک فرایند اتصال در حالت جامد می‌باشد که در آن یک ابزار چرخان غیر مصرفی با زاویه انحراف مناسب به محل تماس دو ورق وارد شده و با حرارت ناشی از اصطکاک بین ابزار و سطح

1- Friction Stir Welding (FSW)

### Please cite this article using:

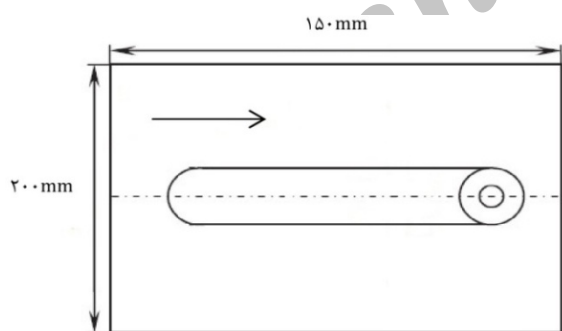
M. Soltan Rezaee, M.R. Ghazavi, A.A. Jafari, Stability analysis of a three-axis power transmission system, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 17-26, 2014 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

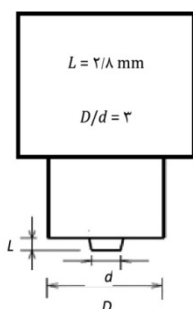
مورد استفاده از جنس فولاد گرم کار H13 بوده که در شکل ۲ مشخصات هندسی آن نشان داده شده است. شکل ابزار بصورت مخروطی و طول بین حدود ۲/۸ میلی متر انتخاب شد. جهت چرخش ابزار در حین جوش کاری بصورت مخالف چرخش عقربه ساعت بوده و نسبت به محور عمودی با زاویه انحراف ۲ درجه موقعیت دهی شد.

کلیه نمونه های آزمون کشش طبق استاندارد ASTM E8 آماده و با استفاده از دستگاه وایرکات به ابعاد مورد نظر رسیدند. آزمون کشش با سرعت ثابت ۱ mm/min در دمای محیط برای کلیه جوش ها و فلز پایه انجام شد. آزمون ریزسختی سنجی بر اساس معیار ویبکرز روی خط میانی مقطع عرضی نمونه های متالوگرافی در فواصل ۲ میلی متری از هم با اعمال نیروی ۱/۹۶ نیوتن در مدت زمان ۱۰ ثانیه انجام شد و نمودار تغییرات سختی برای نمونه های مختلف رسم شد. نمونه ها پس از جوش کاری مورد بررسی های متالوگرافی قرار گرفتند. برای مطالعه دقیق میکروساختاری، نمونه ها به اندازه های مورد نیاز از مقطع عرضی بریده شده و توسط سمباده های مختلف سمباده کاری و سپس صیقل کاری شدند. در ادامه نمونه ها توسط محلول استاندارد کور شامل ۲ میلی لیتر اسید فلوریدریک، ۵ میلی لیتر اسید نیتریک، ۳ میلی لیتر اسید کلریدریک و ۱۹۰ میلی لیتر آب مقطر به مدت ۱۵ ثانیه حکاکی شیمیایی شدند. ریز ساختار سطح مقطع نواحی مختلف جوش و فلز پایه توسط میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین برای ارزیابی ترکیبات شیمیایی رسوبات موجود در نواحی مختلف جوش و بررسی مورفولوژی سطح شکست نمونه های تحت آزمون کشش از میکروسکوپ روبشی (SEM) و پراش پرتو اشعه X استفاده شد. در این تحقیق برای بررسی دقیق تأثیر پارامترهای مهم فرایند جوش کاری نظیر سرعت دورانی، سرعت پیش روی و قطر شانه ابزار، از روش طراحی آزمایش به شیوه رویه پاسخ برای یافتن مقدار بهینه پارامترها برای دستیابی به خواص مطلوب استفاده شد.

هر پارامتر در پنج سطح مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر متقابل پارامترهای جوش کاری و خصوصیات مکانیکی به طور کامل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. آزمایش های طراحی شده به روش ترکیب مرکزی در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱ تصویر شماتیک اتصال



شکل ۲ مشخصات هندسی ابزار

در اتصال انواع آلیاژهای غیر آهنی نظیر آلومینیم، تیتانیوم، منیزیم، مس و همچنین انواع فولادها استفاده فراوانی دارد [۵]. به هر حال، اگر در فرایند FSW از پارامترها به صورت بهینه استفاده شود، این فرایند قادر به اتصال آلیاژهای آلومینیم استحکام بالا به صورت سالم و با کیفیت می باشد [۷،۶]. آلیاژ آلومینیم T6-7075 از آلیاژ های سری ۷۰۰۰ است که با استفاده از عملیات حرارتی سختی رسوبی مقادیر استحکام و سختی آنها افزایش یافته و این امر سبب کاربرد وسیع آنها در صنایع مختلف نظیر اتومبیل سازی و هوا فضا می شود. روی اصلی ترین عنصر آلیاژی این گروه بوده و با افزودن مقدار کمی منیزیم، یک آلیاژ عملیات حرارتی پذیر با استحکام خیلی بالا حاصل می شود. آلیاژهای آلومینیم استحکام بالا (سری های ۲۰۰۰ و ۷۰۰۰) معمولاً به دلیل تغییرات ناخواسته ساختار در محل ذوب و کاهش خواص به سختی توسط روش های ذوبی جوش کاری می شوند. مهم ترین مشکل این دسته از آلیاژها عدم جوش پذیری آنها توسط روش های ذوبی به دلیل حساسیت شدید به ترک خوردگی انجمادی به دلیل حضور مس و پیدایش مشکلات عدیده ای نظیر تخلخل و تولید بخارات خطرناک ناشی از اکسید شدن عنصر روی در حین جوش کاری می باشد [۸،۹]. با توجه به مشکلات اشاره شده، استفاده از فرایندهای حالت جامد نظیر جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی برای آلیاژ آلومینیم T6-7075 بسیار مناسب می باشد. تاکنون تحقیقات نسبتاً گسترده ای در رابطه با استفاده از فرایند FSW در اتصال آلیاژهای آلومینیم و تأثیر پارامترهای جوش کاری بر روی خواص متالورژیکی و مکانیکی اتصالات صورت گرفته است [۱۰،۱۱]. نوروزی و همکاران [۱۲] به مقایسه خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال آلیاژ آلومینیم به روش اصطکاکی اغتشاشی در هوا و زیر آب پرداختند. همچنین در مورد اتصال فلزات غیر همجنس به وسیله این روش تحقیقات کثیری انجام گرفته که از آن جمله می توان به اتصال آلیاژ آلومینیم به فولاد آستنیتی را نام برد [۱۳]. کیمارو و همکاران [۱۴] به بررسی پدیده اتصال در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ T6-7075 پرداختند و به شباهت های مکانیزم جوش کاری این آلیاژ و فولاد کم کربن به دلیل استحکام کششی های نسبتاً مشابه اشاره کردند. راجا کومار و همکاران [۱۵] نشان دادند که برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب مهم ترین عامل داشتن منطقه اغتشاش بی عیب با دانه بندی منظم و پراکندگی یکنواخت ذرات رسوب MgZn<sub>2</sub> می باشد. تحقیقات زیادی برای پیدا کردن تأثیر گذارترین پارامترها و بررسی تأثیرات آنها صورت گرفته اما بررسی تأثیر پارامترهای مهم فرایندی بر روی اتصالات آلیاژ آلومینیم T6-7075 با بکارگیری طراحی آزمایش و تحلیل واریانس بصورت معدود گزارش شده است.

در این تحقیق، تأثیر سه پارامتر مهم جوش کاری از جمله سرعت دورانی (N)، سرعت پیش روی (S) و قطر شانه ابزار (D) را بر روی خصوصیات میکرو ساختاری و مکانیکی اتصالات جوش کاری شده آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ به روش جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با بکارگیری روش طراحی آزمایش به شیوه رویه پاسخ بررسی شد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، از ورق های آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ به ضخامت ۳ میلی متر به عنوان فلز پایه استفاده شد. صفحات آلومینیمی در ابعاد ۱۵۰×۱۰۰ میلی متری ماشین کاری شدند و برای جوش کاری هم جنس در حالت لب به لب مورد استفاده قرار گرفتند. تصویر شماتیک اتصال در شکل ۱ نشان داده شده است. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی فلز پایه در جدول ۱ آورده شده است. ابزار



۳-۲- استحکام کششی

معین می‌کند.

بازدهی جوش برای کلیه نمونه‌های تولید شده در مقایسه با روش‌های قدیم جوش کاری که در آن‌ها میزان بازدهی جوش از مقدار ۵۰٪ فرا تر نمی‌رفت، در محدوده قابل قبول ۵۶٪ تا ۸۷٪ بوده است [۱۶]. محل شکست نمونه‌ها در آزمون کشش در جدول ۵ نشان داده شده است. بدیهی است شکست در جوش‌های معیوب در محل وجود عیب یعنی منطقه اغتشاش رخ داده است. ترک‌ها از محل وجود عیب در منطقه اغتشاش شروع به گسترش کرده و به سمت مناطق دیگر نظیر TMAZ یا HAZ انتشار می‌یابد تا در نهایت شکست در اتصال اتفاق بیافتد.

در اتصالات بی عیب، مقدار استحکام کششی به مشخصات ریز ساختاری ضعیف‌ترین نقطه جوش بستگی دارد.

نتایج حاصل از انجام آزمون کشش و محل شکست کلیه نمونه‌ها در جدول ۳ آمده است. بالاترین مقدار استحکام کششی (TS) برای نمونه شماره ۱۲ با مقدار ۴۴۲MPa بدست آمد که در سرعت دورانی ۱۰۵۰rpm، سرعت پیش‌روی ۱۰۰mm/min و قطر شانه ابزار ۱۴ میلی‌متر جوش کاری شد. وجود عیب در برخی از جوش‌ها باعث کاهش چشم‌گیر مقدار استحکام کششی و بازدهی جوش (JE) شده است. حرارت ورودی بیش از حد در نمونه شماره ۶ به دلیل سرعت دورانی و قطر شانه ابزار بالا بعلاوه سرعت پیش‌روی پایین باعث ایجاد جریان توربولانس در مواد پلاستیک شده و عامل کاهش چشم‌گیر خصوصیات مکانیکی در این نمونه شده است. میزان استحکام کششی جوش تولید شده به استحکام کششی فلز پایه مقدار بازدهی جوش را

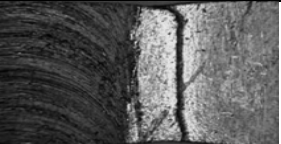


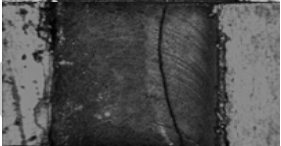
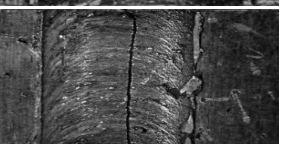
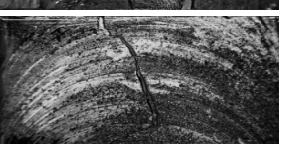
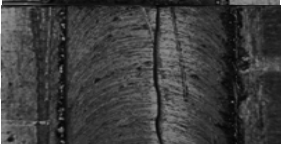
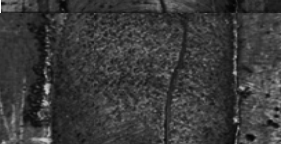
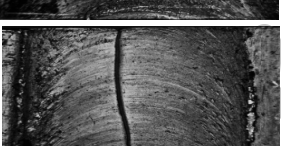
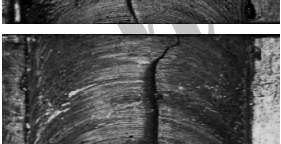


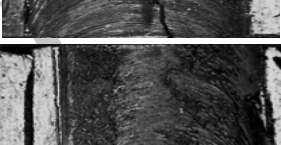


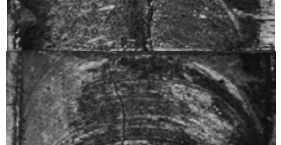
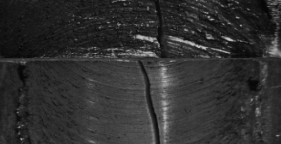
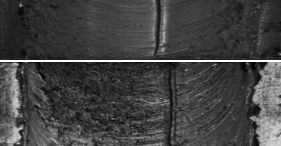




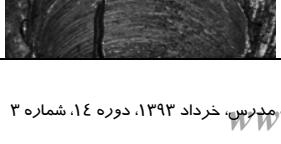

جدول ۳ مقطع عرضی نمونه های جوش کاری شده در شرایط مختلف جوش کاری

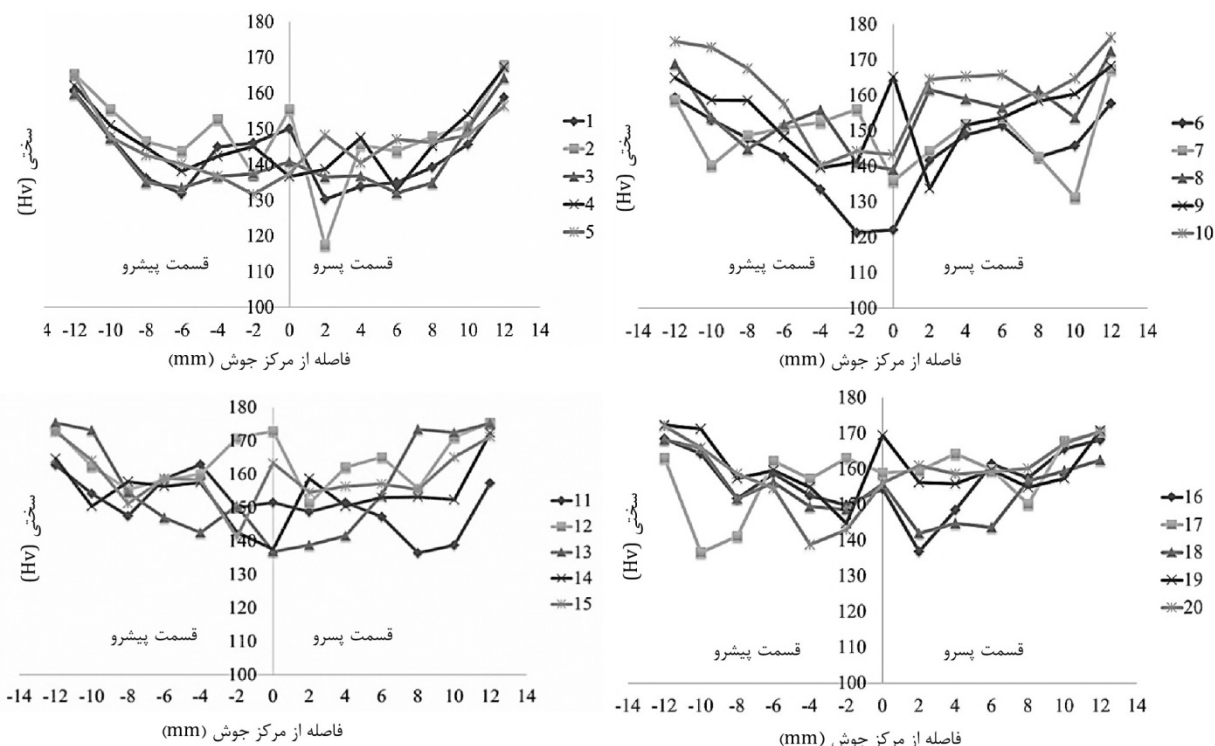
نام عیب	مقطع عرضی جوش		شماره مشخصات نمونه جوش کاری	نام عیب	مقطع عرضی جوش		شماره مشخصات نمونه جوش کاری
	AS	RS			AS	RS	
بدون عیب			N=1000 S=16 D=14	حفره			N=800 S=31/5 D=10/4
بدون عیب			N=1000 S=100 D=14	بدون عیب			N=1250 S=31/5 D=10/4
عیب تونلی			N=1000 S=63 D=8	عیب تونلی			N=800 S=80 D=10/4
عیب بوسه‌ایی			N=1000 S=63 D=20	عیب تونلی			N=1250 S=80 D=10/4
بدون عیب			N=1000 S=63 D=14	بدون عیب			N=800 S=31/5 D=17/5
بدون عیب			N=1000 S=63 D=14	بدون عیب			N=1250 S=31/5 D=17/5
حفره			N=1000 S=63 D=14	حفره			N=800 S=80 D=17/5
بدون عیب			N=1000 S=63 D=14	بدون عیب			N=1250 S=80 D=17/5
بدون عیب			N=1000 S=63 D=14	بدون عیب			N=500 S=63 D=14
بدون عیب			N=1000 S=63 D=14	بدون عیب			N=1600 S=63 D=14

نشد. برای تعیین درصد ازدیاد طول جوش باید این نکته را در نظر داشت که تغییر شکل پلاستیکی، به خصوص در آخرین مرحله گلوبی شدن، عمدتاً به ضعیف‌ترین منطقه در حین آزمون کشش بستگی دارد. این مسأله به این معناست که درصد ازدیاد طول در اتصالات جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی، اساساً توسط میزان تغییرشکل پلاستیکی ضعیف‌ترین نقطه اتصال جوش تعیین می‌شود [۱۷].

در این اتصالات شکست در سمتی اتفاق می‌افتد که کمترین مقدار سختی (HV) را داشته باشد. همان‌طور که در جدول ۴ مشخص است محل شکست برای بیشتر نمونه‌های جوش کاری در سمت پسرو جوش بوده و تنها تعداد معدودی از جوش‌ها در سمت پیشرو شکستند. از آن جایی که تغییر شکل ماکرو پلاستیک به ندرت در اتصالات آلیاژ آلومینیم T6-7075 اتفاق می‌افتد، به همین دلیل گلوبی شدگی قابل توجهی در اطراف محل شکست مشاهده

جدول ۴ محل شکست و مشخصات مکانیکی نمونه‌های جوش کاری شده

مشخصات مکانیکی محل شکست	سطح شکست		شماره نمونه	مشخصات مکانیکی محل شکست		شماره نمونه
	AS	RS		AS	RS	
سمت پسرو TS = ۳۷۸ HV = ۱۵۱ JE = ۷۳٪			۱۱ سمت پسرو TS = ۳۹۹ HV = ۱۵۰ JE = ۷۷٪			۱
سمت پسرو TS = ۴۵۰ HV = ۱۷۲ JE = ۸۷٪			۱۲ سمت پسرو TS = ۴۰۵ HV = ۱۵۵ JE = ۷۸٪			۲
سمت پسرو TS = ۳۲۱ HV = ۱۳۶ JE = ۶۲٪			۱۳ سمت پسرو TS = ۳۷۳ HV = ۱۴۰ JE = ۷۲٪			۳
سمت پسرو TS = ۳۱۴ HV = ۱۳۷ JE = ۶۰٪			۱۴ سمت پسرو TS = ۳۳۸ HV = ۱۳۶ JE = ۶۵٪			۴
سمت پیشرو TS = ۴۰۰ HV = ۱۶۳ JE = ۷۷٪			۱۵ سمت پیشرو TS = ۳۳۴ HV = ۱۳۷ JE = ۶۴٪			۵
سمت پسرو TS = ۳۷۵ HV = ۱۵۴ JE = ۷۲٪			۱۶ سمت پیشرو TS = ۲۹۰ HV = ۱۲۲ JE = ۵۶٪			۶
سمت پیشرو TS = ۳۹۰ HV = ۱۵۸ JE = ۷۵٪			۱۷ سمت پسرو TS = ۳۳۰ HV = ۱۳۵ JE = ۶۳٪			۷
سمت پسرو TS = ۳۷۸ HV = ۱۵۵ JE = ۷۳٪			۱۸ سمت پیشرو TS = ۳۱۲ HV = ۱۳۸ JE = ۶۰٪			۸
سمت پسرو TS = ۴۲۷ HV = ۱۶۹ JE = ۸۲٪			۱۹ سمت پسرو TS = ۴۳۰ HV = ۱۶۵ JE = ۸۳٪			۹
سمت پیشرو TS = ۳۸۵ HV = ۱۵۶ JE = ۷۴٪			۲۰ سمت پیشرو TS = ۳۳۱ HV = ۱۴۳ JE = ۶۴٪			۱۰



شکل ۶ نمودار توزیع سختی نمونه های جوش کاری شده

### ۳-۳- سختی

نمودار تغییرات سختی در طول خط میانی مقطع جوش های ایجاد شده در آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-T۶ توسط فرایند FSW در شکل ۶ ارائه شده است. سختی فلز پایه حدود ۱۷۰ ویکرز می باشد. فرایند جوش کاری در آلیاژهای آلومینیم رسوب سختی شده باعث نرم شدن ناحیه اطراف مرکز جوش و کاهش سختی آن ها نسبت به فلز پایه می شود. تغییرات سختی در آلیاژهای سختی رسوبی به شدت وابسته به تغییرات دمایی در ضمن فرایند می باشد. افزایش دما باعث انحلال و یا رشد رسوبات در نواحی مختلف جوش شده که این مسأله بر میکروساختار و خواص قطعات تأثیر می گذارد. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود توزیع سختی در نقاط مختلف جوش به خصوص در مناطق اغتشاش و متأثر از حرارت بصورت ناهمگن می باشد. در آلیاژهای آلومینیم عملیات حرارتی پذیر، خواص مکانیکی و سختی قطعات جوش کاری شده شدیداً تحت تأثیر میزان یکنواختی توزیع رسوبات، اندازه مناسب رسوبات سخت کننده آلیاژ، اندازه دانه و ترکیبات بین فلزی است. اندازه دانه در منطقه اغتشاش ریزتر از مناطق دیگر جوش نظیر TMAZ و HAZ می باشد، بنابراین انتظار می رود که سختی در منطقه اغتشاش نسبت به مناطق اطرافش مقدار بالاتری داشته باشد [۱۸]. همچنین طبق مکانیزم سختی اروان، وجود ترکیبات بین فلزی ریز در منطقه اغتشاش باعث افزایش سختی در این ناحیه می شود. افت سختی در مناطق TMAZ و HAZ نیز به دلیل درشت شدن و انحلال ذرات رسوب در اثر دمای بالا و تغییر شکل پلاستیکی موجود می باشد. البته به دلیل این که در منطقه TMAZ دما به اندازه کافی افزایش نیافته، تبلور مجدد دینامیکی در این منطقه رخ نداده و در نتیجه افت سختی نسبت به مرکز جوش مشاهده می شود. همچنین نرخ بالای سرد شدن در این مناطق باعث تسریع در رسوب گذاری دوباره فازهای استحکام بخش می شود. بیشترین سختی میانگین در مرکز منطقه اغتشاش برای نمونه شماره ۱۲ با مقدار ۱۷۲ ویکرز بدست آمد. همچنین کمترین مقدار سختی از بین تمامی نمونه ها برای نمونه شماره ۶ در منطقه TMAZ سمت پیشرو با مقدار ۱۲۱ ویکرز معادل

۶۹٪ سختی فلز پایه بدست آمد. نتایج حاصله نشان می دهد که تغییر در پارامترهای جوش کاری تأثیر زیادی بر روی خصوصیات مکانیکی جوش نظیر استحکام کششی و سختی خواهد گذاشت.

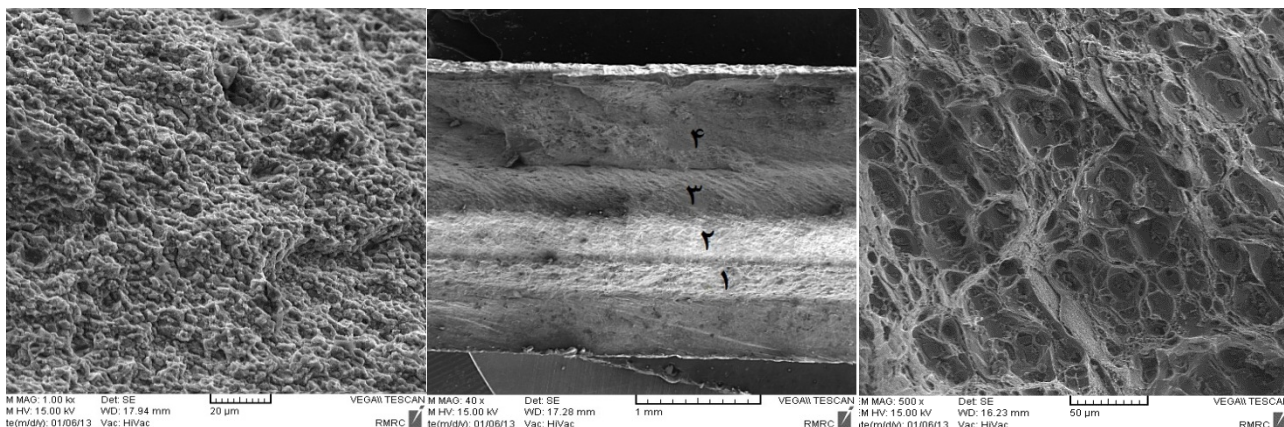
### ۳-۴- مورفولوژی سطح شکست

مطالعه سطح شکست نمونه های آزمون کشش برای تشخیص نوع شکست و بررسی تأثیر پارامترهای جوش کاری روی ساختار شکست توسط تصاویر SEM تهیه شده صورت گرفت. از بین تمامی نمونه های جوش کاری شده، جوش شماره ۱۲ به عنوان مستحکم ترین اتصال و دارای بیشترین مقدار استحکام کششی و جوش شماره ۶ به عنوان ضعیف ترین اتصال و دارای کمترین مقدار استحکام کششی برای بررسی سطح شکست انتخاب گردیدند. در شکل ۷ تصاویر SEM حاصل از نمونه ها نشان داده شده است. سطح شکست نمونه شماره ۱۲ بطور کامل پوشیده از دیپل های<sup>۱</sup> بزرگ و عمیق به همراه رشته های پاره شده<sup>۲</sup> مواد می باشد که نمایانگر تغییر شکل پلاستیکی زیاد در حین آزمون کشش می باشد. شکل ۷-الف به خوبی نشان می دهد که نوع شکست در نمونه شماره ۱۲ شکست نرم بوده است.

شکست ذرات رسوب در حین آزمون کشش باعث تسریع فرایند شکست نهایی می شود. همان طور که در شکل ۷-ب نشان داده شده است، سطح شکست نمونه شماره ۶ را می توان به چهار قسمت مختلف تقسیم بندی کرد. نوع شکست کلی در این نمونه شکست ترد بوده که در برخی مناطق علایم جزئی از شکست نرم نیز در آن دیده شده است. در مناطق ۱ و ۳ ساختار رشته های لایه ای به همراه حفره ها و رشته های پاره شده مواد به خوبی دیده می شوند (شکل ۷-ج و ه). سطح شکست در منطقه ۲ پوشیده از دیپل های کوچک و سطحی به همراه حفره های کوچک پراکنده در سطح زمینه است (شکل ۷-د).

1- Dimples  
2- Tearing Ridges

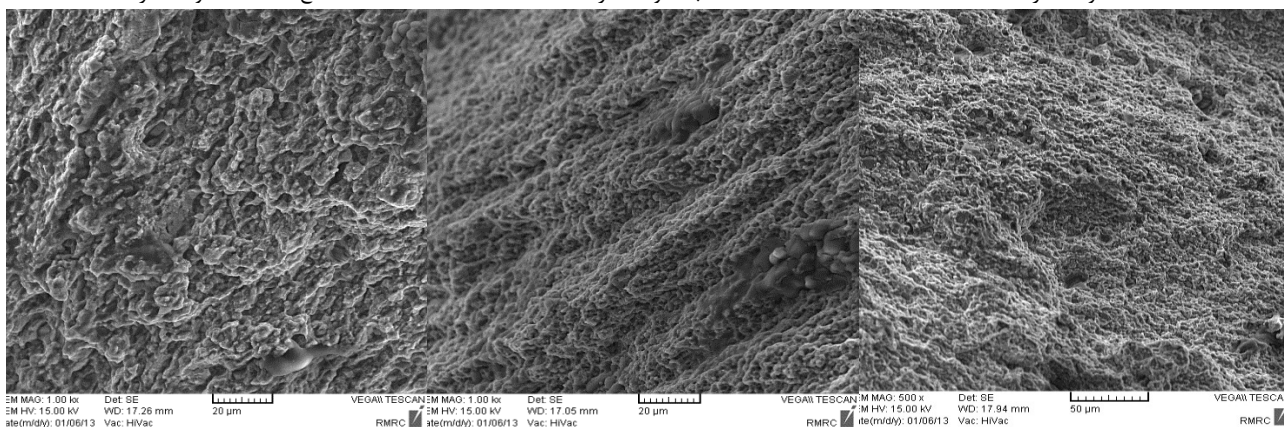




(ج) منطقه ۱ نمونه شماره ۶

(ب) نمونه شماره ۶

(الف) نمونه شماره ۱۲



(و) منطقه ۴ نمونه شماره ۶

(ه) منطقه ۳ نمونه شماره ۶

(د) منطقه ۲ نمونه شماره ۶

شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های جوش کاری شده

اغتشاش نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین سرعت دورانی بالا منجر به افزایش دما در ناحیه جوش کاری به دلیل افزایش حرارت ناشی از اصطکاک می‌شود. شکل ۸ تأثیر سرعت دورانی بر روی استحکام کششی و میکروسختی اتصالات آلیاژ آلومینیوم T6-7075 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییر استحکام کششی و سختی تقریباً مشابه است. با افزایش سرعت دورانی، هم استحکام کششی و هم سختی نمونه‌ها ابتدا به آرامی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در سرعت دورانی پایین جریان ناکافی مواد پلاستیک شده به دلیل حرارت کم باعث به وجود آمدن عیوبی نظیر فضاهای خالی ریز در منطقه اغتشاش می‌شود که منجر به کاهش خواص مکانیکی اتصال می‌گردد. از طرف دیگر، سرعت دورانی بالا باعث تولید حرارت بیش از حد در منطقه اغتشاش و ایجاد جریان توربولانس در مواد پلاستیک شده می‌شود.

این امر عامل تشکیل عیوبی نظیر ترک و فضاهای خالی ریز در ناحیه جوش کاری می‌باشد. افزایش حرارت ورودی در حین جوش کاری به دلیل سرعت دورانی بالا باعث افزایش پهنای منطقه نرم شده و کاهش مقدار سختی در این منطقه نسبت به فلز پایه می‌شود. همچنین افزایش تولید حرارت باعث درشت شدن دانه‌ها و کاهش نرخ سرد شدن می‌شود که علاوه بر کاهش سختی، این اجازه را به فازهای استحکام بخش می‌دهد که دوباره رسوب‌سازی کنند [۱۵]. بنا بر این، از مجموع بیست جوش تولید شده با استفاده از پارامترهای مختلف، نمونه شماره ۱۲ با سرعت دورانی ۱۰۵۰ rpm بهترین خواص مکانیکی را در میان سایر جوش‌ها که در سرعت‌های دورانی پایین‌تر یا بالاتر تولید شدند از خود نشان داد. از این رو می‌توان این‌طور نتیجه گرفت

مورفولوژی کلی سطوح شکست قسمت‌های مختلف نمونه شماره ۶ حاکی از شکستن ترد این نمونه در آزمون کشش می‌باشد. همچنین ذرات ترک خورده فاز دوم در زمینه ی بی شکل سطح شکست منطقه ۴ قابل مشاهده هستند (شکل ۷-و). در نهایت می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که تغییر در مقدار پارامترهای مختلف جوش کاری باعث تغییر در ساختار و نوع شکست نمونه‌های جوش کاری شده می‌شود.

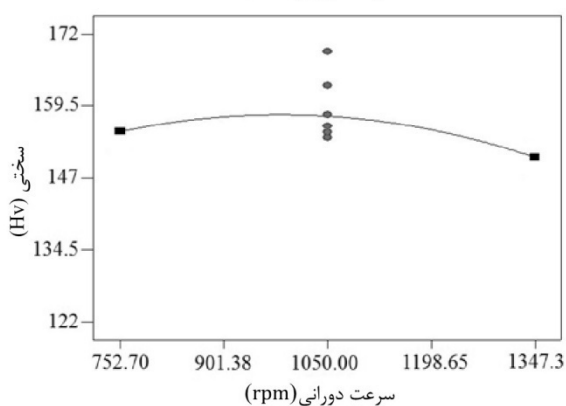
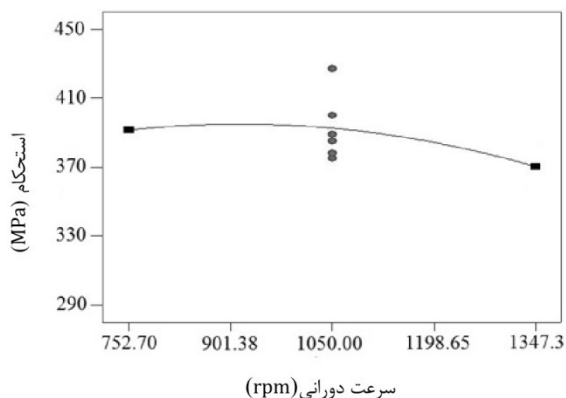
#### ۴- بحث

تمامی آزمایشها برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف جوش کاری برای تشکیل جوشی بی‌عیب با خصوصیات مکانیکی مطلوب بر طبق طراحی آزمایش انجام شد. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی کیفیت جوش‌های تولید شده به طور کلی تابع پارامترهای فرایندی نظیر سرعت دورانی، سرعت پیش‌روی، نیروی محوری و همچنین هندسه ابزار نظیر قطر شانه ابزار، شکل پین، اندازه پین و غیره می‌باشد. بهینه‌سازی این پارامترها برای به دست آوردن جوش بی‌عیب با مشخصات عالی از اهمیت زیادی برخوردار است. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر دو پارامتر فرایندی (سرعت دورانی و سرعت پیش‌روی) و یک پارامتر ابزار (قطر شانه ابزار) بر روی خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصالات می‌باشد. برای رسیدن به این هدف، تمامی نتایج توسط نرم‌افزار متخصص طراحی تحلیل و به کمک نمودارهای آماری به دقت مورد بررسی قرار گرفت.

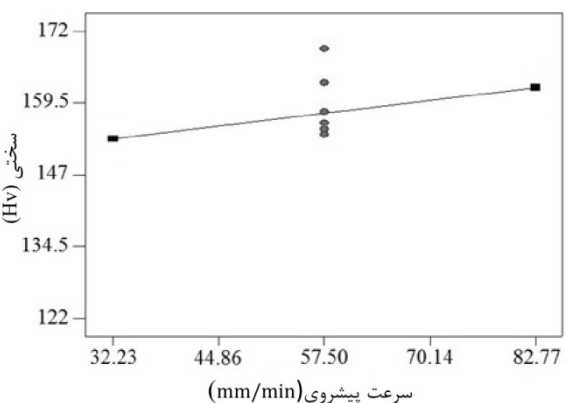
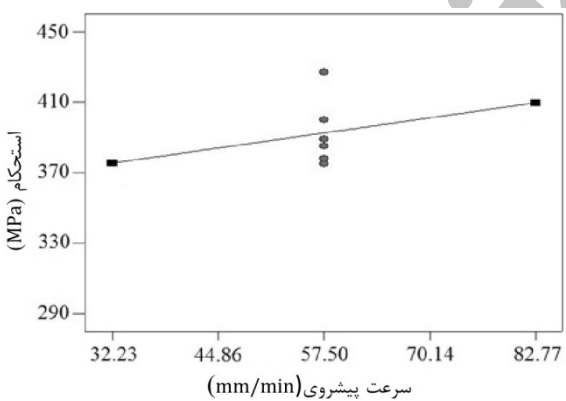
#### ۴-۱- تأثیر سرعت دورانی

در فرایند FSW، چرخش ابزار باعث ایجاد اغتشاش و ترکیب مواد با یکدیگر می‌شود. هر چه سرعت دورانی افزایش یابد، میزان حرارت ورودی به منطقه

بیشتر در عمق نفوذ و جوش پذیری ریشه جوش مهم بوده است به گونه‌ای که با کوچک شدن این مقادیر، عمق نفوذ کم بود و انتهای دو ورق فلزی به هم جوش نمی‌خورد که در این بین البته نقش طول پین مهم‌تر است.



شکل ۸ تأثیر سرعت دورانی بر استحکام کششی و سختی



شکل ۹ تأثیر سرعت پیشروی بر استحکام کششی و سختی

که در سرعت‌های دورانی نامناسب، ترکیبی از تأثیر انحلال رسوبات در حین جوش کاری، شکل‌گیری عیوب، درشت شدن دانه‌ها و به هم پیوستن فضاهای خالی ریز در منطقه جوش می‌تواند خواص مکانیکی نا مطلوبی در اتصال ایجاد کند.

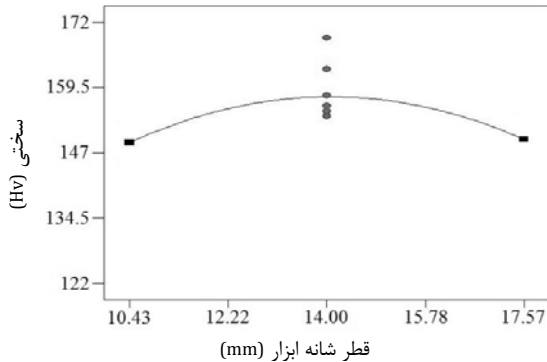
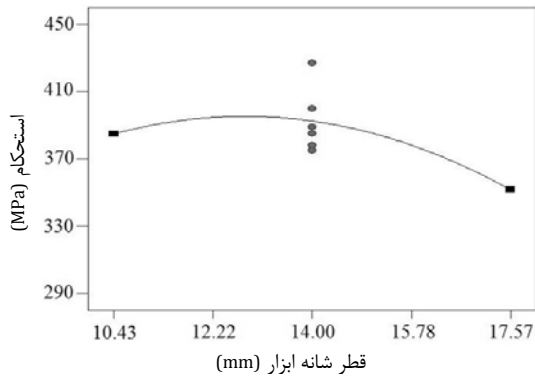
#### ۴-۲- تأثیر سرعت پیشروی

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، میزان حرارت ورودی به پارامترهای جوش کاری نظیر سرعت دورانی و سرعت پیشروی بستگی دارد. نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد این است که نرخ گرمایش در حین جوش کاری بطور کلی توسط سرعت پیشروی کنترل می‌شود. شکل ۹ تأثیر سرعت پیشروی بر روی استحکام کششی و سختی اتصالات آلیاژ آلومینیم T6-7075 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییر استحکام کششی و سختی تقریباً مشابه است. با افزایش سرعت پیشروی، هم سختی و هم استحکام کششی نمونه‌ها به طور پیوسته افزایش پیدا کرده و در سرعت پیشروی 100 mm/min این مقادیر به بیشترین میزان خود رسیدند. سرعت پیشروی کم باعث افزایش حرارت ورودی و به تبع آن افزایش دما در ناحیه جوش کاری می‌شود. این امر باعث کاهش نرخ سرد شدن و بروز عیوب مختلف، تجمع رسوبات MgZn<sub>2</sub> در منطقه اغتشاش، رشد دانه و در نهایت افت خواص مکانیکی اتصال می‌شود. همچنین افزایش سرعت پیشروی باعث باریک‌تر شدن منطقه نرم شده به دلیل کاهش حرارت ورودی به ازای هر واحد طول جوش می‌شود. کاهش دما در حین جوش کاری از این جهت می‌تواند برای رسیدن به خصوصیات مکانیکی بهتر مطلوب باشد که مانع رسیدن بیشترین دما به دمایی بالاتر از دمای حل‌سازی رسوبات مغید و کاهش چگالی آن‌ها در منطقه جوش می‌شود [۱۹]. برای دستیابی به منطقه اغتشاش سالم با پراکندگی یکنواخت رسوبات در سطح زمینه باید از سرعت پیشروی بهینه برای تولید جوش استفاده کرد. بنابر این از مجموع بیست جوش تولید شده با استفاده از پارامترهای مختلف، نمونه شماره ۱۲ با سرعت پیشروی 100 mm/min بهترین خواص مکانیکی را در میان سایر جوش‌ها از خود نشان داد. همچنین می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که در سرعت‌های پیشروی نامناسب، ترکیبی از تأثیر عواملی همچون انحلال رسوبات، مقادیر سختی کمتر، شکل‌گیری عیوب و به هم پیوستن فضاهای خالی ریز در منطقه جوش می‌تواند باعث افت خواص مکانیکی در اتصال شود.

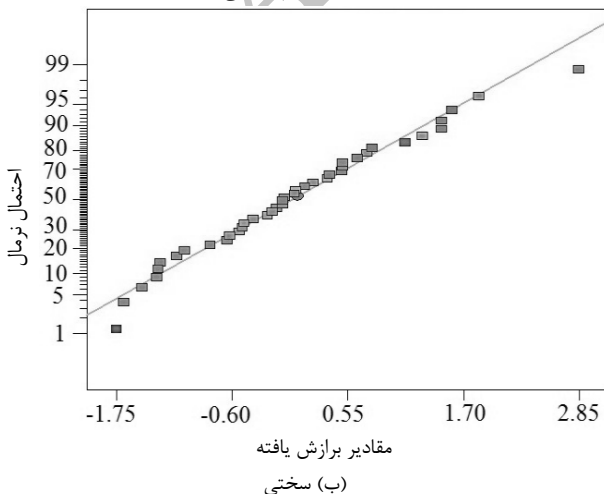
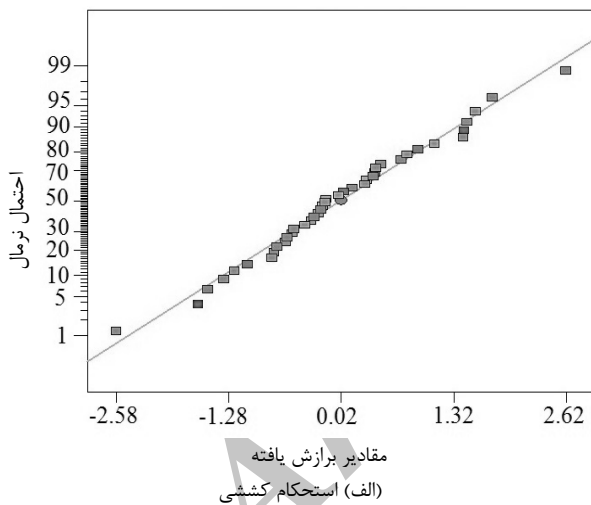
#### ۴-۳- تأثیر قطر شانه ابزار

هندسه ابزار نقش بسیار مهمی در جریان مواد و تولید حرارت در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی بازی می‌کند. اصطکاک بین شانه ابزار و سطح نمونه بیشترین بخش از حرارت مورد نیاز برای جوش کاری را تأمین می‌کند. قطر شانه ابزار با میزان حرارت تولیدی در جوش رابطه مستقیم دارد و از مهم‌ترین متغیرهای فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی می‌باشد که میزان حرارت ورودی میانگین به منطقه اغتشاش را تعیین می‌کند  $q_0 = 4/3\pi^2\mu P\omega R^3$  که در آن  $q_0$  توان خالص،  $\mu$  ضریب اصطکاک،  $P$  فشار،  $\omega$  سرعت دورانی و  $R$  شعاع ابزار می‌باشد (همچنین شانه ابزار با حبس مواد از فرار مواد پلاستیک شده از منطقه جوش جلوگیری می‌کند. بیشترین گرادیان دمایی را در حین فرایند لبه‌های شانه ابزار تجربه می‌کنند که این امر منجر به نرم شدگی مناطق اطراف مرکز جوش می‌شود. قطر پین و نسبت بین قطر پین و قطر شانه از جمله پارامترهای مهم جوش کاری می‌باشد که دقت به آن ضروریست. نقش طول و قطر پین ابزار





شکل ۱۰ تأثیر قطر شانه ابزار بر استحکام کششی و سختی



شکل ۱۱ نمودار احتمال نرمال مقادیر باقی مانده (الف) استحکام کششی (ب) سختی

وظیفه اصلی پین تولید حرارت، ایجاد اغتشاش و ترکیب مواد در منطقه اغتشاش می‌باشد. شکل ۱۰ تأثیر قطر شانه ابزار بر روی استحکام کششی و میکروسختی اتصالات آلیاژ آلومینیم T6-7075 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییر استحکام کششی و سختی تقریباً مشابه است. با افزایش قطر شانه ابزار از مقدار ۸ میلی‌متر، هم استحکام کششی و هم سختی نمونه‌ها ابتدا به آرامی افزایش و سپس بطور قابل ملاحظه‌ای تا رسیدن به حداکثر مقدار قطر شانه ابزار کاهش می‌یابد. قطر شانه کوچک به دلیل داشتن سطح تماس کم باعث کاهش میزان حرارت ورودی و به تبع آن سیلان نامناسب مواد پلاستیک شده می‌شود که در نهایت منجر به تشکیل عیوب و افت خواص مکانیکی می‌شود. هر چه قطر شانه ابزار افزایش یابد، میزان حرارت ورودی در منطقه اغتشاش نیز بطور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. با افزایش میزان حرارت ورودی، اندازه مناطق TMAZ و HAZ پهن‌تر شده و احتمال فلش مواد و تشکیل عیوب به دلیل حرارت بیش از حد افزایش می‌یابد. بنابر این از مجموع بیست جوش تولید شده با استفاده از پارامترهای مختلف، باز نمونه شماره ۱۲ با قطر شانه ابزار ۱۴ میلی‌متر بهترین خواص مکانیکی را در میان سایر جوش‌ها از خود نشان داد که در قطره‌های پایین‌تر یا بالاتر تولید شدند. همچنین می‌توان گفت که در قطر شانه ابزار نامناسب، ترکیبی از تأثیر عواملی همچون رشد دانه، تجمع رسوبات<sup>۱</sup>، عدم ترکیب مناسب مواد، مقدار سختی کمتر و تشکیل عیوب در منطقه جوش می‌تواند باعث افت خواص مکانیکی در اتصال ایجاد شود. با بکارگیری روش طراحی آزمایش به شیوه رویه پاسخ می‌توان با انجام آزمایش‌های معین شده به مقادیر مناسب هر یک از پارامترها برای رسیدن به خصوصیات مطلوب مکانیکی و متالورژیکی برای آلیاژهای مختلف دست یافت.

#### ۴-۴- تحلیل واریانس نتایج

نتیجه‌گیری قطعی از نمودارهای ارائه شده در بخش بالا مستلزم تایید اثرات نشان داده شده پارامترها با استفاده از تحلیل واریانس است. نمودار احتمال نرمال مقادیر باقی مانده در شکل ۱۱ آورده شده است.

پراکندگی نقاط آزمایش در اطراف خط مورب، پیروی نتایج طراحی آزمایش صورت گرفته از مدل توزیع نرمال را نشان می‌دهد. نمودار مقادیر باقی‌مانده در برابر نقاط برازش یافته نیز در شکل ۱۲ مشخص شده است. پراکندگی نقاط طراحی و عدم وجود یک ساختار منظم در نقاط این نمودار نشان دهنده ثابت بودن واریانس است. این دو شکل صحت فرض‌های تحلیل واریانس را تأیید می‌نمایند.

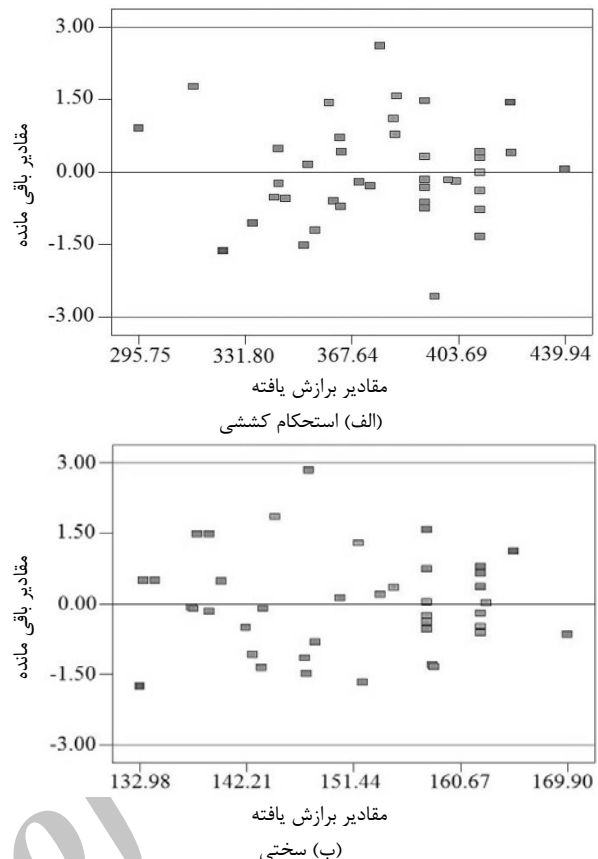
#### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر سه پارامتر مهم فرایند جوش کاری از جمله سرعت دورانی، سرعت پیش‌روی و قطر شانه ابزار بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصالات آلیاژ آلومینیم T6-7075 به وسیله جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی با بکارگیری روش طراحی آزمایش مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- با افزایش سرعت دورانی و قطر شانه ابزار، مقدار استحکام کششی و سختی کلیه نمونه‌ها ابتدا افزایش و سپس کاهش داشته است.
- ۲- مقدار استحکام کششی و سختی با افزایش سرعت پیش‌روی ابزار در محدوده‌ی ذکر شده، در نمونه‌ها روندی افزایشی داشته است.

1- Precipitates Clustering

- [2] R. Fu, Z. Sun, R. Sun, Y. Li, H. Liu, L. Liu, Improvement of weld temperature distribution and mechanical properties of 7050 aluminum alloy butt joints by submerged friction stir welding, *Materials and design*, Vol. 32, pp. 4825-4831, 2011.
- [3] P. Cavaliere, A. Squillace, High temperature deformation of friction stir processed 7075 aluminium alloy, *Material Characterization*, Vol. 55, pp. 136-142, 2005.
- [4] K.H. Rafi, G.D. Janaki Ram, Microstructure and tensile properties of friction welded aluminum alloy AA7075-T6, *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 2375-2380, 2011.
- [5] R.S. Mishra, Z.Y. Mab. Friction stir welding and Processing, *Materials Science and Engineering R*, Vol. 50, 2005, pp. 1-78, 2005.
- [6] P. Cavaliere, R. Nobile, Mechanical and microstructural behaviour of 2024-7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding, *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, pp. 588-594, 2006.
- [7] A.A.M. Da Silva, E. Arruti, G. Janerio, E. Aldanondo, P. Alvarez, A. Echeverria, Material flow and mechanical behaviour of dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminium alloys friction stir welds" *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 2021-2027, 2011.
- [8] G.J. Kaufman, *Properties of Aluminum Alloys; Tensile, Creep, and Fatigue Data at High and Low Temperatures*, ASM International conference, 2002.
- [9] V. Balasubramanian, V. Ravisankar, G.R. Madhusudhan, Influences of pulsed current welding and post weld aging treatment on fatigue crack growth behaviour of AA7075 aluminium alloy joints, *International Journal of Fatigue*, Vol. 30, pp. 405-416, 2008.
- [10] C. Sharma, D. Dwivedi, Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of AA7039 aluminium alloy *Materials and design*, Vol. 36, pp. 379-390, 2012.
- [11] S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian, Predicting tensile strength, hardness and corrosion rate of friction stir welded AA6061-T6 aluminium alloy joints, *Materials and design*, Vol. 32, pp. 2878-2890, 2011.
- [12] S. Nourouzi, M. shakeri, N. Karimi, Comparison of microstructure and mechanical properties of aluminum alloy joining by friction stir welding in air and underwater, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 146-152, 2013. (In Persian)
- [13] S. Nourouzi, M. shakeri, M. Habibnia, Frictions stir welding of dissimilar metal Al5050 Aluminum alloy to AISI304 stainless steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 95-103, 2013. (In Persian)
- [14] M. Kimura, M. Kusaka, Joining phenomena during friction stage of AA7075-T6 aluminum alloy friction weld, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 10, pp. 378-83, 2005.
- [15] S. Rajakumar, C. Muralidharan, V. Balasubramanian, Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075-T6 aluminium alloy joints, *Material and Design*, Vol. 32, pp. 535-549, 2011.
- [16] X.H. Wang, K.S. Wang, Microstructure and properties of friction stir butt-welded AZ31 magnesium alloy, *Material Science and Engineering A*, Vol. 431, pp. 114-117, 2006.
- [17] L. Hui-jie, ZH. Hui-jie, Mechanical properties of underwater friction stir welded 2219 aluminum alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 20, pp. 1387-1391, 2010.
- [18] X. Weifeng, L. Jinhe, ZH. Hongqiang, L. Fu, Influence of welding parameters and tool pin profile on microstructure and mechanical properties along the thickness in a friction stir welded aluminum alloy, *Materials and Design*, Vol. 47, pp. 599-606, 2013.
- [19] L. Fratini, G. Buffa, R. Shivpuri, Mechanical and metallurgical effects of in process cooling during friction stir welding of AA7075-T6 butt joints, *Acta Materialia*, Vol. 58, pp. 2056-2067, 2010.



شکل ۱۲ نمودار مقادیر برآزش یافته به مقادیر باقی مانده (الف) استحکام کششی (ب) سختی

۳- رشد دانه، انحلال رسوبات و تشکیل عیوب از مهم‌ترین دلایل افت خواص مکانیکی اتصالات به علت عدم حضور حرارت کافی در منطقه اغتشاش و جریان نامناسب مواد می‌باشند.

۴- بیشترین مقدار استحکام کششی (۴۲۰ MPa) و بیشترین مقدار سختی (۱۷۲ Hv) در سرعت دورانی ۱۰۵۰ rpm، سرعت پیش‌روی ۱۰۰ mm/min و قطر شانه ابزار ۱۴ میلی‌متر برای نمونه شماره ۱۲ به دست آمد.

۵- تغییر در مقدار پارامترهای مختلف جوش کاری باعث تغییر در ساختار و نوع شکست نمونه‌های جوش کاری شده می‌شود.

۶- قطر شانه ابزار بیشترین تأثیر را در تعیین میزان حرارت ورودی و در نتیجه تعیین کیفیت اتصال داشته و سرعت پیش‌روی میزان نرخ گرمایش ورودی به منطقه جوش را تعیین می‌کند.

## ۶- مراجع

- [1] H. Chen, K. Yan, T. Lin, S.B. Chen, C.Y. Jiang, Y. Zhao, The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds, *Material Science and Engineering A*, Vol. 433, pp. 64-69, 2006.