



## بررسی تأثیر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی به وسیله ابزار دوشانه‌ای بر سختی و مقاومت به ضربه‌ی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

میثم اکثیری<sup>۱</sup>، محمد عظیمی آق قلعه<sup>۲</sup>، نصراله بنی مصطفی عرب<sup>۳\*</sup>، سروش پرویزی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

۴- دانشیار، مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

\*تهران، صندوق پستی ۱۶۵۳۸۷۵۶۹۶، n.arab@sru.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۲ دی ۱۴۰۰

دوری اولیه: ۶ اسفند ۱۴۰۰

پذیرش: ۱۴ اسفند ۱۴۰۰

### کلیدواژگان:

فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

ابزار دوشانه‌ای

آلیاژ آلومینیوم 6061-T6

سختی

مقاومت به ضربه

### چکیده

پژوهش حاضر به بررسی تأثیر سرعت‌های چرخشی گوناگون و جنس انتخاب شده برای ساخت ابزار دوشانه‌ای در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر تغییرات سختی و مقاومت به ضربه‌ی آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 پرداخته است. بر اساس داده‌های حاصله، مطلوب-ترین ابزار برای انجام این فرآیند باید از جنس فولاد گرمکار H13 بوده و طول پین آن نیز برابر ضخامت قطعه‌کار باشد. همچنین بهینه-ترین نسبت میان قطر شانه‌های ابزار و طول پین، حدود ۳ تا ۵ می‌باشد. لذا ابزار طراحی شده برای انجام فرآیند مذکور، دارای قطر شانه-های ۲۰، قطر پین ۶ و طول پین ۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نتایج نشان دادند که افزایش سرعت چرخشی بر کیفیت ظاهری اتصالات انجام شده تأثیر مطلوبی داشته و با بالا رفتن سرعت چرخشی در حین انجام عملیات جوشکاری نیز نیروی لازم برای شکست قطعه افزایش می‌یابد. نتایج آزمون ضربه شاری نیز مبین تأثیر مستقیم سرعت چرخشی فرآیند بر انرژی مصرفی شکستن نمونه‌ها و طبیعتاً تأثیر معکوس آن بر زاویه‌ی برگشت پرتابه می‌باشند. از انجام آزمون سنجش سختی میکروساختار نمونه‌ها نیز استنباط شد که افزایش سرعت جوشکاری در نهایت سختی جوش را بالا می‌برد. علاوه بر این، با بررسی ماکروساختار اتصالات نیز مشخص شد که افزایش سرعت دورانی بر کاهش عیوب آن‌ها تأثیر بسزایی دارد. در پژوهش پیش رو، تأثیر انتخاب فولاد HSS به عنوان جنس ابزار دوشانه‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفته که نهایتاً فولاد گرمکار H13 و سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه به عنوان جنس و سرعت چرخشی مطلوب از نظر تأثیر در ویژگی‌های مکانیکی برای ساخت ابزار انتخاب گردید.

## Study of hardness and impact resistance in Friction Stir Welding process with Bobbin tool in Aluminum 6061-T6 alloy

Meysam Eksiri<sup>1</sup>, Mohamad Azimi Aghghaleh<sup>1</sup>, Nasrolah Bani Mostafa Arab<sup>1\*</sup>, Soroush Parvizi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Department of Metallurgical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1653875696 Tehran, Iran, n.arab@sru.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 2 December 2021

First Decision: 25 February 2022

Accepted: 5 March 2022

### Keywords:

Friction stir welding process

Bobbin tool

Aluminum 6061-T6 alloy

Hardness,

Impact resistance

### Abstract

In this research the effect of different rotational speeds and different materials for producing the Bobbin tool in friction stir welding process on hardness and impact resistance changes for Aluminum 6061-T6 alloy is studied. According to the results, the most desirable tool to accomplish this process should be from H13 hot-work steel and the pin length should be as long as the work piece thickness. The most optimized ratio between tool shoulders diameter and pin length is about 3 to 5. Accordingly, the designed tool for the mentioned process had 20 mm shoulder diameter, 6 mm pin diameter and 4 mm pin length. Results showed that increasing the rotational speed had desirable effect on connections appearance quality and also cause raising the amount of consumed energy for breaking the work pieces and naturally it decreases the return angle of the projectile. Microstructure hardness tests showed that welding speed increase caused welded zone grains size changing. So it will increase the weld hardness. Furthermore, joints macrostructure's defects were studied and determined that increasing rotational speed has good effect in decreasing these defects. Also in this research, the effect of using HSS tool as the bobbin tool material checked was investigated finally H13 was selected as the bobbin tool material due to the better strength in most other speeds. 1500 rpm selected as the best rotational speed in terms of affect on mechanical properties.

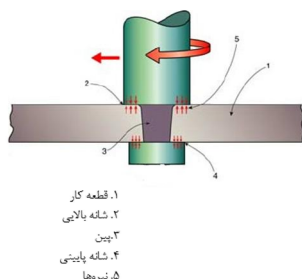
Please cite this article using:

M. Eksiri, M. Azimi Aghghaleh, N. Bani Mostafa Arab, S. Parvizi Study of hardness and impact resistance effect in Friction Stir Welding process with Bobbin tool in Aluminum 6061-T6 alloy, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 10- 18, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.155982>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به وسیله‌ی ابزار دوشانه‌ای<sup>۳</sup>، علاوه بر شانه‌ای که در بالای پین ابزار وجود دارد، شانه‌ای نیز در پایین پین طراحی و ساخته شده تا با یکنواخت‌تر شدن روند توزیع گرما و جریان مواد، ضمن کاهش برخی از عیوب متداول مانند نقص در نفوذ، موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی آن گردد.



۱. قطعه کار  
۲. شانه بالایی  
۳. پین  
۴. شانه پایینی  
۵. نیروها

Fig. 2 The main components of Bobbin tool

شکل ۲ اجزای اصلی ابزار دوشانه ای [۵]

مطالعه‌ای در رابطه با تأثیر متغیرهای فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر روی آلیاژ آلومینیوم 6061-T4 توسط آندرد<sup>۴</sup> و همکارانش صورت پذیرفت که نشان داد بهترین اندازه برای طول پین ابزار مورد استفاده در این فرآیند، اندازه‌ای برابر با ضخامت قطعه کار است. با کاهش اندازه‌ی طول پین، نفوذ بیش از اندازه‌ی شانه‌های ابزار در ورق، سبب شکل‌گیری اتصال با ظاهر نامناسب و ناهنجار گردید و افزایش این اندازه نیز باعث ایجاد حفره‌ای در قطعه کار شد که علت اصلی آن، عدم توانایی ابزار در پر کردن جای خالی موجود به کمک نیروی فورج بوده است [۷]. در پژوهش دیگری نیز توماس<sup>۵</sup> با همراهی همکارانش توانست به بررسی تأثیر اعمال این فرآیند بر روی فولاد پرداخته و دریابد که در صورت بزرگ‌تر بودن اندازه سوراخ ابتدایی نسبت به پین ابزار مورد استفاده، سوراخ مذکور در طی انجام فرآیند پر نشده و سبب شکل‌گیری حفره‌ای در قطعه کار می‌گردد. لذا جهت جلوگیری از وقوع این عیب، سایز این سوراخ باید کوچک‌تر و یا برابر با سایز پین ابزار باشد [۸].

۲- بیان مسئله و نوآوری

در این پژوهش ابزار دوشانه‌ای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از دو جنس فولاد گرمکار H13 و فولاد تندبر HSS تهیه شده و فرآیند مذکور تحت سرعت دورانی‌های متفاوت بر آلیاژ آلومینیوم

آلومینیوم و آلیاژهای آن از جمله‌ی پرمصرف‌ترین فلزات مورد استفاده در صنعت بوده و پس از گروهی از فولادها، جزء پرکاربردترین مواد فلزی به حساب می‌آیند. دلیل اصلی این انتخاب نیز وجود مقاومت بالا در برابر خوردگی، قابلیت ماشین‌کاری و شکل‌پذیری قابل قبول و همچنین دارا بودن استحکام بسیار خوب نسبت به چگالی این گروه از فلزات است. آلیاژهای سری ۶۰۰۰ آلومینیوم با توجه به داشتن ترکیبی از سیلیسیم و منیزیم، در مقایسه با دیگر گروه‌های آلیاژی پرمصرف‌تر بوده و در این بین آلیاژ ۶۰۶۱ در صنایع استراتژیکی نظیر هوافضا، حمل و نقل و... به شدت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱، ۲]. لازم به ذکر است که معمولاً شیوه‌های متداول جوشکاری به دلیل وجود تخلخل در محدوده‌ی ذوب می‌باشد که از ضعیف بودن ساختار انجمادی آلومینیوم نشأت می‌گیرد؛ لذا قابلیت اتصال آلیاژهای مذکور را ندارند [۳، ۴]. بر همین اساس جهت افزایش کیفیت خواص مکانیکی اتصالات یاد شده باید از شیوه‌ی دیگری که سبب کاهش و یا حذف محدوده‌های ذوب و متاثر از حرارت می‌گردد استفاده نمود. در این راستا، روشی جهت اتصال آلیاژهای فلزی و به خصوص آلومینیومی توسط محققان ابداع شد که امروزه با عنوان فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از آن یاد می‌شود. در این روش، ابزار مورد استفاده از نوع غیرمصرفی بوده و فرآیند اتصال نیز در حالت جامد اتفاق می‌افتد. مطابق شکل ۱ این ابزار چرخان که از دو قسمت اصلی شانه<sup>۱</sup> و پین<sup>۲</sup> تشکیل شده است، با حرکت در طول خط جوش، سبب ایجاد حرارت بالا ناشی از اصطکاک میان خود و قطعه کار شده، دمای ورق را بالا برده آن را به حالت خمیری درمی‌آورد که این امر در نهایت به تشکیل جوش می‌انجامد [۶]. البته نوع جدیدتری از این ابزار نیز وجود دارد که به ابزار دوشانه‌ای موسوم بوده و در شکل ۲ نمایش داده شده است.

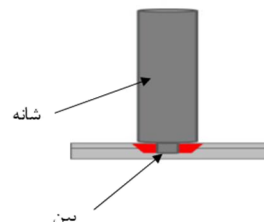


Fig. 1 The main components of single-shoulder tool

شکل ۱ اجزای اصلی ابزار تک شانه ای [۳]

<sup>3</sup> Bobbin Friction Stir Welding (BT-FSW)

<sup>4</sup> Andrade

<sup>5</sup> Thomas

<sup>1</sup> Shoulder

<sup>2</sup> Probe

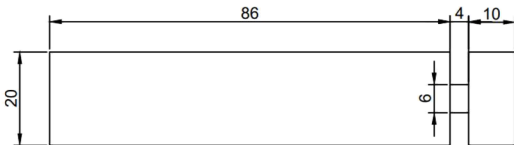


Fig. 3 Map of the used tool

شکل ۳ نقشه ابزار مورد استفاده



Fig. 4 Hot-worked steel tool

شکل ۴ ابزار از جنس فولاد گرمکار

در این پژوهش سرعت‌های دورانی به ترتیب ۱۵۰۰، ۱۱۸۰، ۹۵۰ و ۷۵۰ دور بر دقیقه انتخاب شد تا طیف گسترده‌ای را شامل شود. از دیگر دلایل انتخاب سرعت‌های نسبتاً بالا، فراهم ساختن بررسی امکان اجرای فرآیند بصورت انبوه و گسترده می‌باشد. با تغییر سرعت، تلاش به منظور یافتن سرعت دورانی بهینه و ارتباطی بین این سرعت و کیفیت جوش صورت گرفته است.

دستگاه مورد استفاده برای این پژوهش، فرز ماشین‌سازی تبریز با مدل FV32×152 بوده که از دستگاه‌های رایج در کارگاه‌ها می‌باشد و امکان استفاده‌ی گسترده این روش را نیز فراهم می‌سازد. برای شروع جوشکاری، نمونه‌ها به صورت لب به لب و مطابق شکل ۵ قرار داده شد و توسط گیره دستگاه بر روی زیرکاری که در زیر محل اتصال قرار ندارد محکم گردید. همچنین ابزار دوشانه‌ای در ابتدای محل جوش مماس بر شیار به شکلی که ورق بین دوشانه باشد قرار گرفت، پس از آن نیز عملیات جوشکاری در سرعت‌های مختلف اجرا شد.



Fig. 5 How to place the cut sheets

شکل ۵ نحوه قرارگیری ورق های برش خورده

6061-T6 جوشکاری اجرا گردیده است. پس از آن نیز کیفیت و استحکام نمونه‌های حاصل از جوشکاری به کمک آزمون‌های سختی، ضربه و سنجش ماکروساختار مورد بررسی قرار گرفت. از جمله بهترین اهداف این پژوهش بهبود رفتار و خواص مکانیکی اتصالات حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با ابزار دوشانه‌ای و همچنین دستیابی به نمونه‌های جوشکاری بدون عیب در یک پاس با بهترین خواص ممکن در دو طرف جوش می‌باشد.

### ۳- روش تحقیق

در این بررسی، قطعات به شکل ورق‌هایی با ابعاد ۱۰۰×۵۰ mm با ضخامت ۴ mm تهیه گردید و در نهایت قطعه جوشکاری با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ mm حاصل شد. پس از گونیا و صاف کردن لبه‌های ورق‌ها با ماشین‌کاری، در یک طرف خط اتصال نیز شیار به شکل نیم دایره ایجاد شد. به این دلیل که ابزار در زمان شروع عملیات با حداکثر سطح ممکن برخورد داشته باشد تا با افزایش اصطکاک، بیشترین حرارت ایجاد شود. خواص شیمیایی و مکانیکی نمونه‌ی مورد استفاده به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ به نمایش درآمده است.

پس از برش، نمونه‌ها تمیز شده و قبل از اجرای فرآیند مراحل سنباده زدن و پولیش‌کاری نیز روی قطعات انجام شد. سپس قطعات شسته شده و برای پاک کردن چربی‌ها و آلودگی‌ها با الکل سطح نمونه‌ها تمیز شده و با سشوار و هیتر خشک گردید.

ابزار مورد استفاده مطابق نقشه‌ی موجود در شکل ۳ به شکل یکپارچه از دو جنس H13 و HSS تهیه شد که دارای یک پین و دوشانه می‌باشد. لازم به ذکر است که آلیاژهای مذکور به راحتی قابل تهیه بوده و امکان کار با آن وجود دارد. تصویر نهایی ابزار H13 ساخته شده در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

Table 1 Chemical composition of aluminum alloy 6061						
کروم	منیزیم	منگنز	مس	آهن	سیلیسیم	آلیاژ آلومینیوم
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	آلومینیوم
۰/۳۵ - ۰/۱۵	۰/۱۸ - ۰/۱۲	۰/۰۸ - ۰/۰۲	۰/۰۴ - ۰/۰۱۵	ماکزیمم ۰/۰۷	۰/۰۸ - ۰/۰۴	۶۰۶۱

جدول ۲ خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱

Table 2 Mechanical properties of aluminum alloy			
سختی برینل	درصد تغییر طول	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام کششی (MPa)
۱۵۰	۱۷	۳۲۴	۳۸۶

نمود که سبب ایجاد جوش‌هایی با ظاهر نامطلوب می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، کیفیت سطح جوش با افزایش سرعت دورانی به شکل چشمگیری به سمت یکنواختی و یکدست شدن تغییر می‌یابد. عمده‌ترین دلیل آن نیز تأثیر حرارت ابتدایی ایجاد شده بر خمیری شدن همگن مواد و به تبع آن سیلان مناسب آن‌ها می‌باشد. افزون بر این بالا بردن سرعت دورانی در کاهش عیوب نیز تأثیر بسزایی داشته است. برای بررسی تأثیر انتخاب جنس ابزار، فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به کمک ابزارهای دوشانه‌ای از جنس‌های HSS و H13 با در نظر گرفتن پارامترهای یکسان اجرا و مطابق شکل ۸ ملاحظه گردید که جنس ابزار تأثیر چندانی در ظاهر اتصالات صورت گرفته ندارد.

از عیوب متداولی که به دلیل انتخاب سرعت‌های نامناسب در جوش ایجاد می‌شود، می‌توان به حفره، ترک و به تولید پلیسه‌های بیش از حد اشاره نمود که شکل ۹، نمایی از آن‌ها را نمایش می‌دهند.

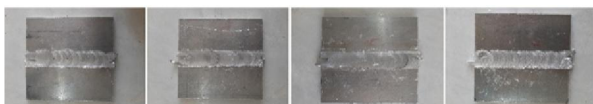


Fig. 7 Welding samples from right to left at speeds of 1180, 1500, 950 and 750 rpm, respectively

شکل ۷ به ترتیب از راست به چپ نمونه جوش با سرعت‌های ۱۱۸۰ و ۱۵۰۰ و ۹۵۰ و ۷۵۰ دور بر دقیقه



Fig. 8 Right: welding with a tool made of hot-worked steel and left: welding with HSS tool

شکل ۸ سمت راست جوشکاری با ابزار از جنس فولاد گرمکار HSS و سمت چپ جوشکاری با ابزار



Fig. 9 Make a crater in the weld joint

شکل ۹ ایجاد حفره در اتصال جوش

پس از اتمام روند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به کمک ابزار دوشانه‌ای ساخته شده، آزمون‌های ضربه و سختی برای بررسی استحکام مکانیکی نمونه‌های نهایی اجرا گردید. برای آزمون ضربه قطعات نمونه مطابق شکل ۶ با ابعاد استاندارد  $4 \times 10 \times 55$  mm آماده شده و یک شیار V شکل نیز در راستای ارتفاع (۴mm) به عمق استاندارد ۲mm و زاویه ۴۵ درجه در مرکز جوش ایجاد شد. این آزمون دارای انرژی وارده  $200J$  زاویه ابتدایی  $\alpha = 149/6$  با دستگاه ساخت شرکت SANTAM مدل SIT-200B اجرا گردید.

برای بررسی سختی قطعات نیز با توجه به جنس اتصالات، آزمون سختی ویکرز انتخاب شد. جسم فرورونده در این آزمایش، هرمی مربع‌القاعده از جنس الماس بوده که زوایای میان وجوه مختلفش برابر ۱۳۶ درجه می‌باشد. برای رسیدن به نتیجه مطلوب مجموعاً بیش از ۱۸ نقطه در هر نمونه مورد بررسی قرار گرفت که از مرکز جوش آغاز و تا لبه به فاصله مساوی انجام شده و در هر بار مرحله حداقل ۳ مرتبه سنجش تکرار شده تا میانگین آن در نمودار قرار گیرد. دستگاه تست سنجش سختی ساخت شرکت Koopa سری universal hardness tester مدل UV1 Model برای تست ویکرز تنظیم شد و بار وارده نیز ۳۰ کیلوگرم تنظیم گردید.

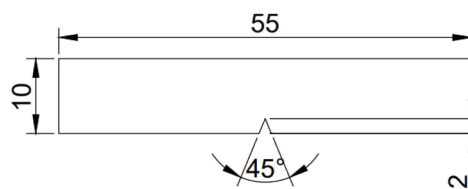


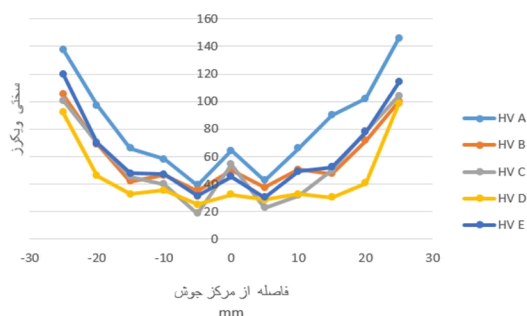
Fig. 6 Sample map of impact test

شکل ۶ نقشه نمونه آزمون ضربه

#### ۴- نتایج و بحث

پس از اجرای فرآیند جوشکاری کلیه‌ی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. از جمله اصلی‌ترین روش‌های بررسی اتصالات، بازرسی چشمی<sup>۱</sup> بوده و می‌توان اطلاعات خوبی را از این طریق کسب نمود. برای شروع، ویژگی‌های ظاهری جوش‌های ایجاد شده مورد ارزیابی قرار گرفته و احتمال ایجاد عیوبی مانند عیب ورود و خروج، ترک سطحی، حفره، ناصافی بیش از حد جوش، شیار در خط اتصال، پلیسه‌ی حجیم و جدایی لبه‌ی ورق‌ها از یکدیگر مورد بررسی قرار گرفت. از عوامل ایجاد عیوب مذکور نیز می‌توان به حرارت ورودی نامتناسب، عدم تنظیم محل قرارگیری ابزار نسبت به قطعه کار و نامناسب بودن سرعت دورانی انتخاب شده اشاره

<sup>۱</sup> Visual Inspection or Visual Test



**Fig. 11** Comparison of microstructure hardness of joints at different speeds: A: 1180 rpm (HSS), B: 1500 rpm, C: 1180 rpm (H13), D: 950 rpm, E: 750rpm

شکل ۱۱ مقایسه ی سختی ریزساختار اتصالات در سرعت های مختلف:

A: 1180 rpm (HSS), B: 1500 rpm, C: 1180 rpm (H13), D: 950 rpm, E: 750rpm

شکل ۱۲ مستقلاً به بررسی چگونگی توزیع سختی در میکروساختار جوش انجام شده به کمک ابزار دوشانه‌ای از جنس فولاد تندبر HSS می‌پردازد. همان‌طور که مشخص است، نحوه توزیع سختی در این نمونه نیز دارای روندی مشابه روند توزیع در قطعات جوشکاری شده به وسیله‌ی ابزاری از جنس فولاد گرمکار H13 می‌باشد. اما برای بررسی دقیق‌تر، سختی نمونه‌های جوشکاری شده تحت سرعت یکسان با دو نوع ابزار مذکور در شکل ۱۳ نمایش داده شده است. مطابق این نمودار، جنس ابزار بر سختی جوش صورت گرفته در سرعت ۱۱۸۰ دور بر دقیقه موثر می‌باشد. به طوری که اتصال انجام شده به کمک ابزار دوشانه‌ای از جنس فولاد تندبر HSS دارای سختی بیشتری نسبت به اتصال مشابهی است که به وسیله‌ی ابزاری از جنس فولاد گرمکار H13 صورت گرفته است. دلیل اصلی این اتفاق نیز وجود تفاوت در ضریب حرارتی آلیاژهای مذکور می‌باشد. اما این عامل به تنهایی نمی‌تواند پارامتر موثری در انتخاب جنس ابزار باشد؛ زیرا جوشکاری قطعاتی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ به کمک ابزار دوشانه‌ای از جنس فولاد ابزار HSS در همه‌ی سرعت‌ها امکان‌پذیر نیست. به طوری که به محض بالا رفتن فشار در ابتدای فرآیند، ابزار شکسته و عملیات ناتمام باقی می‌ماند. لذا علی‌رغم سختی بیشتر نمونه‌ی حاصل از جوشکاری با فولاد ابزار HSS، همچنان فولاد گرمکار H13 گزینه‌ی مناسب‌تری برای ساخت ابزار دوشانه‌ای مورد استفاده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تلقی می‌شود.

شکل ۱۴ دید کامل‌تری از مقایسه‌ی توزیع سختی در عرض اتصال صورت گرفته به کمک ابزار دوشانه‌ای از دو جنس مذکور را ارائه می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روند تغییر نسبتاً متقارن و W شکل نمودار در این قطعات نیز حفظ شده است.

نحوه‌ی توزیع سختی در ریزساختار ناحیه‌ی جوش نیز از جمله ویژگی‌های مهمی است که در ادامه سعی شده تا تغییرات این متغیر در نمونه‌های جوشکاری شده به کمک ابزار دوشانه‌ای در سرعت‌های گوناگون مورد بررسی قرار گیرد. مطابق انتظار، در میکروساختار منطقه‌ی اغتشاش و همچنین بخشی از منطقه‌ی متأثر از حرارت آلیاژ مورد بررسی در این پژوهش، پدیده‌ی تبلور مجدد رخ می‌دهد که این امر به دلیل گرمای زیاد و کار مکانیکی انجام شده می‌باشد. لذا با انحلال قسمتی از فازهای رسوبی، محدوده‌ی جوش نسبت به فلز پایه نرم‌تر می‌شود. البته دانه‌های موجود در محدوده‌ی متأثر از حرارت قطعه‌ی جوشکاری شده نیز تا حدی تغییر اندازه می‌دهند که این امر دلیل دیگری برای کاهش سختی در این محدوده است. بر همین اساس پیش‌بینی می‌شود سختی نمونه‌های جوشکاری شده از مرکز جوش به سمت خارج آن به مرور افزایش یابد.

در این قسمت از پژوهش حاضر، از دو ابزار با جنس‌های فولاد گرمکار H13 و همچنین فولاد تندبر HSS جهت جوشکاری قطعات استفاده شده که یک نوآوری محسوب می‌شود. در ادامه به مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمون مذکور پرداخته می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، با افزایش سرعت دورانی، جریان مواد پلاستیک نیز بالا رفته و این امر موجب افزایش گرمای ورودی عملیات می‌شود. در نتیجه تغییر سایز دانه‌های موجود، افزایش سختی را به دنبال خواهد داشت. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، سختی میکروساختار با افزایش فاصله نسبت به مرکز جوش، ابتدا اندکی کاهش یافته و سپس روندی افزایش دارد. شکل ۱۱ نیز به وضوح مشخص می‌سازد که این توزیع سختی در قطعات شکلی شبیه به W و تا حد قابل قبولی متقارن داشته و بیشترین سختی هم در نواحی کناری آن‌ها وجود دارد.



**Fig. 10** Comparison of microstructure hardness of joints at different speeds B: 1500 rpm, C: 1180 rpm, D: 950 rpm, E: 750 rpm

شکل ۱۰ مقایسه ی سختی میکروساختار اتصالات در سرعت های مختلف B: 1500 rpm , C: 1180 rpm , D: 950 rpm , E: 750 rpm



نمونه‌ها وارد گردید. افزون بر این‌که پرتابه با سرعتی معادل ۵/۲۳ متر بر ثانیه به نمونه‌ها برخورد کرده و همچنین در شروع آزمایش، پرتابه‌ی دستگاه تا زاویه‌ی ۱۴۹/۶ درجه بالا آمده است.

**جدول ۳** فاصله نقطه‌های دارای بیشترین و کمترین سختی نسبت به خط مرکزی جوش مطابق کاهش سرعت چرخشی

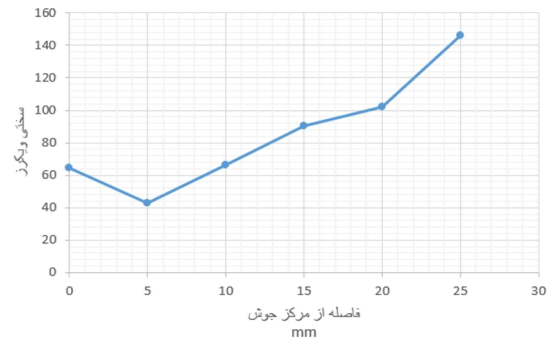
**Table 3** The distance between the points with the highest and the lowest hardness relative to the centerline of the weld according to the reduction of the rotational speed

فاصله نقطه‌ی دارای کمترین سختی از خط مرکزی جوش (mm)	فاصله نقطه‌ی دارای بیشترین سختی از خط مرکزی جوش (mm)	سرعت چرخشی (rpm)
۵	۲۵	۱۵۰۰
۵	۲۵	۱۱۸۰
۵	۲۵	۹۵۰
۵	۲۵	۷۵۰

به منظور دستیابی به نتایج هر چه کامل‌تر، این آزمون بر روی فلز پایه و نمونه‌های قطعات جوشکاری شده به وسیله‌ی ابزار دوشانه‌ای با سرعت‌های مختلف اجرا گردید. در شکل ۱۵ نیز تعدادی از نمونه‌ها پس از اجرای آزمون مذکور نمایش داده شده است.

در شکل ۱۶ میزان انرژی مصرف شده برای شکست نمونه‌های جوشکاری شده با ابزار دوشانه‌ای در تست ضربه شاریبی نشان داده شده است. طبق این نمودار، بیشترین مقاومت نسبت به شکست را قطعه‌ی جوشکاری شده در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه داشته و بیشترین میزان انرژی در مقایسه با سایر جوش‌ها برای شکست این قطعه مصرف شده است. پس از آن با کاهش سرعت چرخشی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، میزان انرژی مصرف شده نیز روند نزولی پیدا کرده است. به طوری که قطعه‌ی جوشکاری شده تحت سرعت ۷۵۰ دور بر دقیقه مقاومت بسیار کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان داده است. این مطلب بیانگر تأثیر مستقیم سرعت چرخشی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به وسیله‌ی ابزار دوشانه‌ای بر مقاومت به ضربه‌ی قطعات می‌باشد. از مهم‌ترین دلایل آن نیز می‌توان به ریزدانه شدن اتصالات انجام شده در سرعت‌های چرخشی بالاتر اشاره نمود که در اثر تولید گرمای مطلوب‌تر ایجاد شده است. از طرفی زخ دادن پدیده‌ی تبلور مجدد در منطقه‌ی اغتشاش نیز سبب افزایش مقاومت به ضربه‌ی اتصالات گردیده است.

متغیر دیگری که در آزمون ضربه شاریبی مورد بررسی قرار گرفت، مقدار زاویه‌ی بالا رفتن پرتابه پس از برخورد با قطعات جوشکاری شده بوده است. طبیعی است که این متغیر با میزان



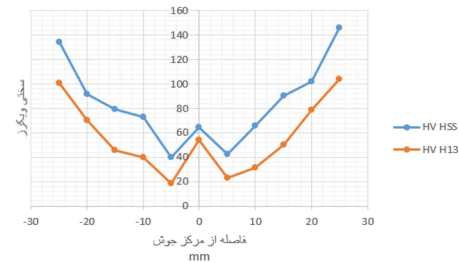
**Fig. 12** Hardness distribution in the microstructure of a welded specimen using HSS tool steel Bobbin tool

شکل ۱۲ توزیع سختی در میکروساختار نمونه‌ی جوشکاری شده به کمک HSS ابزار دوشانه‌ای از جنس فولاد ابزار



**Fig. 13** Comparison of the hardness distribution in the microstructure of welded specimens at the same speed with the help of Bobbin tool made of H13 tool steel and hot-worked steel H13

شکل ۱۳ مقایسه‌ی نحوه توزیع سختی در میکروساختار نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت یکسان به کمک ابزار دوشانه‌ای از دو جنس فولاد H13 ابزار و فولاد گرمکار



**Fig. 14** Comparison of the hardness distribution in the microstructure of welded specimens at the same speed with the help of Bobbin tool made of H13 tool steel and hot-worked steel H13

شکل ۱۴ مقایسه‌ی نحوه توزیع سختی در میکروساختار نمونه‌های جوشکاری شده در سرعت یکسان به کمک ابزار دوشانه‌ای از دو جنس فولاد H13 ابزار و فولاد گرمکار

همان‌گونه که در جدول ۳ نیز مشاهده می‌شود، تغییر سرعت چرخشی در انجام فرآیند، تأثیر چندانی بر تعیین نسبی نقاط دارای بیشینه و کمینه سختی میکروساختار نداشته و یافته‌های پیشین را تأیید می‌نماید.

در ادامه آزمون ضربه‌ی شاریبی بر روی اتصالات صورت گرفته اجرا شد. در این آزمون، انرژی ۲۰۰ ژول به تمامی

سرعت‌های مختلف در آزمون ضربه شاریپی را بر حسب ژول نشان می‌دهد.

مقادیر دقیق مربوط به انرژی‌های مصرف شده و زوایای بازگشت پرتابه برای فلز پایه و نمونه‌های جوشکاری شده به وسیله ابزار دوشانه‌ای در جدول ۴ نمایش داده شده است.

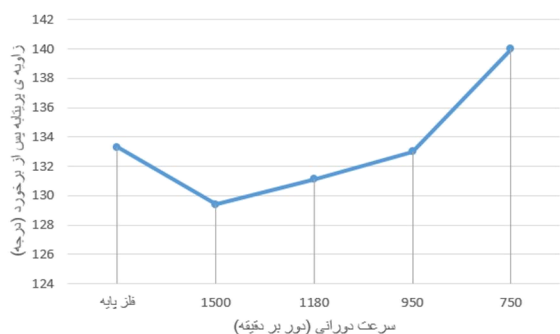


Fig. 17 Comparison of projectile rise angle after collision with welded specimens

شکل ۱۷ مقایسه ی زاویه ی بالا رفتن پرتابه پس از برخورد با نمونه های جوشکاری شده

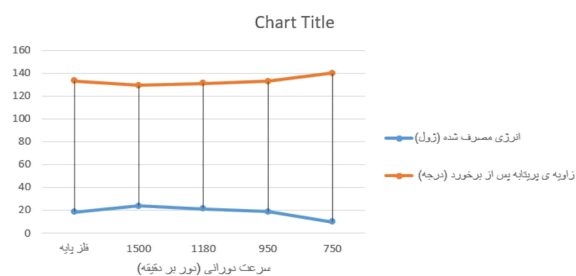


Fig. 18 Comparison of the relationship of energy consumed in the impact test with the return angle of the projectile

شکل ۱۸ مقایسه ی رابطه ی انرژی مصرف شده در آزمون ضربه با زاویه ی برگشت پرتابه

جدول ۴ مقادیر دقیق انرژی های مصرف شده و زوایای بازگشت پرتابه در آزمون ضربه شاریپی A: ۱۵۰۰ rpm ، B: ۱۱۸۰ rpm ، C: ۹۵۰ rpm ، D: ۷۵۰ rpm

Table 4 Exact amounts of energy consumed and projectile return angles in the Charpy Impact Test, A: rpm 1500, B: rpm 1180, C: rpm 950, D: rpm 750

نوع قطعه	انرژی مصرف شده (ژول)	زاویه برگشت پرتابه (درجه)
فلز پایه	۱۸/۳	۱۳۳/۳
A	۲۳/۸	۱۲۹/۴
B	۲۱/۴	۱۳۱/۱
C	۱۸/۷	۱۳۲
D	۹/۷	۱۴۰

برای بررسی بهتر نتایج حاصل از اعمال فرآیند جوشکاری

انرژی مصرف شده برای شکستن قطعات رابطه‌ی عکس داشته و هر چه انرژی بیشتری برای شکستن یک قطعه مصرف شده باشد، زاویه‌ی مربوط به بالا رفتن پرتابه پس از برخورد با آن کمتر خواهد بود. نتایج به دست آمده در این آزمایش نیز مطالب فوق را تایید می‌نماید.



Fig. 15 Part of the samples after impact testing

شکل ۱۵ بخشی از نمونه ها پس از تست ضربه

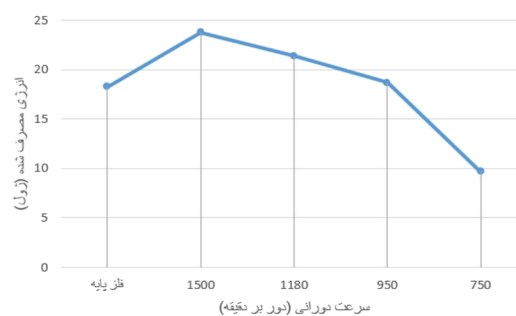


Fig. 16 Comparison of energy consumed in the impact test of welded specimens with the Bobbin tool

شکل ۱۶ مقایسه ی انرژی مصرف شده در آزمون ضربه نمونه‌های جوشکاری شده با ابزار دوشانه‌ای

شکل ۱۷ نیز زوایای به دست آمده توسط پرتابه پس از برخورد با قطعات جوشکاری شده در سرعت‌های گوناگون را با فلز پایه مقایسه می‌نماید. همان‌طور که مشخص است، زاویه برگشت پرتابه با کم شدن سرعت چرخشی، روندی افزایشی داشته است.

شکل ۱۸ نیز وجود رابطه‌ی عکس میان انرژی مصرف شده برای شکست قطعات جوشکاری شده و زاویه‌ی برگشت پرتابه در آزمون‌های انجام شده را به خوبی نمایش می‌دهد. در این نمودار، خط نارنجی رنگ نشانگر میزان زوایای به دست آمده پس از بازگشت پرتابه بر حسب درجه بوده و خط آبی رنگ نیز میزان انرژی مصرف شده برای شکست قطعات جوشکاری شده در

البته در این پژوهش تأثیر انتخاب آلیاژ فولاد تندبر HSS به عنوان ماده‌ی سازنده‌ی ابزار دوشانه‌ای بر روی ماکروساختار نیز بررسی گردید که نتایج آن در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نمایش داده شده است. مطابق تصاویر مذکور، عیوبی که در نمونه‌ی جوشکاری شده به کمک ابزار HSS به وجود آمده، بسیار کمتر از عیوب نمونه‌ای با پارامترهای مشابه توسط ابزار H13 می‌باشد. عمده دلیل این رخداد نیز به تفاوت در نرخ انتقال حرارت آلیاژهای سازنده‌ی ابزار برمی‌گردد. اما همان‌طور که پیش از این نیز ذکر شد، آلیاژ فولاد تندبر HSS قابلیت استفاده به عنوان ابزار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در بسیاری از سرعت‌ها را نداشته و سریعاً دچار شکست می‌شود. لذا علی‌رغم نتیجه‌ی ماکروساختاری مطلوب‌تر، همچنان گزینه‌ی مناسبی برای ساخت ابزار مذکور نمی‌باشد.

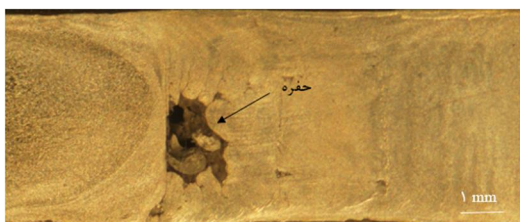


Fig. 21 Welding macrostructure performed at a speed of 1180 rpm with the help of Bobbin tool made from hot-worked steel H13

شکل ۲۱ ماکروساختار جوش انجام شده با سرعت ۱۱۸۰ دور بر دقیقه به کمک ابزار دوشانه‌ای از جنس فولاد گرمکار H13



Fig. 22 Welding macrostructure performed at a speed of 1180 rpm with the help of Bobbin tool made from tool steel HSS

شکل ۲۲ ماکروساختار جوش انجام شده با سرعت ۱۱۸۰ دور بر دقیقه به کمک ابزار دوشانه‌ای از جنس فولاد ابزار HSS

### ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اتصالات آلیاژ 6061 به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و با استفاده از ابزار دوشانه‌ای تهیه شد و برخی از مهم‌ترین خواص مکانیکی اتصالات مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌ها و نتایج اصلی این پژوهش عبارت است از:

- کیفیت سطح جوش با افزایش سرعت دورانی به شکل چشمگیری به سمت یکنواختی و یکدست شدن تغییر می‌یابد و با

اصطکاکی اغتشاشی به کمک ابزار دوشانه‌ای بر روی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱، آزمون متالوگرافی نیز بر روی اتصالات صورت گرفته انجام و ماکروساختار آن‌ها مورد بازرسی قرار گرفت. جهت انجام این آزمایش، مطابق استاندارد ASTM E8 نمونه‌ها در ابعاد ۵۵ در ۱۰ میلی‌متر برش داده شده و سطح آن‌ها نیز به وسیله‌ی سنباده‌های با مش ۱۲۰ تا ۳۰۰۰ و دستگاه پولیش صاف و صیقلی گردید. پس از انجام فرآیند اچ کردن با استفاده از محلول الکترو اچ و بررسی نمونه‌ها به کمک میکروسکوپ نوری استریو، مطابق شکل‌های ۱۹ و ۲۰ مشخص شد که حفره‌ها و عیوب موجود در نمونه‌های جوشکاری شده با سرعت‌های چرخشی پایین‌تر مثل ۷۵۰ دور بر دقیقه نسبت به سرعت‌هایی چون ۱۵۰۰ دور بر دقیقه بسیار بیشتر هستند. وجود این حفره‌ها باعث ایجاد محلی برای تمرکز تنش شده و علاوه بر تأثیرات نامطلوب بر خواص مکانیکی قطعات، موجب شکست زودتر آن‌ها نیز می‌گردد. از اصلی‌ترین دلایل ایجاد چنین عیوبی می‌توان به عدم تولید گرمای کافی و خمیری نشدن کامل مواد اطراف پین اشاره نمود. لذا حفره‌هایی که در حین چرخش ابزار تولید می‌گردند، به وسیله‌ی مواد سیال پر نشده و در نهایت به صورت عیوبی مانند آن‌چه در تصاویر مشاهده می‌شود، باقی می‌مانند.

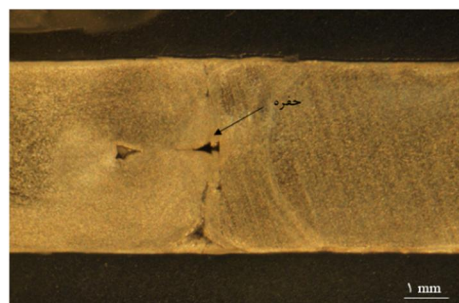


Fig. 19 Welding macrostructure performed at a speed of 750 rpm with the help of Bobbin tool made from hot-worked steel H13

شکل ۱۹ ماکروساختار جوش انجام شده با سرعت ۷۵۰ دور بر دقیقه به کمک ابزار دوشانه‌ای از جنس فولاد گرمکار H13

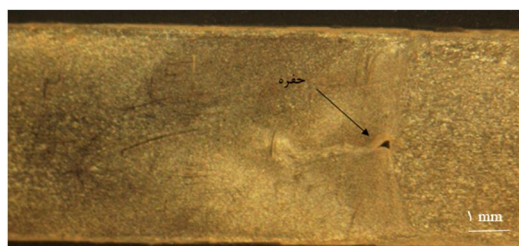


Fig. 20 Welding macrostructure performed at a speed of 1500 rpm with the help of Bobbin tool made from hot-worked steel H13

شکل ۲۰ ماکروساختار جوش انجام شده با سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه به کمک ابزار دوشانه‌ای از جنس فولاد گرمکار H13



- [3] Mostafa M. El-Sayed, A.Y. Shah, M.Abd-Rabou, Mahmoud G. ElSherbiny (2021). "Welding and processing of metallic materials by using friction stir technique: A review". *Journal of Advanced Joining Process*, Vol. 3, June 2021.
- [4] W. Al-Wajidi (2020). "Analysis of friction stir welding process: sustainability and optimization". The University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada, 2020.
- [5] Mohammad Syahid Mohd Isa, Kaveh Moghadasi, Mohammad Ashraf Ariffin, Sufian Raja, Mohd Ridha bin Muhamad, Farazila Yusof, Mohd Fadzil Jamaludin, Nukman bin Yusoff, Mohd Sayuti bin Ab Karim (2021). "Recent research progress in friction stir welding of aluminium and copper dissimilar joint: a review". *Journal of materials research and technology*, Vol. 15, November-December 2021, pp. 2735-2780.
- [6] V. Hariharan, P.V. Elumalai, M. Nambiraj, J. Jayakar, M. Parthasarathy, V. Venkata Kamesh (2021). "Experimental investigation of friction stir welding on aluminium AA6063". *Materialstoday Processing*, Vol. 47, part 19, pp. 6830-6834.
- [7] Andrade, A.C. (2009). "Development of the Bobbin-Tool for Friction Stir Welding Characterization and analysis of aluminum alloy processed the development Experimental Procedure". pp. 1-8.
- [8] Thomas, W.M., Wiesner, C.S., Marks, D. J., Staines, D. G. (2009). "Conventional and bobbin friction stir welding of 12% chromium alloy steel using composite refractory tool materials". *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 14, No. 3, pp. 247-253.
- افزایش سرعت دورانی عیوب ظاهری جوش نیز کاسته می‌شود. در نتیجه می‌توان با افزایش سرعت، ضمن کاهش زمان انجام فرآیند، از نظر اقتصادی نیز صرفه‌جویی نمود.
- رایج‌ترین عیب مشاهده شده در نمونه‌های جوشکاری شده به این روش، نامطلوب بودن ابتدا و انتهای خطوط اتصال است که با رعایت زمان مکث ابتدایی و انتخاب سرعت مناسب تا حدودی قابل جبران می‌باشد.
- میزان مقاومت به ضربه با بالا رفتن سرعت دورانی نیز افزایش یافته و خروجی‌های بهتری حاصل می‌شود.
- مناسب‌ترین جنس برای ساخت ابزار دوشانه‌ای مورد استفاده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، مطابق نتایج حاصل شده و با توجه به لزوم دوام ابزار در دفعات استفاده‌ی بالا، فولاد گرمکار H13 می‌باشد.
- عیوب موجود در ماکروساختار نمونه‌ی جوشکاری شده تحت سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه نسبت به سایر نمونه‌ها بسیار کمتر بوده و به همین دلیل از نظر ویژگی‌های مکانیکی نیز در وضعیت مطلوب‌تری قرار دارد.

## ۶- مراجع

- [1] Shubham Verma, Joy P. Misra (2021). "Experimental investigation on friction stir welding of dissimilar aluminium alloys". *Sage Journals*, Vol. 235, Issue 5, pp. 1545-1554.
- [2] Kishan Fuse, Vishvesh Badheka (2021). "Effect of shoulder diameter on bobbin tool friction stir welding of AA 6061-T6 alloy". *Materials Today: Proceeding* (2021).