



## بررسی اثر سرعت دورانی پین و شانه بر روی خواص مکانیکی ناحیه ایجادشده توسط فرایند اصطکاکی اغتشاشی در آلیاژ آلومینیم 6061

سیدحسن نوربخش<sup>1\*</sup>، یاسین کربعلی<sup>2</sup>، محمد صولتی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

\* شهرکرد، صندوق پستی 88186634141، Nourbakhsh.sh@sku.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

فرایند اصطکاکی اغتشاشی یک فرایند بهبود دهنده خواص مکانیکی و متالورژیکی سطوح فلزات می باشد. یکی از مهم ترین پارامترهای اثرگذار بر روی ساختار و خواص مکانیکی ناحیه ایجادشده توسط این فرایند سرعت دورانی پین و شانه ابزار کار است. در این تحقیق اقدام به طراحی ابزار جدیدی شده که بر خلاف ابزارهای معمول، پین و شانه آن از یکدیگر مستقل بوده و می توانند سرعت های دورانی متفاوت و مجزایی را اختیار کنند. فرایند اصطکاکی اغتشاشی با ثابت نگه داشتن سرعت شانه بر روی 800 دور بر دقیقه و تغییر سرعت پین به ترتیب 800، 1000 و 1250 دور بر دقیقه انجام شد. دمای بیشینه و مقاومت مکانیکی ناحیه ایجادشده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با ثابت نگه داشتن سرعت شانه و افزایش سرعت پین، دمای بیشینه فرایند افزایش چشمگیری پیدا نمی کند (افزایش حدوداً 2 درصد در دمای بیشینه با افزایش 25 درصد در سرعت دورانی پین). افزایش سرعت دورانی پین مقاومت مکانیکی ناحیه ایجادشده را افزایش داد. افزایش سرعت دورانی پین از 800 دور بر دقیقه به 1250 دور بر دقیقه باعث افزایش 18 درصد در تنش نهایی شد.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 9 مرداد 1398  
پذیرش: 28 شهریور 1398  
ارائه در سایت: خرداد 1399

### کلیدواژه ها:

آلیاژ آلومینیم 6061  
فرایند اصطکاکی اغتشاشی  
سرعت دورانی  
مقاومت مکانیکی  
دما

## Investigating the effect of pin and shoulder rotational speed on the mechanical properties of friction stir processed region in Al6061

Sayed Hassan Nourbakhsh<sup>\*</sup>, Yasin karbali, Mohamad Solati

Mechanical engineering Department, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

\* P.O.B. 88186634141, Shahrekord, Iran, Nourbakhsh.sh@sku.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received 30 July 2019  
Accepted 18 August 2019  
Available June 2020

### Keywords:

AL6061  
Friction stir process  
Rotational speed  
Mechanical properties  
Temperature

### Abstract

Friction stir process is one of the process that improve the mechanical and metallurgical properties of metals surface. One of the important parameters in this process which affect mechanical and metallurgical properties is rotational speed of shoulder and pin tool. In this study, unlike the other research a new tool was designed and manufactured in such a way that rotational speed of pin and shoulder is separable from each other and each one can adopt different speed. Friction stir process was done with constant rotational speed of shoulder (800 rpm) and different rotational speed of the pin (800, 1000 and 1250 rpm). Maximum temperature and mechanical properties of the samples was investigated. The results showed that the maximum temperature does not increase greatly with increasing the rotational speed of the pin (2% increase with 25% increase in the rotational speed of the pin). Mechanical properties of the samples increased with increasing the rotational speed of the pin. The ultimate stress was increased 18% when the rotational speed of the pin was changed from 800 rpm to 1250 rpm.

### 1- مقدمه

سرعت دورانی و پیشروی مناسب، وارد درز اتصال می گردد و سپس در اثر حرارت تولید شده ناشی از اصطکاک بین ابزار و قطعه کار، ماده بدون ذوب شدن اتصال داده می شود. فرایند اصطکاکی اغتشاشی<sup>2</sup> یک فرایند مشابه جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی است که توسط میشرها و همکاران [2] ابداع شد. این فرایند به منظور اصلاح خصوصیات سطحی مواد مختلف

در سال 1991 میلادی، انستیتو جوش کاری انگلستان، فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی<sup>1</sup> را برای اولین بار به منظور جوش کاری آلیاژهای آلومینیوم ابداع کرد [1]. اصول و اساس این روش جوش کاری بسیار ساده می باشد. بدین صورت که یک ابزار غیر مصرفی متشکل از دو قسمت پین و شانه، با دارا بودن

<sup>2</sup> FSP (Friction stir processing)

<sup>1</sup> FSW (Friction Stir Welding)

### Please cite this article using:

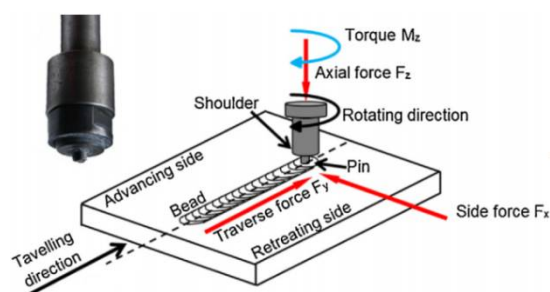
S H Nourbakhsh, Y karbali, M Solati, Investigating the effect of pin and shoulder rotational speed on the mechanical properties of friction stir processed region in Al6061, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 34- 41, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

رفتن رسوبات مفید در ساختار ماده می‌شود. با افزایش سرعت دورانی ابزار، امکان مخلوط شدن مواد پلاستیک شده افزایش پیدا می‌کند که بر خلاف مساله حرارت ایجاد شده یک پارامتر مثبت محسوب می‌شود. بنابراین باید در تعیین سرعت دورانی ابزار دقت کافی به عمل آید. تا کنون تحقیقات زیادی در زمینه انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر روی آلیاژهای آلومینیوم با استفاده از ابزارهای متداول صورت پذیرفته که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

هوانگ<sup>1</sup> و همکاران توزیع دما در داخل نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم تحت فرایند اصطکاکی اغتشاشی قرار گرفته را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی برای آلومینیوم زمانی موفق است که بیشینه دما بین 365 تا 390 درجه سانتی‌گراد باشد. دما در ناحیه پیشران کمی بالاتر از ناحیه پس‌ران است اما نرخ انتقال حرارت در هر دو طرف یکسان است [10]. چن و کواسویک<sup>2</sup> اثر زاویه ابزار روی شکل‌گیری عیوب مختلف در جوش کاری آلیاژ آلومینیوم 5456 را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که زاویه ابزار تأثیر بسزایی روی حرارت ورودی به قطعه کار دارد. مشاهده شد که در زاویه ابزار کم، سیلان ماده به‌اندازه‌ی کافی انجام نمی‌شود که موجب شکل‌گیری عیب در اتصال می‌گردد. در زاویه ابزارهای زیاد به دلیل شکل‌گیری پلیسه زیاد در قسمت پس‌رو، ماده کافی برای پر کردن حفره وجود نخواهد داشت و در نتیجه عیب تونلی شکل می‌گیرد [11]. در تحقیقی که سلیح<sup>3</sup> و همکاران بر روی ساختار کامپوزیت‌های آلومینیومی و آلیاژهای انجام دادند دریافتند که پارامترهای جوش مانند سرعت دوران ابزار، سرعت خطی و نیروی محوری اثر قابل توجهی بر میزان تولید گرما و مقاومت اتصالات جوش داده شده دارند. ارزیابی ریز ساختاری نشان داد که نقص‌های تونلی به دلیل مناسب نبودن جریان فلز در ناحیه جوش کاری شده اتفاق می‌افتد. همچنین این ارزیابی نشان داد تشکیل ریزساختار بهتر ذرات تقویت‌کننده در منطقه اغتشاش با دادن مقدار مختلف گرما به وسیله کنترل پارامترهای جوش کاری امکان‌پذیر است [12]. هیراتا<sup>4</sup> و همکاران اثر حرارت ورودی بر ریزساختار و شکل‌پذیری جوش اصطکاکی آلیاژ 5083 در حالت آنیل شده را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش نسبت سرعت چرخشی به سرعت خطی ابزار، استحکام و شکل‌پذیری اتصالات کاهش پیدا کرده و

استفاده می‌گردد. فرایند مذکور بر اصول جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی استوار است [3]. همان‌طور که در شکل 1 قابل مشاهده است، ابزار مورد استفاده در فرایند اصطکاکی اغتشاشی از دو قسمت اصلی پین و شانه تشکیل شده است. پین ابزار وظیفه ایجاد کرنش‌های پلاستیک در اثر دوران ابزار و سپس تلاطم و اکستروژن ماده از جلوی پین به پشت آن در اثر حرکت دورانی و پیشروی را دارد. اصطکاک مابین شانه و قطعه کار عامل اصلی ایجاد حرارت است. در این فرایند گرمای موضعی ایجادشده (به دلیل اصطکاک بین ابزار و فلز) و همچنین تغییر فرم پلاستیک شدید در محل مذکور موجب وقوع تبلور مجدد و توسعه ریزساختار می‌شود [4].



شکل 1 شماتیک فرایند اصطکاکی اغتشاشی [5]

Figure 1 Schematic view of friction stir process [5]

فرایند FSP در آلیاژهای با نقطه ذوب بالا مشکلاتی از قبیل فرسایش شدید ابزار دارد که موجب عدم گسترش این فرایند در مورد آلیاژهای فولاد و موارد مشابه شده است [6]. اما ویژگی‌های منحصر به فرد این فرایند منجر به کاربردهای گسترده و متنوع از جمله بهبود خاصیت سوپر پلاستیک [2]، تولید کامپوزیت‌های سطحی و زمینه فلزی [7] و همگن‌سازی ریزساختارهای آلیاژی شده است [8]. در انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی، پارامتر سرعت دورانی ابزار جزء مهم‌ترین و اصلی‌ترین متغیرهای فرایند محسوب می‌شود. هر دو عملکرد اصلی ابزار فرایند اصطکاکی اغتشاشی یعنی ایجاد حرارت در اثر اصطکاک (نرم کردن ماده) و اختلاط مواد، به‌طور محسوسی به مقادیر سرعت دورانی ابزار وابسته است. هر چه مقدار این پارامتر افزایش یابد گرمای تولید شده بیشتر خواهد شد. مقدار گرمای تولید شده بر اثر دوران ابزار یک حالت بهینه دارد؛ اگر گرمای تولید شده بر اثر دوران ابزار به اندازه کافی نباشد امکان تولید ریزساختار مناسب به علت کم بودن دمای مواد جریان پیدا کرده کاهش خواهد یافت؛ بنابراین ناحیه ایجادشده از نظر خواص استحکامی افت خواهد کرد [9]. همچنین اگر دما بیش از اندازه افزایش یابد باعث از بین

<sup>1</sup> Hwang

<sup>2</sup> Chen and Kovacevic

<sup>3</sup> Omar S. Salih

<sup>4</sup> Hirata

لازم برای ساخت دستگاه آماده گردید. نکته‌ی حائز اهمیت در این مکانیزم امکان اعمال سرعت دورانی متفاوت به پین ابزار و شانه ابزار است. پین ابزار با سرعت دورانی برابر با سرعت دورانی دستگاه فرز حرکت می‌کند. سرعت دورانی شانه ابزار با استفاده از ترکیب چرخدنده‌ها از محور پین دریافت می‌شود و بنابراین با سرعتی متفاوت از پین حرکت می‌کند. در این مکانیزم به دلیل تفرانس کم قطعات، امکان انبساط در اثر حرارت و تماس فلز با فلز از بلبرینگ و رولبرینگ‌های متفاوتی در مکانیسم‌های بحرانی آن استفاده گردید. در شکل 2 نمای کلی دستگاه طراحی و ساخته شده قابل مشاهده است.

برای انجام فرایند از دستگاه فرز FP4M استفاده شد. طراحی و ساخت مکانیزمی که بتواند دستگاه ساخته شده را به دستگاه فرز ثابت کند و مانع از لرزش و حرکات ناخواسته در جهات مختلف گردد، همچنین مانع اعمال زاویه انحراف مناسب برای انجام فرایند نشود، حائز اهمیت می‌باشد. اتصال مکانیزم طراحی شده به دستگاه فرز در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 2 تصویر کلی دستگاه بعد از مونتاژ کردن قطعات

Figure 2 View of the tool after assembling.



شکل 3 اتصال استفاده شده برای دستگاه FSP

Figure 3 Fixture used for FSP tool.

قطر و طول پین به ترتیب 6 و 4 میلی‌متر و قطر شانه 20

ریزساختار اتصال در ناحیه جوش درشت‌تر شده است. از نقطه نظر استحکام مکانیکی، کیفیت اتصالات FSW آلیاژهای آلومینیم اساساً تحت تأثیر عیوب تونلی، حفره و ترکیبات بین فلزی است [13]. نلی<sup>1</sup> در تحقیقی نشان داد که تبلور مجدد دینامیکی سبب تشکیل دانه‌های ریز با چگالی پایین از نایجایی‌ها در ناحیه‌ی اغتشاش می‌گردد که خود دلیلی بر کاهش استحکام است. افزایش تنش نهایی در بقیه‌ی نمونه‌ها را می‌توان به کاهش اندازه‌ی دانه و یکنواخت شدن آن‌ها نسبت داد [14]. دانه‌بندی بعد از فرایند، در صورت کنترل دما به مراتب از دانه‌های فلز پایه ریزتر است. این خاصیت منطقه اغتشاش باعث شده تا این روش به عنوان یک روش ترمومکانیکی جدید استفاده شود. ایجاد اغتشاش و اصطکاک ناشی از آن، در صورتیکه گرمای زیادی تولید کند، می‌تواند باعث درشت شدن دانه تحت مکانیزم رشد دانه‌ها گردد [15]. علاوه بر این که شانه بر حرکت مواد تأثیر می‌گذارد، در حرارت ایجادشده نیز نقش دارد. در سطح تماس شانه و قطعه فشار بیشتر از سطح تماس پین و ماده می‌باشد و همچنین سرعت خطی در شانه به علت بزرگ‌تر بودن شعاع آن نسبت به پین بیشتر است، بنابراین، تأثیر ویژه‌ای در افزایش دمای بیشینه دارد [16]. نتایج تغییرات دمایی مربوط به فرایند با دو ابزار پین‌دار و بدون پین نشان می‌دهد در ابزار بدون پین در مقایسه با ابزار پین‌دار، عملاً دمای حداکثر به دست آمده چندان تغییر نمی‌کند [17].

در بیشتر تحقیقات به مسئله دما توجه شده است، این موضوع در حالی بوده که اثر مثبت افزایش سرعت نرخ کرنش مواد با افزایش سرعت دورانی توسط اثر منفی افزایش حرارت تولید شده از بین رفته است. این موضوع به خاطر چرخش همزمان و وابسته پین و شانه می‌باشد. در این تحقیق سعی بر آن شده دستگاهی ساخته شود که پین ابزار از شانه ابزار کاملاً مستقل بوده و بتواند سرعت پین در عین ثابت نگه‌داشتن سرعت شانه افزایش پیدا کند و تأثیر آن را بر دمای بیشینه بوجود آمده در حین فرایند و خواص مکانیکی ناحیه تولید شده ناشی از فرایند اصطکاکی اغتشاشی را بررسی نمود.

## 2- مواد و روش تحقیق

در طراحی اولیه، مکانیزم مناسب مدل‌سازی شد، سپس ابعاد و مشخصات دقیق قطعات و چرخدنده‌ها برای رسیدن به سرعت‌های موردنظر پین و شانه ابزار محاسبه و نقشه‌ی قطعات

<sup>1</sup> Nelly

### 3- نتایج و بحث

#### 3-1- بررسی دمای بیشینه

یکی از عواملی که تأثیر زیادی بر روی میکروساختار و به دنبال آن بر روی مقاومت مکانیکی نمونه تولید شده از فرایند اصطکاکی اغتشاشی دارد دمای بیشینه بوجود آمده در حین فرایند است. در صورتی که دما پایین باشد فرایند اصطکاکی اغتشاشی و تولید ناحیه مورد نظر به خوبی انجام نمی‌شود و ناحیه مورد نظر دارای حفره و عیوب متعددی می‌گردد. در صورتی که دما بیش از اندازه افزایش یابد باعث رشد اندازه دانه‌های ماده و حل شدن رسوبات مفید در ماده می‌گردد. سرعت دورانی بر حرارت ایجادشده در قطعه تأثیر می‌گذارد به گونه‌ای که با افزایش سرعت دمای بیشینه افزایش می‌یابد. شکل 5 نمودار دما-زمان برای سه حالت مختلف فرایند اصطکاکی اغتشاشی را نشان می‌دهد. همچنین در جدول 1 مقدار دمای بیشینه بوجود آمده در هر حالت آورده شده است.

همان‌طور که در شکل 4 و جدول 1 مشاهده می‌گردد، با افزایش سرعت دورانی پین در حالی که سرعت شانه ثابت نگه داشته شده است افزایش دمای چندانی در دمای بیشینه اتفاق نمی‌افتد. با افزایش سرعت پین از 800 دور بر دقیقه به 1000 دور بر دقیقه دمای بیشینه 7 درجه سانتی‌گراد و با افزایش سرعت پین از 1000 دور بر دقیقه به 1250 دور بر دقیقه دمای بیشینه تنها 6 درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. دمای بیشینه به‌طور یکنواخت با سرعت دورانی افزایش نمی‌یابد [16]. این موضوع در نتایج این تحقیق نیز مشاهده می‌گردد. رابطه  $dQ = 2\pi\mu F_n r^2 \omega dr$  مقدار حرارت ایجادشده در قطعه با نیروی محوری ( $F_n$ )، ضریب اصطکاک ( $\mu$ )، شعاع شانه ( $r$ ) و سرعت دورانی ( $\omega$ ) را نشان می‌دهد، ضریب اصطکاک در طی فرایند ثابت نیست و با افزایش دما مقدار ضریب اصطکاک تغییر می‌کند، بنابراین، نمی‌توان به تنهایی و بدون توجه به اثر پارامترهای دیگر به تعیین رابطه‌ای بین دمای بیشینه و یک پارامتر ویژه پرداخت [18]. تأثیر اندک سرعت پین در افزایش دمای بیشینه فرایند اصطکاکی اغتشاشی را می‌توان از نتایج به دست آمده در شکل 5 و جدول 1 استنباط کرد.

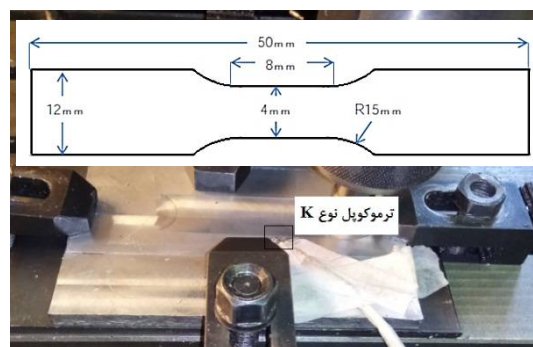
Table 1 Maximum temperature in the different conditions

جدول 1 حداکثر دما در حالت‌های مختلف

مشخصه نمونه	حداکثر دما (درجه سانتی‌گراد)
800-800	307
800-1000	314
800-1250	320

میلی‌متر در نظر گرفته شد. عمق نفوذ شانه در قطعه کار 0/6 میلی‌متر لحاظ گردید. نمونه‌ها از جنس آلومینیم آلیاژی 6061، با ضخامت 8 میلی‌متر در ابعاد 100 در 200 میلی‌متر تهیه شدند. زاویه انحراف<sup>1</sup> ابزار نسبت به قطعه 3 درجه انتخاب شد. سرعت پیشروی ابزار در این بررسی‌ها ثابت و برابر 50 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. سرعت‌های دورانی متداولی که در اکثر مقالات استفاده شده، 800، 1000 و 1250 دور بر دقیقه می‌باشد. در این پژوهش برای اینکه دمای ایجاد شده کمترین مقدار باشد سرعت شانه بر روی 800 دور بر دقیقه ثابت نگه داشته شد. بنابراین طراحی چرخنده‌ها به گونه‌ای انجام گرفت که بتوان در تمام حالت‌ها سرعت شانه را ثابت برابر 800 دور بر دقیقه نگه داشت ولی سرعت پین را بتوان از بین 800، 1000 و 1250 دور بر دقیقه انتخاب نمود. بنابراین سه حالت مختلف 800-800، 800-1000 و 800-1250 برای انجام آزمایش‌ها ایجاد گردید. ثبت دقیق دمای تولید شده در حین فرایند به‌وسیله ترموکوپل نوع K که به دیتالاگر<sup>2</sup> متصل شده و اطلاعات را به رایانه منتقل می‌کند، انجام گردید. دماسنج در فاصله 12 میلی‌متر از خط وسط حرکت پین در عمق 2 میلی‌متری از سطح قرار داده شد (شکل 4). نمونه‌های کشش طبق ابعاد نشان داده شده در شکل 4 از نمونه‌ها با استفاده از دستگاه وایرکات جدا گردید. آزمایش‌ها با سرعت ثابت 1 میلی‌متر بر دقیقه و در دمای محیط تا زمان گسیختگی انجام شدند.

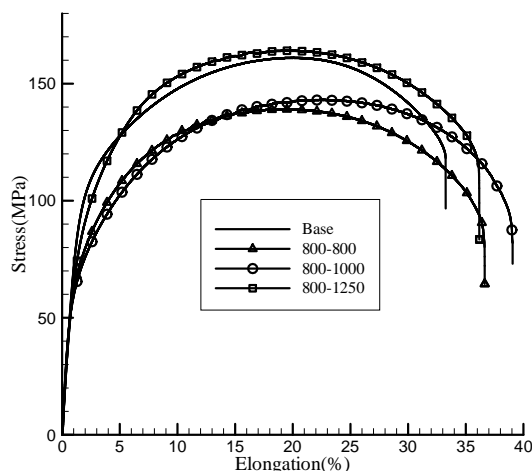
برای بررسی خواص میکروساختاری، نمونه‌ها بصورت مکانیکی پولیش داده شدند و با استفاده از محلول کلر اچ گردیدند. همچنین میکروسختی ویکرز با استفاده از نیروی 300 گرم و مدت زمان 10 ثانیه برای نمونه‌ها به دست آمد.



شکل 4 محل قرار گیری ترموکوپل و ابعاد نمونه کشش

Figure 4 Location of thermocouple and dimensions of the tensile specimen.

<sup>1</sup> Tilt angle  
<sup>2</sup> Data Logger



شکل 6 نمودار تنش-کرنش مربوط به نمونه‌های مختلف

Figure 6 Stress-strain curve for different samples

Table 2 quantity of the ultimate stress and elongation of different samples

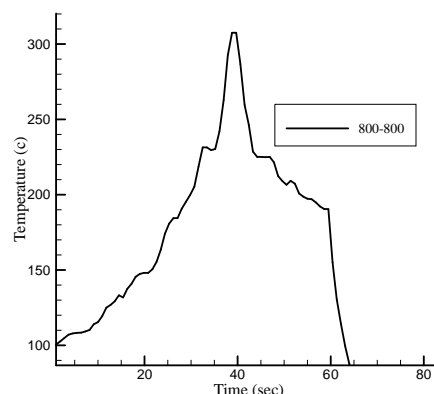
جدول 2 مقادیر عددی تنش نهایی و میزان ازدیاد طول نمونه‌های مختلف

مشخصه نمونه	استحکام کشش (MPa)	ازدیاد طول (%)
فلز پایه	161	33/25
800-800	139	36/64
800-1000	143	39/06
800-1250	164	36/17

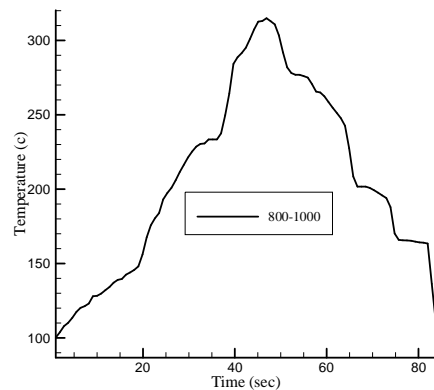
با توجه به نمودار شکل 6 و اعداد جدول 2 مشاهده می‌گردد که انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی با سرعت شانه 800 دور بر دقیقه و سرعت پین 800 دور بر دقیقه باعث کاهش تنش نهایی ولی افزایش ازدیاد طول نمونه شده است. استحکام نهایی نمونه نسبت به فلز پایه 13 درصد کاهش ولی ازدیاد طول 10 درصد افزایش را از خود نشان داده است. در حالت دوم انجام فرایند که سرعت پین در عین ثابت نگه‌داشتن سرعت شانه افزایش یافته است، مشاهده می‌گردد که تنش نهایی 11/18 کاهش ولی ازدیاد طول 17/47 درصد افزایش را نسبت به فلز پایه تجربه کرده است. افزایش سرعت پین از 800 دور بر دقیقه به 1000 دور بر دقیقه باعث شده که تنش نهایی 2/87 و ازدیاد طول 6/6 درصد در نمونه‌های اصطکاک اغتشاشی شده افزایش یابد.

همان‌طور که در قسمت 3-1 و جدول 1 مشاهده می‌شود افزایش سرعت پین از 800 به 1000 دور بر دقیقه دمای بیشینه بوجود آمده در فرایند را افزایش (به مقدار 7 درجه) داده است. علاوه بر افزایش دمای اتفاق افتاده افزایش سرعت پین باعث افزایش نرخ کرنش بوجود آمده در هنگام اکستروژن شدن مواد در فرایند اصطکاکی اغتشاشی می‌شود. معادله (1) نشان دهنده مقادیر ریز شدن و تبلور مجدد دینامیکی مواد در اثر دما و نرخ

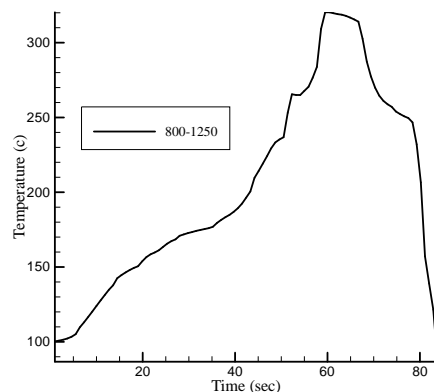
نمونه‌ها در تمام حالت‌ها بدون وجود عیب تولید شدند، که این مسئله کافی بودن دمای فرایند در تمام حالت‌ها را نشان می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل 5 نمودار دما-زمان، الف) 800-800، ب) 800-1000، ج) 800-1250

Figure 5 Temperature-time diagram, a)800-800, b)800-1000, c) 800-1250

### 2-3- بررسی خواص مکانیکی

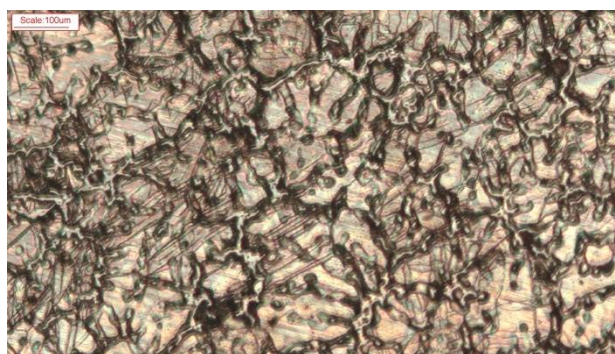
در شکل 6 نمودار تنش-کرنش مهندسی به دست آمده از نمونه کشش‌های حالت‌های مختلف نشان داده شده است. برای مقایسه بیشتر، مقادیر عددی مربوط به تنش نهایی و میزان ازدیاد طول هر یک از حالت‌ها در جدول 2 نیز ذکر گردیده است.

کرنش می‌باشد [19]:

$$\frac{d_{rec}}{d_{init}} = 10^3 \times \left\{ \dot{\epsilon} \times \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right\}^{-\frac{1}{3}} \quad (1)$$

در این رابطه  $d$  اندازه دانه،  $Q$  انرژی فعال‌ساز،  $R$  ثابت گازها،  $T$  دمای انجام فرایند و  $\dot{\epsilon}$  نرخ کرنش ایجادشده در حین فرایند است. نرخ کرنش در فرایند اصطکاکی اغتشاشی توسط رابطه  $\dot{\epsilon} = \frac{R_m \cdot 2\pi\gamma_e}{L_e}$  بیان می‌گردد، در این رابطه  $R_m$  سرعت جریان مواد که تقریباً برابر نصف سرعت دورانی پین است و  $L_e$  و  $\gamma_e$  شعاع و ارتفاع ناحیه در حال دانه‌بندی مجدد می‌باشند که برابر 0/78 شعاع و ارتفاع پین در نظر گرفته می‌شوند [19].

در این رابطه دما اثر معکوس ولی نرخ کرنش رابطه مستقیم با مقدار اندازه دانه ماده بعد از تبلور مجدد دینامیکی دارد. همان‌طور که در بخش 3-1 مشاهده گردید با ثابت نگه‌داشتن سرعت شانه و افزایش سرعت پین افزایش دمای چندانی در قطعه رخ نمی‌دهد ولی این افزایش سرعت پین، مقدار نرخ کرنش را افزایش می‌دهد که طبق رابطه (1) اندازه دانه نهایی ماده تولید شده کاهش می‌یابد. این موضوع باعث همگن شدن ماده از لحاظ ریزساختاری و در نتیجه افزایش مقاومت مکانیکی آن می‌گردد. در شکل 7 تصویر مربوط به ریزساختار فلز پایه و حالت 800-1250 قابل مشاهده است.



(الف)



(ب)

شکل 7 میکروساختار آلیاژ Al6061، (الف) فلز پایه، (ب) حالت 800-1250  
Figure 7 Microstructure of Al6061 alloy, a) Base, b) 800-1250 sample

همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود اندازه دانه‌ها به شدت کاهش پیدا کرده اند و ساختاری همگن بوجود آمده است. در حالت سوم با ثابت بودن سرعت دورانی شانه ابزار بر روی 800 دور بر دقیقه و افزایش سرعت پین ابزار به 1250 دور بر دقیقه همان‌طور که در شکل 6 و جدول 2 قابل مشاهده است، تنش نهایی نسبت به حالت دوم (سرعت پین 1000 دور بر دقیقه) و حتی نسبت به ماده پایه افزایش یافته است. ازدیاد طول نمونه در این حالت نسبت به فلز پایه افزایش ولی نسبت به حالت دوم فرایند اصطکاکی اغتشاشی دچار کاهش شده است.

تنش نهایی و ازدیاد طول نسبت به حالت پایه به ترتیب برابر 1/86 و 8/78 درصد افزایش ولی نسبت به حالت دوم به ترتیب 12/8 درصد افزایش و 7/99 درصد کاهش را نشان می‌دهد. اندازه دانه و چگالی نابه‌جایی‌ها در مقاومت ماده تأثیر می‌گذارند.

اندازه دانه توسط رابطه هال-پتچ  $\sigma_{HP} = kd^{-\frac{1}{2}}$  در افزایش یا کاهش مقاومت ماده تأثیر می‌گذارد. در این رابطه  $d$  اندازه دانه و  $k$  عدد ثابت است [20].

کاهش اندازه دانه در اثر افزایش نرخ کرنش بوجود آمده در فرایند اصطکاکی اغتشاشی باعث افزایش تنش نهایی حالت‌های مختلف شده است. ازدیاد طول با افزایش سرعت دورانی پین از 800 به 1000 دور بر دقیقه باعث افزایش ازدیاد طول ولی در با افزایش آن از 1000 به 1250 باعث کاهش ازدیاد طول شده است، این موضوع می‌تواند به محلی شدن تنش‌ها در ناحیه طول مؤثر نمونه‌های کشش مرتبط باشد. این موضوع توسط یوان و میشرا نیز گزارش شده است [21]. فرایند اصطکاکی اغتشاشی بر اثر تغییر در میکروساختار باعث تغییر در مقدار سختی نمونه تولید شده می‌گردد. سختی در مقاومت به سایش می‌تواند نقش مهمی را ایفا کند. در جدول 3 مقدار سختی ناحیه اغتشاش هر یک از حالتها آورده شده است.

Table 3 Microhardness of different samples(Hv)

جدول 3 میکروسختی نمونه های مختلف (Hv)			
1250-800	1000-800	800-800	فلز پایه
96	89	87	85

همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود سختی در تمامی حالت‌های مختلف افزایش پیدا کرده است. افزایش مقدار سختی در دو حالت 800-800 و 1000-800 به میزان کمتری نسبت به حالت 800-1250 افزایش پیدا کرده که این موضوع مرتبط با

<sup>1</sup> Hall-Petch

- [6] H. S. Grewal, H. S. Arora, H. Singh, A. Agrawal, Surface modification of hydroturbine steel using friction stir processing, *Applied Surface Science*, Vol. 268, No. Supplement C, pp. 547-555, 2013/03/01/, 2013.
- [7] A. Alavi Nia, S. H. Nourbakhsh, Microstructure and Mechanical Properties of AZ31/SiC and AZ31/CNT Composites Produced by Friction Stir Processing, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, Vol. 69, No. 7, pp. 1435-1442, 2016/09/01, 2016.
- [8] a. alavi nia, h.omidvar, h. nourbakhsh, Effect of overlapping ratio and rapid cooling in friction stir process on the microstructure and mechanical properties of AZ31 alloy, *mdrsjrns*, Vol. 13, No. 15, pp. 126-135, 2014.
- [9] Y. Kim, H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki, K. Nakata, Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 415, No. 1, pp. 250-254, 2006.
- [10] Y.-M. Hwang, Z.-W. Kang, Y.-C. Chiou, H.-H. Hsu, Experimental study on temperature distributions within the workpiece during friction stir welding of aluminum alloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 7, pp. 778-787, 2008/06/01/, 2008.
- [11] C. M. Chen, R. Kovacevic, Finite element modeling of friction stir welding—thermal and thermomechanical analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 13, pp. 1319-1326, 2003/10/01/, 2003.
- [12] O. S. Salih, H. Ou, W. Sun, D. G. McCartney, A review of friction stir welding of aluminium matrix composites, *Materials & Design*, Vol. 86, No. Supplement C, pp. 61-71, 2015/12/05/, 2015.
- [13] T. Hirata, T. Oguri, H. Hagino, T. Tanaka, S. W. Chung, Y. Takigawa, K. Higashi, Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 456, No. 1, pp. 344-349, 2007/05/15/, 2007.
- [14] T. McNelley, S. Swaminathan, J. Su, Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys, *Scripta Materialia*, Vol. 58, No. 5, pp. 349-354, 2008.
- [15] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, Friction stir processing: a new grain refinement technique to achieve high strain rate superplasticity in commercial alloys, in *Proceeding of*, Trans Tech Publ, pp. 507-514.
- [16] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [17] C. Rhodes, M. Mahoney, W. Bingel, R. Spurling, C. Bampton, Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum, *Scripta materialia*, Vol. 36, No. 1, 1997.
- [18] N. Rajamanickam, V. Balusamy, G. Madhusudhanna Reddy, K. Natarajan, Effect of میزان تبلور مجدد دینامیکی و ریزدانه شدن نمونه‌ها می‌باشد.
- #### 4- نتیجه‌گیری
- در این تحقیق آلیاژ آلومینیم 6061 تحت فرایند اصطکاکی اغتشاشی با سرعت‌های دورانی متفاوت پین و شانه ابزار قرار گرفت. سرعت شانه بر روی 800 دور بر دقیقه ثابت ولی سرعت پین از 800 تا 1250 دور بر دقیقه افزایش داده شد. نمودار دما- زمان و تنش- کرنش مربوط به هر یک از حالت‌های تحت فرایند استخراج گردید. از مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:
- سرعت دورانی پین نقش چندانی در افزایش دمای بوجود آمده در فرایند اصطکاکی اغتشاشی ندارد. در صورت افزایش 25 درصد در سرعت دورانی پین دمای بیشینه حدوداً 2 درصد افزایش می‌یابد.
  - افزایش سرعت دورانی پین باعث افزایش نرخ کرنش بوجود آمده در حین فرایند شده که این موضوع باعث ریز شدن اندازه دانه و بنابراین افزایش مقاومت مکانیکی نمونه می‌شود.
  - با افزایش سرعت دورانی پین تنش نهایی افزایش می‌یابد ولی ازدیاد طول روند خاصی را دنبال نمی‌کند.
  - با ثابت نگه‌داشتن سرعت شانه و افزایش سرعت پین می‌توان فرایند اصطکاکی اغتشاشی یا جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی را با موفقیت در مورد فلزات عملیات حرارتی پذیر انجام داد بدون اینکه رسوبات مفید از بین بروند.
- #### 5- مراجع
- [1] T. Lienert, R. Mishra, M. Mahoney, Friction Stir Welding and Processing, *ASM International, Materials Park, OH*, pp. 123-154, 2007.
  - [2] R. S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 50, No. 1, pp. 1-78, 2005/08/31/, 2005.
  - [3] K. Surekha, B. S. Murty, K. P. Rao, Microstructural characterization and corrosion behavior of multipass friction stir processed AA2219 aluminium alloy, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 202, No. 17, pp. 4057-4068, 2008/05/25/, 2008.
  - [4] I. Charit, R. S. Mishra, Low temperature superplasticity in a friction-stir-processed ultrafine grained Al-Zn-Mg-Sc alloy, *Acta Materialia*, Vol. 53, No. 15, pp. 4211-4223, 2005/09/01/, 2005.
  - [5] M. S. Węglowski, Friction stir processing – State of the art, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 114-129, 2018/01/01/, 2018.

- [20] N. Afrin, D. L. Chen, X. Cao, M. Jahazi, Strain hardening behavior of a friction stir welded magnesium alloy, *Scripta Materialia*, Vol. 57, No. 11, pp. 1004-1007, 2007.
- [21] W. Yuan, R. S. Mishra, Grain size and texture effects on deformation behavior of AZ31 magnesium alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 558, No. 0, pp. 716-724, 2012.
- process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 7, pp. 2726-2731, 2009.
- [19] C. I. Chang, X. H. Du, J. C. Huang, Achieving ultrafine grain size in Mg-Al-Zn alloy by friction stir processing, *Scripta Materialia*, Vol. 57, No. 3, pp. 209-212, 2007.