



## جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و بررسی اثر پارامترهای آن بر ریزساختار و خواص مکانیکی جوش در آلیاژ آلومینیوم 5052

سجاد فولادی<sup>1</sup>، محمود عباسی<sup>2\*</sup>، محمد گیوی<sup>1</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه کاشان، کاشان

2- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه کاشان، کاشان

\* کاشان، صندوق پستی 8731753153، m.abbasi@kashanu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 16 بهمن 1395

پذیرش: 24 اسفند 1395

ارائه در سایت: 29 فروردین 1396

کلید واژگان:

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی

میکروساختار

خواص مکانیکی

### چکیده

«جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی» یک فرآیند جوشکاری حالت جامد است که مزایای متنوعی نسبت به جوشکاری حالت ذوبی دارد. مشکلات ناشی از سرد شدن فاز مذاب در این فرآیند وجود ندارد. در این تحقیق، یک روش جدید جهت بهسازی میکروساختار و خواص مکانیکی جوش حاصل از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه می‌شود. در این روش قطعات جوش شونده هنگام جوشکاری ارتعاش می‌یابند. قطعات اتصال یابنده در موقعیت لب به لب، بر نگهدارنده محکم شده و نگهدارنده از طریق مکانیزم میل‌لنگی در راستای عمود بر خط جوش مرتعش می‌شود. روش ارائه شده با عنوان جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی توصیف می‌شود. میکروساختار و خواص مکانیکی قطعات جوش شونده توسط دو روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و اصطکاکی ارتعاشی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که اندازه دانه ناحیه جوش قطعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده در حدود 30% کوچک‌تر از مقدار آن در قطعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده است و استحکام نهایی کشش، اتصال اولی در حدود 12% بالاتر از مقدار آن در اتصال دومی است. این موضوع به تولید نابه‌جایی‌های بیشتر و در نتیجه تبلور دوباره بیشتر در حضور ارتعاش نسبت داده می‌شود. نتایج همچنین دلالت می‌کند که اندازه دانه ناحیه جوش قطعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده با افزایش سرعت چرخش و کاهش سرعت طولی ابزار، افزایش و خواص مکانیکی کاهش می‌یابند. این موضوع به افزایش دما در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی نسبت داده می‌شود. نتیجه گرفته می‌شود که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی جایگزینی مناسب برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است و استفاده از آن برای صنایع توصیه می‌شود.

## Friction stirs vibration welding and study about the effects of its parameters on microstructure and mechanical properties of Al5052 joint

Sajad Fouladi, Mahmoud Abbasi\*, Mohammad Givi

Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

\* P.O.B. 8731753153 Kashan, Iran, m.abbasi@kashanu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 04 February 2017  
Accepted 14 March 2017  
Available Online 18 April 2017

### Keywords:

Friction stir vibration welding  
Microstructure  
Mechanical properties

### ABSTRACT

Friction stir welding (FSW) is a solid-state joining process that leads to several advantages over fusion welding methods as problems associated with cooling from the liquid phase are avoided. In the current research, a new method is presented to improve the microstructure and mechanical properties of joint obtained using FSW. In this method, the joining workpieces are vibrated during FSW. The joining workpieces are fixed on fixture in a butt position and the fixture is vibrated mechanically normal to weld line through camshaft mechanism. The new method is described as friction stir vibration welding (FSVW) process. Microstructure and mechanical properties of welded specimens using FSW and FSVW processes are compared. The results show that weld region grain size of FSVW welded specimen is lower than that in specimen welded by FSW by about 30% and the ultimate tensile strength of joint obtained using the former process is higher than that relating to the latter one by about 12%. This is attributed to more generation of dislocations and correspondingly enhanced dynamic recrystallization as vibration is applied. The results also indicate that the weld region grain size of FSVW specimen increases and mechanical properties of joint decrease as tool rotation speed increases and traverse speed decreases. This is related to temperature increase during FSVW. It is concluded that FSVW is a proper candidate for FSW and its application is recommended for industries.

### 1- مقدمه

محیط زیست دارد. این روش جوشکاری معمولاً برای جوشکاری فلزاتی مانند آلومینیوم و منیزیم که به راحتی با روش‌های جوشکاری ذوبی اتصال نمی‌یابند، کاربرد دارد [1-3]. جوشکاری ذوبی این قبیل فلزات همراه با ایجاد

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (FSW)، برخلاف جوشکاری ذوبی یک روش جوشکاری حالت جامد است. این روش بازدهی انرژی بالا و سازگاری خوبی با

### Please cite this article using:

S. Fouladi, M. Abbasi, M. Givi, Friction stirs vibration welding and study about the effects of its parameters on microstructure and mechanical properties of Al5052 joint, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 217-224, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

افزایش می‌یابد. کابیو و همکاران [12] روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جدیدی بر مبنای حرکت دایره‌ای ابزار بر خط جوش در حین جوشکاری آلیاژ آلومینیوم 5754 ارائه دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که در این روش جوشکاری به دلیل کاهش گرمای ورودی به ناحیه اغتشاش، خواص مکانیکی ناحیه جوش افزایش می‌یابد.

کامینلی و همکاران [13] برای بهبود خواص جوش حاصل از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی از ترکیب این فرآیند با پیش گرمادهی توسط اشعه لیزر استفاده کردند. قطعات ورق آلیاژ آلومینیوم 5754H111 با ضخامت 6 میلی‌متر ابتدا با استفاده از اشعه لیزر ایتروم پیش گرم شدند و سپس فرآیند جوشکاری صورت گرفت. بررسی خواص مکانیکی و ریزساختار قطعات جوشکاری‌شونده در دو حالت عدم استفاده از پیش گرمایش و با حضور پیش گرمایش نشان داد که استفاده از لیزر سبب افزایش سختی و کاهش تنش‌های باقی‌مانده طولی در ناحیه جوش و پیش گرمایش سبب افزایش تغییر طول در آزمون کشش شد.

پیچمن و همکاران [14] روش نوینی جهت کاهش نیروی جوشکاری در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه دادند. در این روش با عبور جریان الکتریکی از موضع جوش، دما در این ناحیه افزایش و در نتیجه تغییر شکل پلاستیک و اختلاط در ناحیه اغتشاش با نیروی کمتری صورت گرفت. امینی و همکاران [15] اثر حضور امواج فراصوتی ناشی از ارتعاش قطعه پیروالکترونیک در ابزار در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر میکروساختار ناحیه جوش و خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم Al6061 بررسی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که حضور امواج اولتراسونیک در حین جوشکاری سبب افزایش استحکام قطعه جوشکاری شد. در این تحقیق روشی نوین برای انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارائه شد. روش جدید جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی (FSVW) نام گرفت. میکروساختار ناحیه جوش و خواص مکانیکی قطعات اتصال یافته توسط دو روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی با یکدیگر مقایسه شدند و اثرات متغیرهای سرعت حرکت خطی ابزار و سرعت چرخشی آن بر میکروساختار و خواص مکانیکی ناحیه اغتشاش بررسی شدند.

## 2- روش انجام کار

فلز مورد استفاده در این تحقیق شامل ورق آلومینیوم Al5052 کار سخت‌شده (H32) با ضخامت 3 میلی‌متر و ترکیب ارائه شده در جدول 1 بود. ورق مورد نظر در قطعاتی با ابعاد  $130 \times 50$  (میلی‌متر) برش زده شد. لبه ورق‌ها پلیسه‌گیری و سپس با الکل چربی‌زدایی شد. قطعات بریده شده در راستای طولی لب‌به‌لب کنار یکدیگر قرار گرفته و بر نگهدارنده مهار شدند. ابزار شامل شانه و پین با هندسه نمایش داده شده در شکل 1 بود. شانه از جنس فولاد M2 عملیات حرارتی شده و با سختی 65 راکول‌سی و پین از جنس کاربید تنگستن بود. جهت ارتعاش قطعه‌کارها حین جوشکاری از طریق ارتعاش نگهدارنده اقدام شد. به این منظور از مکانیزم میل‌لنگی برای انتقال حرکت چرخشی موتور به حرکت خطی، رفت و برگشتی نگهدارنده روی ریل‌های هدایتگر استفاده شد. طراحی میل‌لنگ به صورتی انجام شد که دامنه حرکت نگهدارنده 0.5 میلی‌متر بود. به منظور تغییر سرعت حرکت چرخشی محور موتور و در نتیجه فرکانس ارتعاش نگهدارنده از یک کنترل‌کننده برقی سرعت استفاده شد. در شکل 2 طرح ارائه و ساخته شده جهت ایجاد ارتعاش در نگهدارنده و انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی نمایش داده شده است.

عیوب جوش چون عدم ذوب، جدایش و تبخیر است [4]. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در صنایع هوافضا و سایر صنایع حساس می‌تواند برای اتصال آلیاژهای پایه آلومینیوم استحکام بالا به‌کار رود.

نخستین بار روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در مؤسسه جوشکاری بریتانیا به‌عنوان روش اتصال حالت جامد ابداع شد و برای جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم به‌کار گرفته شد [5]. اساس کار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بدین‌گونه است که یک ابزار غیرمصرفی چرخان، شامل یک پین با طراحی مشخص و یک شانه، در فضای بین لبه‌های مجاور صفحات متصل‌شونده وارد می‌شود و در امتداد خط اتصال پیشروی می‌کند. اصطکاک ناشی از تماس سطح ابزار با قطعه‌کارها سبب ایجاد گرما و در نتیجه نرم‌شدن لبه قطعه‌کارها می‌شود. حضور پین در نوک ابزار و چرخش آن سبب گردش موضعی مواد و امتزاج آن‌ها می‌گردد. در واقع پین سبب آهنگری و اکستروژن موضعی مواد می‌شود [6,7].

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نسبت به سایر روش‌های جوشکاری انرژی کمتری مصرف می‌کند؛ به گاز محافظ و فلاکس نیازی ندارد و سازگار با محیط‌زیست است، همچنین نیازی به فلز پرکننده ندارد. هر آلیاژ آلومینیوم را می‌توان بدون نگرانی از به‌هم‌خوردن ترکیب شیمیایی آن جوشکاری کرد. حتی می‌توان آلیاژهایی با ترکیب متفاوت را نیز جوشکاری کرد. علاوه بر این این روش جوشکاری برای وضعیت‌های مختلف جوشکاری مانند جوش لب‌به‌لب، T شکل و جوشکاری لوله‌ها قابل کاربرد است. با توجه به مزایای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تحقیق بیشتر در رابطه با اثرات متغیرهای این فرآیند و همچنین بهبود کارایی و بازدهی انرژی آن از اهمیت زیادی برخوردار است [7].

پائیک [8] خواص مکانیکی قطعات جوشکاری‌شده آلیاژ آلومینیوم 5083 و 5383 به دو روش جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را مورد بررسی قرار داد. او مشاهده کرد که خواص مکانیکی قطعات جوشکاری‌شده با روش اصطکاکی اغتشاشی بهتر از خواص قطعات جوشکاری با روش جوشکاری ذوبی بود.

اتر و همکاران [9] مکانیزم تشکیل دانه در ناحیه اغتشاش در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم 5251 را در دو حالت آنیل شده و کار سرد شده مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که برای قطعات کار سرد شده مکانیزم غالب در شکل‌گیری دانه‌های منطقه اغتشاش حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، مکانیزم تبلور مجدد پیوسته است، در حالی که این مکانیزم برای جوشکاری قطعات آنیل‌شده تبلور مجدد هندسی است. حیرانی و همکاران [10] به بررسی اثر سرعت سرد شدن در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر میکروساختار و خواص مکانیکی جوش آلیاژ آلومینیوم 5083 پرداختند و دریافتند که با انجام جوشکاری در محیط آب، از آن‌جا که سرعت سرد شدن در حین جوشکاری افزایش می‌یابد، اندازه دانه‌ها در ناحیه اغتشاش کوچک‌تر شده و استحکام و سختی افزایش می‌یابد. فولادی و عباسی [11] به بررسی اثر حضور ذرات پودر  $\text{SiO}_2$  در زمینه آلیاژ آلومینیوم 5052 در حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پرداخته و دریافتند که حضور این ذرات سبب تقویت خواص مکانیکی ناحیه جوش شد، همچنین آن‌ها مشاهده کردند که بهبود توزیع ذرات تقویت‌کننده در فاز زمینه سبب افزایش بیشتر خواص مکانیکی جوش شد. آن‌ها به بررسی اثر تعداد پاس جوشکاری بر میکروساختار و خواص مکانیکی جوش تقویت‌شده با ذرات  $\text{SiO}_2$  پرداختند و دریافتند که با افزایش تعداد پاس کلوخه شدن ذرات تقویتی کاسته شده و ذرات توزیع بهتری می‌یابند و در نتیجه خواص مکانیکی قطعه جوش شده

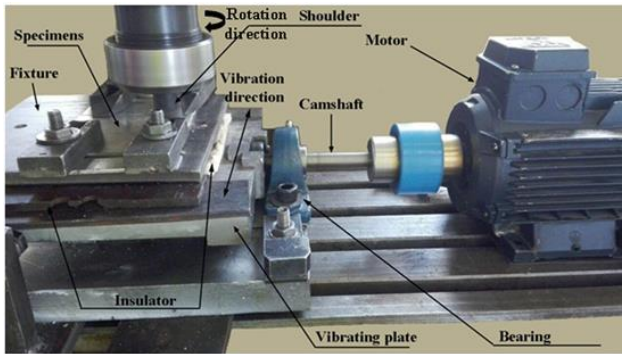


Fig. 2 Machine designed and manufactured for FSW process

شکل 2 دستگاه طراحی و ساخته شده جهت انجام جوشکاری اصطکاکی ارتعاشی

مورد استفاده شامل 2.58% حجمی اسید پیکریک، 10.82% حجمی اسید استیک، 10.82% حجمی آب و 75.78% حجمی اتانول بود. اندازه گیری اندازه دانه براساس استاندارد ASTM E-112 [16] صورت گرفت. به این منظور مربعی با اندازه 300×300 (میکرومتر) بر تصاویر میکروسکوپی ترسیم شد و تعداد دانه‌های محصور در مربع به اضافه نیمی از تعداد دانه‌های قرار گرفته در مرز مربع شمارش شدند. با احتساب شکل کروی برای دانه‌ها، مساحت میانگین یک دانه و قطر میانگین دانه‌ها محاسبه شد. برای هر نمونه مورد مطالعه سه مرتبه اندازه دانه اندازه‌گیری شد به نحوی که در هر مرتبه مکان مربع ترسیمی تغییر کرد.

جهت بررسی خواص مکانیکی قطعات جوشکاری شده از آزمون کشش تک‌محوری طبق استاندارد ASTM-E8 [17] استفاده شد. نمونه‌های آزمون کشش با استفاده از روش وایرکات تهیه شدند. نمونه‌ها در راستای عمود بر خط جوش و به گونه‌ای تهیه شدند که ناحیه جوش در مرکز نمونه قرار گیرد. سرعت حرکت فک دستگاه طی آزمون کشش 1 mm/min بود. برای اطمینان از صحت نتایج آزمون کشش برای هر حالت جوشکاری سه مرتبه جوشکاری صورت گرفت و برای هر یک از قطعات جوشکاری شده نمونه آزمون کشش تهیه شد. نمونه‌های کشش از ناحیه مرکزی قطعات جوشکاری شده انتخاب شدند.

### 3- نتایج و بحث

در شکل 3-a و 3-b به ترتیب تصاویر جوش مربوط به نمونه‌های 1 و 8 از جدول 2 نمایش داده شده است. در شکل 3 مشاهده می‌شود که هر دو نمونه کیفیت سطحی مناسبی دارند. با این حال قطر ناحیه اغتشاش در نمونه جوشکاری اصطکاکی ارتعاشی شده بزرگ‌تر از قطر آن ناحیه در نمونه جوشکاری اصطکاکی ارتعاشی شده است. این موضوع با توجه به ارتعاش نگهدارنده قابل توجه است. در شکل 3-b همچنین نحوه تهیه نمونه کشش از روی نمونه‌های جوشکاری شده نشان داده شده است. همان‌طور که پیشتر بیان شد نمونه‌های کشش با استفاده از روش وایرکات تهیه شدند. در شکل 4 سطح مقطع جوش نمونه‌های مختلف جدول 2 برحسب شماره نمونه‌ها ارائه شده است. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود سطح مقطع کلیه نمونه‌ها عاری از ترک و عیوب چون عدم پرشدگی است.

در شکل 5 میکروساختار مربوط به ناحیه جوش نمونه‌های 1 و 2 از جدول 2 (نمونه‌های جوشکاری شده در دو حالت بدون ارتعاش و با ارتعاش) و همچنین فلز پایه نمایش داده شده است. در شکل 5 مشاهده می‌شود که

جدول 1 ترکیب شیمیایی ورق آلومینیوم مورد استفاده (درصد وزنی)

Table 1 Chemical composition of the studied aluminum alloy (Wt. %)

سایر	آهن	روی	منگنز	مس	سیلیسیم	کروم	منیزیم	آلومینیوم
0.15	0.35	0.1	0.1	0.1	0.2	0.25	2.6	96.15

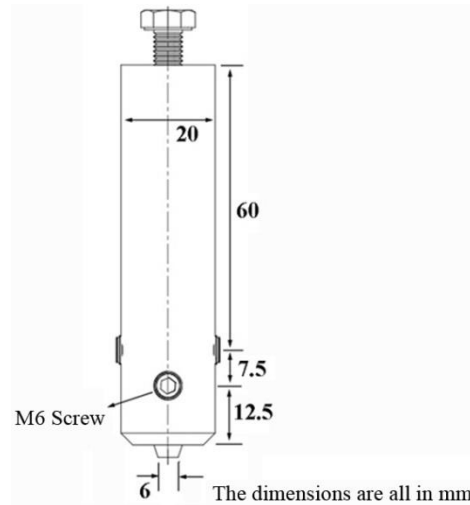


Fig. 1 Schematic design of tool used for FSW and FSWV processes

شکل 1 مهندس و شکل شماتیک ابزار مورد استفاده جهت انجام جوشکاری اصطکاکی ارتعاشی و اغتشاشی

مقادیر مناسب متغیرهای جوشکاری اصطکاکی ارتعاشی شامل سرعت حرکت طولی ابزار، سرعت حرکت چرخشی ابزار و زاویه انحراف ابزار به گونه‌ای انتخاب شدند که جوشی عاری از عیوب و با شکل ظاهری مناسب ایجاد شود. اطلاعات بیشتر در مورد فرآیند انتخاب مقادیر در مرجع [15] اشاره شده است. در جدول 2 مقادیر متغیرهای جوشکاری برای حالات مختلف جوشکاری نمایش داده شده است. فرکانس ارتعاش در تمامی حالات 33 هرتز بود.

پس از انجام جوشکاری نمونه‌ها از لحاظ میکروساختار خواص مکانیکی و شکل‌پذیری با یکدیگر مقایسه شدند. جهت بررسی میکروساختار از روش متالوگرافی استفاده شد. قطعات در راستای عمود بر خط جوش مقطع زده شده و نمونه‌های متالوگرافی از مقطع تهیه شد. نمونه‌ها مانع سرد شدند و سپس عملیات سنباده‌زنی، پولیش و اچ بر آن‌ها صورت گرفت. محلول اچ

جدول 2 مقادیر متغیرهای جوشکاری برای حالات مختلف جوشکاری

Table 2 Welding parameters values for different welding conditions

فرآیند	شماره نمونه	لرزش	سرعت چرخش (rpm)	سرعت حرکت طولی (mm/min)
بررسی اثر لرزش	1	-	1200	20
	2	+	1200	20
بررسی اثر سرعت حرکت طولی ابزار	3	+	700	16
	4	+	700	25
	5	+	700	31.5
بررسی اثر سرعت چرخشی ابزار	6	+	700	25
	7	+	900	25
	8	+	1200	25

(- denotes FSW process and + indicates FSWV process)

(- معرف انجام جوشکاری بدون حضور ارتعاش (FSW) و + معرف انجام جوشکاری با حضور ارتعاش (FSWV) است.)



Fig. 4 Weld cross-section of all studied samples (samples of Table 2)

شکل 4 سطح مقطع جوش کلیه نمونه‌های مطالعه شده (نمونه‌های جدول 2)

طی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی به دلیل ارتعاش قطعه کار، مواد در ناحیه اغتشاش کرنش بیشتری نسبت به آن مواد در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی می‌یابند. از آنجا که طبق یافته‌های محققین نسبت مستقیمی میان کرنش و چگالی ناهنجاری‌های ماده کرنش یافته وجود دارد [21]، پیش‌بینی می‌شود که چگالی ناهنجاری‌ها در ناحیه اغتشاش قطعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده بیشتر از تعداد آن در ناحیه اغتشاش دیگر قطعه جوشکاری شده باشد و بنابراین طی فرآیند تبلور مجدد دینامیکی، مرزهای با زاویه زیاد بیشتری تشکیل شده و منطقه جوش با اندازه دانه کوچک‌تری تشکیل گردد. همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود حضور ارتعاش سبب کاهش اندازه دانه ناحیه اغتشاش در قطعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده، گردیده است.

در شکل 7 تصویر نمونه‌های آزمون کشش تهیه شده از دو نمونه جوشکاری شده در حالت بدون ارتعاش و با ارتعاش (نمونه‌های 1 و 2 از جدول 2) پس از شکست و در شکل 8 خواص مکانیکی این دو نمونه نمایش داده شده است. در شکل 7 ملاحظه می‌شود که شکست هر دو نمونه در ناحیه جوش رخ داده است، اگرچه سطح شکست نمونه 2 تغییر شکل پلاستیک زیادتری از خود نشان می‌دهد.

در شکل 8 مشاهده می‌شود که نمونه جوشکاری شده با روش اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی (FSVW) استحکام نهایی کشش و درصد افزایش طول بیشتری (به ترتیب در حدود 12% و 30%) نسبت به نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده (FSW) دارد. دلیل این موضوع را می‌توان به اندازه دانه کوچک‌تر نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده نسبت داد. طبق رابطه هال-پیچ  $(\sigma = \sigma_i + kd^{-1/2})$  [22]، استحکام ( $\sigma$ ) با معکوس مجذور اندازه دانه ( $d$ ) رابطه مستقیم دارد و با کاهش اندازه دانه استحکام افزایش می‌یابد (در رابطه اشاره شده  $\sigma_i$  تنش اصطکاکی و  $k$  ضریب است). در واقع با

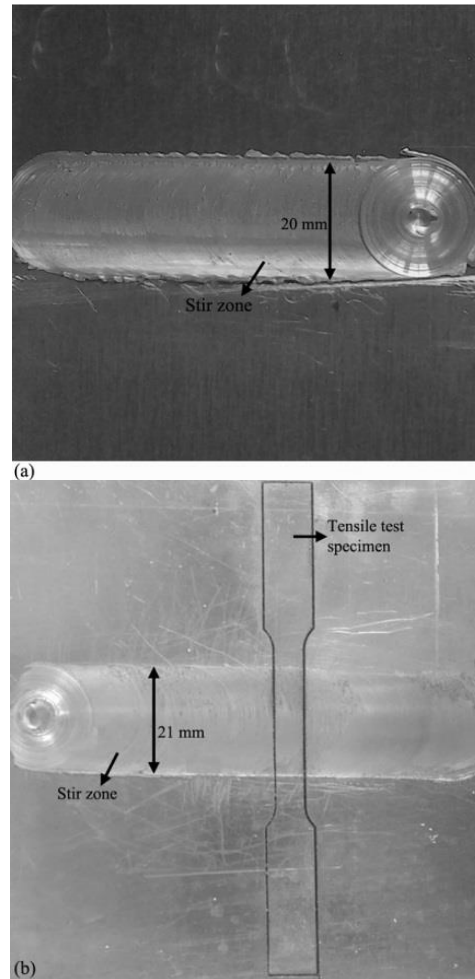


Fig. 3 Pictures of (a) friction stir welded (sample 1 of Table 2) and (b) friction stir vibration welded (sample 8 of Table 2) specimens

شکل 3 تصاویر مربوط به نمونه‌های الف- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده (نمونه 1 از جدول 2)، ب- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده (نمونه 8 از جدول 2)

برای هر دو نمونه جوشکاری شده، اندازه دانه در ناحیه جوش کمتر از مقدار آن در فلز پایه است، همچنین در مقایسه شکل a-5 و b-5 دریافت می‌شود که اندازه دانه در ناحیه جوش نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده (شکل b-5) کوچکتر از مقدار آن در نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده (شکل a-5) است.

مقادیر اندازه‌گیری شده اندازه دانه برای نمونه‌های اشاره شده (نمونه‌های 1 و 2 از جدول 2 و همچنین فلز پایه، در شکل 6 ارائه شده است. دلیل کاهش اندازه دانه در ناحیه جوش و همچنین کاهش بیشتر اندازه دانه ناحیه جوش ضمن حضور ارتعاش را می‌توان به اثر تبلور مجدد دینامیکی نسبت داد. محققین دریافته‌اند که مهم‌ترین عامل کاهش اندازه دانه طی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، تبلور مجدد دینامیکی است [8,3]. طی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، فلز در ناحیه جوش تحت تغییر شکل پلاستیک شدید قرار می‌گیرد و بنابراین چگالی ناهنجاری‌ها در ناحیه اغتشاش به شدت افزایش می‌یابد [3]. به دلیل دمای بالای فرآیند ناهنجاری‌ها در ساختار به جهت کاهش انرژی آزاد ماده، تشکیل مرزهای فرعی با زاویه کم (کمتر از  $15^\circ$ ) می‌دهند. مرزهای فرعی با افزایش مقدار تغییر شکل به مرزهای با زاویه زیاد تبدیل می‌شوند و در نتیجه مرز دانه‌های جدید در درون دانه اولیه شکل می‌گیرد و ساختار ریزدانه می‌شود [20,19].



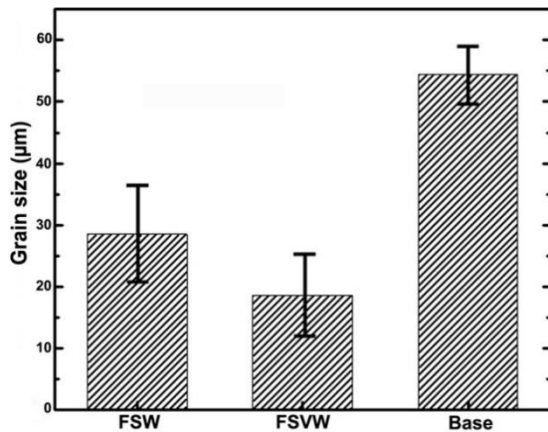


Fig. 6 Weld region grain size of FS and FSV welded samples (samples 1 and 2 of Table 2) as well as base material

شکل 6 مقادیر اندازه دانه ناحیه جوش مربوط به نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و اصطکاکی ارتعاشی شده (به ترتیب نمونه‌های 1 و 2 از جدول 2) و همچنین فلز پایه



Fig. 7 Tensile test samples after fracture (sample 1 and 2 of Table 2)

شکل 7 نمونه‌های آزمون کشش پس از شکست (نمونه‌های 1 و 2 از جدول 2)

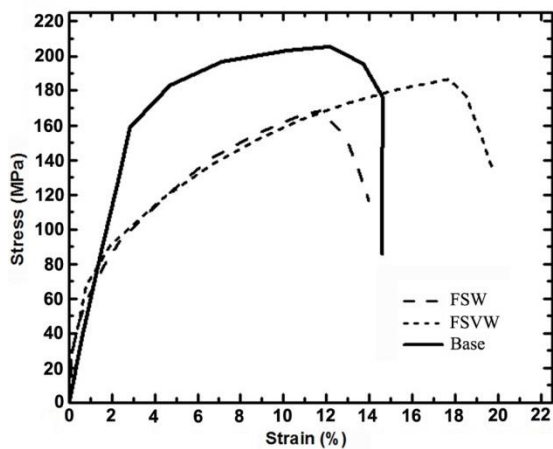


Fig. 8 Engineering stress-strain curves of samples 1 and 2 (Table 2) and base material

شکل 8 منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به نمونه‌های 1 و 2 (جدول 2) و فلز پایه

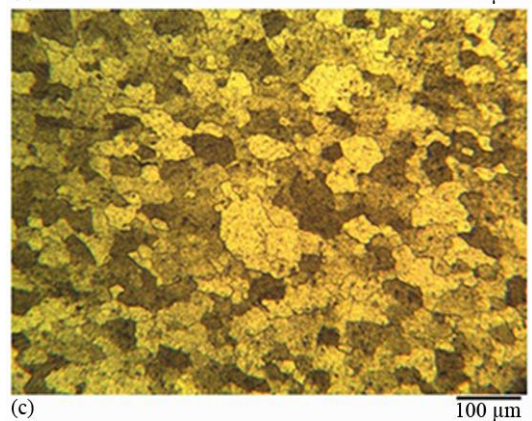
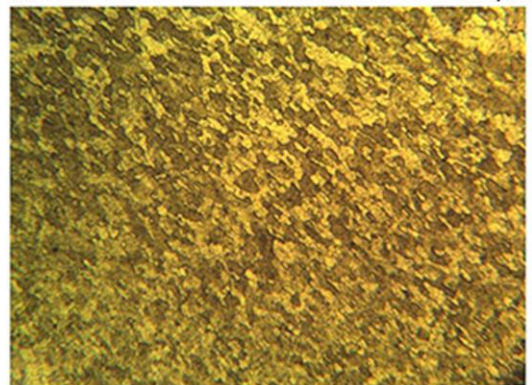
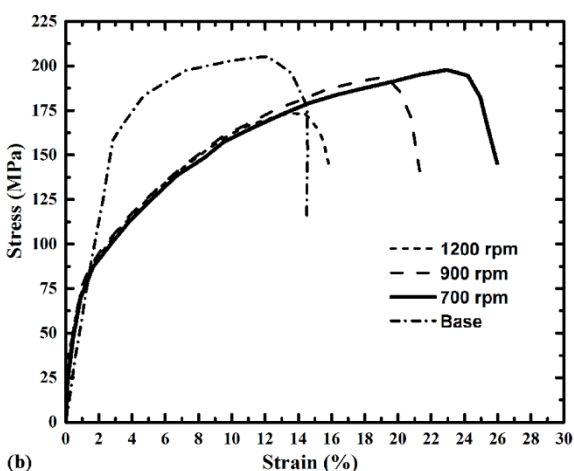
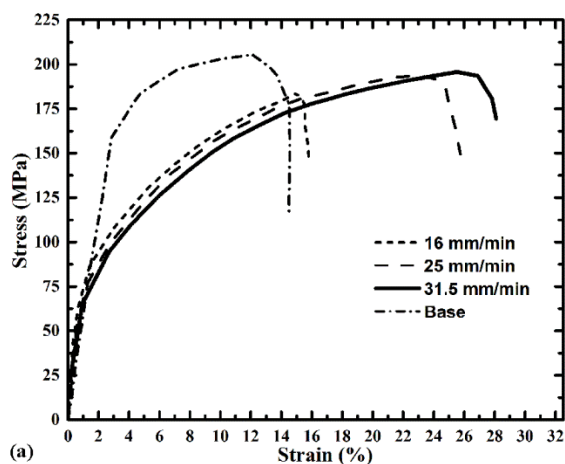


Fig. 5 Weld region microstructures of samples a) 1, b) 2 (Table 2) and c) base material

شکل 5 میکروساختار مربوط به نواحی جوش نمونه‌های الف-1، ب-2 (جدول 2) و ج- ماده پایه

کاهش اندازه دانه جزء حجمی مرزدانه‌ها افزایش می‌یابد و از آنجا که مرزدانه‌ها به‌عنوان سدی در برابر حرکت ناب‌جایی‌ها عمل می‌کند، با کاهش اندازه دانه استحکام افزایش می‌یابد [22,21]. با توجه به موارد بیان شده، می‌توان دریافت که با انجام جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی و کاهش اندازه دانه در ناحیه اغتشاش از آنجا که خواص مکانیکی ناحیه اغتشاش بهبود می‌یابد؛ بنابراین استحکام و درصد افزایش طول نمونه جوشکاری‌شده نیز افزایش می‌یابد.

اگرچه در رابطه با کاهش اندازه دانه و اثر آن بر افزایش استحکام، محققین اجماع نظر دارند، ولی در رابطه با تغییرات افزایش طول در آزمون کشش برحسب تغییرات اندازه دانه، نظر واحدی وجود ندارد. نتایج نشان داده در شکل 8 نشان می‌دهد که در این تحقیق با کاهش اندازه دانه در ناحیه



**Fig. 10** Engineering stress-strain curves of base material and different FSV welded specimens, a) change of transverse speed (samples 3,4 and 5 of Table 2) and b) change of rotation speed (samples 6, 7 and 8 of Table 2)

شکل 10 منحنی تنش-کرنش مهندسی مربوط به فلز پایه و نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده در حالات مختلف جوشکاری، الف- تغییر سرعت حرکت طولی ابزار (نمونه‌های 3-5 از جدول 2)، ب- تغییر سرعت چرخشی ابزار (نمونه‌های 6-8 از جدول 2)

اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده تحت سرعت‌های مختلف طولی ابزار و در شکل 12، ریزساختار ناحیه جوش مربوط به نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده تحت سرعت‌های مختلف چرخشی ابزار نمایش داده شده است. در شکل‌های 11 و 12 مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت حرکت طولی ابزار، اندازه دانه در ناحیه جوش کاهش و با افزایش سرعت چرخش ابزار، اندازه دانه در ناحیه جوش افزایش یافته است.

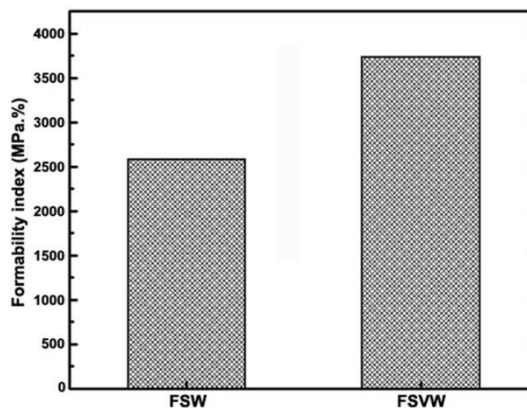
دلیل این موضوع را می‌توان به اثرات گرمای ایجاد شده در تماس شانه ابزار با قطعه کار نسبت داد. عباسی و همکاران [28] با شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و بررسی تغییرات دما در این فرآیند دریافتند که با افزایش سرعت چرخش ابزار و کاهش سرعت حرکت طولی آن گرمای بیشتری در ناحیه جوش ضمن جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی تولید می‌شود. گرمای زیاد تولیدشده در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی ضمن افزایش سرعت چرخش و کاهش حرکت طولی ابزار سبب رشد دانه در ناحیه جوش می‌شود که با مشاهدات نمایش داده شده در شکل 11 و 12 مطابقت دارد. همان‌طور که پیشتر نیز بیان شد با افزایش اندازه دانه در ناحیه

جوشکاری، مقدار درصد افزایش طول افزایش یافته است. براساس نتایج ارائه شده در منابع، علت این موضوع را می‌توان به دو موضوع یکی افزایش تعداد نابه‌جایی‌های مرزی با افزایش جزء حجمی مرزدانه‌ها [23] و دیگر ممانعت بیشتر مرزدانه‌ها از رشد ترک در مواد ریز دانه [24] دانست. مرزدانه‌ها محل انباشت نابه‌جایی‌های ضروری به لحاظ هندسی<sup>1</sup> (GNDs) است. از آن‌جا که با افزایش تعداد نابه‌جایی‌ها، امکان تغییر شکل پلاستیک افزایش می‌یابد، انتظار می‌رود که با کاهش اندازه دانه، تغییر طول ناشی از کشش افزایش یابد [25]، همچنین نتایج بررسی‌ها نشان داده است که با کاهش اندازه دانه به دلیل تغییر مکانیزم شکست از مرزدانه‌ای به فرادانه‌ای، درصد افزایش طول افزایش می‌یابد [26].

در شکل 9 مقادیر اندیس شکل‌پذیری مربوط به نمونه‌های جوشکاری شده در دو حالت بدون ارتعاش و با ارتعاش (به ترتیب نمونه‌های 1 و 2 از جدول 2) نمایش داده شده است. اندیس شکل‌پذیری معرف میزان جذب انرژی پیش از شکست است و با رابطه  $UTS \times EL$  نمایانده می‌شود که برابر حاصل‌ضرب استحکام نهایی کشش (UTS) و درصد افزایش طول (EL) است [27]. در شکل 9 مشاهده می‌شود که اندیس شکل‌پذیری نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده بیشتر از نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده است. این موضوع با مشاهدات پیشین مبنی بر افزایش استحکام و درصد افزایش طول با کاهش اندازه دانه مطابقت دارد؛ بنابراین می‌توان دریافت که نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده نسبت به نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده، پیش از شکست انرژی بیشتری را جذب می‌کند و به عبارت دیگر چقرمگی شکست بیشتری دارد.

در شکل 10-a، اثر تغییر سرعت حرکت طولی (نمونه‌های 3-5 از جدول 2) و در شکل 10-b، اثر تغییر سرعت حرکت چرخشی ابزار (نمونه‌های 6-8 از جدول 2) بر خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده به همراه منحنی تنش-کرنش فلز پایه نمایش داده شده است. در شکل 10 مشاهده می‌شود که استحکام فلز پایه بیش از نمونه‌های جوشکاری شده و درصد افزایش طول آن کمتر از نمونه‌های جوشکاری شده است. با توجه به شکل 10 مشاهده می‌شود که افزایش سرعت چرخشی و همچنین کاهش سرعت طولی ابزار سبب کاهش استحکام و درصد افزایش طول شده است. دلیل این موضوع را می‌توان به اثر اندازه دانه نسبت داد.

در شکل 11 ریزساختار ناحیه جوش مربوط به نمونه‌های جوشکاری

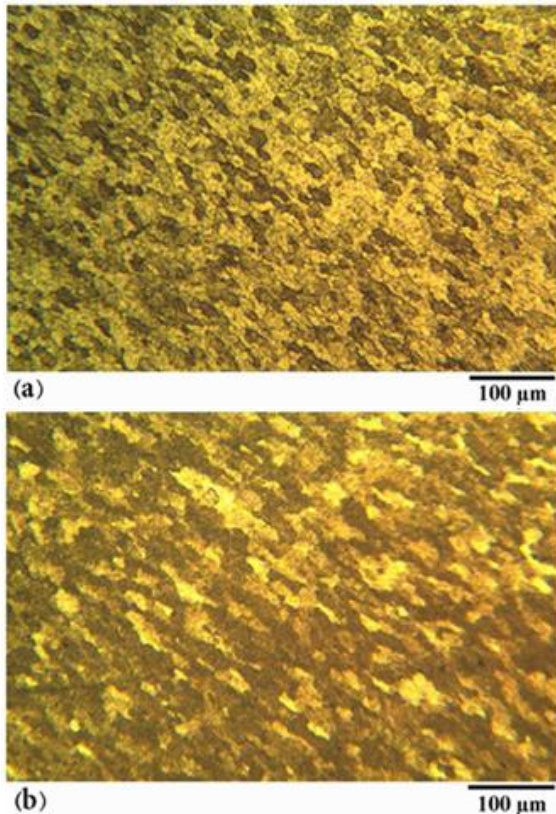


**Fig. 9** Formability indexes of samples 1 and 2 (Table 2)

شکل 9 اندیس شکل‌پذیری مربوط به نمونه‌های 1 و 2 (جدول 2)

<sup>1</sup> Geometrically necessary dislocations





**Fig. 12** Weld region microstructures of FSV welded specimens under different rotation speeds; a) 700 rpm (sample 6 of Table 2) and b) 900 rpm (sample 8 of Table 2)

شکل 12 ریزساختار مربوط به نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده تحت شرایط سرعت چرخش متفاوت، الف- 700 rpm (نمونه 6 از جدول 2) و ب- 900 rpm (نمونه 8 از جدول 2)

### 5- مراجع

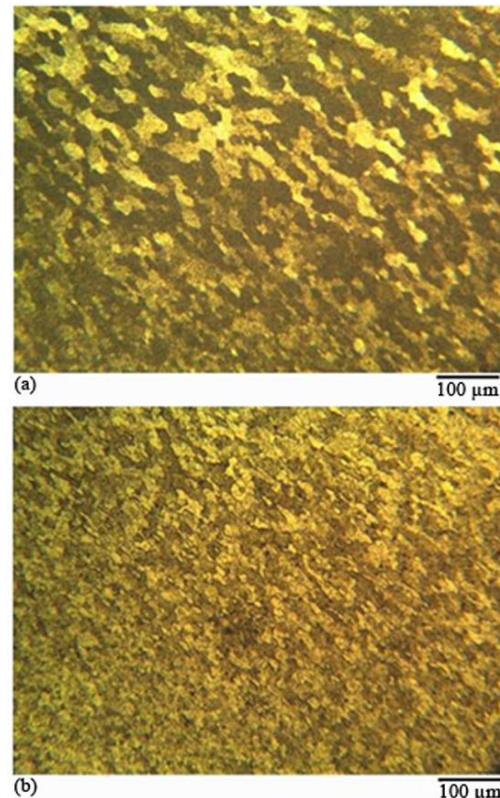
- [1] G. Çam, Friction stir welded structural materials: beyond Al alloys, *International Materials Reviews*, Vol. 56, No. 1, pp. 1-48, 2011.
- [2] H. Rostami, S. Nourouzi, H. Jamshidi Aval, The investigation of structure and mechanical properties Dissimilar joining of aluminum 5052 sheet to titanium alloy by friction stir welding, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 187-195, 2016. (in Persian فارسی)
- [3] R.S. Mishra, Z. Y. Ma, Friction stir welding and processing, *Materials Science and Engineering: R*, Vol. 50, No. 1-2, pp. 1-78, 2005.
- [4] A. Rastegar, D. Ghahremani Moghaddam, Kh. Farhangdoost, M. Tahani, Numerical and experimental investigation of welding speed effect on fatigue crack growth in friction stir welded 2024-T351 aluminum alloy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 91-100, 2016. (in Persian فارسی)
- [5] R. Keivani, B. Bagheri, F. Sharifi, M. Ketabchi, M. Abbasi, Effects of pin angle and preheating on temperature distribution during friction stir welding operation, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, No. 9, pp. 2708-2713, 2013.
- [6] M.M. Moradi, H. Jamshidi Aval, R. Jamaati, Experimental investigation on the effect of friction stir welding process parameters in dissimilar joining of AA2024-T351 and AA6061-T6 aluminum alloys, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, pp. 392-402, 2016. (in Persian فارسی)
- [7] M. K. Besharati-Givi, P. Asadi, *Advances in friction-stir welding and processing*, pp. 43-54, USA: Woodhead Publishing, 2014.
- [8] J. K. Paik, Mechanical properties of friction stir welded aluminum alloys 5083 and 5383, *Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 39-49, 2009.
- [9] A.L. Etter, T. Baudin, N. Fredj, R. Penelle, Recrystallization mechanisms in 5251 H14 and 5251 O aluminum friction stir welds, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 445-446, No. 2, pp. 94-99, 2007.
- [10] F. Heirani, A. Abbasi, M. Ardestani, Effects of processing on microstructure and mechanical behaviors of underwater friction stir welding of Al5083 alloy, *Manufacturing Processes*, Vol. 25, No. 2, pp. 77-84, 2017.
- [11] S. Fouladi, M. Abbasi, The effect of friction stir vibration welding process on characteristics of SiO<sub>2</sub> incorporated joint, *Materials Processing Technology*, Vol. 243, No. 5, pp. 23-30, 2017.

اغتشاش براساس رابطه هال- پیچ [22] استحکام ناحیه اغتشاش و به طبع آن استحکام نمونه جوشکاری شده کاهش می‌یابد. این موضوع با نتایج ارائه شده در شکل 10 مطابقت دارد.

### 4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق روشی نوین برای بهسازی فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی معرفی شد. روش معرفی شده مبتنی بر ارتعاش قطعات اتصال یابنده در راستای عمود بر خط جوش در حین جوشکاری اصطکاکی ارتعاشی است. این روش که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نامیده شد سبب کاهش اندازه دانه در ناحیه جوش به میزان 30% در مقایسه با اندازه دانه در ناحیه جوش قطعه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شد. نتایج همچنین نشان داد که:

- 1- استحکام و درصد افزایش طول نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده به ترتیب 12% و 30% بیشتر از مقادیر آن‌ها در مورد نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده بود.
- 2- با افزایش سرعت چرخشی و کاهش سرعت حرکت طولی ابزار در حین فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی، اندازه دانه در ناحیه جوش افزایش و مقادیر استحکام و درصد افزایش طول نمونه‌های جوشکاری شده کاهش یافت.
- 3- جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی معرفی شده با وجود کم هزینه بودن و سهولت در اجراء روشی مناسب جهت بهسازی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. استفاده از این روش جهت جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم در صنایع توصیه می‌شود.



**Fig. 11** Weld region microstructures of FSV welded specimens under different transverse speeds; a- 16 mm/min (sample 3 of Table 2) and b- 31.5 mm/min (sample 5 of Table 2)

شکل 11 ریزساختار مربوط به نمونه‌های جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ارتعاشی شده تحت شرایط سرعت حرکت طولی ابزار متفاوت، الف- 16 mm/min (نمونه 3 از جدول 2) و ب- 31.5 mm/min (نمونه 5 از جدول 2)

- recrystallization in an Al-Li-Mg-Sc alloy during equal-channel angular extrusion, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 396, No. 1-2, pp. 341-351, 2005.
- [21] G.E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, pp. 215-225, Singapore: McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [22] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering: an Introduction*, pp. 149-152, USA: Wiley, 2007.
- [23] P. Schempp, C. E. Cross, R. Hacker, A. Pittner, M. Rethmeier, Influence of grain size on mechanical properties of aluminium GTA weld metal, *Weld World*, Vol. 57, No. 3, pp. 293-304, 2013.
- [24] P. S. De, R. S. Mishra, C. B. Smith, Effect of microstructure on fatigue life and fracture morphology in an aluminum alloy, *Scripta Materialia*, Vol. 60, No. 7, pp. 500-503, 2009.
- [25] S. X. Li, G. R. Cui, Dependence of strength, elongation and toughness on grain size in metallic structural materials, *Applied Physics*, Vol. 101, No. 4, pp. 1-6, 2007.
- [26] Y. Z. Estrin, P. A. Zabrodin, I. S. Braude, T. V. Grigorova, N. V. Iasev, V. V. Pustovalov, V. S. Fomenko, S. E. Shumilin, Low temperature plastic deformation of AZ31 magnesium alloy with different microstructures, *Low Temperature Physics*, Vol. 36, No. 12, pp. 1100-1112, 2010.
- [27] M. Naderi, M. Abbasi, A. Saeed-Akbari, Enhanced mechanical properties of a hot-stamped advanced high-strength steel via tempering treatment, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 44, No. 4, pp. 1852-1861, 2013.
- [28] M. Abbasi, B. Bagheri, R. Keivani, Thermal analysis of friction stir welding process and investigation into affective parameters using simulation, *Mechanical Science and Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 861-866, 2015.
- [12] M. Cabibbo, A. Forcellese, M. Simoncini, M. Peralisi, D. Ciccarelli, Effect of welding motion and pre/post-annealing of friction stir welded AA5754 joints, *Materials Design*, DOI: 10.1066/j.matdes.2015.12.099.
- [13] S.L. Campanelli, G. Casalino, C. Casavola, V. Moramarco, Analysis and comparison of friction stir welding and laser assisted friction stir welding of aluminum alloy, *Materials*, Vol. 6, No. 12, pp. 5923-5941, 2013.
- [14] M. Pitschman, J. W. Dolecki, G. W. Johns, J. Zhou, J. T. Roth, Application of electric current in friction stir welding, *Proceedings of the ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, October 12-15, Pennsylvania, USA, 2010.
- [15] S. Amini, M. R. Amiri, Study of ultrasonic vibrations' effect on friction stir welding, *Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, No. 1, pp. 127-135, 2014.
- [16] M. Rahmi, *Vibration effect on microstructure and mechanical properties of aluminum weld obtained using friction stir welding*, M. Sc. Thesis, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, 2016. (in Persian فارسی)
- [17] ASTM-E112-13, Standard test methods for determining average grain size, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2013.
- [18] ASTM-E8M, Standard test methods of tension testing of metallic materials [metric], *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 3.01, American Society for Testing and Materials, USA, 2003.
- [19] M. Sarkari Khorrami, M. Kazeminezhad, A. H. Kokabi, Mechanical properties of severely plastic deformation aluminum sheets joined by friction stir welding, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 543, No. 5, pp. 243-248, 2012.
- [20] R. Kaibyshev, K. Shipilova, F. Musin, Y. Motohashi, Continuous dynamic