مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1393، دوره 14، شماره 12، ص‌ص 85-90

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# بررسی اثر استفاده از نانو ذرات آلومینا بر ریز ساختار و خواص مکانیکی حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پیوسته چند پاسه آلومینیوم T6-2024

محمد نظری[1]، محمد کاظم بشارتی گیوی[2*]، محمد رضا فراهانی[3]، جواد ملائی میلانی[4]، حسن محمدزاده جمالیان[5]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تهران، تهران
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران
4- دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، سهند
5- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تهران، تهران
*تهران، صندوق پستی 1915656646، bgivi@ut.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 27 فروردین 1393
پذیرش: 16 خرداد 1393
ارائه در سایت: 09 مهر 1393

*کلید واژگان:*
جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
استحکام کششی نهایی
میکرو سختی
ذرات نانو آلومینا
اندازه دانه

**چکیده**

هدف از این تحقیق بررسی اثر تعداد پاس بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پیوسته لب به لب آلومینیوم 2024 با افزودن ذرات نانو آلومینا در درز جوشکاری است. ترکیبی از سرعت دورانی و سرعت پیشروی بر روی نمونه‌ها اعمال شده است. نمونه بهینه با توجه به عدم وجود عیوب ظاهری و متالورژیکی در ریز ساختار و با توجه به بیشترین استحکام کششی نهایی انتخاب شد و ریز ساختارهای حاصل با استفاده از میکروسکوپ نوری و سطح شکست نمونه ورق خام و نمونه بهینه حکاکی شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل بیانگر آن است که در جوشکاری با سرعت دورانی 1400 دور بر دقیقه و پیشروی 16 میلی متر بر دقیقه در دو پاس جوشکاری پیوسته استحکام کششی نهایی نسبت به نمونه عاری از ذرات تقویتی نانو آلومینا بهبود یافته ولی با افزایش تعداد پاس جوشکاری استحکام کششی نهایی کمتر از استحکام نمونه بدون پودر شد. میانگین سختی در ناحیه هم‌خورده جوش در نمونه جوشکاری شده با پودر نسبت به نمونه جوشکاری شده بدون پودر افزایش یافت، ولی افزایش تعداد پاس جوشکاری تاثیر چشمگیری بر افزایش میانگین سختی در ناحیه هم‌خورده نداشت. اندازه دانه نیز تا پاس دوم جوشکاری کاهش یافت و پس از آن با افزایش تعداد پاس جوشکاری در اندازه دانه تغییر چشمگیری مشاهده نشده است.

# Investigation on the effects of using Nano-size Al2O3 powder on the mechanical and microstructural in the multi-passes continuous friction stir welding of the 2024-T6

Mohammad Nazari[1], Mohammad Kazem Besharati Givi[1*], Mohammad Reza Farahani[1], Javad Mollaei Milani[2], Hasan Mohammadzaeh Jamaliyan[1]

1- Department of Mechanical Engineering, Tehran University, Tehran, Iran.
2- Department of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran
*P.O.B. 1915656646 Tehran, Iran, bgivi@ut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 16 April 2014
Accepted 06 June 2014
Available Online 01 October 2014

*Keywords:*
Friction Stir Welding
Ultimate Tensile Strength
Micro-Hardness
Nano-Size $Al_2O_3$
Grain Size

ABSTRACT

The main aim of this experiment is to investigate the effects of Nano-size $Al_2O_3$ on the mechanical properties and microstructure of multi-passes friction stir welding of Al 2024 lap joint. Nano particles were added into the joint line. A combination of rotational speed and travelling speeds were performed. Optical microscopy and scanning electron microscope were used to investigate the microstructure and fracture surface of samples respectively. Optimum condition (sample) was selected due to highest ultimate tensile strength (UTS). It was seen that sample which included Nano particles and fabricated by 1400 rev/min rotational speed and 16 mm/min travelling speed in second pass of continues welding had improvement in UTS in comparison to one pass welded sample of particle free and after that increasing the number of passes reduce the UTS. The average micro hardness of the sample which was particle rich were increased in comparison to particle free sample in nugget zone. Increasing the number of passes was not effect average micro hardness in nugget zone significantly. Grain sizes were reduced by 2 passes welding and after that no significant reduction has been seen.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M. Nazari, M. K. Besharati Givi, M. R. Farahani, J. Mollaei Milani, H. Mohammadzaeh Jamaliyan, Investigation on the effects of using Nano-size Al2O3 powder on the mechanical and microstructural in the multi-passes continuous friction stir welding of the 2024-T6, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 12, pp. 85-90, 2014 (In Persian)

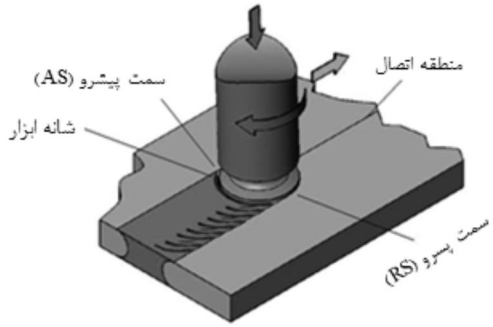
[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.1.2 ]

## 1- معرفی

آلیاژهای آلومینیوم با نسبت استحکام به وزن بالا، فرم‌پذیری و مقاومت در برابر خوردگی بالا، کاربرد فراوانی در صنایع هوافضا، کشتی‌سازی و صنایع ریلی دارد. با رشد مصرف آلومینیوم در صنایع مختلف، اتصال آلیاژهای آلومینیوم بیش از پیش اهمیت می‌یابد. از سویی دیگر در چندین سال اخیر استفاده از روش‌های جوشکاری حالت جامد آلیاژهای فلزی به ویژه آلومینیوم رشد چشمگیری یافته است. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[1] یکی از روش‌های جوشکاری در حالت جامد است که برای جوشکاری آلیاژهای فلزی به‌طور عمده آلومینیوم و منیزیم به‌کار می‌رود. این فرآیند، در سال 1991، توسط موسسه جوش TWI انگلستان ابداع شد[1]. اصول این روش جوشکاری بدین صورت است که یک ابزار غیرمصرفی دوار استوانه‌ای شکل متشکل از دو قسمت پین و شانه ابزار با سرعت دورانی مناسب وارد فصل مشترک بین دو قطعه شده و حرارت ناشی از اصطکاک بین ابزار و قطعات تغییر شکل مواد را به دنبال دارد. با پیشروی ابزار، اتصال دو نمونه به یکدیگر صورت می‌گیرد. نمای کلی فرآیند در شکل 1 نشان داده شده است.

در جوشکاری ذوبی آلیاژهای آلومینیوم، عیوبی نظیر تخلخل، آخال در سرباره و ترک انجمادی کیفیت و خواص اتصال را پایین می‌آورد. از طرف دیگر ساخت کامپوزیت آلومینیومی با روش‌های ذوبی در محل اتصال دو ورق آلومینیوم و تولید کامپوزیت پایه فلزی عیوبی را به‌همراه خواهد داشت که این اشکلات مرتبط با جوشکاری ذوبی است و عبارت‌اند از: واکنش ناخواسته بین فلز زمینه ذوب شده و پودر نانو، جدایش ذرات در حین سرد شدن و جذب گاز[3]. برخلاف جوشکاری ذوبی در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ماده اولیه ذوب نخواهد شد و ریخته‌ری مجدد رخ نخواهد داد به عبارت دیگر این جوشکاری یک جوشکاری حالت جامد است[4]. آلیاژ هایی با استحکام بالا از آلومینیوم نظیر 7075 توسط عبدالحمید عزیزی و همکارانش[5] به این روش جوشکاری شدند و موفق شدند راندمان بالایی از اتصال را ایجاد کنند. اخیرا، کامپوزیت‌هایی نظیر $7005/Al_2O_3/10p$ توسط این روش جوشکاری شدند[6]. در سال‌های اخیر، روش دیگری توسط میشرا و همکارانش اختراع شد که فراوری اصطکاکی اغتشاشی[2] نام گرفت. این روش برگرفته از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است و برای تولید کامپوزیت سطحی نانو، میکرو و همچنین بهبود ریز ساختار به‌کار گرفته می‌شود[7]. تحقیقات زیادی در زمینه تاثیر فرایند FSP بر توزیع ذرات تقویتی انجام شده است و نتایج بیانگر آن است که افزایش تعداد پاس موجب بهبود توزیع ذرات پودر تقویت‌کننده در زمینه ماده می‌شود[8]. شفیعی زرقانی و همکارانش[9] ذرات نانو آلومینا را به‌عنوان تقویت‌کننده برای تولید کامپوزیت سطحی آلومینیوم




**شکل 1** طرحواره فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[2]

1- Friction Stir Welding (FSW)
2- Friction Stir Processing (FSP)

6082 به روش FSP به‌کار گرفتند و گزارشی مبنی بر ایجاد اتصال مناسبی بین ذرات نانو و زمینه فلزی منتشر کردند. بوری و همکارانش[10] نشان دادند که با انجام دو پاس FSP اندازه ذرات در ناحیه جوش از میانگین 10 میکرون به 3 میکرون کاهش می‌یابد. بهرامی و همکارانش[11] از هر دو مزیت FSW و FSP در کنار هم استفاده کردند و با کمک پودر نانو استحکام نهایی شکست و همچنین درصد ازدیاد طول را بهبود دادند. در این تحقیق ابتدا شرایط بهینه به‌منظور ایجاد جوش سالم در حضور پودر نانو مورد بررسی قرار گرفته است و سپس جوش بدون حضور ذرات نانو بر روی ورق خام با همان پارامترهای ثابت فرایند، انجام شده است و بعد از آن با حضور پودر نانو آلومینا به‌عنوان تقویت‌کننده در درز ناحیه اتصال در چند پاس جوشکاری انجام شده است.

## 2- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق، از نمونه‌هایی با ضخامت 4 میلیمتر از آلومینیوم آلیاژی 2024 T6 است که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1 ارائه شده است. پودر نانو آلومینا مورد استفاده در این تحقیق ساخت کشور آلمان با خلوص 99% است. ورق‌ها به ابعاد 120×50 میلی متر از ورق خام بریده و ماشینکاری شدند و جهت اعمال پودر در درز جوش شیاری در امتداد طول در یک سمت قطعه ایجاد شد که با قرار گرفتن دو قطعه با شیار مشابه در کنار هم شیار مربعی کامل ایجاد شود. ابعاد شیار در شکل 2 قابل مشاهده است. داخل شیار با پودر نانو آلومینا به‌صورت فشرده پر شد. فاصله مرکز شیار از سطح بالا نصف فاصله آن از پایین قطعه است، چون اغتشاش در بالای قطعه بیشتر بود و توزیع بهتری از پودر نانو را فراهم می‌ساخت. ابزار جوشکاری مورد استفاده در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دارای پین مربعی به قطر 6 میلیمتر و با ارتفاع 3/7 میلی متر است که شانه ابزار 16 میلیمتر بوده و ابزار از جنس فولاد گرم‌کار است که در شکل 3 نشان داده شده است. به‌منظور تسهیل جریان مواد تقعر شانه به میزان 6 درجه در نظر گرفته شده است و برای جوشکاری از یک ماشین فرز عمودی استفاده شد. در تمامی جوشکاری‌ها زاویه ابزار نسبت به راستای عمود بر خط جوش 3 درجه درنظر گرفته شد. جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در محل اتصال با سرعت دورانی 1400 در سرعت‌های پیشروی 16 و 31/5 و 40 میلی متر بر دقیقه انجام شد تا سرعت پیشروی که در آن جوش بی‌عیب تولید شود به‌دست بیاید. پارامتر نمونه‌ای که بیشترین استحکام کششی را داشت به‌عنوان پارامتر بهینه انتخاب شد. نمونه تست کشش مطابق استاندارد ASTM-E08 عمود بر مسیر جوشکاری به‌طور متقارن با وایر کات برش داده شد. تست کشش به‌وسیله دستگاه SANTAM–STM 50 با ظرفیت 5 تن انجام شد. این آزمایش در دمای اتاق و با سرعت 1 میلیمتر بر دقیقه و نرخ کرنش آن 0/001 میلی متر بر دقیقه بود. در آماده‌سازی نمونه‌های تست کشش در مقطع عرضی به گونه‌ای برش انجام شد که جوش در وسط نمونه قرار بگیرد. به‌علت نفوذ ابزار در ناحیه جوش مقداری عرض نمونه کمتر بود که موجب ایجاد تمرکز تنش در نمونه می‌شد. لذا، برای جلوگیری از این مشکل قبل از انجام تست کشش نمونه‌ها با سنباده صاف شدند. چون نمونه با پیشروی 16 میلی متر بر دقیقه استحکام بیشتری داشت. بنابراین، با انتخاب سرعت پیشروی 16 میلی متر بر دقیقه به‌عنوان سرعت پیشروی ثابت در سه حالت یک‌پاس و دوپاس و چهارپاس جوشکاری انجام شد. پاس‌های جوشکاری پیوسته هستند. خواص مکانیکی و متالورژیکی آن‌ها با نمونه بدون پودر و تک پاسه با همان سرعت دورانی و سرعت پیشروی مقایسه شده است. شماره نمونه‌ها و شرح عملیات بهره‌وری آنها در جدول 2



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.1.2 ]

ارائه شده است. نمونه‌های متالوگرافی عمود بر مسیر جوش از ناحیه جوش استخراج شد. جهت حصول صافی سطح مناسب نمونه‌ها با ورق‌های سنباده کاربایدی تا 3000 سمباده زده شدند و با استفاده از نمد و پودر آلومینا برای دست‌یابی به صافی سطح مناسب پولیش‌کاری شدند. محلول حکاکی مورد استفاده کلر اصلاح شده است و زمان استفاده برای نمونه‌ها مختلف متفاوت بوده است، چون ریزدانگی نمونه‌ها با هم متفاوت بوده است. ریز ساختار با استفاده از میکروسکوپ نوری[1] و نمونه بهینه حکاکی شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی[2] مورد بررسی قرار گرفت. اندازه دانه به‌وسیله میان‌یابی خطی به‌دست آمده است. نمونه‌هایی مشابه با نمونه متالوگرافی برای تست سختی عمود بر مسیر جوش از ناحیه جوش بریده شد و سپس در خطی به فاصله 2 میلی متر از سطح بالایی جوش از سمت پس‌رونده به‌سمت پیش‌رونده جوش تست سختی سنجی ویکرز انجام شد. تست سختی سنجی با بار 100 گرم و مدت زمان اعمال بار 15 ثانیه انجام شد که فاصله نقاط سختی سنجی از هم 0/5 میلیمتر درنظرگرفته شد.

## 3- نتایج و بررسی

### 3-1- ریز ساختار

تغییر شکل پلاستیک و افزایش دما در منطقه جوش منجر به تبلور مجدد دینامیکی و تغییر در ریز ساختارها در منطقه همزده و تجزیه رسوبات و درشت شدن در اطراف منطقه همزده می‌شود. بر این اساس سه منطقه مختلف با نام‌های منطقه همزده[3]، منطقه متاثر از فرایند ترمومکانیکی[4] و منطقه متاثر از حرارت[5] قابل تشخیص است. تفاوت این سه ناحیه در شکل 4 نشان داده شده است.

به‌علت تغییر شکل شدید پلاستیک و افزایش ناگهانی دما در منطقه هم-زده دانه‌ها شکسته می‌شوند و مرز دانه‌هایی با زاویه کم ایجاد می‌شود[12]. این نقاط، نقاط مناسبی برای جوانه زنی هستند. در این نقاط تبلور مجدد رخ می‌دهد که موجب ایجاد یک ساختار ریز دانه در منطقه همزده می‌شود[13].

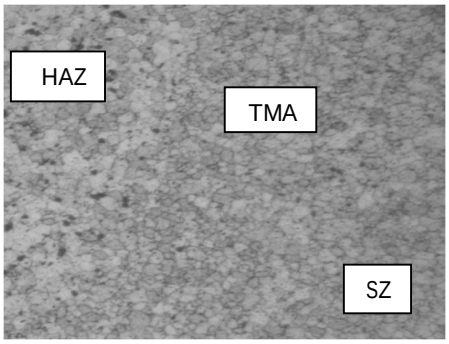
**شکل 2** ورق خام

**شکل 3** شکل ابزار مورد استفاده در جوشکاری

**جدول 1** ترکیبات وزنی عناصر تشکیل دهنده ورق خام 2024 (درصد وزنی)

| عنصر | Al | Mg | Mn | Fe | Si | Cu |
|---|---|---|---|---|---|---|
| % | بقیه | 1/57 | 0/613 | 0/284 | 0/0973 | 5/32 |

1- Optical Microscopy ( OM )
2- scanning electron microscopy (SEM)
3- Stir Zone (SZ)
4- Thermal Mechanical Affected Zone (TMAZ)
5- Heat Affected Zone (HAZ)




**شکل 4** نواحی مختلف در یک جوش اصطکاکی اغتشاشی

در بازیابی مکانیکی مرز دانه‌ها با زاویه کم به مرز دانه‌هایی با زاویه زیاد تبدیل می‌شوند و همین تبدیل موجب بزرگ شدن دانه‌ها می‌شود[14]. در حالت جوشکاری بدون حضور ذرات تقویت‌کننده تنها عامل موثر دما یا به عبارتی گرمای ورودی است. یک روش موثر برای کاهش سایز دانه‌ها اعمال روش‌های خنک‌کننده است. در جوشکاری با حضور ذرات تقویت‌کننده اصول شکل‌گیری ریزساختار متفاوت است. از یک طرف گرمای ورودی موجب افزایش سایز دانه‌ها می‌شود[15] و از طرفی دیگر وجود ذرات نانو تقویت-کننده به‌عنوان مانعی در برابر رشد دانه‌ها عمل می‌کنند و دقیقا به مانند نابه-جایی‌ها از رشد بیشتر آن‌ها جلوگیری می‌کنند که این پدیده تحت عنوان پینینگ[6] شناخته می‌شود[1] که موجب ریز دانه‌تر شدن می‌شود و عامل اصلی کاهش اندازه دانه در نمونه جوشکاری شده با ذرات تقویتی است. مشخصات نمونه‌های جوشکاری شده در جدول 2 ارائه شده است. میانگین اندازه دانه در ناحیه جوش در نمونه یک پاسه 4/1 میکرومتر است و با افزایش تعداد پاس میانگین اندازه نمونه کاهش یافته است. در نمونه چهار پاسه تغییری در میزان اندازه دانه نسبت به نمونه دو پاسه مشاهده نشد که علت آن غلبه عامل گرما بر اثر پینینگ نانو ذرات تقویت‌کننده است که از کوچک-تر شدن بیشتر اندازه دانه جلوگیری کرده است. تصویر نمونه‌های حکاکی شده در شکل 5 نشان داده شده است. از طرفی درصورت عدم ایجاد اغتشاش مناسب ممکن است ذرات نانو به جای توزیع مناسب در مکانی تجمع پیدا کنند که این تجمع استحکام کششی را کاهش می‌دهد. برای جلوگیری از ایجاد این تجمع در این تحقیق از روش جوشکاری چند پاسه استفاده شد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه شماره 3 در شکل 6 نشان داده شده است.

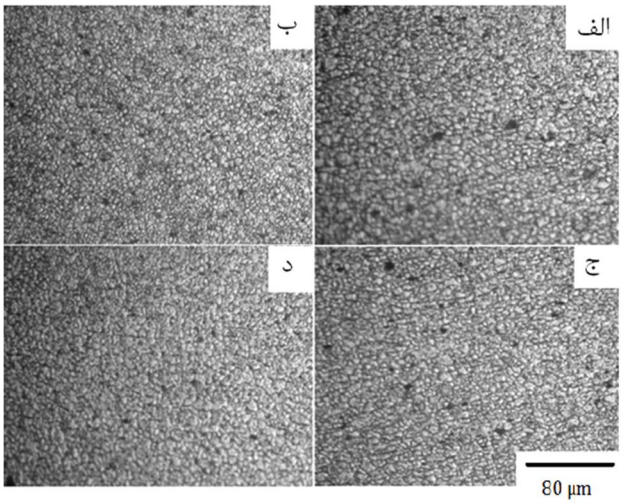
**جدول 2** عملیات جوشکاری هر نمونه

| شماره نمونه | عملیات جوشکاری |
|---|---|
| 1 | جوشکاری یک پاسه بدون پودر تقویتی |
| 2 | جوشکاری یک پاسه با پودر تقویتی |
| 3 | جوشکاری دو پاسه با پودر تقویتی |
| 4 | جوشکاری چهار پاسه با پودر تقویتی |

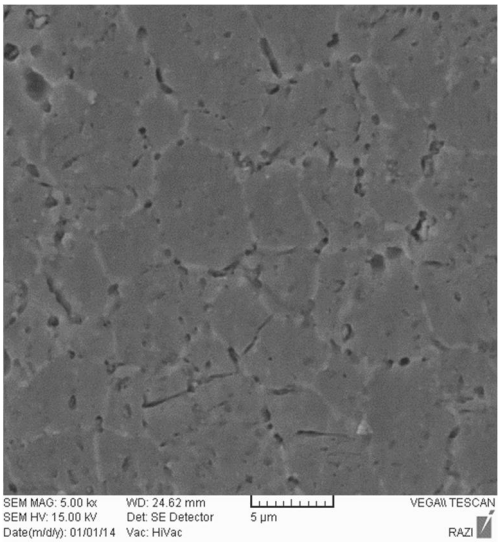
6- pinning



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.1.2 ]




**شکل 5** ریز ساختار نمونه‌ها الف) نمونه جوشکاری شده بدون ذرات نانو آلومینا ب) نمونه جوشکاری شده یک پاسه با ذرات نانو آلومینا ج) نمونه جوشکاری شده دو پاسه با نانو ذرات آلومینا د) نمونه جوشکاری شده چهار پاسه با ذرات نانو آلومینا



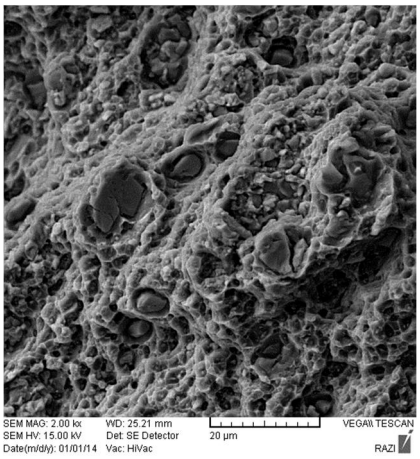

**شکل 6** عکس میکروسکوپ الکترونی از نمونه 3 حکاکی شده

### 3-2- خواص کششی

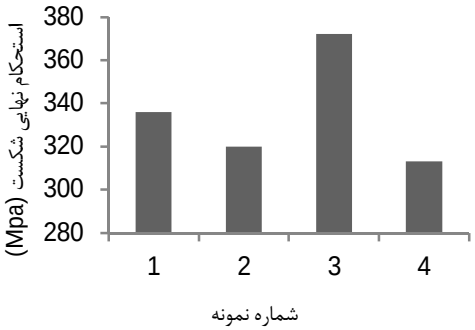
عوامل متنوعی بر روی استحکام کششی اثر می‌گذارند نظیر اندازه دانه‌ها، چگالی نابجایی‌ها و اتصال مناسب بین ذرات تقویت‌کننده و زمینه فلزی که همگی بر روی استحکام کششی اثر می‌گذارند[7]. خواص مکانیکی نمونه‌ها نظیر استحکام کششی نهایی، سختی تمامی نمونه‌ها در جدول 3 ذکر شده است. نمونه شماره 1 یک نمونه جوش داده شده بدون حضور ذرات نانو است. این نمونه جهت مقایسه اثر حضور پودر و عدم حضور نانو پودر جوشکاری شده است. نمونه شماره 2 در همان شرایط جوشکاری شده با این تفاوت که در این نمونه ذرات تقویتی نیز به درز جوش اعمال شد و نمونه شماره 3 جوشکاری در دو پاس متوالی انجام شد که هر بار تغییر جهت سرعت دورانی اعمال شد. در نمونه شماره 4، همان جوشکاری نمونه شماره 3 را یک بار دیگر تکرار شد. بدین معنی که چهار بار ابزار از ابتدا تا انتهای مسیر را طی کرده است و هر بار نیز تغییر جهت چرخش ابزار نیز اعمال شده است. استحکام کششی ورق خام در راستای نورد 490 Mpa است، ولی استحکام نمونه بدون پودر به‌طور چشم‌گیری پایین‌تر است که علت آن در ریز ساختار مربوط به جوش است. یک پاس جوشکاری اندازه ذرات را کاهش داده است، ولی چون نتوانسته است توزیع همگنی از ذرات نانو در زمینه فلزی ایجاد کند موجب تجمع ذرات در داخل ناحیه جوش شده است که این امر موجب کاهش استحکام در یک پاس جوشکاری شده است. شکل 7 رسوبات موجود در ورق خام را نشان می‌دهد. شکل 8 تفاوت میان استحکام کششی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. ورق خام نورد شده حاوی تنش‌های پسماند فشاری است که پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی این تنش‌ها آزاد می‌شوند و اعمال گرما موجب انحلال رسوبات در ناحیه اغتشاش جوش می‌شود. شایان ذکر است که در تمامی نمونه‌های تست کشش، نمونه از ناحیه هم‌زده شکسته شدند. شکل 9 یک نمونه تست کشش شکسته شده را نشان می‌دهد.

**جدول 3** مشخصات نمونه‌ها

| # | استحکام نهایی کشش (MPa) | متوسط سختی در ناحیه جوش به ویکرز | سایز متوسط دانه در ناحیه جوش به میکرومتر |
|---|---|---|---|
| 1 | 336 | 97/3 | 4/1 |
| 2 | 320 | 142/4 | 2/3 |
| 3 | 372 | 144/41 | 1/8 |
| 4 | 313 | 139 | 1/8 |




**شکل 7** عکس SEM از سطح مقطع شکست نمونه ورق خام




**شکل 8** نمودار تنش نهایی شکست برای نمونه شماره 1 تا 4

**شکل 9** عکس از محل شکست نمونه شماره 4



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.1.2 ]

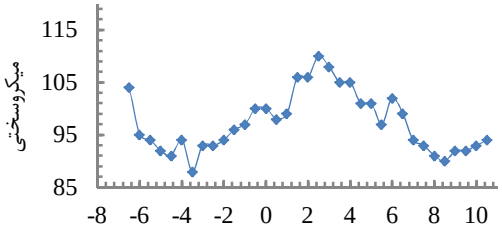
### 3-3- سختی سنجی

سختی در ناحیه اتصال که کامپوزیتی پایه آلومینیومی است به اندازه دانه، چگالی نابجایی‌ها، ذرات نانو تقویتی و گرمای ورودی به این ناحیه بستگی دارد. با توجه به رابطه هال-پتچ با کاهش اندازه دانه‌ها میزان سختی افزایش پیدا می‌کند[8]. نابه‌جایی‌هایی که در نتیجه توزیع ناهمگن ذرات نانو در زمینه فلزی ایجاد می‌شوند موجب افزایش در سختی می‌شوند. ذرات تقویت-کننده تاثیری دوچندان بر میزان سختی دارند. هم خود ذرات سختی بالایی دارند و هم اثری که در نتیجه پدیده پینینگ می‌گذارند موجب می‌شود که سختی نمونه‌ها افزایش یابد[16]. از طرفی اثر آنیلینگ ناشی از گرمای ورودی موجب کاهش میزان سختی می‌شود[17]. سختی میانگین در ناحیه هم-خورده نمونه شماره 2 که جوشکاری با پودر شده است نسبت به نمونه بدون پودر افزایش یافته است. این افزایش چشم‌گیر است، زیرا در حالتی که ذرات نانو نباشند تنها عامل تاثیرگذار گرمای ورودی است که با وجود ریز دانه شدن دانه‌ها در داخل جوش سختی را به طرز چشم‌گیری کاهش می‌دهد. در نمونه دو پاسه سختی به میزان کمی نسبت به یک پاسه افزایش داشته است. این افزایش ناچیز ناشی از توزیع بهتر ذرات نانو در زمینه آلومینیومی است. از طرفی گرمای ورودی ناشی از جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی پیوسته اجازه نداده است که سختی به میزان زیادی افزایش یابد و نهایتا، در پاس چهارم جوشکاری یعنی نمونه شماره 4 گرمای ورودی بر اثر حضور ذرات تقویت-کننده غلبه کرده و سختی نسبت به نمونه شماره 3 که دو پاس جوشکاری شده است؛ کاهش یافته است این افت اندک ناشی از اثر آنیلینگ است که پیش‌تر توضیح داده شد.

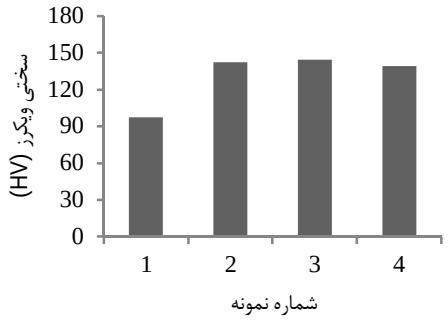
همان‌طور که در شکل 10 مشاهده می‌شود، در نمونه شماره 1، که بدون پودر نانو تقویتی جوشکاری شده است، ابتدا، سختی کاهش یافته و سپس در داخل ناحیه هم‌زده، به‌علت غلبه اثر ریزدانگی، کمی افزایش داشته است. تست سختی سنجی از سمت پس‌رونده به‌سمت پیش‌رونده انجام شد، چون میزان تغییرات زیاد بود برای تحلیل راحت‌تر نمودار سختی از نمودار میله‌ای سختی میانگین در ناحیه هم‌خورده استفاده شده است. اندازه میانگین سختی در نمونه‌های با پودر در ناحیه هم‌خورده افزایش داشته است که به‌علت کاهش اندازه دانه‌ها و حضور ذرات تقویتی است که خود سختی بالاتری نسبت به فلز پایه دارند و موجب افزایش در اندازه سختی در ناحیه هم‌خورده می‌شوند. این میزان رشد در میانگین سختی در پاس چهارم کاهش می‌یابد. در شکل 11، تفاوت میان سختی نمونه‌ها با نمودار میله‌ای نشان داده شده است.

### 4- جمع‌بندی

در این تحقیق اثر تعداد پاس بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی پیوسته لب به لب آلومینیوم 2024 با افزودن ذرات نانو




**شکل 10** تغییرات سختی در ناحیه هم‌خورده جوش برای نمونه شماره 1




**شکل 11** نمودار میانگین سختی در ناحیه هم‌خورده برای نمونه شماره 1 تا 4

آلومینا در درز جوشکاری بررسی شد. میکروساختار و خواص مکانیکی نمونه‌ها شامل استحکام کششی و میکروسختی نمونه‌ها بررسی شده است و به‌دنبال آن نتایج ذیل به‌دست آمده است.

1- نانو کامپوزیت پایه آلومینیومی 2024 با ذرات آلومینا در ناحیه جوش ایجاد شده است. حضور ذرات نانو در یک پاس جوشکاری موجب افت در استحکام کششی نهایی شد.

2- افزایش تعداد پاس جوشکاری پیوسته ابتدا موجب بهبود استحکام کششی نهایی و سپس موجب کاهش استحکام می‌شود. علت افزایش استحکام توزیع بهتر ذرات پودر و در نتیجه غلبه اثر پینینگ نانو ذرات بر اثر آنیلینگ گرمای ورودی ناشی از جوشکاری پیوسته است.

3- ذرات نانو اضافه شده در جوش از رشد بیشتر دانه‌ها جلوگیری می‌کند. وجود ذرات نانو تقویتی در داخل ناحیه هم‌خورده موجب کاهش اندازه دانه تا پاس دوم شد و در ادامه در پاس چهارم جوشکاری اندازه دانه تغییر چشم-گیری نداشت که ناشی از غلبه کردن اثر آنیلینگ بر اثر پینینگ بوده است و علت آن افزایش گرمای ورودی به ناحیه هم‌خورده است.

4- در نمونه جوشکاری شده بدون حضور ذرات نانو تقویتی آلومینا میکروسختی کاهش می‌یابد، ولی در حضور ذرات نانو سختی میانگین در ناحیه هم‌خورده جوش افزایش می‌یابد که به‌علت ریز دانه شدن و حضور ذرات نانو تقویتی است که سختی بالایی دارند. سختی در نمونه‌ای که با دو پاس متوالی جوشکاری شده بود؛ بیشترین میزان افزایش را نسبت به نمونه جوشکاری شده بدون حضور ذرات نانو تقویتی را داشت.

### 5- مراجع


[1] M. M. El-Rayes, E. A. El-Danaf, The influence of multi-pass friction stir processing on the microstructural and mechanical properties of Aluminum Alloy 6082, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 5, pp. 1157-1168, 2012.

[2] 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, 2012. (In Persian)

[3] L. Ceschini, I. Boromei, G. Minak, A. Morri, F. Tarterini, Effect of friction stir welding on microstructure, tensile and fatigue properties of the AA7005/10 vol.%Al2O3p composite, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, No. 3–4, pp. 605-615, 2007.

[4] K. Elangovan, V. Balasubramanian, Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 200, No. 1–3, pp. 163-175, 2008.

[5] A. H. Azizi, V. Zakeri Mehrabad, A. Mostofi Zadeh, R. Azarafza, Influnce of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of AA7075–T6 aluminum alloy joints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 56-66, 2012. (In Persian)

[6] W. B. Lee, C. Y. Lee, M. K. Kim, J. I. Yoon, Y. J. Kim, Y. M. Yoen, S. B. Jung, Microstructures and wear property of friction stir welded AZ91 Mg/SiC particle reinforced composite, *Composites Science and Technology*, Vol. 66, No. 11–12, pp. 1513-1520, 2006.




[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.1.2 ]

[7] M. Barmouz, P. Asadi, M. K. Besharati Givi, M. Taherishargh, Investigation of mechanical properties of Cu/SiC composite fabricated by FSP: Effect of SiC particles' size and volume fraction, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 3, pp. 1740-1749, 2011.
[8] A. Shamsipur, S. F. Kashani-Bozorg, A. Zarei-Hanzaki, The effects of friction-stir process parameters on the fabrication of Ti/SiC nano-composite surface layer, *Surface and Coatings Technology,* Vol. 206, No. 6, pp. 1372-1381, 2011.
[9] A. Shafiei Zarghani, S. F. Kashani Bozorg, A. Zarei Hanzaki, Microstructures and mechanical properties of Al/Al2O3 surface nano-composite layer produced by friction stir processing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 500, No. 1–2, pp. 84-91, 2009.
[10] R. Bauri, D. Yadav, G. Suhas, Effect of Friction Stir Processing (FSP) on microstructure and properties of Al–TiC in situ composite, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 13–14, pp. 4732-4739, 2011.
[11] M. Bahrami, K. Dehghani, M. K. Besharati Givi, A novel approach to develop aluminum matrix nano-composite employing friction stir welding technique, *Materials & Design*, Vol. 53, No. 0, pp. 217-225, 2014.
[12] Z. Y. Ma, R. S. Mishra, M. W. Mahoney, Superplastic deformation behaviour of friction stir processed 7075Al alloy, *Acta Materialia,* Vol. 50, No. 17, pp. 4419-4430, 2002.
[13] F. J. Humphreys, P. B. Prangnell, R. Priestner, Fine-grained alloys by thermomechanical processing, *Current Opinion in Solid State and Materials Science,* Vol. 5, No. 1, pp. 15-21, 2001.
[14]D. Yadav, R. Bauri, Nickel particle embedded aluminium matrix composite with high ductility, *Materials Letters,* Vol. 64, No. 6, pp. 664-667, 2010.
[15] M. Abbasi Gharacheh, A. H. Kokabi, G. H. Daneshi, B. Shalchi, R. Sarrafi, The influence of the ratio of "rotational speed/traverse speed" (ω/v) on mechanical properties of AZ31 friction stir welds, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 15, pp. 1983-1987, 2006.
[16] A. Dolatkhah, P. Golbabaei, M. K. Besharati Givi, F. Molaiekiya, Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing, *Materials & Design,* Vol. 37, No. 0, pp. 458-464, 2012.
[17] M. Barmouz, M. K. B. Givi, Fabrication of in situ Cu/SiC composites using multi-pass friction stir processing: Evaluation of microstructural, porosity, mechanical and electrical behavior, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,* Vol. 42, No. 10, pp. 1445-1453, 2011.

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-19 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.12.1.2 ]