



استفاده از نانو ذرات Al_2O_3 جهت بهبود خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصال جوشی چندپاسه اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ Al 2024

مجید فرهنگ^{1,2*}، محمدرضا فراهانی³، محمد نظری⁴

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

2- مربی، مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی اوج، آبیک، قزوین

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

4- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

* تهران، صندوق پستی 1439957131، mrfarahani@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف از این پژوهش بررسی خواص مکانیکی و متالورژیکی اثرات استفاده از نانو پودر Al_2O_3 و همچنین تعداد پاس‌ها در جوش کاری آلیاژ AA2024 T6 است. بدین منظور با انتخاب سرعت چرخشی 1400 دور بر دقیقه و پیشروی 16 میلی‌متر بر دقیقه، 9 نمونه با حضور نانو ذرات آلومینا و 1 نمونه بدون حضور نانو ذرات جوش کاری شدند. در نمونه‌هایی که حاوی نانو ذرات بودند؛ ترکیبی از سه درصد حجمی 3%، 5% و 7% در سه حالت 1 پاسه، 2 پاسه و 4 پاسه به‌طور پیوسته ساخته شدند. در نهایت ریزساختار اتصال، میکروسختی و استحکام کششی اتصال جوشی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد حجمی ذرات از 3% به 7%، میانگین اندازه‌ی دانه به طور متوسط 37% کاهش و میانگین استحکام کششی 10% افزایش می‌یابند. همچنین در همین افزایش درصد حجمی ذرات از 3% به 7% و با ثابت بودن تعداد پاس در تمامی موارد 1، 2 و 4 پاسه، میانگین سختی در ناحیه تحت تأثیر شانه حدود 10% افزایش یافت. از میان اتصالات جوشی ایجاد شده نمونه 2 پاسه با 7 درصد حجمی نانو ذرات به‌عنوان مطلوب‌ترین اتصال به لحاظ خواص مکانیکی و متالورژیکی انتخاب شد. به‌طوری که میزان میانگین اندازه دانه نسبت به نمونه تک پاسه بدون پودر 55% کاهش داشت. برای استحکام کششی و میانگین سختی این تغییرات به ترتیب حدود 11% و 48% رشد در مقایسه حالت بدون نانوذره با بهترین حالت مشاهده شد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 11 بهمن 1399
داوری اولیه: 18 اسفند 1399
پذیرش: 31 اردیبهشت 1400

کلیدواژگان:

جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی
خواص استحکامی
خواص متالورژیکی
تعداد پاس‌های جوش کاری
درصد حجمی، نانو ذرات Al_2O_3

Incorporation of Al_2O_3 powder for improvement of the mechanical and metallurgical properties of multi-passes friction stir welding of Al 2024

Majid Farhang^{1,2}, Mohammad Reza Farahani^{1*}, Mohammad Nazari³

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, OJ Institute of Higher Education, Abyek, Qazvin, Iran.

3- Faculty of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1439957131 Tehran, Iran, mrfarahani@ut.ac.ir, address

Article Information

Original Research Paper
Received: 31 January 2021
First Decision: 10 March 2021
Accepted: 21 May 2021

Keywords:

Friction stir welding
Tensile strength
Metallurgical properties
Multi-pass welding
Volume percentage Al_2O_3 Nano particle

Abstract

The main aim of this experiment is to determine the mechanical and microstructural characteristics of using Nano powder of Al_2O_3 besides stir welding of Al2024-T6 in multi-pass welding. Nanoparticles welded nine specimens and one particle-free in 1400 rpm rotational speed and 16 mm/min traveling speed. A combination of volume percentage of powder (3%, 5%, and 7%) and three different multi continuous passes (1, 2, and 4) is applied for Nano-rich specimens. The microstructure of the joint, micro-hardness, and ultimate tensile strength (UTS) of the welded joint has been studied. It was observed that by increasing the particle volume from 3% to 7% average grain size increased extremely up to 37%, and UTS up to 10%, and in the Steady of welding passes, average micro-hardness has a 10% increase in shoulder affected zone. The result showed that the specimen with 7% of Nanoparticles in two passes has the highest mechanical and metallurgical properties and has a significant decrease (55%) in average grain size compared with a particle-free specimen. Meanwhile, UTS and average micro hardness of the same specimen was about 11% and 48% more than particle-free.

1- مقدمه

دیگر ضریب هدایت حرارتی بالا یک منبع حرارتی شدیدتر و متمرکزتر برای جوش کاری ذوبی این آلیاژ را طلب می‌کند. آلیاژهای سری 2xxx به ترک گرم حساس هستند. همین امر در گذشته جوش کاری ذوبی این فلز را غیر ممکن می‌ساخت و تا

جوش کاری ذوبی آلیاژهای آلومینیوم همواره امری چالش‌برانگیز بوده است. از طرفی ضریب انبساط حرارتی بالای این آلیاژ موجب ایجاد اعوجاج و پسماند بالا در محصول می‌شود. از طرف

Please cite this article using:

M. Farhang, M. R. Farahani, M. Nazari, Incorporation of Al_2O_3 powder for improvement of the mechanical and metallurgical properties of multi-passes friction stir welding of Al 2024, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 35- 46, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

همزنی ابزار دوار موجب خمیری شدن ماده در ناحیه اطراف پین شده و اتصال ایجاد می‌گردد [1]. از این رو افزایش سرعت دورانی و همچنین کاهش سرعت پیشروی افت استحکام را به دنبال دارد [24]. اثرات این پارامترها در تحقیقی توسط وون و همکارانش بر روی آلیاژ AA1050 صورت پذیرفت [25]. بهرامی و همکاران در مطالعه خود بر روی آلیاژ 7075-O دریافتند که تولید یک اتصال از طریق فرآوری اصطکاکی اغتشاشی با افزودن نانوذرات استحکام نهایی و درصد افزایش طول را بهبود می‌بخشد [26]. برموز و بشارتی به این نتیجه رسیدند که با افزایش تعداد پاس در ساخت کامپوزیت فلزی Cu/SiC سختی ناحیه ردپای شولدر نسبت به فلز پایه افزایش می‌یابد [27].

این تحقیق به دنبال ایجاد یک اتصال جوشی تقویت شده با ذرات نانو آلومینا بر روی ورق‌های AA2024 T6 می‌باشد. در ادامه تغییرات خواص مکانیکی و متالورژیکی برای درصدهای مختلف نانو ذرات افزودنی در تعداد پاس‌های مختلف جوش کاری مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

2- فعالیت‌های تجربی

2-1- آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش ورق آلیاژ آلومینیوم AA2024 T6 با ضخامت 4 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت که ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آن در جداول 1 و 2 مشاهده می‌شود. در ابتدا ورق‌ها با ابعاد 50×120 میلی‌متر برش کاری شدند. جهت اعمال پودر در درز جوش، شیار در امتداد طول ایجاد شد. فاصله مرکز شیار از سطح بالایی ورق یک سوم ضخامت ورق است. بطوری که با قرار گرفتن دو قطعه با شیار قرینه در کنار هم، یک محفظه مربعی شکل کامل ایجاد شد. نمایی از موقعیت شیار در شکل 2 قابل مشاهده می‌باشد. چون حرارت ورودی و نیز امکان همزنی در سطح بالایی به مراتب بیشتر است لذا انتظار می‌رود که توزیع بهتری از پودر نانو در اتصال فراهم شود. برای از بین بردن لایه چسبنده اکسید آلومینیوم، سطح ورق‌ها توسط سنباده تمیزکاری و با استون خالص شسته شدند. در نهایت داخل شیار با پودر نانو آلومینا به صورت فشرده پر شد. پودر مورد استفاده از جنس نانو آلومینا، دارای 99% خلوص و محصول شرکت GNM بود که ابعادی در حدود 30-20 نانومتر داشت.

جدول 1 آنالیز شیمیایی ورق آلومینیومی AA2024 T6

Table 1 Chemical composition of AA2024 T6

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

سالیان متمادی غیر قابل جوش کاری نامیده می‌شدند. جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی یک روش جوش حالت جامد نسبتاً جدید است که در سال 1991 در انگلستان توسط موسسه TWI ابداع شد [1، 2]. عاملی که سبب سرعت بخشیدن به پیشرفت این فرایند شد، خواص مکانیکی مناسب‌تر و اعوجاج کمتر آن بود [3، 4]. این روش یک فرآیند ترمومکانیکی است و حوضچه مذاب ندارد [5]. به‌طوری که محدوده دمایی بیشتر آلیاژهای آلومینیوم با این فرایند کمتر از 500 درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است [6، 7]. در نتیجه با این فرایند جوش کاری می‌توان عیوبی مانند تخلخل، حبس لایه اکسیدی و ترک‌های انجمادی (ترک گرم) را در این اتصالات حذف کرد [3، 5]. از دیگر مزایای این روش می‌توان به میزان تنش‌های پسماند پایین‌تر نسبت به روش‌های ذوبی اشاره نمود [8، 9]. عامل اصلی این امر عدم وجود گرادیان حرارتی شدید است [10، 11] که نیاز عملیات حرارتی پس از جوش کاری را از بین می‌برد [12]. تمامی این مزایا سبب شده تا از این روش برای اتصالات همجنس [14، 15] و غیر همجنس [16، 17]، با [18، 19] و بدون حضور پودر [20] به کار رود. نمایی از این فرایند جوش کاری در شکل 1 نمایش داده شده است.

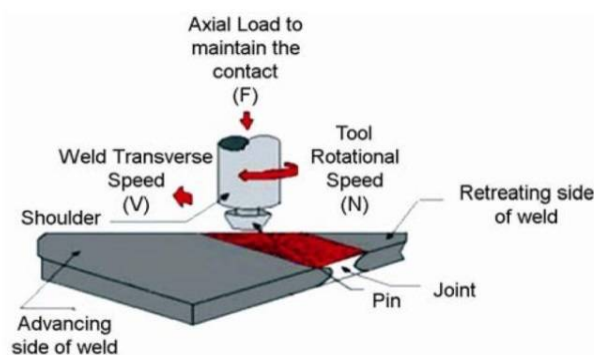
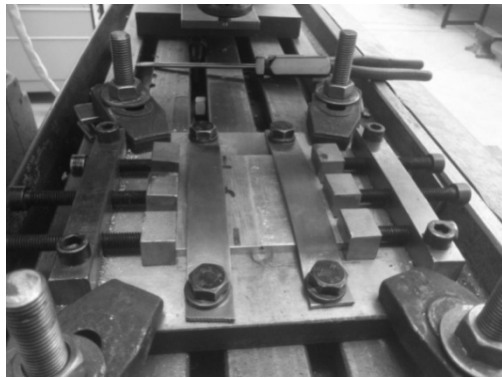


Fig. 1 Schematic view of different zone in FSW [21]

شکل 1 شماتیکی از مناطق مختلف جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی [21]

دو متغیر اصلی در انجام این فرایند سرعت دورانی و پیشروی هستند. ترکیب این دو متغیر از اهمیت بالایی برخوردار است [22]. با افزایش سرعت دورانی و کاهش سرعت پیشروی گرمای بیشتری تولید شده و مساحت ناحیه همزنی افزایش می‌یابد [23]. گرمای ناشی از دوران ابزار به وسیله اصطکاک میان شانه ابزار و قطعه کار ایجاد می‌شود و حرارت مورد نیاز جوش کاری را تأمین می‌نماید. حرارت تولید شده از طریق فشار عمودی و



(الف)



(ب)

Fig. 3 Used items for friction stir welding. a) Milling machine, b) Fixture

شکل 3 نمایی از تجهیزات مورد استفاده در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی (الف) دستگاه فرز، (ب) فیکسچر مورد استفاده

برای ساخت قطعات به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی طراحی آزمایش بر اساس جدول 3 صورت گرفت. بر مبنای نمونه‌سازی‌های اولیه مشخص گردید که در سرعت‌های دورانی کمتر از 1400 دور بر دقیقه نمی‌توان جوش بدون عیب تونلی تولید کرد. همچنین با افزایش سرعت پیشروی بیش از 16 میلی‌متر بر دقیقه در ابتدا عیب تونلی و با افزایش بیشتر آن ترک طولی مشاهده گردید. با توجه به وجود عیوب در سرعت‌های دورانی و پیشروی متفاوت نهایتاً انتخاب این پارامترها مطابق جدول 3 تنظیم گردید.

برای تهیه نمونه آزمایش کشش قطعات بر اساس استاندارد ASTM E08 در جهت عمود بر مسیر جوش و به صورت متقارن تهیه گردیدند. کلیه آزمون‌ها در دمای اتاق و نرخ کرنش 0/001 بر دقیقه انجام شد.

برای انجام آزمایش‌های متالورژیکی، از محلول کلر اصلاح شده برای اچ کردن نمونه‌ها استفاده شد. ترکیب شیمیایی این

جدول 2 خواص استحکامی ورق آلومینیومی AA2024 T6

Table 2 Mechanical properties of AA2024 T6

تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	سختی (HV)
375	495	153

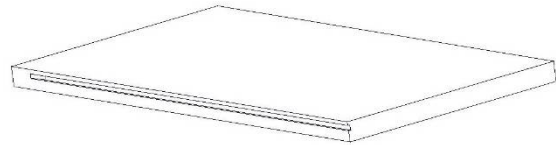


Fig. 2 Schematic view of lap joint welding.

شکل 2 شماتیک طرح اتصال جوش کاری.

ساخت ابزار با هندسه و جنس مناسب جهت دستیابی به اتصال قابل قبول از اهمیت بالایی برخوردار است [28]. پین ابزار باعث تغییر شکل در ناحیه همزنی و انتقال مواد به پشت پین است. پاتلی و همکاران در مطالعه خود بر روی آلیاژ 6082-O به این نتیجه رسیدند که هندسه پین ابزار در استحکام نهایی اتصال مؤثر است [29]. از این رو بنا بر تحقیقات الانگوان و همکارانش هندسه پین مربعی که بهترین خواص مکانیکی و متالورژیکی را فراهم می‌کند [30]. در این پژوهش از ابزار با پین مربعی استفاده شده است. میشرها و همکاران قطر پین به اندازه ضخامت ورق را پیشنهاد کردند [3] اما به دلیل افزایش استحکام پین و جلوگیری از شکست آن هر ضلع پین به اندازه ضخامت ورق لحاظ گردید [31].

سختی ابزار تعیین‌کننده ضریب اصطکاک است. این عامل در ایجاد حرارت در طی فرایند مؤثر می‌باشد [32]. فولاد ابزار AISI H13 از جمله فولادهای گرم کار است که به‌وفور برای جوش کاری آلیاژهای آلومینیومی مورد استفاده قرار می‌گیرد [33]. در نهایت با توجه به مطالعات انجام شده قطر شانه 16 میلی‌متر و زاویه تعرق آن 6 درجه در نظر گرفته شدند [22, 31].

ایجاد حفره در جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی بسیار رایج است. زاویه انحراف ابزار می‌تواند در از بین رفتن حفرات نقش مثبتی را ایفا نماید. به طوری که در زاویه انحراف مناسب جریان مواد مناسب‌تر و حفره تشکیل شده کوچک‌تر می‌شود و در یک محدوده خاص از بین می‌رود. زاویه انحراف ابزار بر اساس تحقیقات اخیر به میزان 3 درجه تنظیم گردید [31, 34].

به منظور انجام فرایند جوش کاری اصطکاکی اغتشاشی از یک دستگاه فرز انیورسال با کنترلر نیمه اتوماتیک استفاده شد. نمایی از دستگاه، فیکسچر و همچنین ابزار جوش کاری در شکل 3 نشان داده شده است.

محلول در جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 3 طراحی آزمایش

Table 3 Design of experiment									
مقدار یا مقادیر					متغیر				
1400					سرعت دورانی (rpm)				
16					سرعت پیشروی (mm/min)				
1	4	2	1	4	2	1	4	2	1
0					درصد حجمی				

جدول 4 ترکیب شیمیایی محلول کلر اصلاح شده

Table 3 Chemical composition of corrected chlorine solution				
جزء	آب مقطر	HND ₃	HCL	HF (48%)
مقدار میلی متر	190	5	3	2

میکروسختی سنجی، نمونه‌ها عمود بر مسیر جوشکاری انجام شدند. از این رو نمونه‌ها در این جهت از ناحیه جوش بریده شدند. آزمایشات جهت استخراج پروفیل سختی بر طبق استاندارد ASTM E348 انجام شدند. محل انجام آزمایش در راستای عرضی و در حد فاصل میانی ورق یعنی عمق 2 میلی متر از سطح بالایی جوش بود. فاصله‌ی اثرهای سختی سنجی از یکدیگر 0/5 میلی متر انتخاب شد. میزان بار دستگاه تست ریزسختی 100 گرم و مدت زمان اعمال بار را 15 ثانیه در نظر گرفته شد.

3- بحث و نتیجه گیری

نمونه‌ها بر اساس آنچه که در جدول 3 به آن اشاره شد ساخته شدند. بر همین اساس یک نمونه بدون پودر و نه نمونه دیگر با حضور نانوذرات آلومینا به روش اصطکاکی اغتشاشی جوشکاری گردیدند. بر روی تمامی نمونه‌ها آزمایش‌های کشش تک محوری، سختی سنجی، میانگین اندازه دانه و بررسی سطح شکست صورت گرفتند. در ادامه به بررسی نتایج رفتار استحکامی و متالورژیکی با توجه به تغییرات پارامترهای فرایندی ذکر شده در طراحی آزمایش، پرداخته خواهد شد. به دلیل استفاده از نانوذرات تقویتی برای بررسی و دستیابی به تجزیه و تحلیل مناسب‌تر در ابتدا رفتار متالورژیکی مورد مطالعه قرار گرفت.

3-1- بررسی ریز ساختار جوش

3-1-1- بررسی نمونه بدون حضور نانوذرات

نواحی مختلفی که در اثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی ایجاد

می‌شود در شکل 4 نمایش داده شده‌اند. در ناحیه همزنی به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید و حرارت ورودی بالا، تبلور مجدد دینامیکی و بهبود در زیرساختار به وجود آمده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در ناحیه اغتشاش دانه‌ها ریز و همگن هستند. علت کاهش اندازه‌ی دانه‌ها در ناحیه‌ی همزنی، تغییر شکل پلاستیک شدید و تنش‌های مکانیکی شدید توأم با حرارت است. نتیجه این رخداد سبب ایجاد مکان‌های جدید و مناسبی برای هسته‌سازی است. هسته‌سازی باعث افزایش چگالی دانه‌ها و مرز دانه‌ها می‌شود. این عامل مانع از رشد بیشتر دانه‌ها می‌شود. در نهایت اندازه‌ی دانه‌ها به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. پارامتر دیگری نیز در حین جوشکاری بر ریزساختار نمونه‌ها تأثیر می‌گذارد و آن گرمای ورودی است. افزایش گرمای ورودی در طول فرآیند موجب آنیلینگ و افزایش میانگین اندازه دانه می‌شود. در شکل 5 هر چهار ناحیه اغتشاش، ترمومکانیکال، منطقه‌ی متأثر از حرارت و فلز پایه نشان داده شده است. در ناحیه ترمومکانیکال به دلیل عدم وجود نیروی محرکه برای رسیدن به تبلور مجدد دانه‌ها کشیده می‌شوند. همچنین ممکن است به علت افزایش دما، برخی رسوبات درشت شده و موجب کاهش استحکام در این ناحیه شوند.

همان‌گونه که در شکل 5 دیده می‌شود به دلیل آن که سرعت دورانی مورد استفاده در ایجاد این اتصال بالا بوده است، در ناحیه پایینی منطقه جوش یک الگوی پیازی شکل (حالت بیضی) مشاهده گردید. اندازه دانه در این منطقه کوچکتر است. زیرا از ناحیه فصل مشترک ابزار با فلز پایه فاصله دارد و انتقال حرارت سریع‌تر رخ می‌دهد. البته برخی محققین توزیع غیریکنواخت دانه‌های خرد شده [35] و افزایش چگالی نابجایی‌ها [36] را نیز عامل ایجاد این اتفاق می‌دانند.

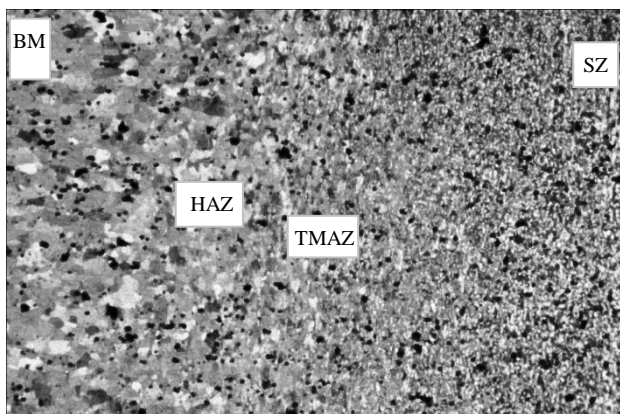


Fig. 4 Different zones in FSW

شکل 4 نواحی مختلف در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

کاهش می‌یابد و پس از آن با افزایش تعداد پاس از دو به چهار این مقدار نسبت به نمونه دو پاسه 16% افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه این است که همچنان اندازه دانه کمتر از نمونه یک پاسه است. افزایش تعداد پاس‌های فرآیند، حضور نابیجایی‌ها را در ریز ساختار افزایش می‌دهد [39]. این در حالی است که در کامپوزیت‌های پایه فلزی سه عامل عمده را می‌توان به عنوان منبع ایجاد نابیجایی برشمرد. آنها عبارتند از: مرز دانه، تغییر شکل متناوب ذرات تقویتی در ساختار فلزی و همچنین سطح مقطع بین ذرات پودر و زمینه آلومینیومی.

پاس اول جوشکاری ناحیه‌ی وسیعی از مرز دانه‌ها را می‌سازد و ریزساختار را بهبود می‌بخشد. بنابراین نواحی مناسب برای جوانه‌زنی مرز دانه‌های جدید (حین تبلور مجدد) در پاس‌های بعدی بیشتر خواهد شد. البته افزایش تعداد پاس‌های فرآیند موجب توزیع بهتر پودر در ریزساختار شده و نواحی که ذرات در آن تجمع کردند را از بین می‌برد. این عمل سطح مقطع بین ذرات پودر و زمینه‌ی فلزی را نیز افزایش می‌دهد. در شکل 7 بزرگی اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی در تعداد پاس ثابت مشاهده می‌شود. در این شکل سرعت دورانی با RS و سرعت پیشروی با TS بیان شده‌اند. همچنین درصد حجمی نانو ذرات با نماد V نشان داده شده است.

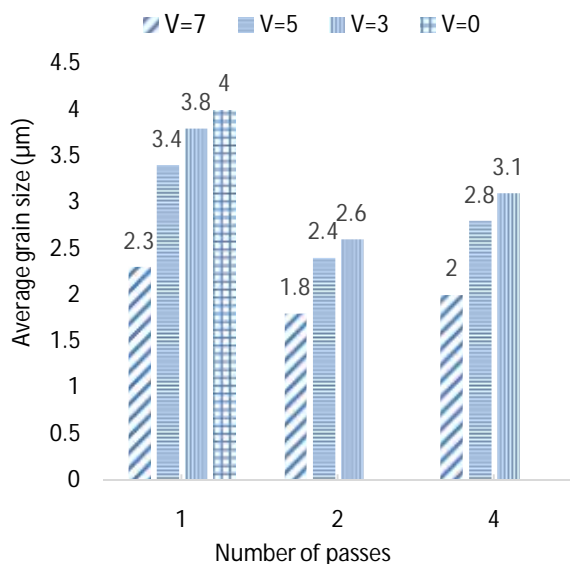


Fig. 6 Nugget grain size in multi passes of specimens

شکل 6 بزرگی اندازه دانه در ناحیه اغتشاشی در تعداد پاس مختلف برای نمونه‌های جوشکاری شده

شکل 7 نمایی از شکستگی دانه‌ها و شکل 8 ریز ساختار نمونه‌ها را نمایش می‌دهد. با توجه به شکل‌های 7 و 8 می‌توان نتیجه گرفت که ذرات نانو آلومینا موجب توقف مهاجرت مرز دانه‌ها

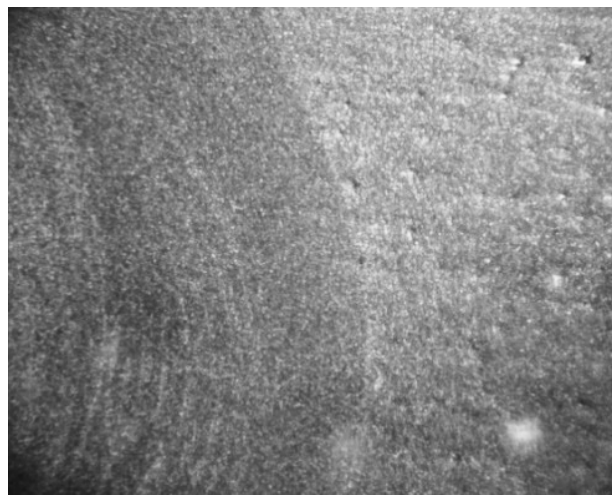


Fig. 5 The Onion-ring flow pattern at the bottom of lap joint AL2024

شکل 5 حالت بیضوی شکل پایین جوش در ناحیه‌ی اغتشاش آلومینیوم 2024 جوشکاری شده

3-1-2- بررسی حضور نانوذرات بر ریزساختار جوش

در جوشکاری با حضور نانوذرات مهم‌ترین مسئله اختلاط مناسب نانوذرات در ناحیه‌ی اغتشاش است که خود متأثر از نحوه‌ی جریان مواد، اغتشاش مواد و ابزار مورد استفاده می‌باشد. درصد حجمی نانوذرات از جمله پارامترهایی است که در این تحقیق بررسی شده است. محققان بسیاری در زمینه نحوه‌ی توزیع ذرات در ناحیه اغتشاش تحقیق نموده‌اند.

تغییر شکل پلاستیک شدید همراه با افزایش دما در منطقه همزنی سبب وقوع پدیده تبلور مجدد دینامیکی و تجزیه رسوبات می‌شود. تحقیقات نشان داده است که افزایش سرعت چرخش ابزار حین انجام FSP در آلیاژ 2024 منجر به خرد شدن بیشتر ذرات نامحلول و انحلال ذرات محلول می‌گردد [37].

یکی از راه‌های ایجاد ساختار همگن در جوش افزایش تعداد پاس است. با افزایش تعداد پاس مساحت ناحیه همگن ناشی از همزنی افزایش پیدا می‌کند. به دلیل این که جریان مواد به سمت پیشرو است و توزیع پودر نانوآلومینا به یک سمت متمایل می‌شود، در هر پاس جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی جهت دوران ابزار تغییر داده شد. از این رو تعداد پاس‌های مورد بررسی زوج در نظر گرفته شد تا جوش‌های حاصله همگن باشند. بنابراین تعداد سمت‌های پیشرو و پس رو مساوی هستند [38].

در شکل 6 بزرگی میانگین اندازه دانه‌ها در ناحیه همزنی در تعداد پاس ثابت نشان داده شده است. همانطور که در شکل 6 ملاحظه می‌شود افزایش تعداد پاس بر اندازه‌ی دانه در ناحیه همزنی تأثیر می‌گذارد. در هر سه درصد حجمی 3% و 5% و 7% با افزایش تعداد پاس از یک به دو، میانگین اندازه‌ی دانه 28%

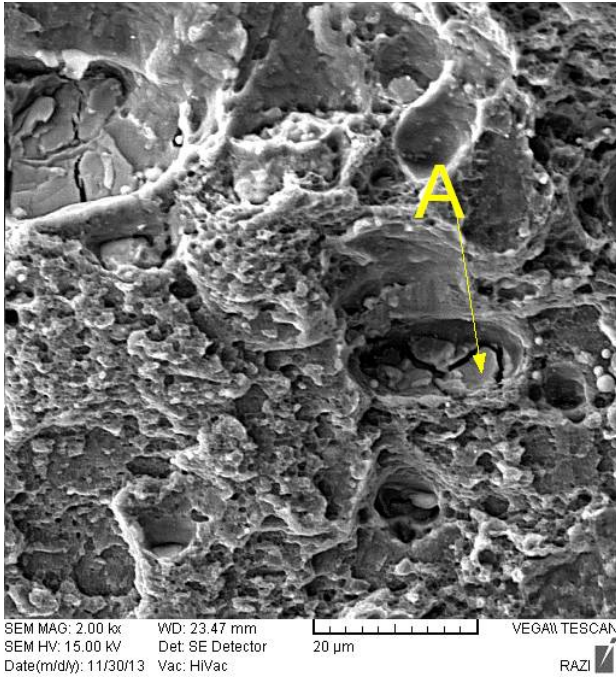


Fig. 7 SEM picture of broken grain by reinforcement.

شکل 7 تصویر میکروسکوپ الکترونی از شکستگی ذرات در دانه.

شده و از رشد بیشتر آن‌ها جلوگیری کرده است. این ذرات می‌توانند مکان‌های مناسب بیشتری برای افزایش میزان جوانه‌زنی در ساختار ایجاد کنند. همچنین موجب شکستگی دانه‌های بزرگتر و تبدیل به دانه‌های کوچکتر شوند.

شکل 9 اندازه‌ی دانه در ناحیه اغتشاشی در حجم ثابت از نانوذرات در پاس مختلف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را نمایش می‌دهند. همان‌طور که در شکل 8 و 9 مشاهده می‌شود در هر سه درصد حجمی نانوذرات تقویتی، کمترین اندازه‌ی دانه متعلق به پاس دوم جوشکاری است. در این تعداد پاس توزیع همگنی از ذرات فراهم و از رشد بیشتر دانه جلوگیری شده است. در پاس چهارم جوشکاری با 7 درصد حجمی نانو ذرات، تغییر چشمگیری در میزان کاهش اندازه‌ی دانه مشاهده نشد. علت این امر را می‌توان تقابل بین گرمای ورودی ناشی از جوشکاری و اثرات تبلور مجدد و پینینگ نانوذرات دانست. این ذرات نانو در ناحیه اغتشاش به مانند مانعی در برابر رشد دانه‌ها عمل می‌کنند و عملکردی نظیر نابجایی‌ها از خود نشان می‌دهند.

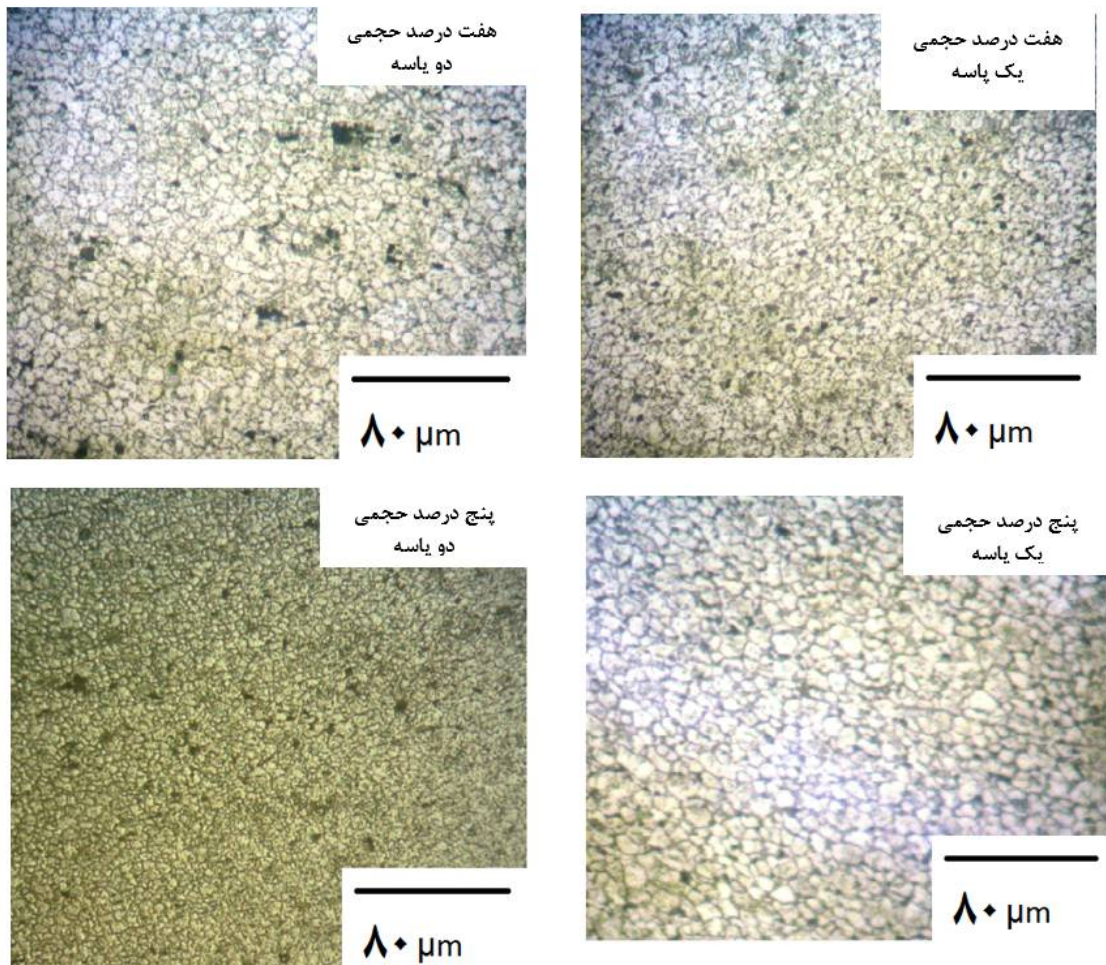


Fig. 8 microstructure of specimens

شکل 8 ریزساختار نمونه‌ها

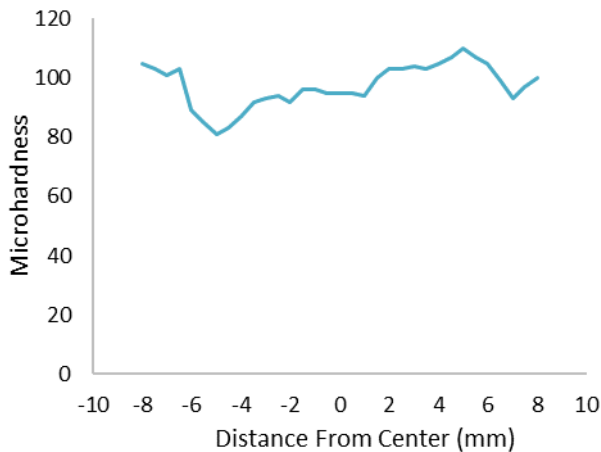


Fig. 10 Comparison of hardness profiles in different locations

شکل 10 پروفیل میکروسختی در نمونه جوشکاری شده یک پاسه بدون پودر بر حسب فاصله از مرکز جوش

جدول 5 مقایسه مقادیر سختی در ناحیه تحت تاثیر شانه برای نمونه‌های با پودر با 3% حجمی

Table 5 Comparison of micro hardness in shoulder affected zone for 3% Nano particle samples

تعداد پاس	درصد حجمی 3		
	ناحیه مورد بررسی		
	پیشرو	اغتشاش	پسرو
1	111/1	126/5	114
2	135	134/1	141/7
4	121/33	132/5	141/7

جدول 6 مقایسه مقادیر سختی در ناحیه تحت تاثیر شانه برای نمونه‌های با پودر با 5% حجمی

Table 6 Comparison of micro hardness in shoulder affected zone for 5% Nano particle samples

تعداد پاس	درصد حجمی 5		
	ناحیه مورد بررسی		
	پیشرو	اغتشاش	پسرو
1	112	132	113/77
2	135/38	145/35	137/16
4	122/5	146/86	1131/77

جدول 7 مقایسه مقادیر سختی در ناحیه تحت تاثیر شانه برای نمونه‌های با پودر با 7% حجمی

Table 7 Comparison of micro hardness in shoulder affected zone for 7% Nano particle samples

تعداد پاس	درصد حجمی 7		
	ناحیه مورد بررسی		
	پیشرو	اغتشاش	پسرو
1	128/3	152/8	139/5
2	132/6	148/8	153/3
4	130/88	149/6	131/77

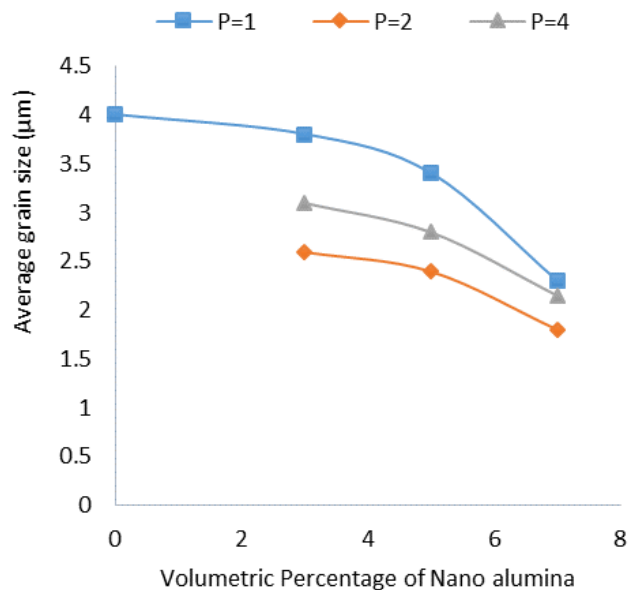


Fig. 9 Comparison of stir zone grain size in different passes in staid Nano particle of FSW

شکل 9 اندازه‌ی دانه در ناحیه اغتشاشی در حجم ثابت از نانوذرات در پاس مختلف جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

در پاس چهارم برای نمونه‌های با درصد‌های حجمی 3 و 5 اثر گرما بر اثر حضور نانو ذرات غلبه کرده و موجب افزایش میانگین اندازه دانه می‌گردد، ولی همچنان اندازه دانه از نمونه یک پاسه کمتر است.

3-2- میکروسختی سنجی جوش

سختی در ناحیه اتصال کامپوزیتی به اندازه‌ی دانه، چگالی نابجایی‌ها، نانو ذرات تقویتی و گرمای ورودی بستگی دارد. با توجه به رابطه هال-پیچ با کاهش اندازه‌ی دانه‌ها میزان سختی افزایش پیدا می‌کند [40]. در شکل 10 پروفیل میکروسختی (سطح مقطع عرضی) نمونه جوشکاری شده بدون حضور نانوذرات تقویتی نشان داده شده است. میزان سختی در سمت پیش روبه دلیل میزان حرارت ورودی بالاتر بیشتر از سمت پسرو است.

در جدول‌های 5 تا 7 مقایسه مقادیر سختی در ناحیه تحت تاثیر شانه برای نمونه‌های با پودر با هر سه درصد حجمی 3%، 5% و 7% گزارش شده است. وجود ذرات نانوالومینا با افزایش نرخ جوانه‌زنی در هنگام تبلور مجدد دینامیکی ماده و ایجاد خاصیت پینینگ موجب ریز دانه‌تر شدن نسبت به حالت اولیه می‌شود. همچنین میکروسختی با وجود این ذرات نسبت به نمونه بدون پودر افزایش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است وجود ذرات پودر در نمونه، موجب افزایش چگالی نابجایی‌ها و واپیچش ساختاری در آلومینیوم می‌شود.

جوشکاری شده یک پاسه با پودر نسبت به نمونه بدون حضور نانو ذرات با افزایش چشمگیری داشته است. زیرا در حالت عدم حضور نانوذرات تنها پارامتر تأثیرگذار گرمای ورودی است.

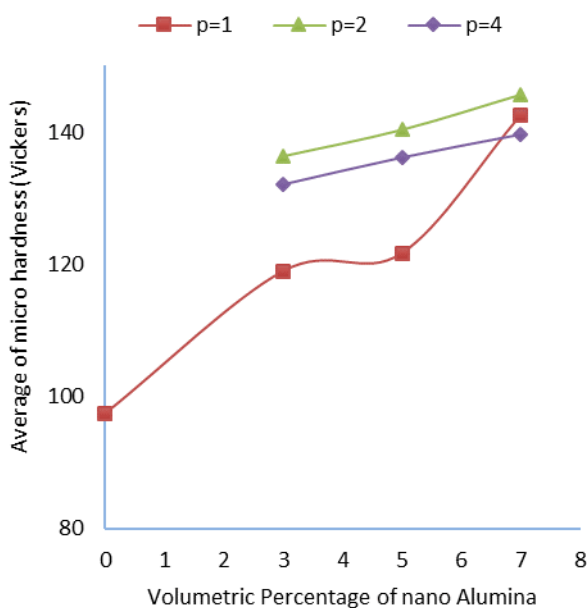


Fig. 11 Average micro hardness in stir zone in multi passes in staid Nano particle volume

شکل 11 میانگین میکروسختی در ناحیه اغتشاشی در پاس‌های مختلف جوش در حجم ثابت

در نمونه دو پاسه سختی به میزان کمی نسبت به یک پاسه افزایش داشته است. این افزایش ناشی از توزیع بهتر نانوذرات در زمینه‌ی آلومینیومی است. از طرفی گرمای ورودی بالا ناشی از بالا بودن نسبت سرعت چرخشی به سرعت پیشروی اجازه افزایش سختی بیشتر را نمی‌دهد. در نهایت در پاس چهارم جوشکاری گرمای ورودی بر اثر پینینگ ناشی از حضور نانوذرات غلبه کرده است و سختی نسبت به نمونه دو پاسه کاهش اندک داشته است.

3-2-2- تأثیر حجم ذرات بر رفتار میانگین میکروسختی نمونه‌های جوشکاری شده

یکی از عوامل تأثیرگذار در سختی نمونه‌ها، چگالی نابجایی‌ها است. علت تشکیل نابجایی‌ها اختلاف بین ضریب انبساط حرارتی زمینه آلومینیومی، نانوذرات آلومینا و همچنین تغییر شکل پلاستیک شدید طی فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی است. وجود نانو ذرات موجب افزایش نرخ جوانه‌زنی در هنگام تبلور مجدد دینامیکی شده و با ایجاد خاصیت پینینگ موجب ریزدانه‌تر شدن می‌شوند. نانو ذرات مانند نابجایی‌ها عمل می‌کنند و مانع رشد دانه می‌شوند. در نتیجه اندازه دانه کوچکتر شده و سختی طبق رابطه هال-پچ افزایش می‌یابد.

دلیل افزایش نابجایی‌ها را می‌توان اثر کوئنچ ناشی از تفاوت ضریب انتقال حرارت و ضریب انبساط حرارتی میان زمینه آلومینیومی، و ذرات آلومینا دانست. همچنین تفاوت در کرنش پلاستیک زمینه و کرنش الاستیک نانوپودر نیز در این شرایط اثر گذار است [41]. در نتیجه اضافه کردن پودر اثر کاهش سختی ناشی از کاهش چگالی نابجایی‌ها را از بین می‌برد. در ضمن سرعت پیشروی پایین (16 میلی‌متر بر دقیقه) منجر به توزیع و جدایش بهتر ذرات آلومینا در فاز زمینه گردید. این امر منجر به تشدید اثر پینینگ این ذرات گشته و اندازه‌ی دانه را به دلیل مقاومت بیشتر در مقابل لغزش مرز دانه‌ها بیشتر کاهش می‌دهد. این کاهش بیشتر میانگین اندازه دانه و اثر مقاومتی بیشتر ذرات نانوآلومینا در مقابل حرکت مرز دانه‌ها و نابجایی‌ها منجر به افزایش سختی نمونه‌ها می‌شود. در پروفیل سختی نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده یک پاسه در بعضی فواصل مقادیر سختی تغییر ناگهانی دارد که دلیل آن عدم توزیع یکنواخت ذرات در فاز زمینه می‌باشد. این تغییر ناگهانی در نمونه جوشکاری شده بدون حضور ذرات نیز در منطقه‌ی متأثر از حرارت دیده می‌شود که علت آن بزرگ شدن رسوبات در این ناحیه است.

3-2-1- تأثیر تعداد پاس بر رفتار میانگین میکروسختی نمونه‌های جوشکاری شده

در شکل 11 میانگین سختی در ناحیه‌ی اغتشاش برای درصدهای حجمی 3%، 5%، 7% و حالت بدون استفاده از نانوذرات تقویتی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در درصدهای حجمی ثابت از نانوذرات، میانگین سختی در ناحیه اغتشاش بیشتر از نمونه جوشکاری شده بدون حضور نانوذرات است. علت این رخداد سختی بالای نانو ذرات آلومینا می‌تواند باشد. در تمامی حالات، در ناحیه اغتشاش رسوبات حل می‌شوند. بنابراین رسوبات در اختلاف سختی بین نمونه‌ها تأثیر چشمگیری نخواهند داشت. اندازه‌ی دانه در نمونه‌ها با افزایش تعداد پاس در ناحیه اغتشاش کاهش می‌یابد. در حالی که از یک طرف انتظار می‌رود با توجه رابطه هال-پچ با کاهش اندازه‌ی دانه سختی نمونه‌ها افزایش یابد. نابجایی‌هایی موجب افزایش در سختی می‌شوند. که در نتیجه‌ی توزیع ناهمگن در یک پاس و همگن در چند زوج پاس از ذرات نانو در زمینه‌ی فلزی ایجاد می‌شوند. از طرف دیگر اثر آنیل شدن ناشی از گرمای ورودی موجب کاهش میزان سختی می‌شود. تا پاس چهارم اثر آنیلینگ بر پدیده ریز دانه شدن غالب می‌شود. در نتیجه از افزایش بیشتر سختی نمونه‌ها جلوگیری می‌کند. سختی میانگین در نمونه

موجب بهبود توزیع ذرات می‌شود. این ذرات با تشکیل یک کامپوزیت، به افزایش استحکام نمونه‌ها کمک می‌کنند. علاوه بر این با افزایش تعداد پاس، عیوب کوچک احتمالی که ممکن بود در نمونه باقی مانده باشد برطرف می‌شود. با بررسی سطح شکست نمونه جوشکاری شده با 7% حجمی نانوذرات در یک پاس جوشکاری هیچ اثری از گلوبی شدن مشاهده نشد. برعکس نمونه جوشکاری شده یک پاسه بدون پودر ذرات احتمالاً در منطقه ای تجمع پیدا کردند و زمینه را برای هسته‌سازی ترک و رشد آن فراهم نمودند.

شکل 12 استحکام کششی نمونه‌های جوشکاری شده در حجم ثابت از نانوذرات در پاس‌های مختلف جوشکاری یک پاس، دو پاس و چهار پاس را نشان می‌دهد. بیشترین استحکام کششی مرتبط با نمونه دو پاسه حاوی نانوذرات است. از شکل 12 می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد پاس جوشکاری مقاومت ذرات در برابر لغزش مرز دانه‌ها و حرکت نابجایی‌ها بیشتر شده است. علت این اتفاق توزیع بهتر ذرات نانوالومینا است. با افزایش تعداد پاس از یک به چهار امکان توده‌ای شدن و تجمع ذرات که مکان مناسبی برای رشد و گسترش ترک هستند، کمتر می‌شود. در درز جوش احتمال ایجاد تخلخل زیاد است. با افزایش تعداد پاس حجم تخلخل موجود در درز جوش کاهش می‌یابد که دلیل آن ایجاد پیوند مناسب بین ذرات نانوالومینا و زمینه‌ی آلومینیومی است [43].

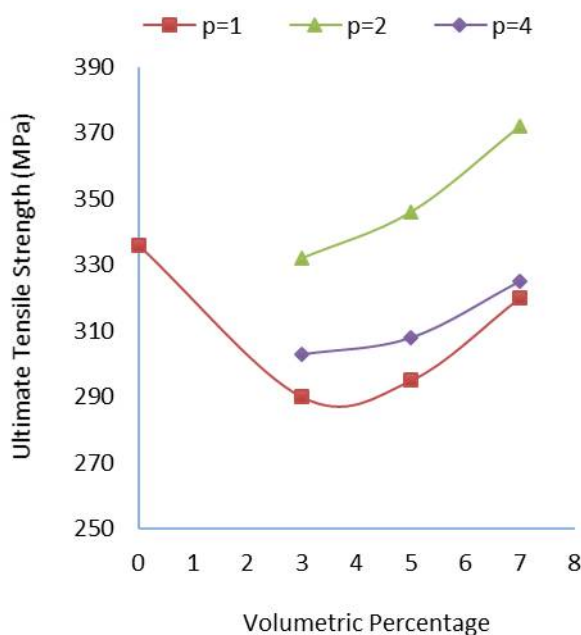


Fig. 12 Ultimate tensile strength of specimens in multi passes in staid Nano particle volume percentage

شکل 12 استحکام کششی نمونه‌های جوشکاری شده در پاس‌های مختلف در درصد حجم ثابت از نانو ذرات

اگر میزان نابجایی‌ها کم باشد اثر آن‌ها در سختی کمتر مشاهده می‌شود. بنابراین حجم ذرات تقویت کننده می‌تواند به عنوان یک عامل تأثیرگذار باشد. بر اساس آنچه در شکل 15 مشاهده می‌شود با افزایش درصد حجمی ذرات تقویتی سختی افزایش می‌یابد. بیشترین میزان افزایش سختی متعلق به نمونه دو پاسه با 7% حجمی ذرات تقویتی است. علت آن در توزیع بهتر نانوذرات در دو پاس جوشکاری می‌باشد. همچنین باید توجه داشت که سختی ذرات نانوالومینا به تنهایی از سختی زمینه آلومینیومی بالاتر است.

3-3- بررسی خواص کششی

استحکام نمونه جوشکاری شده یک پاسه بدون حضور نانوذرات 320 مگاپاسکال (64% استحکام ورق خام) بود. بررسی‌ها به‌وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) بر روی آلیاژ عملیات حرارتی پذیر نشان می‌دهد که در داخل ناحیه اغتشاش هیچ‌گونه رسوبی مشاهده نشده است [42]. شایان ذکر است که آلیاژ آلومینیوم 2024، استحکام خود را از عملیات حرارتی و رسوبات موجود می‌گیرد.

محل شکست نمونه‌های تست کشش بیانگر ضعیف‌ترین نقطه در نمونه‌ها است. تمام نمونه‌های جوشکاری شده با و بدون پودر از ناحیه متأثر از حرارت دچار شکست شدند. مطالعه‌ی محل شکست نمونه بدون پودر به یافتن راهکار مناسب برای بهبود استحکام ناحیه شکست کمک می‌کند. بررسی سطح شکست نمونه عاری از پودر نشانگر آن است که نمونه از سمت پیشرو شکسته است. این مطلب نشانگر آن است که خواص کششی جوش در دو سمت جوش در نمونه یک پاسه یکسان نیست. در سمت پیشرو خواص مکانیکی ضعیف‌تر است، زیرا بردارهای سرعت دورانی و پیشروی همدیگر را تقویت می‌کنند. در حالی که در سمت پس‌رو عکس این اتفاق به وقوع می‌پیوندد. البته مشاهده کمترین میزان سختی نیز در ناحیه‌ی متأثر از حرارت تأیید کننده این موضوع است. دلیل دیگری که می‌توان برای توضیح شکست در این ناحیه نام برد، تفاوت ساختاری بین دو ناحیه است. از طرفی اعمال گرمای ورودی به این ناحیه اجتناب‌ناپذیر است. چون برای تولید جوش سالم و سیلان بهتر ماده در مجاورت ابزار جوشکاری ضروری است.

3-3-1- تأثیر تعداد پاس جوش کاری بر استحکام کششی

نمونه‌های جوشکاری شده

افزایش تعداد پاس در حالتی که نمونه حاوی نانو ذرات است،

تقویت کننده این راهکار کمی متفاوت است. بطوری که از یک طرف گرمای ورودی موجب افزایش اندازه دانه‌ها می‌شود [44] و از طرف دیگر پدیده تحت عنوان پینینگ مانع از آن می‌گردد. به این معنی که وجود ذرات نانو تقویت کننده به عنوان سدی در برابر رشد دانه‌ها عمل می‌کنند [45].

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق خواص مکانیکی و متالورژیکی اتصالات جوشی بر روی ورق‌های AA2024 T6 با و بدون ذرات نانو آلومینا مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از آن به شرح زیر می‌باشد.

- افزایش تعداد پاس بر اندازه‌ی دانه در ناحیه اغتشاشی تأثیرگذار است. در هر سه درصد حجمی 3 و 5 و 7 با افزایش تعداد پاس تا پاس دوم میانگین اندازه‌ی دانه 28% کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش بیشتر تعداد پاس تا پاس چهارم در اثر غلبه اثر آنیلینگ این مقدار 16% افزایش داشت بطوری که همچنان اندازه دانه کمتر از نمونه یک پاسه بوده است.

- با افزایش درصد حجمی ذرات از 3% به 7%، میانگین اندازه‌ی دانه به طور متوسط 37% کاهش می‌یابد.

- در یک حجم ثابت از نانو ذرات با افزایش تعداد پاس جوش کاری از 1 به 2 ابتدا میانگین استحکام کششی 16% افزایش یافت. در ادامه با افزایش تعداد پاس از 2 به 4 پاس جوش کاری، میانگین استحکام کششی 10% کاهش داشت.

- با افزایش درصد حجمی نانو ذرات از 3% به 7%، افزایش 10% در میانگین استحکام کششی مشاهده شد.

- در تعداد پاس ثابت جوش کاری با حضور نانو ذرات، با افزایش درصد حجم نانو ذرات از 3% به 7% در هر سه حالت یک، دو و چهار پاس جوش کاری، میانگین سختی در ناحیه اغتشاش حدود 10% افزایش یافت.

- در جوش کاری با حضور نانو ذرات با افزایش تعداد پاس جوش کاری از 1 به 2 ابتدا میانگین سختی 10% افزایش یافته و در ادامه با افزایش تعداد پاس از 2 به 4، میانگین سختی به مقدار جزئی کاهش می‌یابد. در تمامی موارد میانگین سختی در نمونه جوش کاری شده با حضور نانو ذرات بیشتر از نمونه جوش کاری شده بدون حضور نانو ذرات است.

- بهترین خواص مکانیکی و متالورژیکی در این پژوهش متعلق به نمونه 2 پاسه با 7 درصد نانو ذرات بود. در مقایسه حالت بدون نانو ذره با بهترین حالت، اندازه دانه 55% کاهش، استحکام کششی حدود 11 درصد افزایش و میانگین سختی 48% افزایش مشاهده شد.

با افزایش تعداد پاس اندازه‌ی دانه در نمونه‌های تا دو پاس کاهش چشمگیری داشته و در پاس چهارم تغییرات چندانی نداشته است. این کاهش اندازه‌ی دانه موجب بالا رفتن استحکام نمونه های دو پاسه می‌شود. در نمونه‌های چهار پاسه استحکام مجدداً پایین آمده است. این در حالی است که هم توزیع ذرات بهبود داشته است و هم اندازه‌ی دانه کاهش یافته است. علت این امر غلبه گرمای حاصل از جوشکاری بر عوامل ریزدانگی و بهبود توزیع ذرات است. در نهایت رشد بیش از حد رسوبات موجب افت ناگهانی استحکام می‌گردد. حضور نانو ذرات تا دو پاس موجب کوچک نگه داشتن رسوبات و شکسته شدن آن‌ها به رسوبات کوچکتر است. با افزایش تعداد پاس از دو به چهار گرمای ورودی بر ریزدانگی و بهبود توزیع ذرات غلبه کرده و اثر آنیلینگ موجب کاهش استحکام می‌گردد.

در پایان می‌توان نتیجه گرفت که در جوشکاری آلومینیوم 2024 در هر سه درصد حجمی 3% و 5% و 7% با افزایش تعداد پاس جوشکاری تا 2 پاس افزایش در میزان استحکام کششی نمونه‌ها مشاهده می‌شود ولی در پاس چهارم استحکام کششی کاهش پیدا می‌کند.

3-2-3- تأثیر حجم ذرات بر استحکام کششی نمونه‌های جوشکاری شده

در تعداد پاس جوشکاری ثابت، تغییر حجم نانو ذرات تأثیر چشمگیری بر میزان استحکام دارد. به گونه‌ای که در 2 پاس جوشکاری نمونه حاوی 7% نانو ذرات آلومینا استحکام نهایی کششی حدوداً 10% بالاتر از نمونه بدون پودر بوده است. تغییر حجم نانو ذرات در نوع شکست نمونه‌ها نیز تأثیر چشمگیری داشته است. شکست نمونه‌ها با درصد حجمی نانو ذرات بیشتر منجر به شکست ترد شده و تعداد دیمپل‌ها را کاهش داده است. درصد حجمی نانو ذرات از 3% به 7% موجب بهبود در استحکام کششی می‌گردد. این افزایش ممکن است به دلیل سختی بالا و حضور بیشتر نانو ذرات آلومینا که مقاومت بیشتری در مقابل لغزش مرز دانه‌ها و حرکت نابجایی‌ها ایجاد می‌کنند و منجر به افزایش در استحکام کششی و کاهش درصد ازدیاد طول نمونه‌ها می‌گردد.

در جوش کاری FSW بصورت سنتی (بدون حضور نانو ذرات تقویت کننده) پارامتر فرایندی موثر در ایجاد حرارت ورودی سرعت دورانی است. در این حالت برای کاهش اندازه دانه راه‌های مختلفی از جمله اعمال خنک کننده در حین انجام فرایند و یا استفاده از مبرد است. در جوش کاری با حضور ذرات

- [8] Farhang, M., et al., Effect of the FSW Parameters on the Residual Stress Distribution in Al 2024-T6. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2021. 15(1): p 7684-7694.
- [9] Sattari-Far, I.a. and M. Farahani, Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2009. 86(11): pp. 723-731.
- [10] Akbari, D., M. Farahani, and N. Soltani, Effects of the weld groove shape and geometry on residual stresses in dissimilar butt-welded pipes. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2012. 47(2): pp. 73-82.
- [11] Sabokrouh, M. and M. Farahani, Experimental study of the residual stresses in girth weld of natural gas transmission pipeline. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2019. 5(2): pp. 199-206.
- [12] Ebrahimi, S., M. Farahani, and D. Akbari, The influences of the cyclic force magnitude and frequency on the effectiveness of the vibratory stress relief process on a butt welded connection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. 102(5): pp. 2147-2158.
- [13] Zamanpour, A., et al., Experimental Study on the Effects of Harmonic Vibration on the Stress Relief of the Butt Welded AISI 1021 Pipes. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 2020. 7(2): pp. 1-7 (in Persian).
- [14] Andalib, H., M. Farahani, and M. Enami, Study on the new friction stir spot weld joint reinforcement technique on 5754 aluminum alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018. 232(17): pp. 2976-2986.
- [15] Shahmirzaloo, A., M. Farahani, and M. Farhang, Evaluation of local constitutive properties of Al2024 friction stir-welded joints using digital image correlation method. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2020: p. 0309324720981201.
- [16] Hajideh, M.R., M. Farahani, and N.M. Ramezani, Reinforced dissimilar friction stir weld of polypropylene to acrylonitrile butadiene styrene with copper nanopowder. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018. 32: pp. 445-454.
- [17] Mohammadi, J., et al., Friction stir welding joint of dissimilar materials between AZ31B magnesium and 6061 aluminum alloys: Microstructure studies and mechanical characterizations. *Materials Characterization*, 2015. 101: pp. 189-207.
- [18] Azizieh, M., A. Kokabi, and P. Abachi, Effect of rotational speed and probe profile on microstructure and hardness of AZ31/Al₂O₃ nanocomposites fabricated by friction stir processing. *Materials & Design*, 2011. 32(4): pp. 2034-2041.
- [19] Tabasi, M., et al., Dissimilar friction stir welding of 7075 aluminum alloy to AZ31 magnesium alloy using SiC nanoparticles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016. 86(1): pp. 705-715.

5- فهرست علائم

AA	آلیاژ کار شده آلومینیوم
O	آنیل
T6	نوع عملیات حرارتی (محلوس سازی شده و سپس عملیات پیر شده به صورت مصنوعی)
P	تعداد پاس
V	درصد حجمی نانو ذرات
BM	فلز پایه
HAZ	منطقه متأثر از حرارت
TMAZ	منطقه ترمومکانیکی
SZ	منطقه اغتشاش

6- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از زحمات زنده یاد دکتر محمد کاظم بشارتی گیوی، آقای دکتر میلانی و همچنین مسئولان و کارشناسان مرکز پژوهش کاربردی جوش و آزمون‌های غیر مخرب (TWN) به جهت همکاری‌های فراوان در راستای انجام این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آورند.

7- مراجع

- [1] Besharati-Givi, M.-K. and P. Asadi, *Advances in friction-stir welding and processing*. 2014: Elsevier.
- [2] Mathers, G., *The welding of aluminium and its alloys*. 2002: Woodhead publishing.
- [3] Mishra, R.S. and Z. Ma, *Friction stir welding and processing. Materials science and engineering: R: reports*, 2005. 50(1-2): pp. 1-78.
- [4] Zargar, S.H., M. Farahani, and M.K.B. Givi, Numerical and experimental investigation on the effects of submerged arc welding sequence on the residual distortion of the fillet welded plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2016. 230(4): pp. 654-661.
- [5] Enami, M., M. Farahani, and M. Farhang, Novel study on keyhole less friction stir spot welding of Al 2024 reinforced with alumina nanopowder. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. 101(9): pp. 3093-3106.
- [6] Reynolds, A.P., W. Lockwood, and T. Seidel. *Processing-property correlation in friction stir welds. in Materials science forum*. 2000. Trans Tech Publ.
- [7] Tang, W., et al., Heat input and temperature distribution in friction stir welding. *Journal of Materials Processing and Manufacturing Science*, 1998. 7: pp. 163-172.

- AA7075-T6 aluminum alloy joints. Modares Mechanical Engineering, 2014. 13(12): pp. 56-66(in Persian).
- [33] Saeidi, M., et al., Study on ultrafine-grained aluminum matrix nanocomposite joint fabricated by friction stir welding. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2016. 230(1): pp. 311-318.
- [34] Krishna, G.G., P.R. Reddy, and M.M. Hussain, Effect of tool tilt angle on aluminum 2014 friction stir welds. Global Journal of Research In Engineering, 2015.
- [35] Leonard, A. Microstructure and ageing behaviour of FSWs in aluminium alloys 2014A-T651 and 7075-T651. in Proc. 2nd Int. Symp. on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden. 2000.
- [36] Threadgill, P., et al., Friction stir welding of aluminium alloys. International Materials Reviews, 2009. 54(2): pp. 49-93.
- [37] Pasebani, S., I. Charit, and R.S. Mishra, Effect of tool rotation rate on constituent particles in a friction stir processed 2024Al alloy. Materials Letters, 2015. 160: pp. 64-67.
- [38] Dolatkhan, A., et al., Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing. Materials & Design, 2012. 37: pp. 458-464.
- [39] Yadav, D. and R. Bauri, Nickel particle embedded aluminium matrix composite with high ductility. Materials Letters, 2010. 64(6): pp. 664-667.
- [40] Shamsipur, A., S.F. Kashani-Bozorg, and A. Zarei-Hanzaki, The effects of friction-stir process parameters on the fabrication of Ti/SiC nanocomposite surface layer. Surface and Coatings Technology, 2011. 206(6): pp. 1372-1381.
- [41] Rhodes, C., et al., Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. Scripta materialia, 1997. 36(1): pp. 69-75.
- [42] Sato, Y.S. and H. Kokawa, Distribution of tensile property and microstructure in friction stir weld of 6063 aluminum. Metallurgical and Materials Transactions A, 2001. 32(12): pp. 3023-3031.
- [43] Mishra, R.S., Z. Ma, and I. Charit, Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite. Materials Science and Engineering: A, 2003. 341(1-2): pp. 307-310.
- [44] Gharacheh, M.A., et al., 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, 2006. 46(15): pp. 1983-1987.
- [45] El-Rayes, M.M. and 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, 2012. 212(5): pp. 1157-1168.
- [20] Farzami, M., et al., Friction stir weld of AZ91 magnesium alloy with and without nano-SiC particle. JOM, 2019. 71(11): pp. 4171-4179.
- [21] Muruganandam, D., D. Raguraman, and L. Kumaraswamidhas, Effect of post-welding heat treatment on mechanical properties of butt FSW joints in high strength aluminium alloys. 2015.
- [22] Jamalian, H.M., et al., Study on the effects of friction stir welding process parameters on the microstructure and mechanical properties of 5086-H34 aluminum welded joints. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016. 83(1-4): pp. 611-621.
- [23] Elyasi, M., H.A. Derazkola, and M. Hoseinzadeh, Study on joint zone Microstructure Evolution and Hardness in Friction Stir welding of AA1100 Aluminum alloy to A441 AISI steel. Modares mechanical engineering, 2015. 14(14): pp. 97-107(in Persian).
- [24] Mishra, R.S. and M.W. Mahoney, Friction stir welding and processing, ASM International. 2007, Materials Park, Ohio.
- [25] Kwon, Y., I. Shigematsu, and N. Saito, Mechanical properties of fine-grained aluminum alloy produced by friction stir process. Scripta materialia, 2003. 49(8): pp. 785-789.
- [26] Bahrami, M., K. Dehghani, and M.K.B. Givi, A novel approach to develop aluminum matrix nanocomposite employing friction stir welding technique. Materials & Design, 2014. 53: pp. 217-225.
- [27] Barmouz, M. and 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, 2011. 42(10): pp. 1445-1453.
- [28] Hajideh, M.R., et al., Investigation on the effects of tool geometry on the microstructure and the mechanical properties of dissimilar friction stir welded polyethylene and polypropylene sheets. Journal of Manufacturing Processes, 2017. 26: pp. 269-279.
- [29] Patil, H. and S. Soman, Experimental study on the effect of welding speed and tool pin profiles on AA6082-O aluminium friction stir welded butt joints. International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010. 2(5): pp. 268-275.
- [30] Elangovan, K. and V. Balasubramanian, Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. Materials Science and Engineering: A, 2007. 459(1-2): pp. 7-18.
- [31] Nazari, M., et al., Investigation on the effects of using Nano-size Al_2O_3 powder on the mechanical and microstructural in the multi-passes continuous friction stir welding of the 2024-T6. Modares Mechanical Engineering, 2015. 14(12) (in Persian).
- [32] Azizi, A., Influence of friction stir welding process and tool parameters on strength properties of