نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال چهارم، شماره 2، پاییز و زمستان1397، صفحه 57-47

جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت $Al-Al_2O_3$ با اندازه دوگانه از تقویت کننده آلومینا تولید شده به روش پلاسمای قوس الکتریکی

بهزاد صادقی[1]، مرتضی شمعانیان[2] ، فخرالدین اشرفی زاده[2]، پاسکواله کاوالیره[3]

1- مرکز تحقیقات فناوری و فراورش مواد نو،دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نیشابور، خراسان رضوی، ایران

2- دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، 84156-83111، ایران

3- گروه مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه سالنتو، لچه، 73100، ایتالیا

(دریافت مقاله: 1397/01/19 ؛ پذیرش مقاله: 1397/03/01)

چکیده

اتصال حالت جامد نانوکامپوزیت های ساخته شده به روش متالورژی پودر و تف جوشی شده به روش پلاسمای قوس الکتریکی به روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مطالعه شده است. نانوکامپوزیت به روش آسیاب کاری مکانیکی و سپس تف جوشی به روش پلاسمای قوس الکتریکی تولید شده اند. خواص مکانیکی، ریزساختاری اتصالات به عنوان تابعی از پارامترهای فرایندی مختلف مانند سرعت خطی و دورانی ابزار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت های ساخته شده به روش متالورژی پودر و با توزیع اندازه دوگانه از تقویت کننده Al_2O_3، دارای یک پنجره کاری است که متاثر از حرارت ورودی جوشکاری می باشد. ارزیابی اتصالات نشان داد که خواص ریزساختاری و مکانیکی آنها متاثر از میزان حرارت ورودی تولید شده طی فرایند جوشکاری است. مشخص شد که تبلورمجدد دینامیکی باعث کاهش اندازه دانه آلومینیوم در ناحیه اغتشاش می شود. ضمن اینکه مشخص شد که نانوذرات می توانند اثر قفل کنندگی برای جلوگیری از رشد دانه های متبلور شده ناشی از تبلورمجدد دینامیکی شوند.

کلمات کلیدی: نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم، پلاسمای قوس الکتریکی، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، حرارت ورودی، اثر قفل کنندگی.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: b.sadeghi@sjtu.edu.cn

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

Friction stir welding of Al-Al_2O_3 nanocomposite with bimodal size of alumina reinforcement produced by spark plasma sintering

B. Sadeghi[1], M.Shamanian[2], F.Ashrafizadeh[2], P. Cavaliere[3]
1-New Materials Technology and Processing Research Center, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran
2-Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, 84156-83111, Iran
3-Department of Innovation Engineering, University of Salento, Lecce, Italy

(Received 8 April 2018 ; Accepted 22 May 2018)

Abstract
Solid state joining of powder metallurgy (P/M) processed and sintered by spark plasma sintering through friction stir welding (FSW) was studied. The nanocomposites were prepared via mechanical milling followed by spark plasma sintering. The microstructural and mechanical of the joints were evaluated as a function of the different processing parameters such as rotating and advancing speeds of the tool. The achieved finding revelled that the FSW of the nanocomposites produced by P/M containing bimodal sized Al_2O_3 reinforcement have a working window are affected by the heat input. The joint evolution revelled that the microstructure and mechanical properties of those was related to the generated heat input during the welding. It is known that dynamic recrystallization (DRX) caused grain size refinement of aluminium into stir zone. Meanwhile, it was revealed that the pinning effect of Al_2O_3 nanoparticles retarded grain growth of the recrystallized grains caused by DRX.

Keywords: Aluminum matrix nanocomposite, Spark plasma sintering,Friction stir welding, Heat input, Pinning effect.

1- مقدمه
کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم، یک دسته از کامپوزیت‌های زمینه فلزی هستند که دارای خواصی چون چگالی پایین، استحکام بالا، ضریب انبساط حرارتی کنترل‌شده، مقاومت به خستگی بالا و پایداری مناسب در دماهای بالا می‌باشند. کاربرد این دسته از مواد در صنایع مختلفی مانند خودرو، هوافضا، نظامی، ورزشی و... ، به دلیل نیاز به اجزا با نسبت استحکام به وزن بالا(استحکام ویژه بالا) رو به افزایش است. بهبود بیشتر در خواص ذکر شده در بالا ممکن است در کامپوزیت‌هایی با توزیع اندازه دوگانه از یک تقویت کننده حاصل شود. به منظور تهیه این نوع نانوکامپوزیت ها دو رویکرد متالورژی پودر (حالت جامد) و ریخته گری (حالت مذاب) وجود دارد. توزیع مطلوب تقویت کننده در زمینه و همچنین حداقل میزان واکنش بین تقویت کننده و زمینه باعث شده است که تکنیک های ساخت نانوکامپوزیت ها به روش متالورژی پودر بیشتر مورد توجه قرار گیرد. با این حال، جوشکاری این دسته از مواد به سایر مواد کامپوزیتی از مهمترین چالش‌های این حوزه است. وجود مشکلات متعدد در جوشکاری ذوبی قطعات ساخته شده به روش متالورژی پودر مانند رشد بیش از حد اندازه دانه در ناحیه جـوشکاری، بروز واکنش‌های ناخواسته بین مـذاب و زمینه، تخلخل موجود در ناحیه ذوب، اختلاط نامناسب تقویت‌کننده و زمینه، شکل‌گیری یوتکتیک‌های اضافی و همچنین کلوخه‌ای شدن نانو ذرات تقویت‌کننده منجر به توسعه فرایندهای جوشکاری حالت‌جامد جهت اتصال این دسته از مواد شده است. جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی یکی از مهم‌ترین روش‌های اتصال حالت جامد برای اتصال کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی مخصوصا زمینه آلومینیوم است. معمولاً ذرات تقویت‌کننده با اندازه میکرومتر، جهت بهبود استحکام و مدول الاستیک زمینه آلومینیومی استفاده می‌شود. این در حالی است که کاهش چشمگیری در شکل‌پذیری اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر، استفاده ازتقویت‌کننده‌هایی با اندازه نانو ضمن اینکه می‌تواند باعث افزایش خواص مکانیکی شود، می‌تواند حداقل تاثیر منفی را بر شکل‌پذیری نانوکامپوزیت داشته باشد. با این حال کلوخه‌ای شدن نانوذرات تقویت‌کننده در مقدار بیش‌از 4درصدوزنی، مهمترین محدودیت در افزایش مدول، استحکام و حتی سختی نانوکامپوزیت می‌باشد. بنابراین، ترکیب مقدار مشخصی از تقویت‌کننده‌های فوق ریز با تقویت کننده‌های با اندازه میکرو احتمال می‌رود که تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی داشته باشد. از اینرو در سال های اخیر، برخی از پژوهشگران تحقیقات

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

خود را روی ساخت کامپوزیت‌های حاوی تقویت‌کننده‌هایی با توزیع اندازه دو یا سه گانه متمرکز کرده‌اند [1و2]. با وجود این پژوهش‌ها، جوشکاری حالت جامد این نانوکامپوزیت ها کمتر مورد توجه بوده است. از آنجاییکه روش تولید نانو کامپوزیت می‌تواند نقش بسزایی در میزان کلوخه‌ای شدن تقویت کننده‌ها داشته باشد، انتخاب روش تولید از اهمیت دوچندانی برخوردار است. پژوهش‌های صورت گرفته خود گویای این واقعیت است که تمرکز مطالعات، بیشتر بر ساخت کامپوزیت‌هایی زمینه فلزی (مخصوصا زمینه آلومینیوم و منیزیم) با یک نوع تقویت کننده و یا چند نوع تقویت کننده به روش متالورژی پودر انجام شده است [1و2]. هدف از انجام این پژوهش، اتصال این دسته از نانوکامپوزیت‌های حاوی از نانو ومیکروذرات تقویت کننده میباشد. از این رو، در این پژوهش تمرکز اصلی بر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم ساخته شده به روش متالورژی پودر تف جوشی شده با روش قوس پلاسمای الکتریکی می باشد. علاوه بر این ریزساختار و برخی از خواص مکانیکی مواد قبل و بعد از جوشکاری بررسی و مطالعه می‌شود.

2- روش آزمایش

2-1- آسیاب کاری مکانیکی

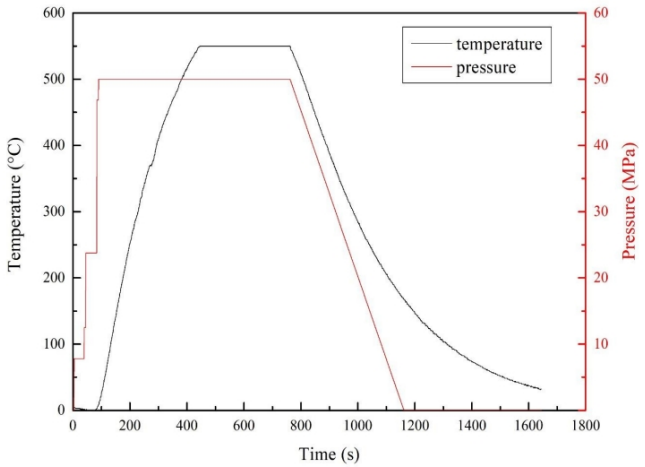
پودرهای اولیه مورد استفاده در این پژوهش، آلومینیوم و آلومینا می‌باشند. کلیه مشخصات این پودرها در جدول(1) آورده شده است.

جدول1- مشخصات پودرهای اولیه

ماده	D50	شکل ذرات	خلوص	شرکت سازنده
(μm)Al	۴۰	تقریبا کروی	>99.8%	ECKA, Germany
Al_2O_3 (μm)	۵	کروی	99%	Feurth, Germany
Al_2O_3 (nm)	۸۰	تقریبا کروی	99.8%	Evonik Industries, Germany

فرایند آسیاب کاری به منظور شکسته شدن کلوخه‌های نانوذرات آلومینا و همچنین مخلوط‌سازی پودر نانو و میکروذرات آلومینا با پودر آلومینیوم انجام شد. فرایند آسیاب کاری مکانیکی در شرایط سرعت دورانی300rpm برای محفظه، نسبت گلوله به پودر 10:1، اتمسفر آرگون با خلوص 99/9، دمای محیط(25° C) و زمان 2 ساعت انجام شد.

کدگذاری نمونه‌ها به این صورت است که در نمونه Al-28Al_2O_3 حاوی 2 درصد وزنی نانوذرات آلومینا، 8 درصد وزنی میکروذرات آلومینا و 90 درصد وزنی پودر آلومینیوم می باشد. تف جوشی نمونه ها به روش پلاسمای قوس الکتریکیدر فشار اعمالی 50 MPa، دمای تف جوشی 500 سانتیگراد و زمان نگهداری در دمای تف جوشی 300 ثانیه انجام شد(شکل1).جنس ابزار مورد استفاده برای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، فولاد ابزار H13 بود که دارای قطر شانه 18 mm و پین مخروطی رزوه دار با طول هرگام رزوه 0/6 میلیمتر می‌باشد.



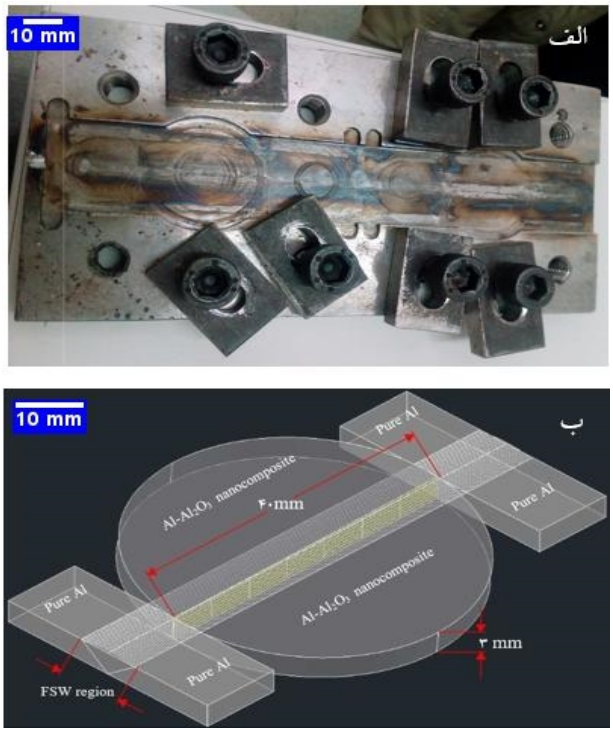
شکل1- دما و فشار اعمال شده طی فرایند قوس الکتریکی پلاسما.

با توجه به شکل خاص نمونه های حاصل از قوس الکتریکی پلاسما، نگهدارنده نمونه یا فیکسچر با طرح خاص از جنس فولاد ساده کربنی برای قرارگیری نمونه ها بر روی آن در حین فرایند جوشکاری نمونه‌ها طراحی شد(شکل2-الف،2-ب).

جهت انجام جوشکاری، ابتدا نمونه های نانوکامپوزیتی به دو نیمه مساوی به وسیله دستگاه وایرکات در راستای سطح مقطع، خط زرد رنگ در شکل(2-ب)، برش خوردند. در ادامه بر اساس اتصال لب به لب این دو نیمه نانوکامپوزیتی تحت فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی قرارگرفتند. آماده سازی نمونه‌ها برای بررسی‌های ریزساختاری، فیزیکی و مکانیکی، توسط یک سری از کاغذهای سنباده زنی با ذرات ساینده کاربید سیلیسیم(#120-#3000) انجام شد. جهت بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی از یک ماشین سایش یونی با محدوده ولتاژ 2-5kVو زاویه7 درجه برای پرتو یون،استفاده شد. اندازه‌گیری چگالی نمونه‌های تف جوشی شده، مطابق با

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

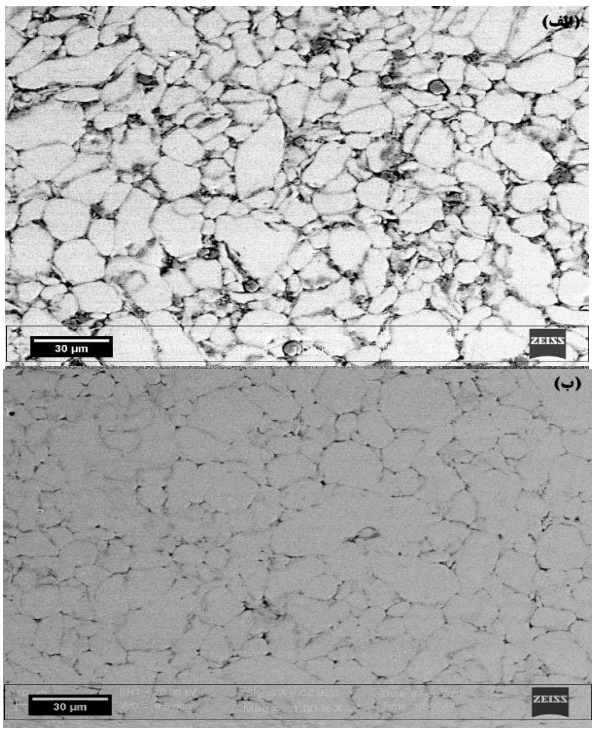
استاندارد ASTM B962 به روش ارشمیدس انجام شد. از آنالیزهای پراش الکترون‌های برگشتی و میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور بررسی های ریزساختاری استفاده شد. آزمون کشش در دمای 25 °C و بادستگاه Hounsfield H50KS و با نرخ کرنش $10^{-4}s^{-1}$ بر مبنای استاندارد ASTM E8 [3] انجام گرفت.به منظور انجام آزمون ریزسختی از دستگاه Akashi مجهز به فرورنده ویکرز و با نیروی 50 نیوتن و فاصله زمانی 15 ثانیه استفاده شد.



شکل2-الف) طرح نگهدارنده نمونه ها برای جوشکاری
ب) شماتیک یک نمونه پس از جوشکاری؛ قابل ذکر است که نمونه‌های SPS شده قبل از جوشکاری به دو قسمت مساوی تقسیم شده اند(خط زرد رنگ بدین منظور رسم شده است).

3- نتایج و بحث

شکل(3-الف)، ریزساختار نانوکامپوزیت$Al\text{-}4n6mAl_2O_3$ ساخته شده به روش پلاسمای قوس الکتریکی را نشان می دهد. به منظور مقایسه، ریزساختار آلومینیوم خالص در شکل(3-ب)، آورده شده است. جریان الکتریکی مجبور به عبور از طریق نقاط تماس بین ذرات پودر می‌باشد. ولتاژ بین ذرات و نقاط تماس آنها آنقدر افزایش می یابد که باعث تولید جرقه و دماهای خیلی بالای موضعی می شود. علاوه بر این، فشار موضعی تولید شده در نقاط تماس بین ذرات پودر به دلیل کاهش سطح مقطع می‌تواند تا چند صد برابر فشار اولیه برسد [1و4].بنابراین، فشارهای موضعی تولید شده در نقاط تماس بین ذرات پودر، باعث شکسته شدن لایه اکسیدی و ایجاد اتصالات مستقیم فلز به فلز، در اینجا آلومینیوم به آلومینیوم، می‌شود [4-7]. به دلیل ایجاد دماهای موضعی بالا، نفوذ اتمی در این محل‌ها تسهیل و بنابراین با شکل گیری گلویی‌هایی بین ذرات آلومینیوم، چگالی افزایش می‌یابد.



شکل3-الف)تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نانوکامپوزیت $Al\text{-}4n6mAl_2O_3$ ساخته شده به روش قوس الکتریکی پلاسما
ب)تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی آلومینیوم خالص ساخته شده به روش قوس الکتریکی پلاسما

به عبارت دیگر، نانوذرات آلومینا به دلیل اندازه کوچکشان می‌توانند در حفرات شکل گرفته حین چگالش بین ذرات آلومینیوم توزیع شوند. از طرفی دیگر، به دلیل بالاتر بودن میزان نفوذ اتمی در نانوذرات نسبت به میکروذرات آلومینا، بدیهی است که انتظار اتصالات متالورژیکی مطلوب‌تری بین نانوذرات آلومینا و ذرات آلومینیوم می‌رود. در نسبت درصدهای وزنی بالاتر از 4:6 برای نانو به میکروذرات آلومینا، به دلیل

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

شکل‌گیری کلوخه هایی از نانوذرات آلومینا، تغییر شکل پلاستیک موضعی ذرات آلومینیوم طی فرایند آسیاب کاری مکانیکی محدود شده و بنابراین با ایجاد شبکه هایی از کلوخه‌های فاز ترد آلومینا بر روی سطح ذرات آلومینیوم و حتی مرزدانه های آنها علاوه بر ایجاد موانعی برای عبور جریان الکتریکی حین فرایند تف جوشی، باعث کاهش اتصال بین ذرات آلومینیوم و در نتیجه مانع از شکل گیری گلویی بین آنها می‌شود [6-10]. استفاده از سرعت حرارت دهی و بازده بالای انتقال حرارت در تف جوشی پلاسمای قوس الکتریکی باعث تولید موادی با چگالی بالا در مدت زمان کوتاهی می‌شود. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت مورد مطالعه در این پژوهش در جدول(2) آورده شده است. نتایج نشان داد که خواص مکانیکی مانند تنش تسلیم، استحکام کششی و همچنین سختی در ابتدا با افزایش نسبت نانو به میکروذرات آلومینا، افزایش می‌یابد و پس از گذراندن یک پیک در نسبت های بالاتر از ذرات آلومینا، این خواص افت پیدا می‌کنند. این نتایج در تطابق کامل با مطالعات دیگر می‌باشد[6 و11-17].

جدول2- خواص مکانیکی نانوکامپوزیت $Al-Al_2O_3$

ماده	استحکام تسلیم(MPa)	استحکام کششی(MPa)	سختی (HV)
Al-10m Al_2O_3	۵۴	۷۵	۶۵
Al-28Al_2O_3	۵۸	۷۹	۷۲
Al-46Al_2O_3	۶۶	۸۶	۷۸
Al-64Al_2O_3	۳۲	۴۲	۴۸
Pure Al	۲۹	۴۹	۳۹

در این مقاله سرعت خطی جوشکاری (V)، سرعت دورانی ابزار(W) و همچنین نسبت نانو به میکروذرات آلومینا در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت های Al- Al_2O_3 در نظرگرفته شد. جداول(3و4)که پس از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانو کامپوزیت های Al-2n8mAl_2O_3 و Al-4n6m Al_2O_3 به دست آمده است، نشان داد که امکان جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت های متالورژی پودر با توزیع دوگانه از تقویت کننده‌ها در همه سرعت‌های چرخشی و خطی ابزار میسر نیست. معیار اصلی در انتخاب جوش ها به عنوان مطلوب، (OK)، و یا معیوب بودن آنها، (F)، مورد پذیرش بودن سطح و ظاهر آنها است، به‌طوریکه جوش‌هایی که دارای سطوحی کاملا صاف، بدون هرگونه ناپیوستگی، ترک و حفره بودند به عنوان جوش‌های مورد قبول اندیس OK به خود نسبت دادند.

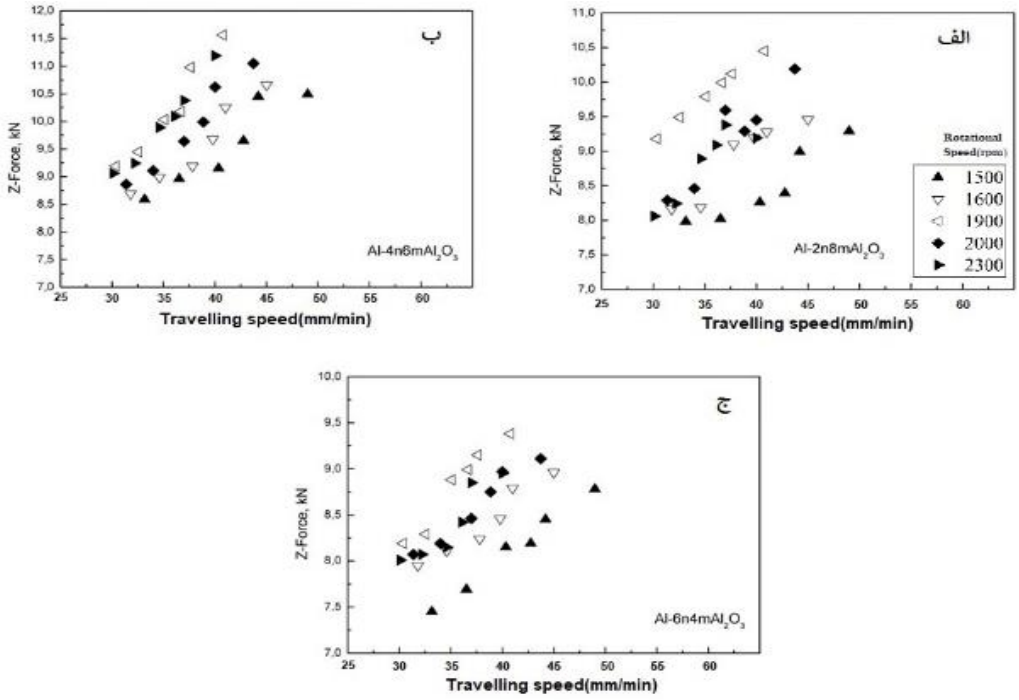
این درحالی است که سایر جوش ها که دارای حداقل یکی از این عیوب بودند، اندیس نامطلوب بودن یا F گرفتند. جدول(5) نشان‌دهنده ی حرارت ورودی (H.I) تولید شده از طریق اصطکاک بین شانه ابزار/سطح نمونه بر اساس رابطه (1) می‌باشد[20]؛

$$HI = \frac{2\pi}{3}\mu \times P \times W \times V \times R \qquad (1)$$

جاییکه μ ضریب اصطکاک، W و V به ترتیب سرعت دورانی و خطی ابزار، P نیروی اعمالی در راستای محورZ و R شعاع شانه ابزار هستند. همانطور که از نتایج جدول(5) مشخص است با افزایش نسبت W/V حرارت ورودی افزایش می‌یابد و بنابراین بیشینه دمای ایجاد شده در ناحیه جوشکاری نیز، افزایش می یابد. چنین روندی در جدول(5) برای سرعت دورانی 2000 rpm نسبت به سرعت دورانی 1900 rpm برای نانوکامپوزیت Al-2n8mAl_2O_3 مشاهده شد. افزایش بیشتر سرعت دورانی به مقادیر بالای 1900rpm، می تواند منجر به کاهشی در مقدار سختی ناحیه اغتشاش شود که ناشی از اثر آنیل شدن این ناحیه در حرارت های ورودی بالای تولید شده است. پدیده رشد دانه آلومینیوم به عنوان نتیجه ای از آنیل شدن در حرارت های ورودی خیلی بالا، مهمترین دلیل این کاهش سختی است.

شکل(4) نیروهای ثبت شده برروی ابزار حین جوشکاری نانوکامپوزیت های $Al-Al_2O_3$ تولید شده در این پژوهش است. شکل(4) نشان می دهد که همه نانوکامپوزیت های تولیدی رفتاری مشابه را نشان داده، به طوریکه در یک سرعت خطی ثابت، با افزایش سرعت دورانی تا1900 rpm، نیروی عمودی لازم جهت جوشکاری افزایش می یابد که این را می‌توان به تغییر شکل و امتزاج مناسب مواد در معرض اغتشاش نسبت داد. این مورد شرایط مطلوبی را برای هم توزیع همگن تقویت‌کننده‌ها در آن ناحیه و هم اتصال قطعات به همدیگر فراهم می‌کند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]



شکل4-نیروی جوشکاری در جهتz (F_z) به عنوان تابعی از سرعت خطی طی فرایند جوشکاری؛ (الف) $Al\text{-}28Al_2O_3$، (ب)$Al\text{-}46Al_2O_3$، (ج)$Al\text{-}64Al_2O_3$.

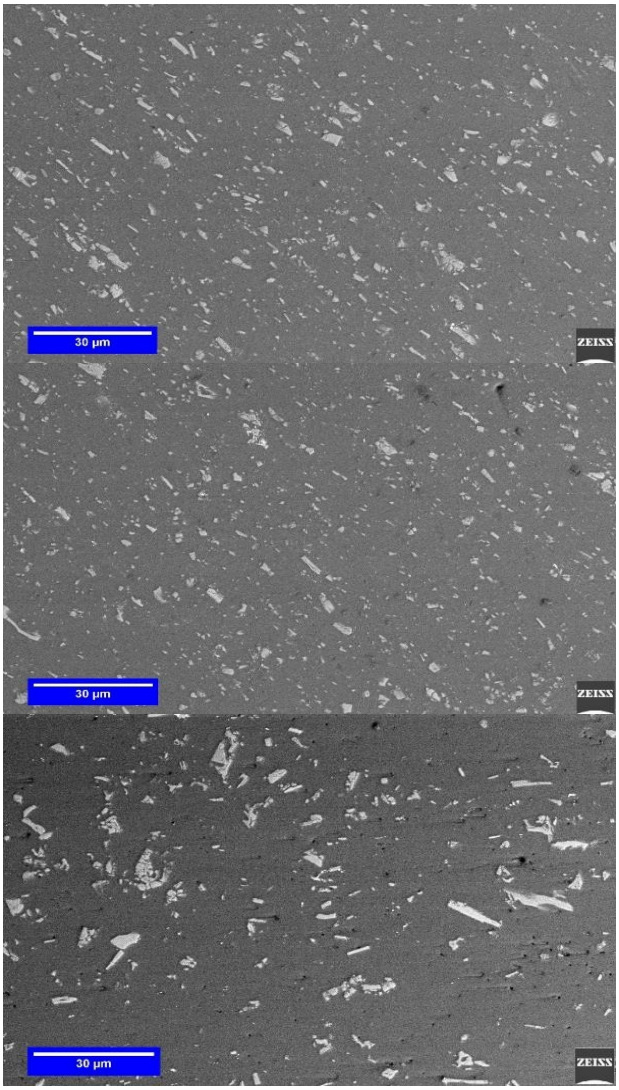
این در حالی است که در سرعت دورانی بالاتر، حدود 2000rpm، برای تمام نانوکامپوزیت‌های مورد مطالعه نیرو کاهش می یابد که این کاهش را در منابع مختلف، به حرارت ورودی بسیار زیاد تولید شده نسبت داده اند [21].

چنین حرارت های بالایی ضمن تلاطم زیاد در مواد در حال اغتشاش، باعث نرمی بیش از اندازه در فلز پایه می شوند و در نتیجه نیرو لازم برای جوشکاری را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، به نظر می رسد که افزایش بیش از 4 درصد وزنی در محتوای نانوذرات آلومینا در زمینه آلومینیوم باعث افزایش میزان ناهمگنی توزیع تقویت کننده ها از طریق ایجاد خوشه‌هایی ازکلوخه های نانوذرات آلومینا می شود. تاثیر مخرب چنین شرایطی باعث افت خواص مکانیکی مانند سختی و استحکام کششی می شود که این می تواند تاثیر قابل توجهی بر روی نیروی Fz برای شروع جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت های ساخته شده با توزیع دوگانه‌ای از تقویت کننده‌های آلومینایی داشته باشد. ریزساختار ناحیه اغتشاش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت$Al\text{-}2n8mAl_2O_3$، $Al\text{-}4n6mAl_2O_3$، $Al\text{-}6n4mAl_2O_3$ برای‌سرعت‌دورانی 1900 rpm و سرعت خطی 40 mm/min در شکل(5) آورده شده است. به نظر می‌رسد که توزیعی دوگانه و همگن از ذرات گوشه‌دار آلومینا در زمینه آلومینیوم در نسبت‌های 4:6 و 6:4 از نانو به میکروذرات تقویت‌کننده وجود دارد.

میکروذرات آلومینا و همچنین خوشه‌های نانوذرات آلومینا طی فرایند اغتشاش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شکسته شده‌اند که این نیز خود می‌تواند دلیلی بر توزیع همگن‌تر تقویت‌کننده‌ها در زمینه آلومینیوم و حذف درصد بالایی از حفرات در ناحیه اغتشاش ناشی از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی باشند [22]. جدول(6) مقادیر استحکام کششی آلومینیوم خالص و نانوکامپوزیت‌های $Al\text{-}2n8mAl_2O_3$ و $Al\text{-}4n6mAl_2O_3$ که تحت فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی با سرعت‌های دورانی و خطی مختلف قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. پروفیل‌های ریزسختی برای نانوکامپوزیت $Al\text{-}2n8mAl_2O_3$ برای سطح مقطع و همچنین سطح ناحیه جوشکاری شده در شکل(6) آورده شده است. افزایش سرعت دورانی و یا کاهش سرعت خطی می‌تواند افزایش حرارت ورودی را به دنبال داشته باشد. همانطور که حرارت ورودی

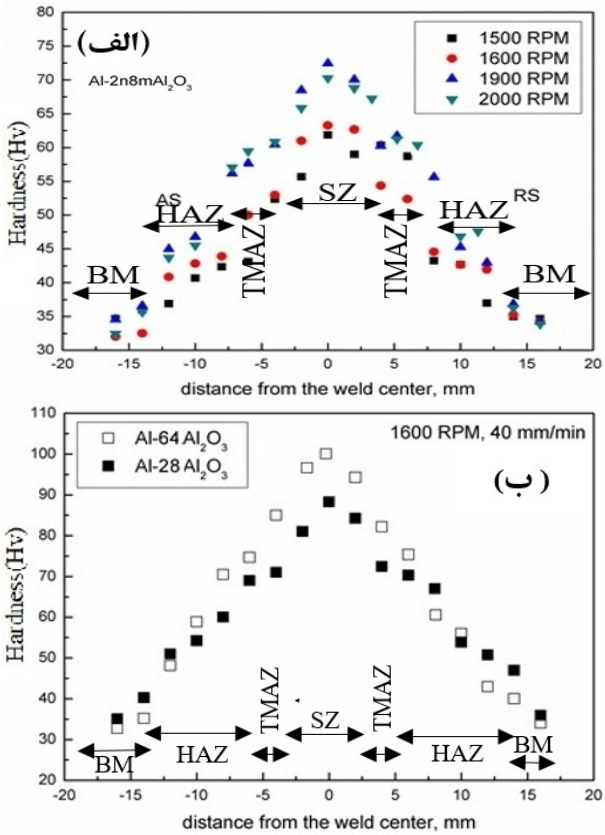
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

افزایش می‌یابد، پدیده نرم شدگی در زمینه آلومینیوم خالص و همچنین آزاد شدن تنش‌های فشاری باقی‌مانده احتمالی از فرایند تف‌جوشی می‌تواند باعث کاهش در استحکام کششی شود. حداکثر مقادیر استحکام و سختی برای ناحیه اغتشاش در سرعت دورانی1900 rpmحاصل شده است. چنین رفتاری را می‌توان به فرایند کاهش اندازه دانه شدیدی که به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید رخ می‌دهد نسبت داد [23و 24].



شکل5-ناحیه اغتشاش در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت؛ الف) Al-28Al2O3 ، ب)Al-46Al2O3، ج)Al-64Al2O3 سرعت خطی و دورانی به ترتیب 40 mm/min و 1900 rpmدر تمام نمونه ها؛

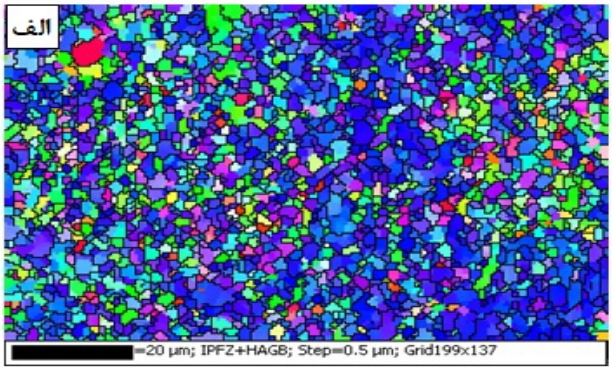
حضور اندازه دوگانه تقویت‌کننده آلومینا در ناحیه اغتشاش و شکسته شدن برخی از میکروذرات آلومینا به دلیل فرایند اغتشاش و توزیع یکنواخت تقویت‌کننده‌ها و تخلخل‌ها در این ناحیه باعث افزایش سختی ناحیه جوش شود. مشخص شده است که میکرو و نانوذرات آلومینا در حالتی که به شکل کلوخه‌های بزرگتر از یک میکرومتر باشند می‌توانند به عنوان مکان‌های ترجیحی جوانه زنی عمل کند و از طریق مکانیزم جوانه زنی متاثر از ذرات، باعث پدید آمدن دانه‌های جدید عاری از تنش و ریز در طی فرایند تبلورمجدد دینامیکی در ناحیه اغتشاش شوند.این ساختار خواص کششی مطلوبی را از خود نشان داد [25و 26].

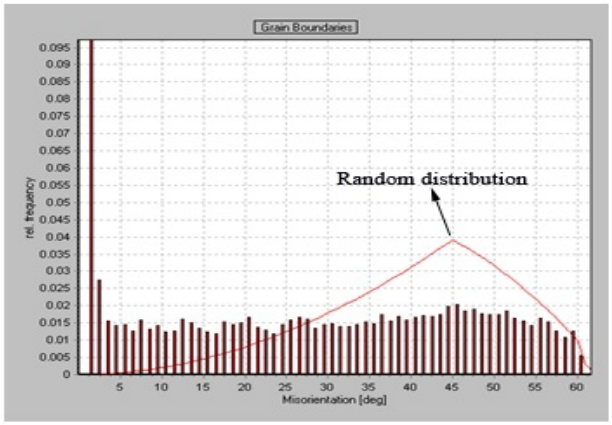


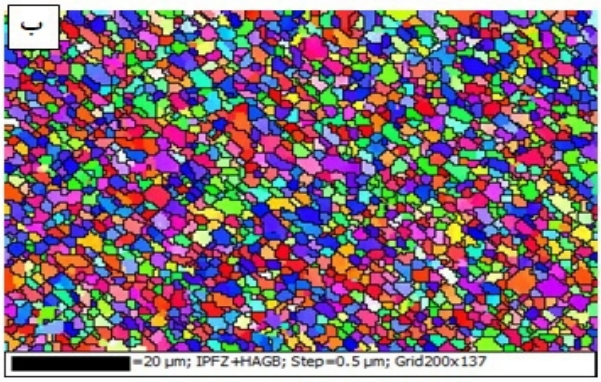
شکل6- توزیع ریزسختی؛ (الف) سطح مقطع جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده نانوکامپوزیت

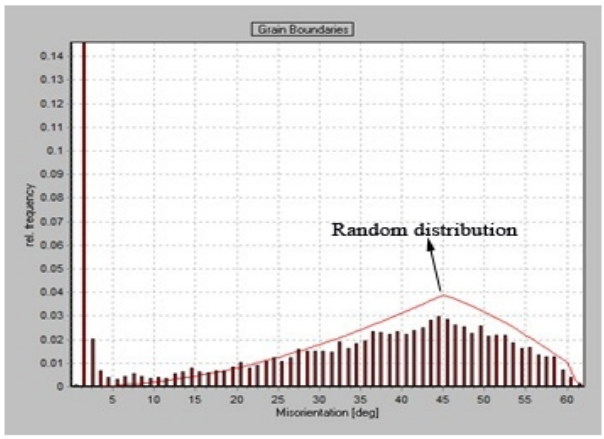
ضمن اینکه توزیع همگن نانوذرات آلومینا در ناحیه اغتشاش نیز می‌توانند باعث ممانعت از پدیده رشد دانه در حرارت‌های ورودی بالاتر از طریق اثر فشار زنر شوند [26و27]. نانوذرات تقویت‌کننده آلومینا می‌توانند بر میزان بهره‌وری پدیده تبلورمجدد تاثیر بگذارند و باعث سهم مشارکتی اضافی در افزایش استحکام و سختی ماده در مقایسه با میکروذرات آلومینا

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

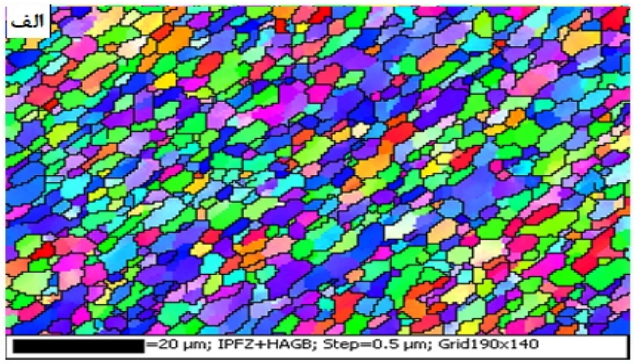


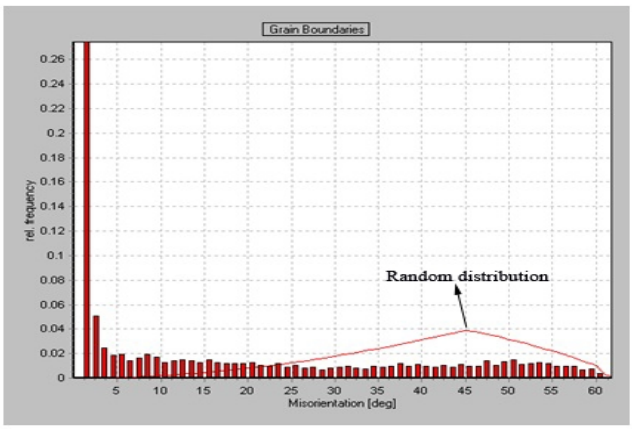


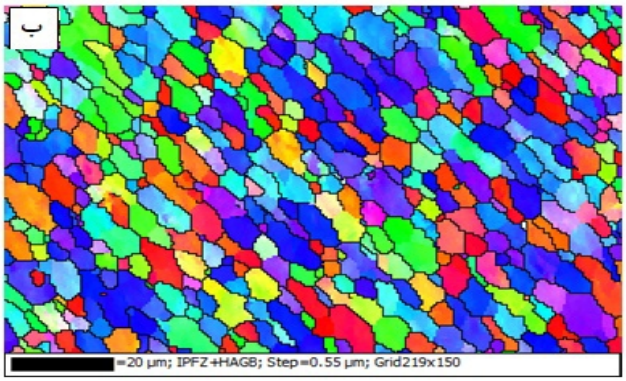


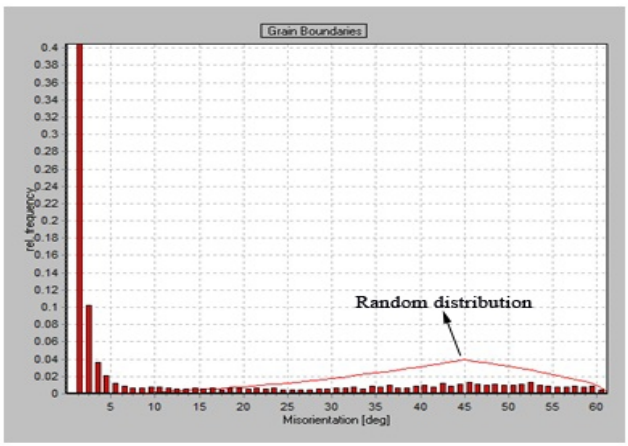


شکل7-توزیع مرزدانه های نانوکامپوزیت $Al\text{-}4n6mAl_2O_3$ جوشکاری شده با الف) سرعت 1600rpm و سرعت خطی 32mm/min ب) سرعت 1600rpm و سرعت خطی 40mm/min









شکل8- توزیع مرزدانه های نانوکامپوزیت $Al\text{-}4n6mAl_2O_3$ جوشکاری شده با الف) سرعت 1900rpm و سرعت خطی 37mm/min ب) سرعت 2000 rpmو سرعت خطی 40mm/min

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول 3- پنجره کاری جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت‌ها Al-$28Al_2O_3$

پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی		سرعت دورانی(rpm)						
		۸۷۰	۱۱۴۰	۱۲۵۰	۱۵۰۰	۱۶۰۰	۱۹۰۰	۲۰۰۰
سرعت خطی(mm/min)	۱۷	F	F		F	F		F
	۲۴	F	F	F		F	F	
	۳۲		F		OK	OK	F	F
	۳۷			F	OK	OK	OK	F
	۴۰				F	F	OK	OK
	۵۰					F	OK	F
	۶۰				F	F	F	F

جدول4- پنجره کاری جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت ها Al-$46\ Al_2O_3$

پارامترهای جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی		سرعت دورانی(rpm)						
		۸۷۰	۱۱۴۰	۱۲۵۰	۱۵۰۰	۱۶۰۰	۱۹۰۰	۲۰۰۰
سرعت خطی(mm/min)	۱۷	F	F		F	F		F
	۲۴	F	F	F		F	F	
	۳۲		F		OK	OK	F	F
	۳۷			F	OK	OK	OK	F
	۴۰				F	OK	OK	OK
	۵۰					F	F	F
	۶۰				F			

شوند. به عبارتی دیگر، می‌توان به اثرات قفل شوندگی نابجایی‌ها در حضور نانوذرات آلومینا اشاره کرد [28،29]. جدول(7) تاثیر سرعت خطی و دورانی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی را بر خصوصیات ریزساختاری نانوکامپوزیت Al-$2n8mAl_20_3$ نشان می‌دهد. مشخص است که میانگین اختلاف جهتگیری و کسر مرزهای زاویه زیاد با افزایش حرارت ورودی کاهش یافته است. شکل‌های مربوط به آنالیز پراش الکترون‌های برگشتی نانوکامپوزیت Al-$4n6mAl_2O_3$ جوشکاری شده در شکل‌های(7و8) نشان داده شده است.با مقایسه شکل‌های(7و8) مشخص می‌شود که با افزایش سرعت دورانی به بیشتر از 1900rpm، دانه های ناحیه اغشاش از حالت هم محور بودن خارج و مورفولوژی آنها به صورت کشیده در می‌آید. به نظر می رسد که با افزایش حرارت ورودی ناشی از افزایش سرعت دورانی ابزار، اندکی رشد دانه آلومینیوم در ناحیه اغتشاش اتفاق می افتد.

جدول5- حرارت ورودی تولید شده حین جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نانوکامپوزیت Al-28 Al_2O_3

(rpm)(W)	(V) (mm/min)	W/V ($\frac{rpm}{mm/min}$)	نیرو(F_z) (kN)	ضریب اصطکاک(μ)	حرارت ورودی(J/mm)	ریزسختی ناحیه اغتشاش(HV)
۱۵۰۰	۳۷	۴۰/۶	۹/۱۹	۰/۴۱	۳۳۶۱۵±۲	۶۷
۱۶۰۰	۳۲	۵۰	۹/۵۹	۰/۴۳	۳۳۹۳۸±۲	۷۶/۵
۱۹۰۰	۳۷	۵۱/۳۵	۱۰	۰/۴۶	۵۱۹۳۰±۲	۱۰۰/۵
۱۹۰۰	۴۰	۴۷/۵	۱۰/۳۸	۰/۴۶	۵۲۸۷۱±۲	۱۰۴
۲۰۰۰	۴۰	۵۰	۹/۳۸	۰/۴۶	۵۶۴۸۷±۲	۹۴

جدول6-استحکام کششی ناحیه جوشکاری شده برای نانوکامپوزیت های Al- Al_2O_3 در سرعت های مختلف جوشکاری

کامپوزیت	سرعت دورانی،W، (rpm)	سرعت خطی،V، (mm/min)	$\frac{W}{V}$ ($\frac{rpm}{mm/min}$)	استحکام کششی (MPa)
Pure Al	۱۶۰۰	۳۷	~۴۴	۴۷
	۱۶۰۰	۴۰	۴۰	۴۹
	۱۹۰۰	۳۷	~۵۲	۴۲
	۱۹۰۰	۴۰	~۴۸	۴۶
	۲۰۰۰	۴۰	۵۰	۴۴
Al-$28Al_2O_3$	۱۶۰۰	۳۷	~۴۴	۷۲
	۱۶۰۰	۴۰	۴۰	۷۰
	۱۹۰۰	۳۷	~۵۲	۷۸
	۱۹۰۰	۴۰	~۴۸	۷۵
	۲۰۰۰	۴۰	۵۰	۶۵
Al-$46Al_2O_3$	۱۶۰۰	۳۷	~۴۴	۷۸
	۱۶۰۰	۴۰	۴۰	۷۴
	۱۹۰۰	۳۷	~۵۲	۸۴
	۱۹۰۰	۴۰	~۴۸	۸۱
	۲۰۰۰	۴۰	۵۰	۷۲

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

جدول7- تاثیر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی بر روی ویژگی های ریزساختاری نانوکامپوزیت Al-2n8mAl_2O_3

پارامتر جوشکاری	نسبت سرعت دورانی به خطی	میانگین اندازه دانه ناحیه اغتشاش (mμ)	میانگین زاویه اختلاف جهت گیری (درجه)	کسر مرزهای زاویه بزرگ
W=1600 rpm , V= 40 mm/min	۴۰	۲/۳۷	۲۶	۰/۹۶
W=1600 rpm, V= 32 mm/min	۵۰	۲/۴۶	۳۴	۰/۹۲
W= 2000 rpm, V= 40 mm/min	۵۰	۳/۲۸	۳۵	۰/۸۶
W= 1900 rpm, V= 37 mm/min	۵۱.۳۵	۴/۵۱	۳۹	۰/۸۱

شکل(8) نشان می‌دهد که دانه های جدید متبلور شده دستخوش یک جهت‌گیری ترجیحی نیز می شوند. حضور نانو و میکرو ذرات آلومینا از طریق اثر گذاری بر روی پدیده تبلور مجدد دینامیکی باعث توسعه بافت تبلور مجدد در این نواحی می‌شوند. به عبارتی دیگر، تبلور مجدد دینامیکی رخ داده در طی جوشکاری، منجر به شکل گیری مرزهای زاویه بزرگ و در نتیجه شکل گیری دانه های جدید متبلور شده می شود. به نظر می رسد که در سرعت های دورانی کم، سهم سرعت خطی بر روی پدیده های ریزساختاری مانند کاهش اندازه دانه و همچنین جهت گیری ترجیحی دانه ها بیشتر می شود. با این حال، سرعت های دورانی بالا تاثیر شگرفی بر کاهش اندازه دانه آلومینیوم دارد.

4- نتیجه گیری

در این مقاله، ترکیبی از روش تف جوشی پلاسمای قوس الکتریکی و جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای اتصال نانوکامپوزیت های تقویت شده با توزیعی دوگانه از تقویت‌کننده آلومینا استفاده شد. ریزساختار و برخی از خواص مکانیکی مواد قبل و بعد از جوشکاری مورد بررسی قرار گرفت. مهمترین یافته ها در ادامه خلاصه شده اند:

- جوشکاری نانوکامپوزیت های تقویت شده با توزیعی دوگانه از تقویت کننده آلومینا دارای یک پنجره جوشکاری مشخصی است.

- ریزساختار جوشکاری نانوکامپوزیت های ساخته شده به روش متالورژی پودر دانه های ریز و هم محور را برای ناحیه اغتشاش نشان داد. علاوه بر این، نواحی مجزای اغتشاش، ناحیه تحت تاثیر عملیات ترمومکانیکی، ناحیه متاثر از حرارت و همچنین ناحیه فلز پایه در جوشکاری این نوع نانوکامپوزیت‌ها دیده شد.

- سختی ناحیه جوشکاری شده برای سرعت دورانی یکسان، با افزایش حرارت ورودی افزایش می یابد.

- با افزایش حرارت ورودی، استحکام کششی اتصالات جوشکاری شده کاهش می یابد؛ که این را می توان به پدیده رشد دانه در نتیجه پدیده آنیل شدن نسبت داد.

منابع

1-Dash. K, Chaira. D, Ray. B. C., "Synthesis and Characterization of Aluminium–Alumina Micro-and Nano-Composites by Spark Plasma Sintering," Materials Research Bulletin, vol. 48, no. 7, pp. 2535-2542, 2013.

2- Babu. N. K., Kallip. K., Leparoux. M., AlOgab. K. A., Maeder. X. and Dasilva. Y. A. R., "Influence of Microstructure and Strengthening Mechanism of AlMg5–Al2O3 nNanocomposites Prepared via Spark Plasma Sintering," Materials & Design, vol. 95, pp. 534-544, 2016.

3-A. E. E. M.-. 11, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," Ed., ASTM INTERNATIONAL, 2010.

4- Guillon. O., Gonzalez-Julian. J., Dargatz. B., Kessel. T., Schierning. G., Räthel. J. and Herrmann. M., "Field-Assisted Sintering Technology/Spark Plasma Sintering: Mechanisms, Materials, and Technology Developments," Advanced Engineering Materials, vol. 16, no. 7, pp. 830-849, 2014.

5- Garay. J., "Current-activated, Pressure-assisted Densification of Materials," Annual review of materials research, vol. 40, pp. 445-468, 2010.

6- Sadeghi. B., Shamanian. M., Ashrafizadeh. F., Cavaliere. P., Sanayei. M. and Szpunar. J. A., "Microstructural Behaviour of Spark Plasma Sintered Composites Containing Bimodal Micro- and Nano-Sized Al_2O_3Particles," Powder Metallurgy, vol. 61, no. 1, pp. 50-63, 2018.

7- Sadeghi. B., Shamanian. M., Ashrafizadeh. F., Cavaliere. P., Sanayei. M. and Szpunar. J. A.,"Microstructural and Mechanical Behavior of

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]

pp. 314-323, 2014.
20- Heurtier. P., Jones. M., Desrayaud. C., Driver. J. H., Montheillet. F. and Allehaux. D., "Mechanical and Thermal Modelling of Friction Stir Welding," Journal of Materials Processing Technology, vol. 171, no. 3, pp. 348-357, 2006.
21- Cavaliere. P., Campanile. G., Panella. F. and Squillace. A., "Effect of Welding Parameters on Mechanical and Microstructural Properties of AA6056 Joints Producedby Friction Stir Welding," Journal of Materials Processing Technology, vol. 180, no. 1–3, pp. 263-270, 2006.
22- Izadi. H., Nolting. A., Munro. C., Bishop. D., Plucknett. K. and Gerlich. A., "Friction Stir Processing of Al/SiC Composites Fabricated by Powder Metallurgy," Journal of Materials Processing Technology, vol. 213, no. 11, pp. 1900-1907, 2013.
23- Periyasamy. P., Mohan. B. and Balasubramanian. V., "Effect of Heat Input on Mechanical and Metallurgical properties of Friction Stir Welded AA6061-10% SiCp MMCs," Journal of materials engineering and performance, vol. 21, no. 11, pp. 2417-2428, 2012.
24- Behjat. A., Shamanian. M, Atapour. M. and Sarmadi. M. Ahl, "Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties in Friction Stir Welding of HSLA-60," IRANIAN JOURNAL OF Science and Technology of Welding, vol. 2, no. 1, pp. 57-68, 2016.
25- Guo. J. F., Liu. J., Sun. C. N., Maleksaeedi. S., Bi. G., Tan. M. J. and Wei. J., "Effects of Nano-Al2O3Particle Addition on Grain Structure Evolution and Mechanical Behaviour of Friction-Stir-Processed Al," Materials Science and Engineering: A, vol. 602, pp. 143-149, 2014.
26-McNelley. T. R., Swaminathan. S. and Su. J. Q., "Recrystallization Mechanisms During Friction Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys," Scripta Materialia, vol. 58, no. 5, pp. 349-354, 2008.
27- Bodaghi. M. and Dehghani. K., "Friction Stir Welding of AA5052: the Effects of SiC Nano Particles Addition," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 88, no. 9, pp. 2651-2660, 2017.
28- Khodabakhshi. F., Simchi. A., Kokabi. A. H., Švec. P., Simančík. F.and Gerlich. A. P., "Effects of Nanometric Inclusions on the Microstructural Characteristics and Strengthening of a Friction-Stir Processed Aluminum–Magnesium Alloy," Materials Science and Engineering: A, vol. 642, pp. 215-229, 2015.
29- Azimi-Roeen. G., Kashani-Bozorg. S. F., Nosko. Mand Orovcik. L., "EBSD Investigation of Al/(Al13Fe4+ Al2O3) Nanocomposites Fabricated by Mechanical Milling and Friction Stir Processing," Journal of Microscopy, vol.6, no.12, 2017.
Bimodal Reinforced Al-Based Composites Produced by Spark Plasma Sintering and FSP," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 94, no. 9, pp. 3903-3916, 2018.
8-Diouf. S. and Molinari. A., "Densification Mechanisms in Spark Plasma Sintering: Effect of Particle Size and Pressure," Powder Technology, vol. 221, pp. 220-227, 2012.
9- Sadeghi. B., Shamanian. M., Ashrafizadeh. F., Cavaliere and Rizzo. A., "Influence of Al2O3 Nanoparticles on Microstructure and Strengthening Mechanism of Al-Based Nanocomposites Produced via Spark Plasma Sintering," Journal of Materials Engineering and Performance, pp. 1-9, 2017.
10-Sadeghi. B., Shamanian. M., Ashrafizadeh. F., Cavaliere. P, and Valerini. D. le, "Nanoindentation Characterization of Al-matrix Nanocomposites Produced via Spark Plasma Sintering," International Journal of Materials Research, vol. 1, 2018.
11- Casati, R. "Aluminum matrix composites reinforced with alumina nanoparticles,", Springer, Switzerland, 2015.
12- Casati. R., "Consolidations of Al Powder and Dry Al2O3 Nanoparticles," Aluminum Matrix Composites Reinforced with Alumina Nanoparticles, Ed., pp. 47-58, Springer InternationalPublishing, Cham, 2016.
13- Asgharzadeh. H., Simchi. A. and Kim. H., "Microstructural Features, Texture and Strengthening Mechanisms of Nanostructured AA6063 Alloy Processed by Powder Metallurgy," Materials Science and Engineering: A, vol. 528, no. 12, pp. 3889-3899
14- Cavaliere. P., Sadeghi. B. and Shabani. A., "Carbon Nanotube Reinforced Aluminum Matrix Composites Produced by Spark Plasma Sintering," Journal of Materials Science, pp. 1-12, 2017.
15- Ashby. M., "The Deformation of Plastically Non-homogeneous Materials," Philosophical Magazine, vol. 21, no. 170, pp. 399-424, 1970.
16-Miller. W. and Humphreys. F., "Strengthening Mechanisms in Particulate Metal-Matrix Composites: Reply to Comments by Arsenault," Scripta metallurgica et materialia, vol. 25, no. 11, pp. 2623-2626, 1991.
17-Schmidt. H., Hattel. J. and Wert. J., "An Analytical Model for the Heat Generation in Friction Stir Welding," Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, vol. 12, no. 1, pp. 143, 2003.
18- Salih. O. S.,Ou. H., Sun. W. and McCartney. D. G, "A Review of Friction Stir Welding of Aluminium Matrix Composites," Materials & Design, vol. 86, pp. 61-71, 2015.
19- Cho. J.-H., Kim. W. J. and Lee. C. G., "Texture and Microstructure Evolution and Mechanical Properties DuringFriction Stir Welding of Extruded Aluminum Billets," Materials Science and Engineering: A, vol. 597,

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-11-29]