



Fabrication and Mechanical Characterization of TiB₂-Graphene Reinforced AA 6061 Composite by Friction Stir Processing

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Nazari M.¹ MSc,
Eskandari H.*¹ PhD,
Golbaharhighi M.R.¹ PhD

How to cite this article

Nazari M, Eskandari H, Golbaharhighi M.R. Fabrication and Mechanical Characterization of TiB₂-Graphene Reinforced AA 6061 Composite by Friction Stir Processing. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(3):611-621.

¹Engineering Faculty, Persian Gulf University, Bushehr, Iran

*Correspondence

Address: Engineering Faculty, Persian Gulf University, Bushehr, Iran
Phone: -
Fax: -
heskandari@pgu.ac.ir

Article History

Received: January 28, 2019
Accepted: June 2, 2019
ePublished: March 01, 2020

ABSTRACT

In this research, friction stir processing was used to produce mono and hybrid surface composite layers of aluminum matrix containing TiB₂ and graphene particles. Microstructural evaluation of the samples was performed by optical microscopy and field emission scanning electron microscopy of the composite samples cross-sections. The mechanical properties of the samples were investigated using microhardness and tension tests. Among the samples reinforced with TiB₂ and graphene, the samples with 20wt% TiB₂ and 1wt% graphene exhibited the highest hardness and strength compared to other samples. Also, the highest mechanical properties are observed in the sample reinforced with hybrid powders include 20wt% TiB₂ and 1wt% graphene. The yield and ultimate strength of the sample increased from 75 and 160MPa (corresponding to the initial 6061 AA) to 191 and 271MPa, respectively. Also, the average hardness of this sample in the stir zone is equal to VHN101 which was significantly higher than the initial alloy (VHN62) and the non-powdered friction-stir sample (VHN71).

Keywords AA6061 Alloy; Graphene; Titanium Diboride (TiB₂); Composite; Mechanical properties

CITATION LINKS

[1] Aluminium alloys for aerospace applications. In: Prasad NE, Wanhill RJH, ... [2] Aluminum and aluminum ... [3] Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix ... [4] Aluminium matrix composites: Challenges and ... [5] Friction stir processing technology: A ... [6] Friction processing ... [7] The influence of the ratio of "rotational speed/traverse speed" on mechanical properties of AZ31 friction stir ... [8] Material properties of graphene/aluminum metal matrix composites fabricated by friction stir ... [9] Effect of carbonaceous reinforcements on the mechanical and tribological properties of friction stir processed Al6061 ... [10] Fabrication of Al7075/TiB₂ surface composite via friction stir ... [11] A novel technique for development of aluminum alloy matrix/TiB₂/Al₂O₃ hybrid surface nanocomposite by friction stir ... [12] Microstructures and mechanical properties of Al/Al₂O₃ surface nano-composite layer produced by friction stir ... [13] Evaluation of the microstructure and wear behaviour of AA6063-B₄C/TiB₂ mono and hybrid composite layers produced by friction stir ... [14] Composite fabrication using friction stir processing-a ... [15] Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum ... [16] A study on microstructure and mechanical properties of Al 6061-TiB₂ in-situ ... [17] Cyclic deformation behavior of in situ aluminum-matrix composites of the system Al-Al₃Ti-... [18] Microstructure and mechanical properties of SiC-particle-strengthening trimetal Al/Cu/Ni composite produced by accumulative roll bonding ... [19] Review of mechanical and microstructural properties of aluminum matrix composites reinforced with ceramic particles produced by SPD ... [20] Synthesis and characterization of AA 6061-Graphene-SiC hybrid nanocomposites processed through microwave ... [21] Process development in stir casting and investigation on microstructures and wear behavior of TiB₂ on ... [22] Mechanical and Tribological Behaviour of friction-Stir-Processed Al 6061 Aluminium Sheet Metal Reinforced with 0.5 Gr/Al₂O₃ Hybrid Surface ... [23] Surface composites by friction stir processing: A ... [24] Mechanical behavior and wear prediction of stir cast Al-TiB₂ composites using response surface ... [25] Effect of ball milling on graphene reinforced Al6061 composite fabricated by semi-solid ... [26] Parameter optimization and evaluation of mechanical and thermal properties of nanographene reinforced Al 6060 surface composite using ... [27] Graphene-reinforced metal matrix nanocomposites-a ... [28] Bioinspired, graphene/Al₂O₃ doubly reinforced aluminum composites with high strength and ...

ساخت و بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱- دی‌بوراید تیتانیوم- گرافن تولیدشده با فرآیند اصطکاکی- اغتشاشی

مهدی نظری MSc

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

حسین اسکندری* PhD

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

محمد رضا گلپهار حقیقی PhD

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

چکیده

در این پژوهش تولید و بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ تقویت‌شده با پودرهای تکی و هیبریدی دی‌بوراید تیتانیوم و گرافن به روش اصطکاکی اغتشاشی بررسی شده است. از میکروسکوپ نوری، الکترونی روبشی مجهز به طیف‌سنج پراش انرژی اشعه ایکس و آنالیز پراش‌سنجی اشعه ایکس برای شناسایی ریزساختار و فازهای موجود استفاده شد. خواص مکانیکی نمونه‌ها به وسیله آزمون کشش و سختی‌سنجی بررسی شد. در میان نمونه‌های تقویت‌شده با دی‌بوراید تیتانیوم و گرافن به صورت تکی، به ترتیب نمونه با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیوم و نمونه با ۱wt% گرافن بالاترین خواص مکانیکی را نشان دادند. همچنین بین تمامی نمونه‌ها بالاترین خواص مکانیکی مربوط به نمونه تقویت‌شده با پودرهای هیبریدی شامل ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیوم و ۱wt% گرافن است و استحکام تسلیم و نهایی این نمونه به ترتیب از ۷۵ و ۱۶۰Mpa (مربوط به آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ اولیه) به ۱۹۱ و ۲۷۱Mpa افزایش یافت. همچنین میانگین سختی این نمونه در ناحیه همزده‌شده برابر ۱۰۱۷VHN است که نسبت به آلیاژ اولیه (۶۲۷VHN) و نمونه اصطکاکی اغتشاشی‌شده بدون پودر (۷۱۷VHN) افزایش چشم‌گیری نشان داد.

کلیدواژه‌ها: آلومینیوم ۶۰۶۱، گرافن، دی‌بوراید تیتانیوم، کامپوزیت، خواص مکانیکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۱۲

*نویسنده مسئول: heskandari@pgu.ac.ir

۱- مقدمه

آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل استحکام ویژه بالا، شکل‌پذیری و مقاومت به خوردگی خوب، به طور وسیع در صنایع مختلف مانند هوافضا، حمل‌ونقل و کاربردهای سازه‌ای استفاده می‌شوند [1, 2]. در دهه‌های اخیر پژوهشگران همواره در تلاش بوده‌اند تا خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم را بهبود دهند و یکی از روش‌های مهم در این راستا کامپوزیت‌سازی است. ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیومی سبب افزایش استحکام و مقاومت به خوردگی، خستگی، خزش و سایش می‌شود. این ویژگی‌های ممتاز، مواد کامپوزیتی زمینه آلومینیومی را در زمره مواد سازه‌ای مناسب برای کاربرد در صنایع مختلف قرار داده است. کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی که با روش‌های تولید کامپوزیت مرسوم، تولید می‌شوند و دارای تقویت‌کننده‌های خارجی هستند، اغلب با حفره، اندازه دانه‌های بزرگ‌تر، کلوخه شدن ذرات، چسبندگی ضعیف، تر شوندگی

نامناسب و واکنش‌های سطحی نامطلوب همراه هستند. روش درجا برای تولید مواد کامپوزیتی زمینه آلومینیومی شامل ترکیب کردن ذرات تقویت‌کننده در حین فرآیند است. از جمله مزایای روش درجا نسبت به روش سنتی غیردرجا، قابلیت تولید دانه‌های ریزتر همراه با پایداری حرارتی و مکانیکی بهتر است [3-5].

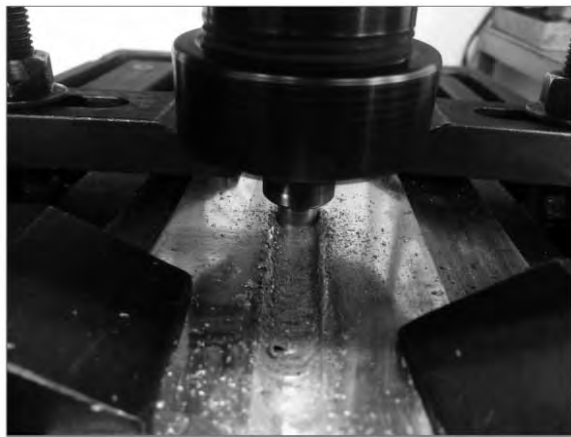
یکی از روش‌های مناسب برای تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم، "فرآیند اصطکاکی اغتشاشی" است که برای اولین بار توسط میسر/ و همکاران در سال ۱۹۹۱ برای اعمال تغییر شکل موم‌سان زیاد با نرخ کرنش بالا در آلومینیوم ۶۰۶۱ توسعه داده شد [5]. از جمله مزایای این روش می‌توان به بازدهی انرژی و انعطاف‌پذیری بالا و آلاینده‌گی کم اشاره کرد. مزایای ویژه این فرآیند باعث استفاده روزافزون آن در صنعت شده است؛ به طوری که پس از ابداع این روش به‌عنوان فرآیند اتصال‌دهی آلیاژهای سبک، نسبت تقاضا به عرضه محصولات پایه مانند ورق و شمش افزایش چشمگیری داشت [5]. این فرآیند یک ابزار غیرمصرفی (شانه و پین) دارد که با سرعت چرخش بالا وارد درز اتصال شده و اصطکاک ابزار با قطعه کار بر اثر حرکت چرخشی، باعث تولید حرارت، آفت استحکام، و افزایش شکل‌پذیری مواد اطراف پین شده و حرکت انتقالی ابزار باعث جابجایی مواد از جلوی ابزار به پشت آن و اتصال‌دهی می‌شود. تغییر شکل شدید در دمای بالا حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی باعث تشکیل دانه‌های هم‌محور و ریز می‌شود [6, 7].

در سال‌های اخیر، پژوهشگران زیادی اثر افزودن ذرات تقویت‌کننده حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی و سایشی آلیاژهای آلومینیوم را بررسی نموده‌اند. برای مثال ژنون و همکاران ساخت کامپوزیت زمینه آلومینیوم ۵۰۵۲ با تقویت‌کننده گرافن به روش اصطکاکی اغتشاشی را بررسی نمودند. بررسی خواص مکانیکی نشان داد که فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بدون تقویت‌کننده سبب افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش کم استحکام کششی آلیاژ پایه می‌شود که علت آن تغییر فرم برشی شدید حین تبلور مجدد دینامیکی است. در حالتی که تقویت‌کننده گرافن به زمینه آلومینیوم اضافه شد، انعطاف‌پذیری افزایش یافت اما کاهش جزیی در استحکام کششی نسبت به نمونه فرآوری‌شده بدون تقویت‌کننده دیده شد [8].

مائوریا و همکاران، اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با تقویت‌کننده‌های کربنی (گرافیت، نانولوله‌های کربنی و گرافن) بر خواص مکانیکی و تریبولوژیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ را بررسی نمودند. فاز تقویت‌کننده به‌صورت خمیر همگنی از روغن سیلیکون و ذرات کربنی به شیار اضافه شد. پس از انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، قطعات بلافاصله در آب یخ آب‌دهی شدند. بر اساس نتایج، بیشترین سختی و کمترین ضریب سایش مربوط به نمونه تقویت‌شده با گرافن بود که علت آن کاهش شدید اندازه دانه‌ها و ایجاد تنش فشاری در ساختار بود [9].

بیسادی و عباسی اثر فرآیندهای اصطکاکی اغتشاشی بر پراکندگی ذرات دی‌بوراید تیتانیوم در زمینه آلومینیوم ۷۰۷۵ را بررسی نمودند.

به‌منظور انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، ابتدا شیاری با پهنای ۲mm و عمق ۳mm در ورق پایه آلومینیوم ۶۰۶۱ ماشینکاری شده و پس از عملیات تمیزکاری با استون، شیار با ذرات تقویت‌کننده پر شد (هم به‌صورت مجزا و هم به‌صورت هیبریدی). برای توزیع بهتر، ذرات تقویت‌کننده قبل از افزودن به فلز پایه، در استون حل شده و به مدت ۱۵ دقیقه در حمام التراسونیک قرار داده شدند. برای جلوگیری از بیرون‌ریختن ذرات حین انجام فرآیند، سطح رویی شیار با یک ابزار استوانه‌ای بدون پین از جنس فولاد گرمکار به قطر شانه ۱۲mm طی یک پاس بسته شد. جزییات فرآیندی عبارت‌اند از: سرعت چرخشی ۱۰۰۰rpm، سرعت خطی ۳۴۰mm/min و زاویه پیشروی ۳°. در مرحله بعد با انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی توسط ابزاری استوانه‌ای با پین به قطر ۶mm و متغیرهای فرآیندی ذکرشده و طی یک پاس، نمونه‌های کامپوزیتی تولید شد. همچنین یک نمونه بدون ذرات تقویت‌کننده نیز تحت فرآیند قرار گرفت تا اثر افزودن ذرات تقویت‌کننده بر خواص مکانیکی (میکروسختی و خواص کششی) مورد بررسی قرار گیرد. در این نمونه، سرعت انتقالی و دورانی ابزار مشابه حالت با ذرات تقویت‌کننده در نظر گرفته شد. تصویری از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی انجام‌شده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که به‌منظور انجام آزمون‌های مختلف و بررسی تکرارپذیری نتایج، از هر نمونه ۵ عدد ساخته شد.



شکل ۱) فرآیند اصطکاکی اغتشاشی انجام‌شده به‌منظور تولید کامپوزیت زمینه آلومینیوم ۶۰۶۱

تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودرهای دی‌بوراید تیتانیم و گرافن استفاده‌شده در این پژوهش در شکل ۲ نشان داده می‌شود. همان‌طور که در تصویر دیده می‌شود، اندازه میانگین پودرهای دی‌بوراید تیتانیم حدود ۳μm و اندازه صفحات گرافن حدود ۲۵μm است. گرافن انتخاب‌شده در این پروژه از نوع چندلایه است. نمونه‌های تولیدشده با تقویت‌کننده تکی شامل ۱۰، ۲۰ و ۳۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و نیز ۰/۵، ۱ و ۲wt% گرافن و نمونه‌های با تقویت‌کننده‌های هیبریدی شامل ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۰/۵، ۱ و ۲wt% گرافن هستند.

با توجه به نتایج، توزیع ذرات دی‌بوراید تیتانیم در سرعت چرخش بالاتر از ۸۲۵rpm مناسب است و در سرعت‌های کمتر، ذرات تمایل به کلوخه‌شدن دارند. مقادیر سختی ویکرز کامپوزیت نیز وابسته به مقادیر سرعت چرخشی و انتقالی ابزار است و حداکثر سختی ۱۷۹HV در سرعت چرخشی ۱۱۱۵rpm و سرعت انتقالی ۶۰mm/min مشاهده شد [10].

همچنین در برخی از پژوهش‌ها، اثر افزودن همزمان بیش از یک نوع پودر تقویت‌کننده بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم بررسی شده است. برای مثال اسکندری و طاهری، ایجاد نانو کامپوزیت زمینه آلومینیوم با تقویت‌کننده‌های هیبریدی دی‌بوراید تیتانیم و آلومینا به روش اصطکاکی اغتشاشی را بررسی نمودند. بررسی ریزساختار نشان داد که پودرهای تقویت‌کننده به‌خوبی در زمینه آلومینیومی توزیع شده‌اند و افزایش تعداد پاس و سرعت چرخشی و کاهش سرعت انتقالی سبب توزیع بهتر ذرات می‌شود. طبق نتایج، سختی نقاط هم‌زده‌شده به‌مراتب بیشتر از سختی فلز پایه (به‌ترتیب ۱۷۵ و ۸۵HV) بود. همچنین بررسی‌ها نشان داد که افزایش تعداد پاس سبب افزایش سختی می‌شود [11].

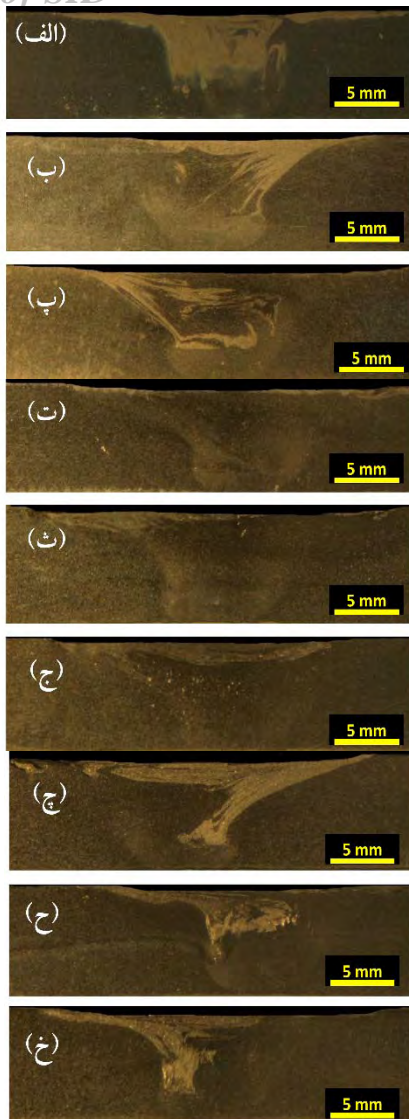
در پژوهش حاضر، اثر افزودن تقویت‌کننده‌های گرافن و دی‌بوراید تیتانیم به‌صورت جدا و هیبریدی توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی بر خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ بررسی شده است. انتظار می‌رود حضور ذرات دی‌بوراید تیتانیم سبب افزایش سختی و بهبود مقاومت به سایش و حضور صفحات گرافن سبب بهبود انعطاف‌پذیری و مقاومت به سایش شود. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، اثر افزودن همزمان این ذرات تقویت‌کننده به‌صورت هیبریدی بر خواص مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم تاکنون بررسی نشده است.

۲- روش آزمایش

در این پژوهش ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ به ابعاد ۱۰×۵×۱ میلی‌متر به‌عنوان فلز پایه مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی فلز پایه با استفاده از آزمون کوانتومتری و استاندارد ASTM E 406-81(2008) در جدول ۱ نشان داده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ترکیب شیمیایی آلومینیوم استفاده‌شده مطابقت خوبی با آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ دارد.

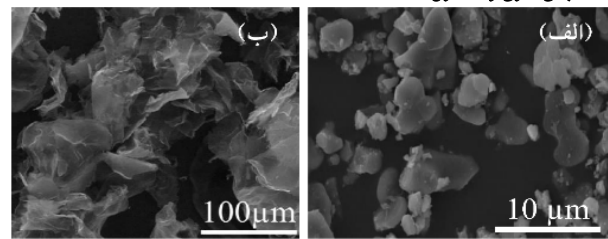
جدول ۱) ترکیب شیمیایی ورق آلومینیوم ۶۰۶۱ بر اساس آزمون کوانتومتری

عنصر	Wt%
Mg	۰/۸
Si	۰/۵
Fe	۰/۵
Mn	۰/۱
Cu	۰/۱۵
Zn	۰/۰۳
Cr	۰/۰۵
Al	باقیمانده



شکل ۳) تصویر میکروسکوپ استریوگرافی از مقطع نمونه‌های فرآوری شده با درصدهای مختلف پودر: الف) ۱۰wt% دی‌بوراید تیتانیم، ب) ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم، پ) ۳۰wt% دی‌بوراید تیتانیم، ت) ۴۰wt% دی‌بوراید تیتانیم، ث) ۵۰wt% دی‌بوراید تیتانیم، ج) ۶۰wt% دی‌بوراید تیتانیم، چ) ۷۰wt% دی‌بوراید تیتانیم + ۲۰wt% گرافن، ح) ۸۰wt% دی‌بوراید تیتانیم + ۲۰wt% گرافن و خ) ۱۰wt% گرافن + ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم

همان طور که دیده می‌شود تمامی نمونه‌ها عاری از عیب هستند و عیوب مرسوم فرآیند اصطکاکی اغتشاشی مانند حفرات کرمی شکل و تونلی در آنها دیده نمی‌شود که نشان‌دهنده تلاطم و اختلاط کافی و مناسب است. با توجه با تصاویر الف تا پ، در دی‌بوراید تیتانیم بیشتر از ۲۰wt%، ناحیه هم‌زده شده یکنواختی دیده نمی‌شود که می‌توان آن را به درصد بالای ذرات پودر و ناکافی بودن کار پلاستیک برای همگن‌سازی نسبت داد^[12]. همچنین با توجه به شکل‌های ت تا ج، ناحیه هم‌زده شده در تمامی نمونه‌های تقویت شده با گرافن یکنواخت است. در نمونه‌های هیبریدی شامل ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم + ۵wt% و ۱wt% گرافن (شکل‌های چ و ح) نیز ناحیه هم‌زده شده یکنواختی دیده می‌شود اما در نمونه با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۲wt% گرافن ناحیه هم‌زده شده یکنواخت



شکل ۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الف) ذرات دی‌بوراید تیتانیم و ب) صفحات گرافن استفاده شده

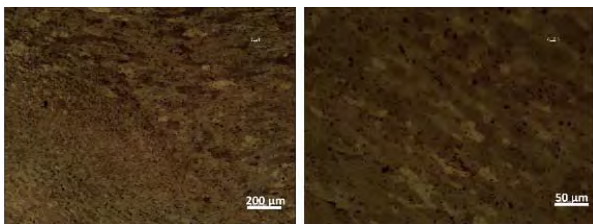
به‌منظور بررسی تحولات ریزساختاری و نحوه توزیع فازهای تقویت‌کننده و نیز توزیع سیلان در مقطع، پس از بریدن نمونه‌ها با گیوتین، سنباده‌زنی توسط سنباده‌های ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ و صیقل کاری با خمیر الماسه با اندازه ذرات ۱μm انجام شده و سطح نمونه‌ها با استفاده از محلول ترکیبی شامل ۵mL HBF₄ و ۲۰mL H₂O به مدت ۸۰ تا ۱۲۰s با ولتاژ ۲۰V و جریان مستقیم ۲A/cm² و قراردادن نمونه به‌عنوان آند (کاتد از جنس فولاد زنگ‌نزن)، حکاکی الکتروشیمیایی شد. تصویربرداری نمونه‌ها توسط یک میکروسکوپ استریوگرافیک نیکون و یک میکروسکوپ نوری الیم‌پیوس PME3 انجام شد. اندازه دانه‌ها به کمک نرم‌افزار آنالیز تصویر (ImageJ 1.38X) و میانگین‌گیری از ۳۰ اندازه‌گیری تعیین شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی MIRA3 TESCAN-XMU با هدف تعیین نحوه توزیع ذرات گرافن و دی‌بوراید تیتانیم درون فلز پایه و نقشه‌برداری عنصری استفاده شد. آزمون پراش‌سنجی اشعه ایکس توسط دستگاه مدل X'Pert PRO MPD و با طول موج ۱/۵۴۲Å انجام شد.

به‌منظور انجام آزمون میکروسختی‌سنجی، نمونه‌ها تحت آماده‌سازی متالوگرافی با روش توضیح‌داده شده قرار گرفتند. میکروسختی‌سنجی در فاصله ۱mm از سطح فوقانی نمونه‌ها، تحت نیروی ۵۰g با زمان نگهداری ۱۵s اثنایه انجام شد. سختی‌سنجی از فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت، منطقه حرارتی- مکانیکی و منطقه هم‌زده شده انجام شد و متوسط نتایج در مقیاس ویکرز گزارش شدند. نمونه‌های آزمون کشش طولی از مناطق هم‌زده شده به روش برش لیزری کامپیوتری کنترل عددی (CNC) و مطابق استاندارد ASTM E8M بریده شدند. آزمون کشش در دمای اتاق و در نرخ کرنش ۱mm/min با استفاده از دستگاه آزمون کشش محوری هانزفیلد مدل H10KS مجهز به یک کشش‌سنج محوری خودمحافظ HT به‌منظور ثبت منحنی نیرو- جابجایی در طول سنج روی نمونه‌های با درصد مختلف پودر انجام شد.

۳- نتایج و بحث

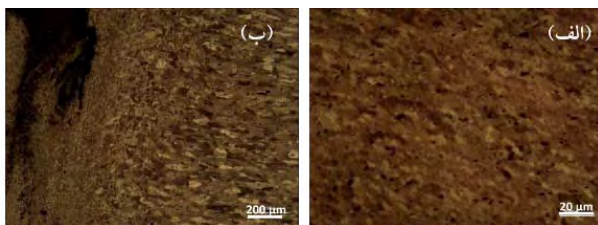
تصاویر میکروسکوپ استریوگرافی از مقطع نمونه‌های فرآوری شده با درصدهای مختلف دی‌بوراید تیتانیم و گرافن به‌صورت تکی و هیبریدی در شکل ۳ نشان داده می‌شود. نواحی تیره مربوط به فلز پایه و نواحی روشن مربوط به ناحیه هم‌زده شده (شامل پودرهای تقویت‌کننده) است.

به وجود آمدن دانه‌های ریزتر می‌شود، می‌توان بیان کرد تبلور مجدد دینامیکی پیوسته، سازوکار غالب برای ریزدانه شدن حین فرآوری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ است [13-15].



شکل ۵) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تابکاری شده پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی (الف) در ناحیه هم‌زده شده و (ب) ناحیه هم‌زده شده، متأثر از حرارت، حرارتی- مکانیکی و فاز پایه

تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تابکاری شده پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۲۰wt% دی بوراید تیتانیوم در ناحیه هم‌زده شده در حالت زمینه روشن در شکل ۶ نشان داده می‌شود. همان طور که ملاحظه می‌شود در اثر افزایش نرخ جوانه‌زنی مرزهای جدید به علت حضور ذرات، قفل شدن مرز دانه‌ها و اُفت نرخ رشد دانه‌ها حین فرآیند تبلور مجدد دینامیکی، ریزدانه شدن شدید رخ داده و اندازه دانه‌ها به ۳μm رسیده است که از نمونه اولیه و نمونه فرآیند اصطکاکی اغتشاشی شده بدون ذرات تقویت کننده نیز کوچک تر است [13-15]. با دقت در شکل ۶- الف، می‌توان توزیع مناسب ذرات دی بوراید تیتانیوم را مشاهده نمود که اندازه این ذرات در حدود ۱ تا ۳μm متغیر است.



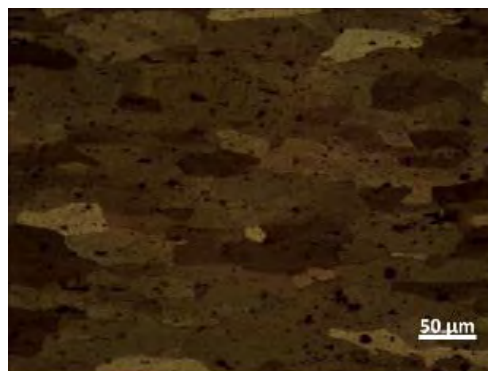
شکل ۶) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تابکاری شده پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۲۰wt% دی بوراید تیتانیوم (الف) در ناحیه هم‌زده شده و (ب) ناحیه هم‌زده شده، متأثر از حرارت، حرارتی- مکانیکی و فاز پایه

تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تابکاری شده پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۱wt% گرافن در ناحیه هم‌زده شده در شکل ۷ نشان داده می‌شود. مانند نمونه دارای میکروذرات دی بوراید تیتانیوم، در این نمونه نیز به علت حضور ذرات و قفل شدن مرز دانه‌ها و در نتیجه اُفت نرخ رشد دانه‌ها حین فرآیند تبلور مجدد دینامیکی، ریزدانه شدن رخ داده است و اندازه دانه‌ها به ۸μm رسیده است.

توزیع پودرها در نمونه با ۲۰wt% دی بوراید تیتانیوم و ۱wt% گرافن توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد (شکل ۸). تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه فرآوری شده در

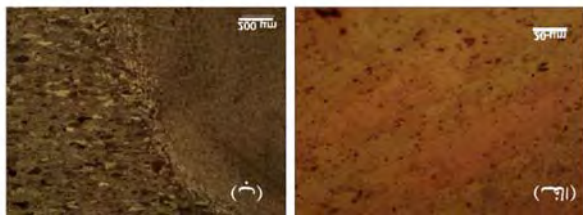
نیست که می‌تواند به علت درصد بالای پودر و کلوخه شدن آنها یا کافی نبودن کار پلاستیک به منظور توزیع پودر باشد.

تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تابکاری شده قبل از فرآیند اصطکاکی در شکل ۴ نشان داده می‌شود. ریزساختار به صورت دانه‌های نسبتاً هم‌محور با اندازه ۵۳μm است و حفرات قابل مشاهده ناشی از اثر محلول اچ بر سطح فلز است که منجر به خوردگی موضعی به شکل حفره در سطح شده است (شکل ۴).



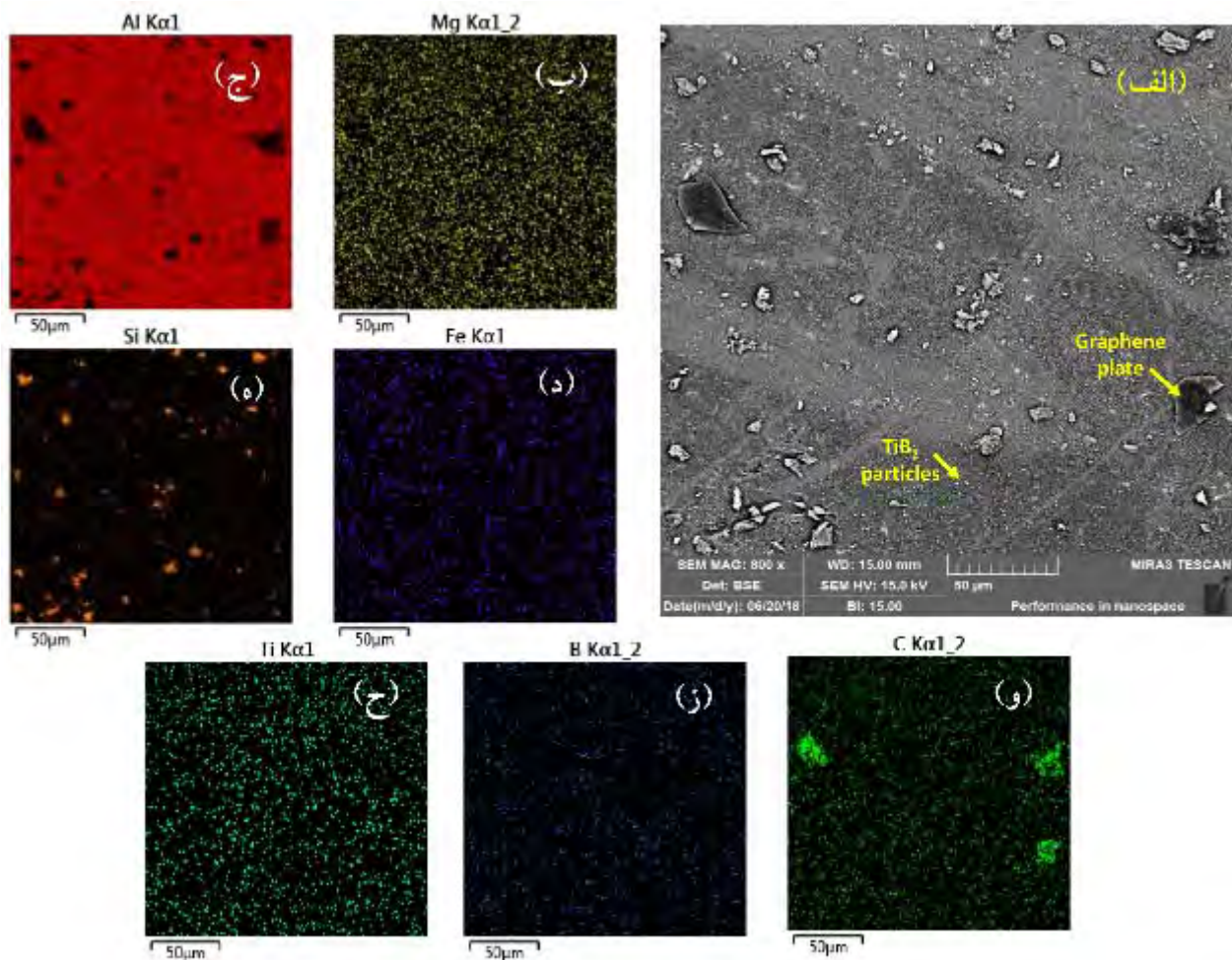
شکل ۴) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تابکاری شده قبل از فرآیند اصطکاکی

تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار ناحیه هم‌زده شده آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تابکاری شده پس از فرآیند اصطکاکی نشان می‌دهد که در مقایسه با ریزساختار فلز پایه قبل از فرآیند، اندازه دانه‌ها در اثر تغییر شکل و حرارت در ناحیه هم‌زده شده کاهش یافته است و به ۱۸μm رسیده است (شکل ۵). به طور کلی تغییر شکل پلاستیک و حرارت ناشی از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی سبب تغییر دانه‌های بزرگ فلز تابکاری شده به ریزساختاری حاوی دانه‌های هم‌محور و به شدت آرایش نیافته، در نتیجه سازوکار تبلور مجدد دینامیکی می‌شود [13-15]. دانه‌ها در منطقه حرارتی- مکانیکی یک تغییر شکل برشی ساده و شدید در صفحه عمود بر جهت ابزار نزدیک به ناحیه هم‌زده شده را تجربه می‌کنند. تاثیر این تغییر شکل بر تحولات در ریزدانه‌های فرعی درون دانه‌های منطقه حرارتی- مکانیکی به شدت به آرایش دانه‌ها وابسته است. به طور کلی، بازیابی دینامیکی و تبلور مجدد دینامیکی در حین فرآوری اصطکاکی اغتشاشی فلزات و آلیاژهای مختلف سبب ریزدانه شدن آنها می‌شود. حین تغییر شکل داغ فلزات با انرژی نقص چیدن بالا مانند آلومینیوم، بازیابی دینامیکی اتفاق می‌افتد. در مراحل اولیه تغییر شکل، با حرکت و اندرکنش نابجایی‌ها، تنش سیلان افزایش یافته و با افزایش چگالی نابجایی‌ها، نرخ بازیابی افزایش یافته و نابجایی‌ها شروع به آرایش مجدد و تشکیل مرزهای کم‌زاویه مانند دانه‌های فرعی می‌کنند. حین کارپذیری داغ آلومینیوم و آلیاژهای آن، بازیابی دینامیکی دخیل بوده که به تبلور مجدد دینامیکی وابسته است. از آنجا که تبلور مجدد دینامیکی پیوسته مسئول رخداد تحولات ریزساختاری در آلیاژ آلومینیوم تابکاری شده است و باعث



شکل ۷) تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تابکاری شده پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۱wt% گرافن (الف) در ناحیه همزده شده و (ب) ناحیه همزده شده، متاثر از حرارت، حرارتی- مکانیکی و فاز پایه

منطقه همزده شده نشان می‌دهد که ساختار عاری از حفره است و توزیع عناصر Mg، Si و Fe در ساختار دیده می‌شود. نقشه عنصری C به وضوح توزیع مناسب صفحات گرافن را در ساختار نشان می‌دهد. همچنین نقشه عنصری Ti و B توزیع مناسب ذرات دی‌بوراید تیتانیم را در فلز پایه آلومینیوم ۶۰۶۱ نشان می‌دهد. یکسانی الگوهای Ti و B موید این نکته است که این عناصر مربوط به ذرات دی‌بوراید تیتانیم هستند.



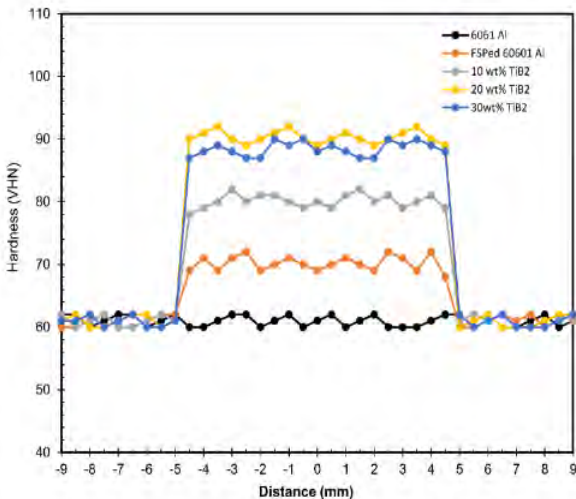
شکل ۸) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ تابکاری شده پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۲wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۱wt% گرافن (الف) و نقشه عنصرهای Mg (ب)، Al (ج)، Fe (د)، Si (ه)، C (و)، B (ز) و Ti (ح).

اغتتشاشی با ۲wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۱wt% گرافن را نشان می‌دهد. در هر دو نمونه پیک‌های واضح و تیز مربوط به زیرلایه آلومینیوم ۶۰۶۱ دیده می‌شود. همچنین در نمونه فرآوری شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۲wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۱wt% گرافن، پیک‌های دی‌بوراید تیتانیم دیده می‌شود که نشان‌دهنده حضور این جزء در زمینه آلومینیومی است. عدم مشاهده پیک مربوط به گرافن می‌تواند به علت درصد کم این جزء باشد؛ زیرا آنالیز پراش‌سنجی اشعه ایکس در اغلب موارد فازهایی با بیش از ۵wt% را شناسایی می‌کند [16, 17].

طیف پراش انرژی اشعه ایکس نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ قبل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۲wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۱wt% گرافن در نمودار ۱ مقایسه شده است. در نمودار الف، طیف مربوط به بستر آلومینیوم و عناصر آلیاژی Fe، Mg و Si دیده می‌شود. پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، عناصر Ti و C در طیف دیده می‌شوند که به ترتیب مربوط به دی‌بوراید تیتانیم و گرافن هستند.

نمودار ۲ مقایسه الگوی پراش اشعه ایکس نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ قبل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و پس از فرآیند اصطکاکی

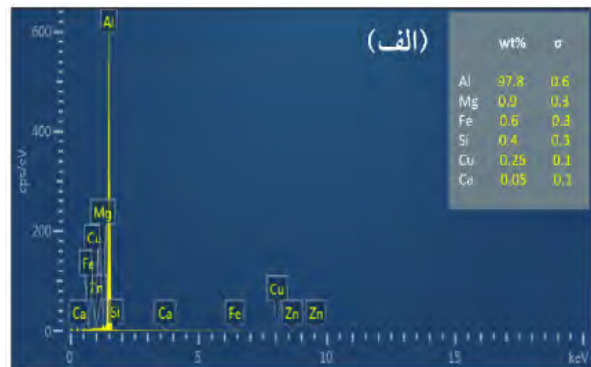
اصطکاکی اغتشاشی سبب افزایش سختی در منطقه هم‌زده شده و حرارتی- مکانیکی می‌شود که می‌توان آن را به جزییات ریزساختاری شامل ریزدانه شدن (که با مکانیزم هال- پچ سبب افزایش استحکام می‌شود) و افزایش چگالی نابجایی‌ها نسبت داد [14].



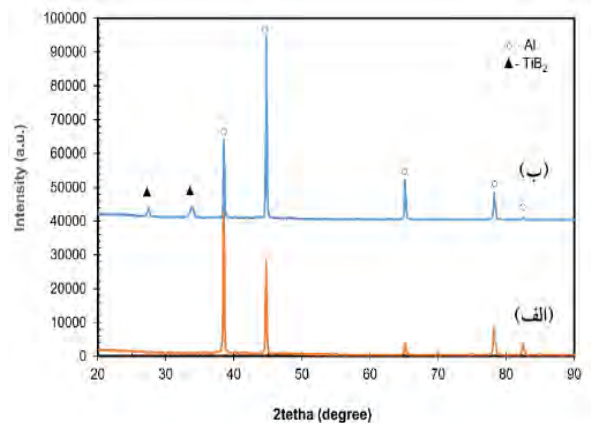
نمودار ۳) پروفیل سختی در مقطع نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱، نمونه فرآوری شده با عملیات اصطکاکی اغتشاشی بدون پودر و نمونه فرآوری شده با درصد‌های مختلف دی‌بوراید تیتانیم

همچنین در موادی با انرژی نقص چیدمانی بالا مانند آلومینیوم، فاصله بین نابجایی‌ها کم است و انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی سبب کار سختی شدید و در نتیجه افزایش سختی می‌شود [18, 19]. با افزودن دی‌بوراید تیتانیم به زمینه آلومینیومی، سختی افزایش یافته و با افزایش درصد دی‌بوراید تیتانیم تا ۲۰wt%، روند افزایشی در پروفایل سختی ناحیه هم‌زده شده و حرارتی- مکانیکی دیده می‌شود اما در ۳۰wt% دی‌بوراید تیتانیم، کاهش جزیی در سختی دیده می‌شود. روند افزایش سختی با افزایش دی‌بوراید تیتانیم تا ۲۰wt% می‌تواند به علت حضور ذرات سخت دی‌بوراید تیتانیم در ساختار باشد که علاوه بر افزودن سختی آلیاژ، سبب قفل شدن نابجایی‌ها، و ریزدانه شدن ساختار شده و در نتیجه سختی را افزایش می‌دهد. در درصد‌های بیشتر (۳۰wt% دی‌بوراید تیتانیم)، به علت عدم توزیع خوب در ناحیه هم‌زده و پودر تقویت کننده (شکل ۳- پ)، به طور کلی سختی در ناحیه هم‌زده شده و حرارتی- مکانیکی کمتر می‌شود (هرچند در برخی از نقاط که تجمع پودر وجود دارد سختی بالایی دیده می‌شود) [20, 21].

نمودار ۴) پروفیل سختی در مقطع نمونه‌های فرآوری شده با درصد‌های مختلف گرافن را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها نیز با افزایش درصد گرافن، سختی افزایش می‌یابد؛ هرچند پروفیل سختی نمونه‌های با ۱ و ۲wt% گرافن، تفاوت محسوسی ندارد. در این نمونه‌ها نیز به علت حضور صفحات گرافن، قفل شدن نابجایی‌ها، و ریزدانه شدن ساختار عوامل اصلی افزایش سختی نمونه هستند [20, 21].



نمودار ۱) طیف‌سنجی پراش انرژی اشعه ایکس نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ (الف) قبل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و (ب) پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۱wt% گرافن.



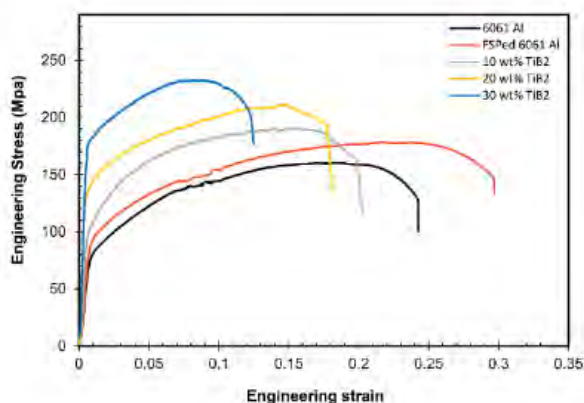
نمودار ۲) الگوی پراش اشعه ایکس نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ (الف) قبل از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و (ب) پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۱wt% گرافن

با توجه به بررسی‌های میکروسکوپی می‌توان گفت نمونه‌های تولید شده دارای توزیع مناسب پودر هستند و ساخت نمونه‌های کامپوزیتی با موفقیت انجام شده است.

به منظور بررسی اثر فرآیند اصطکاکی اغتشاشی و درصد‌های مختلف پودرهای تقویت کننده بر سختی نمونه‌ها، پروفیل سختی در مقطع ۱mm زیر سطح، بررسی شد. نمودار ۳) پروفیل سختی در مقطع نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱، نمونه فرآوری شده با عملیات اصطکاکی اغتشاشی بدون پودر و نمونه فرآوری شده با درصد‌های مختلف دی‌بوراید تیتانیم را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، انجام فرآیند

۱۷۰BHN می‌شود. طبق نظر این محققان، افزودن نانوذرات آلومینا تا ۶wt% سبب توزیع خوب ذرات می‌شود اما در بیشتر از این مقدار، کلوخه شدن ذرات و توزیع نامناسب پودر رخ داده و خواص کاهش می‌یابد [22].

به منظور بررسی اثر ذرات تقویت کننده بر خواص کششی نمونه‌ها از آزمون کشش تک محوره استفاده شد. نمودار ۶ منحنی‌های کشش نمونه‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ قبل و بعد از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۱۰، ۲۰ و ۳۰wt% دی‌بوراید تیتانیوم را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از منحنی‌ها در جدول ۲ خلاصه شده‌اند.

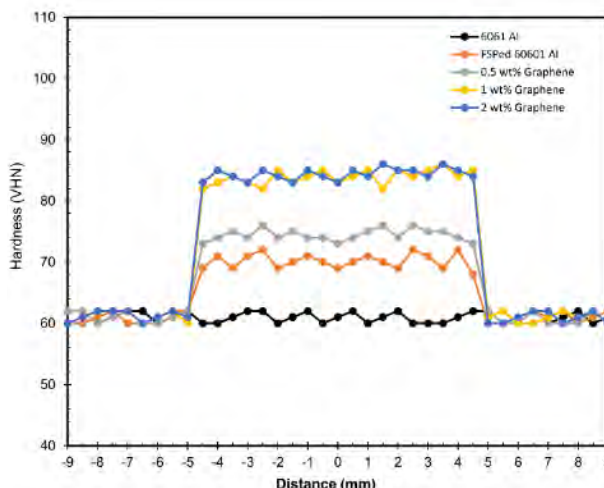


نمودار ۶) منحنی‌های به دست آمده از آزمون کشش تک محوره نمونه‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ قبل و بعد از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۱۰، ۲۰ و ۳۰wt% دی‌بوراید تیتانیوم

جدول ۲) نتایج به دست آمده از آزمون کشش تک محوره نمونه‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ قبل و بعد از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۱۰، ۲۰ و ۳۰wt% دی‌بوراید تیتانیوم

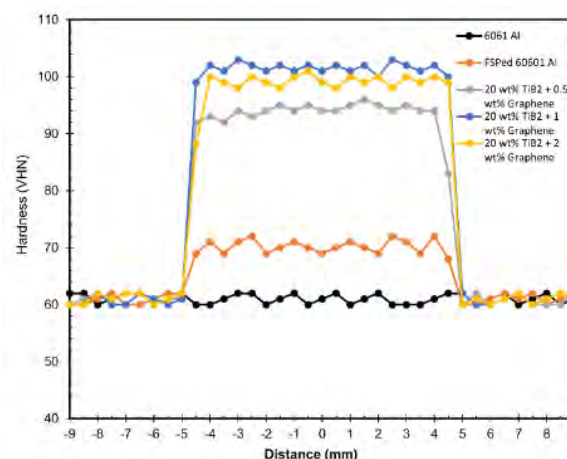
نمونه	تنش تسلیم (MPa)	استحکام شکست (MPa)	کرنش شکست
آلومینیوم ۶۰۶۱	۷۵±۳	۱۶۰±۱۰	۰/۲۴±۰/۰۱
آلومینیوم ۶۰۶۱ پس از فرآیند	۹۳±۴	۱۷۶±۴	۰/۲۹±۰/۰۲
آلومینیوم ۶۰۶۱ با ۱۰wt% دی‌بوراید تیتانیوم	۸۸±۲	۱۸۹±۵	۰/۲۰±۰/۰۱
آلومینیوم ۶۰۶۱ با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیوم	۱۲۵±۴	۲۱۰±۴	۰/۱۸±۰/۰۱
آلومینیوم ۶۰۶۱ با ۳۰wt% دی‌بوراید تیتانیوم	۱۷۲±۷	۲۳۲±۸	۰/۱۲±۰/۰۱

پس از انجام فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، به طور همزمان استحکام و انعطاف پذیری ماده افزایش یافته و در نتیجه چقرمگی بیشتر شده است که به علت ریزدانه شدن ماده در حین فرآیند اصطکاکی اغتشاشی است. همان طور که در بررسی‌های ریزساختار مربوط به نمونه فرآوری شده با فرآیند اصطکاکی اغتشاشی دیده شد، ساختار اولیه پس از فرآیند به ساختاری ریزدانه تبدیل می‌شود که می‌تواند همزمان سبب افزایش استحکام (طبق رابطه هال-پچ) و به تاخیر افتادن پدیده گلوئی شدن و در نتیجه افزایش انعطاف پذیری شود [23]. با افزودن ذرات دی‌بوراید تیتانیوم، استحکام به طور پیوسته



نمودار ۴) پروفیل سختی در مقطع نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱، نمونه فرآوری شده با عملیات اصطکاکی اغتشاشی بدون پودر و نمونه فرآوری شده با درصد‌های مختلف گرافن

پروفیل سختی در نمونه‌های کامپوزیتی با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیوم و ۱، ۰/۵ و ۲wt% گرافن در نمودار ۵ مقایسه می‌شود. در مقایسه با نمونه‌های تقویت شده با پودر تکی، استفاده همزمان از دو نوع پودر سبب افزایش میزان سختی شده است و بالاترین سختی مربوط به نمونه با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیوم و ۱wt% گرافن است. ریزدانه شدن شدید در نمونه فرآوری شده با پودرهای هیبریدی و حضور درصد بالای ذرات تقویت کننده و اثر هم‌افزایی این ذرات عامل اصلی مقاومت به سختی بالا در این نمونه است [20, 21].

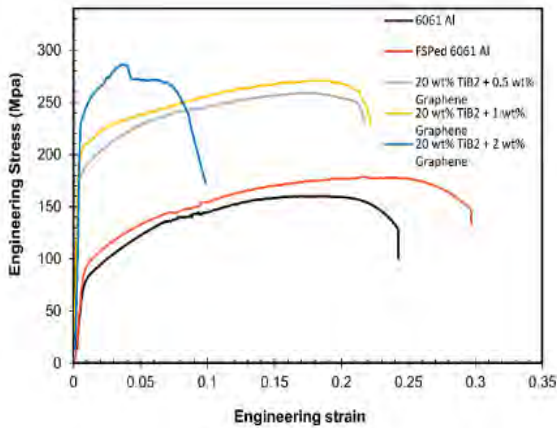


نمودار ۵) پروفیل سختی در مقطع نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱، نمونه فرآوری شده با عملیات اصطکاکی اغتشاشی بدون پودر و نمونه فرآوری شده با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیوم و ۱، ۰/۵ و ۲wt% گرافن

پراکاش و همکاران اثر افزودن صفر، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰wt% نانوذرات آلومینا به کامپوزیت آلومینیوم ۶۰۶۱ با ۵wt% گرافن توسط فرآیند اصطکاکی اغتشاشی را بررسی نمودند. نتایج سختی‌سنجی نشان داد که افزودن آلومینا تا ۶wt% سبب افزایش سختی از ۱۱۵BHN (مربوط به نمونه تقویت شده با ۵wt% گرافن) به

همان طور که در نمودار ۷ مشاهده می‌شود، افزودن گرافن تا ۱wt% سبب افزایش همزمان استحکام، تنش تسلیم و کرنش شکست می‌شود. حضور ذرات گرافن می‌تواند با قفل کردن نابجایی‌ها و عدم اجازه به رشد دانه‌ها سبب استحکام زمینه شود. طبق نظر تانگ و همکاران، علت افزایش غیرمعمول انعطاف‌پذیری در این نمونه‌ها می‌تواند صاف شدن صفحات چروک خورده گرافن در حین تغییر فرم پلاستیک باشد که منجر به مقابله با رشد ترک‌ها و گلوپی شدن شود. در نمونه با ۲wt% گرافن، تنش تسلیم و استحکام شکست، افزایش یافته اما انعطاف‌پذیری آفت شدیدی دارد. با توجه به نتایج مشاهده شده می‌توان نمونه با ۱wt% گرافن را به‌عنوان نمونه بهینه انتخاب نمود. تنش تسلیم، استحکام نهایی و کرنش شکست این نمونه به ترتیب ۱۲۶ Mpa، ۲۴۷ Mpa و ۰/۲۶ است [25-28].

منحنی‌های کشش نمونه‌های تقویت‌شده با پودرهای هیبریدی دی‌بوراید تیتانیم و گرافن در نمودار ۸ نشان داده شده و نتایج این منحنی‌ها در جدول ۴ خلاصه شده است.



نمودار ۸) نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کشش تک محوره نمونه‌های آلومینیوم 6061 قبل و بعد از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۱،۰/۵ و ۲۰wt% گرافن

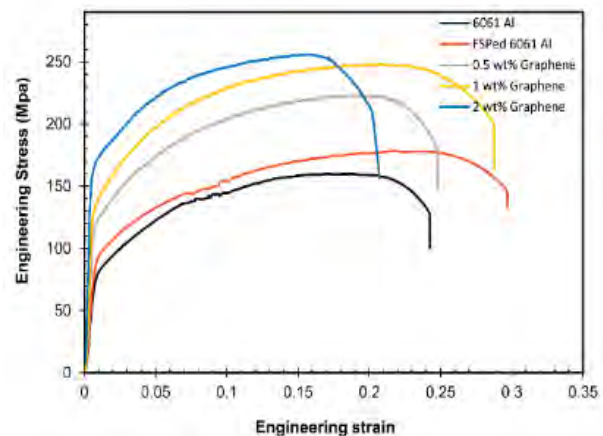
جدول ۴) نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کشش تک محوره نمونه‌های آلومینیوم 6061 قبل و بعد از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۱،۰/۵ و ۲۰wt% گرافن

نمونه	تنش تسلیم (MPa)	استحکام شکست (MPa)	کرنش شکست
آلومینیوم 6061	۷۵±۲	۱۶۰±۲	۰/۲۴±۰/۰۱
آلومینیوم 6061 پس از فرآیند	۹۳±۲	۱۷۶±۵	۰/۲۹±۰/۰۱
آلومینیوم 6061 با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۰/۵wt% گرافن	۱۷۳±۴	۲۵۹±۶	۰/۲۲±۰/۰۱
آلومینیوم 6061 با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۱wt% گرافن	۱۹۱±۶	۲۷۱±۷	۰/۲۳±۰/۰۱
آلومینیوم 6061 با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۲wt% گرافن	۲۲۵±۷	۲۸۱±۵	۰/۰۹±۰/۰۱

افزایش و انعطاف‌پذیری کاهش می‌یابد. حضور ذرات تقویت‌کننده منجر به قفل شدن حرکت نابجایی‌ها شده و در نتیجه استحکام کششی و تسلیم ماده را افزایش می‌دهد. همچنین این ذرات می‌توانند با قفل کردن مرز دانه‌ها، سبب ریزدانه‌تر شدن ساختار و در نتیجه افزایش بیشتر استحکام شوند [24].

در نمونه‌های اخیر، حضور ذرات دی‌بوراید تیتانیم که ماهیتی سخت و ترد دارند سبب کاهش انعطاف‌پذیری ماده می‌شود و در نمونه با ۳۰wt% دی‌بوراید تیتانیم، کاهش انعطاف‌پذیری بسیار زیاد است که هم می‌تواند به علت کسر حجمی بالای ذرات تقویت‌کننده و هم به علت کلوخه شدن این ذرات (شکل ۳- پ) باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نمونه با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم را به‌عنوان نمونه بهینه انتخاب نمود. تنش تسلیم، استحکام نهایی و کرنش شکست این نمونه به ترتیب ۱۲۵ Mpa، ۲۱۰ Mpa و ۰/۱۸ است، در حالی که برای نمونه آلومینیوم 6061 اولیه این مقادیر به ترتیب عبارتند از: ۷۵ Mpa، ۱۶۰ Mpa و ۰/۲۴.

منحنی‌های کشش تک محوره نمونه‌های آلومینیوم 6061 قبل و بعد از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۱،۰/۵ و ۲۰wt% گرافن در نمودار ۷ و نتایج به‌دست‌آمده از منحنی‌ها در جدول ۳ خلاصه نشان داده شده است.



نمودار ۷) منحنی‌های به‌دست‌آمده از آزمون کشش تک محوره نمونه‌های آلومینیوم 6061 قبل و بعد از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۱،۰/۵ و ۲۰wt% گرافن

جدول ۳) نتایج به‌دست‌آمده از آزمون کشش تک محوره نمونه‌های آلومینیوم 6061 قبل و بعد از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با ۱،۰/۵ و ۲۰wt% گرافن

نمونه	تنش تسلیم (MPa)	استحکام شکست (MPa)	کرنش شکست
آلومینیوم 6061	۷۵±۲	۱۶۰±۲	۰/۲۴±۰/۰۱
آلومینیوم 6061 پس از فرآیند	۹۳±۲	۱۷۶±۵	۰/۲۹±۰/۰۱
آلومینیوم 6061 با ۰/۵wt% گرافن	۱۱۳±۴	۲۲۰±۸	۰/۲۵±۰/۰۱
آلومینیوم 6061 با ۱wt% گرافن	۱۲۶±۵	۲۴۷±۶	۰/۲۹±۰/۰۲
آلومینیوم 6061 با ۲wt% گرافن	۱۶۳±۷	۲۵۵±۵	۰/۲۰±۰/۰۱

- NE, Wanhill RJH, editors. Aerospace Materials and Material Technologies. Singapore: Springer; 2017.
- 2- Kissell JR, Pantelakis SG, Haidemenopoulos GN. Aluminum and aluminum alloys. In: Wessel JK, editor. Handbook of Advanced Materials: Enabling New Designs. Hoboken: John Wiley & Sons; 2004.
- 3- Tjong SC, Ma ZY. Microstructural and mechanical characteristics of in situ metal matrix composites. Materials Science and Engineering: R: Reports. 2000;29(3):49-113.
- 4- Surappa MK. Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. Sadhana. 2003;28(1-2):319-334.
- 5- Ma ZY. Friction stir processing technology: A review. Metallurgical and Materials Transactions A. 2008;39(3):642-658.
- 6- Nicholas ED. Friction processing technologies. Welding in the World. 2003;47(11-12):2-9.
- 7- Gharacheh MA. The influence of the ratio of "rotational speed/traverse speed" on mechanical properties of AZ31 friction stir welds [Dissertation]. Tehran: Sharif University of Technology; 2005. [Persian]
- 8- Jeon CH, Jeong YH, Seo JJ, Tien HN, Hong ST, Yum YJ, et al. Material properties of graphene/aluminum metal matrix composites fabricated by friction stir processing. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2014;15(6):1235-1239.
- 9- Maurya R, Kumar B, Ariharan S, Ramkumar J, Balani K. Effect of carbonaceous reinforcements on the mechanical and tribological properties of friction stir processed Al6061 alloy. Materials & Design. 2016;98:155-166.
- 10- Bisadi H, Abasi A. Fabrication of Al7075/TiB₂ surface composite via friction stir processing. American Journal of Materials Science. 2012;1(2):67-70.
- 11- Eskandari H, Taheri R. A novel technique for development of aluminum alloy matrix/TiB₂/Al₂O₃ hybrid surface nanocomposite by friction stir processing. Procedia Materials Science. 2015;11:503-508.
- 12- Shafiei-Zarghani A, Kashani-Bozorg SF, Zarei-Hanzaki A. Microstructures and mechanical properties of Al/Al₂O₃ surface nano-composite layer produced by friction stir processing. Materials Science and Engineering: A. 2009;500(1-2):84-91.
- 13- Narimani M, Lotfi B, Sadeghian Z. Evaluation of the microstructure and wear behaviour of AA6063-B₄C/TiB₂ mono and hybrid composite layers produced by friction stir processing. Surface and Coatings Technology. 2016;285:1-10.
- 14- Arora HS, Singh H, Dhindaw BK. Composite fabrication using friction stir processing-a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012;61(9-12):1043-1055.
- 15- McNelley TR, Swaminathan S, Su JQ. Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys. Scripta Materialia. 2008;58(5):349-354.
- 16- Ramesh CS, Pramod S, Keshavamurthy R. A study on microstructure and mechanical properties of Al 6061-TiB₂ in-situ composites. Materials Science and Engineering: A. 2011;528(12):4125-4132.
- 17- Tjong SC, Wang GS, Geng L, Mai YW. Cyclic deformation behavior of in situ aluminum-matrix composites of the system Al-Al₃Ti-TiB₂-Al₂O₃. Composites science and technology. 2004;64(13-14):1971-1980.
- 18- Tayyebi M, Eghbali B. Microstructure and mechanical properties of SiC-particle-strengthening tri-metal Al/Cu/Ni composite produced by accumulative roll

با افزایش درصد گرافن، استحکام تسلیم و نهایی نمونه‌ها افزایش می‌یابد اما کرنش شکست در نمونه با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۱wt% گرافن حداکثر است. با مقایسه نتایج جدول‌های ۲ تا ۴ می‌توان دریافت که بیشترین استحکام مربوط به نمونه‌هایی است که در آنها از ترکیبی از پودرها استفاده شده است. این پدیده را می‌توان به اثر هم‌زمان ذرات تقویت‌کننده در کاهش چشمگیر اندازه ذرات و قفل‌شدن موثر نایجایی‌ها ارتباط داد. یک دستاورد مهم دیگر در نمونه‌های فوق، عدم کاهش زیاد انعطاف‌پذیری است که ناشی از حضور گرافن در ماده است.

همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد، صاف‌شدن صفحات چروک‌خورده گرافن حین تغییر فرم پلاستیک و مقابله این صفحات با رشد ترک‌ها منجر به بهبود انعطاف‌پذیری ماده می‌شود. توجه شود که در نمونه با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۲wt% گرافن، انعطاف‌پذیری به‌شدت کاهش یافته است که می‌تواند ناشی از کلوخه‌شدن شدید ذرات در این نمونه باشد که سبب افت شدید در کرنش شکست شده است [28]. با توجه به نتایج، نمونه با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۱wt% گرافن را می‌توان به‌عنوان نمونه بهینه انتخاب نمود. در این نمونه استحکام تسلیم، استحکام نهایی و کرنش شکست به‌ترتیب عبارتند از: ۱۹۱Mpa، ۲۷۱Mpa و ۰/۲۳.

۶- نتیجه‌گیری

اثر افزودن ذرات تقویت‌کننده دی‌بوراید تیتانیم و گرافن به‌صورت تکی و هیبریدی بر خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدشده به روش اصطکاکی اغتشاشی بررسی شد و نتایج نشان دادند که:

- فرآیند اصطکاکی اغتشاشی سبب کوچک‌تر شدن اندازه دانه شده و استحکام و انعطاف‌پذیری آلیاژ ۶۰۶۱ را افزایش می‌دهد.
- در نمونه‌های فرآوری‌شده با تقویت‌کننده دی‌بوراید تیتانیم، کاهش اندازه دانه شدیدتری نسبت به نمونه فرآوری‌شده بدون پودر رخ داد و با افزایش درصد دی‌بوراید تیتانیم تا ۲۰wt%، سختی و استحکام ناحیه هم‌زده‌شده افزایش و انعطاف‌پذیری کاهش می‌یابد.
- افزودن گرافن تا ۱wt% سبب افزایش سختی، استحکام، تنش تسلیم و کرنش شکست می‌شود.

- در میان تمامی نمونه‌ها بالاترین سختی و استحکام مربوط به نمونه تقویت‌شده با پودرهای هیبریدی است و نمونه با ۲۰wt% دی‌بوراید تیتانیم و ۱wt% گرافن به‌عنوان نمونه بهینه انتخاب شد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

سهام نویسندگان: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

منابع

- 1- Rambabu P, Prasad NE, Kutumbarao VV, Wanhill RJH. Aluminium alloys for aerospace applications. In: Prasad

- by friction stir processing: A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;224:117-134.
- 24- Suresh S, Vinayaga Moorthi NS, Vettivel SC, Selvakumar N. Mechanical behavior and wear prediction of stir cast Al-TiB₂ composites using response surface methodology. *Materials & Design*. 2014;59:383-396.
- 25- Bastwros M, Kim GY, Zhu C, Zhang K, Wang S, Tang X, et al. Effect of ball milling on graphene reinforced Al6061 composite fabricated by semi-solid sintering. *Composites Part B: Engineering*. 2014;60:111-118.
- 26- Kalyanamanohar V, Chandra Appalachari DG. Parameter optimization and evaluation of mechanical and thermal properties of nanographene reinforced Al 6060 surface composite using FSP. *AIP Conference Proceedings*. 2018;1943(1):020052.
- 27- Hu Z, Tong G, Lin D, Chen C, Guo H, Xu J, et al. Graphene-reinforced metal matrix nanocomposites—a review. *Materials Science and Technology*. 2016;32(9):930-953.
- 28- Zhang Y, Li X. Bioinspired, graphene/Al₂O₃ doubly reinforced aluminum composites with high strength and toughness. *Nano Letters*. 2017;17(11):6907-6915.
- bonding process. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2018;25;(3):357-364.
- 19- Tayyebi M, Rahmatabadi D, Hashemi R. Review of mechanical and microstructural properties of aluminum matrix composites reinforced with ceramic particles produced by SPD processes. *Journal of Science and Technology of Composites*. 2019;5(4):583-594. [Persian]
- 20- Jauhari S, Kumar HGP, Xavior MA. Synthesis and characterization of AA 6061-Graphene-SiC hybrid nanocomposites processed through microwave sintering. *InIOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016;149:012086.
- 21- Suresh S, Vinayaga Moorthi NS. Process development in stir casting and investigation on microstructures and wear behavior of TiB₂ on Al6061 MMC. *Procedia Engineering*. 2013;64:1183-1190.
- 22- Prakash T, Sivasankaran S, Sasikumar P. Mechanical and Tribological Behaviour of friction-Stir-Processed Al 6061 Aluminium Sheet Metal Reinforced with 0.5 Gr/Al₂O₃ Hybrid Surface Nanocomposite. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2015;40(2):559-569.
- 23- Sharma V, Prakash U, Kumar BVM. Surface composites