ماه‌نامه علمی پژوهشی
مهندسی ساخت و تولید ایران
www.smeir.org
10.22034/IJME.2024.432303.1889

تولید کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی از براده‌های بازیافتی به روش اکستروژن داغ

حمیدرضا رضایی آشتیانی[1*]، حسین احسانی[2]

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران
۲ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: hr_rezaei@arakut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی
دریافت: ۴ دی ۱۴۰۲
پذیرش: ۹ اسفند ۱۴۰۲

کلیدواژگان:
کامپوزیت زمینه آلومینیومی
براده بازیافتی
اکستروژن داغ
خواص مکانیکی
میکروساختار

چکیده

حدود ۳۰ درصد از هزینه‌های تولید آلومینیوم صرف انرژی می‌شود، لذا بازیافت ضایعات آلومینیوم به‌خصوص در حالت جامد نقش به‌سزایی در کاهش مصرف انرژی و آلودگی زیست محیطی دارد. در این مقاله با حذف فرایند ذوب و ریخته‌گری و تنها با استفاده از فشردن سرد و سپس اکستروژن داغ پودر حاصل از براده‌های بازیافتی آلومینیوم ۶۰۶۱ و نانوپودرهای سرامیکی اکسیدهای آلومینیوم و تیتانیم، در دما و کاهش سطح مقطع مناسب کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی مختلف تولید و تغییرات میکروساختاری و خواص مکانیکی قطعات تولید شده بررسی شدند. نتایج میکروساختاری نشان داد پودرهای سرامیکی بصورت یکنواخت در داخل پودرهای حاصل از براده آلومینیم توزیع شده و خواص ماده تقریباً یکنواخت است و در تمامی نمونه‌های اکسترود شده، دانه‌ها در سطح خارجی قطعه نسبت به نواحی داخلی ساختار ریزتر و کشیده شده‌تری را داراست و ریزترین اندازه دانه در ساختار کامپوزیت با اکسید آلومینیوم مشاهده شد. بررسی خواص مکانیکی قطعات تولیدی نشان داد که نمونه آلومینیوم بازیافتی دارای سختی ۱۲۲ ویکرز و استحکام نهایی ۴۳۳ مگاپاسکال می‌باشد که با توجه به سختی و استحکام نهایی نمونه اولیه آلومینیوم (۱۳۲ ویکرز و ۵۰۰ مگاپاسکال) خواص قابل قبول و تقریباً نزدیک به نمونه اصلی برای یک نمونه بازیافتی حالت جامد محسوب می‌شود و با افزودن پودر اکسید تیتانیوم به پودر براده‌ها سختی قطعه کامپوزیتی به حدود ۱۱۰ ویکرز و استحکام نهایی به حدود ۴۰۶ مگاپاسکال می‌رسد در حالی‌که اکسید آلومینیوم سختی و استحکام کامپوزیت را به ترتیب به ۱۳۳ ویکرز و ۵۰۷ مگاپاسکال می‌رساند.

Production of aluminum-based composites from recycled chips by hot extrusion processing

Hamid Reza Rezai Ashtiani[1]*, Hossein Ehsani[2]

1- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran
2- MSc, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran
* Corresponding Author's Email: hr_rezaei@arakut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 25 December 2023
Accepted: 28 February 2024

Keywords:
Aluminum Based Composite
Recycled Chips
Hot Extrusion
Mechanical Properties
Microstructure

Abstract

About 30% of aluminum production costs are spent on energy, so recycling aluminum, especially in solid form, plays a significant role in reducing energy consumption and environmental pollution. In this paper, different aluminum-based composites were produced by removing the melting and casting process and using only cold pressing and then hot extrusion of the powder obtained from recycled aluminum 6061 chips and ceramic nanopowders of aluminum and titanium oxides at the appropriate temperature and reduction then changes of microstructural and mechanical properties of the produced parts were investigated. The microstructural results showed that ceramic powders are uniformly distributed inside the aluminum chip powders and the material properties are almost uniform and the grains on the outer surface of the part have a finer and more stretched structure than the inner regions and the smallest grain size was observed in the composite structure with aluminum oxide. Evaluation of the mechanical properties of the samples indicated that the recycled aluminum sample has a hardness of 122 Vickers and an ultimate strength of 433 MPa, which according to the hardness and ultimate strength of the original aluminum sample (132 Vickers and 500 MPa), the properties are acceptable and almost close to the original sample for a recycled sample, and by adding titanium oxide to the chips powder, the hardness of composite sample increased to 110 Vickers, and the final strength reached about 406 MPa, while aluminum oxide increased both the hardness and strength of the composite to 133 Vickers and 507 MPa, respectively.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Rezai Ashtiani HR, Ehsani H. Production of aluminum-based composites from recycled chips by hot extrusion processing. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Feb 20;10(12):28-38. doi: 10.22034/IJME.2024.432303.1889 [In Persian]

۱– مقدمه

بازیافت به معنای آماده سازی مواد برای استفاده دوباره است. امروزه با پیشرفت تکنولوژی موادی زیادی قابل بازیافت هستند که از جمله می‌توان به ضایعات فلزی سبک و سنگین و فلزات قراضه، پلاستیک، شیشه، کاغذ، مقوا، برخی مواد شیمیایی و غیره اشاره نمود. این روش شامل فلز آلومینیوم نیز می‌شود، بازیافت ضایعات آلومینیوم فرایندی است که در آن محصولات آلومینیومی، بعد از یک یا چند بار استفاده، دوباره به چرخه تولید باز می‌گردند و از آن‌ها محصوالت آلومینیومی جدید دیگری ساخته می‌شود. فرایند مرسوم بازیافت ضایعات آلومینیوم، شامل ذوب مجدد این فلز می‌شود که بسیار پر هزینه‌تر و پرمصرف تر از تولید آلومینیوم از روش‌های دیگر بازیافت مثل متالورژی پودر، بازیافت حالت جامد و سایر روش‌های بازیافت است. علاوه بر این بازیافت ضایعات آلومینیوم، تنها به ٪۵ انرژی مصرف شده برای تولید آلومینیوم جدید از سنگ معدنی آن، نیاز دارد. به عبارت دیگر نه تنها تولید آلومینیوم جدید از طریق بازیافت ضایعات آلومینیوم انرژی کمتری نسبت به تولید آلومینیوم جدید از طریق سنگ معدنی آن نیاز دارد، بلکه با اضافه کردن سایر مواد با خواص متفاوت و کامپوزیت کردن آلومینیوم می‌توان خواص مکانیکی کامپوزیت آلومینیوم را از طریق روش بازیافت ارتقا داد. میزان بازیافت‌پذیری فلزات مختلف یکسان نیست. آلومینیوم یکی از فلزات مهم صنعتی است که در حالت غیر آلیاژی و همچنین به‌صورت آلیاژی کاربرد وسیعی در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی، تجهیزات پزشکی، لوازم خانگی و تجهیزات ارتباطی و نیروگاهی دارد. منابع ضایعات آلومینیومی نظیر ضایعات صنعتی و کارگاهی، ضایعات لوازم اتومبیل، دوچرخه، قایق، رایانه، ظروف آشپزی و غیره بسیار وسیع و گسترده هستند. در ایالات متحده و در آخرین آمارها ٪۳۶ از آلومینیوم تولید شده، از منابع ضایعات قدیمی و بازیافتی است. به طور کلی انرژی مصرف‌شده برای بازیافت فلزات نسبت به انرژی مورد نیاز برای تولید اولیه آن‌ها، بسیار کمتر است. این نسبت برای فلز پرکاربردی مانند آلومینیوم تا ۹۵ درصد کاهش می‌یابد [۱، ۲].

از ابتدای طرح ایده ساخت کامپوزیت‌های زمینه فلزی به خصوص پایه آلومینیومی پژوهش‌های فراوانی در این زمینه صورت گرفته است که عمده این پژوهش‌ها شامل انواع روش‌های ذوبی و یا ریخته گری می‌باشند و در اکثر آن‌ها، تاثیر عناصر مختلف آلیاژی، مواد بهبود دهنده خواص مکانیکی و غیره مورد بررسی قرار گرفته است [۳].

نکته حائز اهمیت در بازیافت ضایعات آلومینیومی این است که در بازیافت فلزات، هیچ تغییری در اصل و عنصر آن‌ها رخ نمی‌دهد. محصولات و ضایعات آلومینیومی، می‌توانند بارها و بارها بازیافت شوند و برای تولید هر محصولی که در تولید آن نیاز به آلومینیوم جدید وجود دارد استفاده شوند [۴، ۵].

عموماً بازیافت ضایعات آلومینیومی ناشی از ماشینکاری با روش ریخته‌گری مقرون به صرفه نیست چرا که با توجه به اندازه کوچک آن‌ها، وقتی براده‌ها در حال ذوب شدن هستند، مقدار قابل توجهی به دلیل اکسیداسیون از بین می‌رود [۵]. برای جلوگیری از این اتفاق روش‌های متداولی وجود دارد که از مهمترین و جدیدترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های متالوژی پودر یا روش شکل‌دهی داغ مانند اکستروژن اشاره کرد. در فرایند اکستروژن داغ می‌توان با کنترل مناسب پارامترهای فرایندی به قطعه مناسب دست یافت به‌خصوص در سال‌های اخیر از فرایند اکستروژن داغ برای تولید قطعات کامپوزیتی و چند لایه استفاده می‌شود [۶].

شرافت و همکاران [۷] امکان بازیافت براده‌های آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ را از طریق متالورژی پودر با فرایند اکستروژن داغ مورد بررسی قرار دادند و خواص مکانیکی قطعات بازیافتی را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای تولید نمونه‌های باکیفیت بالا با استفاده از براده، بایستی فرایند اکستروژن در دماهای بالاتر از ۵۰۰ درجه سانتیگراد انجام شود. در این دما پیوند خوبی بین براده‌ها و پودر ایجاد می‌شود که در نتیجه خواص مکانیکی نمونه‌ها بهبود می‌یابد. همچنین با افزودن پودر آلومینیوم به براده‌ها که به عنوان اتصال دهنده عمل می‌کند می‌توان اتصال بهتری را برای براده‌ها فراهم کرد. علاوه بر این با افزودن پودر آلومینیوم می‌توان تخلخل را به‌طور موثری کم کرد.

مانیکام و همکاران [۸] با استفاده از ذرات TiO_2 و روش متالوژی پودر، کامپوزیت زمینه آلومینیومی تولید کردند. آن‌ها درصدهای مختلف ذرات TiO_2 را به پودر آلومینیوم خالص اضافه کردند و خواص مختلف کامپوزیت‌های تولید شده را بررسی کردند. بعد از اینکه تف جوشی با استفاده از کوره برقی در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد به مدت یک ساعت انجام شد، نمونه‌های مورد نظر با استفاده از سنبه و قالب مناسب تحت فرایند اکستروژن داغ تولید شدند و خواص مکانیکی مانند استحکام کششی نهایی، درصد ازدیاد طول و سختی نمونه‌های تولید شده بررسی شد. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که با افزودن ۵ درصد وزنی از ذرات TiO_2 به آلومینیوم مقاومت

فشاری و استحکام کششی نهایی بهبود پیدا می‌کند و با افزودن درصد وزنی بیشتر TiO_2، استحکام کششی نهایی نمونه‌ها به دلیل اتصال نامناسب کاهش پیدا می‌کند. همچنین آن‌ها گزارش دادند که سختی نمونه‌های تولید شده با ٪۷/۵ از ذرات TiO_2 بیشترین مقدار را دارد درحالی که با مقادیر بیشتر، سختی به دلیل تجمع ذرات TiO_2 کاهش می‌یابد.

عیسی و همکاران [۹] به بررسی و تولید کامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانوذرات سرامیکی اقدام کردند. آن‌ها درصدهای وزنی مختلف را به پودر آلومینیوم اضافه کردند و با استفاده از اکستروژن داغ کامپوزیت ساختند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزودن تنها ٪۱ وزنی از نانوذرات SiO_2 به براده‌ها، سختی و استحکام کششی به ترتیب ٪۴۱/۸ و ٪۲۴/۸ افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این نانوذرات SiO_2 باعث کاهش شکل پذیری کامپوزیت‌ها تا ٪۱۲/۶ در مقایسه با فلز اصلی می‌شوند.

ردی و همکاران [۱۰] بازیافت براده‌های آلومینیوم را با روش‌های متالورژی پودر و روش تف جوشی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد مورفولوژی، اندازه و توزیع ذرات به زمان آسیاب شدن بستگی دارد و زمان آسیاب بر روی خواص مکانیکی تاثیر مستقیم دارد. همچنین افزایش زمان آسیاب از یک محدوده زمانی به بعد غیر ضروری است، زیرا به دلیل جوش سرد، اندازه ذرات افزایش می‌یابد و این پدیده بر سختی تاثیر منفی می‌گذارد.

وان و همکاران [۱۱] بازیافت آلومینیوم و براده‌ها و ضایعات آلیاژی آن را با روش سنتی و ذوب مجدد آلومینیوم و روش‌های بازیافت حالت جامد مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد با روش اکستروژن داغ می‌توان براده‌ها را به طور مستقیم به قطعه نهایی تبدیل کرد. این روش مزایای بسیاری از جمله مصرف انرژی کم‌تر، ضایعات تولیدی کم‌تر و همچنین میزان کم انتشار گازهای مضر و پرخطر را دارد. علاوه بر این خواص مکانیکی نمونه‌های بازیافت شده حالت جامد به کیفیت اتصال براده‌ها، نوع تقویت کننده و دمای فرایند بستگی دارد.

سیامی و همکاران [۱۲] در مورد روش بازیافت مستقیم و جایگزین برای بازیافت براده آلومینیوم بدون ذوب کردن مواد، به این نتیجه دست پیدا کردند که روش بازیافت جامد یکی از مناسب ترین روش‌های بازیافت است. طبق دستاوردهای این پژوهش مرحله فشرده‌سازی مهم‌ترین مرحله بازیافت مستقیم است که به طور قابل توجهی بر خواص مکانیکی و ریزساختار تاثیر می‌گذارد. مشکل اصلی در فشرده‌سازی مستقیم نایکنواختی چگالی است. معرفی روش فشار برگشتی دوطرفه برای بهبود تراکم قطعات که بر سختی، اندازه ذره و مرزدانه‌های نمونه آلومینیوم ۶۰۶۱ در حین بازیافت مستقیم و اکستروژن داغ تاثیر می‌گذارد یکی از اهداف پژوهش آن‌ها بود.

کریم و همکاران [۱۳] از براده‌های ماشینکاری آلومینیوم ۶۰۶۱ برای تولید کامپوزیت‌های فلزی به روش تبدیل مستقیم حالت جامد استفاده کردند. آن‌ها از پودر قلع به عنوان تقویت کننده استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد مقدار ٪۲۰ حجمی از پودر قلع باعث بهبود مقاومت کششی نهایی می‌شود و مقادیر بیشتر از این باعث کاهش استحکام کششی نهایی می‌شوند. همچنین دمای بهینه برای انجام فرایند ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد گزارش شد که در این دما مقدار فضای خالی کمترین مقدار خواهد بود. در سال‌های اخیر نیز تحقیقاتی در خصوص استفاده از فرایندهای اصطکاک اغتشاشی جهت بازیافت غیر ذوبی مواد فلزی و به‌خصوص آلومینیوم و آلیاژهای آن انجام شده است [۱۴-۱۸].

با مطالعه بررسی‌های صورت گرفته در خصوص بازیافت آلومینیوم مشخص شد که در اغلب تحقیقات انجام شده از روش ذوبی جهت بازیافت این فلز استفاده شده است و تعداد محدودی از محققان از روش حالت جامد برای بازیافت استفاده کرده‌اند؛ این در حالی است که در خصوص اضافه کردن نانوذرات سرامیکی مانند اکسیدهای آلومینیوم و تیتانیم به مواد بازیافتی و تولید نانو کامپوزیتی آلومینیومی تا کنون مطالعه خاصی انجام نشده است. لذا در این مقاله به بررسی و مقایسه میکروساختار و رفتار مکانیکی قطعات آلومینیومی تولید شده از براده‌های بازیافتی آلومینیومی ۶۰۶۱ و کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی ساخته شده از پودرهای سرامیکی Al_2O_3 و TiO_2 با ٪۵درصد وزنی پرداخته شده است. برای این منظور و جهت تولید قطعات آلومینیومی و کامپوزیت بازیافتی آن از براده‌های آلومینیومی استفاده شده که با آسیای مناسب به پودرهایی با ابعاد مناسب تبدیل شده و با پودرهای سرامیکی با درصد مناسب مخلوط و پس از فشردن اولیه، قطعه خام اولیه تحت عملیات اکستروژن داغ به قطعه نهایی با شکل مورد نظر تبدیل شده است.

۲- مواد و روش‌ها

برای ساخت نمونه‌ها ابتدا براده‌های آلومینیوم از میل گرد آلومینیوم آلیاژی ۶۰۶۱ با ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول ۱ (اطلاعات حاصل از آمایش کوانتومتری) حاصل از ماشینکاری میل گرد آلومینیوم تولید و جمع آوری شدند.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی عناصر تشکیل دهنده شمش آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ مورد استفاده

اجزاء	Al	Mg	Si	Cu	Zn	Fe	Ti
درصد (٪)	۸۴/۹۹	۱/۲	۰/۸	۰/۴	۰/۲۵	۰/۷	۰/۱۵

به منظور تولید براده‌های هم اندازه و ریز ساختار، براده‌ها مطابق شکل ۱ به مدت سه ساعت درون دستگاه آسیا گلوله‌ای با سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه در حال دوران بود قرار گرفتند. بعد از این مرحله اندازه ذرات پودر با استفاده از میکروسکوپ نوری و آزمون اندازه ذرات اندازه گیری و میانگین اندازه پودر ۷۱۰ میکرومتر ثبت شد.

شکل ۱ پودر کردن براده‌های آلومینیومی در دستگاه آسیای گلوله‌ای با اندازه‌های مختلف گلوله

سپس پودر حاصل از براده‌های ریز شده در آسیای مکانیکی درون قالب مخصوص فشردن قرار گرفته (شکل ۲-الف) و توسط دستگاه پرس بصورت سرد همان‌طورکه در شکل ۲-ب نشان داده شده است به قطعه ای استوانه‌ای شکل به قطر ۱۵ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر فشرده می‌شود. در مرحله بعد نمونه‌ها درون قالب مخصوص اکستروژن داغ قرار گرفته و قطعه و قالب اکستروژن همان‌طور که در شکل ۳-الف نشان داده شده طور هم زمان توسط کوره المنت حرارت مناسب تا دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد گرم شده و جهت یکنواخت شدن دما در تمام قطعه به مدت ۵ دقیقه در این دما نگه داشته می‌شود؛ سپس نمونه‌ها از قطر ۱۵ میلی‌متر تحت فرایند اکستروژن داغ به قطر ۱۰ میلی‌متر تبدیل می‌شوند که قطعه نهایی اکسترود شده در شکل ۳-ب نشان داده شده است.

(ب) (الف)

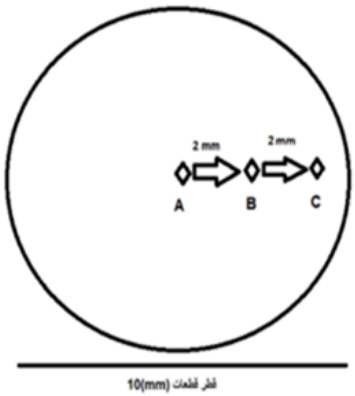
شکل۲ الف) فشردن پودر در قالب مناسب فشردن و ب) قطعات آلومینیومی خام اولیه فشرده شده سرد

(الف) (ب)

شکل ۳ الف) قالب اکستروژن داغ در داخل کوره با المنت حرارتی و ب) قطعه نهایی اکستروژن داغ شده

جهت تولید قطعات کامپوزیتی نیز ابتدا مقدار ٪۵ وزنی از نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم به پودر براده‌هایی که از دستگاه آسیاب گلوله‌ای خارج شده‌اند اضافه شده و دوباره به مدت ۳۰ دقیقه درون دستگاه مخلوط کن گلوله‌ای قرار گرفتند تا نانوذرات با براده‌ها به طور یکنواخت مخلوط شوند و توزیع یکنواخت و همگنی از پودر آلومینیوم و نانوذرات سرامیکی حاصل گردد. در واقع یکی از اهمیت‌های زیادی استفاده از پودرهای بازیافتی در تولید قطعات کامپوزیتی پایه فلزی امکان اختلاط یکنواخت پودر سرامیکی و فلزی در حالت جامد است؛ در حالی‌که دستیابی به کامپوزیتی با توزیع یکنواخت ذرات تقویت کننده مانند پودرهای سرامیکی در داخل مذاب فلزات به دلیل اختلاف چگالی ذرات پودر سرامیکی و مذاب فلز عملاً غیر ممکن و یا خیلی سخت می‌باشد و اغلب پودر بصورت سرباره روی مذاب قرار می‌گیرد. در ادامه قطعه کامپوزیتی پایه آلومینیومی همانند تولید قطعه آلومینیومی، فرایند اکستروژن داغ در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد را جهت تبدیل قطعه خام اولیه به قطعه نهایی کامپوزیتی طی می‌کند؛ یعنی مراحل مانند مراحل تولید نمونه‌های آلومینیومی ساده تکرار می‌گردد. به منظور اطمینان از کیفیت یکسان قطعات تولیدی اکسترود شده، ابتدا و انتهای نمونه‌های تولیدی بریده شده و نمونه برداری جهت آزمون‌های مختلف از وسط قطعات تولیدی انجام می‌شود. برای مشاهده ریز ساختار، ابتدا سطح مقطع نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌هایی با درجه‌های مختلف پولیش شد، پس از آن با محلول کلر حاوی ۹۵ میلی‌لیتر آب مقطر، ۲/۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک، یک میلی‌لیتر اسید هیدروفلوئوریک، ۱/۵ میلی‌لیتر اسید هیدروکلریک به مدت ۳۰ ثانیه اچ شد. پس از آن ریزساختار قطعات اچ شده توسط میکروسکوپ نوری بررسی و از نمونه‌های تولید شده آزمون فشار و میکروسختی ویکرز مطابق استاندارد تهیه شد و نتایج ریزساختاری و مکانیکی نمونه‌های آلومینیوم بازیافتی و کامپوزیت‌های پایه آلومینیومی با نمونه اصلی آلومینیوم ۶۰۶۱ مقایسه شد. به منظور صحت نتایج و عدم بروز خطا از هر نمونه سه مورد آزمون فشار گرفته شده و میانگین آن‌ها گزارش شده است. به دلیل اینکه در حین اکستروژن داغ پودرهای فلزی و سرامیکی در فاصله‌های مکانی مختلف از مرکز نمونه تحت کرنش ها و فشردگی‌های مختلف قرار می‌گیرند لذا آزمون میکروسختی ویکرز مطابق شکل ۴ از مرکز نمونه تا سطح آن در سه نقطه به فاصله دو میلی‌متر از هم اندازه‌گیری و نتایج ثبت شده است. میکرو سختی‌سنجی ویکرز قسمت‌های مختلف نمونه‌ها، توسط دستگاه ریز سختی‌سنجی Innovatest با اعمال نیرو ۲۰۰ گرم که در زمان ۱۵ ثانیه مطابق استاندارد ASTM-E384 [۱۹] انجام شد (شکل ۴). فرو رونده این دستگاه یک هرم مربع‌القاعده الماسی با زاویه سطح جانبی ۱۳۶ درجه بود.

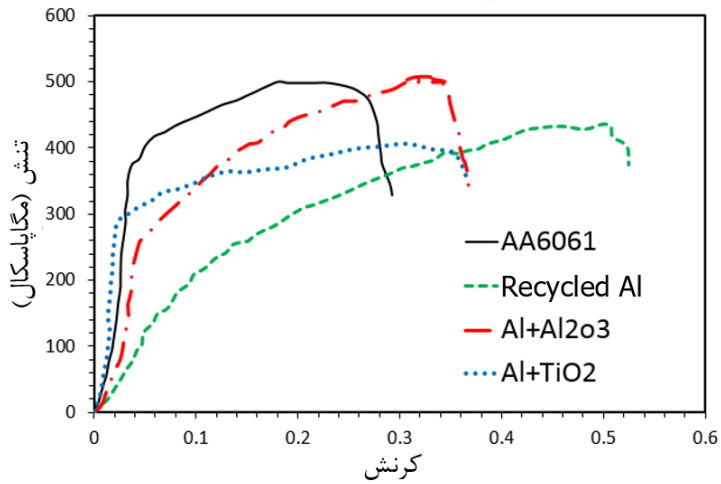
به منظور بررسی رفتار مکانیکی قطعات تولید شده و تعیین منحنی‌های تنش-کرنش و استحکام نهایی از آزمون فشار سرد طبق استاندارد ASTM E9-19 [۲۰] با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۰ و ۱۵ میلی‌متری نمونه‌ها استفاده شده است.



شکل ۴ دستگاه میکروسختی و محل نقاط A، B و C بر سطح عمود بر محور نمونه اکسترود شده جهت اندازه گیری میکروسختی

۳- نتایج و بحث

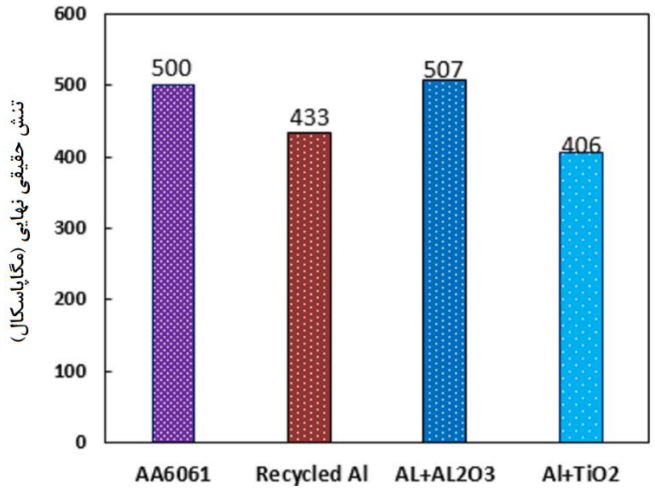
در شکل ۵ منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از آزمون فشار نمونه‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ پس از فرایند اکستروژن (AA6061) و آلومینیوم بازیافت شده (Recycled Al) و کامپوزیت‌های آلومینیومی با پودرهای تقویت کننده اکسید آلومینیوم ($Al+Al_2O_3$) و اکسید تیتانیوم ($Al+TiO_2$) نشان داده شده است. همان‌طور که از مقایسه نمودارهای تنش- کرنش مشخص است آلومینیوم بازیافتی بیشترین میزان شکل‌پذیری را داراست در حالی‌که بیشترین استحکام متعلق به کامپوزیت $Al-Al_2O_3$ می‌باشد.



شکل ۵ مقایسه نمودارهای تنش- کرنش حقیقی حاصل از آزمایش فشار سرد نمونه‌های آلومینیومی و کامپوزیتی از پودرهای بازیافتی

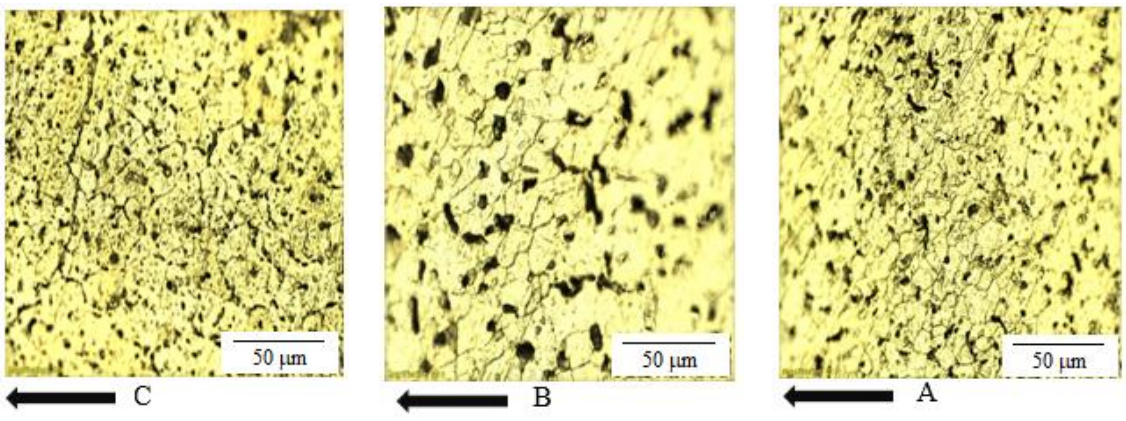
از مقایسه نمودارها مشخص است که قطعه اصلی آلومینیوم ۶۰۶۱ بیشترین استحکام تسلیم و مقاومت در برابر تغییرشکل دائمی را از خود نشان می‌دهد. در سایر قطعات بدلیل استفاده از پودر فلزی در تهیه آن‌ها و استفاده از مواد بازیافتی استحکام تسلیم کمتری را دارا می‌باشد ولی همان‌طور که اشاره شد این مقدار افت خواص مکانیکی در مقایسه با مزایای تولید با این روش قابل قبول می‌باشد. همان‌طور که از نمودارها مشخص می‌باشد بیشترین میزان استحکام تسلیم در مورد قطعات تولیدی از پودرهای بازیافتی به ترتیب مربوط به قطعه کامپوزیت آلومینیومی تقویت شده با اکسید تیتانیوم ($Al-TiO_2$)، قطعه کامپوزیت آلومینیومی تقویت شده با اکسید آلومینیوم ($Al-Al_2O_3$) می‌باشد و نهایتاً کمترین میزان استحکام تسلیم قطعه مربوط به آلومینیوم بازیافت شده می‌باشد. از طرف دیگر کمترین میزان شکل‌پذیری مربوط به قطعه اصلی آلومینیوم ۶۰۶۱ می‌باشد درحالی‌که قطعات بازیافتی حتی در مورد کامپوزیت‌های

تقویت شده آن‌ها پودرهای سرامیکی میزان شکل پذیری بیشتری ملاحظه می‌گردد. همان‌طور که دیگر محققان نیز گزارش کرده اند، اضافه کردن نانو پودرهای سرامیکی می‌تواند استحکام را افزایش و شکل پذیری ماده را تا حدودی کاهش می‌دهد [۸]. با افزایش نانو ذرات سرامیکی استحکام ماده نتایج نشان می‌دهند که شکل‌پذیری کامپوزیت آلومینیوم با هر دو پودر تقویت کننده شکل‌پذیری تا شکست یکسانی را خواهند داشت. با مقایسه نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های مختلف مشخص است که کامپوزیت آلومینیومی ترکیب شده با اکسید تیتانیوم استحکام تسلیم کمتر از نمونه اصلی آلومینیوم دارد در حالی‌که استحکام تسلیم آن از کامپوزیت آلومینیوم حاوی اکسیدآلومینیوم بیشتر می‌باشد. در شکل ۶ مقادیر تنش‌های استحکام نهایی نمونه‌های مختلف با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشخص می‌باشد، ماکزیمم تنش تحمل شده توسط قطعات، در کامپوزیت آلومینیوم ترکیب شده با پودر اکسید آلومینیوم مشاهده می‌شود که نشان دهنده استحکام بالای این قطعات نسبت به سایر قطعات تولیدی می‌باشد.



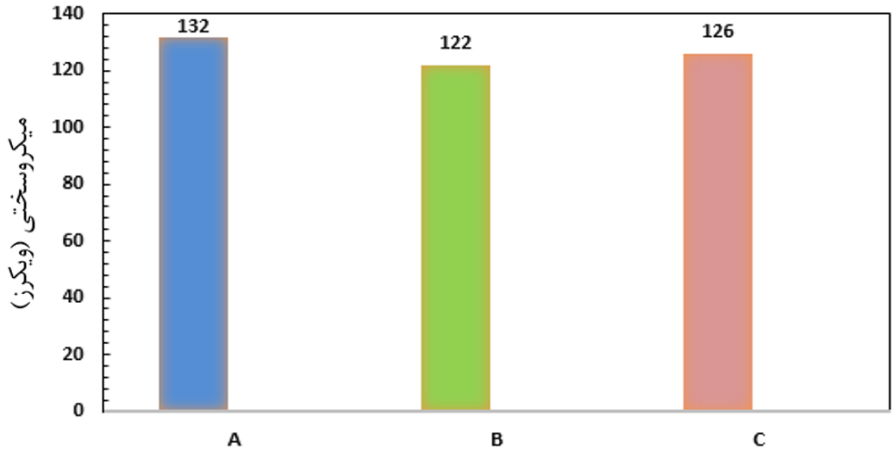
شکل ۶ مقایسه مقادیر تنش حقیقی نهایی برای قطعات مختلف تولیدی آلومینیومی و کامپوزیتی

شکل ۷ میکروساختار نقاط نشان داده شده در شکل ۴، برای آلومینیوم ۶۰۶۱ اکسترود شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است، دانه‌ها در مرکز و سطح نمونه دارای اندازه کوچکتری بوده و نتایج میکروسختی نمونه همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، نیز همین مورد را تصدیق می‌کند به‌طوریکه نقطه A با توجه به میکروساختار مشاهده شده در مقایسه با نقطه B دانه‌بندی ریزتری مشاهده شده است. این تفاوت می‌تواند به این دلیل باشد که دانه‌ها برای تبلور مجدد یا بازیابی در هنگام سرد شدن سریع نسبت به دو نقطه دیگر، زمان بیشتری داشته‌اند. اندازه دانه‌های کوچکتر نشان دهنده میکروسختی بالاتر نسبت به نقطه B می‌باشد که نتیجه آن در نمودار شکل قابل مشاهده است. با توجه به نقطه C و مسیر اکسترود، با حرکت به سمت لبه قطعه، میزان تغییر شکل قطعات به دلیل تماس با قالب بیشتر و سختی نسبت به نقطه قبلی افزایش پیدا کرده است.



(ج) (ب) (الف)

شکل ۷ تصاویر میکروساختار قطعه AA6061 اکسترود شده اصلی در موقعیت‌های الف) A، ب) B، و ج) C



شکل ۸ نمودار میکروسختی قطعات اکسترود شده آلومینیوم AA6061 در نقاط مشخص شده در نمونه

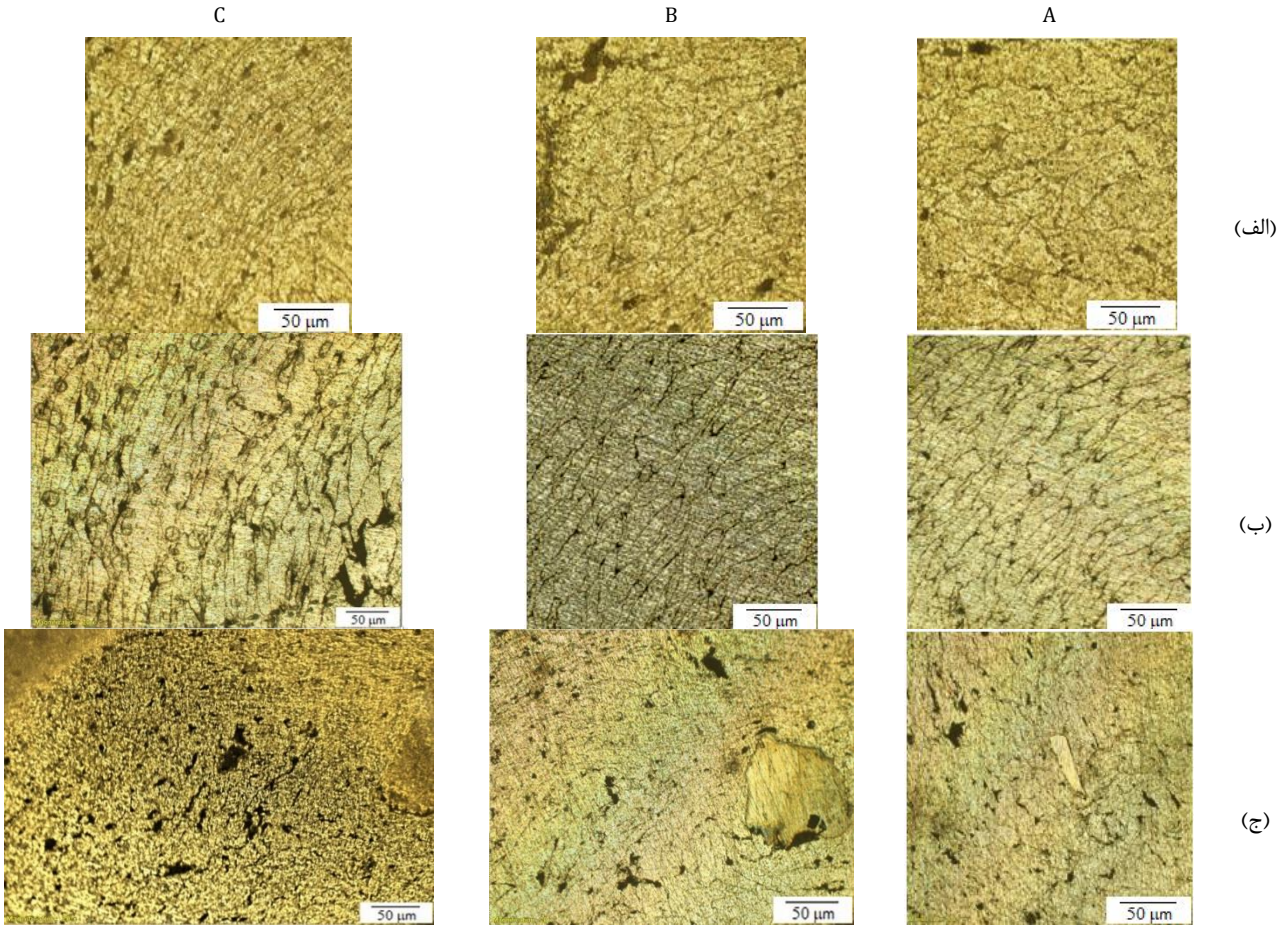
شکل ۹-الف تا ۹-ج به ترتیب ریزساختار قطعات اکسترود شده از پودرهای آلومینیوم AA6061 بازیافتی، کامپوزیت آلومینیوم بازیافتی تقویت شده با اکسید تیتانیوم ($Al-TiO_2$) و کامپوزیت آلومینیومی تقویت شده با اکسید آلومینیوم ($Al-Al_2O_3$) را نشان می‌دهد. همانطور که در تمامی جنس‌های مورد بررسی مشخص است اندازه دانه‌ها با حرکت روی سطح مقطع قطعه از مرکز قطعه (موقعیت A) به سمت سطح قطعه (موقعیت B) اندازه دانه‌ها قطعات ریزتر و کشیده‌تر می‌شوند که ناشی از تاثیر گرادیان کرنشی از سطح قطعه تا مرکز نمونه‌ها می‌باشند. دانه‌های تشکیل شده در قسمت سطح خارجی قطعه نسبت به نواحی داخلی ساختار ریزتر اما کشیده شده‌تر را نشان می‌دهند که می‌تواند ناشی از اثر اصطکاک بیشتر با بدنه قالب و اثر بیشتر واپیچش داخلی ماده در سطوح خارجی آن باشد. از طرف دیگر از آن‌جا که نمونه‌های اکسترود داغ شده پس از عملیات شکل دهی در دمای بالا سریع سرد می‌شوند و در سطح قطع سرعت سرد شدن قطعه بالاتر می‌باشد، لذا امکان رشد دانه‌های تبلور مجدد یافته کاهش یافته و دانه‌های ریزتری در نواحی نزدیک به سطح قطعه مشاهده می‌گردد.

علیرغم اینکه توزیع یکنواخت‌تر ذرات پودر سرامیکی تقویت کننده در نمونه‌هایی که بصورت اختلاط جامد کامپوزیت می‌شوند وجود دارد، اما همان‌طور که در قسمت‌های ب و ج شکل ۹ ملاحظه می‌گردد، در برخی قسمت‌های نمونه بخصوص در نواحی نزدیک به سطح قطعات کامپوزیتی تجمع محدود ذرات پودر سرامیکی مشاهده می‌شود؛ که علت آن را می‌توان در میل تجمعی نانو پودرهای سرامیکی به‌خصوص آلومینا به دلیل سطح تماس بالای ذرات آن‌ها دانست که اغلب با روش‌های مرسوم اختلاط ها پودرها اجتناب ناپذیر می‌باشد.

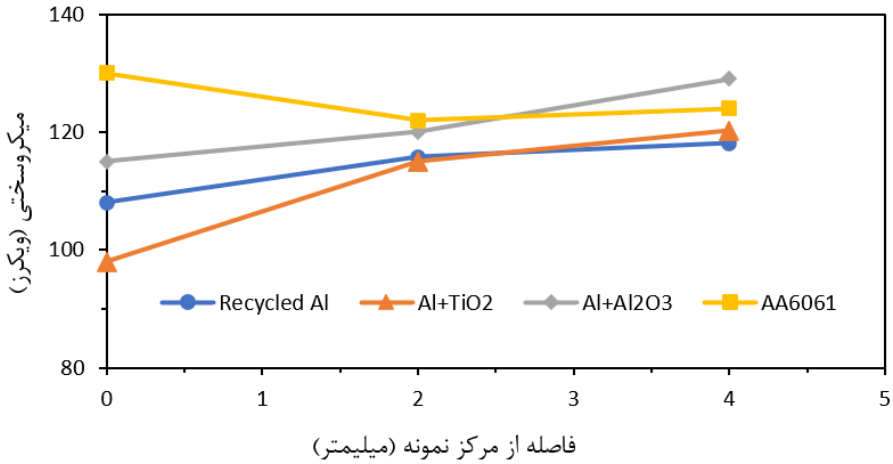
از مقایسه میکروساختارهای سه نمونه تولید شده از پودرهای بازیافتی آلومینیومی و سرامیکی (کامپوزیتی) ملاحظه می‌شود که دانه‌های تشکیل شده در ساختار کامپوزیت آلومینیومی با اکسید آلومینیوم (آلومینا) ریزترین اندازه دانه را دارا می‌باشد؛ به‌طوری‌که متوسط اندازه دانه در کل نواحی سطح این قطعات در حدود ۱۵ میکرون اندازه‌گیری شد در حالی‌که متوسط اندازه دانه در کل قطعات آلومینیوم بازیافتی حدود ۴۰ میکرون و کامپوزیت آلومینیومی با اکسید تیتانیوم حدود ۵۵ میکرون می‌باشد.

شکل ۱۰ نتایج آزمون میکروسختی قطعات مختلف تولیدی از پودرهای بازیافتی آلومینیوم و پودرهای سرامیکی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج میکروسختی مشخص است برای کلیه قطعات اکسترود شده سختی از مرکز قطعه تا سطح روند افزایشی خواهد داشت که علت آن تغییرات اندازه دانه در ساختار نمونه‌ها در مکان‌های مختلف سطح مقطع می‌باشد؛ یعنی بیشترین سختی در سطح خارجی قطعات که از اندازه دانه کوچکتری برخوردار می‌باشند، مشاهده می‌گردد. حداکثر متوسط میزان میکروسختی نمونه آلومینیومی بازیافتی ۱۱۸/۱ ویکرز و در نقاط نزدیک به سطح قطعه می‌باشد، و متوسط میکروسختی نمونه کامپوزیت آلومینیوم بازیافتی و اکسید تیتانیوم تولید شده ۱۲۰ ویکرز اندازه‌گیری شد در حالی‌که میزان میکروسختی نمونه کامپوزیت آلومینیوم بازیافتی و پودر آلومینا ۱۲۹ ویکرز اندازه گیری شد. نتایج نشان داد به‌طور کلی قطعات کامپوزیت آلومینیوم بازیافتی و اکسید آلومینیوم ($Al+Al_2O_3$) بیشترین میزان میکروسختی را در بین نمونه‌های بازیافتی از آلومینیوم خواهد داشت و پس از آن سختی کامپوزیت

آلومینیوم و اکسید تیتانیوم و نمونه آلومینیومی بازیافتی می‌باشد. میکروساختارهای کامپوزیت آلومینیومی با پودر آلومینا در شکل ۹-ج کمترین میزان اندازه دانه را در مقایسه با دیگر نمونه‌ها ارائه می‌کند که یکی از دلایل مهم در بالا بودن میزان میکروساختاری این مواد محسوب می‌گردد. همان‌طور که در بررسی‌های دیگر محققان نیز گزارش شده است، اضافه کردن ذرات پودر سرامیکی به زمینه آلومینیومی تا حدودی و درصد مشخصی می‌تواند افزایش سختی ماده را به همراه داشته باشد [۲۰].



شکل ۹ تصاویر متالوگرافی موقعیت‌های A، B، و C در نمونه‌های اکسترود شده الف) آلومینیوم بازیافتی اصلی، ب) کامپوزیت آلومینیومی با اکسید تیتانیوم و ج) کامپوزیت آلومینیومی با پودر آلومینا



شکل ۱۰ تغییرات میکروسختی قطعات اکسترود داغ شده با فاصله از مرکز نمونه‌های آلومینیوم ۶۰۶۱ (AA6061)، آلومینیوم بازیافتی (Recycled Al)، کامپوزیت آلومینیوم بازیافتی و اکسید تیتانیوم ($Al+TiO_2$) و کامپوزیت آلومینیوم بازیافتی و اکسید آلومینیوم ($Al+Al_2O_3$)

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از پودر براده‌های بازیافتی آلومینیوم ۶۰۶۱ و ترکیبات آن با نانوپودرهای سرامیکی اکسید تیتانیوم (TiO_2) و آلومینا (Al_2O_3)، قطعات آلومینیومی و کامپوزیتی پایه آلومینیوم با روش فشردن سرد پودرها و سپس اکستروژن داغ آن‌ها تولید شد. میکرو ساختار و خواص مکانیکی قطعات تولیدی با این روش با قطعه آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ اصلی مقایسه شد که نتایج زیر حاصل گردید:

- بررسی ها نشان داد فشردن سرد پودرها و سپس اکستروژن داغ قطعات خام اولیه روش مناسب و منطقی برای تولید قطعات از براده‌ها و ضایعات آلومینیوم می‌باشد که علاوه بر مصرف انرژی و مشکلات زیست محیطی کمتر در مقایسه با روش‌های بازیافت ذوبی سرعت فرایند نیز بیشتر است
- با افزودن نانوذرات تقویت کننده به پودرها براده‌های بازیافتی می‌توان خواص مناسب و تقریباً یکنواختی را به دست آورد که اغلب با روش‌های ذوبی نمی‌توان به این حالت در کامپوزیت‌ها رسید.
- نتایج میکروساختاری نشان داد در تمامی نمونه‌های اکسترود داغ شده، دانه‌های تشکیل شده در قسمت سطح خارجی قطعه نسبت به نواحی داخلی ساختار ریزتر و کشیده شده‌تری را داراست و ریزترین اندازه دانه در ساختار کامپوزیت آلومینیومی با اکسید آلومینیوم تشکیل می‌شود. ضمن این‌که پودرهای سرامیکی بصورت یکنواخت در داخل پودرهای حاصل از براده آلومینیم توزیع شده و خواص ماده تقریباً یکنواخت است.
- بررسی خواص مکانیکی قطعات تولیدی نشان داد که نمونه آلومینیوم بازیافتی دارای میانگین سختی ۱۲۲ ویکرز و استحکام نهایی ۴۳۳ مگاپاسکال می‌باشد که با توجه به سختی و استحکام نهایی نمونه اولیه آلومینیوم (۱۳۲ ویکرز و ۵۰۰ مگاپاسکال) با افت حدود ۸٪ و ۱۳٪ به ترتیب در سختی و استحکام نهایی، خواص قابل قبول و تقریباً نزدیک به نمونه اصلی برای یک نمونه بازیافتی بدون انجام ذوب و انجماد محسوب می‌شود.
- افزودن پودر اکسید تیتانیوم به پودر براده‌ها سختی قطعه کامپوزیتی را به حدود ۱۱۰ ویکرز و استحکام نهایی به حدود ۴۰۶ مگاپاسکال می‌رسد در حالی‌که اکسید آلومینیوم سختی و استحکام کامپوزیت را به ۱۳۳ ویکرز و ۵۰۷ مگاپاسکال می‌رساند.
- بیشترین استحکام و میکروسختی در نمونه تولید شده با ذرات آلومینا (۵۰۷ مگا پاسکال و ۱۲۹ ویکرز) و بیشترین شکل‌پذیری در نمونه تولید شده بدون پودر تقویت کننده (آلومینیوم) مشاهده شد.

References

[1] Fuziana Y, Warikh A, Lajis M, Azam M, Muhammad N. Recycling aluminium (Al 6061) chip through powder metallurgy route. Materials Research Innovations. 2014;18:354-8. doi: 10.1179/1432891714Z.000000000981

[2] Golev A, Corder G D. Typology of options for metal recycling: Australia's perspective, Resources. 2015 Dec;5(1):1. doi: 10.3390/resources50100015 (2016) 1–10

[3] Ramanathan A, Krishnan P K, Muraliraja R. A review on the production of metal matrix composites through stir casting–Furnace design, properties, challenges, and research opportunities. Journal of Manufacturing processes. 2019 Jun;42(4):213-45. doi: 10.1016/j.jmapro.2019.04.0172019; 42: 213-245

[4] Meshram A, Singh K K. Recovery of valuable products from hazardous aluminum dross: A review. Resources Conservation and Recycling. 2018 Mar;130:95-108. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.11

[5] Rojas-Díaz L, Verano-Jiménez L, Muñoz-García E, Esguerra-Arce J, Esguerra-Arce A. Production and characterization of aluminum powder derived from mechanical saw chips and its processing through powder metallurgy. Powder Technology. 2020 Jan 15;360:301-11. doi: 10.1016/j.powtec.2019.10.028

[6] Rezaei Ashtiani H, Ahari A. Fabrication of two layer Al/Cu rods using hot forward extrusion. Iranian Journal of Manufacturing Engineering 2019;6(4):7-13. [In Persian]

[7] Sherafat Z, Paydar M, Ebrahimi R. Fabrication of Al7075/Al, two phase material, by recycling Al7075 alloy chips using powder metallurgy route. Journal of Alloys and Compounds. 2009 Jul;487(1):395-9. doi: 10.1016/j.jallcom.2009.07.146

[8] Ravichandran M, Meignanamoorthy M, Dineshkumar S. Microstructure and properties of hot extruded Al-TiO2 powder metallurgic composites. Applied Mechanics and Materials, 2016 Sep;852:130-5. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.852.130

[9] Issa H K, Taherizadeh A, Maleki A, Ghaei A. Development of an aluminum/amorphous nano-SiO2 composite using powder metallurgy and hot extrusion processes. Ceramics International. 2017 Jun;43(17):14582-92. doi: 10.1016/j.ceramint.2017.06.057
[10] Reddy M P, Ubaid F, Shakoor R, Parande G, Manakari V, Mohamed A. Effect of reinforcement concentration on the properties of hot extruded Al-Al2O3 composites synthesized through microwave sintering process. Materials Science and Engineering: A. 2017 Apr;696:60-9. doi: 10.1016/j.msea.2017.04.064
[11] Wan B, Chen W, Lu T, Liu F, Jiang Z, Mao M. Review of solid state recycling of aluminum chips. Resources Conservation and Recycling. 2017 Oct;125:37-47. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.06.004
[12] Shahrom MS, Yusoff AR. Cyclic extrusion compression back pressure technique for hot forging process in direct recycling of aluminium 6061 machining chip. Journal of Manufacturing Processes. 2017 Oct;29:1-9. doi: 10.1016/j.jmapro.2017.07.003
[13] Karim SR, Badarulzaman NA, Lajis MA. Fabrication of Al-Sn composites from direct recycling aluminium alloy 6061. in Applied Mechanics and Materials. Dec;465-466:1003-7. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.465-466.1003
[14] Asadi P, Akbari M, Armani A, Aliha MR, Peyghami M, Sadowski T. Recycling of brass chips by sustainable friction stir extrusion. Journal of Cleaner Production. 2023 Sep 15;418:138132. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138132
[15] Abdi Behnagh R, Jabarshayan R. Investigation of microstructure and hardness of recycled aluminum seamless tube using friction stir consolidation. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2022;8(11):35-42 doi: 10.22034/IJME.2023.403285.1797 [In Persian]
[16] Yoder JK, Hahn GD, Zhao N, Brennan RE, Cho K, Hang ZY. Additive friction stir deposition-enabled upcycling of automotive cast aluminum chips. Additive Manufacturing Letters. 2023 Feb 1;4:100108. doi: 10.1016/j.addlet.2022.100108
[17] Borgert T, Homberg W. Analysis of temperature effect on strength and microstructure in friction induced recycling process (FIRP). Materials Research Proceedings. 2023. doi: 10.21741/9781644902479-215
[18] Wan B, Chen W, Lu T, Liu F, Jiang Z, Mao M. Review of solid state recycling of aluminum chips. Resources, Conservation and Recycling. 2017 Oct 1;125:37-47. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.06.004
[19] The American Society for Testing and Materials, "ASTM E384 : Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials", 2000.
[20] The American Society for Testing and Materials, "ASTM E9–19 Standard Test Method of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature.
[21] Rocha F, Simões S. Aluminum Nanocomposites Reinforced with Al2O3 Nanoparticles: Synthesis, Structure, and Properties. Journal of Composites Science. 2024 Jan 17;8(1):33. doi: 10.3390/jcs8010033