



Production of Bulk Aluminum Parts from Machining Chips by Shear Compaction Processing

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Abdi Behnagh R.¹ PhD,
Abdollahi H.*¹ PhD,
Rajabi R.¹ MSc

How to cite this article

Abdi Behnagh R, Abdollahi H, Rajabi R. Production of Bulk Aluminum Parts from Machining Chips by Shear Compaction Processing. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(9):2213-2221.

¹Manufacturing Department, Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

*Correspondence

Address: Faculty of Materials Science & Engineering, Shiraz University of Technology, Modarres Boulevard, Shiraz, Iran. Postal Code: 71551313.
Phone: +98 (44) 31980294
Fax: +98 (44) 31980251
h.abdollahi@uut.ac.ir

Article History

Received: January 06, 2020
Accepted: June 15, 2020
ePublished: September 20, 2020

ABSTRACT

In the current study, shear compaction processing was used for the recycling of aluminum machining chips and direct converting of them to bulk parts. In this processing, machining chips are first loaded in a cylindrical chamber; then a rotating tool with a defined rotational speed and aligned axis with the chamber is placed on the chips, in the following, the temperature inside the chamber increases due to the friction. Then, the process continues until all chips are transformed into a bulk part. After producing the samples, properties such as density, porosity, microstructure, hardness, and wear of the recycled parts were examined. The results showed that there is a possibility of transforming aluminum chips into a completely bulk part without porosity, with a density of about 2.67g/cm³ and hardness of more than half of the base metal via shear compaction process. The amount of heat during the process leads to the consolidation of the chips and nucleation of new grains with dynamic recrystallization. Finally, a review of the total results and properties of the recycled samples showed that they could be used as an industrial part directly or after a secondary process.

Keywords Aluminum; Recycling; Machining Chip; Shear Compaction; Microstructure

CITATION LINKS

[1] Tribological and microstructural evaluation of friction stir processed Al2024 alloy [2] Recycling of aluminium swarf by direct incorporation in aluminium melts [3] New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling [4] A new technique for recycling aluminium scrap [5] Recycling of aluminium alloy and aluminium matrix composite chips by pressing and hot extrusion [6] New recycling process by extrusion for machined chips of AZ91 magnesium and mechanical properties of extruded bars [7] Relationship between extrusion ratio and mechanical properties of extruded machined-chips of AZ91 magnesium alloy [8] Fatigue behavior of AZ31 magnesium alloy produced by solid-state recycling [9] Effect of chip size on mechanical property and microstructure of AZ91D magnesium alloy prepared by solid state recycling [10] Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips [11] Metal and energy saving by direct and continuous extrusion of aluminium scraps [12] Solidification and forming technology of minute scrap metal by semisolid process [13] Solid-state recycling of aluminium alloy swarf through cold profile extrusion and cold rolling [14] Experimental Analysis and microstructure modeling of friction stir extrusion of magnesium chips [15] Uncovering technological and environmental potentials of aluminum alloy scraps recycling through friction stir consolidation [16] Shear compaction processing of SiC nanoparticles reinforced magnesium composites directly from magnesium chips [17] Friction Stir consolidation of aluminum machining chips [18] Production of seamless tube from aluminum machining chips via double-step friction stir consolidation [19] Recrystallization behavior of rolled ingots of 6061 and 6069 aluminum and alloys [20] A TEM study of precipitation and related microstructures in friction-stir-welded 6061 aluminium [21] Effect of materials position on friction stir lap welding of Al to Cu [22] Predicting microstructure evolution for friction stir extrusion using a cellular automaton method [23] On the formation of onion rings in friction stir welds [24] Study on mechanical, micro-, and macrostructural characteristics of dissimilar friction stir welding of AA6061-T6 and AA7075-T6

تولید قطعات توپر آلومینیومی از براده‌های ماشین‌کاری با استفاده از فرآیند فشرده‌سازی برشی

رضا عبدی بهق PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

هادی عبداللهی PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

روژین رجبی MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

در مطالعه حاضر، از فرآیند فشرده‌سازی برشی برای بازیافت براده‌های ماشین‌کاری آلومینیوم و تبدیل مستقیم آنها به قطعات توپر استفاده شد. در این فرآیند، براده‌های حاصل از ماشین‌کاری ابتدا درون یک محفظه استوانه‌ای ریخته می‌شود، سپس یک ابزار چرخان با سرعت دورانی مشخص که محور آن با محور محفظه در یک راستا قرار دارد به حرکت در آمده و بر روی براده‌ها قرار می‌گیرد. در این شرایط دمای درون محفظه به دلیل اصطکاک به وجود آمده بالا می‌رود و حرکت تا تبدیل همه براده‌ها به یک قطعه کامل ادامه می‌یابد. پس از تولید نمونه‌ها خواصی نظیر چگالی، وجود تخلخل، ریزساختار، سختی و سایش برای قطعات بازیافت‌شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که امکان تبدیل براده‌های ماشین‌کاری آلومینیوم به یک قطعه کاملاً توپر و بدون تخلخل با چگالی حدود ۲/۶۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب و با سختی بیش از نصف سختی فلز پایه، از طریق فرآیند فشرده‌سازی برشی امکان‌پذیر است. از طرفی به دلیل میزان حرارت ایجادشده در حین فرآیند، مرز دانه‌ها به واسطه ایجاد تبلور مجدد دینامیکی از بین رفته و ریزساختاری با دانه‌بندی جدید به دست آمده است. همچنین بررسی مجموع نتایج و خواص قطعات بازیافت‌شده نشان داد که قطعه تولیدشده توسط این فرآیند این قابلیت را دارد که به صورت مستقیم و یا پس از یک فرآیند تولید ثانویه به یک قطعه صنعتی تبدیل شود.

کلیدواژه‌ها: آلومینیوم، بازیافت، براده ماشین‌کاری، فشرده‌سازی برشی، ریزساختار

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۶

*نویسنده مسئول: h.abdollahi@uut.ac.ir

مقدمه

آلومینیوم یکی از سبک‌ترین فلزات بوده و نسبت استحکام به وزن بالایی دارد. استفاده از آلیاژهای آلومینیوم یک انتخاب عالی برای سازه‌های مهندسی در صنایع مختلف از جمله دو صنعت مهم هوافضا و خودروسازی است [1]. آلیاژهای آلومینیوم دارای قابلیت ماشین‌کاری خوبی هستند، لذا تولید محصولات مختلف آلومینیومی با استفاده از فرآیندهای ماشین‌کاری سنتی همچون تراشکاری، فرزکاری و سوراخ‌کاری بسیار متداول است. بنابراین، در فرآیندهای تولید قطعات با روش‌های یادشده حجم انبوهی از براده (در حدود ۳ تا ۵٪ وزن قطعه ریخته‌شده) به صورت دورریز ایجاد می‌شود. به طور سنتی این براده‌ها به خریداران ضایعات فلزی با قیمت‌های بسیار پایین فروخته می‌شود که از لحاظ اقتصادی

مقرون‌به‌صرفه نیست [2]. از طرفی ضایعات جمع‌آوری شده در نهایت در کوره‌های ذوب مجدد به آلومینیوم خام تبدیل می‌شوند. فرآیند ذوب مجدد مصرف انرژی بالایی دارد که باعث افزایش هزینه‌های بازیافت می‌شود.

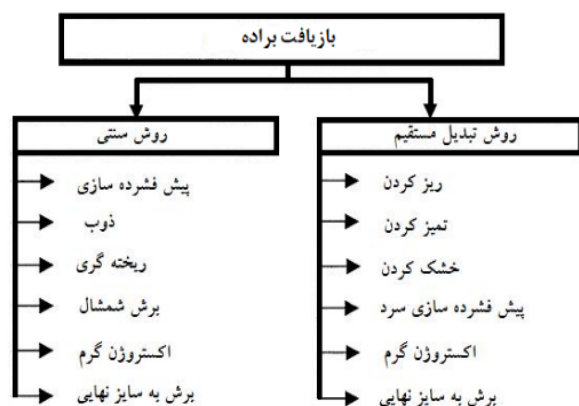
با توجه به قیمت بالای آلومینیوم و کمبود منابع در دسترس برای این فلز ارزشمند، بازیافت براده‌های آلومینیوم با روش‌های مقرون‌به‌صرفه از نظر اقتصادی می‌تواند بسیار پراهمیت باشد. مرور تاریخچه فرآیندهای تبدیل ضایعات آلومینیوم نشان می‌دهد که تحقیقات متعددی در رابطه با بازیافت براده‌های آلومینیوم با استفاده از روش‌های سنتی و غیرسنتی گزارش شده است [3-5]. برای سال‌های متمادی، براده‌های تولیدشده در فرآیندهای ماشین‌کاری جهت تبدیل به مواد اولیه بازیافتی قابل استفاده مستقیماً تحت عملیات ذوب مجدد قرار می‌گرفتند. فرآیند تولید آلومینیوم بازیافتی با روش‌های سنتی در مجموع شامل آماده‌سازی قراضه، ذوب و پالایش و سپس اکستروژن است. آماده‌سازی شامل دسته‌بندی، شست‌وشو و تمیزکاری قراضه‌ها است. فرآیند ذوب و پالایش نیز شامل ذوب، آلیاژسازی و خالص‌سازی می‌شود. در تولید آلومینیوم با روش‌های ذوبی، قراضه‌ها اغلب در داخل کوره‌های ارتعاشی گازسوز یا روغن‌سوز با ظرفیت بالا ذوب می‌شوند. البته باید توجه داشت که هنگام بازیافت ضایعات با استفاده از روش‌های ذوبی، اتلاف مواد زیاد بوده و مقدار زیادی از مواد در نتیجه فرآیند اکسیداسیون از بین می‌رود و هزینه‌های مربوط به فرآیند مانند هزینه‌های نیروی انسانی، انرژی و حفظ و نگهداری محیط زیست افزایش می‌یابد [6].

روش دیگری نیز برای بازیافت براده‌ها وجود دارد که به نوعی تبدیل مستقیم براده‌ها به یک محصول فلزی فشرده است. اساس این روش که در ابتدا برای بازیافت براده‌های آلومینیوم مورد استفاده قرار گرفت، بر پایه خردکردن براده‌ها تا اندازه مورد نظر و سپس استفاده از یکی از دو فرآیند اکستروژن گرم یا فورج گرم قرار دارد. این نوع از بازیافت می‌تواند برای آهن، مس، آلیاژهای آلومینیوم و بعضاً چدن نیز به کار رود. روش مستقیم یا روش حالت جامد در بازیافت براده‌های منیزیم روشی تقریباً جدید است که ابداع آن به اواسط دهه ۱۹۹۰ در کره [6] و ژاپن [7] برمی‌گردد. در بازیافت حالت جامد، براده‌ها بدون فرآیند ذوب به صورت مستقیم با استفاده از فرآیند اکستروژن گرم به چرخه استفاده برمی‌گردند [8]. با استفاده از بررسی میزان تلفات مربوط به مواد و همچنین هزینه‌های مربوط به هر یک از روش‌ها می‌توان به مقایسه بازدهی آنها پرداخت. به عنوان مثال، در روش تبدیل مستقیم براده‌های آلومینیوم به یک محصول اکستروژنی، میزان فلز بازیافت‌شده به بیش از ۹۵٪ می‌رسد و مقداری در حدود ۵٪ در مراحل مختلف تلف می‌شود. در واقع تفاوت روش‌های مختلف بازیافت حالت جامد به نوع فرآیند به کار گرفته‌شده در قسمت آماده‌سازی براده‌ها قبل از فرآیند اکستروژن گرم بستگی دارد. سه نوع مختلف از انواع روش‌های بازیافت نیمه‌جامد، که ترکیبی از دو فرآیند هستند،

آن است که استحکام و چگالی مواد بازیافت‌شده از طریق اکستروژن و یک فرآیند نورد اضافی، بالاتر از مواد بازیافت‌شده با استفاده از اکستروژن تکی است. همچنین مشاهده شد که شکل‌پذیری مواد بازیافت‌شده ضعیف‌تر از آلیاژ آلومینیوم اولیه است.

در تمام کارهای تحقیقاتی اشاره‌شده، فرآیند بازیافت به‌صورت دومرحله‌ای انجام شده است. کاهش تعداد مراحل بازیافت می‌تواند مستقیماً منجر به کاهش زمان و انرژی مورد نیاز برای بازیافت شود. لذا استفاده از روش‌هایی که هم حالت جامد بوده و هم بتوان توسط آنها تنها در یک مرحله عملیات بازیافت را انجام داد، می‌تواند راندمان بازیافت را بسیار افزایش دهد. یکی از روش‌های جدید بازیافت حالت جامد براده‌های فلزی، فرآیند فشرده‌سازی برشی است. این روش بازیافت، از اصول فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی پیروی می‌کند. در این فرآیندها یک ابزار چرخشی غیرمصرفی باعث ایجاد حرارت اصطکاکی و نرم‌شدگی موضعی ماده می‌شود. فرآیند اکستروژن اصطکاکی اغتشاشی نوعی فرآیند اکستروژن است که برای تولید مفتول‌های فلزی از براده‌های فلزات به‌کار می‌رود و استفاده از آن در سال‌های اخیر در حال افزایش است [14]. روش فشرده‌سازی برشی در واقع همان روش اکستروژن اصطکاکی است که در آن سوراخ مربوط به اکستروژن از قالب حذف شده است و براده‌ها در یک مرحله فشرده شده و به یک قطعه توپر تبدیل می‌شوند. با توجه به اینکه در این فرآیند، مانند روش‌های سنتی بازیافت، نیاز به ذوب مجدد ماده نیست و به‌صورت تک‌مرحله‌ای انجام می‌شود، انرژی مصرفی بسیار کم است. مقایسه مصرف انرژی در بازیافت با روش‌های فشرده‌سازی برشی و ذوب مجدد توسط بافا و همکاران [15] مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیقات انجام‌شده بر روی روش‌های مختلف بازیافت مقدار مشخصی از براده آلومینیوم، به این نتیجه رسیدند که میزان مصرف انرژی در فرآیند فشرده‌سازی برشی در حدود ۴۴٪ کمتر از روش ذوب مجدد است. بررسی تاریخچه این فرآیند نشان می‌دهد که تحقیقات بسیار محدودی بر روی این فرآیند و قابلیت‌های آن صورت گرفته است. اخیراً این فرآیند توسط ناروان و همکاران برای تولید نانوکامپوزیت Mg/SiC مورد استفاده قرار گرفته است [16]. در این تحقیق از پودر نانوکاربید سیلیسیم برای تولید نانوکامپوزیت پایه فلزی در زمینه منیزیم (به‌صورت براده) استفاده شده است. بررسی‌های انجام‌شده توسط این گروه نشان داده است که پیوند بین پودر نانو و زمینه شکل گرفته و از طرفی پودر با توزیع نسبتاً یکنواختی بر روی زمینه منیزیمی قرار گرفته است. در پژوهش دیگری که توسط لی و همکاران صورت گرفته است، به امکان‌سنجی انجام فرآیند با بررسی تجربی و شبیه‌سازی المان محدود بازیافت براده‌های آلومینیوم توسط فرآیند فشرده‌سازی برشی پرداخته شده است [17]. یک ناحیه با ساختار میکروسکوپی تبلور مجددیافته کاسه‌ای‌شکل در قسمت بالای سطح مقطع قطعات بازیافت‌شده مشاهده شد.

شامل پرس سرد- اکستروژن گرم، پرس گرم- اکستروژن گرم و اکستروژن دوپل می‌شوند. با مقایسه روش‌های مختلف حالت جامد با روش‌های سنتی مشاهده شده است که این روش‌ها به سه دلیل عمده بر روش‌های بازیافت ذوبی برتری دارند. نخست اینکه در تبدیل حالت جامد، فرآیند اکسیداسیون و از بین‌رفتن ماده بر اثر آن ناچیز است، در حالی که به‌عنوان مثال در فرآیند ذوب مجدد آلومینیوم چیزی در حدود ۲۰٪ ماده اولیه در اثر اکسیداسیون از بین می‌رود [9]. دوم اینکه مصرف انرژی در بازیافت حالت جامد به‌دلیل حذف مرحله ذوب بسیار کمتر خواهد بود و در نهایت اینکه این روش از نظر ملاحظات زیست‌محیطی برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به روش‌های سنتی دارد. مراحل انجام عملیات بازیافت به دو حالت سنتی و تبدیل مستقیم در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱) بازیافت براده‌های آلومینیوم به روش سنتی و مستقیم [10]

مقایسه تلفات مواد و هزینه‌های مربوط به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم توسط برخی از محققان در گذشته بررسی شده است. یکی از این بررسی‌ها توسط لازارو و ویتوری [11] انجام گرفته است. آنها به ارزیابی روش اکستروژن پیوسته برای استفاده در صنایع مختلف پرداخته‌اند. سوگی‌یاما و یاناگیموتو [12]، امکان تبدیل ضایعات بازیافت‌شده به یک ماده با استحکام نسبتاً بالا توسط اکستروژن نیمه‌جامد را بررسی کرده‌اند. این آزمایش‌ها بر روی براده‌های حاصل از فرآیند تراشکاری آلومینیوم با اتخاذ دماها و نسبت‌های اکستروژن متفاوت انجام شده است. نتایج تحقیقات آنها نشان داده است که نسبت اکستروژن نیمه‌جامد بالای ۱۰، نتایج موفقیت‌آمیزی را موجب شده و خواص مکانیکی مانند مقاومت کششی این محصولات با نوع فلز پایه اولیه آن برابری می‌کند. چپیا و همکاران، امکان بازیافت حالت جامد ضایعات ماشین‌کاری آلیاژ آلومینیوم را با استفاده از اکستروژن سرد و متعاقب آن فرآیند نورد سرد را بررسی نموده‌اند [13]. ضایعات آلیاژ آلومینیوم- سیلیسیم ریخته‌گری در داخل شمشال‌ها سرد و فشرده شده و به‌طور موفقیت‌آمیزی پروفیل مورد نظر به‌صورت شمش‌های چهارگوش با یک سطح مقطع مستطیلی با نسبت اکستروژن چهار یا بالاتر اکستروژن شده است. همچنین نتایج این تحقیق حاکی از

می‌گیرد. در این حال، مقادیر زیادی حرارت اصطکاکی که ناشی از حرکت چرخشی و خطی ابزار است ایجاد می‌شود که منجر به نرم شدن براده‌ها و به هم پیوستن آنها به صورت یک قطعه توپر مدور می‌شود. قطر خارجی نمونه تولیدشده با قطر داخلی محفظه یکسان است. همچنین براساس مقدار براده‌های ریخته شده درون محفظه، میزان پیشروی حرکت خطی ابزار تعیین می‌شود. مقدار کورس این حرکت در نهایت ضخامت نمونه تولیدشده را مشخص می‌کند. پس از رسیدن به کورس نهایی، ابزار چرخان به عقب باز می‌شود. در نهایت نمونه تولیدشده از درون محفظه خارج می‌شود.

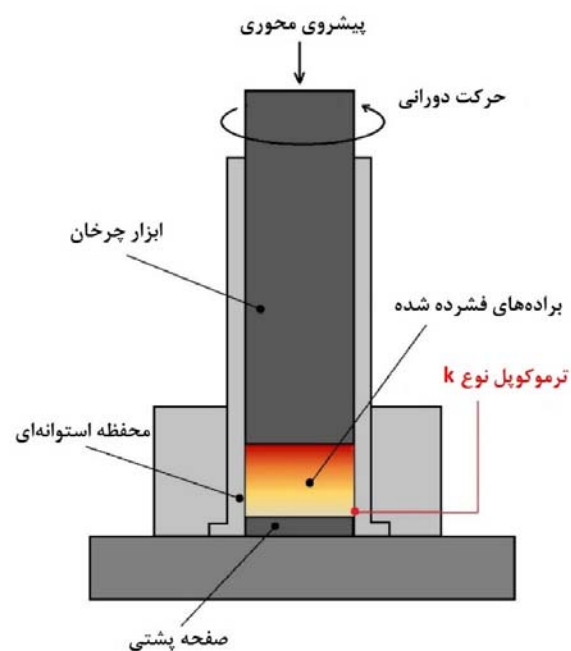
انتخاب ماده و روش تحقیق

ماده اولیه استفاده شده براده‌های تمیز و خشک آلومینیوم ۶۰۶۱ است که از ماشین‌کاری یک شمش از طریق یک دستگاه فرز معمولی به دست آمده است. ترکیب شیمیایی آلومینیوم در جدول ۱ آمده است. فرآیند با استفاده از یک دستگاه فرز با قابلیت حرکت اتوماتیک محور عمودی انجام شده است. قطعات اصلی قالب از فولاد ابزار H13 ساخته شده و برای افزایش سختی یک مرحله عملیات حرارتی سختی‌سازی بر روی آنها صورت گرفته است. عملیات حرارتی فولاد شامل یک مرحله پیش گرم در دمای ۸۱۶ درجه سانتی‌گراد، حرارت‌دهی سریع و نگهداری به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۰۱۰ درجه سانتی‌گراد و سرد کردن تا دمای محیط در هوا است. قطر خارجی ابزار چرخان ۲۰ میلی‌متر و سرعت دورانی و خطی آن به ترتیب ۵۰۰ دور بر دقیقه و ۳۲ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شده است. این پارامترها براساس تجربیات پیشین انتخاب شده‌اند. میزان کورس حرکت ابزار به نحوی انتخاب شده است که ضخامت نهایی نمونه ۶ میلی‌متر باشد. برای انجام بهتر عمل اغتشاش و همزنی براده‌های داخل محفظه، ابزار چرخان با پیشانی مارپیچ به عمق دندان ۳ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است. تصاویر مربوط به قسمت‌های مختلف قالب و آماده‌سازی فرآیند در شکل ۳ ارائه شده است. آماده‌سازی نمونه‌ها برای بررسی ریزساختار مطابق با استانداردهای ASTM E407-07 و ASTM E3-11 انجام شده است. نمونه‌های تولیدشده از وسط برش زده شد و سطح مقطع آنها پس از اچ توسط محلول کلر اصلاح شده با ترکیب شیمیایی ۵ میلی‌لیتر آب مقطر، ۲ میلی‌لیتر اسید هیدروفلوئوریک، ۲ میلی‌لیتر اسید کلریدریک و ۳ میلی‌لیتر اسید نیتریک، با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی سختی نمونه‌ها از سختی‌سنج ویکرز با انتخاب نیروی ۰٫۰۱ گرم‌نیرو و زمان نفوذ ۱۵ ثانیه استفاده شده است. رفتار سایشی نمونه تولیدشده و قطعه پایه توسط روش پین روی دیسک بررسی شد. پین مورد استفاده از جنس فولاد آلیاژی AISI 52100 با قطر ۵ میلی‌متر بوده است. آزمون سایش به صورت خشک و در دمای اتاق بر روی سطح بالایی نمونه تولیدشده و قطعه پایه انجام شد. بار عمودی در حین آزمون ۰٫۱ نیوتن و آزمون در مسافت ۵۰۰ متر انجام شد و تغییرات ضریب اصطکاک در طول مسافت پیموده شده

همچنین، عبدی بهق و همکاران، با استفاده از فرآیند فشرده‌سازی برشی دومرحله‌ای، موفق به تولید مستقیم تیوپ‌های بدون درز از براده‌های آلومینیوم شدند [18]. در تحقیق پیش رو، از فرآیند فشرده‌سازی برشی برای تبدیل براده‌های ماشین‌کاری آلومینیوم به یک قطعه توپر مدور استفاده شده است. مطالعه تحقیقات پیشین انجام شده در این زمینه نشان داده است که با توجه به نوبادون فرآیند بسیاری از جنبه‌های آن از قبیل خواص ریزساختاری و مکانیکی قطعات تولیدشده تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین در این تحقیق به بررسی ریزساختار به دست آمده، خواص سختی و مقاومت به سایش قطعات بازیافت شده به عنوان معیاری برای ارزیابی قابلیت فرآیند فشرده‌سازی برشی برای استفاده به عنوان یک روش بازیافت براده‌های آلومینیومی با بازدهی بالا پرداخته شده است.

اصول فرآیند فشرده‌سازی برشی

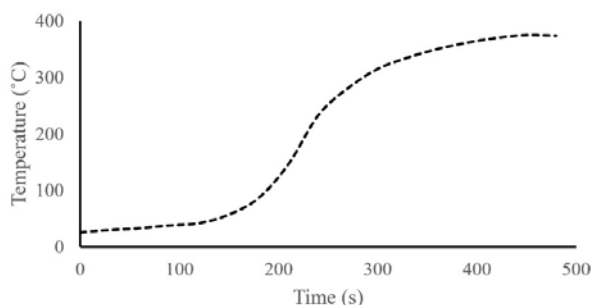
نمای شماتیک از فرآیند فشرده‌سازی برشی، در شکل ۲ نشان داده شده است. اجزای این فرآیند از سه قطعه اصلی تشکیل شده است؛ محفظه استوانه‌ای که براده‌ها درون آن قرار می‌گیرند، ابزار همزنی، و صفحه پشتی که زیر براده‌ها قرار دارد.



شکل ۲) نمای شماتیک فرآیند فشرده‌سازی برشی

چین فرآیند، محفظه استوانه‌ای با یک گیره بر روی میز یک دستگاه ثابت می‌شود. ابزار چرخان در قسمتی که با براده‌ها تماس دارد دارای یک شیار مارپیچ با گام مشخص است. این مارپیچ برای سیلان و همزنی بهتر مواد درون قالب به کار گرفته شده است. در گام اول براده‌ها درون محفظه ریخته می‌شود، سپس ابزار چرخان با سرعت دورانی و نرخ پیشروی از پیش تعیین شده در درون محفظه استوانه‌ای به حرکت درآمده و روی براده‌ها قرار

آلومینیوم از طریق فرآیندهای حرارتی مکانیکی معمول، تشکیل یک ساختار دانه‌بندی یکنواخت به همراه ریزترشدن اندازه دانه‌ها را فراهم می‌کند. کاهش بیشتر اندازه دانه در آلیاژهای آلومینیوم فقط از طریق تبلور مجدد دینامیکی حاصل می‌شود. آلیاژهای آلومینیوم انرژی فعال‌سازی بالایی از خود نشان می‌دهند و تبلور مجدد دینامیکی، مکانیزم اصلی اصلاح دانه‌بندی این آلیاژها در رنج وسیعی از دماها است. اگرچه رسیدن به یک ساختار تبلور مجددیافته کامل نیازمند مقدار کرنش کافی نیز است. میزان اصلاح ریزساختار در آلیاژهای مختلف آلومینیوم با مکانیزهای تبلور مجدد کنترل می‌شود که خود این مکانیزها نیز متأثر از ترکیب فازهای موجود در آلیاژ و دمای تغییر شکل است. به‌طور معمول، دمای تبلور مجدد در آلیاژهای آلومینیوم حدود ۴۰ الی ۵۰٪ دمای ذوب آلیاژ است [19]. لذا بیشینه دمای ثبت‌شده در فرآیند فشرده‌سازی برشی نشان می‌دهد که تبلور مجدد دینامیکی در طی فرآیند به وقوع پیوسته است. این نتیجه در بررسی ریزساختار اتصال جوشی آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ حاصل از فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که توسط مور و همکاران انجام شده است، نیز دیده شده است [20]. فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک فرآیند جوشکاری حالت جامد حرارتی مکانیکی است که مکانیزم عملکردی آن بسیار شبیه به فرآیندهای فشرده‌سازی برشی در تحقیق پیش رو است [21].



نمودار ۱) چرخه حرارتی طی‌شده در طول فرآیند

چگالی و خواص ظاهری

چگالی اندازه‌گیری‌شده برای نمونه‌های تولیدشده برابر با مقدار ۲/۶۷ گرم بر متر مکعب است که حدود ۹۹٪ چگالی آلومینیوم ۶۰۶۱ (قطعه پایه) است که این نتیجه نشان می‌دهد امکان تبدیل براده‌های آلومینیوم به یک قطعه توپر بدون تخلخل از طریق فرآیند فشرده‌سازی برشی امکان‌پذیر است. در شکل ۴، نمایی از سطح بالایی، زیر و دیواره نمونه برش‌خورده از یک نمونه بازیافت‌شده دیده می‌شود. همان‌گونه که در شکل نیز دیده می‌شود، نمونه تولیدشده فاقد هر گونه ترک ظاهری بوده و براده‌ها در هر دو سطح بالا و پایین نمونه‌ها کاملاً به هم چسبیده و یک قطعه واحد تشکیل شده است. در سطح بالایی نمونه اثر چرخش ابزار مارپیچ دیده می‌شود. همچنین در قسمت‌های بیرونی، مقداری از ماده قطعه به‌صورت یک ناصافی باریک بر روی نمونه‌ها دیده می‌شود

ثبت شد. برای تعیین چگالی قطعات تولیدشده از روش ارشمیدوس استفاده شد. همچنین یک ترموکوپل تماسی جهت پایش و ثبت چرخه حرارتی در طی فرآیند، در محفظه براده‌ها تعبیه شد.

جدول ۱) ترکیب شیمیایی آلومینیوم ۶۰۶۱

عناصر	درصد وزنی
Si	۰/۴۲
Fe	۰/۵۶۳
Cu	۰/۹۱۴
Mn	۰/۷۵۶
Mg	۰/۸۹۲
Cr	۰/۱۰۲
Ni	۰/۰۰۸۸
Zn	۰/۲۱۲
Al	پایه



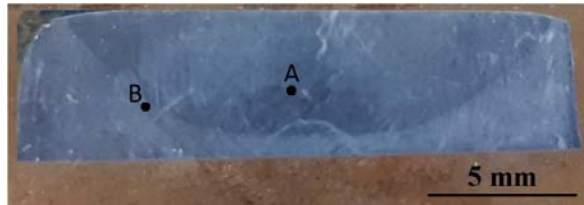
شکل ۳) قسمت‌های مختلف قالب فرآیند فشرده‌سازی برشی

نتایج

چرخه حرارتی در طول فرآیند

حرارت در فرآیند فشرده‌سازی برشی از سه منبع حرارت ناشی از اصطکاک میان براده‌ها، حرارت اصطکاکی در فصل مشترک براده‌ها و دیواره‌های داخلی قطعات، و حرارت ناشی از تغییر شکل مکانیکی ماده ایجاد می‌شود. نمودار ۱ چرخه حرارتی ثبت‌شده را نشان می‌دهد. منحنی به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که تا ثانیه ۱۵۰ دما با شیب بسیار ملایمی در حال افزایش بوده که متناظر با زمانی است که صرف فشرده‌سازی اولیه براده‌ها شده است و پس از ۱۵۰ ثانیه افزایش ناگهانی دما با شیب زیاد تا ثانیه ۳۳۰ دیده می‌شود. پس از آن شیب افزایش دما مجدداً کند شده و فرآیند به یک حالت تقریباً یکنواخت رسیده است. بیشینه دمای ثبت‌شده در فرآیند ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد است. اصلاح ریزساختار در آلیاژهای

ساختار حلقه پیازی معروف است [23]. بیرون از ناحیه A همچنان ساختار ناشی از تبلور مجدد دینامیکی دیده می‌شود و اثری از مرز بین براده‌ها مشاهده نمی‌شود. شکل ۶- d تصویر میکروسکوپی ناحیه B را نشان می‌دهد. در این تصویر مرز بین بخش کاسه‌ای شکل و قسمت پایین‌تر کاملاً مشخص است. تنها تفاوت بین ناحیه A و بخش‌های بیرون از آن مربوط به اندازه دانه‌بندی است. در بیرون از این ناحیه، دانه‌بندی شکل گرفته اندکی درشت‌تر از دانه‌بندی درون آن است.



شکل ۵) تصویر ماکروسکوپی سطح مقطع نمونه تولیدشده

که دلیل آن، وجود لقی موجود بین ابزار چرخان و محفظه حاوی براده‌ها است.

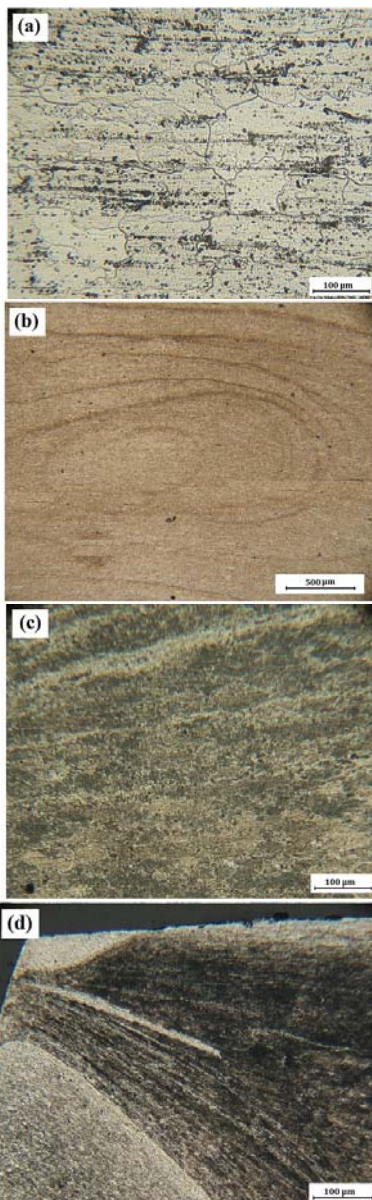


شکل ۶) نمونه تولیدشده از نماهای مختلف

ریزساختار

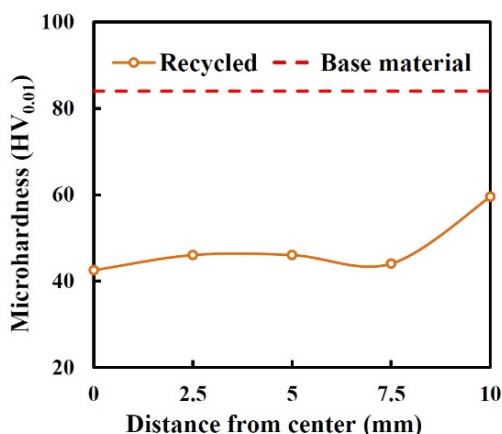
تصویر سطح مقطع برش‌داده‌شده نمونه تولیدشده در شکل ۵ دیده می‌شود. بررسی این تصویر نشان می‌دهد که هیچ گونه عیبی همچون ترک یا حفره در نمونه‌ها ایجاد نشده است. همچنین مشخص است که مرز بین براده‌ها کاملاً از بین رفته است. این نتیجه نشان می‌دهد که تبلور مجدد دینامیکی در حین فرآیند روی داده است. همچنین این سطح مقطع را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد. بخش بالایی که کاسه‌ای شکل است با رنگ تیره‌تر از بخش پایینی جدا شده است.

تصاویر میکروسکوپی از ریزساختار فلز پایه و ریزساختار شکل‌گرفته بر روی نمونه تولیدشده، در شکل ۶ دیده می‌شود. این تصاویر از نواحی A و B بر روی سطح مقطع نشان‌داده‌شده در شکل ۵ ارایه شده است. ناحیه A در درون قسمت کاسه‌ای شکل واقع شده است. ناحیه B مرز بین بخش کاسه‌ای شکل و سایر قسمت‌ها است. لی و همکاران با استفاده از یک مدل المان محدود حرارتی مکانیکی به این نتیجه رسیدند که در حین فرآیند، افزایش دما از سطح بالایی نمونه (زیر ابزار چرخان) شروع شده و نواحی بیرون از ناحیه A چرخه حرارتی کمتری را نسبت به سایر نقاط تحمل می‌کنند [17]. این نتیجه در مدل المان محدود استفاده‌شده توسط عبدی بهنق و همکاران در شبیه‌سازی فرآیند فشرده‌سازی برشی نیز، دیده شده است [18]. ساختار میکروسکوپی با دانه‌بندی ریز در تمامی قسمت‌های ناحیه A دیده می‌شود. شکل ناحیه A مشابهت زیادی با شکل توزیع میدان حرارتی در فرآیند اکستروژن اصطکاکی دارد [22]. در این ناحیه، ریزساختار با دانه‌بندی ریز ناشی از تبلور مجدد دینامیکی شکل گرفته است. از طرفی همان‌طور که در تصویر میکروسکوپی نیز دیده می‌شود یک نوع ساختار لایه‌ای در نمونه شکل گرفته است. این ساختار لایه‌ای الگوی جریان ماده را نشان می‌دهد که در اثر چرخه حرارتی- مکانیکی در طی فرآیند پدیدار شده است. در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نیز مشابه این ساختار در منطقه تلاطم دیده شده است که در آنجا به

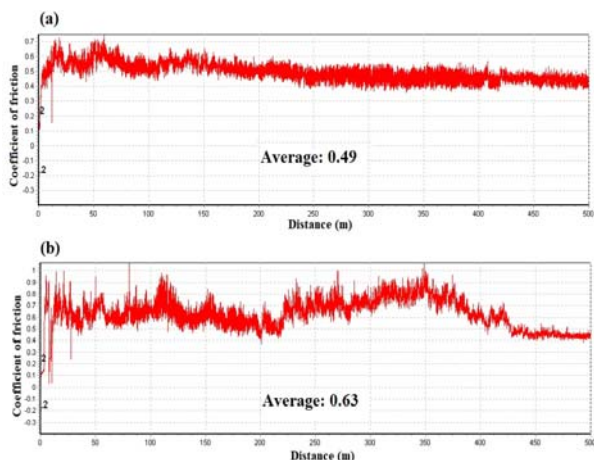


شکل ۷) تصویر ریزساختار گرفته‌شده با میکروسکوپ نوری: (a) فلز پایه، (b) ناحیه A، (c) ناحیه A با بزرگ‌نمایی بیشتر، (d) ناحیه B

تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به آلومینیوم اولیه و نمونه تولیدشده در شکل ۷ دیده می‌شود. همان‌طور که مشخص است هر دو مکانیزم ساییش خراشان و ساییش چسبان در نمونه‌ها روی داده است. ساییش خراشان هنگامی اتفاق می‌افتد که یک سطح سخت در برابر یک سطح نرم‌تر (در اینجا آلومینیوم) حرکت لغزشی داشته باشد و در آن فرورفتگی و شیار ایجاد نماید و منجر به کاهش وزن در نمونه نرم‌تر شود. شیاریهای مربوط ساییش خراشان که جهت ساییش را نیز نشان می‌دهند در آلومینیوم اولیه و نمونه بازیافت‌شده دیده می‌شود. ساییش چسبان هنگامی روی می‌دهد که لغزش موضعی بین دو سطح درگیر موجب گسیختگی اتصال و نهایتاً انتقال ماده از سطح ماده نرم‌تر به سطح دیگر شود. در نمودار ۳، نشانه‌هایی از کندگی عمیق روی سطح ساییش هر دو نمونه قابل مشاهده است. دلیل این موضوع سختی بالاتر پین نسبت به آلومینیوم است که منجر به تغییر شکل پلاستیک ماده و جداشدن مقداری از آلومینیوم از سطح نمونه‌ها می‌شود. اگرچه مقدار کندگی ناشی از مکانیزم ساییش چسبان در نمونه بازیافت‌شده به دلیل ضریب اصطکاک بالاتر، بیشتر است.



نمودار ۲) پروفایل سختی بر روی سطح مقطع نمونه تولیدشده



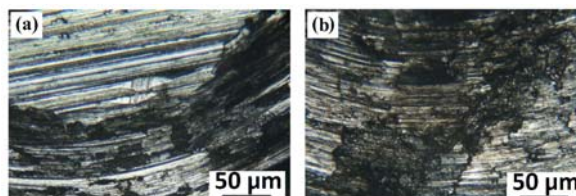
نمودار ۳) تغییرات ضریب اصطکاک در مسافت ۵۰ متر برای: (a) آلومینیوم اولیه، (b) نمونه تولیدشده

سختی و مقاومت به ساییش

آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ جزو آلیاژهای قابل عملیات حرارتی آلومینیوم (رسوب سختی) محسوب می‌شود. در این گونه از آلیاژها مقدار سختی به شدت وابسته به توزیع رسوبات است و در مقابل وابستگی بسیار کمی به اندازه دانه دارد. در فرآیند فشرده‌سازی برشی، ماده تحت فرآیند یک چرخه حرارتی- مکانیکی را با نرخ کرنش و دمای بالا تجربه می‌کند. ترکیب نرخ کرنش و حرارت بالا منجر به حل‌شدن رسوبات استحکام‌بخش شده و زمینه ایجاد تبلور مجدد دینامیکی را فراهم می‌کند. نمودار ۲ نشان دهنده نتایج سختی‌سنجی ویکرز در سطح مقطع نمونه تولیدشده و فلز پایه است. همان‌طور که در نمودار قابل مشاهده است، مقادیر سختی داری توزیع تقریباً یکنواختی در راستای شعاعی دیسک هستند. نتایج آزمون سختی نشان داده است که متوسط سختی در نمونه‌های تولیدشده در حدود ۴۸ ویکرز بوده است که در مقایسه با میزان سختی متوسط فلز پایه که در حدود ۸۴ ویکرز بوده است، ۴۳٪ کاهش نشان می‌دهد. همان‌گونه که اشاره شد، در آلیاژهای آلومینیوم نظیر آلیاژ ۶۰۶۱، مهم‌ترین عامل استحکام بخشی وجود رسوبات $Mg_2Si - \beta''$ است که در دماهای پایین‌تر از ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار هستند [24]. این رسوبات در فلز آلومینیوم اولیه وجود داشته‌اند، اما در آلومینیوم بازیافت‌شده غایب خواهند بود. نتایج بررسی دما نشان داده است که در فرآیند فشرده‌سازی برشی، در اثر حرارت اصطکاک، دما مطمئناً بیش از ۲۰۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بالا می‌رود. در این دماها فاز β'' به راحتی حل می‌شود که مهم‌ترین عامل سختی است. در هنگام سرد شدن فلز بازیافت‌شده نیز، β'' به جای β'' رسوب می‌کند که تاثیر بسیار کمتری در مقایسه با β'' بر روی سختی دارد و در نتیجه سختی پایین می‌آید [24]. همچنین نتایج آزمون سختی نشان داده است که میزان سختی در کناره‌های قطعات اندکی بیشتر از مرکز آنها است. این امر می‌تواند ناشی از کرنش بالاتر در کناره‌های قطعات، در نزدیکی فصل مشترک دیواره داخلی محفظه نگهدارنده و براده‌های داخل آن باشد.

ضرایب اصطکاک آلومینیوم اولیه و قطعات بازیافت‌شده، با استفاده از نتایج حاصل از آزمون ساییش خشک، مورد بررسی قرار گرفت. نمودار ۳ نشان‌دهنده تغییرات ضریب اصطکاک با مسافت لغزش ۵۰ متر برای فلز پایه و نمونه تولیدشده است. میانگین ضریب اصطکاک متوسط برای آلومینیوم اولیه ۰/۴۹ است، در حالی که برای این مقدار برای نمونه بازیافتی ۰/۶۳ است. این نتایج نشان می‌دهد که نمونه بازیافتی در مقایسه با آلومینیوم اولیه مقاومت به ساییش کمتری از خود نشان می‌دهد که این نتیجه با توجه به مقادیر سختی پایین‌تر قابل پیش‌بینی بوده است. سختی و مقاومت به ساییش رابطه مستقیمی با یکدیگر دارند. یکی از نتایج کاهش میزان سختی در فلزات، افزایش ضریب اصطکاک و کاهش مقاومت به ساییش است.

- stir processed Al2024 alloy. *Materials & Design*. 2010;31(10):4891-4896.
- 2- Puga H, Barbosa J, Soares D, Silva F, Ribeiro S. Recycling of aluminium swarf by direct incorporation in aluminium melts. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(11):5195-5203.
- 3- Gronostajski J, Marciniak H, Matuszak A. New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2000;106(1-3):34-39.
- 4- Samuel M. A new technique for recycling aluminium scrap. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;135(1):117-124.
- 5- Fogagnolo JB, Ruiz-Navas EM, Simón MA, Martinez MA. Recycling of aluminium alloy and aluminium matrix composite chips by pressing and hot extrusion. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003;143-144:792-795.
- 6- Mabuchi M, Kubota K, Higashi K. New recycling process by extrusion for machined chips of AZ91 magnesium and mechanical properties of extruded bars. *Materials Transactions, JIM*. 1995;36(10):1249-1254.
- 7- Nakanishi M, Mabuchi M, Kubota K, Higashi K. Relationship between extrusion ratio and mechanical properties of extruded machined-chips of AZ91 magnesium alloy. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*. 1995;42(3):373-377.
- 8- Chino Y, Furuta T, Hakamada M, Mabuchi M. Fatigue behavior of AZ31 magnesium alloy produced by solid-state recycling. *Journal of Materials Science*. 2006;41:3229-3232.
- 9- Hu M, Ji Z, Chen X, Zhang Z. Effect of chip size on mechanical property and microstructure of AZ91D magnesium alloy prepared by solid state recycling. *Materials Characterization*. 2008;59(4):385-389.
- 10- Tekkaya AE, Schikorra M, Becker D, Biermann D, Hammer N, Pantke K. Hot profile extrusion of AA-6060 aluminium chips. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(7):3343-3350.
- 11- Lazzaro G, Vittori S. Metal and energy saving by direct and continuous extrusion of aluminium scraps. *Proceedings of the 121st TMS Annual Meeting, Unknown Date of Meeting, San Diego, CA. Unknown Publisher; 1992.*
- 12- Sugiyama S, Yanagimoto J. Solidification and forming technology of minute scrap metal by semisolid process. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*. 2009;3(2):227-235.
- 13- Chiba R, Nakamura T, Kuroda M. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf through cold profile extrusion and cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011;211(11):1878-1887.
- 14- Abdi Behnagh R, Shen N, Ansari MA, Narvan M, Besharati Givi MK, Ding H. Experimental Analysis and microstructure modeling of friction stir extrusion of magnesium chips. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2016;138: 041008.
- 15- Buffa G, Baffari D, Ingarao G, Fratini L. Uncovering technological and environmental potentials of aluminum alloy scraps recycling through friction stir consolidation. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2020, Jan.
- 16- Narvan M, Abdi Behnagh R, Shen N, Besharati Givi MK, Ding H. Shear compaction processing of SiC nanoparticles reinforced magnesium composites directly from magnesium chips. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016;22:39-48.



شکل ۷) تصویر میکروسکوپی سطح سایش: (a) آلومینیم اولیه، (b) نمونه تولیدشده

نتیجه گیری

برای اولین بار و به طور موفقیت آمیز براده های ماشین کاری آلومینیومی با استفاده از روش فشرده سازی برشی، بازیافت شده و به نمونه های آلومینیومی توپر تبدیل شدند. نتایج مهم و کلیدی تحقیق به شرح زیر استخراج شد:

۱- نمونه های تولیدشده با این روش دارای چگالی برابر با چگالی قطعه پایه و فاقد هر گونه تخلخل و عیوب ظاهری از قبیل ترک بوده و به صورت یک قطعه یکپارچه و واحد هستند.

۲- در حین فرآیند و طی چرخه حرارتی ایجادشده در داخل نمونه ها، تبلور مجدد دینامیکی رخ داده و مرز بین براده ها از بین می رود. همچنین نمونه ها دارای ریزساختاری با حالت کلی دانه بندی ریز ناشی از تبلور مجدد دینامیکی هستند.

۳- با توجه به چرخه حرارتی ایجادشده در نمونه ها و ایجاد حرارت بالای ۲۰۰ درجه سانتی گراد، رسوبات استحکام بخش موجود در ساختار آلومینیوم ۶۰۶۱ در نمونه های بازیافتی از بین رفته و در نهایت سختی نمونه های تولیدی به حدود ۵۷٪ سختی قطعه پایه می رسد.

۴- ضریب اصطکاک در نمونه های تولیدی نسبت به قطعه پایه حدود ۲۹٪ افزایش می یابد که ارتباط مستقیم با کاهش سختی نمونه ها دارد.

۵- روش فشرده سازی برشی می تواند مستقیماً و یا پس از یک فرآیند تولید تکمیلی، برای بازیافت و تبدیل براده های ماشین کاری آلومینیومی به قطعات صنعتی مورد استفاده قرار بگیرد.

تشکر و قدردانی: موردی بیان نشد.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی مستخرج از مقاله، حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده آنها است.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: رضا عبدی بهنق (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۴٪)؛ هادی عبداللهی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۳٪)؛ روزین رجیبی (نویسنده سوم)، روش شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۳۳٪).

منابع مالی: هزینه ها از طریق گرنت پژوهشی اختصاص یافته توسط دانشگاه صنعتی ارومیه تامین شده است.

منابع

- 1- Zahmatkesh B, Enayati, MH, Karimzadeh F. Tribological and microstructural evaluation of friction

materials position on friction stir lap welding of Al to Cu. Science and Technology of Welding and Joining. 2012;17(7):581-588.

22- Abdi Behnagh R, Samanta A, Agha Mohammad Pour M, Esmailzadeh P, Ding H. Predicting microstructure evolution for friction stir extrusion using a cellular automaton method. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2019;27(3):035006.

23- Krishnan KN. On the formation of onion rings in friction stir welds. Materials Science and Engineering: A. 2002;327(2):246-251.

24- Bahemmat P, Haghpanahi M, Besharati MK Ahsanizadeh S, Rezaei H. Study on mechanical, micro-, and macrostructural characteristics of dissimilar friction stir welding of AA6061-T6 and AA7075-T6. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2010;224(12):1854-1864.

17- Li X, Baffari D, Reynolds AP. Friction Stir consolidation of aluminum machining chips. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018;94:2031-2042.

18- Abdi Behnagh R, Fathi F, Yeganeh M, Paydar M, Agha Mohammad M, Liao Y. Production of seamless tube from aluminum machining chips via double-step friction stir consolidation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019;104:4769-4777.

19- Li X, Kassner ME, Bergsma S C. Recrystallization behavior of rolled ingots of 6061 and 6069 aluminum and alloys. Journal of Materials Engineering and Performance. 2000;9:416-423.

20- Murr LE, Liu G, McClure JC. A TEM study of precipitation and related microstructures in friction-stir-welded 6061 aluminium. Journal of Materials Science. 1998;33:1243-1251.

21- Akbari M, Abdi Behnagh R, Dadvand A. Effect of