مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، بهمن 1400، دوره 8، شماره 11، ص‌ص. 35 - 42

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی ریزساختار و سختی تیوب بدون درز آلومینیمی بازیافت شده با استفاده از فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی

رضا عبدی بهنق[1*]، رسول جبارشایان[2*]

1- استادیار، گروه مهندسی ساخت وتولید، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

* ارومیه، صندوق پستی 57155-419، r.abdibehnagh@mee.uut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 6 آذر 1400

داوری اولیه: 12 دی 1400

پذیرش: 2 بهمن 1400

کلیدواژگان:

آلومینیم

تیوب بدون درز

بازیافت

براده ماشین‌کاری

فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی

چکیده

در این تحقیق، از فرایند فشرده سازی برشی دو مرحله‌ای برای بازیافت براده‌های ماشین‌کاری آلومینیم و تبدیل مستقیم آنها به تیوب بدون درز استفاده شد. این فرایند در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، براده‌های ماشین‌کاری 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 رفته و حرکت تا تبدیل براده‌ها به یک قطعه کامل ادامه می‌یابد. در مرحله دوم، از یک ابزار چرخان با هندسه متفاوت و ابعاد کوچکتر نسبت به مرحله اول استفاده می‌شود. در این مرحله، ابزار با سرعت دورانی و خطی از پیش تعیین شده بر روی قطعه ایجاد شده در مرحله اول قرار می‌گیرد و منجر به اکسترود غیرمستقیم آلومینیم از کناره‌های ابزار به سمت بالا شده و تیوب بدون درز تولید می‌شود. به منظور بررسی ریزساختار حاصله و سختی مناطق مختلف به ترتیب از میکروسکوپ نوری و سختی سنج ویکرز استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که تیوب‌های تولید شده با این روش بدون عیب بوده و ریزساختار حاصل از تبلور مجدد در آنها ایجاد شده است. همچنین نتایج حاصل از آزمون سختی نشان داد که مقدار سختی متوسط در زیر و دیواره نمونه‌ها در مقایسه با آلومینیم اولیه به ترتیب 20% و 27% کاهش داشته است.

Investigation of microstructure and hardness of recycled aluminum seamless tube using friction stir consolidation

Reza Abdi Behnagh*, Rasoul Jabarshayan

Department of Manufacturing Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

* P.O.B. 57155-419 Urmia, Iran, r.abdibehnagh@mee.uut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 27 November 2021

First Decision: 2 January 2022

Accepted: 22 January 2022

Keywords:

Aluminum

Seamless tube

Recycling

Machining chip

Friction stir consolidation

Abstract

In this study, a double-step friction stir consolidation process was used to recycle aluminum machining chips and convert them directly into seamless tubes. This process was done in two steps. At the first step, the machining chips are poured into a cylindrical chamber, then a rotating tool with a certain rotational speed and feed rate whose axis is in line with the chamber axis is moved and placed into the chips. Due to the creation of frictional heating, the temperature inside the chamber rises and the movement continues until all the chips are compressed and merged to form a cylindrical bulk material. At the second step, a rotating tool with different geometry and smaller dimensions is used than in the first step. The tool is placed on the created part in the first step with a predetermined rotational and linear speed, leading to indirect extrusion of aluminum from the sides of the tool upwards and producing a seamless tube. In order to study the resulting microstructure and hardness of different regions in the produced tubes, an optical microscope and Vickers hardness tester were used, respectively. The results of this study showed that the tubes produced by this method are without defects and the microstructure resulting from recrystallization has been created in them. Also, the results of the hardness test showed that the average hardness at the bottom and walls of the samples decreased by 20% and 27%, respectively, compared to the as-received aluminum.

1- مقدمه

آلیاژهای آلومینیم از سبک ترین آلیاژهای فلزی محسوب شده و از نسبت استحکام به وزن بالایی برخوردار می‌باشند. استفاده از آلیاژهای آلومینیم یک انتخاب عالی برای سازه‌های مهندسی در صنایع مختلف از جمله صنایع مهمی چون کشتی سازی، خودروسازی و هوافضا می‌باشد [1]. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که از سال 2005 تا 2050 تقاضا برای آلومینیم از رشدی 2/6 تا 3/5 برابری مواجه خواهد شد، این در حالی است

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

R. Abdi Behnagh, R. Jabarshayan, Investigation of microstructure and hardness of recycled aluminum seamless tube using friction stir consolidation, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 11, pp. 35- 42, 2022 (in Persian)

که پیش بینی شده است که تقاضا برای فولاد از رشدی 1/8 تا 2/2 برابری برخوردار شود [2]. از طرفی فرایند تولید ماده خام، سهم عمده‌ای در تولید و انتشار گاز CO_2 را دارا می‌باشد. وورل و همکارانش در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که فرایندهای تولید مواد خام، عامل انتشار چیزی در حدود 25% از کل گاز CO_2 درجهان است [3]. این آمارها نشان می‌دهد که حرکت در جهت عکس این روند و داشتن استراتژی بازیافت مناسب برای نگه داشتن چند باره ماده در چرخه استفاده به جای تولید ماده خام تا چه اندازه می‌تواند در کاهش انتشار گازهای مخرب اهمیت داشته باشد.

آلیاژهای آلومینیم قابلیت ماشین‌کاری بالایی دارند، توان کمی برای ماشین‌کاری نیاز داشته و پرداخت سطح مناسبی بعد از ماشین‌کاری آنها بدست می‌آید. بنابراین، تولید محصولات مختلف آلومینیمی با استفاده از فرایندهای مبتنی بر براده برداری از قبیل فرزکاری، تراشکاری و سوراخکاری امری بسیار متداول است. در فرایندهای تولید قطعات با این روش‌ها حجم انبوهی از براده (در حدود 3% تا 5% وزن قطعه ریخته شده) به صورت دورریز ایجاد می‌شود. به طور سنتی این براده‌ها به خریداران ضایعات فلزی با قیمت‌های بسیار پایین فروخته می‌شود که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی باشد. خریداران ضایعات، براده‌های جمع آوری شده را در نهایت در کوره‌های ذوب بازیافت کرده و به آلومینیم خام تبدیل می‌کنند. در طی این فرایند انرژی بالایی مصرف می‌شود که افزایش هزینه‌های بازیافت را به دنبال دارد. با توجه به قیمت بالای آلومینیم و کمبود منابع در دسترس برای این فلز ارزشمند، بازیافت براده‌های آلومینیم با روش‌های مقرون به صرفه از نظر اقتصادی می‌تواند بسیار پراهمیت باشد. مرور تاریخچه فرایندهای تبدیل ضایعات آلومینیم نشان می‌دهد که تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با بازیافت براده‌های آلومینیم با استفاده از روش‌های سنتی و غیرسنتی انجام شده است [4]. برای سال‌های متمادی، براده‌های تولید شده در فرایندهای ماشین‌کاری جهت تبدیل به مواد اولیه بازیافتی قابل استفاده مستقیماً تحت عملیات ذوب مجدد قرار می‌گرفتند. فرایند تولید آلومینیم بازیافتی با روش‌های سنتی در مجموع شامل آماده‌سازی قراضه، ذوب و پالایش و سپس اکستروژن بوده است. آماده‌سازی شامل دسته‌بندی، شست و شو و تمیزکاری قراضه‌ها است. فرایند ذوب و پالایش نیز شامل ذوب، آلیاژسازی و خالص‌سازی می‌شود. در تولید آلومینیم 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 فرایند اکسیداسیون از بین می‌رود. بنابراین، هزینه‌های مربوط به فرایند مانند هزینه‌های نیروی انسانی، انرژی و حفظ و نگهداری محیط زیست افزایش می‌یابد [4].

روش دیگری نیز برای بازیافت براده‌ها وجود دارد که به نوعی تبدیل مستقیم براده‌ها به یک محصول فلزی فشرده می‌باشد. اساس این روش که در ابتدا برای بازیافت براده‌های آلومینیم مورد استفاده قرار گرفت، بر پایه خرد کردن براده‌ها تا اندازه مورد نظر و سپس استفاده از یکی از دو فرایند اکستروژن گرم یا فورج گرم قرار دارد. این نوع از بازیافت می‌تواند برای آهن، مس، آلیاژهای آلومینیم 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 1990 در کره [5] و ژاپن [6] برمی گردد. در بازیافت حالت جامد، براده‌ها بدون فرایند ذوب به صورت مستقیم با استفاده از فرایند اکستروژن گرم به چرخه استفاده برمی‌گردند. با استفاده از بررسی میزان تلفات مربوط به مواد و همچنین هزینه‌های مربوط به هر یک از روش‌ها می‌توان به مقایسه میزان بازدهی آنها پرداخت. به عنوان مثال، در روش تبدیل مستقیم براده‌های آلومینیم به یک محصول اکسترودی، مقدار فلز بازیافت شده به بیش از 95% می‌رسد و مقداری در حدود 5% در مراحل مختلف تلف می‌شود. در واقع تفاوت روش‌های مختلف بازیافت حالت جامد به نوع فرایند به کار گرفته شده در قسمت آماده‌سازی براده‌ها قبل از فرایند اکستروژن گرم بستگی دارد. سه نوع مختلف از انواع روش‌های بازیافت نیمه جامد، که ترکیبی از دو فرایند می‌باشند، عبارتند از: پرس سرد-اکستروژن گرم، پرس گرم-اکستروژن گرم و اکستروژن دوبل. 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، فرایند اکسیداسیون و از بین رفتن ماده بر اثر آن ناچیز است، در حالی‌که به عنوان مثال در فرایند ذوب مجدد آلومینیم چیزی در حدود 20% ماده اولیه در اثر اکسیداسیون از بین می‌رود [7]. دوم اینکه مصرف انرژی در بازیافت حالت جامد به دلیل حذف مرحله ذوب بسیار کمتر خواهد بود و در نهایت اینکه این روش از نظر ملاحظات زیست محیطی برتری قابل ملاحظه‌ای نسبت به روش‌های سنتی دارد.

در همه کارهای تحقیقاتی اشاره شده در بالا، فرایند بازیافت به صورت دومرحله‌ای انجام شده است. کاهش تعداد مراحل

بازیافت می‌تواند مستقیماً منجر به کاهش زمان و انرژی مورد نیاز برای بازیافت گردد. 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، فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی[1] می‌باشد. این روش بازیافت، از اصول فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی[2] پیروی می‌کند. در فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که در سال 1991 میلادی در موسسه جوش انگلستان ابداع شده است، از حرارت اصطکاکی و نیروی محوری برای تغییر شکل پلاستیکی ماده و ایجاد اتصال جوشی استفاده می‌شود. در طی این فرایند، ورق‌هایی که باید به هم متصل شوند با گیره‌بندی مناسب بر روی میز دستگاه قرار گرفته و یک ابزار چرخشی غیر مصرفی با سختی بالاتر از سختی مواد پایه در محل اتصال فرو می‌رود. سپس ابزار با سرعت مشخصی در راستای خط اتصال به حرکت در می‌آید و اتصال جوشی در اثر حرارت و تغییر شکل پلاستیکی مواد شکل می‌گیرد [8].

همان‌گونه که اشاره شد، در روش فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی از اصول اولیه فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی استفاده شده است. در طی این فرایند که یک فرایند بازیافت محسوب می‌شود، یک ابزار چرخشی غیرمصرفی باعث ایجاد فشار، حرارت اصطکاکی و نرم شدگی موضعی براده‌ها شده و منجر به تولید ماده توپر می‌شود. با توجه به اینکه در این فرایند، مانند روش‌های سنتی بازیافت، نیاز به ذوب مجدد ماده نیست و به صورت تک مرحله‌ای انجام می‌شود، انرژی مصرفی بسیار کم است. مقایسه مصرف انرژی در بازیافت با روش فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی و ذوب مجدد توسط بافا و همکارانش [9] مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیقات انجام شده بر روی روشهای مختلف بازیافت مقدار مشخصی از براده آلومینیم، نویسندگان به این نتیجه رسیدند که میزان مصرف انرژی در فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی در حدود 44% کمتر از روش ذوب مجدد می‌باشد. بررسی تاریخچه این فرایند نشان می‌دهد که تحقیقات بسیار محدودی بر روی این فرایند و قابلیت‌های آن صورت گرفته است. در سال 2016، عبدی و همکاران از این فرایند بازیافت برای تولید نانوکامپوزیت Mg/SiC استفاده کردند [10]. در این تحقیق از پودر نانوکاربید سیلیسم برای تولید نانوکامپوزیت پایه فلزی در زمینه منیزیم استفاده شده است. بررسی‌های انجام شده 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 یک تحقیق دیگر توسط عبدی و همکارانش از فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی برای ساخت قطعات آلومینیمی تو پر استفاده شده است[11]. بررسی انجام شده در تحقیق آنها نشان داد که قطعه تولیدشده توسط این فرآیند، با چگالی برابر با ماده اولیه، این قابلیت را دارد که به صورت مستقیم و یا پس از یک فرآیند تولید ثانویه به یک قطعه صنعتی تبدیل شود. در پژوهش دیگری که توسط لی و همکارانش صورت گرفته است، به امکان سنجی انجام فرایند با بررسی تجربی و شبیه‌سازی المان محدود بازیافت براده‌های آلومینیم توسط فرایند فشرده سازی برشی پرداخته شده است [12]. در این پژوهش، یک ناحیه با ساختار میکروسکوپی تبلور مجدد یافته کاسه‌ای شکل در قسمت بالای سطح مقطع قطعات بازیافت شده مشاهده شد. در یک پژوهش دیگر، از فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی برای بازیافت براده‌های مس استفاده شده و خواص مختلف قطعات بازیافت شده مورد بررسی قرار گرفته است [13]. اخیراً عبدی و همکارانش [14]، برای اولیه بار به امکان سنجی تولید مستقیم تیوب‌های بدون درز از براده‌های آلومینیم پرداخته‌اند. در این تحقیق، پارامترهای فرایند برای رسیدن به تیوب‌های عاری از عیوب ماکروسکوپی و شبیه‌سازی المان محدود فرایند مورد بررسی قرار گرفته است.

مطالعه تحقیقات پیشین انجام شده در این زمینه نشان داده است که فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی فرایندی نوپا می‌باشد و تولید تیوب بدون درز توسط این روش در مراحل اولیه تحقیق و توسعه قرار دارد و قطعاً نیازمند تحقیقات گسترده تری است. بسیاری از جنبه‌های تولید تیوب بدون درز از براده‌های آلومینیم توسط فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی از قبیل خواص ریزساختاری و مکانیکی قطعات تولید شده که می‌تواند به عنوان معیاری برای تصمیم‌گیری صنایع مرتبط در جهت استفاده یا عدم استفاده از این فرایند باشد، تا کنون مورد بررسی قرار نگرفته است.

لذا در تحقیق پیش رو، از فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی برای تبدیل براده‌های ماشین‌کاری آلومینیم به یک تیوب بدون درز استفاده شده است. در ادامه، به بررسی ریزساختار و سختی قسمت‌های مختلف تیوب‌های بازیافت شده به عنوان معیاری برای ارزیابی قابلیت فرایند فشرده‌سازی اصطکاکی اغتشاشی برای استفاده به عنوان یک روش بازیافت

[1] Friction Stir Consolidation
[2] Friction Stir Welding

براده‌های آلومینیمی و تبدیل آنها به قطعات قابل استفاده پرداخته شده است.

2- اصول فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی

اصول اولیه فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی در شکل 1 نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل نیز دیده می‌شود این فرایند در دو مرحله مشخص انجام می‌شود. در هر دو مرحله، اجزای این فرایند از سه قطعه اصلی تشکیل شده است: یک محفظه استوانه‌ای که براده‌ها درون آن قرار می‌گیرند، یک ابزار چرخان، و یک صفحه پشتی که زیر براده‌ها قرار دارد. تفاوت در اندازه و شکل هندسی ابزار چرخان باعث تمایز بین دو مرحله از فرایند شده است. در مرحله اول، ابزار چرخان دارای یک سر مارپیچ جهت سیلان راحت‌تر مواد و افزایش اصطکاک میان پیشانی ابزار و براده‌ها می‌باشد. در حالی‌که ابزار چرخان مرحله دوم دارای سری صاف بوده و قطر آن از ابزار مرحله قبل کمتر است. در واقع این تفاوت قطر تعیین کننده ضخامت دیواره تیوب بازیافت شده می‌باشد.

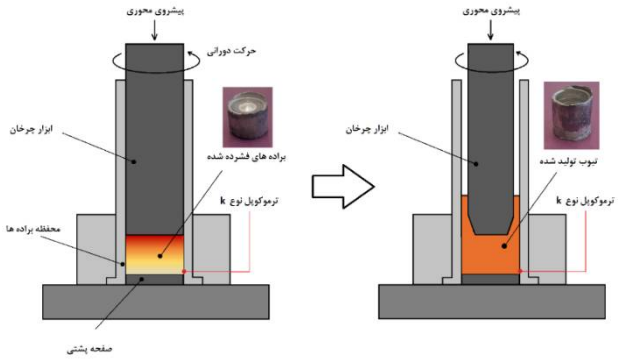

Fig. 1 Schematic representation of friction stir consolidation process [11]

شکل 1 نمای شماتیک فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی [11]

محفظه استوانه‌ای با یک گیره بر روی میز یک دستگاه فرز با قابلیت حرکت اتومات در راستای محور عمودی ثابت می‌شود. در مرحله 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 در آمده و بر روی براده‌ها قرار 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 استوانه‌ای می‌شود.. پس از رسیدن به کورس نهایی، ابزار چرخان مرحله اول، از درون محفظه خارج می‌شود. در مرحله دوم یک ابزار چرخان دیگر با قطر کمتر نسبت به ابزار قبلی مجددا با سرعت دورانی و سرعت پیشروی مشخص بر روی قطعه استوانه‌ای تشکیل شده در مرحله قبل قرار می‌گیرد. در این شرایط حرکت نسبی ابزار چرخان نسبت به محفظه در راستای محور عمودی منجر به اکستروژن غیرمستقیم آلومینیم نرم شده به سمت بالای محفظه شده و تیوب بدون درز تشکیل می‌شود.

3- انتخاب ماده و روش تحقیق

در این تحقیق، از براده‌های تمیز و خشک آلومینیم 7023 استفاده شده است. این براده‌ها از فرایند ماشین‌کاری آلومینیم با استفاده از یک ماشین تراش معمولی بدست می‌آیند. ترکیب شیمیایی آلومینیم و تصویری از براده ماشین‌کاری شده در جدول 1 ارائه شده است. در حین ماشین‌کاری براده‌ها هیچگونه سیال خنک کار یا روانکاری استفاده نشده است. فرایند 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 سختی سازی بر روی آنها صورت گرفته است. عملیات حرارتی فولاد شامل یک مرحله پیش گرم در دمای $816\ C^{\circ}$، حرارت دهی سریع و نگهداری به مدت 30 دقیقه در دمای $1010C^{\circ}$ و سرد کردن تا دمای محیط در هوا است.

در مرحله اول و دوم، قطر خارجی ابزار چرخان به ترتیب 20 و 15 میلی‌متر بوده است. در هر دو مرحله، قطر داخلی و ارتفاع محفظه نگهدارنده براده‌ها به ترتیب 60 و 20/6 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. قطر ابزار چرخان در مرحله دوم نشان می‌دهد که ضخامت دیواره تیوب‌های تولید شده 2/5 میلی‌متر می‌باشد. برای تسهیل در فرایند سیلان مواد در مرحله دوم، سر ابزار چرخان با زاویه 8 درجه به شکل یک مخروط در نظر گرفته شده است. در هر دو مرحله، سرعت دورانی و خطی ابزار به ترتیب 800rev/min و 8mm/min انتخاب شده است. این پارامترها بر اساس تجربیات پیشین نویسندگان انتخاب شده اند. ارتفاع قطعه استوانه‌ای تولید شده در مرحله اول با توجه به عمق نفوذ ابزار 18mm می‌باشد. با توجه به اهمیت میزان حرارت تولید شده، سیکل دمایی در حین انجام فرایند توسط ترموکوپل تماسی که درون دیواره محفظه نگهدارنده براده‌ها تعبیه شده بودند، ثبت شده است. تصویر ترمومتر و ترموکوپل استفاده شده در شکل 2 ارائه شده است. بعد از اتمام فرایند، تیوب تولید شده از محفظه خارج شده و جهت انجام تست‌های مختلف آماده سازی شده است.

برای بررسی ریزساختار شکل گرفته، نمونه‌های تولید شده از وسط برش زده شده و سطح مقطع آنها پس از اچ توسط محلول

کلر با میکروسکوپ نوری مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی سختی نمونه‌ها از سختی سنج ویکرز با انتخاب نیروی 200grf استفاده شده است. برای تعیین چگالی قطعات تولید شده از روش ارشمیدوس استفاده شد.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلومینیم 7023 و تصویر براده

Table 1 Chemical composition of 7023 Aluminum and an image of used chips

عنصر	درصد وزنی (%)
Si	0/4
Fe	0/5
Cu	0/86
Mg	0/1
Ti	0/1
Zn	3/19
Al	پایه

Fig. 2 CMM DT-613 Thermometer and k-type thermocouple

شکل 2 ترمومتر سی‌ای ام مدل DT-613 و ترموکوپل نوع k

4- نتایج

4-1- سیکل حرارتی در فرایند

حرارت در فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی از سه منبع ایجاد می‌شود؛ حرارت ناشی از اصطکاک میان براده‌ها، حرارت اصطکاکی در فصل مشترک براده‌ها و دیواره‌های داخلی قطعات، و حرارت ناشی از تغییر شکل مکانیکی ماده [11]. بررسی داده‌های ثبت شده توسط ترموکوپل حرارتی نشان می‌دهد در هر دو مرحله دما ابتدا بالا رفته، به یک مقدار بیشینه رسیده و سپس به یک حالت پایدار می‌رسد. در مرحله اول دمای بیشینه 585 C° درجه سانتی گراد ثبت شده است در حالیکه این مقدار برای مرحله دوم 340 C° بوده است. این کاهش در دمای بیشینه نشان می‌دهد که در مرحله دوم که ماده اولیه به جای براده یک ماده توپر می‌باشد یکی از منابع تولید حرارت (اصطکاک میان براده‌ها) که بالاتر اشاره شد حذف شده است. بنابراین، میزان حرارت تولید شده در مرحله دوم کمتر از مرحله اول بوده است. همچنین بیشینه دمای ثبت شده در مرحله اول چیزی در حدود 0/9 درجه حرارت ذوب آلومینیم می‌باشد، دمایی که لازمه فعالسازی تبلور مجدد دینامیکی می‌باشد. اصلاح ریزساختار در آلیاژهای آلومینیوم از طریق فرایندهای حرارتی مکانیکی رایج، تشکیل یک ساختار دانه بندی یکنواخت به همراه ریزتر شدن اندازه دانه‌ها را فراهم می‌کند. کاهش بیشتر اندازه دانه در آلیاژهای آلومینیوم فقط از طریق تبلور مجدد دینامیکی حاصل می‌شود. آلیاژهای آلومینیم انرژی فعال‌سازی بالایی دارند و تبلور مجدد دینامیکی، مکانیزم اصلی اصلاح دانه‌بندی این آلیاژها در محدوده وسیعی از دماها می‌باشد. اگرچه رسیدن به یک ساختار تبلورمجدد یافته کامل نیازمند مقدار کرنش کافی نیز می‌باشد. میزان اصلاح ریزساختار در آلیاژهای مختلف آلومینیم با مکانیزهای تبلورمجدد کنترل می‌شود که خود این مکانیزها نیز متاثر از ترکیب فازهای موجود در آلیاژ و دمای تغییر شکل می‌باشد. به طور معمول، دمای تبلور مجدد در آلیاژهای آلومینیم حدود 40 الی 50% دمای ذوب آلیاژ می‌باشد [15]. لذا بیشینه دمای ثبت شده در فرایند فشرده نشان می‌دهد که تبلور مجدد دینامیکی به وقوع پیوسته است. این نتیجه در بررسی ریزساختار اتصال جوشی آلیاژ آلومینیم حاصل از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که توسط مور و همکارانش انجام شده است، نیز دیده شده است [16].

4-2- چگالی و خواص ظاهری

چگالی اندازه‌گیری شده برای تیوب‌های تولید شده برابر با مقدار 2/71gr/cm3 می‌باشد که حدود 98% چگالی آلومینیم اولیه است است. مقدار چگالی بدست آمده در این تحقیق با مقدار چگالی بدست آمده در تولید قطعات توپر آلومینیمی از براده‌های ماشین‌کاری توسط روش فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی مطابقت دارد [11]. این نتیجه نشان می‌دهد امکان تبدیل براده‌های آلومینیم به تیوب‌های بدون درز از طریق فرایند فشرده سازی برشی امکان‌پذیر می‌باشد. در شکل 3، نمای کامل و برش خرده از یک قطعه تولید شده دیده می‌شود. همانگونه که درتصاویر ارائه شده نیز دیده می‌شود، نمونه تولید شده فاقد هرگونه ترک ظاهری بوده و براده‌ها کاملاً به هم چسبیده و یک قطعه کامل تشکیل شده است. سطح خارجی نمونه از صافی سطح قابل قبولی برخوردار است. در قسمت پایینی نمونه اثری از چسبندگی به صفحه پشتی قالب دیده نمی‌شود. در سطح داخلی قطعه اثر چرخش ابزار قابل مشاهده است. همچنین در بالای نمونه، مقداری از ماده به صورت یک پلیسه باریک بر روی نمونه‌ی کامل دیده می‌شود که دلیل آن، وجود لقی موجود بین ابزار چرخان و محفظه حاوی براده‌ها است.

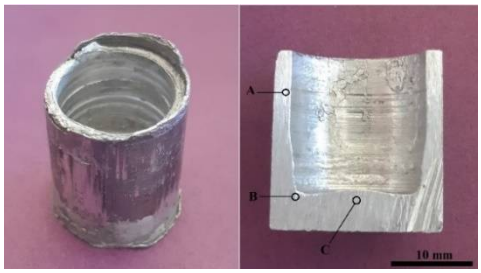

Fig. 3 Images of whole and sectioned tube

شکل 3 نمای کامل و برش خورده تیوب بازیافت شده

4-3- ریزساختار

در سطح مقطع شکل 3، موقعیت نقاطی که در آنها ریزساختار بررسی شده است دیده می‌شود. نتایج حاصل از بررسی‌ها توسط میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی 200 برابر در شکل 4 ارائه شده است. نقطه A در قسمت بالایی نمونه و در نزدیکی جداره داخلی آن قرار دارد. نقاط B و C در قسمت پایینی نمونه در نزدیکی محل چرخش قسمت پیشانی ابزار چرخان واقع شده است. در نتیجه حرارت اصطکاکی و تغییر شکل شدید، شکل گیری دانه بندی جدید ناشی از تبلور مجدد در تمامی نقاط دیده می‌شود.

در نقاط B و C با توجه به میزان برابری از حرارت اصطکاکی و تغییر شکل، تفاوتی میان اندازه دانه‌ها دیده نمی شود. اندازه دانه متوسط بدست آمده در این مناطق μm 13 بوده است. بررسی تصویر ریزساختار در نقطه A نشان می‌دهد که اندازه دانه متوسط در این منطقه بیشتر بوده و به μm 40 رسیده است که دلیل آن می‌تواند تغییر در میزان تغییر شکل پلاستیک و دما در مقایسه با قسمت‌های پایین تر باشد.

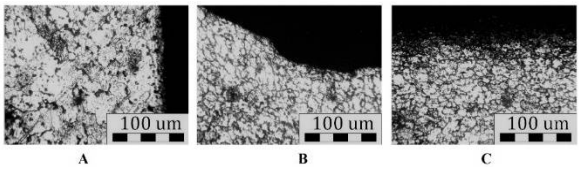

Fig. 4 Microstructure of different locations on Fig. 3

شکل 4 ریزساختار نقاط مختلف نشان داده شده در شکل 3

4-4- بررسی سختی

آلیاژ آلومینیم 7023 جزو آلیاژهای قابل عملیات حرارتی آلومینیم (رسوب سختی) محسوب می‌شود. به آلیاژهای گروه 7000 آلومینیم همچون آلیاژ 7023 استفاده شده در این پژوهش، آلیاژهای آلومینیم-روی نیز گفته می‌شود. در جهت افزایش استحکام، این آلیاژها عموما تحت عملیات حرارتی قرار می‌گیرند. فرایند عملیات حرارتی شامل رسوب دهی، سرد کردن در آب و پیرسختی است. تحت این شرایط سخت شدگی توسط رسوب MgZn2 اتفاق می‌افتد. ریزساختار آلومینیم 7023 پایه شامل رسوبات یوتکتیک سوزنی MgZn2 در زمینه- aluminumα است. در این گونه از آلیاژها مقدار سختی به شدت وابسته به توزیع رسوبات می‌باشد و در مقابل وابستگی بسیار کمی به اندازه دانه دارد. نتایج مطالعات پیشین بر روی فرایندهای مشابه مبتنی بر اصطکاک نشان می‌دهد که در آلیاژهای رسوب سخت آلومینیم نظیر آلیاژهای گروه 7000، به دلیل انحلال و درشت شدن رسوبات استحکام بخش در حین فرایند، سختی نهایی کاهش می‌یابد .

در فرایند فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی نیز، ماده تحت فرایند یک سیکل حرارتی-مکانیکی را با نرخ کرنش و دمای بالا تجربه می‌کند. ترکیب نرخ کرنش و حرارت بالا منجر به حل شدن رسوبات استحکام بخش شده و زمینه ایجاد تبلور مجدد دینامیکی را فراهم می‌کند. شکل 5 نشان دهنده نتایج سختی سنجی در نمونه تولید شده می‌باشد. سختی آلومینیم 7023 پایه 135 ویکرز بوده است. بررسی مقادیر سختی بر روی قطعه برش خورده در دو موقعیت شامل دیواره قطعه و انتهای قطعه انجام شده است. موقعیت‌های مورد نظر با خط چین بر روی نمای شماتیک قطعه برش خورده در شکل 5 نشان داده شده است. فاصله این نقاط از یکدیگر 1 میلی‌متر می‌باشد. نمودار سمت چپ شکل 5 مربوط به بررسی سختی در ارتفاع سطح مقطع تیوب می‌باشد. کمترین سختی در بالاترین نقطه تیوب (نزدیک به سطح بالایی) با مقدار 86 ویکرز بدست آمده است. با حرکت به سمت قسمت‌های پایینی به میزان سختی افزوده شده و سختی بیشینه به مقدار 105 ویکرز ثبت شده است. دلیل پایین تر بودن نرخ سختی در قسمت‌های بالایی می‌تواند تفاوت اندازه دانه در این نقطه نسبت قسمت‌های پایین تر باشد که با سر ابزار چرخان در تماس هستند. سختی متوسط اندازه‌گیری شده در این قسمت 98 ویکرز بوده است که نسبت به سختی متوسط آلومینیم اولیه 27% کاهش دیده شده است. این نتیجه مجددا نشان می‌دهد که با وجود کاهش اندازه دانه‌ها پس از فرایند، به دلیل انحلال رسوبات استحکام بخش در دماهای بالا، سختی متوسط در تیوب کاهش پیدا کرده است.

در بررسی شعاعی قطعه بر روی انتهای تیوب، سختی مابین مقادیر 86 و 125 ویکرز در نوسان بوده است. در این قسمت سختی متوسط 108 ویکرز بوده و روند خاصی برای افزایش یا کاهش سختی دیده نمی شود و پروفایل سختی تقریباً یکنواخت ثبت شده است. در این بخش نیز با وجود کاهش اندازه دانه بیشتر نسبت به قسمت‌های بالایی نمونه، باز هم سختی متوسط

حدود 20% از سختی فلز پایه کمتر بوده است.

نتایج بدست آمده در این بخش، بویژه کاهش مقدار سختی نسبت به مقدار سختی آلومینیم اولیه، مشابه نتایجی است که در فرایند جوشکاری اصطکاکی آلیاژ آلومینیم 7075-T6 توسط خالید رافی و همکاران بدست آمده است [17].

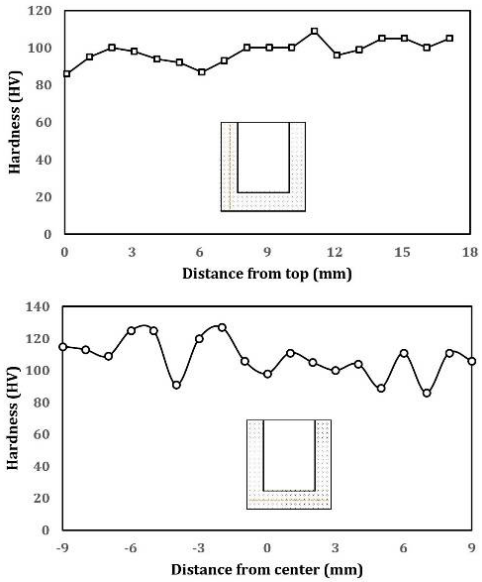

Fig. 5 Hardness test results

شکل 5 نتایج حاصل از تست سختی

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی برای تبدیل براده‌های ماشین‌کاری آلومینیم به تیوب‌های بدون درز استفاده شد. این روش یک روش بازیافت حالت جامد می‌باشد که برای تبدیل مستقیم براده‌های فلزی به ماده توپر بدون نیاز به فرایند ذوب مورد توجه قرار گرفته است. نتایج مهم و کلیدی تحقیق به شرح زیر استخراج گردید:

- نمونه‌های تولید شده با این روش دارای چگالی تقریباً برابر با چگالی قطعه پایه و فاقد هرگونه تخلخل و عیوب ظاهری بوده و به صورت یک تیوب بدون درز می‌باشند که انتهای آن بسته است.

- در حین فرایند و طی سیکل حرارتی ایجاد شده در داخل نمونه‌ها، تبلور مجدد دینامیکی رخ داده و مرز بین براده‌ها از بین می‌رود. همچنین نمونه‌ها دارای ریزساختاری با حالت کلی دانه‌بندی ریز ناشی از تبلور مجدد دینامیکی می‌باشند. توزیع اندازه‌ها به شکلی است که در قسمت‌هایی که نزدیک به سر ابزار چرخان قرار دارد به دلیل تغییر شکل پلاستیک بیشتر دانه بندی ریزتری بدست آمده است .

- ایجاد حرارت بالا در حین فرایند موجب انحلال رسوبات استحکام بخش موجود در نمونه‌های بازیافتی شده و در نتیجه سختی نمونه‌های تولیدی در قسمت‌های مختلف نمونه، از 20% تا 27% کاهش نشان می‌دهد.

- تیوب‌های تولید شده با استفاده از روش فشرده سازی اصطکاکی اغتشاشی می‌تواند مستقیماً و یا پس از یک فرایند تولید ثانویه، در صنایع مرتبط همچون صنایع خودروسازی و هوافضا مورد استفاده قرار بگیرد.

6- مراجع

[1] Abdi behnagh, R., Besharati Givi, M. K., and Akbari, M., Mechanical Properties, Corrosion Resistance, and Microstructural Changes during Friction Stir Processing of 5083 Aluminum Rolled Plates, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 27(6), pp. 636–640, 2012.

[2] Gutowski, T. G., Sahni, S., Allwood, J. M., Ashby, M. F., and Worrell, E., The Energy Required to Produce Materials: Constraints on Energy-Intensity Improvements, Parameters of Demand, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.*, Vol. 371(1986), p. 20120003, 2013.

[3] Worrell, E., Allwood, J., and Gutowski, T., The Role of Material Efficiency in Environmental Stewardship, *Annual Review of Environment and Resources.*, Vol. 41, pp. 575–598, 2016.

[4] Fogagnolo, J. B., Ruiz-Navas, E. M., Simón, M. A., and Martinez, M. A., Recycling of Aluminium Alloy and Aluminium Matrix Composite Chips by Pressing and Hot Extrusion, *Journal of Materials Processing Technology.*, Vol. 143, pp. 792–795, 2003.

[5] Mabuchi, M., Kubota, K., and Higashi, K., New Recycling Process by Extrusion for Machined Chips of AZ91 Magnesium and Mechanical Properties of Extruded Bars, Materials *Transactions, JIM*, Vol. 36(10), pp. 1249–1254, 1995.

[6] Nakanishi, M., Mabuchi, M., Kubota, K., and 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*, Vol. 42(3), pp. 373–377, 1995.

[7] Hu, M., Ji, Z., Chen, X., and Zhang, Z., Effect of Chip Size on Mechanical Property and Microstructure of AZ91D Magnesium Alloy Prepared by Solid State Recycling, *Materials Characterization*, Vol. 59(4), pp. 385–389, 2008.

[8] Shojaeefard, M. H., Behnagh, R. A., Akbari, M., Givi, M. K. B., and Farhani, F., Modelling and Pareto Optimization of Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA7075/AA5083 Butt Joints Using Neural Network and Particle Swarm Algorithm, *Materials & Design*, 44, pp. 190–198, 2013.

[9] Buffa, G., Baffari, D., Ingarao, G., and 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*, 7, pp. 955–964, 2020.

[10] Narvan, M., Abdi Behnagh, R., Shen, N., Besharati Givi, M. K., and Ding, H., Shear Compaction Processing of SiC Nanoparticles Reinforced Magnesium Composites Directly from Magnesium Chips, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 22, pp. 39–48, 2016.

[11] Abdi behnagh, R., Abdollahi, H., and Rajabi, R., Production of Bulk Aluminum Parts from Machining Chips by Shear Compaction Processing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 20(9), pp. 2213–2221, 2020, (in Persian فارسی)

[12] Li, X., Baffari, D., and Reynolds, A. P., Friction Stir Consolidation of Aluminum Machining Chips, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 94(5–8), pp. 2031–2042, 2018.

[13] Behnagh, R. A., Abdollahi, H., Pour, M. A. M., and Shahbazi, B., Microstructure, Mechanical Properties, and Electrical Conductivity of the Solid-State Recycled Pure Copper Machining Chips, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 235(1), pp. 195–201, 2021.

[14] Behnagh, R. A., Fathi, F., Yeganeh, M., Paydar, M., Mohammad, M. A., and Liao, Y., Production of Seamless Tube from Aluminum Machining Chips via Double-Step Friction Stir Consolidation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 104(9–12), pp. 4769–4777, 2019.

[15] Kassner, M. E., and Bergsma, S. C., Recrystallization Behavior of Rolled Ingots of 6061 and 6069 Aluminum and Alloys, Journal *of Materials Engineering and Performance*, Vol. 9(4), pp. 416–423, 2000.

[16] MURR, L. E., LIU, G., and MURR, L. E., A TEM Study of Precipitation and Related Microstructures in Friction-Stir-Welded 6061 Aluminium, *Journal of Materials Science*, Vol. 33(5), pp. 1243–1251, 1998.

[17] Khalid Rafi, H., Janaki Ram, G.D., Phanikumar, G., Prasad Rao, K., Microstructure and tensile properties of friction welded aluminum alloy AA7075-T6, *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 2375–2380, 2010.