

تأثیر سرعت چرخش ابزار در فرایند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) بر ناحیه متأثر

از کار مکانیکی - حرارتی آلومینیوم آلیاژی کار شده ۲۰۲۴

عبدالله لعل پور، مسعود مصلائی پور

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، پردیس فنی و مهندسی، دانشگاه یزد

علی اشرفی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۹/۰۸/۱۱ - پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷)

چکیده

فرایند اصطکاکی اغتشاشی روی ورق آلومینیوم آلیاژی ۲۰۲۴ با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر انجام شد. تغییر در شکل و اندازه دانه‌ها در منطقه متأثر از کار مکانیکی - حرارتی، وابستگی زیادی به متغیرهای اجرایی فرایند اصطکاکی اغتشاشی دارد. در این تحقیق اثر سرعت چرخش بر تغییرات ساختاری و خواص مکانیکی ایجاد شده در منطقه متأثر از کار مکانیکی - حرارتی، در سرعت پیشروی ثابت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد؛ در منطقه پیشرو با تغییر سرعت چرخش از ۳۱۵ دور بر دقیقه به ۵۰۰ دور بر دقیقه، اندازه دانه میانگین از ۷ میکرومتر به ۴ میکرومتر کاهش یافت و با افزایش سرعت چرخش ابزار از ۵۰۰ دور بر دقیقه به ۸۰۰ دور بر دقیقه، اندازه دانه از سه میکرومتر به ۷ میکرومتر افزایش یافت. همچنین در منطقه پسرو با افزایش سرعت چرخش ابزار از ۳۱۵ دور بر دقیقه به ۵۰۰ دور بر دقیقه، اندازه دانه میانگین از ۷ میکرومتر به ۴ میکرومتر کاهش یافت و با افزایش سرعت چرخش از ۵۰۰ دور بر دقیقه به ۸۰۰ دور بر دقیقه، اندازه دانه میانگین از چهار میکرومتر به هشت میکرومتر افزایش یافت. همچنین اندازه دانه میانگین منطقه پیشرو بیشتر از منطقه پسرو بود. خواص مکانیکی منطقه پسرو و پیشرو مشابه بود. واژه‌های کلیدی: فرایند اصطکاکی اغتشاشی، تبلور مجدد، منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی، منطقه پسرو، منطقه پیشرو.

Effect of FSP's Rotation Speed on Thermo-Mechanically Affected Zone of AA2024 Alloy

Abdollah Lalpour, Masoud Mosallae

Material Science group, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran

Ali Ashrafi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, 8415683111, Isfahan, Iran

(Received 1 November 2020, accepted 8 August 2021)

Abstract

Friction stir processing (FSP) was performed on a 2024 aluminum alloy sheet with a thickness of 2.5 mm. Determination of the parameters affecting on the microstructure is very important to investigate the grain size changes in Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ). In this study, were investigated the effect of tool rotation speed on the microstructure and mechanical properties of the areas around the stir zone when keeping the traverse speed constant. The average grain size in advancing side were decreased from 6 μ to 3 μ by increasing rotation speed from 315 to 500 rpm and were increased from 3 μ to 7 μ by increasing rotation speed from 500 to 800 rpm. The average grain size in retreating side were decreased from 7 μ to 4 μ by increasing rotation speed from 315 to 500 rpm and were increased from 4 μ to 8 μ by increasing rotation speed from 500 to 800 rpm. Also the advancing side's grain size was smaller than that of the retreatin side. The mechanical properties of advancing and retreating sides were semillar.

Keywords: Friction Stir Processing (FSP), Recrystallization, Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ), Advancing Side (AD), Retreating Side (RS).

E-mail of Corresponding author: ashrafi@cc.iut.ac.ir.

مقدمه

منطقه پیشرو^۴ و پسرو^۵ را ایجاد خواهد کرد که از نظر دانه بندی و خواص مکانیکی ممکن است متفاوت باشند. زحمتکش و همکاران، اختلاف بیشینه سختی دو منطقه پیشرو و پسرو را در حدود ۱۰ ویکرز گزارش کرده اند [۱۰]. تحقیقات دیگر نیز اختلاف خواص مکانیکی و خواص فیزیکی ناحیه پیشرو و پسرو را نشان می دهد [۱۱-۱۶]. تحقیقات اراما^۶ و همکاران نشان می دهد ناحیه پیشرو خواص مکانیکی ضعیف تری نسبت به ناحیه پسرو دارد [۱۷]. مدلسازی رفتار سیلان فلز زمینه حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی نشان می دهد که در منطقه پیشرو، جریان سیلان ماده بیشتر از منطقه پسرو خواهد بود [۱۸]. همچنین منطقه پیشرو مستعد بروز عیوب ساختاری و ایجاد حفرات است [۱۹]. افزایش سرعت پیشروی اختلاف خواص مکانیکی را بیشتر خواهد کرد. از این رو می بایست بهترین متغیر عملیاتی تعیین و اجرا گردند. همچنین افزایش سرعت پیشروی موجب ایجاد عیوب حفره ای و کانال خواهد شد. ایجاد این عیوب عموماً در منطقه پسرو خواهد بود. تحقیقات گسترده ای در زمینه تاثیر متغیرهای عملیاتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی منطقه اغتشاشی انجام شده است. انتخاب متغیرهای عملیاتی نظیر سرعت پیشروی و سرعت چرخش ابزار تاثیر بسیار مهمی بر ریزساختار و خواص متالورژیکی منطقه فرآوری دارد. تحقیقات نشان می دهد افزایش سرعت پیشروی تاثیری بر نیروی گشتاور اعمالی از جانب ابزار به فلز پایه ندارد. برای آلومینیوم آلیاژی ۲۵۲۴ این نیرو در بازه سرعت پیشروی ۱ الی ۴ میلیمتر بر ثانیه در بازه ۶۰ الی ۷۰ نیوتن متر خواهد بود. بر همین اساس انرژی تولید شده نیز ثابت و در حدود ۲۰۰۰ ژول است [۳]. با افزایش سرعت پیشروی، چگالی انرژی انتقال یافته به سطح کاهش خواهد یافت. با افزایش سرعت پیشروی از ۱/۲ میلیمتر بر

فرایند اصطکاکی - اغتشاشی را می توان به عنوان نوعی کار گرم در نظر گرفت که در خلال آن مقدار زیادی تغییر شکل از طریق گردش ابزار بر ماده تحت عملیات اعمال می شود. این تغییر شکل با خارج شدن از منطقه اغتشاشی به سمت منطقه تحت تأثیر مکانیکی - حرارتی، کاهش می یابد [۱]. حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی، دما در منطقه تماس بین و زمینه به بالای ۴۰۰ درجه سانتیگراد خواهد رسید [۲ و ۳]. ایجاد دمای بالا حین فرایند موجب ایجاد تغییرات ساختاری در منطقه اغتشاشی و مناطق اطراف خواهد شد. بر همین اساس سه منطقه اغتشاشی^۱، منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی^۲ و منطقه متأثر از حرارت^۳ را می توان از یکدیگر تمیز داد. در منطقه اغتشاشی دانه ها کاملاً هم محور و بدون جهت گیری ترجیحی خواهند بود. در منطقه متأثر از حرارت و کار مکانیکی، عموماً دانه ها در جهت اغتشاش انتقال یافته از منطقه فرآوری، دچار کشیدگی خواهند شد. همچنین امکان تشکیل دانه های تبلور مجدد یافته نیز وجود دارد. در منطقه متأثر از حرارت، شکل و جهت گیری دانه ها تغییر نخواهد کرد. در این ناحیه عمده تغییرات خواص، ناشی از تغییرات حرارتی است. لذا تحول های وابسته به دما نظیر فرایند سازی، آنیل جزئی و بازبایی امکان فعال شدن خواهند داشت [۴ و ۵].

با کنترل متغیرهای اثرگذار مانند سرعت چرخش، سرعت پیشروی و شکل ابزار، گرمای ورودی به ساختار تغییر خواهد کرد. با کاهش گرمای ورودی می توان به اندازه دانه ریزتر و خواص مکانیکی مطلوب تری دست یافت [۵-۸]. گرمای انتقال یافته به منطقه متأثر از اغتشاش و منطقه متأثر از حرارت، خواص مکانیکی را تغییر خواهد داد. درشت شدن رسوبات موجب کاهش سختی می شود [۹]. چرخش و حرکت بین در ناحیه متأثر از کار مکانیکی - حرارتی دو

⁴ Advancing Side (AD)

⁵ Retreating Side (RS)

⁶ Eramah

¹ Stirred Zone

² ThermoMechanically Affected Zone (TMAZ)

³ Heat Affected Zone (HAZ)

تحلیل قرار گیرد. لذا از بین متغیرهای حاکم بر فرایند اصطکاکی اغتشاشی، سرعت پیشروی ۱۶ میلیمتر بر دقیقه و سرعت چرخش ابزار متفاوت مورد توجه و ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش آزمایش ها

ورق های استفاده شده به ضخامت ۲/۵ میلیمتر و از جنس آلومینیوم کار شده AI2024-T3 با مشخصه فنی ASM QQ-A-250/4 است که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی ورق AI2024

عنصر شیمیایی	مس	منیزیم	منگنز	آهن	سیلیسیم	روی	آلومینیوم
درصد حجمی	۴/۵	۱/۳	۰/۵۴	۰/۲۴	۰/۰۹	۰/۱	بقیه

ورق ها در ابعاد ۳۰×۱۵ سانتی متر تهیه گردید. بعد از برشکاری، برای از بین بردن اثر آلودگی های سطحی و اثرات چربی، ورق ها ابتدا با محلول متیل اتیل کتون^۲ شستشو داده شد و آلودگی های سطحی حذف گردید. در هر مرحله انجام فرایند سرعت پیشروی ۶۳ میلیمتر بر دقیقه و سرعت های چرخش ابزار متفاوت انتخاب و اجرا شد. شرایط انجام آزمون به دقت مورد کنترل قرار گرفت.

ابزار از جنس فولاد HSS به قطر ۲۵ میلی متر، قطر پین ۴ میلی متر به شکل استوانه ساده و ارتفاع پین ۲ میلی متر تهیه شد. بعد از انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی سطح مقطع نمونه ها برای بررسی ریزساختار برش داده شده و آماده سازی شدند. سمباده زنی تا شماره ۲۴۰۰ انجام شد. جهت انجام پولیش و حکاکی، دو روش پولیش مکانیکی و حکاکی شیمیایی و روش پولیش و حکاکی الکتریکی انجام شد. در روش پولیش مکانیکی سطح با آلومینای ۰/۰۲ میکرومتر پرداخت شد. سپس نمونه ها با محلول کلر^۳

ثانیه به ۴/۲ میلیمتر بر ثانیه، انرژی وارد شده به سطح از ۱۴۰۰ ژول به کمتر از ۶۰۰ ژول خواهد رسید [۳]. لذا با افزایش سرعت پیشروی از ۱/۲ به ۴/۲ میلیمتر بر ثانیه، چگالی انرژی انتقال یافته حدود ۲/۵ برابر کاهش خواهد یافت [۳]. افزایش سرعت چرخش ابزار تاثیر مهمی بر نیروی گشتاور اعمال شده از جانب ابزار به فلز زمینه دارد. افزایش سرعت چرخش موجب کاهش نیروی گشتاور خواهد شد. در مورد آلومینیوم آلیاژی ۲۵۲۴ و سرعت پیشروی ۲ میلیمتر بر ثانیه، نیروی گشتاور در سرعت چرخش ۲۰۰ دور بر ثانیه حدود ۱۱۰ نیوتن متر است. در حالیکه با افزایش سرعت چرخش به ۸۰۰ دور بر دقیقه نیروی گشتاوری به حدود ۳۰ نیوتن متر تقلیل خواهد یافت. لذا شکل و خواص مکانیکی ناحیه متاثر از کار مکانیکی - حرارتی، بسیار متاثر از سرعت چرخش ابزار خواهد بود. منطقه متاثر از اغتشاش نسبت به منطقه اغتشاشی انرژی کمتری را تجربه می کند. لذا ممکن است انرژی انتقال یافته جهت تکمیل فرایند تبلور مجدد کافی نباشد و دانه هایی با تنش نهفته ایجاد گردد. در شرایط ویژه با دریافت انرژی فعال سازی حین جوشکاری یا عملیات حرارتی و ... دانه های دارای انرژی نهفته به طور غیر معمول رشد کرده و پدیده رشد غیرطبیعی^۱ را حاصل می کند [۲۰].

نظر به اهمیت بسزای ریزساختار بر خواص AI2024 از یکسو و تاثیر منطقه متاثر از حرارت و کار مکانیکی در خواص عملکردی نهایی منطقه فرآوری شده، در این پژوهش با استفاده از مطالعات ریزساختاری و خواص مکانیکی، تغییرات ایجاد شده در در منطقه پیشرو و پسرو در متغیرهای اجرایی حین فرایند و تاثیر آن بر ریزساختار مورد مطالعه و پژوهش واقع شد. در این مقاله سعی بر آن است که با ثابت نگه داشتن سرعت پیشروی، تاثیر سرعت چرخش ابزار بر مناطق پیشرو و پسرو مورد ارزیابی و

² Methyl Ethyl Ketone (MEK)

³ keller

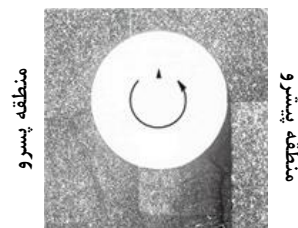
¹ Abnormal Grain Growth (AGG)

منطقه متاثر از حرارت و کار مکانیکی را می توان به دو منطقه پیشرو و منطقه پسرو (شکل ۱) تقسیم بندی نمود. در منطقه پیشرو سرعت موضعی حرکت ابزار و ورق بیشتر از سرعت موضعی حرکت ابزار و ورق در منطقه پسرو است. در نتیجه با تغییر سرعت موضعی، تغییرات ساختاری متفاوتی نیز ایجاد خواهد شد. سیلان مواد از سمت منطقه پسرو به سمت منطقه پیشرو است. علاوه بر آن اعمال نیرو به واسطه حرکت پین به جلو و اعمال نیرو به واسطه چرخش پین در منطقه پسرو بر خلاف همدیگر می باشد که اثرات یکدیگر را تعدیل می کنند. اما در منطقه پیشرو نیروی وارده از جانب پین به ورق آلومینیوم به واسطه حرکت رو به جلوی پین و نیروی حاصل از چرخش پین هم راستا بوده که اثرات همدیگر را تقویت می نمایند. لذا نیروی برشی شدیدی در منطقه پیشرو ایجاد می گردد که در صورت عدم کنترل، موجب عیوب ساختاری نیز خواهد شد [۲۲]. سیلان ماده در منطقه پیشرو بیشتر از منطقه پسرو است [۱۸]، لذا کرنش بالاتری نسبت به منطقه پسرو به ساختار اعمال می شود. دو عامل کرنش و سیلان بیشتر موجب می گردد که مرز مشخصی بین منطقه پیشرو و منطقه اغتشاشی ایجاد شود. شکل ۲ تغییرات دانه بندی مناطق متاثر کار مکانیکی را نشان می دهد. در منطقه پیشرو می توان مرز مشخصی بین منطقه اغتشاشی و منطقه متاثر از حرارت و کار مکانیکی مشخص نمود (شکل ۲- الف). با عبور از منطقه اغتشاشی به سمت فلز پایه ابتدا دانه ها در جهت اغتشاش ناشی از حرکت ابزار جهت گیری می کنند و سپس با فاصله گرفتن از منطقه اغتشاشی، جهت گیری دانه ها در طول ورق تغییر خواهد کرد. تغییرات دانه بندی در منطقه پسرو و پیشرو را می توان در شکل ۲- الف و ۲- ب مشاهده نمود. عرض منطقه متاثر از کار مکانیکی در منطقه پسرو بسیار بیشتر از منطقه پیشرو است. ناحیه متاثر از اغتشاش در معرض کرنش و گرمای انتقال یافته از منطقه اغتشاش است.

حکاکی شیمیایی گردید. در روش پولیش و حکاکی الکتریکی از محلول ۳۰٪ اسید نیتریک رقیق شده با متانول استفاده شد. ولتاژ اعمالی ۵ ولت و زمان ۱۲۰ ثانیه اجرا شد. دمای محلول حین فرایند بین ۱۵- الی ۲۰- درجه سانتیگراد تنظیم شد. بررسی های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری صورت پذیرفت. اندازه دانه ها به کمک نرم افزار ImageJ محاسبه گردید. همچنین به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان با ولتاژ اعمالی ۲۵ کیلو ولت، بررسی توزیع رسوبات در ریزساختار انجام شد. سپس مناطق مختلف فرآوری شده با آزمون میکروسختی با بار اعمالی ۱۰۰ گرم و زمان ننگه داشت اعمال بار یک دقیقه، مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفتند. در هر منطقه حداقل در ۱۰ نقطه آزمون ریزسختی سنجی انجام شد و بیشینه و کمینه عدد سختی در نمودار سختی گزارش گردید. خطای اندازه گیری عدد سختی حدود ۱۰ ویکرز است.

نتایج و بحث

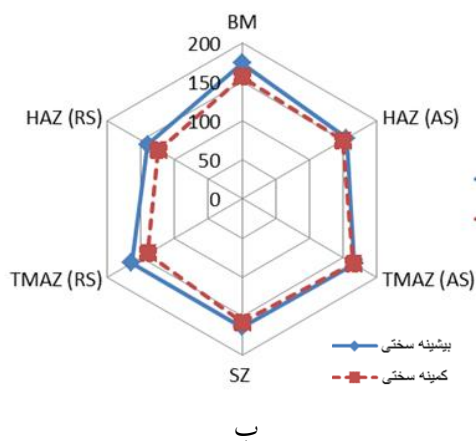
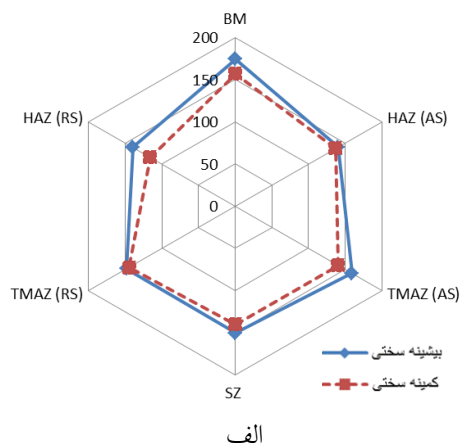
بررسی میکروسختی سنجی نشان می دهد؛ سختی در سطح مقطع نمونه قبل از عملیات اصطکاکی اغتشاشی متفاوت است. سختی در لایه های نزدیک سطح برابر ۱۵۴ ویکرز و در نیمه ضخامت نمونه به ۱۷۴ ویکرز می رسد. افزایش عدد سختی بیانگر نایکنواختی ساختار از منظر توزیع عدد اندازه دانه از سطح به عمق ورق است. کار مکانیکی اعمال شده به ورق کار شده به صورت غیر یکنواخت در عمق نمونه اعمال می شود. عموماً دانه های درشت تبلور مجدد یافته در سطح قطعه ایجاد می گردد [۲۱]. با افزایش ریزدانگی در نیمه ضخامت، سختی نیز افزایش یافته است.



شکل ۱. شماتیک مناطق مختلف حاصل از حرکت ابزار.

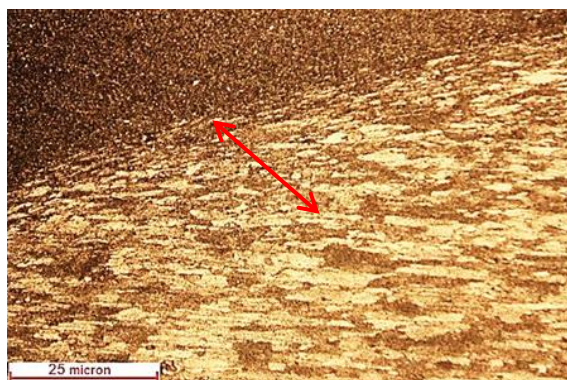
بیشتری بین منطقه اغتشاشی و فلز زمینه اتفاق خواهد افتاد [۲۳].

شکل ۳ نمودار میکروسختی مناطق مختلف فرآوری در سرعت چرخش متفاوت را نشان می‌دهد.

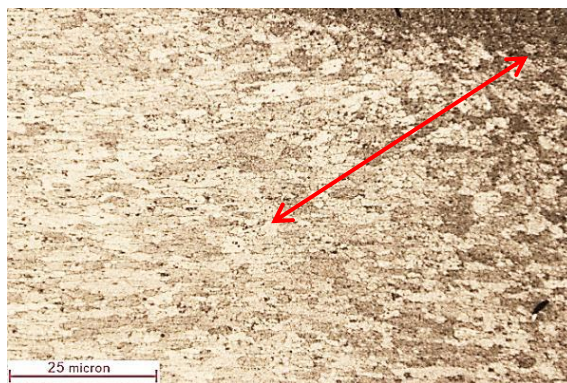


شکل ۳. نمودار میکروسختی سنجی مناطق مختلف اصطکاکی اغتشاشی در سرعت پیشروی ۶۳ میلی‌متر بر دقیقه، (الف) سرعت چرخش ۳۱۵ دور بر دقیقه، (ب) سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه.

در حالی که سختی یکسان باشد؛ شکل نمودار شش ضلعی متساوی الاضلاع است. جمع شدگی نمودار در منطقه متاثر از حرارت در دو نمودار ۳-الف و نمودار ۳-ب بیانگر کاهش سختی است. بررسی‌ها حاکی از اختلاف کم سختی در دو ناحیه پیشرو و پسرو منطقه متاثر از اغتشاش با سرعت چرخش متفاوت است. سختی در منطقه پسرو حدود ۱۰ ویکرز بیشتر از ناحیه پیشرو با سختی ۱۴۸ ویکرز برای نمونه با سرعت چرخش ابزار ۵۰۰ دور بر



الف

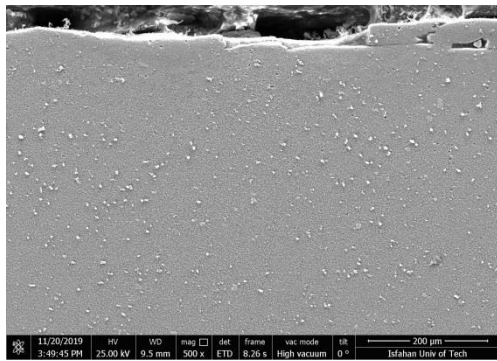


ب

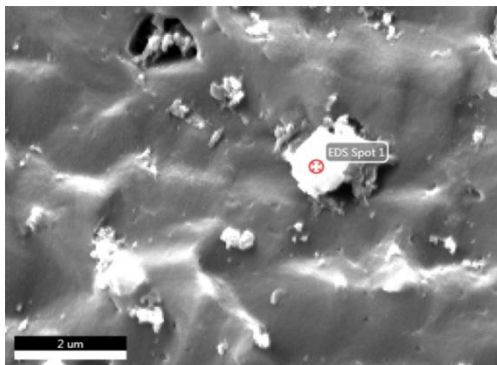
شکل ۲. ریزساختار میکروسکوپی منطقه متاثر از کار مکانیکی حرارتی، سرعت پیشروی ۶۳ میلی‌متر بر دقیقه و سرعت چرخش ۳۱۵ دور بر دقیقه، (الف) منطقه پیشرو، بزرگنمایی ۱۰۰ برابر. (ب) منطقه پسرو، بزرگنمایی ۱۰۰ برابر.

تحقیقات نشان می‌دهد؛ گرادیان دما در منطقه پسرو بیشتر از منطقه پیشرو است. البته اختلاف دمای ایجاد شده قابل ملاحظه نیست و تغییرات دمایی حدود ۵ درصد است [۳]. لذا عامل تاثیرگذار در عرض منطقه متاثر از اغتشاش و همچنین شکل دانه بندی در دو ناحیه پسرو و پیشرو ناشی از تفاوت در میزان نیروی برشی و میزان سیلان مواد انتقال یافته از منطقه اغتشاشی به این ناحیه است. تحقیقات خودیر^۱ و همکاران نشان می‌دهد؛ ریزساختار منطقه پیشرو و پسرو متفاوت است. در منطقه پیشرو، مرز مشخصی بین منطقه اغتشاشی و منطقه متاثر از اغتشاش وجود دارد. درحالی‌که تغییرات ساختاری در منطقه پسرو در محدوده

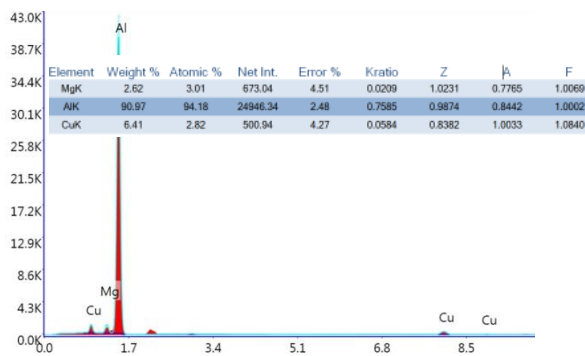
¹ Khodir



الف



ب



ج



د

شکل ۴. ریزساختار میکروسکوپی الکترونی منطقه تحت تاثیر اغتشاش، (الف) توزیع رسوبات، (ب) شکل رسوبات، (ج) ترکیب شیمیایی رسوبات، (د) موقعیت رسوبگذاری ثانویه.

دقیقه است (شکل ۳-ب). سختی فلز زمینه بین ۱۵۴ الی ۱۷۰ ویکرز است. می بایست توجه نمود که اعداد سختی اندازه گیری شده دارای حدود ۱۰ ویکرز خطای آزمون هستند. لذا می توان نتیجه گرفت که اختلاف سختی مناطق متأثر از اغتشاش و فلز زمینه بسیار کم است. با وجود آنکه نواحی اطراف منطقه اغتشاشی دارای دگرگونی های ساختاری شده اند؛ ولی از نظر خواص مکانیکی رفتار مشابهی از خود نشان می دهند و سختی تقریباً در محدوده سختی حالت عملیات حرارتی T3 قرار دارد.

شکل ۴- الف ریزساختار منطقه فرآوری شده را نشان می دهد. فاز ثانویه به صورت ذرات سفید رنگ، به صورت یکنواخت در کل سطح مقطع نمونه توزیع شده است. در شکل ۴- ب شکل رسوبات بعد از انجام عملیات اصطکاکی اغتشاشی نمایان است. اندازه ذره رسوبات به یک میکرومتر می رسد. آنالیز شیمیایی ذره نشان داده شده در شکل ۴- ب را می توان در شکل ۴- ج مشاهده نمود. آنالیز فلئوئورسانس پرتو ایکس ذرات نشان می دهد که این رسوبات غنی از عناصر مس و منیزیم است. مرکادو^۱ و همکاران نشان دادند این رسوبات شکل یافته حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی فاز Al_2CuMg است که تمایل دارند در مرز دانه ها رسوب گذاری کنند [۲۴]. شکل ۴- د مناطقی را نشان می دهد که رسوبات عملیات حرارتی پذیر در آنجا تشکیل شده اند. تغییرات خواص مکانیکی ایجاد شده تابع دو متغیر اندازه دانه و توزیع رسوبات عملیات حرارتی پذیر است. تقابل این دو متغیر، سختی نهایی را شکل خواهد داد [۲۵]. کرنش بالا موجب تغییر در شکل و توزیع فاز ثانویه خواهد شد. اغتشاش و اصطکاک اعمالی به ساختار طی فرایند تغییر شکل شدید، انرژی زیادی به رسوبات اعمال خواهد نمود.

¹ Mercado

از این رو شکل رسوبات غیر قابل انحلال از حالت تیغه‌ای و شکل‌های غیر کروی به سمت ریز شدن ذرات و کروی شدن رسوبات تغییر خواهد کرد [۲۶]. بنابراین می‌توان انتظار داشت در مورد رسوبات عملیات حرارتی پذیر، با اعمال اغتشاش و همچنین ایجاد گرما به بیش از دمای انحلال رسوبات، رسوبات غنی از فلزات مس و منیزیم در زمینه آلومینیوم انحلال یابند. با عبور پین از منطقه فرآوری و کاهش دما به زیر دمای انحلال رسوبات، شرایط برای جوانه‌زنی و تشکیل رسوبات فراهم می‌گردد. رسوبات عملیات حرارتی پذیر با افزایش دما و کرنش وارده تمایل به انحلال دارند [۲۷]. مناطق پر انرژی شرایط را برای انحلال رسوبات فراهم می‌سازد. همچنین رسوبات تمایل دارند با به هم پیوستن بتوانند انرژی سطحی خود را کاهش دهند [۲۸]. مرزخانه‌ها یکی از مکان‌های پر انرژی هستند. کاهش اندازه دانه در منطقه متاثر از حرارت و کار مکانیکی، این امکان را برای رسوبات فراهم می‌سازد که در مرزخانه‌ها تجمع و رشد کنند [۲۲]. ریز شدن دانه‌ها و ایجاد شبکه گسترده مرزخانه‌ای، این موقعیت را برای رسوبات فراهم می‌سازد تا بجای آنکه در داخل دانه رسوب‌گذاری نمایند در مرزخانه‌ها تشکیل شوند (شکل ۴-د). خروج رسوبات از داخل دانه به مرز دانه دو اثر را در پی خواهد داشت. اثر اول مربوط به سختی و استحکام نهایی منطقه فرآوری است. انجام عملیات حرارتی T3 بر آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ موجب تشکیل رسوبات ریز و پراکنده غنی از مس در داخل دانه می‌شود که این امر استحکام و سختی را افزایش خواهد داد. حال با انجام تغییر شکل شدید و ریز شدن دانه، این رسوبات از حالت ریز و پراکنده خارج می‌شود و به صورت رسوبات درشت‌تر و یا به صورت رسوب‌گذاری در مرزخانه‌ها نمایان می‌گردند (شکل ۴-د). درشت شدن رسوبات را می‌توان مشابه شرایط بوجود آمده در حالت پیرسختی اضافه تصور نمود. در نتیجه به واسطه خروج رسوبات از داخل دانه و یا درشت شدن رسوبات، سختی و استحکام کاهش خواهد یافت. اگر در سختی نهایی تنها اثر

رسوبات در نظر گرفته شود می‌بایست سختی منطقه متاثر از اغتشاش کاهش داشته باشد و به سختی حالت آنیل آلومینیوم آلیاژی ۲۰۲۴ نزدیک باشد. در حالیکه سختی، کاهش محسوسی نداشته است. این موضوع مربوط به اثر ریزدانه‌ریزی است. طبق رابطه هال-پچ با کاهش اندازه دانه، سختی و استحکام افزایش خواهد یافت. از آنجایی که این رابطه برای ساختارهای تغییر فرم شدید یافته آلیاژهای آلومینیوم نیز صادق است [۲۹]؛ می‌توان انتظار داشت با کاهش اندازه دانه در منطقه پسر و پیشرو، سختی نیز افزایش یابد. ولی این افزایش سختی در تقابل با کاهش سختی ناشی از حذف رسوبات غنی از مس از داخل دانه به مرزخانه‌ها و یا درشت شدن رسوبات است. با عبور از مناطق متاثر از اغتشاش، شکل ریزساختار کاملاً مشابه فلز زمینه خواهد بود. ناحیه متاثر از حرارت تنها در معرض حرارت انتقال یافته از منطقه اغتشاش قرار دارد. تغییر در آرایش رسوبات در منطقه متاثر حرارتی باعث افت سختی می‌گردد. میزان حرارت انتقال یافته به اندازه ای نیست که بتواند فرایند پیرسختی اضافه را کامل کند و سختی کاهش چشمگیری داشته باشد. سختی در منطقه متاثر از حرارت بین ۱۰۰ الی ۱۲۰ ویکرز است (شکل ۳-ب). با توجه به آنکه سختی در حالت آنیل حدود ۵۰ ویکرز و در حالت فرایرسازی حدود ۸۰ ویکرز است [۳۰]؛ می‌توان نتیجه گرفت که فرای پیرسختی کامل نشده و سختی منطقه متاثر از حرارت بین سختی حالت عملیات حرارتی و حالت فرای پیرسازی قرار دارد.

شکل ۵ ریزساختار منطقه متاثر از اغتشاش را در حالت سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد. شکل ۵-الف منطقه پیشرو را نشان می‌دهد. کشیدگی دانه‌ها در جهت کرنش اعمالی کاملاً مشهود است. در این منطقه نمی‌توان مرز مشخصی بین ناحیه اغتشاشی و ناحیه متاثر از اغتشاش مشخص نمود. دانه‌های تبلور مجدد یافته قابل مشاهده است. شکل ۵-ب ناحیه متاثر از اغتشاش در منطقه پسر و را نشان می‌دهد. در این منطقه دانه‌های تبلور مجدد

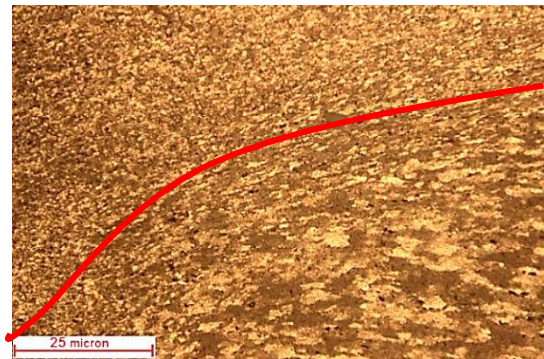
شکل ۵-ب این تفاوت را نشان می‌دهد. شکل ۶ اندازه دانه منطقه پیشرو متاثر از اغتشاش در سه حالت مختلف چرخش ابزار ۳۱۵، ۵۰۰ و ۸۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. اندازه دانه میانگین در حالت سرعت چرخش ۳۱۵ دور بر دقیقه حدود ۶ میکرومتر است. با افزایش سرعت دوران به ۵۰۰ دور بر دقیقه، اندازه دانه میانگین کاهش یافته و به حدود ۳ میکرومتر خواهد رسید. در سرعت چرخش ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه، اندازه دانه میانگین حدود ۷ میکرومتر است. با مقایسه شکل ۶-الف و شکل ۶-ب مشخص است که میزان تشکیل دانه های هم محور با افزایش سرعت چرخش قابل ملاحظه‌ای یافته است. در ناحیه پیشرو تغییرات ساختاری تابعی از سیلان مواد اطراف پین و اغتشاش ناشی از آن و همچنین گرمای انتقال یافته از منطقه اغتشاشی است. طبق رابطه فریگاد^۱ [۳۱] افزایش سرعت چرخش باعث افزایش گرمای ورودی به ساختار خواهد شد.

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{\left(\frac{4}{3}\pi^2\mu PR^3\right)\omega_1}{\left(\frac{4}{3}\pi^2\mu PR^3\right)\omega_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{315}{500} = 0.63$$

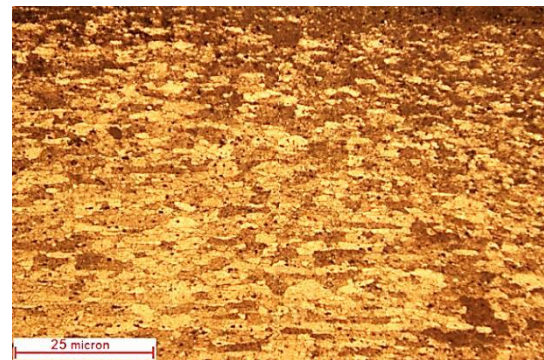
$$\frac{q_1}{q_3} = \frac{315}{800} = 0.39$$

در رابطه μ ضریب اصطکاک، P فشار بر حسب پاسگال، ω سرعت چرخش بر حسب دور بر ثانیه و R شعاع ابزار بر حسب متر است. q_1 گرمای ورودی به زمینه در سرعت چرخش ابزار ۳۱۵ دور بر دقیقه، q_2 گرمای ورودی در سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه و q_3 گرمای ورودی در سرعت چرخش ۸۰۰ دور بر دقیقه است. با افزایش سرعت چرخش از ۳۱۵ به ۸۰۰ دور بر دقیقه گرمای ورودی حدود ۵۹ درصد افزایش می‌یابد. افزایش گرمای ورودی به منطقه متاثر اغتشاش شرایط برای افزایش تحول تبلور مجدد و رشد دانه را فراهم آورده و موجب افزایش چگالی دانه‌های هم محور می‌گردد. در فرایند اصطکاکی اغتشاشی، فرایند

یافته تشکیل شده است. همچنین نمی‌توان مرز مشخصی بین ناحیه اغتشاشی و ناحیه متاثر از اغتشاش تعیین نمود. با افزایش سرعت چرخش ابزار از ۳۱۵ به ۵۰۰ دور بر دقیقه، شکل ناحیه متاثر از اغتشاش تغییر خواهد کرد.



الف



ب

شکل ۵. ریزساختار میکروسکوپی منطقه متاثر اغتشاش، سرعت

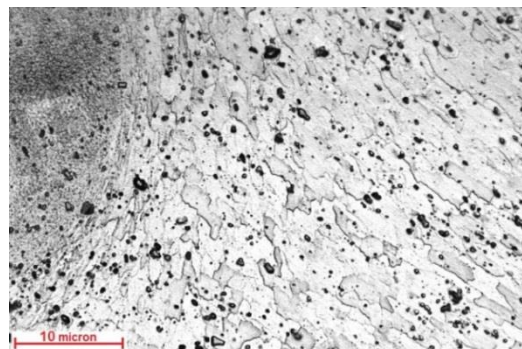
پیشروی ۶۳ میلی متر بر دقیقه و سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه، الف) ناحیه پیشرو، بزرگنمایی ۱۰۰ برابر، ب) ناحیه پسرو، بزرگنمایی ۱۰۰ برابر.

مقایسه شکل ۲-الف و شکل ۵-الف نشان می‌دهد که با افزایش سرعت چرخش، شکل منطقه پیشرو دگرگون خواهد شد. این تغییر از دو جنبه قابل بررسی است. اول آنکه با افزایش سرعت چرخش ابزار، مرز ناحیه اغتشاشی و متاثر اغتشاش تعدیل می‌گردد، به گونه‌ای که در نمونه با سرعت چرخش بالاتر خط مرز مشخصی بین ناحیه اغتشاش و ناحیه متاثر از اغتشاش نمی‌توان تعیین نمود. دومین تغییر در رابطه با تفاوت اندازه دانه منطقه متاثر از اغتشاش با تغییر سرعت چرخش ابزار است. مقایسه شکل ۲-الف با شکل ۵-الف و همچنین مقایسه شکل ۲-ب و

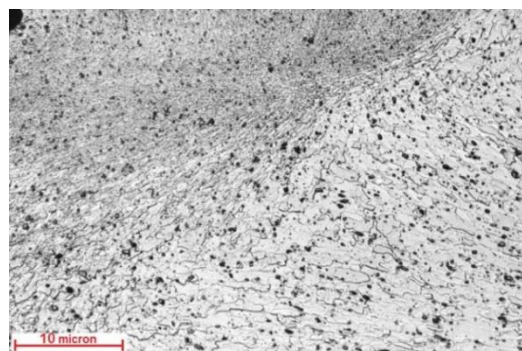
¹ Frigaad

چرخش از ۳۱۵ دور بر دقیقه به ۵۰۰ دور بر دقیقه حدود ۳۷ درصد گرمای ورودی به ساختار حین فرایند افزایش یافته است. می‌توان انتظار داشت که با افزایش گرمای ورودی به زمینه، مکانیزم تبلور مجدد افزایش یابد و به همین دلیل اندازه دانه ریزتری در سرعت چرخش ابزار ۵۰۰ دور بر دقیقه نسبت به سرعت چرخش ۳۱۵ دور بر دقیقه حاصل شده است. با افزایش سرعت چرخش ابزار به ۸۰۰ دور بر دقیقه، گرمای انتقال یافته به ساختار بیشتر شده است. افزایش گرمای ورودی به ساختار، امکان فعال شدن مکانیزم رشد دانه‌ها را فراهم می‌سازد [۲۷]. لذا می‌توان انتظار داشت با افزایش فرایند رشد دانه‌ها، اندازه دانه در نمونه با سرعت چرخش ابزار ۸۰۰ دور بر دقیقه، بزرگتر از نمونه با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه باشد. بررسی ریزساختاری نیز نشان می‌دهد اندازه دانه در نمونه با سرعت چرخش ۸۰۰ دور بر دقیقه حدود ۴ میکرومتر بیشتر از اندازه دانه منطقه پیشرو با سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه است. سختی نمونه با افزایش سرعت چرخش افزایش یافته است به گونه‌ای که سختی منطقه پیشرو در نمونه با سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه بین ۱۶۴ ویکرز در منطقه نزدیک اغتشاش شروع و به ۱۴۰ ویکرز خواهد رسید. افزایش سرعت چرخش، سختی در منطقه متاثر حرارت را تحت تاثیر قرار خواهد داد. افزایش گرمای ورودی به ساختار و به تبع آن افزایش گرمای ورودی به منطقه متاثر حرارتی موجب می‌شود تا سختی در منطقه متاثر حرارتی کاهش یابد. با مقایسه بیشینه سختی در دو نمونه اختلافی مشاهده نمی‌شود؛ لذا نتیجه می‌شود افت سختی بسیار خفیف بوده و سختی منطقه متاثر از حرارت با افزایش سرعت چرخش تقریباً ثابت باقی خواهد ماند. این موضوع نشان می‌دهد که هرچند با افزایش سرعت چرخش گرمای بیشتری ایجاد شده است، اما به دلیل سرعت بالای فرایند، زمان لازم جهت انجام فرایند پیرسختی فراهم نشده است. بر همین اساس علی‌رغم ایجاد نیرو محرکه بیشتر در نمونه با سرعت چرخش بالاتر، فرایند پیرسختی افزایش

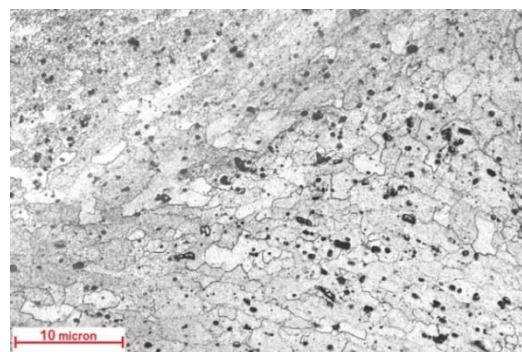
تبلور مجدد دینامیکی و تبلور مجدد گرمایی همزمان فعال خواهد شد [۳۲].



الف



ب



ج

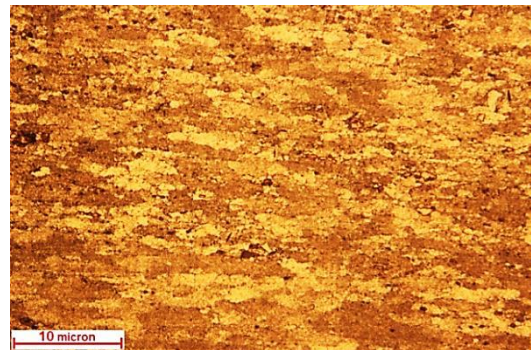
شکل ۶. ریزساختار منطقه متاثر از اغتشاش ناحیه پیشرو در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر، الف) سرعت چرخش ۳۱۵ دور بر دقیقه، ب) سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه، ج). سرعت چرخش ۸۰۰ دور بر دقیقه.

در منطقه اغتشاشی به دلیل تجربه بالای کرنشی، فرایند تبلور مجدد دینامیکی پدیده غالب خواهد بود و در منطقه متاثر از اغتشاش فرایند تبلور مجدد حرارتی غالب است. لذا تغییر در سرعت چرخش ابزار تاثیر بسیار مهمی در اندازه دانه منطقه متاثر از حرارت خواهد داشت. با افزایش سرعت

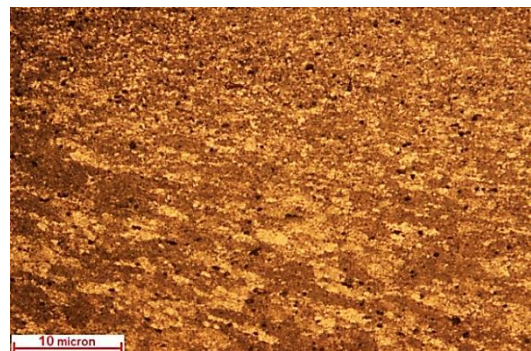
است. مناطقی نیز با دانه‌های هم محور قابل مشاهده است. اندازه دانه میانگین حدود ۷ میکرومتر محاسبه شد. شکل ۷-ب ریزساختار نمونه با سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه را نمایش می‌دهد. در این شکل، دانه‌های هم محور و ریزدانه مشاهده می‌شود. البته مناطقی نیز وجود دارد که کشیدگی دانه‌ها کاملاً مشهود است. اندازه دانه میانگین حدود ۴ میکرومتر محاسبه شد. شکل ۷-ج مربوط به ریزساختار سرعت چرخش ۸۰۰ دور بر دقیقه است. از مشخصه این منطقه دانه‌های هم محور و رشد یافته است. اندازه دانه‌ها رشد یافته به اندازه میانگین حدود ۸ میکرومتر رسیده است. با افزایش سرعت چرخش ابزار و به تبع آن انرژی ورودی بیشتر به زمینه، فرایند تبلور مجدد و رشد دانه‌ها بیشتر فعال شده است. بررسی‌های میکروسختی دو نمونه با سرعت چرخش ۳۱۵ دور بر دقیقه و ۵۰۰ دور بر دقیقه نیز حاکی از افزایش خفیف عدد سختی در نمونه با سرعت چرخش بالاتر است که بیانگر کاهش میانگین اندازه دانه نمونه با سرعت چرخش بالاتر است. افزایش سرعت چرخش ابزار از ۵۰۰ دور بر دقیقه به ۸۰۰ دور بر دقیقه موجب افزایش اندازه دانه منطقه پسر و پیشرو خواهد شد. این موضوع با مقایسه شکل ۵-ب و ۵-ج و همچنین مقایسه شکل ۷-ب و ۷-ج کاملاً نمایان است. با افزایش سرعت چرخش ابزار، دانه‌ها رشد قابل توجهی یافته‌اند. افزایش سرعت چرخش، گرمای بیشتری به ساختار اعمال می‌کند که موجب فعال شدن مکانیزم رشد دانه می‌گردد. دانه‌های تبلور مجدد یافته رشد نموده و باعث افزایش عدد اندازه دانه می‌شود.

شکل ۸ تغییرات اندازه دانه را با افزایش سرعت چرخش ابزار در دو منطقه پیشرو و پسر نشان می‌دهد. اندازه دانه میانگین منطقه پیشرو کمتر از منطقه پسر است و این موضوع در سرعت‌های مختلف چرخش ابزار صادق است. شکل ۸-الف و ۸-ب نشان می‌دهد؛ با افزایش سرعت چرخش ابزار، ابتدا اندازه دانه کاهش خواهد یافت و سپس اندازه دانه رشد خواهد داشت.

قابل ملاحظه‌ای نداشته است. لذا می‌توان انتظار داشت که میزان پیرسختی اضافه در دو نمونه مشابه باشد. شکل ۷ ریزساختار منطقه پسر و متاثر از اغتشاش سه نمونه با سرعت چرخش ابزار متفاوت را نشان می‌دهد.



الف



ب



ج

شکل ۷. ریزساختار منطقه متاثر از اغتشاش ناحیه پسر و بزرگنمایی ۲۰۰ برابر، الف) نمونه با سرعت چرخش ۳۱۵ دور بر دقیقه، ب) نمونه با سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه، ج) نمونه با سرعت چرخش ۸۰۰ دور بر دقیقه.

شکل ۷-الف ریزساختار با سرعت دوران ۳۱۵ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. در تصویر کشیدگی دانه‌ها مشخص

داشت. منطقه پیشرو کرنش بالاتری نسبت به منطقه پسرو تجربه می‌کند. این عامل می‌تواند دلیل اندازه دانه کوچکتر در منطقه پسرو نسبت به منطقه پیشرو باشد. تحقیقات نشان می‌دهد؛ افزایش سرعت پیشروی موجب تغییرات خواص مکانیکی ناحیه پیشرو و پسرو می‌شود و با افزایش سرعت پیشروی ابتدا خواص مکانیکی بهبود یافته و سپس کاهش می‌یابد [۳۳]. این نتیجه با نتایج حاصل شده در پژوهش اخیر همخوانی دارد. لذا می‌توان انتظار داشت که تاثیر افزایش سرعت چرخش ابزار با افزایش سرعت پیشروی ابزار مشابه است.

نتیجه گیری

- در سرعت چرخش ۳۱۵ دور بر دقیقه مرز مشخصی بین منطقه اغتشاشی و متاثر از اغتشاش ناحیه پیشرو می‌توان تعیین کرد.

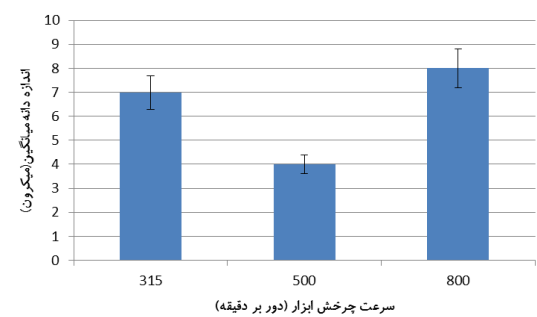
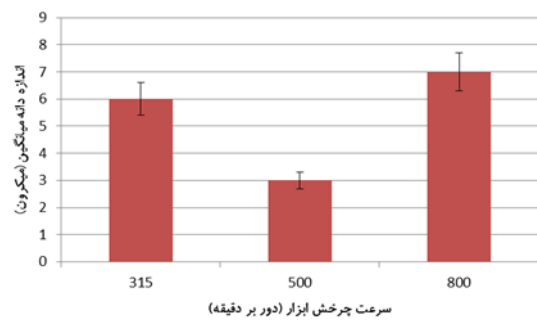
- با افزایش سرعت چرخش از ۳۱۵ به ۵۰۰ دور بر دقیقه نمی‌توان مرز مشخصی بین ناحیه اغتشاشی و ناحیه متاثر از اغتشاش تعیین نمود و تغییرات اندازه و شکل دانه‌ها در بازه مکانی بیشتری اتفاق خواهد افتاد.

- اندازه دانه میانگین منطقه متاثر از اغتشاش با افزایش سرعت چرخش ابتدا کاهش می‌یابد و سپس دانه‌ها درشت خواهند شد.

- اندازه دانه میانگین منطقه پیشرو کوچکتر از منطقه پسرو است.

منابع و مراجع

1. C. B. Smith, R. S. Mishra, *Friction Stir Processing for Enhanced Low Temperature Formability*, 1st Ed., Elsevier, United Kingdom, (2014) 7-12.
2. Z.Y. Ma, S.R. Sharma, R.S. Mishra and M.W. Mahoney, *Microstructural modification of cast aluminum alloys via friction stir processing*, Materials Science Forum 426-432 (2003) 2891-2896.
3. A. Arora, R. Nandan, A.P. Reynolds and T. DebRoy, *Torque, power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through*



شکل ۸. میانگین اندازه دانه منطقه متاثر از اغتشاش با سرعت پیشروی ۶۳ میلیمتر بر دقیقه و سرعت چرخش متفاوت، (الف) منطقه پیشرو، (ب) منطقه پسرو.

با افزایش سرعت چرخش ابزار، گرمای ورودی به ساختار افزایش خواهد یافت. علاوه بر آن مکانیزم انحلال و رسوب گذاری رسوبات عملیات حرارتی پذیر نیز تحت تاثیر قرار خواهد گرفت. با افزایش سرعت چرخش نرخ انحلال رسوبات افزایش می‌یابد. رسوبات انحلال یافته با تجمع در مرزدانه‌ها از رشد مرزدانه جلوگیری می‌نماید. بر همین اساس نمونه با سرعت چرخش ۵۰۰ دور بر دقیقه، اندازه دانه کوچکتری نسبت به نمونه با سرعت چرخش ۳۱۵ دور بر دقیقه خواهد داشت. از طرفی با افزایش سرعت چرخش به ۸۰۰ دور بر دقیقه، فرایند درشت شدن رسوبات فعال شده و مرزدانه‌ها از قدرت حرکت بیشتری برخوردار خواهند بود. با افزایش سرعت دوران و به تبع آن افزایش گرمای تولید شده، دانه‌ها تمایل به رشد بیشتری خواهند داشت. لذا اندازه دانه نمونه با سرعت دوران ۸۰۰ دور بر دقیقه بالاترین اندازه دانه را نسبت به دو نمونه دیگر خواهد

- Grant, *Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds*, Materials Processing Technology 211 (2011) 972–977.
16. S.S. Nene, S. Gupta, C. Morphey, R.S. Mishra, *Friction stir butt welding of a high strength Al-7050 alloy with a metastable transformative high entropy alloy*, Materialia (2020).
17. A. M. Eramah, M. P. Rakin, D. M. Veljic, S. S. Tadic, N. A. Radovic, M. M. Zrilic, M. M. Perovic, *Influence Of Friction Stir Welding Parameters On Properties Of 2024 T3 Aluminium Alloy Joints*, thermal science 18 (2014) 21-28.
18. W. U. Chuan-song, Z. Wen-bin, S. Lei, C. Maoai, *Visualization and simulation of plastic material flow in friction stir welding of 2024 aluminium alloy plates*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 22 (2012) 1445_1451.
19. B.C. Liechty, B.W. Webb, *Flow field characterization of friction stir processing using a particle-grid method*, journal of materials processing technology 208 (2008) 431–443.
20. I. Charit, R.S. Mishra, *Abnormal grain growth in friction stir processed alloys*, Scripta Materialia 58 (2008) 367–371.
21. I. J. Polmear, *Light Alloys From Traditional Alloys to Nanocrystals*, Fourth edition, 2006
22. A. Alhamidi, Z. Horita, *Grain refinement and high strain rate superplasticity in aluminium 2024 alloy processed by high pressure torsion*, Materials Science Engineering A 622 (2015) 139–145.
23. S. A. Khodir, S. Toshiya, *Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Similar and Dissimilar Joint of Al and Mg alloys*, Transactions of JWRI 36 (2007) 27-40.
24. U. Alfaro-Mercado, G. Biallas, *Incipient Melting and Corrosion Properties of Friction Stir Welded AA2024-T3 Joints*, 12th International Conference on Aluminium Alloys, September 5-9, Yokohama, Japan (2010) 978-983.
25. R. Abbasschian, L. Abbasschian, R. E. Reed-Hill, *Physical metallurgy Principles*, Cengage Learning, Fourth Edition, ISBN-10:0-495-08254-5 (2009) 651-684.
26. R.S.Mishra, Z.Y.MA, *Friction stir processing technology: a review*, Metallurgical modeling and experiments, Scripta Materialia 60 (2009) 13–16 .
4. J.Q.Su, T.W.Nelson and C.J.Sterling, *Microstructure evolution during FSW/FSP of highstrength aluminum alloys*, Materials Science and Engineering A 405 (2005) 277–286.
5. H. Mehdi, R.S. Mishra, *Effect of friction stir processing on mechanical properties and heat transfer of TIG welded joint of AA6061 and AA7075*, Defence Technology 17 (2021) 715-727.
6. R.S. Mishra and Z.Y. Ma, *Friction stir welding and processing*, Materials Science and Engineering R50 (2005) 1-78.
7. J.Q.Su, T.W.Nelson and C.J.Sterling, *Microstructure evolution during FSW/FSP of highstrength aluminum alloys*, Materials Science and Engineering A 405 (2005) 277–286.
8. R. S. Mishra, H. Sidhar, *Friction Stir Welding of 2XXX Aluminum Alloys Including Al-Li Alloys*, Butterworth-Heinemann ISBN: 978-0-12-805368-3 (2017) 18-37.
9. J.Q. Su, T.W. Nelson, R.S. Mishra and M. Mahoney, *Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium*, Acta Materialia 51 (2003) 713-729.
10. B. Zahmatkesh, M.H. Enayati, F. Karimzadeh, *Tribological and microstructural evaluation of friction stir processed Al2024 alloy*, Materials and Design 31 (2010) 4891–4896.
11. D. Guillemot G, *A review of microstructural changes occurring during FSW in aluminium alloys and their modelling*, Journal of Materials Processing Tech. (2020)
12. R. Miranda, *Surface modification by solid state processing*, Woodhead Publishing, ISBN : 978-0-85709-469-8, (2014).
13. M. Ghosh, K. Kumar, R.S. Mishra, *Friction stir lap welded advanced high strength steels: Microstructure and mechanical properties*, Materials Science and Engineering A 528 (2011) 8111– 8119.
14. H. Soleimani, K. Amini, F. Gharavi, *Influence of Tool Offset Distance on Microstructure and Mechanical Properties of the Dissimilar AA2024–AA7075 Plates Joined by Friction Stir Welding*, Advanced Design and Manufacturing Technology 13 (2020) 109-120.
15. W. Yuana, R.S. Mishra, S. Webba, Y.L. Chen, B. Carlson, D.R. Herling, G.J.

and Materials Transactions A 39 (2008) 642-658.

27. F.J. Humphreys, M. Hatherly, *Recrystallization And Related Annealing Phenomena*, Second Edition (2004) 451-466.

28. A. P. Zhilyaev, J.M. Garcia-Infanta, F. Carreno, T. G. Langdon and O. A. Ruano, *Particle and grain growth in an Al-Si alloy during high-pressure torsion*, Scripta Materialia 57 (2007) 763-765.

29. Piotr Bazarnik , Yi Huang , Malgorzata Lewandowska, Terence G. Langdon, *Structural impact on the Hall-Petch relationship in an Al-5Mg alloy processed by high-pressure torsion*, Materials Science & Engineering A 626 (2015) 9-15.

30. *AMS Handbook*, 2 (2006) 262-278

31. O.Frigaad, O.Grong and O.T.Midling, *A process model for friction stir welding of age hardening aluminium alloys*, Metall. Mater. TransA 32 (2001) 1189-1200.

32. J.Q.Su, T.W.Nelson and C.J.Sterling, *Microstructure evolution during FSW/FSP of highstrength aluminum alloys*, Materials Science and Engineering A 405 (2005) 277-286.

33. M. Milcic, D. Milcic, T. Vuherer, L. Radovic , I. Radisavljevic, A. Đuri, *Influence of Welding Speed on Fracture Toughness of Friction StirWelded AA2024-T351 Joints*, Materials 14 (2021) 1561.