# اثر تبرید حین فرایند اصطکاکی اغتشاشی(FSP) بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵

عبدالله لعل پور

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

خسرو فرمنش

عبدالرضا سلطاني يور

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی مالک اشتر

( دریافت مقاله ۹٤/۰۱/۳۰ ـ یذیرش مقاله : ۹۵/۰۳/۱۲

### چکیدہ

فرایند اصطکاکی اغتشاشی (FSP) کرنش بسیار بالایی را به ساختار اعمال می کند که باعث تغییر ساختار مواد خواهد شد. اغتشاش و گرمای تولید شده در اثر حرکت پین موجب تبلور مجدد و رشد دانهها می گردد. اعمال سرمایش در طی فرایند موجب جذب گرمای تولید شده می شود. اعمال شرایط خنک شوندگی، مکانیزم رشد دانهها را متوقف خواهد نمود؛ از این رو می توان به دانه بندی بسیار ریز دست یافت. ساختارهای با دانه بندی نانو توانایی بالایی در رسیدن به شرایط ابرمومسانی در دماهای پایین تر و یا در نرخهای کرنش بالاتر، از خود نشان می دهند. در تحقیق حاضر فرایند اصطکاکی اغتشاشی در شریط ابرمومسانی در دماهای پایین تر و یا در نرخهای کرنش بالاتر، از خود نشان می دهند. در تحقیق حاضر فرایند اصطکاکی اغتشاشی در شرایط بهینه خنک سازی جهت دستیابی به دانه بندی نانوساختار در ورق آلومینیوم آلیاژی ۲۰۰۷ در شرایط عملیات حرارتی T6 به کار گرفته اغتشاشی در شرایط بهینه خنک سازی جهت دستیابی به دانه بندی نانوساختار در ورق آلومینیوم آلیاژی ۲۰۰۷ در شرایط معلیات حرارتی T6 به کار گرفته شد. بدین منظور از شرایط بهینه خنک سازی جهت دستیابی به دانه بندی نانوساختار در ورق آلومینیوم آلیاژی ۲۰۰۷ در شرایط عملیات حرارتی T6 به کند گرفته شد. بدین منظور از شرایط تبرید حین فرایند در زیر و روی ورق، به کمک مخلوط آب، الکل، یخ، یخ خشک و نیتروژن مایع استفاده گردید. اعمال شرایط تبرید موز ن مایع استفاده گردید. اعمال شرایط تبرید موزن مایع استفاده گردید. اعمال شرایط تبرید مور ن ماین آغازین × 1 مرایط تبرید موز مای ماین آغازین به تا مرایط تبرید می در نرخ کرنش آغازین به در ایر این مرایط تبرید مورن مایع استفاده گردید. ایم شرایط تبرید مور می در نرخ کرنش آغازین به در مرایط تبرید موجب ریزدانه شدن ساختار شده و ایندازه دانه زیر ۲۰۰ نانو متر حاصل گردید. بیشینه ازدیاد طول شکست در نرخ کرنش آغازین به در مور مورن فرایند و می توان در شرایط کربردی و صنعتی نیز اعمال نمود. از این رو می توان فرایند اصطکاکی اغتشاشی در شرایط خنک شوندگی بهینه را بسیار موثر در دستیابی به شرایط ابرمومسان در نرخ های کرنش بالاتر دانست.

## Effect of Chilled FSP on the Microstructure and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy

A. Lalpour

Department of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University A. Soltani Pour Department of Mechanical Engineering, Malek- Ashtar University of Technology

Kh. Farmanesh

Department of Materials Engineering, Malek- Ashtar University of Technology (Received 19 April 2015, accepted 5 June 2016)

#### Abstract

The FSP can be used as a generic process to modify the microstructure, refine the grains and change the composition, at selective locations. During FSP, the material that flows around the tool undergoes extreme levels of plastic deformation, that causes recrystallization and grain growth mechanism and is why the solid state processing technique that causes superplasticity. The nano grained alloy exhibited superplasticity at relatively lower temperatures and/or higher strain rates. In this research, FSP and cooling condition was used to create a microstructure with nano grains in a 7075 Aluminum alloy. Using cooling conditions don't let grain growth, so can be achieved to nano grain structure. Cooling condition contains of alcohol, ice, dry ice and liquid nitrogen. Optimum ductility at an initial strain rate of  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  was obtained on the 500°C. Current results suggest that FSP and cooling system can be developed as a simple yet effective technique for producing microstructure amenable for superplasticity at high strain rates and/or lower temperatures.

Keywords: Sever plastic deformation(SPD), Recrystallization, Nano grain, Superplasticity.

E-mail of corresponding author: lalpour 2004 @yahoo.com.

مقدمه

۲۸

فرايند اصطكاكي اغتشاشي را مي توان شاخهاي از تغيير شکل شدید در نظر گرفت. در خلال فرایند، مقدار زیادی تغییر شکل از طریق گردش پین ابزار و شانه آن بر ماده تحت عملیات اعمال می شود. اعمال کرنش بیش از ٤٠ و نرخ کرنش حدود ۱۰ بر ثانیه موجب تغییرات ساختاری شدید و تشکیل مجدد دانهها خواهد شد[۱-۳]. ریزساختار منطقه اغتشاش شامل دانههای ریز و هممحوری است که طى مكانيزم تبلور مجدد ديناميكي ايجاد خواهند شد[٣و٤]. دانه بندی بعد از فرایند به مراتب از دانههای فلز پایه ریزتر است. این خاصیت منطقه اغتشاش باعث شده تا این روش به عنوان یک روش ترمومکانیکی جدید استفاده شود. ایجاد اغتشاش و اصطکاک ناشی از آن، گرمای زیادی تولید میکند. این گرما می تواند باعث درشت شدن دانه تحت مکانیزم رشد دانهها گردد[٥و٦]. از این رو تعیین شرایط بهینه برای ایجاد تبلور مجدد و جلوگیری از رشد دانهها بسیار اهمیت دارد.

با کنترل متغییرهای اثر گذار مانند سرعت چرخش، سرعت پیشروی و شکل ابزار، گرمای ورودی به ساختار در حین فرایند تغییر خواهد کرد. با کاهش گرمای ورودی می توان مکانیزم رشد دانهها را کاهش و یا متوقف نمود. در نتیجه ساختار دانه ریزتر شده و خواص مکانیکی مطلوب تری ایجاد کرد. تحقیقات نشان داده با اعمال شرایط تبرید اندازه دانه ۱۰۰ نانومتر را ایجاد نمود[۲]. همچنین انجام عملیات اصطکاکی اغتشاشی دانه بندی آلومینوم آلیاژی ۷۰۷۰ را به ۷ میکرومتر کاهش داده و در شرایط بهینه، ازدیاد طول حین شکست بالای ۵۰۰ درصد حاصل خواهدشد[۷].

ریزدانگی بالا موجب ایجاد خواص ابرمومسانی می میشود[۸]. برای دستیابی به شرایط ابرمومسانی می بایست ریزساختار سه شرط اساسی را دارا باشد: اول آنکه دانه بندی بسیار ریز باشد؛ دوم آنکه ساختار کاملا هم محور

باشد؛ سوم آنکه در صورت وجود فاز ثانویه، توزیع يكنواخت ذرات فاز ثانويه در زمينه لازم و اساسي است[۹و ۱۰]. دو مشخصه دما و نرخ کرنش آزمون در میزان تغيير طول شكست اثر بسيار مهمي دارند. تعيين دما و نرخ كرنش مناسب موجب مي گردد مكانيزم لغزش دانهها به نحو مطلوب فعال گردد. در نرخهای کرنش بالاتر و یا دمای آزمون پایینتر، لغزش دانهها فعال نمی شود. همچنین در نرخهای کرنش خیلی کم و یا دمای آزمون بالاتر، حرکت گروهی دانهها و ایجاد ترک وحفره موجب کاهش ازدیاد طول شکست می گردد[۲و۳]. بالا رفتن دمای آزمون این تهدید را به همراه دارد که مکانیزم رشد دانهها فعال شود. در ساختارهای به شدت ریزدانه، به دلیل انرژی سطحی بالای مرزدانهای، تمایل به رشد دانه بسیار زیاد است[۱۱]. برای انجام آزمون ابرمومسانی در شرایط آزمایشگاهی، معمولا از نمونه های با طول کمتر از ۷ میلی متر استفاده می شود. بر همین اساس زمان انجام آزمون به شکل قابل ملاحظهای کاهش مییابد. کاهش زمان آزمون، مکانیزم رشد دانهها را حداقل میکند که نتیجه آن ازدیاد طول شکست بالاتر است. اما در عمل میبایست شرایط ابرمومسان را برای هر نوع قطعه با ابعاد مختلف را فراهم نمود. از این رو در تحقیق حاظر سعی بر آن است؛ شرایط ابرمومسان برای نمونههای با طول ۳۲ میلیمتر حاصل شود. از این رو می توان انتظار داشت نتایج بدست آمده در شرایط کاربردی و صنعتی نیز کارایی مناسبی داشته باشد.

## مواد و روش آزمایشها

ورق،های استفاده شده از جنس آلومینیوم AI7075-T651 است که طبق استاندارد ASM دارای مشخصه فنی -QQ-A 250-12 میباشد. ورق به ابعاد ۹/۵×۱۰۰×۳۰۰ میلی متر تهیه گردید. بعد از برشکاری، برای از بین بردن اثر آلودگی های سطحی، ورق،ها اسیدشویی شده و آلودگی های سطحی

<sup>&#</sup>x27; Severe Plastic Deformation(SPD)

سمباده زنی با سمباده ۲۵۰۰، عملیات الکتروپولیش با محلول ۵۰ میلی لیتر اسید فسفریک، ۳۰ میلی لیتر اسید سولفریک و ۲۰ میلی لیتر اسید نیتریک در ولتاژ بین ۱۰ الی ۲٤ ولت انجام شد. نمونه ها با محلول keller به ترکیب شیمیایی ۱۰ میلی لیتر اسید فرمیک، ۱۵ میلی لیتر اسید کلریک، ۲۵ میلی لیتر اسید نیتریک و ۵۰ میلی لیتر آب تقطیر، حکاکی گردید. بررسیهای ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی FESEM-S4160 انجام شد. همچنین بررسی پراش پرتو ایکس صورت پذیرفت. بررسیهای ریزسختی سنجی به منظور تحلیل منطقه اغتشاشی انجام شد. جهت دستیابی به خواص ابرمومسان کشش گرم در دماهای ۱۰۰ الی ۵۰۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش ابتدایی <sup>1–</sup>ه <sup>2–</sup> 10<sup>–</sup> ۲۱ انجام شد و ازدیاد طول شکست تعیین گردید.

**نتایج و بحث** شکل۲ بیانگر ریزساختار قبل از انجام فرایند است. کشیدگی دانهها در جهت نورد کاملا مشهود است.



شکل۲. تصویر میکروسکوپی نوری قبل از فرایند.

برای بررسی اثر سیال خنک کننده دو نمونه با شرایط یکسان و تنها تفاوت در میزان خنک شوندگی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل۳ ریزساختار منطقه اغتشاشی نمونه بدون خنک شوندگی دیده می شود. حذف شد. سپس در محل هایی که می بایست پین وارد ورق شده و عملیات آغاز شود؛ سوراخهایی ایجاد گردید. این سوارخها به جهت جلوگیری از آسیب دیدگی پین در حین ورود به ورق و کاهش زمان انجام فرایند ایجاد شد. پین درون سوراخ ایجاد شده قرار می گیرد و با حرکت به جلو عملیات اصطکاکی اغتشاشی انجام می شود. شماتیک پین و ابعاد آن در شکل ۱ نشان داده شده است.



سرعت پیشروی و سرعت چرخش ابزار تعیین شد و شرایط انجام آزمون به دقت مورد کنترل قرار گرفت. در شرایط بهینه سرعت چرخش پین ۵۰۰ دور بر دقیقه و سرعت پیش روی ۱٦ میلی متر بر دقیقه و زاویه نشست پین بر ورق دو درجه انتخاب گردید. جهت بررسی اثر سرمایش بر ریزساختار و خواص نهایی ورق، از سیستم سرمایش حین فرایند استفاده شد. به دلیل ضخامت زیاد ورق، دو سیستم سرمایش از کف ورق و سرمایش هم زمان کف و سطح ورق طرحریزی و اجرا گردید. در سیستم سرمایش از کف، قالب مسی آبگرد ساخته شد. مایع با دمای ۱۵- درجه سانتیگراد از داخل مخزن آب، الکل، یخ و یخ خشک به داخل قالب مسی پمپاژ می شود. در سیستم سرمایش از سطح، در ابتدا مخلوط آب، الکل و یخ خشک و سپس خواهد شد.

بعد از انجام فرایند سطح مقطع نمونهها برای بررسی ریزساختار برش داده شده و آماده سازی شدند. بعد از



شکل۳. تصویر میکروسکوپی نوری منطقه اغتشاشی نمونه بدون شرایط تبریدی.

بررسی شکل ۲ و ۳ نشان میدهد؛ در اثر انجام فرایند ساختار کاملا تغییر کرده و دانهها از حالت جهت دار به دانههای کاملا هم محور تبدیل شدهاند و اندازه دانه نیز کاهش چشمگیری داشته است. بررسی شکل۳ با نرم افزارهای آنالیز تصویر ٔ اندازه دانه متوسط ٥ میکرومتر را نشان مي دهد. اعمال كرنش بالا به ساختار موجب افزايش عيوب كريستالي، از جمله چگالي نابجاييها ميشود. افزایش چگالی نابجاییها موجب ایجاد مرزهای فرعی و در نهایت مرزدانههای با زاویه عدم انطباق زیاد(بیش از ۱۵ الى ٢٠ درجه) خواهد شد. اين فرايند به مكانيزم شكست دانهها شناخته می شود. در فرایند تغییر فرم شدید، ایجاد كرنش بالا و شكست دانهها مكانيزم غالب است[١١ و١٢]. كرنش بالا در واقع نيرومحركه مكانيكي را به ساختار اعمال میکند که طی مکانیزم تبلور مجدد دینامیکی دانه های کاملا هم محور در ساختار ایجاد نماید[۱۲]. در اطراف پین گرمای بسیار زیادی ناشی از اصطکاک و اغتشاش شدید پین و ساختار آلومینیوم ایجاد میگردد که میتواند موجب بالا رفتن دمای ورق در منطقه فر آوری به بیش از ٤٠٠ درجه سانتیگراد شود[١٣]. افزایش دما نیرومحرکه لازم جهت مکانیزم رشد دانهها را فراهم مینماید. ساختارهای فوق ریز دانه به دلیل وجود مرز دانه زیاد، تمایل دارند طی مکانیزم

شده فرایند، برای فعال شدن مکانیزم رشد دانهها کافی است. برای جلوگیری از فعال شدن مکانیزم رشد دانهها، می بایست گرمای ایجاد شده، به نحو مناسب از ساختار خارج گردد. خروج گرما باید به میزانی باشد که انرژی لازم برای فعال شدن مکانیزمهای رشد دانه فراهم نگردد. در شرایط خنک کنندگی می توان مکانیزم رشد دانهها را کاهش داد. شکل ٤ دانه بندي منطقه فر آوري شده در شرايط تبريدي را نشان میدهد. کاهش شدید اندازه دانه حاصل شده نسبت به شکل۳ کاملا مشهود است. به نظر میرسد اندازه دانه حاصل از شرایط خنک شوندگی زیر ۱۰۰ نانومتر خواهد بود. این موضوع نشان میدهد آنقدر میزان کرنش در حین فرايند بالا است كه با وجود اعمال شرايط خنك كنندگي شديد، مكانيزم تبلور مجدد بطور كامل اتفاق افتاده است. البته ممكن است مكانيزم رشد دانهها نيز فعال شده باشد. ولی به دلیل ریزدانگی بسیار شدید در مرحله تبلور مجدد، ین اثر باعث تغییر شدید ریزساختار نهایی نشده باشد.

رشد دانهها، انرژی درونی خود را کاهش دهند. از این رو مکانیزمهای رشد دانه تشدید می شوند[۱۱]. گرمای ایجاد



شکل٤. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی منطقه اغتشاش یافته در بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر.

تحقیقات سو و همکاران نشان میدهد برای آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ تغییرات ساختاری در اثر تبلور مجدد پیوسته دینامیکی<sup>۲</sup> اتفاق میافتد. هنگام عبور پین و اغتشاش صورت گرفته، تبلور مجدد همزمان اتفاق خواهد افتاد[۲]. این

<sup>&</sup>lt;sup>\*</sup> continuous dynamic recrystallization(CDRX)

<sup>&#</sup>x27; Image analyzer

موضوع شرایط را برای استفاده سیال خنک کننده بسیار مناسب می کند. اگر تبلور مجدد ناپیوسته دینامیکی <sup>۱</sup> اتفاق میافتاد؛ با خروج گرما بعد از عبور پین، ساختار انرژی لازم برای تبلور مجدد را از دست می داد و ریزدانه شدن اتفاق نمی افتاد. فعال شدن مکانیزم تبلور مجدد پیوسته این امکان را فراهم می کند که حین عبور پین ریزدانگی بالا بدست آید و بعد از گذر پین بتوان با خارج کردن گرمای ایجاد شده، مکانیزم رشد دانه ها را متوقف کرد.

در شکل، الگوی تفرق نمونه اغتشاش یافته مشاهده می شود. یهن شدگی پیکها کاملا مشهود است. فازیابی الگوى تفرق نشان مىدهد رسوبات عمليات حرارتى پذير MgZn2 در ساختار تشکیل شدهاند. از آنجایی که تنها فازهایی توانایی ایجاد پیک در الگوی تفرق را دارند که درصد حجمی آن ها بیش از ٥ درصد باشد؛ می توان انتظار داشت که درصد فاز ثانویه تشکیل شده بیش از ٥ درصد است. كرنش بالا موجب تغيير در مورفولوژي و توزيع فاز ثانویه خواهد شد. اغتشاش و اصطکاک اعمالی به ساختار طی فرایند تغییر شکل شدید، انرژی زیادی به رسوبات اعمال خواهد نمود. از این رو شکل رسوبات غیر قابل انحلال از حالت تیغهای و شکل های غیر کروی به سمت ریز شدن ذرات و کروی شدن رسوبات تغییر خواهد نمود[18]. از این رو می توان انتظار داشت در مورد رسوبات عمليات حرارتي پذير، اعمال اغتشاش و همچنين ايجاد گرما به بیش از دمای انحلال رسوبات، رسوبات غنی از فلزات روی و منیزیوم 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 می گردد. از آنجایی که رسوبات تمایل دارند در مناطق با

انرژی بالاتر ایجاد شوند؛ تشکیل آنها در مرز دانهها در اولویت قرار دارد[۱۵]. دانهبندی بسیار ریز و ایجاد شبکه گسترده مرزدانهای این موقعیت را برای رسوبات فراهم می سازد؛ بجای آنکه در داخل دانه رسوبگذاری نمایند در مرزدانهها تشکیل شوند. خروج رسوبات از داخل دانه به مرز دانه دو اثر را در یی خواهد داشت.

اثر اول مربوط به سختی و استحکام نهایی منطقه فرآوری است. انجام عملیات حرارتی T6 بر آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ موجب تشکیل رسوبات ریز و پراکنده MgZn<sub>2</sub> در داخل دانه می شود که این امر استحکام و سختی را افزایش خواهد داد. حال با انجام تغییر شکل شدید و ریز شدن دانه، این رسوبات از داخل دانه خارج شده و در مرزدانه رسوب گذاری نمودهاند. در نتیجه به واسطه خروج رسوبات از داخل دانه، سختی و استحکام کاهش خواهد یافت. شکل7 پروفیل سختی منطقه اغتشاش یافته را نشان میدهد. اگر در سختی نهایی تنها اثر رسوبات در نظر گرفته شود مىبايست سختى منطقه اغتشاشي كاهش شديدي داشته باشد و به سختی حالت آنیل آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ نزدیک باشد. در حالیکه سختی منطقه فرآوری بالاتر است. این موضوع مربوط به اثر ریزدانگی شدید ریزساختار 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[١٦]؛ مي توان انتظار داشت با كاهش شديد دانه بندی در تحقیق حاظر، سختی نیز افزایش یافته است. ولی این افزایش سختی در تقابل با کاهش سختی ناشی از حذف رسويات MgZn<sub>2</sub>

' Hall-Petch

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> discontinuous dynamic recrystallization(DDRX)



شکل۵. الگوی تفرق منطقه اغتشاش یافته؛ (الف) زاویه روبش 20 از ۲۰ تا ۱۰۰ درجه؛ (ب) الگوی تفرق20 در زاویه ۸۷ درجه؛ (ج) الگوی تفرق20 در زاویه ۸۲ درجه؛ (د) الگوی تفرق20 در زاویه ۹۹ درجه.

از داخل دانه به مرزدانه است. استفاده از شرایط خنک شوندگی بر منطقه انتقال(منطقه تحت تاثیر حرارتی-مکانیکی<sup>۱</sup> و منطقه تحت تاثیر حرارت<sup>۲</sup>) تاثیر می گذارد و افت سختی بسیار کمی را ایجاد نموده است. در نمودارهای سختی بدون شرایط خنک شوندگی افت سختی شدیدی ناشی از درشت شدن رسوبات و تغییر ریزساختار اتفاق می افتد[۱۷].





با اعمال خنک شوندگی انتقال حرارت کمتری نیز به مناطق مجاور اعمال میشود؛ در نتیجه تغییرات ساختاری کمتری

اثر دوم خروج رسوبات از داخل دانه به مرز دانه، موجب کاهش انرژی مرزدانهها و در نتیجه کاهش فعالیت مرزدانه ای خواهد شد[۸۸]. این عامل جلوگیری کننده از رشد دانهها است. قفل شدن مرزدانهها اولا ریزدانگی بیشتر ساختار را در مقایسه با آلومینیوم خالص تغییر شکل شدید یافته نشان می دهد[۹۹]. دوما قفل شدن مرزدانهها شرایط را برای استفاده این نوع ساختارها را در دمای بالا مهیاتر می نماید. در تحقیق حاضر سعی بر آن است که شرایطی فراهم شود که بتوان در زمانهای بیشتری قطعه در دمای بالا، فرایند با کاهش شدید اندازه دانه، شرایط برای توزیع فرایند با کاهش شدید اندازه دانه، شرایط برای توزیع شکل ٥ب،ج،د مربوط به سه پیک انتهایی الگوی تفرق در

بنان بالاتر است. از روی پهن شدگی پیکهای الگوی بزرگنمایی بالاتر است. از روی پهن شدگی پیکهای الگوی تفرق می توان اندازه دانه منطقه اغتشاشی را تعیین کرد.

'Heat Affected Zone(HAZ)

ایجاد شده و در نهایت ساختار یک دست تری از نظر خواص مکانیکی حاصل خواهد شد.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Thermo Mechanically Affected Zone(TMAZ)

رابطه گسترش یافته هال- ویلیامسون<sup>۱</sup> توانایی خوبی برای تعیین اندازه دانه زیر ۱۰۰ نانومتر با تقریب مناسب دارد. رابطه۱ توسط هال- ویلیامسون برای بررسی اثر ریزدانگی و تنش داخلی معرفی شده است[۲].

 $B\cos\theta_{\rm B} = \frac{0.9\lambda}{d} + 2A\sqrt{\epsilon^2}\sin\theta_{\rm B} \qquad (1)$ 

از آنجایی که صفحات هم خانواده در اندیس های بالا کمتر است؛ برای بدست آمدن اندازه دانه، بهتر است از پیکهای با زاویه بزرگ استفاده گردد. سعی بر آن است که نمودار و برازش آن با محور عمودی مقدار d/d تعیین میشود. با تعیین این مقدار و داشتن طول موج پرتو ایکس، مقدار با تعیین این مقدار و داشتن طول موج پرتو ایکس، مقدار میتواند باشد. نتایج حاصل از تحقیقات نشان میدهد که اندازه دانه بهدست آمده از این روش کمی کمتر از اندازه دانه بهدست آمده از روش های بررسی میکروسکوپی الکترونی است که این اختلاف برای آلومینوم گروه ۷۰۰۰

برای محاسبه اندازه دانه حاصل از فرایند، الگوی پراش نمونه مورد تحلیل قرار گرفت. پیک های که بدین منظور انتخاب گردید چهار پیک آخر است. با توجه به تطبیق پیک فاز ثانویه با فلز پایه، پیک با زاویه **٦٥** درجه لحاظ نگردید؛ زیرا تطبیق پیکهای این دو فاز موجب ایجاد خطا در محاسبات می گردد و می بایست پیکهایی مد نظر قرار گیرد که تنها حاصل از پراش زمینه آلومینیوم باشد. برای محاسبه میزان پهن شدگی سه پیک با زاویه پراش ۸۸ و ۸۲ و درجه محاسبه گردید(شکل **٥**ب،ج،د). میزان پهن شدگی پیکها و همچنین دیگر محاسبات لازم برای رسم نمودار

'Hall-Williamson

 $B\cos\theta_B$  بر حسب  $B\sin\theta_B$  انجام شد. در شکل ۷ نیز نمودار برازش شده حاصل از رابطه ۱ آورده شده است. رابطه ۱ از دو بخش تشکیل شده است. بخش اندازه دانه و بخش تنش داخلی که بصورت معادله خط نمایان شده است. در این رابطه،  $^{2}A\sqrt{\epsilon^{2}}$  شیب خط است که وابسته به میزان تنش داخلی ساختار است و  $h^{0.9\lambda}$  عرض از مبدا است که اندازه دانه را مشخص میکند. طول موج اشعه ایکس مورد ستفاده ۱/۵٤ انگستروم است که مطابق با ۲۵ عنصر مس نانومتر خواهد بود که با توجه به مطالب گفته شده میتوان نانومتر خواهد بود که با توجه به مطالب گفته شده میتوان انتظار داشت؛ اندازه دانه واقعی کمتر از ۱۰۰ نانومتر است. مرزهای فرعی است[۲۰]. نتایج بدست آمده حاصل از بررسی میکروسکوپی الکترونی و پراش اشعه ایکس انطباق دارند.

شیب نمودار شکل۷ بیان گر تنش داخلی است. شیب کم نمودار حاکی از تنش داخلی باقی مانده کم در نمونه است. حین فرایند کرنش بالایی به نمونه اعمال شده و باعث شكست دانهها خواهد شد. مكانيزم اصلى ايجاد دانههاي عاری از تنش در مناطق پر تنش خواهد بود. از این رو می توان انتظار داشت که تنش های داخلی به کمترین مقدار خود رسیده باشد و باعث کاهش شیب نمودار شکل ۷ شود. برای دستیابی به خواص ابرمومسان باید ماده وارد خزش مرحله سوم شود. در دماهای بالا خزش کوبل فعال می گردد و امکان رسیدن به شرایط ابرمومسان فراهم می شود. مکانیزم غالب لغزش دانهها روى هم بر اساس نفوذ دماي بالا خواهد بود[٢٤]. در تحقیقات میشرا و همکاران فرایند اصطکاکی اغتشاشی بدون شرایط تبریدی، اندازه دانه متوسط ٤ میکرون را ایجاد می کند. این ساختار در شرایط نرخ کرنش 10<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> و دمای آزمون ٤٨٠ درجه سانتیگراد ازدیاد طول شکست ۱۲۵۰درصد حاصل می نماید[۱۷]. شکل ۸ نمودار

www.SID.ir

نمونه های کشش با ابعادی کمتر از ۷ میلی متر استفاده می شود. در این حالت می توان به ازدیاد طول شکست بسیار بالا دست یافت. دو اتفاق گفته شده می تواند گلوگاه اصلی در انتقال نتایج آزمایشگاهی به شرایط کارگاهی و صنعتی باشد. زیرا در شرایط صنعتی، عملا امکان ثابت نگه داشتن نرخ کرنش وجود ندارد. همچنین به دلیل ابعاد و اندازههای واقعى و شرايط عملياتي، جهت انجام عمليات شكل دهي، قطعه در زمان بیشتری تحت دمای بالا قرار خواهد گرفت. از این رو می بایست شرایطی را فراهم نمود تا در شرایط عملی ابرمومسانی حاصل گردد. بر همین اساس در تحقیق حاضر زمان انجام آزمون در حدود ۱۰ الی ۱۵ دقیقه طراحی گردید. این زمان برای اکثر فرایندهای شکل دهی صنعتی زمانی قابل اجرا خواهد بود. شکل۸ نشان میدهد ابرمومسانی حاصل گردیده است. در دمای ٤٠٠ و ٥٥٠ درجه سانتیگراد ازدیاد طول شکست کمتر از دمای ٥٠٠ درجه سانتیگراد است. این مسئله نشان میدهد توان حساسیت به نرخ کرنش در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد بیشتر از دمای ٤٠٠ و ٥٥٠ درجه سانتیگراد است. می توان نتیجه گرفت با توجه به شرایط رشد دانهها در دمای بالا، اندازه دانهها آنقدر كوچك مي باشند كه باز هم لغزش مرزدانهای فعال است و ابرمومسانی حاصل گردیده است.

تغییرات افزایش طول شکست بر حسب دمای آزمون را نشان میدهد. بیشترین ازدیاد طول شکست در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد به میزان ۸۸٤ درصد خواهد بود. هرچند که در شرایط تبریدی دانهبندی کوچکتر شده؛ ولی ابرمومسانی کاهش یافته است. این در حالی است که انتظار میرود با کوچک شدن بیشتر دانهها ابرمومسانی بیشتری حاصل گردد. اختلاف ابرمومسانی حاصل شده در این تحقیق و دیگر تحقیقات ناشی از دو اتفاق است. اتفاق اول به حداکثر ابرمومسانی از نرخ کرنش ثابت استفاده می شود. برای این منظور با افزایش طول نمونه طی آزمون کشش، سرعت حرکت فکها افزایش می یابد. این افزایش به گونه ای است که در نهایت نرخ کرنش ثابت بماند. اما در شرایط کاربردی و صنعتی عملا کنترلی روی کاهش سرعت حین عملیات شکل دهی نمی توان داشت.

اتفاق دوم مربوط زمان انجام آزمون است. همان گونه که گذشت با افزایش زمان ماندگاری نمونه در دمای بالا، امکان رشد دانههای بسیار ریز وجود دارد. در بیشتر کارهای آزمایشگاهی، برای جلوگیری از مکانیزم رشد دانهها، سعی میشود شرایط آزمون و نمونهسازی به گونهای طراحی شود که زمان انجام کشش گرم حداقل شود. به این منظور از



شکل۷. نمودار برازش شده از اطلاعات پراش پرتو ایکس نمونه فر آوری شده.

[1]. A. Dutta, I. Charit, L. B. Johannes, R. S. Mishra, *Deep cup forming by superplastic punch tretching of friction stir processed 7075 Al alloy*, Mate. Sci. Eng. A 395 (2005) 173–179.

[2]. J.Q.Su, T.W.Nelson and C.J.Sterling, *Microstructure evolution during FSW/FSP of high strength aluminum alloys*, Materials Science and Engineering A 405 (2005) 277–286.

[3]. J.Q. Su, T.W. Nelson, and C.J. Sterling, *Friction stir processing of large-area bulk UFG aluminum alloys*, Scripta Mater, 52(2005)135–140.

[4]. T. Srinivasa Rao, G. Madhusudhan Reddy, S. R. Koteswara Rao, *Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA7075–T651 aluminum alloy thick plates*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 25 (2015) 1770–1778.

[5]. R. S. Mishra, M. W. Mahoney, *Friction Stir Processing: A New Grain Refinement Technique in Commercial Alloys*, Materials Science Forum, 357-359 (2001) 507-514.

[6]. P. Cavaliere and A. Squillace, *High temperature deformation of friction stir processed* 7075 *aluminium alloy*, Materials Characterization 55 (2005) 136–142.



شکل ۸. نمودار ازدیاد طول شکست بر حسب دمای آزمون.

نتيجه گيرى

 انجام فرایند اصطکاکی اغتشاشی موجب تغییرات ساختاری در آلومینیوم آلیاژی ۷۰۷۵ می گردد. این فرایند در ورق با ضخامت ۱۰۰ میلی متر اجرا گردید و ساختار دانهها از حالت کشیده شده در جهت نورد به شکل کاملا هم محور تغییر کرده و تنش داخلی باقیمانده بسیار کمی در بررسیهای پراش پرتوایکس مشاهده گردید.

۲) اعمال شرایط تبرید حین فرایند با جذب گرمای تولید شده ناشی از چرخش پین و اغتشاش حاصل از آن، موجب کاهش مکانیزم رشد دانهها گردیده و اندازه دانه نهایی به زیر ۱۰۰ نانومتر کاهش یافته است.

۳) کاهش شدید اندازه دانهها موجب می گردد رسوب گذاری مجدد فاز ثانویه در مرزدانهها تسهیل گردد. ایجاد شبکه رسوبات مرزدانهای موجب کاهش سختی می گردد. تقابل این پدیده با اثر افزایش سختی ساختار به دلیل ریزدانگی شدید باعث ایجاد سختی مابین حالت آنیل کامل و حالت عملیات حرارتی T6 خواهد شد.

٤) در دمای ٥٠٠ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش آغازین × 1

www.SID.ir

۳٥

[7]. S.D. Ji, Y.Y. Jin, Y.M. Yue, S.S. Gao, Y.X. Huang, L. Wang, Effect of Temperature on Material Transfer Behavior at Different Stages of Friction Stir Welded 7075-T6 Aluminum Alloy, Mater. Sci. Technol. 29 (2013) 955-960.

[8]. T. Dieguez, A. Burgueño, H. Svoboda, Superplasticity of a Friction Stir Processed 7075-T651 aluminum alloy, Procedia Materials Science 1 (2012) 110 – 117.

[9]. T. Diegueza, A. Burgueñob, H. Svobodaa, *Superplasticity of a Friction Stir Processed* 7075-T651 Aluminum Alloy, Proc. Mate. Sci 1(2012)110-117.

[10]. Z. Ma, R. S. Mishra, *Friction Stir Superplasticity for Unitized Structures*, ISBN: (2014)978-0-12-420006-7

[11]. F. J. Humphreys, M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Elsevier 2(2004) ISBN:0080441645.

[12]. A. P. Zhilyaev, T. G. Langdon, Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications, Progress in Materials Science 53 (2008) 893–979.

[13]. C. M. Chen and R. Kovacevic, *Finite* element modeling of friction stir weldingthermal and thermomechanical analysis Machine Tools and Manufacture 43 (2003) 1319-1326.

[14]. 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.

[۱۵] دوید آپورتر، کنت ای ایسترلینگ، ترجمه: ابولقاسم دهقان، عباسعلی نظربلند، بابک هاشمی، دگرگونی فازها در فلزات و آلیاژها، انتشارات دانشگاه شیراز، ۱۳۸۲. [16]. P. Bazarnik , Y. Huang, M. Lewandowska, T. 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.

[17]. R. S. Mishra, Z. Y. Ma, *Friction stir* processing technology: a review, Metallurgical and Materials Transactions A, 39 (2008) 642-658.

[18]. Y.F. Shen, R.G. Guan, Z.Y. Zhao, R.D.K. Misra, Ultrafine-grained Al– 0.2Sc–0.1Zr alloy: The mechanistic contribution of nano-sized precipitates on grain refinement during the novel process of accumulative continuous extrusion, Acta Materialia 100 (2015) 247–255.

[19]. C. Xu, T.G. Langdon , *Threedimensional representations of hardness distributions after processing by highpressure torsion*, Materials Science and Engineering A 503 (2009) 71–74.

[20]. Y. H. Zhao, Y. T. Zhu, X. Z. Liao, Z. Horita, T. G. Langdon, *Influence of stacking fault energy on the minimum grain size achieved in severe plastic deformation*, Materials Science and Engineering A, 469 (2007) 22–26.

[21]. M. Cabibbo, E. Meccia, E. Evangelista, *TEM analysis of a friction stir-welded butt joint of Al–Si–Mg alloys*, Materials Chemistry and Physics, 81 (2003) 289-292.

[22]. L. Lityska, R. Braun, G. Staniek, C. Dalle Donne, J. Dutkiewicz, *TEM study of the microstructure evolution in a friction stir-welded AlCuMgAg alloy*, Materials Chemistry and Physics, 81 (2003) 293-295.

[23]. W. Y. Gan, Z. Zhou, H. Zhang, T. Peng, *Evolution of microstructure and hardness of aluminum after friction stir* 

*processing*, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 24(2014) 975–981.

[24]. A. Zhilyaev and A. *Pshenichnyuk, Superplasticity and grain boundaries in ultrafine-grained materials*, Cambridge International Science Publishing (2011).