بررسی و آموزش پدیده تبلور مجدد دینامیکی آلیاژ Al-Li-Cu-Zr(-Mg)

آرش رضایی[۱]، شهرام احمدی[۲]، علی شکوه فر[۳]

چکیده

در این پژوهش پدیده تبلور مجدد دینامیکی یک نمونه آلیاژ Al-Li در دماهای ۳۵۰°C و ۴۰۰°C بررسی شده است. نمونه های متفاوت آلیاژ به شکل گوه تهیه شده و در دماهای ۳۵۰°C و ۴۰۰°C نورد گرم شده اند. مقدار کاهش سطح مقطع در نمونه‌ها حداکثر ۷۰ درصد در نظر گرفته شد. بررسی نمونه های نورد شده در دماهای ۳۵۰°C و ۴۰۰°C نشان می دهد که متوسط قطر دانه ها از ۱۰۰ میکرومتر به کمتر از ۳۰ میکرومتر کاهش یافته و محدوده کرنش بحرانی شروع تبلور مجدد دینامیکی در این محدوده دمایی به ترتیب ۵۰ و ۴۰ درصد است.

واژه های کلیدی: تبلور مجدد دینامیکی، کرنش بحرانی، نورد گرم، ریز ساختار

۱– مقدمه

هدف اصلی از استفاده و توسعه آلیاژهای آلومینیم- لیتیم، کاهش وزن در سازه‌های هوایی است. به ازای افزودن هر یک درصد وزنی لیتیم به آلومینیم، ۳ درصد کاهش چگالی و ۶ درصد افزایش در مدول الاستیک ایجاد می‌شود. آلیاژهای آلومینیم- لیتیم از آلیاژهای استحکام بالا بوده و یکی از روش‌های شکل دهی این آلیاژها نورد گرم است [۱-۳].

تبلور مجدد دینامیکی یکی از فرآیندهای مهم علمی و صنعتی است که در هنگام کار گرم مانند نورد گرم رخ می‌دهد. این پدیده با تغییر ریزساختار و کاهش اندازه دانه باعث بهبود خواص مکانیکی می‌گردد، تغییرهای ریزساختاری به روش متالوگرافی امکان پذیر است[۴].

در پدیده تبلور مجدد دینامیکی با جوانه زنی و رشد دانه‌های جدید به واسطه افزایش انرژی داخلی و افزایش نابه‌جایی‌ها در زمینه و در مرز دانه‌های جدید، دانه های جدید به وجود آمده که این امر منجر به کاهش اندازه دانه می‌شود [۵].

جهت شروع تبلور مجدد دینامیکی در یک دمای ویژه، به یک حداقل کرنش برای جوانه زنی دانه‌های جدید نیاز است. یکی دیگر از پارامتر های مهم تبلور مجدد دینامیکی دمای تبلور مجدد است، همان گونه که برای شروع تبلورمجدد به یک کرنش بحرانی نیاز است برای شروع تبلور مجدد به یک حداقل دما نیز نیاز است که با افزایش دما پدیده تبلور مجدد دینامیکی تسریع می‌شود. در پدیده تبلور مجدد حذف مرزهای فرعی یک بخش اصلی از فرآیند تبلور مجدد است [۶]. پدیده تبلور مجدد دینامیکی و ارتباط آن با میزان کرنش و دما به کمک تست گوه در دماهای متفاوت امکان پذیر است. یکی دیگر از پارامترهای تبلور مجدد دینامیکی ترکیب آلیاژ است.

آلیاژهای آلومینیم حاوی *زیرکنیم* و *اسکاندینیم* به ویژه آلیاژهای سبک آلومینیم که حاوی لیتیم هستند، نسبت به آلیاژهای معمولی آلومینیم، مقاومت بیشتری در مقابل

مقاله دریافت ۸۷/۱/۲۸ دریافت و در تاریخ ۸۷/۳/۲۷ به تصویب نهایی رسید.

[۱] **فارغ التحصیل کارشناسی ارشد**، رشته مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک
پست الکترونیکی: Arash.r4@gmail.com
[۲] **دانشجوی دکتری**، رشته مهندسی مواد ، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد
[۳] **استاد**، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک

تبلور مجدد در عملیات حرارتی آنیل و شکل دهی گرم دارند [۶]. برای مثال عنصر زیرکنیم با تشکیل فاز Al_3Zr در مرز دانه ها باعث قفل شدن مرزدانه ها شده که این پدیده منجر به تعویق افتادن پدیده تبلور مجدد می‌شود و در نتیجه امکان افزایش دما را بدون رشد دانه میسر می‌کند.

یکی از روش هایی که می توان پدیده تبلور مجدد را بررسی کرد انجام کارگرم در یک دمای ویژه و در کرنش‌های متفاوت است. آزمایش گوه با توجه به بررسی میزان کرنش های متفاوت در یک نمونه از روش‌های مناسب برای بررسی تبلور مجدد در یک دمای ویژه است. در این آزمایش تبلور مجدد دینامیکی آلیاژ آلومینیم- لیتیم- مس- (منیزیم)- زیر کنیم به کمک آزمایش گوه مورد بررسی قرار گرفته است که معادله‌ی دما و میزان کرنش بحرانی در این آلیاژ مد نظر بوده است. همچنین اثر دما و کرنش بر اندازه دانه، مورد بررسی قرار گرفته است.

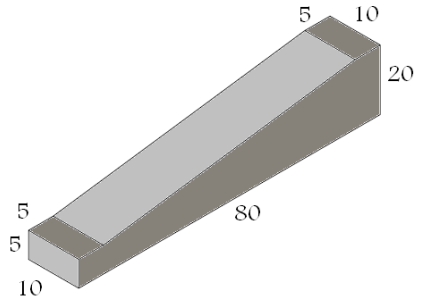
۲- مواد و روش پژوهش

برای تولید شمش‌ها از آلومینیم خالص ساخت شرکت ایرالکو، لیتیم خالص، مس کاتدی و آمیژن Al-8%Zr (مجموع مقدار ناخالصی‌های آهن و سیلیسیم کمتر از ۰٫۳ درصد وزنی) استفاده شده است. ترکیب شیمیایی شمش اولیه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ آنالیز شیمیایی شمش‌های ریخته گری شده

عنصر	Al	Cu	Mg	Li	Zr
درصد وزنی	bal	۱٫۵۱	۱٫۱۵	۲٫۴۸	۰٫۰۸۷

نمونه ها از شمش های ریختگی به صورت گوه ای استخراج شدند شکل۱. همگن‌سازی در دمای ۵۲۰°C به مدت ۱۳ساعت در کوره محفظه‌ای به حجم ده لیتر تحت اتمسفر آرگون انجام شد. آزمایش گوه در دماهای ۳۵۰°C و ۴۰۰°C به وسیله‌ی دستگاه نورد با قطر غلتک ۴۳ سانتیمتر و سرعت چرخش ۸rpm انجام شد. نمونه‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که طی یک پاس نورد محدوده‌های کرنشی تا ۷۵٪ بر روی نمونه‌ها اعمال شود، در مقاطع مختلف تا ۷۰٪ کرنش نمونه ها علامت گذاری شدند. جهت جلوگیری از تبلور مجدد استاتیکی نمونه‌های گوه‌ای پس از نورد بلافاصله به وسیله‌ی آب سرد **کوئنچ** شدند. پس از نورد نمونه‌ها از مقاطع علامت گذاری شده مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین با توجه به نتیجه‌های به دست آمده اعمال کرنش ۹۰٪ نیز بر روی شمش مشابه انجام پذیرفت.



شکل ۱ نمونه گوه‌ای (ابعاد بر حسب میلیمتر)

بررسی‌های ریزساختاری به وسیله‌ی میکروسکپ نوری انجام گرفته است. همچنین آنالیز تصویری به وسیله‌ی آنالیزگر تصویری LEICA و کلیه محاسبه‌ها به وسیله‌ی نرم افزار انجام شده است. سختی سنجی مطابق با استاندارد ASTM E45 (محدوده عددی ۱۶ تا۶۲۷ برینل) انجام شد(حداقل سه بار سختی سنجی در هر گستره انجام و میانگین اعداد گزارش شده است).

۳- یافته ها و بحث

نتیجه‌ها آزمایش‌ها سختی سنجی و بررسی ریز ساختاری (اندازه دانه) نمونه نورد شده در دماهای ۳۵۰°C و ۴۰۰°C به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده است.

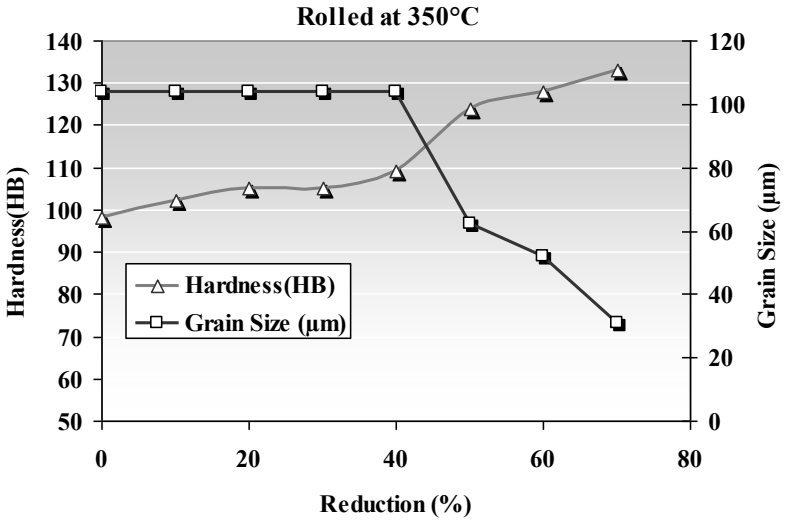
جدول ۲ تأثیر کرنش بر سختی و قطر دانه نورد شده در دمای ۳۵۰°C

Reduction (%)	Hardness(HB)	قطردانه (μm)
0	98	104
10	102	104
20	105	104
30	105	104
40	109	104
50	124	62
60	128	52
70	133	31

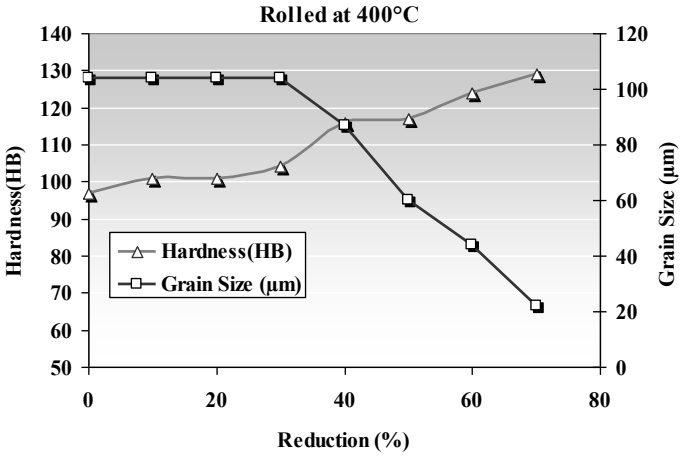
جدول ۳ تأثیر کرنش بر سختی و قطر دانه نمونه نورد شده در دمای ۴۰۰°C

Reduction (%)	Hardness(HB)	قطردانه (µm)
0	97	104
10	101	104
20	101	104
30	104	104
40	116	87
50	117	60
60	124	44
70	129	22

با توجه به جداول ۲ و۳ و تغییرهای ناگهانی در قطر متوسط دانه و سختی، می‌توان نتیجه گرفت که میزان کرنش بحرانی برای نمونه های نورد شده در دماهای ۳۵۰° و ۴۰۰°C به ترتیب در محدوده ۵۰ و ۴۰ درصد است.
همان گونه که ذکر شد، برای شروع تبلورمجدد به یک کرنش بحرانی نیاز است و در ضمن برای شروع تبلور مجدد به یک حداقل دما نیز احتیاج است که با افزایش دما پدیده تبلور مجدد دینامیکی تسریع می شود. با توجه به جدول ۲ مشاهده می‌شود با افزایش کرنش از محدوده ۴۰٪ به ۵۰٪ در نمونه نورد شده در دمای ۳۵۰°C سختی افزایش یافته و تغییرهایی در اندازه‌ی دانه متناسب با افزایش سختی مشاهده می‌شود، این موضوع برای نمونه نورد شده در دمای ۴۰۰°C نیز درست است با این تفاوت که افزایش سختی و کاهش اندازه دانه در این نمونه با افزایش کرنش از گسترده ۳۰٪ به ۴۰٪ قابل مشاهده است. با توجه به شرایط آزمایش که نمونه‌ها بلافاصله پس ازنورد در آب کوئنچ شده‌اند، عامل اصلی تغییر ساختار، تبلور مجدد دینامیکی بوده و تبلور مجدد استاتیکی در تغییر ساختار نقش چندانی نداشته است. افزایش کرنش باعث تغییر شکل دانه‌ها شده و **دانسیته** نابه‌جایی را افزایش می‌دهد. با رسیدن دانسیته نابه‌جایی به حد بحرانی، انرژی داخلی ماده افزایش یافته و تجمع نابه‌جایی‌ها محل مناسبی برای جوانه‌زنی دانه‌ها بوده و مرزدانه‌های جدید تشکیل می‌شود. با جوانه‌زنی دانه‌های کوچکتر درون دانه‌های بزرگتر اندازه‌ی متوسط دانه‌ها کاهش یافته که با کاهش اندازه‌ی دانه، سختی نیز افزایش می‌یابد. اطلاعات موجود در جدول‌های فوق به صورت نمودار در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.



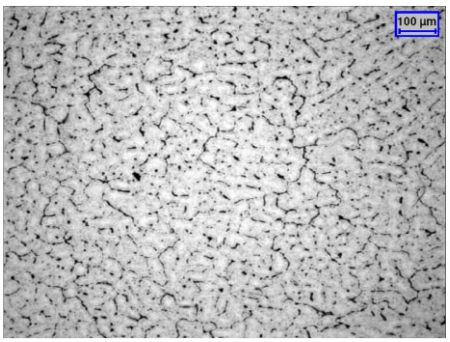
شکل ۲ تغییرهای سختی و اندازه‌ی دانه بر اساس افزایش کرنش (نورد شده در دمای ۳۵۰°C)



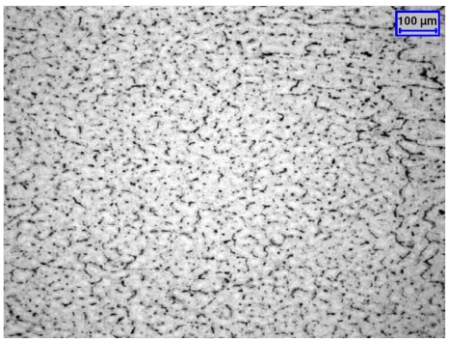
شکل ۳ تغییرهای سختی و اندازه‌ی دانه بر اساس افزایش کرنش (نورد شده در دمای ۴۰۰°C)

با توجه به شکل‌های ۲ و۳ و نحوه تغییرهای اندازه‌ی دانه در دو نمونه متفاوت روند یکسانی داشته است به گونه‌ای که قبل از شروع تبلور مجدد و رسیدن به حد بحرانی تغییرهای محسوسی در اندازه‌ی دانه مشاهده نمی‌شود در حالی که پس از رسیدن به حد بحرانی جهشی در اندازه‌ی متوسط دانه‌ها مشاهده می‌گردد که دلیل اصلی آن پدیده تبلور مجدد دینامیکی و جوانه‌زنی و رشد دانه‌های جدید بوده است.

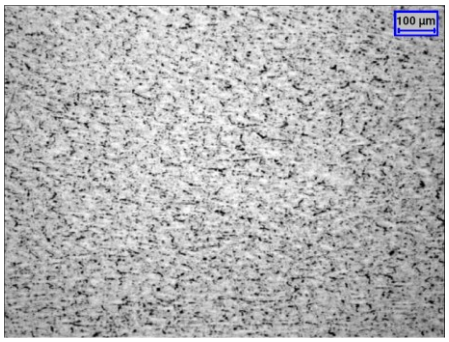
در شکل‌های ۴ تا ۶ ریز ساختار نمونه نورد در دمای ۴۰۰°C شده در مقاطع مختلف نشان داده شده است و در شکل‌های ۷ تا ۹ ریز ساختار نمونه نورد در دمای ۳۵۰°C شده در مقاطع متفاوت نشان داده شده است.



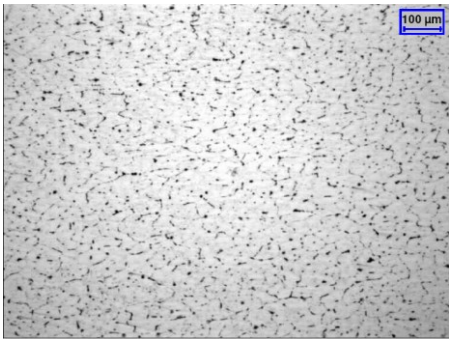
شکل ۴ مقطع ریزساختاری در گسترده‌ی ۳۰٪ کرنش (نورد شده در دمای ۴۰۰°C)



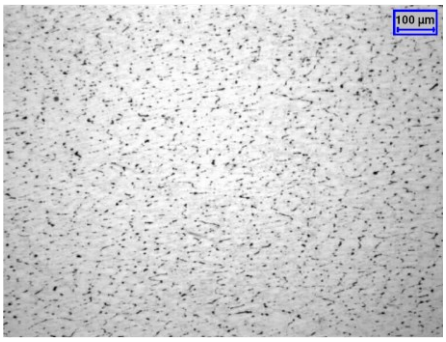
شکل ۵ مقطع ریزساختاری در گسترده‌ی ۴۰٪ کرنش (نورد شده در دمای ۴۰۰°C)



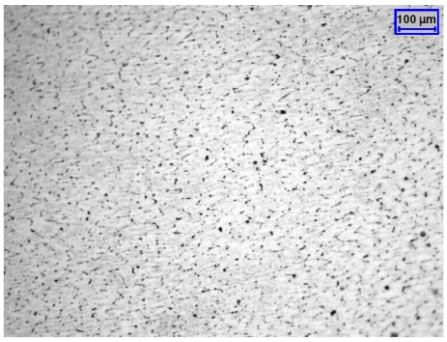
شکل ۶ مقطع ریزساختاری در گسترده‌ی ۷۰٪ کرنش (نورد شده در دمای ۴۰۰°C)



شکل ۷ مقطع ریزساختاری در گسترده‌ی ۴۰٪ کرنش (نورد شده در دمای ۳۵۰°C)



شکل ۸ مقطع ریزساختاری در گسترده‌ی ۵۰٪ کرنش (نورد شده در دمای ۳۵۰°C)



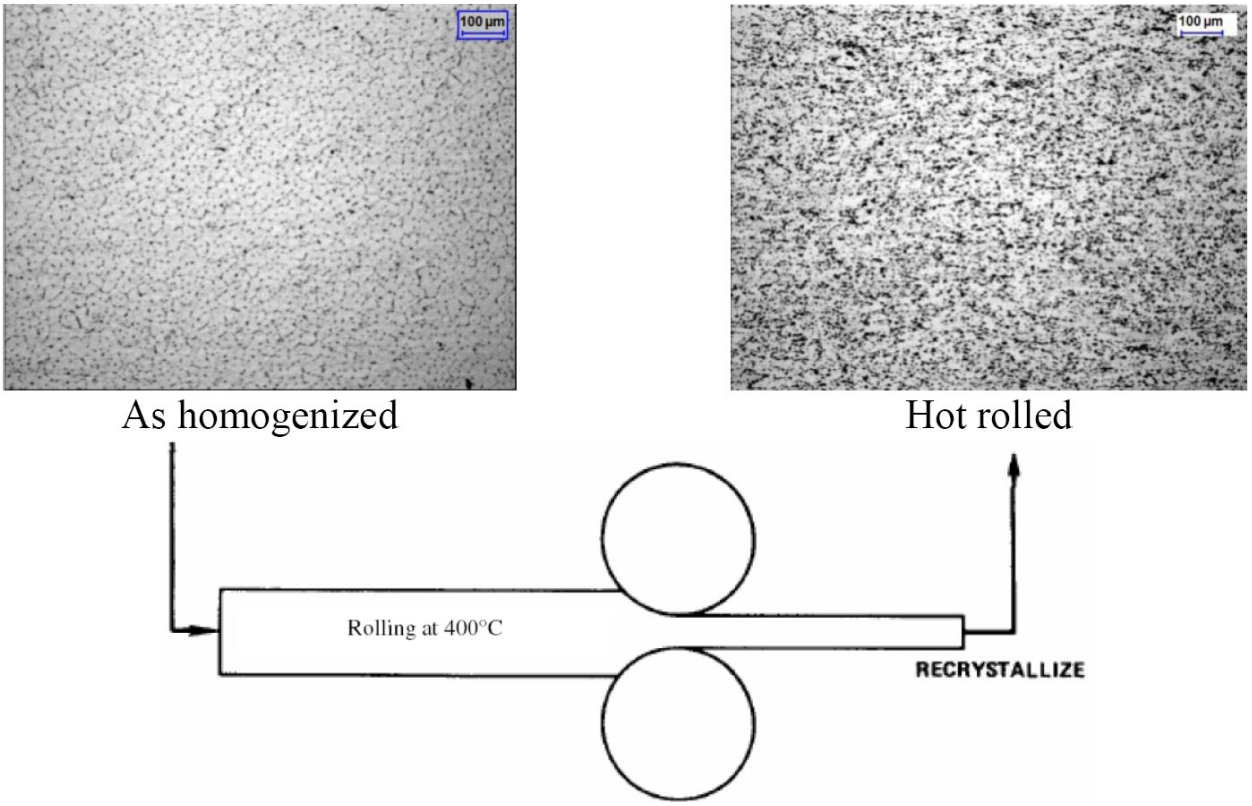
شکل ۹ مقطع ریزساختاری در گسترده‌ی ۷۰٪ کرنش (نورد شده در دمای ۳۵۰°C)

در فرآیند تبلور مجدد دینامیکی، ابتدا پدیده کارسختی غالب بوده و با افزایش میزان انرژی داخلی و رسیدن به حد بحرانی تبلور مجدد آغاز می شود و با افزایش میزان کرنش تبلور مجدد نیز افزایش می یابد نیروی محرکه تبلور مجدد ناشی از انرژی ذخیره شده کارمکانیکی است به همین منظور یک مقدار کارمکانیکی بحرانی تعریف می‌شود که حداقل کرنش لازم برای تبلور مجدد در یک دمای ویژه است. نیروی محرکه لازم برای ایجاد ساختار دانه‌ای جدید تفاوت بین انرژی داخلی ماده کرنش یافته و کرنش نیافته است. دانه های جدید، به صورت هسته‌های بسیار کوچکی تشکیل شده و رشد می‌کنند تا به طور کامل جایگزین ساختار اولیه ماده شوند که دلیل آن تفاوت بین انرژی داخلی ماده کرنش یافته و کرنش نیافته است. با توجه به شرایط آزمایش در کرنش‌های کم کشیدگی دانه رخ می-دهد و نمونه‌ها در جهت طولی کشیده می‌شوند و با افزایش کرنش مرزدانه‌های جدید جوانه زده و دانه‌های کوچکتری تشکیل می‌شود و با افزایش کرنش پس از رسیدن به حد بحرانی اندازه دانه‌ها کمتر می‌شود.

با توجه به جدول‌های شکل های فوق می توان اثر دما را بر میزان کرنش بحرانی شروع تبلور مجدد دینامیکی مشاهده کرد که با افزایش دما به میزان $50\ ^{\circ}C$ میزان کرنش بحرانی به تقریب ۱۰٪ کاهش می‌یابد. در نمونه نورد شده در دمای $350\ ^{\circ}C$ با اعمال کرنش های کمتر از ۴۰٪ تغییرهای قابل توجهی در اندازه‌ی دانه و سختی مشاهده نمی‌شود که این بدان معنی است که میزان کرنش اعمال شده جهت شروع تبلور مجدد دینامیکی در این دما کم است. در نمونه نورد شده در دمای $400\ ^{\circ}C$ تغییرهای تا گسترده‌ی کرنش ۳۰٪ کم بوده که با افزایش کرنش در این دما تغییرات چشمگیری در اندازه‌ی دانه مشاهده می‌شود.

در تبلور مجدد دینامیکی به واسطه انجام کار مکانیکی ناپایداری افزایش یافته و از طرف دیگر بالا بودن دما باعث ایجاد پدیده تبلور مجدد می گردد که نتیجه این فرآیند کاهش اندازه دانه است [۷ و ۸]. با اعمال کار مکانیکی، انرژی ذخیره شده و در انرژی آزاد فلز افزایش می‌یابد و ساختار داخلی از نظر ترمودینامیکی، ناپایدار می‌شود. تبلور مجدد تشکیل یک مجموعه از دانه های هم محور عاری از تنش جدید است که دارای ابعادی به تقریب یکسان در همه جهت‌ها هستند. این دانه ها چگالی نابه‌جایی کمی داشته و ویژگی‌های شرایط پیش از کارسرد را دارا می باشند. در مجموع می‌توان گفت افزایش دما باعث کاهش میزان کرنش بحرانی برای تبلور مجدد دینامیکی و ریزدانه شده، زودتر اتفاق می‌افتد.

همچنین بررسی‌های ریز ساختاری انجام شده روی نمونه نوردی در دمای $400^{\circ}C$ با اعمال کرنش ۹۰٪ نشان می‌دهد که ورق تولیدی از نظر ریزساختاری سالم بوده و هیچگونه ترکی مشاهده نمی‌شود. به واسطه‌ی اعمال کرنش‌های زیاد (بیش از ۹۰٪) در پاس‌های متوالی در حالت گرم ریز ساختار به طور کامل تبلور مجدد یافته و اندازه دانه‌ها در حدود ۵ میکرومتر است شکل ۱۰.



شکل ۱۰ تبلور مجدد دینامیکی در حین نورد

۴- نتیجه گیری

۱. گسترده‌ی دمایی ۳۵۰°C تا ۴۰۰°C جهت نورد گرم آلیاژ Al-Li-Cu-Zr(-Mg) مناسب تشخیص داده شد.

۲. شروع تبلور مجدد دینامیکی در دمای ۳۵۰°C در گسترده‌ی کرنش ۵۰٪ است.

۳. شروع تبلور مجدد دینامیکی در دمای ۴۰۰°C در گسترده‌ی کرنش ۴۰٪ است.

۴. با اعمال کرنش ۷۰٪ در دماهای ۳۵۰°C و ۴۰۰°C قطر متوسط دانه از ۱۰۰ میکرومتر به ترتیب ۳۰ و ۲۰ میکرومتر کاهش می‌یابد.

مراجع

[1] A.M. Wusatowska-Sarnek , H. Miura, T. Sakai: Materials Science and Engineering A323 **2002**, pp. 177–186.

[2] Jeong-Min Kim, Ki-Dug Seong , Joong-Hwan Jun ,Keesam Shin , Ki-Tae Kim, Woon-Jae: Journal of Alloys and Compounds 434–435 **2007**, pp. 324–326

[3] J.R Davis & associated. ASM specially Hand book, Aluminium and Aluminium Alloys. **1993**. pp. 121-147.

[4] Y. Xun, M. J. Tan: Material Characterization, 52 **2204**, pp. 187-193.

[5] H.P. Stu¨we , A.F. Padilha , F. Siciliano Jr.: Materials Science and Engineering A333 **2002**, pp. 361–367.

[6] Yu. M. Vainblat, N. A. Sharshgin, L. B. Khokhlatova, N. I. Kolobnev, N. V. Bukharina, L. G. Kilmovich: Material Forum, 28 **2004**.

[7] Robert E. Reed-hill, Reza Abbaschian. Physical metallurgy principles. 3rd edition.

[۸] اصول علم و مهندسی مواد. ویلیام دی کلیستر. ترجمه دکتر علی شکوه‌فر، **۱۳۸۳**.