Journal of Metallurgical and Materials Engineering, 35, 1. 2024. (1-10)



#### Effect of Aging Heat Treatment and Extrusion Process on Mechanical Properties of Al-3Mg-2.5 Cu-xEr Alloy Research Article

Mohammad Alipour <sup>1</sup> DOI: 10.22067/jmme.2023.82403.1109

#### **1-Introduction**

Al alloys are very popular for structural applications due to their low density, high strength, weldability and good workability. In particular the extruded profiles are used for making crash boxes in cars, fuselage stringers and frames for airframe structures. In particular the grain refinement in Al alloys is mainly by heterogeneous nucleation and grain growth. Several studies have shown the importance of addition of various grain refiners like Al-10Ti, Al-5Ti-1B, Al-8B to aluminum alloys has influenced the microstructure, mechanical and tribological properties. Especially the combination of new processing technique like strain induced melt activation process and grain refiners have enhanced the mechanical properties of Al Al-Mg-Cu series. On the other hand the rare earth elements like La, Sc, Ce and Er are also used for refining grain sizes and modifying the eutectic microstructures. Fang et al. studied the effect of rare earth element like Er on the mechanical and corrosion characteristics of AlZnMgCu alloy. The secondary precipitate like Al3Er with size of 15-25 nm was found to inhibit the recrystallization and improved fracture toughness. Liu et al. studied the effect of Sc and Zr addition on hardness and tensile properties of AlZnMgCu alloy sheets fabricated by a combination of hot and cold rolling. With the increase in Sc and Zr addition, the alloy found to exhibit resistance to recrystallization by inhibiting dislocation mobility. Hardness and tensile strength was found to be enhanced due to presence of large volume fraction of precipitates of Al<sub>3</sub>Sc and Al<sub>3</sub>Zr. Due to the possibility of aging of the alloy used in this research, the aging steps were carried out on this alloy and the simultaneous effect of aging heat treatment and mechanical deformation (extrusion) on this alloy was investigated. According to the research, the simultaneous effect of these two processes on this series of alloys has not been done. The main goal of this research is to study the effect of extrusion process and heat treatment on mechanical properties and microstructure of Al-3Mg-2.5Cu-xEr alloy.

#### 2- Experimental

Al-3Mg-2.5Cu alloy was used as base alloy. Melting of aluminum alloy was done by heating up to  $\sim$ 750°C. Er was

added to the molten alloy at a temperature of 750°C using Amighan Al-30Er in different percentages of 0.5, 1, 1.5 and 2% by weight. After the successful addition of Er, the melt was poured into a permanent mold designed and manufactured according to ASTM B557M-10. A scanning electron microscope equipped with X-ray energy diffraction analysis (EDX) was used for microstructural studies. The cut parts of the alloy were polished and then etched using sandpaper to obtain the desired structure. The average grain size of the samples was measured according to ASTM: E112 standard. The phase was determined by X-ray diffraction method. Tensile test was performed on all the samples at room temperature with the SANTAM machine with a strain rate of 1 mm/min. Four samples were prepared and tested for each of the percentages and the average value was reported in the article. Before the tensile test, the extrusion process was applied to all the samples. In other words, samples made under different conditions using a hydraulic press at a speed of 1 mm/s at a temperature of 320 °C on a primary cylindrical billet with a diameter of 29 mm with an extrusion ratio of 6 to 1 (which is the ratio of the cross-sectional area of the initial billet to the final cross-sectional area after extrusion) was extruded. Figure 1 shows the metal mold, the dimensions of the tensile sample and the schematic of the extrusion mold. After applying extrusion on the samples, the tensile test was performed on the samples again. To study the effect of heat treatment (T6 conditions) on mechanical properties, Al-3Mg-2.5Cu alloy cast samples were heated to 460 °C for 8 hours and then immediately cooled with water. Finally, the cooled samples were heated at 120°C for 24 hours in an oven.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Corresponding author: Assistance Professor. Faculty of Mechanical engineering, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Iran **Email**: alipourmo@tabrizu.ac.ir



<sup>\*</sup>Manuscript received: May 14, 2023, Revised. July 9, 2023, Accepted, October 4, 2023.



Fig 1. SEM microstructures of refined specimens, with (a) 0.0 wt.% Er, (b) 0.5 wt.% Er, (c) 1 wt.% Er and (d) 2 wt.% Er.

#### **3- Results and Discussion**

Figure 1 shows the microstructure images of Al-3Mg-2.5Cu alloy casting and modified with different weight percentages of Er. The images clearly show that after the addition of Er, a remarkable change occurs in the dendritic morphology of the Al-3Mg-2.5Cu alloy.

Figure 2 shows the effect of different amounts of Al-30Er on the grain size of Al-3Mg-2.5Cu alloy. It was found that the

average grain size of the basic Al-3Mg-2.5Cu alloy was about 550  $\mu$ m. The addition of Er to the Al-3Mg-2.5Cu alloy severely fines the primary columnar and coarse  $\alpha$ -Al grains and produces fine coaxial  $\alpha$ -Al grains with an average size of 65  $\mu$ m.



Fig. 2. Grain size variations with Er contents.

Table 1 shows the mechanical properties of Al-3Mg-2.5Cu alloy under different conditions. As seen in Table 1, the average ultimate tensile strength (UTS) of the samples before and after the T6 extrusion and heat treatment processes increased from 225 MPa to 602 MPa. The tensile properties of Al-3Mg-2.5Cu-xEr alloy mainly depend on the shape, size, distribution of  $\alpha$ -Al grains, secondary phase structure and distribution of intermetallic among the grains.

Table 1.	U1S of unr	enned and I	Er renned sa	imples at the				
different conditions.								
$\mathbf{E} = 0/$	A = = = = +	A	A	A = = = = +				

Er %	As-cast	As-cast-	As-cast-	As-cast-
		T6	extrusion	extrusion-T6
0	230	460	275	510
0.5	245	480	303	530
1	270	500	317	580
1.5	242	475	300	528
2	235	468	278	512

#### 4- Conclusion

1- The mechanical properties of Al-3Mg-2.5Cu alloys mainly depend on the shape and size of deposits and grain size of  $\alpha$ -Al and the distribution of secondary phases.

2- Al-30Er is effective in reducing the grain size, changing the dendritic morphology and creating a fine and uniform microstructure.

3- The increase in tensile properties with the addition of Er nucleating agent is due to the breaking of primary  $\alpha$ -Al grains and the formation of  $\alpha$ -Al grains with a more uniform distribution and a narrower distribution of secondary phases.

4- The optimal percentage of germinating Er in this research was selected as one weight percent, and in this weight percentage of Amijan, the highest tensile properties were obtained.

5- The final tensile strength of casting alloys increases significantly by adding Er. This is mainly due to the microdispersion and uniform distribution of eutectic phase and a-Al dendrite and strengthening through precipitated Al3Er particles using Oravan mechanism.

مهندسی متالورژی و مواد، ۳۵، ۱، ۳۰۰۴۱. (۱۰–۱)



### مهندسی متالورژی و مواد



https://jmme.um.ac.ir/

### تأثير عمليات حرارتي پيرسختي و فرآيند اكستروژن بر خواص مكانيكي آلياژ Al-3Mg-2.5Cu-xEr\*

مقاله پژوهشی

محمد على پور(۱) 🕩

DOI: 10.22067/jmme.2023.82403.1109

چکیده در این مقاله، اثر جوانه زای Al-30Er عملیات حرارتی و فرآیند اکستروژن بروی آلیاژ آلومینیوم Al-3Mg-2.5Cu مورد بررسی قرار گرفت. آمیژان نادر خاکی Al-30Er در درصدهای 0.5 I، 5.1 و 2 ایربیوم به مذاب در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد افزوزده شد. مقدار بهینهی zr برابر یک درصد وزنی به دست آمد. مطالعات ریزساختاری و شکست نگاری با میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به طیف سنجی پراش اشعه ایکس انجام شد. عملیات حرارتی T6 شامل همگن سازی، کوئنچ سریع تا دمای اتاق و پیرسازی در دمای ۵۰ به مدت 24 ساعت، برای دست یابی به استحکام بیشینه صورت گرفت. جهت از بین بردن تخلخل داخل نمونه ها و بهبود استحکام نمونه ها از فرآیند اکستروژن با نسبت 6 به 1 استفاده شد. برای نمونه های اولیه جهت اکستروژن قطر استوانه اولیه 29 میلی متر می باشد. با افزودن جوانه زا و اعمال عملیات حرارتی T6 و فرایند اکستروژن، بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی حاصل شد. میانگین استحکام کششی نهایی (UTS) نمونه ها قبل و بعد از عملیات حرارتی T6 و فرایند اکستروژن از SMP میشیو قابل توجهی در خواص مکانیکی حاصل شد. میانگین استحکام کششی نهایی (UTS) نمونه ها قبل و بعد از عملیات حرارتی T6 و فرایند اکستروژن از SMP میشیو قابل توجهی در خواص مکانیکی دامی شد. میانگین استحکام کششی نهایی (UTS) نمونه ها قبل و بعد از عملیات حرارتی T6 و فرایند اکستروژن از SMP میا توجهی در خواص مکانیکی حاصل شد. میانگین استحکام اعمال عملیا حرارتی و فرایند اکستروژن، بهبود در استحکام کششی در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم پایه گردید.

**واژەھاي كليدي** نادر خاكي، عمليات حرارتي، خواص مكانيكي، ريزساختار.

# Effect of Aging Heat Treatment and Extrusion Process on Mechanical Properties of Al-3Mg-2.5Cu-xEr Alloy

Mohammad Alipour

**Abstract** In this study, the effect of Al-30Er grain refiners, extrusion and heat treatment conditions on an Al-3Mg-2.5Cu aluminum alloy was studied. Different amounts of Al-30Er (0.5 wt.% Er, 1 wt..0% Er, 1.5 wt.% Er and 2 wt.% Er) were added to the molten alloy at 750 °C. The optimum level of Er was found to be 1 wt.%. Microstructural examinations and fracture surfaces were conducted by scanning electron microscopy coupled with an energy dispersive spectrometry. To heat treatment including quenching to room temperature and aging at 120 °C for 24 h was employed to reach to the maximum strength. In order to eliminate the porosity inside the samples and improve the strength of the samples, the extrusion process was used with a ratio of 6 to 1. For the prototypes in the direction of extrusion process, a significant improvement in mechanical properties was achieved. The average ultimate tensile strength (UTS) of the samples before and after T6 heat treatment and extrusion process, caused a 167% improvement in tensile strength compared to the base aluminum and extrusion process, caused a 167% improvement in tensile strength compared to the base aluminum alloy.

Keywords Rare earth, Heat treatments, Mechanical Properties, Microstructure.

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۲/۲۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۲/۷/۱۲ می باشد.

(۱) استادیار، مهندسی مواد، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز

Email: alipourmo@tabrizu.ac.ir

#### مقدمه

ريزدانه كردن آلياژهاي آلومينيم از متداول ترين عمليات در صنايع شمش ریزی و ریخته گری آلیاژهای آلومینیوم است. این کار به طور معمول با اضافه کردن جوانه زا به مذاب صورت می گیرد. لذا استفاده از جوانه زای مناسب جهت ریزدانگی آلیاژهای آلومینیومی می تواند تاثیر زیادی بر کیفیت این گونه قطعات داشته باشد. آلیاژهای آلومینیوم سری ۵۰۰۰، یک آلیاژ آلومینیوم منیزیم است که خواص مقاومت در برابر خوردگی و چقرمگی و قابلیت جوشکاری خوب و استحکام متوسطی دارد [1] و از خانواده آلیاژهای آلومینیوم کارپذیر (Wrought Aluminum Alloy) است. آلياژ ألومينيوم 5000 بيش از 70 سال پيش ساخته شد. با اين حال طی دهه ی اخیر تحقیقات بسیاری پیرامون آن صورت گرفته است [1-4]. استحکام بالا و سبک بودن آلیاژ، ویژگی های جذابی هستند که به استفاده ی رایج آن در کاربردهای حمل و نقل منجر مي شود. انواع اين ألياژها عبارتند از : ألياژ ألومينيوم ۵۰۰۵ ، ألياژ آلومينيوم ۵۰۵۰ ، آلياژ آلومينيوم ۵۰۵۲ ، آلياژ آلومينيوم ۵۰۵۶ ، آلیاژهای آلومینیوم گروه ۵۰۰۰ گرید ۵۰۸۳ ، آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۶ ، آلیاژ آلومینیوم ۵۱۵۴ و آلیاژ آلومینیوم ۵۲۵۲ . سایر آلياژهای آلومينيوم سری xxx۵ شامل آلياژ آلومينيوم ۵۲۵۴ ، آلياژ آلومينيوم ۵۴۵۴ ، آلياژ آلومينيوم ۵۴۵۶ ، آلياژ آلومينيوم ۵۴۵۷ ، آلياژ آلومينيوم ۵۶۵۲ و آلياژ آلومينيوم ۵۶۵۷ هستند. در ضمن، آلياژ ألومينيوم 5083 بدليل دارا بودن استحكام به وزن بالا كاربرد وسیعی در صنایع هوافضا و دریایی پیدا کرده است [5]. آلیاژ آلومينيوم 5083 معمولاً با فرايند شكل دهي توليد مي شود كه به استحکام بالا می انجامد. با این حال، هزینه ی این روش تولید در مقایسه با روش ریخته گری بسیار بالاست. با این تفاسیر، معایب ریخته گری متداول، از جهت ساختار مواد دارای نواقص ناشی از ریخته گری، نظیر تخلخل و حفره های انقباضی است که به استحکام کم می انجامد [6]. در دهه های اخیر استفاده از جوانه زاهایی نظیر Al-5Ti-B و Al-8B بیشتر شده و بر خواص تريبولوژی، مکانيکی و ريزساختار مجموعه ی آلياژهای AA5000 در مطالعات بسیاری گزارش شده است [7-9].

واقعیت این ا ست که به وا سطه ی پیچیدگی سیستم آلیاژ آلومینیوم و محدودیت مشخصه یابی اثرات عناصر نادر خاکی بر روی آلیاژهای آلومینیوم، همچنان مشکلات علمی بسیاری در این خصوص وجود دارد. بنابراین، لازم است که تحقیقاتی در

خصوص اثرات و توزیع بسیاری از عناصر نادر خاکی (Y ،Er، Y ،Er، Sc ،Nd ،Gd ،La ،Ce، و غیره) در آلومینیوم خالص و آلیاژ آلومینیوم صورت گیرد.

بدلیل امکان پیرسازی آلیاژ مورد استفاده در این تحقیق، مراحل پیرسازی بر روی این آلیاژ انجام شد و تاثیر همزمان اعمال عملیات حرارتی پیرسازی و تغییر شکل مکانیکی (اکستروژن) بر روی این آلیاژ بررسی شد. طبق تحقیقات انجام شده تاثیر همزمان این دو فرآیند بر روی این سری از آلیاژها انجام نشده است. هدف اصلی این پژوهش، مطالعهی اثر فرایند اکستروژن و عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی و ریزساختار آلیاژ -Al SMg-2.5Cu-xEr

#### روش تحقيق

آلیاژ AI-3Mg-2.5Cu آلومینیوم به عنوان آلیاژ اولیه مورد استفاده قرار گرفت. فرایند ذوب آلیاژ در یک کوره ی مقاومت الکتریکی با استفاده از بوته ی کاربید سیلسیم انجام شد. AI، Mg و Cu عنصری خالص صنعتی (همگی با خلوص % 99.9) به عنوان مواد AI- عنصری خالص صنعتی (همگی با خلوص % 99.9) به عنوان مواد اولیه در تهیهی شمش به کار گرفته شدند. شمش های آلیاژ AI- اولیه در تهیهی شمش به کار گرفته شدند. شمش های آلیاژ داخل یک بوته گرافیتی قرار داده شد. بوته ی گرافیتی در یک کوره مقاومت الکتریکی قرار داده شد. ذوب آلیاژ آلومینیوم با حرارت دهی تا دمای ~℃ 750 صورت گرفت. مقادیر مختلفی از AI-30Er (2 کا ۲۰۰ ۲۰ ۲۰ ۲۰ ۲۰ ۲۰ ۲۰ ۲۰ ۹ در در 2 %th (Er) به آلیاژ مذاب در دمای ℃ 750 افزوده شد.

پیش از انجام آزمون کشش، فرایند اکستروژن بروی تمام نمونه ها اعمال گردید. به عبارتی نمونه های ساخته شده تحت شرایط مختلف با استفاده از پرس هیدرولیک با سرعت I mm/s در دمای C<sup>o</sup> 320 بروی شمش استوانه ای اولیه با قطر 29 mm با نسبت اکستروژن 6 به 1 (که نسبت سطح مقطع بیلت اولیه به سطح مقطع نهایی پس از اکستروژن است) اکستروژن شد. شکل (۱) قالب فلزی، ابعاد نمونه کشش و شماتیک قالب اکستروژن را نشان می دهد. بعد از اعمال اکستروژن بر روی نمونه ها، آزمون کشش بر روی نمونه ها مجدد انجام شد.

برای مطالعات ریزساختاری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (ساخت Cam Scan MV2300) مجهز به تحلیل پراش انرژی پرتو (EDX) X مورد استفاده قرار گرفت. بخش های برش

خورده ی آلیاژ با استفاده از ورق سمباده ی پایه SiC پولیش شده و سپس با عامل کلر (2 ml HCl ،ml HF 2، 2 ml HNO3 ، و (ml H2O 190) اچ شدند تا ساختار مورد نظر به دست آید. میانگین سایز دانه ی نمونه ها طبق استاندارد ASTM: E12 اندازه میانگین سایز دانه ی نمونه ها طبق استاندارد ASTM: E12 اندازه گیری شد. تعیین فاز با روش پراش پرتو X (ساخت ASTO الم30) انجام شد. برای مطالعه ی اثر عملیات حرارتی (شرایط (T6) بر خواص مکانیکی، نمونه های ریختگی آلیاژ -Hal-3Mg میس با آب فورا سرد شد. در نهایت، نمونه های سرد شده و میس با آب فورا سرد شد. در نهایت، نمونه های سرد شده در میرد شدند [2]. آزمون کشش روی تمام نمونه ها در دمای اتاق و با استفاده از دستگاه SANTAM با نرخ کرنش mm/min انجام شد. چهار نمونه آزمایشی برای هر حالت تست شده و مقدار میانگین در اینجا گزارش شده است.



شکل ۱ (الف) قالب ریخته گری، (ب) ابعاد نمونه تست کشش، (ج) قالب اکستروژن

### نتایج و بحث مطالعات ریزساختاری

شکل (۲) تصاویر ریزساختار ریخته گری آلیاژ -Al-3Mg 2.5Cu و اصلاح شده با در صدهای وزنی مختلف Er را نشان می دهد. تصاویر به وضوح نشان می دهند که پس از افزودن Al- تغییر قابل ملاحظه ای در مورفولوژی دندریتی آلیاژ -Al 3Mg-2.5Cu رخ می دهد. ریزساختار آلیاژ شـکل گلبولی دانههای Δ-A اولیه را نشان می دهند که با فازهای ثانویه ی بین

سال سي و پنج، شمارهٔ يک، ۱۴۰۳

دندریتی احاطه شده است. طبق شکل (۳) ملاحظه می شود که افزودن Er تعداد مرزدا نه ها را افزایش داده و بالطبع توزیع همگن تر رسوبات بین فلزی را تقویت می کند. روشن است که افزودن Er شکل و اندازه فاز یوتکتیک را تغییر می دهد. مقدار بهینه ی Er که می – توان برای آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu به کار برد، wt روزنی می باشد.

شکل (۳) تصویر میکرو سکوپ الکترونی روبشی و آنالیز عنصری آلیاژ ریختگی AI-3Mg-2.5Cu اصلاح شده با یک درصد وزنی Er را نشان می دهد. فازهای مختلف به وضوح در تصاویر قابل مشاهده هستند. علاوه بر این، EDX انجام شده روی این آلیاژ حاکی از وجود فاز بین فلزی Al<sub>3</sub>Er بود که نشان می دهد مقدار Al و Er از سطح میانگین ترکیب شیمیایی در آلیاژ بالاتر بوده است.

شکل (۴) تأثیر مقادیر مختلف Al-30Er را بر اندازه دانه ی آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu نشان می-دهد. مشخص شد که میانگین اندازه دانه ی آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu یا یه در حدود μm بوده است. افزودن Er به آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu دانه های α-Al اولیه ی ستونی و در شت را به شدت ریز کرده و دانه های هم محور ریز α-Al با میانگین سـایز μm 65 را به وجود می آورد. علت اصلی این است که ذرات Al₃Er حین انجماد دانه های -α Al به عنوان عامل های جوانه زنی عمل می کنند. به وضوح مشاهده می شود که ریز ساختار آمیژان Al-30 wt% Er متشکل از ماتریس a-Al و فاز Al<sub>3</sub>Er بین فلزی است. فاز Al<sub>3</sub>Er به طور یکنواخت در ماتریس a-Al توزیع شده است. مکانیسم های مختلفی برای فرایند ریز شدن دانه پیشنهاد شده است. در برخی از مکانیسم ها گفته شده است که وجود ذراتی نظیر Al<sub>3</sub>Er در پرو سه ی ریز شدن دانه مؤثر است. وجود برخی عنا صر آلیاژی نظیر Mg و Lu باعث بهبود بازده برخی جوانه زا ها نظیر آمیژان Al-30Er می گردد. با افزایش مقدار در صد وزنی Er، این ذرات مرزدانه ها را تثبیت کرده و ریزشـدگی دانه را افزایش می دهند. همچنین این ذرات باعث تثبیت ترک شده و استحکام را بهبود مي بخشند.

نشریهٔ مهندسی متالورژی و مواد



شکل ۳ آنالیز عنصری اشعه ایکس آلیاژ آلومینیوم Al-3Mg-2.5Cu /1% Er



شکل ۴ اندازه دانه بر حسب میزان عنصر نادر خاکی Er

شکل (۵) تصویر آلیاژ ریختگی Al-3Mg-2.5Cu اصلاح شده با ۵,۰ %Er wt را پس از عملیات اکستروژن نشان میدهد. همانطور که در شکل مشاهده میکنید کل ساختار بهم ریخته و شکل دانهها کاملا نامنظم بوده و در را ستای اکستروژن کشیده شده است.

شکل (۶) تصویر آلیاژ ریختگی Al-3Mg-2.5Cu اصلاح شده با 0.5 %wt wt ا/، و 2 wt/ از Er را پس از عملیات حرارتی T6 نشان میدهد. رو شن است که افزودن Er، شکل و اندازه رسوبات را تغییر می دهد. دلیل این امر که این سری از آلیاژ ها قابلیت عملیات حرارتی دارند این است که بخاطر حضور عنصر مس در داخل ترکیب این آلیاژ باعث شده است



شكل ۲ تصویر میكروسكوپ الكترونی روبشی ریزساختار آلیاژ پایه با (الف) صفر درصد Er، (ب) 0.5 درصد Er، (ج) 1 درصد Er و (د) Er درصد Er

نشریهٔ مهندسی متالورژی و مواد

که این سری از آلیاژها قابلیت عملیات حرارتی داشته باشند.



شكل ۵ ريزساختار آلياژ Al-3Mg-2.5Cu بعد از فرآيند اكستروژن

رسوبات تشکیل شده در مراحل مختلف پیرسازی برای آلیاژهای 5xxx به این ترتیب است: محلول جامد فوق اشباع η و سپس تبدیل به ۹ متاپایدار و سپس (۵) یایدار می شود.

فاز  $\eta$ ، فاز تعادلی است و فصل مشترک ناهمدوس با ماتریس (AI) دارد. در این سه نوع رسوب، نواحی GP و فاز  $\eta'$ متاپایدار، فاز اصلی پیرسازی در آلیاژهای Al-Mg-Cu تجاری است. حضور ذرات فاز ثانویه معمولا باعث اعوجاج شبکه می شود. این اعوجاجها شبکه هنگامی رخ می دهند که ذرات رسوب از نظر ساختار کریستالوگرافی و اندازه با اتم های میزبان فرق داشته باشند. فاز (n-MgCu) و اندازه با اتم های میزبان فرق تشکیل می شود و همیشه به عنوان بخشی از یوتکتیک حضور دارد. بنابراین ساختار یوتکتیکی متشکل از فازهای آلومینیمی ( $\alpha$ ) یو  $\eta$  است و به صورت تقریبا لایه ای است. در رابطه با نوع ساختار فاز اتا اطلاعلات دقیقی وجود ندارد و یک ساختار پیچیده دارد.

ذرات کوچکتر رسوب در یک شبکهی میزبان باعث ایجاد تنش کششی در ساختار میشوند، درحالی که ذرات بزرگتر رسوب باعث ایجاد یک تنش فشاری در شبکه میشوند. نواقص نابجایی نیز یک میدان تنش ایجاد میکنند. بالای نابجایی یک تنش فشاری و پایین آن یک تنش کششی وجود دارد. متعاقبا، یک انرژی برهم کنش منفی بین یک نابجایی و یک رسوب وجود دارد که هریک به ترتیب یک تنش فشاری و یک تنش کششی ایجاد میکنند. به عبارت دیگر، نابجایی به سمت رسوب جذب می شود. به علاوه، یک انرژی برهم کنش مثبت بین یک نابجایی و یک رسوب وجود دارد که همان نوع میدان تنش را دارد. این

سال سي و پنج، شمارهٔ یک، ۱۴۰۳

بدین معناست که نابجایی توسط رسوب رانده می شود. با این حال، برای کسر حجمی ثابتی از ذره، در مقادیر بالاتر به دلیل افزایش فواصل ذره، این تنش می تواند کاهش یابد. نابجایی نیز می تواند پیرامون یک ذره ی رسوب خم شود که مکانیسم حاکم بر آن، مکانیسم اوروان نامیده می شود.



SEM HV: 20.00 kV Det: BSE Date(m/d/y): 06/11/17 Vac: HiVac

شکل ۶ تصویر SEM نمونههای اصلاح شده با (الف) 0.5 درصد Er، (ب) 1 درصد T6 و (ج) 2 درصد Er. پس از عملیات T6

تأثير عمليات حرارتی پيرسختی و فرآيند اکستروژن بر خواص مکانيکی آلياژ...

استحکام کششی جدول (۱) خواص مکانیکی آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu را تحت شرایط مختلف نشان میدهد. همان طور که در جدول (۱) مشاهده می شود، میانگین استحکام کششی نهایی (UTS) نمونهها قبل و بعد از فرایندهای اکستروژن و عملیات حرارتی T6 از قبل و بعد از فرایندهای اکستروژن و عملیات حرارتی T6 از Al-3Mg-2.5Cu-xEr عمدتا به شکل، اندازه، توزیع دانه های -α Al-3Mg-2.5Cu-xEr دازد [10].

استحکام کشش نهایی آلیاژ پایه و نمونه های اصلاح شده با Er	جدول ۱
تحت شرايط مختلف	

Er %	As-cast	As-cast- T6	As-cast- extrusion	As-cast- extrusion-T6
0	230	460	275	510
0.5	245	480	303	530
1	270	500	317	580
1.5	242	475	300	528
2	235	468	278	512

علت اصلى اين بهبود، به احتمال زياد اندازه كوچكتر دانه ها است که به توزیع یکنواخت تر و کوچکتری از فازهای ثانویه (بین فلزی ها) در آلیاژ Al-3Mg-2.5Cu-xEr-T6 منجر می شـود. مشـخص اسـت که طبق نظریه ی هال-پچ هرچه دانه ها ريزتر باشند، استحكام بيشتر است [11]. ولي به واسطه ي مکانیسم های متعدد حاکم بر استحکام بخشی آلیاژهای Al 5xxx، به ویژه اندازه، وابسـتگی اسـتحکام به اندازه ذره روشــن نیست. ترکیبات بین فلزی ترد هستند و به عنوان محل های مهم جوانه زنی ترک حین بارگذاری شناخته می شوند. گزارش های متعددی نشان داده اند که رسوبات همدوس یا نیمه همدوس متاپايدار η حين عمليات پير سازي تشكيل مي گردند [12, 13]. استحکام نهایی نمونه های ریخته گری شده بدون افزودن آمیژان و فرآيند اكسـتروژن، مقدار كمي دارد كه به دليل وجود تخلخل های انقبا ضی داخل دانه ها و مرزدانه ها ست. با توجه به فرایند اکستروژن، مقادیر UTS نمونه ها پس از عملیات حرارتی T6 بیشــتر از نمونه های تحت شــرایط دمایی T6 بدون فرایند اكستروژن هست [14].

از طرف دیگر، می توان با رسوب دادن ذرات Al<sub>3</sub>Er پس Al-3Mg-2.5Cu به آلیاژ Al-30 wt% Er

نشریهٔ مهندسی متالورژی و مواد

استحکام آلیاژ پایه را بهبود داد. ذرات میکرو یا نانومتری Al3Er نقش مهمی در مکانیسم استحکام بخشی بازی می کنند. بنابراین، استحکام کششی نهایی آلیاژها با افزودن Er به طرز قابل توجهی افزایش یافت. این عمدتا به دلیل مقاوم سازی توسط ذرات رسوب Al<sub>3</sub>Er است.

### شکست نگاری

شکل (۷) سطوح شکست آلیاژهای ریخته گری را تحت شرایط مختلف نشان می دهد. در شکل (۷) به وضوح مشاهده می شود که صفحات کلیواژ و رگه های پارگی روی تمام سطح شکست آلیاژ اصلاح نشده مشهود هستند.

به واسطه ی اصلاح Er روی یوتکتیک، ناحیه ی صفحات کلیواژ کاهش یافته و تعداد حفره ها افزایش می یابد. در نتیجه، آلیاژ اصلاح شده با wt ٪ 1 از Er حفره های بیشتر و استحکام بالاتری در مقایسه با سایر آلیاژهای اصلاح شده دارد. تحت شرایط اصلاح نشده، سطح ترک عمدتا با صفحه ی کلیواژ پوشیده شده است. به وضوح می توان نتیجه گرفت که میزان تخلخل آلیاژ از طریق استفاده از جوانه زای Er و فرایند اکستروژن به شدت کاهش می یابد. تخلخل ها برای خواص کششی ریخته گری مضر بوده و مطالعات متعددی به تشکیل تخلخل ها و اثرات آن بر خواص کششی پرداخته اند [17–17].



سال سی و پنج، شمارهٔ یک، ۱۴۰۳

٩

محمد علی پور



شکل ۷ سطوح شکست نمونه کشش برای (الف) آلیاژ پایه، (ب) 1 درصد Er (ج) 1 درصد Er بعد از عملیات T6 و (د) 1 درصد Er بعد از عملیات T6 و فرآیند اکستروژن

تقدیر و تشکر

نتيجه گيري

۸. خواص مکانیکی آلیاژهای Al-3Mg-2.5Cu عمدتا به شکل،
۱۱ اندازه رسوبات و اندازه دانه ی α-Al و توزیع فازهای ثانویه

۲. Al-30Er مؤثر در کاهش سایز دانه، تغییر مورفولوژی دندریتی

 ۳. افزایش خواص کششی با افزودن جوانه زای Er به دلیل شکست دانه های A-Al اولیه و تشکیل دانه های α-Al با توزیع یکنواخت تر و توزیع باریک تر فازهای ثانویه است.
۴. درصد بهینه جوانه زای Er در این پژوهش یک درصد وزنی انتخاب شد که در این درصد وزنی از آمیژان، بیشترین خواص

۵. استحکام کششی نهایی آلیاژهای ریخته گری با افزودن Er به طرز قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. این عمدتا به دلیل ریزشدن و یخش یکنواخت فاز یوتکتیک و دندریت a-Al و

مقاوم سازی از طریق ذرات Al<sub>3</sub>Er رسوبی با استفاده از

نتايج زير از اين مطالعه قابل استخراج است:

و ایجاد ریزساختار ریز و یکنواخت است.

ېستگې دارد.

كششى بدست آمد.

مكانيسم اوراوان است.

مراجع

- [1] J. Hirsch, "Aluminium in innovative light-weight car design," *Materails Transaction*, Vol. 52, no. 5, pp. 818-824, (2011). https://doi.org/10.2320/matertrans.L-MZ201132
- [2] T. Dursun, C. Soutis, "Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys," *Materials and Design*, Vol. 56, pp. 862-871, (2014). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002
- [3] A. Haghparast, M. Nourimotlagh and M. Alipour, "Effect of the strain-induced melt activation (SIMA) process on the tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy modified by Al-5Ti-1B grain refiner," *Materials Characterization*, Vol. 71, pp. 6-18, (2012). https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.05.015
- [4] M. Alipour, M. Emamy, "Effects of Al–5Ti–1B on the structure and hardness of a super high strength aluminum alloy produced by strain-induced melt activation process," *Materials and Design*, Vol. 32, pp. 4485-4492, (2011).

https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.044

- [5] M. Alipour, M. Emamy, R. E. Farsani, M. H. Siadati and H. Khorsand, "Effects of a modified SIMA process on the structure, hardness and mechanical properties of Al-12Zn-3Mg-2.5Cu alloy," *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, Vol. 12, pp. 77-88, (2015).
- [6] M. Alipour, B.G. Aghdam, H.E. Rahnoma and M. Emamy, "Investigation of the effect of Al-5Ti-1B grain refiner on dry sliding wear behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy formed by strain-induced melt activation process," *Materials and*

نشریهٔ مهندسی متالورژی و مواد

سال سبي و پنج، شمارهٔ یک، ۱۴۰۳

Design, Vol. 46, pp. 766-775, (2013). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.10.058

[7] M. Alipour, M. Emamy, S.H.S. Ebrahimi, M. Azarbarmas, M. Karamouz and J. Rassizadehghani, "Effects of predeformation and heat treatment conditions in the SIMA process on properties of an Al-Zn-Mg-Cu alloy modified by Al-8B grain refiner," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 4482-4490, (2011).

https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.02.026

- [8] M. Alipour, M. Emamy, M. Azarbarmas and M. karamouz, "Effects of Al-5Ti-1B master alloy on the microstructural evaluation of a highly alloyed aluminum alloy produced by SIMA process," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1252, no. 1, pp. 1060-1072, (2010). https://doi.org/10.1063/1.3457501
- [9] M. Alipour, M. Emamy, J. Rasizadeh, M. Karamouz and M. Azarbarmas, "Effects of Al-8B grain refiner on the structure, hardness and tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy," *TMS Annual Meeting*, Vol. 2, pp. 309-320, (2011). http://dx.doi.org/10.1002/9781118062142.ch38
- [10] G.S. Pradeep Kumar, P.G. Koppad, R. Keshavamurthy and M. Alipour, "Microstructure and mechanical behaviour of in situ fabricated AA6061–TiC metal matrix composites," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 17, no. 3, pp. 535-544, (2017). https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.12.006
- [11] M. Alipour, M. Emamy, J. Rasizadeh, M. Karamouz and M. Azarbarmas, "Effects of Al-5Ti-1B grain refiner on the structure, hardness and tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy," *TMS Annual Meeting*, Vol. 3,pp 833-842, (2011). https://doi.org/10.1002/9781118062173.ch105
- [12] M. Alipour, M. Azarbarmas, F. Heydari, M. Hoghoughi, M. Alidoost and M. Emamy, "The effect of Al-8B grain refiner and heat treatment conditions on the microstructure, mechanical properties and dry sliding wear behavior of an Al-12Zn-3Mg-2.5Cu aluminum alloy," *Materials and Design*, Vol. 38, pp. 64-73, (2012). https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.02.008
- [13] S.S. Mirjavadi, M. Alipour, A.M.S. Hamouda, M.K. Besharati Givi and M. Emamy,"Investigation of the effect of Al-8B master alloy and strain-induced melt activation process on dry sliding wear behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy" *Materials and Design*, Vol. 53, pp. 308-316, (2014).https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.013
- [14] B.M. Afshari, S.S. Mirjavadi, Y.A. Dolatabad, M. Aghajani, M.K.B. Givi, M. Alipour and M. Emamy," Effects of pre-deformation on microstructure and tensile properties of Al—Zn—Mg—Cu alloy produced by modified strain induced melt activation," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, Vol. 26, no. 9, pp. 2283-2295, (2016). https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64349-2
- [16] M. Alipour, M. Emamy, J. Rasizadeh, M. Azarbarmas and M. Karamouz, "Effect of predeformation and heat treatment conditions in the modified SIMA process on microstructural of a new developed super high-strength aluminum alloy modified by A1-8B grain refiner," *TMS Annual Meeting*, Vol. 3, pp. 843-853, (2011). https://doi.org/10.1002/9781118062173.ch106
- [17] M. Alipour, M. Emamy, J. Rasizadeh, M. Karamouz and M. Azarbarmas, "Effects of Al-8B grain refiner on the structure, hardness and tensile properties of a new developed super high strength aluminum alloy," *TMS Annual Meeting*, Vol. 2, pp. 309-320, (2011).http://dx.doi.org/10.1002/9781118062142.ch38

نشریهٔ مهندسی متالورژی و مواد