

اثر آلومینیوم بر رفتار رشد دانه برنج ۳۰-۷۰ حاوی آهن

علی اکبری^۱ و مهدیه جمشیدی جم^۱

۱- مربی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان

Aliakbarif@gmail.com

چکیده

در این تحقیق اثر آلومینیوم بر رفتار رشد دانه برنج ۳۰-۷۰ حاوی ناخالصی آهن مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهند رفتار رشد دانه در دماهای مختلف متفاوت است، به طوری که در دماهای کم به صورت غیرنرمال بوده ولی با افزایش دما نرمال می‌شود. همچنین محدوده دمایی این تغییر رفتار با تغییر مقدار آلومینیوم تغییر می‌کند، به طوری که با افزایش مقدار آلومینیوم این دما افزایش می‌یابد. وقوع رشد دانه غیرنرمال و تحول آن به رشد دانه نرمال در دماهای بالاتر می‌تواند به اثر ممانعت ناخالصی روی حرکت مرز دانه‌ها نسبت داده شود.

واژه‌های کلیدی:

برنج ۳۰-۷۰، رشد دانه غیرنرمال، توزیع اندازه دانه، ممانعت ناخالصی.

۱- مقدمه

رشد دانه فرآیندی است که در طی آن متوسط اندازه دانه مواد چند بلوری افزایش می‌یابد [۱]. در اثر اعمال انرژی گرمایی، مرز دانه‌ها مهاجرت کرده و در نتیجه مساحت مرز دانه در واحد حجم کم می‌شود و انرژی ذخیره شده سیستم کاهش یافته و پایداری ترمودینامیکی افزایش می‌یابد [۲]. فرآیند رشد دانه بعد از تبلور مجدد معمولاً به دو نوع رشد دانه نرمال و غیرنرمال تقسیم می‌شود.

در رشد دانه نرمال، متوسط اندازه دانه به صورت تابعی از زمان و دما به سمت دانه‌های بزرگتر حرکت می‌کند که ناشی از انقباض دانه‌های کوچکتر و رشد دانه‌های با اندازه بزرگتر است. در این رشد توزیع اندازه دانه معمولاً لگ-نرمال^۱ می‌شود و با گذشت

زمان تغییر نمی‌کند [۳]. این نوع رشد دانه به وسیله معادله (۱)

شرح داده می‌شود:

$$r = kt^n \quad (1)$$

r اندازه دانه متوسط در زمان t و k عدد ثابت وابسته به دما و n توان رشد دانه است. اما در حین رشد دانه غیرنرمال، برخی از دانه‌ها به صورت غیریکنواخت رشد کرده و موجب حذف شدن دانه‌های ریزتر می‌شوند که باعث به وجود آمدن توزیع اندازه دانه‌ها، به صورت غیریکنواخت می‌شود [۴].

مشخص کردن دلایل رشد غیرنرمال موضوعی است که هنوز جای بحث دارد هر چند معمولاً عقیده بر این است که برای شروع این پدیده دو شرط باید وجود داشته باشد. ابتدا، رشد دانه باید با مانع روبرو شود و دوم اینکه بعضی دانه‌ها باید هنوز قادر

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژهای به کار رفته.

Material	Fe, %	Al, %	Zn, %	Cu, %
70B-0.3Fe-0.3Al	۰/۳	۰/۳	۲۹	bal.
70B-0.3Fe-0.8Al	۰/۳	۰/۸	۲۷	bal.

شمش های حاصل با ضخامت ۲۰mm به مدت یک ساعت در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد پیشگرم شده و تا ضخامت ۳mm تحت عملیات نورد گرم قرار گرفتند. سپس نمونه های نورد گرم شده به میزان ۴۰٪ کاهش ضخامت، تحت نورد سرد واقع شدند. نمونه هایی به ابعاد ۱۲×۱۰×۱/۸ میلی متر از ورق نهایی بریده شد و در حمام نمک در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد و زمان های مختلف بین ۳ تا ۶۰ دقیقه تحت عملیات آنیل به صورت ایزوترمال قرار گرفتند.

پس از آنیل، نمونه ها به سرعت از حمام نمک خارج و در آب ۲۰ درجه سانتی گراد کوئنچ شدند. سطح نمونه ها پس از سنباده زنی، الکتروپالیش و الکترواچ شدند. ریزساختار نمونه ها توسط متالوگرافی نوری و الکترونی مطالعه گردید و برای هر نمونه مساحت دانه ها به عنوان پارامتر اندازه دانه توسط آنالیز تصویری اندازه گیری شد. سپس مساحت اندازه گیری شده برای

هر دانه به شعاع دایره معادل آن، $r_A = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$ ، تبدیل گردید.

۳- نتایج و بحث

همان طور که در شکل (۱-الف) آورده شده است ریزساختار همه نمونه های آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al آنیل شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد شامل زمینه ای از دانه های ریز و همچنین شامل دانه های غیرنرمال است. ریزساختار نمونه های آنیل شده در دمای ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد مطابق با شکل های (۱-ب) تا (۱-د) حاوی زمینه ای از دانه های با اندازه تقریباً یکنواخت است و دانه های بزرگ مشاهده نمی شوند.

در مقایسه، مطابق با شکل (۲-الف) تا (۲-ج)، ریزساختار نمونه های آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al آنیل شده در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتی گراد حاوی دانه های غیرنرمال هستند. شکل (۲-د) ریزساختار نمونه های آنیل شده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد را نشان می دهد.

همان طور که در شکل مشاهده می شود، تمامی نمونه های آنیل شده در این دما شامل زمینه ای از دانه های با اندازه تقریباً یکنواخت است و دانه های بزرگ و غیرنرمال مشاهده نمی شوند.

به رشد باشند. از جمله دلایل پیشنهاد شده اثر عناصر حل شده^۲ در یک ماده می باشد [۳].

این اتم های حل شده معمولاً روی عیوب کریستالی مانند مرز دانه ها جدایش پیدا می کنند. لذا حتی مقدار خیلی کمی از این عناصر باعث تغییر رفتار دینامیکی این عیوب شده و در نهایت خواص ماکروسکوپی ماده را تغییر می دهند [۵]. عناصر مختلفی به منظور ایجاد خواص معین و کاربردهای ویژه به برنج اضافه می گردند. علاوه بر این ممکن است عناصر ناخالصی دیگری نیز با توجه به نحوه فرآوری برنج ها حضور داشته باشند.

از جمله مسائل موجود، می توان به کاهش شکل پذیری برنج، ناشی از حضور ناخالصی آهن اشاره کرد. بدین لحاظ تحقیقات متعددی به منظور بررسی اثر آهن بر خواص برنج ها و روش های کاهش میزان و اثر آن با استفاده از عناصر افزودنی به عمل آمده است [۶-۸].

با توجه به اهمیت رفتار رشد دانه در فلزات، هم از لحاظ تکنولوژیکی و هم از لحاظ علمی، در این تحقیق رفتار رشد دانه برنج ۳۰-۷۰ آهن دار که به آن عنصر آلومینیوم اضافه شده است، بررسی شده است. هدف، شناخت نحوه اثرگذاری عناصر آلیاژی بر پدیده رشد دانه در این آلیاژ است.

۲- روش تحقیق

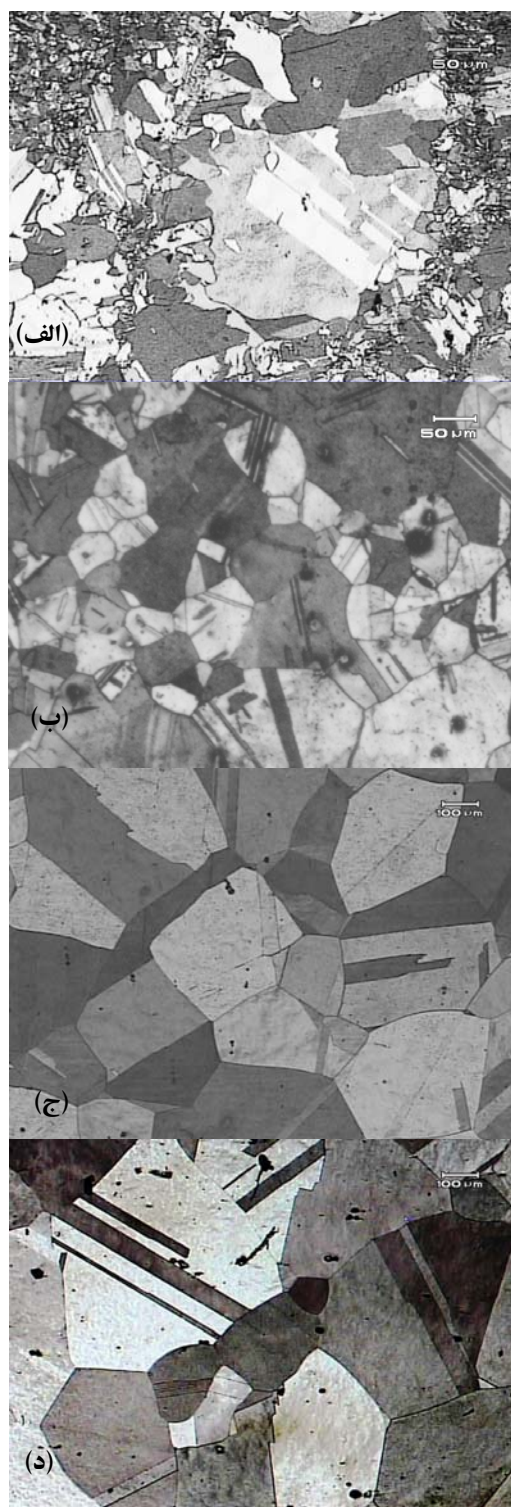
در این تحقیق، دو آلیاژ برنج ۳۰-۷۰ حاوی ۰/۳ درصد آهن با درصد های متفاوت از آلومینیوم به میزان ۰/۳ درصد و ۰/۸ درصد استفاده شده است. ترکیب شیمیایی این آلیاژها در جدول (۱) آمده است. عملیات ذوب و آلیاژسازی در داخل بوتله گرافیتی و به وسیله یک کوره القایی تحت اتمسفر معمولی انجام شده و نمونه ها در قالب ماسه ای ریخته گری شد.

شکل (۳) توزیع اندازه دانه نرماله شده به دست آمده در دماهای ۷۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶۰ دقیقه برای آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al را نشان می دهد. همان طور که دانه های غیر نرمال در شکل (۱) دیده می شوند، حضور این دانه ها باعث گستردگی توزیع اندازه دانه نرماله شده در دماهای ۷۰۰ درجه سانتی گراد شده است، از مقایسه شکل (۳-الف) با شکل (۳-ب) مشاهده می شود، توزیع اندازه دانه نرماله شده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد به صورت یکنواخت بوده و کشیدگی سمت راست توزیع به علت عدم حضور دانه های غیر معمول دیده نمی شود. همه نمونه های آنیل شده در این دما و دماهای ۸۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد چنین توزیع اندازه دانه ای دارند که با گذشت زمان شکل توزیع نیز تقریباً تغییر نمی کند.

شکل (۴) توزیع اندازه دانه نرماله شده به دست آمده در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۰ دقیقه برای آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al را نشان می دهد. همان طور که در شکل های (۳) و (۴) نشان داده شد، حضور دانه های غیر نرمال باعث گستردگی توزیع اندازه دانه نرماله شده در دماهای ۷۰۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی گراد شده است. شکل (۴-د) توزیع اندازه دانه نرماله شده به دست آمده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد و زمان یک دقیقه را نشان می دهد که توزیع اندازه دانه به صورت یکنواخت بوده و کشیدگی سمت راست توزیع به علت عدم حضور دانه های غیر معمول دیده نمی شود. همه نمونه های آنیل شده در این دما چنین توزیع اندازه دانه ای دارند که با گذشت زمان شکل توزیع نیز تقریباً تغییر نمی کند.

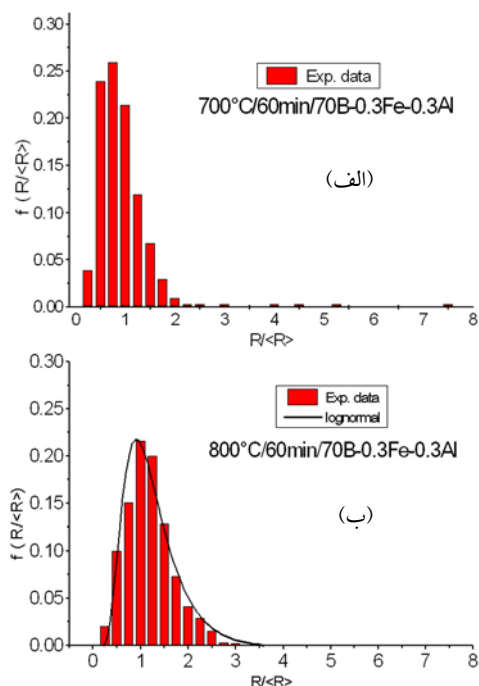
تغییر اندازه دانه در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al در دماهای ۷۰۰ درجه سانتی گراد از رابطه سیستماتیک پیروی نمی کند. شکل (۵-الف) تغییرات اندازه دانه در زمان های مختلف و دماهای ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد را نشان می دهد.

همان طور که از این شکل پیداست تغییرات اندازه دانه به صورت پارابولیک است. تغییر اندازه دانه در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al در دماهای ۷۰۰، ۸۰۰ و ۸۵۰ درجه سانتی گراد از رابطه سیستماتیک پیروی نمی کند.



شکل (۱): ریزساختار آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al آنیل شده

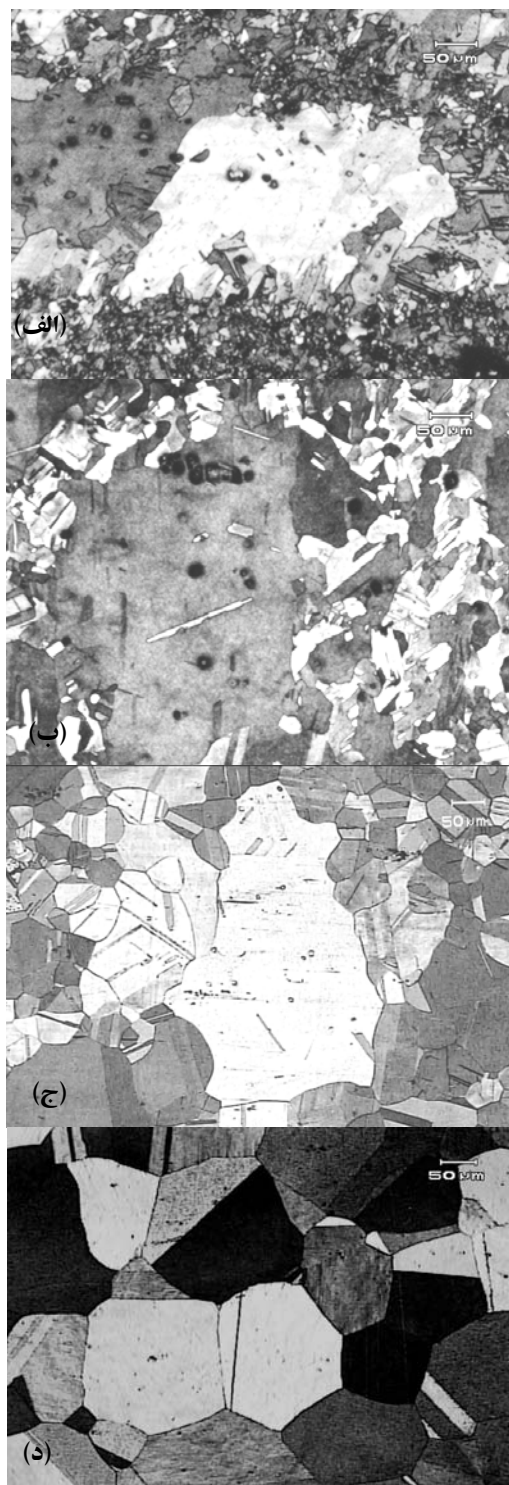
- (الف) در دمای ۷۰۰°C به مدت ۱۰ دقیقه
 (ب) در دمای ۸۰۰°C به مدت ۶۰ دقیقه
 (ج) در دمای ۸۵۰°C به مدت ۱۵ دقیقه
 (د) در دمای ۹۰۰°C به مدت ۳ دقیقه.



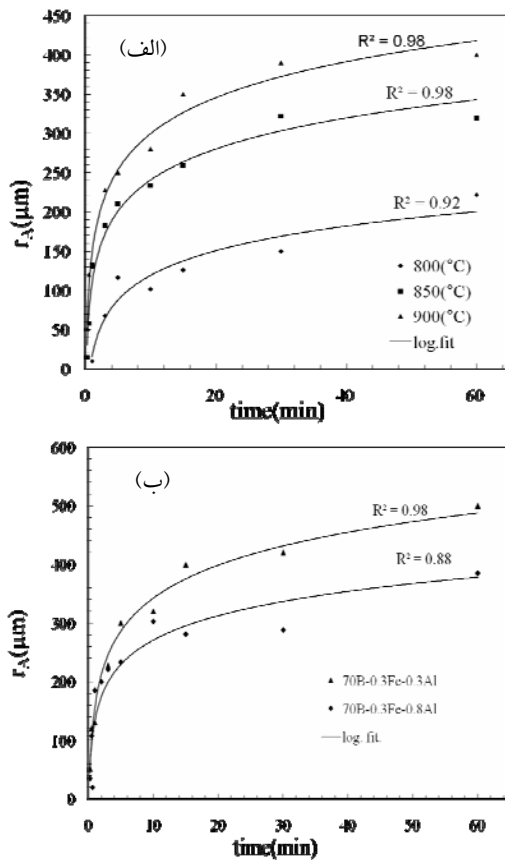
شکل (۳): توزیع اندازه دانه نمونه‌های آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al آنیل شده
 (الف) در دمای ۷۰۰°C به مدت ۶۰ دقیقه
 (ب) در دمای ۸۰۰°C به مدت ۶۰ دقیقه.

شکل (۵-ب) تغییر اندازه دانه با زمان در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد که با تغییر اندازه دانه در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، تغییر اندازه دانه با زمان در این دما به صورت پارابولیک است و در مقایسه با آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al تغییر با نرخ کمتری صورت گرفته است.

شکل (۱-الف) رشد دانه غیرنرمال دانه‌های گوس^۳ حاوی دانه‌های جزیره مانند^۴ [۵، ۹-۱۱] و زمینه‌ای از دانه‌های ریز در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al آنیل شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه را نشان می‌دهد. در این آلیاژ، با توجه به تغییر توزیع اندازه دانه نرماله شده، با افزایش دمای آنیل، مقدار غیرنرمالی ریزساختار کاهش می‌یابد به طوری که در دماهای بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد توزیع‌های تجربی به دست آمده در این آلیاژ با تابع توزیع لگ-نرمال مطابقت دارد و



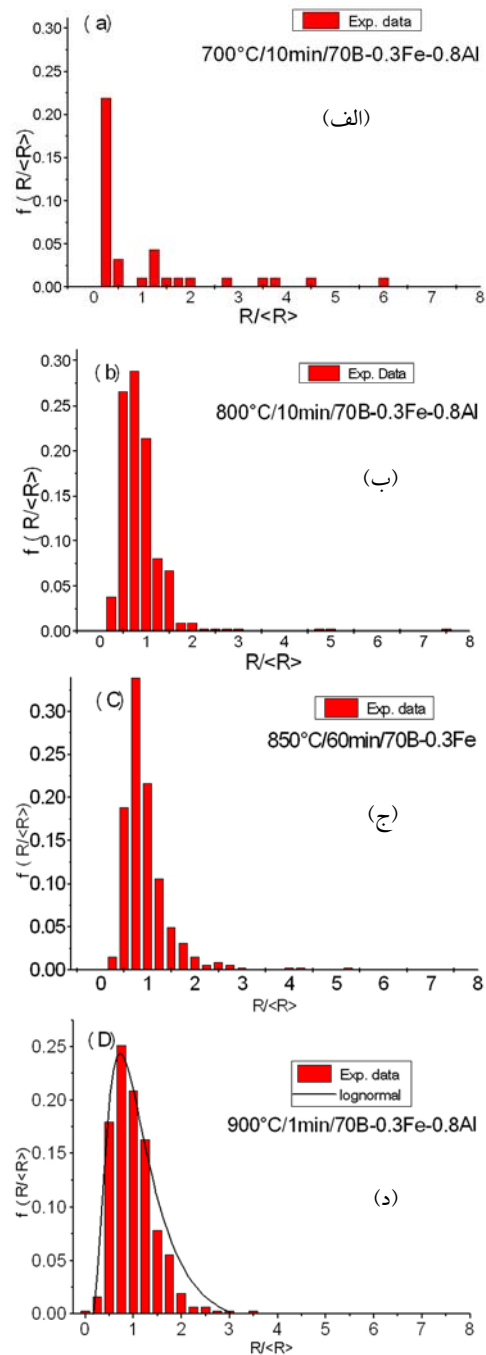
شکل (۲): ریزساختار آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al آنیل شده
 (الف) در دمای ۷۰۰°C به مدت ۳۰ دقیقه
 (ب) در دمای ۸۰۰°C به مدت ۳ دقیقه
 (ج) در دمای ۸۵۰°C به مدت ۶۰ دقیقه
 (د) در دمای ۹۰۰°C به مدت ۱ دقیقه.



شکل (۵): الف) تغییر اندازه دانه آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al بر حسب زمان در دماهای ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۰۰°C، ب) تغییر اندازه دانه 70B-0.3Fe-0.8Al بر حسب زمان در دمای ۹۰۰°C و مقایسه آن با آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al، شعاع معادل مساحت دانه.

ضریب تطبیق تابع لگ-نرمال با داده‌های تجربی بالاتر از ۰/۹ است که این نشان‌دهنده وقوع رشد دانه نرمال است. رفتار رشد دانه در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al اندکی متفاوت است. به طوری که همانند آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al در دماهای کم رفتار رشد دانه به صورت غیرنرمال بوده و با افزایش دما رفتار رشد دانه به صورت نرمال تغییر می‌یابد ولی محدوده دمایی برای تغییر رفتار آن با آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al متفاوت است و در دماهای بالاتر یعنی ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد.

وقوع رشد دانه غیرنرمال و تحول آن به رشد دانه نرمال در دماهای بالا در این آلیاژها می‌تواند به اثر ممانعت ناخالصی روی حرکت مرز دانه‌ها نسبت داده شود. این مکانیزم فرض می‌کند سرعت مرز دانه‌ها به وسیله نفوذ عناصر حل شده به پشت مرز



شکل (۴): توزیع اندازه دانه نمونه‌های آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al آتیل شده الف) در دمای ۷۰۰°C و به مدت ۱۰ دقیقه، ب) در دمای ۸۰۰°C و به مدت ۱۰ دقیقه، ج) در دمای ۸۵۰°C و به مدت ۶۰ دقیقه و د) در دمای ۹۰۰°C و به مدت ۱ دقیقه.

دماهای بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتی گراد برای آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al و در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد برای آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al، دانه‌های غیرنرمال وجود ندارند به نظر می‌رسد با افزایش دما و با توجه به غلظت ناخالصی‌ها در هر آلیاژ، نیرو محرکه برای رشد دانه افزایش می‌یابد و لذا تحرک پذیری مرزها مستقل از اتم‌های ناخالصی می‌شوند و بنابراین تقریباً همه مرزها شرایط یکسانی پیدا کرده و دانه‌های غیرنرمال به وجود نمی‌آیند.

در نمونه‌های آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al آویل شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد، رشد دانه غیرنرمال رخ می‌دهد. معادله رشد دانه نرمال، معادله (۲)، برای توصیف رشد دانه غیرنرمال، مناسب نیست [۳ و ۱۰].

رشد دانه در دماهای ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد با توجه به گسترش توزیع اندازه دانه، نرمال است. لذا سینتیک رشد دانه در این آلیاژ از معادله (۱) پیروی می‌کند.

شکل (۶-الف) تغییرات $\text{Log}(r_A)$ را بر حسب $\text{Log}(t)$ در دماهای مختلف برای آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al نشان می‌دهد. مقادیر توان رشد به دست آمده در این دماها متفاوت است. به طوری که می‌توان تغییرات اندازه دانه را در دو محدوده زمانی تقسیم کرد.

توان رشد در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد از ۱/۷۴ تا ۰/۳۵، در دمای ۸۵۰ درجه سانتی گراد از ۱/۵۸ تا ۰/۲۲ و در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد از ۱/۲۲ تا ۰/۳ تغییر می‌کند. توان رشد در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al در این دماها بزرگتر از مقدار ایده‌آل $n = 0.5$ است. محاسبه توان رشد به وسیله معادله (۱) و تغییر در توان رشد، در فلزات تصفیه موضعی شده و فلزات رقیق نیز گزارش شده است [۱۳ و ۱۴].

شکل (۶-ب) تغییرات $\text{Log}(r_A)$ را بر حسب $\text{Log}(t)$ در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al و برای مقایسه، آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al را نشان می‌دهد. توان رشد دانه برای آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al نیز در دمای ۹۰۰ درجه سانتی گراد از ۱/۲۸ تا ۰/۱۸ تغییر می‌کند. این موضوع می‌تواند

کنترل می‌شود. یک مرز با سرعت (v) که متناسب با فشار خالص $(p = \sum P_i)$ روی مرز است، حرکت می‌کند. به طور کلی اگر فرض شود که سرعت با فشار رابطه مستقیم دارد، ثابت تناسب برابر با تحرک پذیری (M) مرز می‌شود و بنابراین:

$$v = MP \quad (2)$$

اگر تحرک پذیری مرز به وسیله اتم‌های حل شده کنترل شود، حرکت مرزها به اتمسفر مرز بستگی پیدا کرده و با افزایش اتم‌های ناخالصی، سرعت مرز به وسیله نفوذ این اتم‌ها کنترل می‌شود و کاهش می‌یابد. در نیرو محرکه‌های زیاد و غلظت ناخالصی کم، مرزها می‌توانند از اتمسفر خود فرار کرده و تحرک پذیری مرز مستقل از جزئیات مرز می‌شود [۲، ۳ و ۱۲].

با توجه به این مطلب در سیستم‌های چند بلوری مانند این آلیاژها وقتی متوسط اندازه دانه خیلی بزرگ است، نیرو محرکه کوچک بوده و تمام مرز دانه‌ها با ممانعت ناخالصی‌ها به طور آهسته مهاجرت کرده و رشد دانه نرمال رخ می‌دهد. از طرف دیگر وقتی متوسط اندازه دانه‌ها کوچک باشد، نیرو محرکه زیاد بوده، تمام مرز دانه‌ها بدون ممانعت ناخالصی‌ها به طور سریع مهاجرت کرده و دوباره رشد نرمال رخ می‌دهد.

وضعیت بحرانی جایی است که نیرو محرکه برای بخشی از دانه‌ها زیاد و برای بخشی دیگر کم است. نیرو محرکه رشد برای دانه‌ای با شعاع r_i تقریباً برابر $\frac{1}{r_i} - \frac{1}{\langle r_i \rangle}$ است. این نشان می‌دهد یک دانه بزرگ که با دانه‌های کوچکتر احاطه شده است دارای نیرو محرکه بیشتری برای رشد بوده و می‌تواند بدون کنترل ممانعت ناخالصی رشد کند و از طرف دیگر دانه‌های ریز که با ممانعت ناخالصی‌ها روبرو هستند، سرعت رشد کمتری خواهند داشت لذا در این شرایط رشد دانه غیرنرمال رخ می‌دهد [۵]. با توجه به این مطلب به نظر می‌رسد وجود عناصر آلیاژی آهن و آلومینیوم باعث گردیده که دانه‌ها با سرعت کندتری رشد کنند و مشاهده دانه‌های غیرنرمال هم تأثیر عناصر آلیاژی بر جلوگیری از حرکت مرز دانه را به صورت ناقص نشان می‌دهد.

همان‌طور که اشاره شد در این آلیاژها با افزایش دمای آویل، مقدار غیرنرمالی ریزساختار کاهش می‌یابد به طوری که در

ممانعت ناخالصی‌ها، کنترل‌کننده مهاجرت مرز دانه است و نرخ رشد کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه گیری

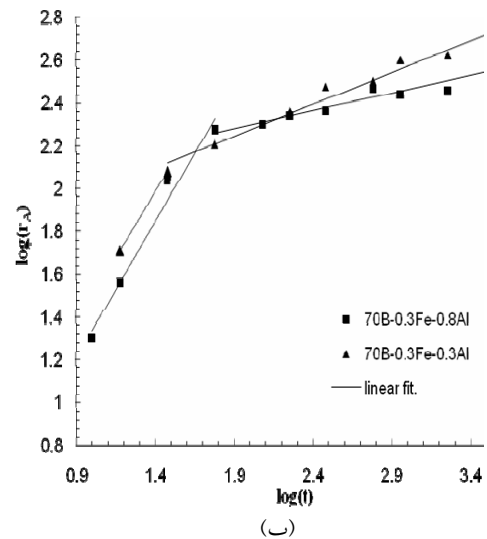
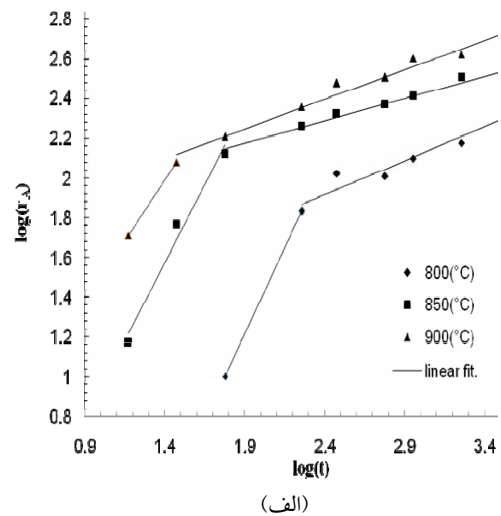
ساختار نمونه‌های آنیل شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های مختلف از هر دو آلیاژ حاوی دانه‌های گوس به همراه دانه‌های جزیره مانند و زمینه‌ای از دانه‌های ریز است. ولی با افزایش دمای آنیل، مقدار غیرنرمالی ریزساختار کاهش می‌یابد به طوری که در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al در دماهای ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد رشد دانه به صورت نرمال است. وقوع رشد دانه غیرنرمال و تحول آن به رشد دانه نرمال در دماهای بالا در این آلیاژ می‌تواند به اثر ممانعت ناخالصی روی حرکت مرز دانه‌ها نسبت داده شود. با توجه به مطابقت سینتیک رشد دانه با قانون پارابولیک در محدوده دمایی که رشد دانه نرمال است، مقدار توان رشد در این دماها محاسبه گردید. مقادیر توان رشد دانه در زمان‌های مختلف متفاوت است و می‌توان آن را به دو محدوده زمانی تقسیم کرد. تغییرات آن برای آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد از ۱/۷۴ تا ۰/۳۵، در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد از ۱/۵۸ تا ۰/۲۲ و در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد از ۱/۲۲ تا ۰/۳ تغییر می‌کند. توان رشد به دست آمده در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al از مقدار ۱/۲۸ تا ۰/۱۸ تغییر می‌کند.

۵- تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان صورت گرفته است که بدینوسیله تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

۶- مراجع

- [1] H. V. Atkinson, "Theories of Normal Grain Growth in Pure Single Phase Systems", Acta Metallurgica, 36, pp. 469-491, 1988.
- [2] F. J. Gil and J. M. Guilemany, "Effect of Cobalt Addition on Grain Growth Kinetics in Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys", Intermetallics, No. 6, pp. 445-450, 1998.



شکل (۶): تغییرات $\text{Log}(r_n)$ بر حسب تابعی از $\text{Log}(t)$ ، الف) در دمای ۸۰۰، ۸۵۰ و ۹۰۰°C در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al (ب) در دمای ۹۰۰°C در آلیاژ 70B-0.3Fe-0.8Al و مقایسه آن با آلیاژ 70B-0.3Fe-0.3Al در همان دما.

به وسیله کنترل مهاجرت مرز دانه به وسیله ناخالصی، مدل کان [۱۵]، تفسیر شود. در محدوده زمانی کم، با توجه به کوچک بودن اندازه دانه، نیرو محرکه برای رشد دانه زیاد بوده و نیرو محرکه نسبت به سرعت مرز دانه غیرخطی است و در این شرایط مهاجرت مرز دانه مستقل از ناخالصی‌ها می‌شود. در محدوده زمانی زیاد با افزایش اندازه دانه، نیرو محرکه کاهش یافته و نیرو محرکه نسبت به سرعت مرز دانه خطی می‌شود. در این حالت

- [11] N. Maazi, N. Rouag, A. L. Etter, R. Penelle and T. Baudin, "Influence of Neighborhood on Abnormal Goss Grain Growth in Fe-3% Si Steels: Formation of Island Grains in the Large Growing Grain", Scripta Materialia 55, pp. 641-644, 2006.
- [12] F. J. Gil, J. A. Picas, J. M. Manero, A. Forn and J. A. Planell, "Effect of the Addition of Palladium on Grain Growth Kinetics of Pure Titanium", Journal of Alloys and Compounds, No. 260, pp. 147-152, 1997.
- [13] J. P. Drolet and A. Galibois, "Altering the Time Cycle of Heat Treatment by Preannealing Prior to Grain Growth", Metallurgical Transactions, No. 2, pp. 53-64, 1971.
- [14] R. A. Vandermeer and H. Hu, "On the Grain Growth Exponent of Pure Iron", Acta Metallurgica and Materialia, 42, No. 9, pp. 3071-3075, 1994.
- [15] J. W. Cahn, "The Impurity-drag Effect in Grain Boundary Motion", Acta Metall, 10, pp. 789-798, 1962.
- [3] B. Ralph, "Grain growth", Materials Science and Technology A, 6, pp. 1139-44, 1990.
- [4] F. J. Humphreys and M. Hatherly, "Recrystallization and Related Annealing Phenomena", Elsevier Science Ltd, Oxford, 1995.
- [5] S. G. Kim and Y. B. Park, "Grain Boundary Segregation, Solute Drag and Abnormal Grain Growth", Acta Materialia, 56, 15, pp. 3739-3753, 2008.
- [۶] م. فاضلی، ر. محمودی و م. شیخ شهاب‌افقی، "تأثیر سیلیسیم بر شکل‌پذیری ورق برنج ۷۰-۳۰ آهن‌دار"، هشتمین کنگره انجمن مهندسين متالورژی ایران، ص ص. ۱۲۴۷-۱۲۵۴، ۱۳۸۳.
- [7] ASM Handbook, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials", Printed in U. S. A., 1990.
- [8] M. Aghaie-Khafri and A. Mohebbati-Jouibari, "Thermomechanical Treatment of 70/30 Brass Containing Iron Impurity", Journal of Materials Science, 41, pp. 7585-7589, 2006.
- [9] P. R. Rios, "On the Stability of Small Grains Imbedded Within Abnormally Large Grains", Scripta Materialia, No. 44, pp. 991-993, 2001.
- [10] N. Rajmohan and J. A. Szpunar, "An Analytical Method for Characterizing Grain Boundaries Around Growing Goss Grains During Secondary Recrystallization", Scripta Materialia, No. 44, pp. 2387-2392, 2001.

۷- پی‌نوشت

- 1- Log-normal
- 2- Solute elements
- 3- Goss grains
- 4- Island grains