

تأثیر افزودن منگنز بر فرآیند رشد در آلیاژ برنج ۳۰-۷۰ متبلور شده

اعظم زمانی^۱، غلامحسین اکبری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار، دانشگاه شهید باهنر کرمان

Zamani_a007@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق نمونه آلیاژ 70B+0.25%Mn تحت شرایط اتمسفر کنترل شده به روش ریخته‌گری تبریدی ثقلی در قالب مسی تهیه گردید. سپس تسمه‌هایی به ابعاد ۵×۱۰×۵ میلی‌متر تهیه و بر روی تمامی نمونه‌ها با استفاده از نورد سرد کاهش سطح مقطع برابر ۶۵٪ اعمال گردید. پس از نورد، نمونه‌ها در حمام نمک در دماهای ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های مختلف بین ۲ دقیقه تا ۱ ساعت تحت عملیات آنیل هم‌دما قرار گرفتند و سپس در آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد سرد شدند. بررسی‌های ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری انجام شد و برای محاسبه اندازه دانه، مساحت حدود ۴۵۰-۲۰۰ دانه برای هر نمونه به وسیله دنبال کردن مرز دانه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Clemex اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از محاسبه اندازه دانه و انرژی اکتیواسیون نشان داد که حضور منگنز با تأثیر بر اتمسفر مرزهای دانه و نیز کاهش انرژی اکتیواسیون موجب تسریع فرآیند رشد دانه در آلیاژ برنج ۳۰-۷۰ خواهد شد. انرژی اکتیواسیون رشد دانه برابر با $Q_{gg}=22/35$ KJ/mol به دست آمده است. درحالی‌که این انرژی برای برنج ۳۰-۷۰ در محدوده دمایی ۷۰۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۱۷۱ KJ/mol است.

واژه‌های کلیدی:

برنج ۷۰B، آنیل، تأثیر منگنز، انرژی اکتیواسیون، رشد دانه.

۱- مقدمه

آلفا یا برنج‌های تک فاز، طیف گسترده‌ای از برنج‌ها با خواص متنوع را شامل می‌شوند که قابلیت کارسرد بالایی دارند ولی قابلیت کارگرم آنها نسبت به برنج‌های دو فازی کم است. در نتیجه عمده فرآیندهای شکل‌دهی این آلیاژها در صنعت از طریق اعمال کارسرد صورت می‌گیرد و از این رو عملیات تبلور مجدد بخش جدایی‌ناپذیر این گونه صنایع محسوب می‌شود.

رشد دانه به‌عنوان سومین مرحله از فرآیند تبلور مجدد نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل خواص مکانیکی فلز یا آلیاژ بر عهده

برنج‌ها آلیاژهای تشکیل‌یافته از مس و روی هستند که از کاربردهای مرسوم این آلیاژ می‌توان به کاربردهای الکتریکی، معماری، ساخت ابزارآلات، مهمات و لوله‌های صنعتی اشاره نمود [۱]. گرچه ساختار کریستالی مس و روی یکسان نیست و این دو عنصر در یکدیگر حلالیت کامل ندارند، ولی حلالیت روی در مس قابل توجه است. مهم‌ترین فازی که در دی‌گرام مس و روی مشاهده می‌شود محلول جامد α می‌باشد. برنج‌های

$$P = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (4)$$

که در این رابطه γ انرژی آزاد مرز دانه، r_1 و r_2 شعاع‌های اصلی انحنا سطح هستند. با در نظر گرفتن فرضیات تئوری و پس از انجام محاسبات نهایتاً رابطه زیر به دست آمد:

$$n = 0.5 \bar{R} = Kt^n \quad (5)$$

که در آن n توان رشد دانه و K پارامتری است که طبق رابطه زیر بستگی به دما دارد.

$$K = A \exp\left(-\frac{Q_{gg}}{RT}\right) \quad (6)$$

در جایی که Q_{gg} انرژی اکتیواسیون رشد دانه، A ثابت و T دمای مطلق برحسب درجه کلوین است. بنابراین معادله رشد پارابولیک به صورت زیر خواهد بود [۲ و ۳]:

$$\bar{R}_t = At^n \exp\left(-\frac{Q_{gg}}{RT}\right) \quad (7)$$

۱-۳- تأثیر عناصر آلیاژی در فرآیند رشد دانه

یکی از مهم‌ترین مسائل در فرآیند رشد دانه، اثر اتم‌های خارجی موجود در شبکه با مرز دانه‌ها است. اتم‌های خارجی می‌توانند بر روی حرکت مرز دانه‌ها اثر ممانعت‌کنندگی داشته باشند [۲، ۳ و ۴]. در حقیقت تأثیر عناصر آلیاژی را می‌توان مشابه اثر اتم‌های ناخالصی بر روی نابجائی‌ها در نظر گرفت.

در صورت وجود اختلاف بین اندازه اتم‌های بیگانه و شبکه اصلی در اطراف هر اتم بیگانه یک میدان الاستیک در شبکه ایجاد خواهد شد. از طرفی به دلیل این که در مرز دانه‌ها از نظر نظم اتمی نسبت به داخل دانه انطباق کمتری وجود دارد، اتم خارجی می‌تواند به همسایگی مرز دانه منتقل شده تا از میزان انرژی کرنشی مرز و شبکه اطراف اتم خارجی کاسته شود. در حقیقت همانند اتمسفر نابجائی، در اینجا نیز اتمسفر مرز دانه به وجود می‌آید. نتایج تجربی نشان داده‌است که این اتمسفر می‌تواند به طور مؤثری حرکت مرز دانه را با مشکل مواجه کند. مرز برای حرکت باید این اتمسفر را نیز به دنبال خود بکشد. همین نکته سبب به تأخیر افتادن حرکت مرز می‌گردد. هر چه یک عنصر، شبکه را بیشتر تحت اعوجاج قرار دهد، اثر بیشتری بر روی نرخ رشد دانه خواهد داشت [۳].

دارد. در حقیقت رشد در دانه نتیجه مهاجرت مرز دانه رخ می‌دهد و فرآیندی است که در آن میانگین اندازه دانه در یک ماده پلی کریستال در اثر مهاجرت مرز دانه‌ها افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه مقدار کل مرز دانه‌ها در ماده پلی کریستال کاهش می‌یابد [۲ و ۳].

بررسی‌های متعددی برای شناخت هر چه بیشتر عوامل مؤثر بر این فرآیند صورت گرفته و تئوری‌های بسیاری در این خصوص ارائه شده‌است که تئوری‌های موجود در خصوص سینتیک رشد دانه را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود:

۱-۱- سینتیک رشد دانه پارابولیک

این رابطه تجربی ابتدا توسط بیک [۲] و همکارانش مطرح شد. مقادیر آزمایشی به دست آمده نشان می‌داد که افزایش اندازه دانه به صورت معادله پارابولیک زیر با زمان آنیل رابطه دارد:

$$d = Kt^m \quad (1)$$

که در آن d اندازه متوسط دانه، t زمان آنیل، K و m مقادیر ثابت وابسته به دمای آنیل و ترکیب ماده هستند. این معادله فقط زمانی با داده‌ها همخوانی دارد که اندازه دانه برای شروع ($t = 0$)، نسبت به دانه‌هایی که محاسبه می‌شوند خیلی کوچک باشد. از آنجا که در عمل همیشه این رابطه صادق نیست بنابراین شکل عمومی‌تر این معادله به صورت زیر ارائه شد:

$$\frac{1}{d^m} - \frac{1}{d_0^m} = Kt \quad (2)$$

که در رابطه جدید d_0 اندازه دانه اولیه قبل از رشد است.

۱-۲- آنالیز بورک و ترنول

این روش رشد دانه را با در نظر گرفتن فرضیاتی مانند مهاجرت مرزها به صورت انتقال اتم‌ها در عرض مرز تحت نیروی محرکه انرژی سطحی مرز، مدل‌سازی می‌کند. مرزها برای کاهش سطح مرز دانه‌ها و انرژی مربوط به آن، تمایل دارند به سمت مرکز انحنا مهاجرت کنند. با این فرضیات سرعت مهاجرت مرز دانه، v برای شرایط ایزوترمال برای مواد خالص به صورت زیر ارائه شد:

$$v = \mu P \quad (3)$$

در جایی که μ تحرک پذیری و P به صورت زیر تعیین می‌شود:

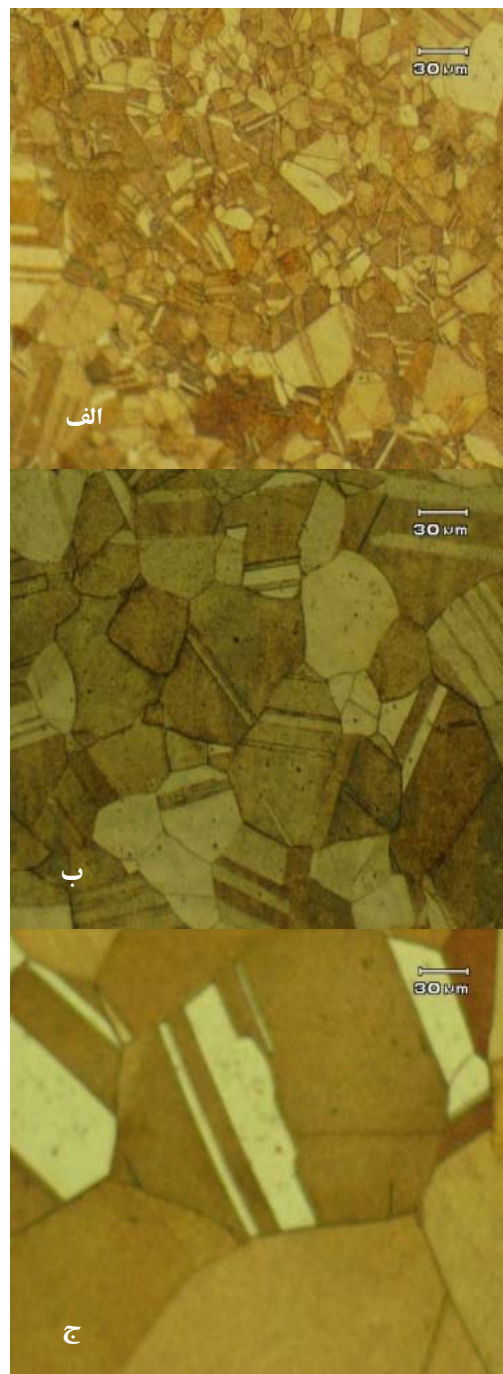
هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر حضور منگنز در آلیاژ برنج ۳۰-۷۰ بر فرآیند رشد دانه بود که به این منظور با استفاده از روابط موجود جهت محاسبه اندازه دانه و انرژی اکتیواسیون، نقش این عنصر در تسریع فرآیند رشد دانه ارزیابی گردید.

۲- روش تحقیق

برای تولید نمونه‌های آلیاژی، عملیات ذوب و آلیاژسازی در بوتله گرافیتی با کوره موفلی مدل اکسایتون تحت شرایط اتمسفر کنترل شده با گاز آرگون و به روش ریخته‌گری تبریدی ثقلی در قالب مسی (با ابعاد $250 \times 80 \times 80$ میلی‌متر) انجام شد. از نمونه‌های ریخته شده تسمه‌های مسی با ابعاد $5 \times 10 \times 5$ میلی‌متر تهیه و جهت حصول اطمینان از رسیدن به ترکیب‌های شیمیایی مورد نظر، آنالیز شیمیایی نمونه‌ها با استفاده از روش کوانتومتری انجام شد. سپس بر روی تمامی نمونه‌ها با استفاده از نورد سرد کاهش سطح مقطع ۶۵٪ اعمال گردید، در مرحله بعد نمونه‌هایی به ابعاد $10 \times 10 \times 2$ میلی‌متر از ورق‌های نورد شده بریده و سپس در حمام نمک در دماهای ۶۰۰، ۷۰۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های مختلف بین ۲ تا ۶۰ دقیقه تحت عملیات آنیل هم‌دما قرار گرفتند و سپس در آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد سرد شدند. برای بررسی ریزساختار پس از آماده‌سازی سطحی، نمونه‌ها در محلول اسید فسفریک ۲۵٪ و آب دو بار تقطیر ۷۵٪ اچ شده و توسط میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفتند. برای محاسبه اندازه دانه، مساحت حدود ۲۰۰-۴۵۰ دانه برای هر نمونه به وسیله دنبال کردن مرز دانه‌ها با استفاده از نرم‌افزار clemex اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

جدول (۱) نتایج حاصل از آزمون کوانتومتری روی نمونه‌های ریخته شده را نشان می‌دهد. شکل (۱) تصاویر ریزساختار آلیاژ فوق را در دماهای مختلف آنیل در زمان ۱ ساعت نشان می‌دهد. در تمامی دماها و زمان‌های مورد بررسی دانه‌های هم‌محور شامل دوقلوبی‌ها مشاهده می‌شوند. منگنز در تمامی دماها در زمینه



شکل (۱): ریزساختار آلیاژ 70B+0.25%Mn آنیل شده

- (الف) در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد
 (ب) در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد
 (ج) در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد
 به مدت یک ساعت.

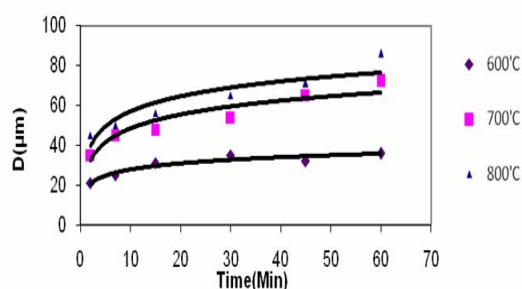
جدول (۱): ترکیب شیمیائی آلیاژ بر حسب درصد وزنی.

ترکیب آلیاژ	Zn	Fe	Mn	Al	Si	Cu
70B+Mn	۳۰/۳	۰/۰۰۳	۰/۲۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۲	Bal.

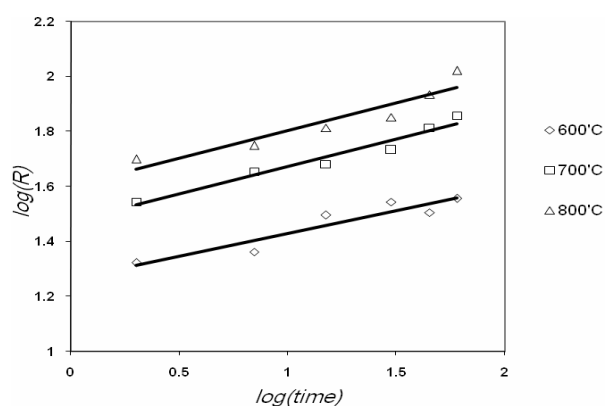
جدول (۲): شعاع متوسط دانه‌ها در نمونه 70B+0.25%Mn در دماها

و زمان‌های مختلف آنیل.

70B+0.25%Mn			
زمان (دقیقه)	شعاع (میکرون) ۶۰۰°C	شعاع (میکرون) ۷۰۰°C	شعاع (میکرون) ۸۰۰°C
۲	۲۱	۳۵	۵۰
۷	۲۵	۴۵	۵۶
۱۵	۳۱/۲۵	۴۸	۶۵
۳۰	۳۵	۵۴	۷۱
۴۵	۳۲	۶۵	۸۶
۶۰	۳۶	۷۲	۱۰۵



شکل (۲): تغییر اندازه دانه آلیاژ 70B+0.25%Mn بر حسب زمان در دماهای مختلف.

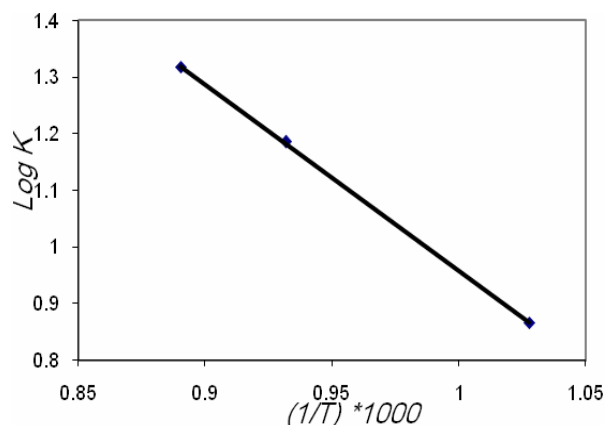


شکل (۳): تغییرات $\log(R)$ بر حسب تابعی از $\log(t)$ در آلیاژ 70B+0.25%Mn در دماهای مختلف آنیل.

چنانچه از دو طرف این رابطه (۵) لگاریتم گرفته شود و تغییرات $\log(R)$ بر حسب $\log(t)$ رسم شود، خط راستی حاصل خواهد شد که شیب آن، n ، توان رابطه (۵) و عرض آن از مبدأ K را ارائه می‌دهد. شکل (۳) تغییرات $\log(R)$ بر حسب $\log(t)$ در دماهای مختلف برای آلیاژ 70B+0.25%Mn را نشان می‌دهد. مقادیر n برای دماها و پارامترهای مختلف در جدول (۳) آورده شده‌است. مطابق با جدول، توان رشد محاسبه شده از اندازه‌گیری مساحت دانه‌ها در دماهای مختلف تقریباً برابر $n = 0.19$ است. در حالت ایده‌آل مقدار توان رشد برابر با 0.5 است [۵]. معمولاً مقادیر تجربی به‌دست آمده برای توان رشد، کمتر از 0.5 است. فولاد ساده کربنی آستنیتی (۰/۸ درصد کربن) محدوده آن بین 0.1 در 760 درجه سانتی‌گراد [۵]، 0.23 در 980 درجه

برنجی حل شده و هیچ آثاری از ذرات فاز ثانویه و بین فلزی مشاهده نمی‌شود. با افزایش دما در زمان‌های یکسان آنیل، اندازه دانه‌ها افزایش یافته‌است. در تمامی دماها و زمان‌ها نایک‌خواختی در اندازه دانه‌ها مشاهده می‌شود و دانه‌های کوچک در کنار دانه‌های بزرگتر وجود دارند. جدول (۲) نتایج محاسبه اندازه دانه میانگین را برای تمام زمان‌ها و دماهای مورد آزمایش نشان می‌دهد.

شکل (۲) نشان‌دهنده تغییرات اندازه دانه در شرایط دمایی یکسان برای نمونه مورد بررسی می‌باشد. با توجه به شکل، می‌توان تغییرات اندازه دانه با زمان فرآیند آنیل را با هم مقایسه کرد. در دمای 600 درجه سانتی‌گراد نرخ رشد دانه در ترکیب مورد بررسی نسبت به دماهای 700 و 800 درجه سانتی‌گراد کمتر است. در دماهای بالاتر آنیل اثر عناصر آلیاژی بر روی فرآیند رشد دانه تا حدی کمتر می‌شود. دلیل آن می‌تواند این باشد که تأثیرپذیری مرز دانه از اتمسفر به‌وجود آمده ناشی از حل شدن عناصر آلیاژی در دماهای بالاتر کاهش می‌یابد [۳].



شکل (۴): تغییرات $\text{Log}(K_n)$ بر حسب $1/T$ و محاسبه انرژی اکتیواسیون رشد دانه در آلیاژ 70B+0.25%Mn.

نکته جالب توجه اینکه وقتی مقدار به دست آمده برای این آلیاژ با مقدار گزارش شده برای برنج ۳۰-۷۰ گزارش شده علی اکبری و بیژن صالحی [۹ و ۱۰] مقایسه می شود، کاهش انرژی اکتیواسیون را نشان می دهد.

۴- نتیجه گیری

- ۱- سینتیک رشد دانه ترکیب مورد بررسی از قوانین رشد دانه نرمال پیروی می کند.
- ۲- توان رشد محاسبه شده در محدوده دمایی ۶۰۰-۸۰۰ درجه سانتی گراد تقریباً ۰/۱۹ می باشد.
- ۳- انرژی اکتیواسیون برای این آلیاژ $Q_{gg} = 22/35 \text{ KJ/mol}$ به دست آمده است که در مقایسه با انرژی اکتیواسیون برنج ۳۰-۷۰ ($Q_{gg} = 171 \text{ KJ/mol}$) مقدار کمتری نشان می دهد.

۵- مراجع

- [1] J. R. Davis, "copper and copper alloy", First Edition, ASM Specialty Handbook, ASM, pp. 485-488, 2001.
- [2] F. J. Humphreys and M. Hatherly, "Recrystallization and Related Annealing phenomena", Elsevier Science and Technology, 1995.
- [3] R. E. Read Hill and R. Abbaschian, "Physical Metallurgy Principles", Third Edition, PWS Publishing Co, 1994.
- [4] G. Gottstein, "Physical Foundation of Materials Science", June 30, Springer, 2005.

جدول (۳): مقادیر توان رشد آلیاژ 70B+0.25%Mn به دست آمده در دماهای مختلف.

دما (°C)	معادله خط راست	n	R ²
۶۰۰	$\text{Log}(R) = 0.1658\text{Log}(t) + 1.2642$	۰/۱۷	۰/۸۸۶۲
۷۰۰	$\text{Log}(R) = 0.1985\text{log}(t) + 1.4743$	۰/۲	۰/۹۵۰۶
۸۰۰	$\text{Log}(R) = 0.2002\text{Log}(t) + 1.6032$	۰/۲	۰/۸۷۸۲

سانتی گراد، برای برنج ۳۰-۷۰ در محدوده دمایی ۵۰۰-۷۰۰ درجه سانتی گراد برابر ۰/۲ [۶] و در محدوده دمایی ۷۰۰-۹۰۰ درجه سانتی گراد تقریباً ۰/۲۶ [۸]، گزارش شده است. مقایسه مقادیر به دست آمده با برنج ۳۰-۷۰ نشان می دهد که افزودن ۰/۲۵ درصد منگنز به آن سبب کاهش مقدار n (توان رشد) شده است [۹ و ۱۰].

با توجه به ثابت بودن توان رشد با تغییر دما، انرژی اکتیواسیون رشد دانه به وسیله معادله (۶) محاسبه می شود. شکل (۴) تغییرات $\log(k)$ بر حسب $1/T$ را نشان می دهد. شیب این خط برابر $-\frac{Q}{R}$ است بنابراین انرژی اکتیواسیون رشد دانه برای این آلیاژ مورد بررسی در محدوده دمایی ۶۰۰-۸۰۰ درجه سانتی گراد برابر $Q_{gg} = 22/35 \text{ KJ/mol}$ است. انرژی اکتیواسیون رشد دانه سیستم های فلزی دیگر مانند مس خالص در محدوده دمایی ۴۲۵-۷۰۰ درجه سانتی گراد برابر ۱۲۰ KJ/mol، Ti- α در محدوده دمایی ۷۰۰-۸۰۰ درجه سانتی گراد برابر با ۱۰۰ KJ/mol، Ti- β در محدوده دمایی ۹۰۰-۱۱۰۰ درجه سانتی گراد برابر با ۲۰ KJ/mol [۵] و برنج ۳۰-۷۰ در محدوده دمایی ۵۰۰-۷۰۰ درجه سانتی گراد برابر ۱۷۱ KJ/mol [۶]، برنج ۳۰-۷۰ در محدوده دمایی ۷۰۰-۹۰۰ درجه سانتی گراد برابر ۳۷/۴ KJ/mol [۸] و آلیاژ سه تایی Cu-Zn-Al حاوی مقادیر مختلف کبالت حدوداً ۳۷-۳۹ KJ/mol [۷]، گزارش شده است. انرژی اکتیواسیون به دست آمده در این آلیاژ در مقایسه با سیستم های فلزی ۳۰-۷۰ خالص مقدار کمتری را نشان می دهد.

- [۹] ع. اکبری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۳.
- [۱۰] ب. صالحی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۵۸.
- [5] F. X. Gil, D. Rodriguez and J. A. Planell, "Grain Growth Kinetics of Pure Titanium", Scripta Metall. Mat., 33, pp. 1361-66.
- [6] R. L. Fullman, ASM Seminar Metal Interfaces, pp. 179, 1952.
- [7] F. J. Gil and J. M. Guilemany, "Effects of Cobalt Addition on Grain Growth Kinetics in Cu-Zn-Al Shape Memory Alloys", Intermetallics 6, pp. 445-450, 1998.
- [۸] ع. اکبری، ر. محمودی و غ. اکبری، "بررسی سینتیک رشد دانه برنج ۷۰-۳۰"، هشتمین کنگره انجمن مهندسين متالورژی ایران، مهرماه، ص. ۴۶-۳۹، ۱۳۸۳.