

بررسی سینتیک تبلور فازهای نانومتری $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ و α -Fe در استحاله

غیر شیشه‌ای شدن آلیاژ غیربلورین $Fe_{51}Cr_{18}Mo_7B_{16}C_4Nb_4$

شهرام احمدی، رحیم اعرابی جشوقانی و حمیدرضا شاهرودی*
دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۲۶ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۲/۱۴)

چکیده - در این پژوهش تبلور فازهای $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ و α -Fe در استحاله غیر شیشه‌ای شدن آلیاژ غیربلورین $Fe_{51}Cr_{18}Mo_7B_{16}C_4Nb_4$ با استفاده از آزمون پراش اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی عبوری مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور ارزیابی سینتیک تبلور، آزمون گرماسنجی افتراقی در نرخ‌های گرمایش مختلف انجام شد. نتایج نشان داد که تبلور دو مرحله‌ای منجر به تشکیل فازهای $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ و α -Fe در ساختار آلیاژ می‌شود. انرژی فعال‌سازی تبلور فازهای $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ و α -Fe با استفاده از مدل Kissinger-Starink، به ترتیب ۷۴۷ و ۸۸۰ kJ/mol اندازه‌گیری شد. نتایج بررسی سینتیکی، مکانیزم رشد کنترل-نفوذی یک بعدی همراه با کاهش نرخ جوانه‌زنی در تشکیل فازهای $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ و α -Fe را نشان داد.

واژگان کلیدی: تبلور، غیر شیشه‌ای شدن، انرژی فعال‌سازی، مکانیزم رشد

Investigation of Crystallization Kinetics of $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ and α -Fe Phases in Devitrification of $Fe_{51}Cr_{18}Mo_7B_{16}C_4Nb_4$ Amorphous Alloy

S. Ahmadi, R. Arabi Jeshvaghani and H.R. Shahverdi*

Faculty of Engineering, Division of Materials Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract: In this research, crystallization of $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ and α -Fe phases in devitrification of $Fe_{51}Cr_{18}Mo_7B_{16}C_4Nb_4$ amorphous alloy was studied using X-ray diffraction and transmission electron microscopy. For evaluation of crystallization kinetics, differential scanning calorimetric tests were carried out at different heating rates. Results showed that two-step crystallization led to the formation of $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ and α -Fe phases in the structure of alloy. Activation energy of crystallization of $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ and α -Fe phases measured according to Kissinger-Starink model were 747 and 880 kJ/mol, respectively. Results

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: shahverdi@modares.ac.ir

of kinetic investigations showed a one-dimensional diffusion controlled growth mechanism along with the decreasing nucleation rate in crystallization of $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ and α -Fe phases.

Keywords: Crystallization, Devitrification, Activation energy, Growth mechanism

۱- مقدمه

α -Fe در آلیاژ غیربلورین $Fe_{81}B_{13}Si_4C_2$ ، مکانیزم جوانه‌زنی و رشد در سه بعد با نرخ ثابت در حین عملیات حرارتی را پیشنهاد کرده‌اند.

به‌طور کلی در بررسی سینتیک تبلور و استحاله غیر شیشه‌ای شدن آلیاژهای غیربلورین، چهار مدل $Kissinger-Starink$ ، $Ozawa$ ، $Matusita$ و $Gao-Wang$ مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تمامی این مدل‌ها سینتیک تبلور از طریق تبلور دینامیک یا غیر همدماً^۴ در نرخ گرمایش ثابت ارزیابی می‌شود [۱۰]. گفتنی است که در مدل‌های $Kissinger-Starink$ و $Ozawa$ تنها امکان محاسبه انرژی فعال‌سازی^۵ واکنش وجود دارد اما در مدل‌های $Matusita$ و $Gao-Wang$ علاوه بر محاسبه انرژی فعال‌سازی می‌توان مکانیزم تبلور و رشد (با تعیین ضریب اورامی و ...) را نیز تعیین کرد.

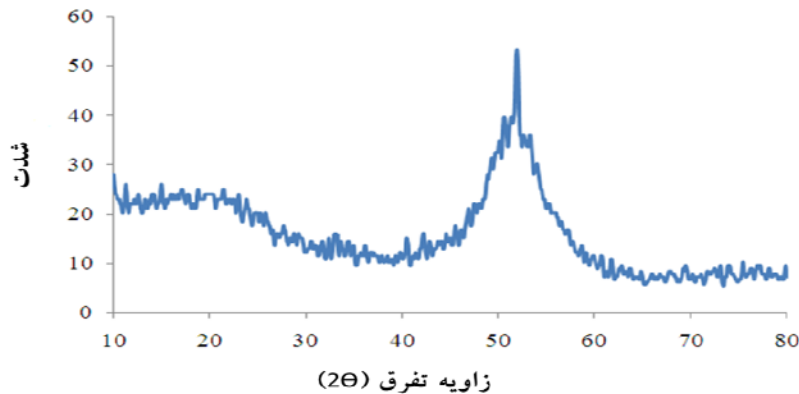
در این پژوهش تبلور فازهای $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ و α -Fe در استحاله غیر شیشه‌ای شدن آلیاژ غیربلورین $Fe_{51}Cr_{18}Mo_7B_{16}C_4Nb_4$ با استفاده از آزمون پراش اشعه ایکس^۶ و میکروسکوپ الکترونی عبوری^۷ مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی سینتیک تبلور و تعیین مکانیزم جوانه‌زنی و رشد، آزمون گرماسنجی افتراقی^۸ در نرخ‌های گرمایش مختلف انجام شد.

۲- روش پژوهش

آلیاژ مورد استفاده در این پژوهش شمش ریخته‌گری شده $Fe_{51}Cr_{18}Mo_7B_{16}C_4Nb_4$ است. ساخت آلیاژ با استفاده از آهن (۹۹/۷ %wt)، کروم (۹۹/۹ %wt)، مولیبدن (۹۹/۹ %wt)، بور (۹۹/۵ %wt) و نایوبیم (۹۹/۹ %wt) در کوره القایی تحت خلا انجام شد. برای افزودن کربن به ترکیب آلیاژ نهایی از آهن حاوی مقدار مشخص کربن استفاده شد. در گام بعد برای تهیه آلیاژ ۱۰۰٪ غیربلورین، قطعات ۱۵ گرمی از شمش ریخته شده

فلزهای شیشه‌ای^۱ به دلیل سختی و استحکام بسیار بالا (سختی بیش از ۱۰۰۰ ویکرز و استحکام بالاتر از ۳۰۰۰ مگاپاسکال)، مقاومت به سایش و فرسایش عالی (قابل رقابت با پوشش‌های کاربردی) و مقاومت خوردگی عالی (بطور معمول بیشتر از مقاومت خوردگی فولاد زنگ نزن 316L) در چند دهه‌ی گذشته به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱ و ۲]. در بین فلزهای شیشه‌ای، اخیراً فلزهای پایه آهنی به دلیل فراوانی در طبیعت، قیمت پایین و خواص فیزیکی/مکانیکی بی‌همتا مانند خواص مغناطیسی نرم^۲، استحکام و سختی بالا، مقاومت سایشی خوب و مقاومت خوردگی عالی بیشتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۳ و ۴]. معمولاً فلزهای شیشه‌ای پایه آهنی شامل عناصری مثل کروم، مولیبدن و نایبوم هستند و برای کاربرد در محیط‌های خوردنده استفاده می‌شوند [۵].

نکته قابل توجه در مورد این فلزها تبدیل ساختار غیربلورین (آمورف) به یک ساختار بلوری نانومتری است. بررسی‌ها نشان می‌دهد تبدیل ساختار غیربلورین به یک ساختار بلوری نانومتری با به‌کارگیری عملیات حرارتی در دماهای بالاتر از دمای تبلور و انجام استحاله غیر شیشه‌ای شدن^۳ امکان‌پذیر است [۶]. اگرچه در پژوهش‌هایی به استحاله‌ی غیر شیشه‌ای شدن و ایجاد ساختارهای بلوری نانومتری در فلزهای شیشه‌ای پرداخته شده است اما در رابطه با سینتیک تبلور و مکانیزم‌های رشد پژوهش‌های قابل توجهی انجام نشده است [۷-۹]. در این رابطه تنها می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط Solima و همکارانش [۷]، در استحاله آلیاژ غیربلورین $Fe_{83}B_{17}$ و $Chrissafis$ و همکارانش [۸]، در تبلور آلیاژ غیربلورین $Fe_{75}Si_9B_{16}$ اشاره کرد. بررسی‌های انجام شده توسط این پژوهشگران بیانگر تبلور با مکانیزم کنترل-نفوذی است. افزون بر این، Minic و همکارانش [۹]، در بررسی سینتیک تبلور فاز



شکل ۱- الگوی پراش اشعه ایکس آلیاژ $Fe_{51}Cr_{18}Mo_7B_{16}C_4Nb_4$ در حالت غیربلورین

جدول ۱- پارامترهای فرایند ذوب ریسی

وزن آلیاژ	۱۵ گرم
سرعت خطی چرخ مسی	۳۲٫۵ متر بر ثانیه
فشار تزریق مذاب بر روی چرخ مسی	۳۲۵ میلی بار
قطر سوراخ مجرای خروجی (نازل)	۶۰۵ میکرومتر
نوع مجرای خروجی	کوارتزی
فاصله مجرای خروجی تا دیسک دوار	۲٫۵ میلی متر
زاویه مجرای خروجی	۱۵ درجه
خلاً نهایی در هنگام تزریق مذاب	$10^{-5} \times 2/8$ میلی بار

نهایت برای بررسی سینتیک تبلور و اندازه گیری انرژی فعال سازی فازهای بلوری متبلور شده در استحاله غیر شیشه ای شدن، آزمون گرماسنجی افتراقی در نرخ های گرمایش $10, 20, 30, 40$ K/min انجام شد.

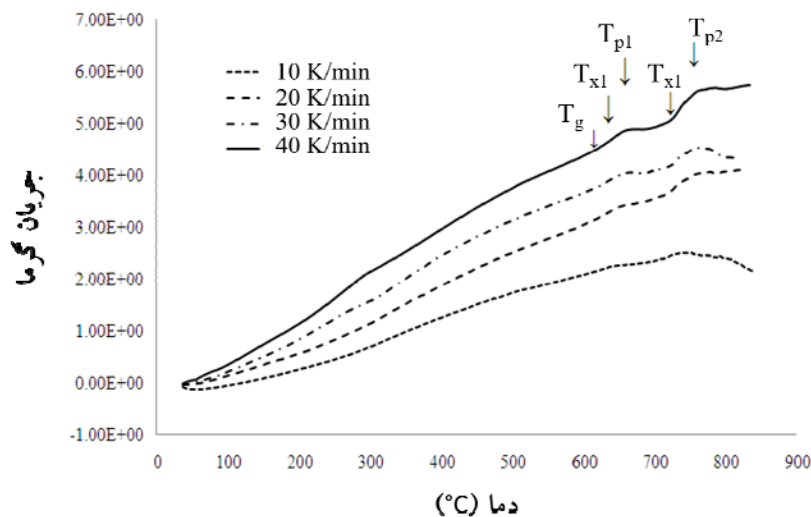
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی آلیاژ غیربلورین اولیه

در شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس نوارهای غیربلورین به دست آمده از فرایند ذوب ریسی نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود قله قابل توجهی در زوایای تفرق مختلف وجود ندارد که نشان دهنده عدم وجود فازهای بلوری و تأیید غیربلورین بودن ساختار است. قله مشاهده شده در

در فرایند ذوب ریسی^۹ به نوارهایی^{۱۰} با ضخامت ۶۰ میکرون تبدیل شدند. در جدول ۱ پارامترهای فرایند ذوب ریسی داده شده است.

در گام بعد برای بررسی پدیده تبلور، نوارهای تولید شده از فرایند ذوب ریسی در کوره عملیات حرارتی تحت خلا 10^{-3} میلی بار و در دماهای بالاتر از دمای تبلور آلیاژ آئیل شدند. گفتنی است که دماهای تبلور با استفاده از آزمون گرماسنجی افتراقی به دست آمد. برای بررسی ریز ساختار نوارهای تهیه شده در فرایند ذوب ریسی در حالت غیربلورین و متبلور شده، از میکروسکوپ الکترونی عبوری مجهز به تحلیلگر ترکیب شیمیایی^{۱۱} استفاده شد. برای شناسایی فازهای بلورین ناشی از تبلور، آزمون پراش اشعه ایکس مورد استفاده قرار گرفت. در



شکل ۲- منحنی گرماسنجی افتراقی آلیاژ $Fe_{51}Cr_{18}Mo_7B_{16}C_4Nb_4$ در حالت غیربلورین

جدول ۲- تغییرات دماهای شروع تبلور و قله تبلور (بر حسب درجه سانتی گراد) در نرخ‌های گرمایش مختلف

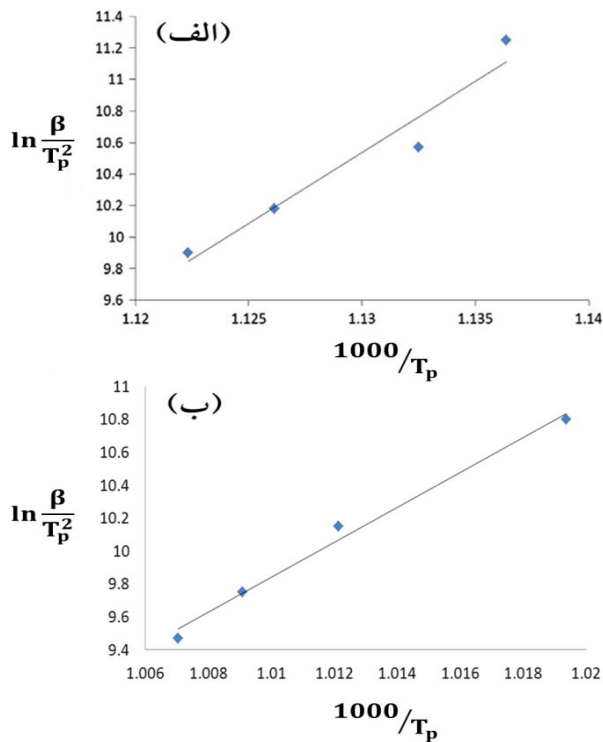
نرخ گرمایش (K/min)	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	
T_{x1}	۶۱۸	۶۱۵	۶۱۰	۶۰۷	
T_{p1}	۶۵۵	۶۵۰	۶۴۵	۶۴۰	
T_{x2}	۷۲۰	۷۱۸	۷۱۵	۷۰۸	
T_{p2}	۷۵۳	۷۴۸	۷۴۳	۷۳۸	

مختلف نشان داده شده است.

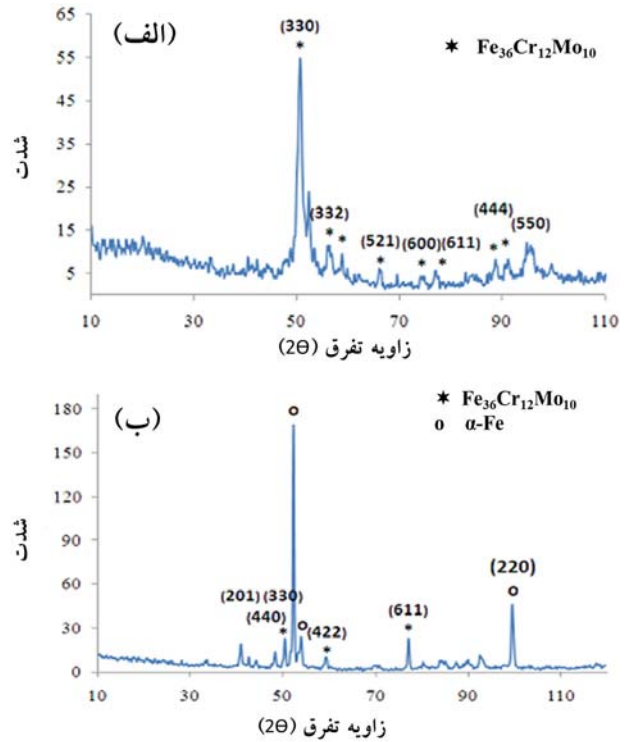
۲-۳- عملیات حرارتی و متبلور شدن آلیاژ غیربلورین

برای بررسی استحاله غیر شیشه‌ای شدن، نوارهای به دست آمده از فرایند ذوب‌ریزی در دو دمای مختلف و به مدت ۳ ساعت در کوره تحت خلا آنیل شدند. در این پژوهش دماهای آنیل ۷۱۰ و ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد که بیشتر از قله دماهای تبلور اول و دوم بود. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌های آنیل شده در دو دمای یاد شده در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد فاز به وجود آمده در ساختار آلیاژ پس از انجام عملیات حرارتی در دمای ۷۱۰ درجه سانتی‌گراد، فاز $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ با ساختار بلوری مکعبی^{۱۴} و پارامتر شبکه a برابر با ۸/۸۹ آنگستروم است و

زاویه‌ی تفرق حدود ۵۰ درجه می‌تواند به دلیل وجود ناخالصی‌ها و یا مناطق با نظم کم دامنه^{۱۲} در ساختار باشد. در شکل ۲ نتایج به دست آمده از آزمون گرماسنجی افتراقی آلیاژ $Fe_{51}Cr_{18}Mo_7B_{16}C_4Nb_4$ در حالت غیربلورین و در نرخ‌های گرمایش مختلف داده شده است. در این نمودار T_p بیانگر قله دماهای تبلور (حداکثر نرخ رشد)، T_g نشان‌دهنده دمای شیشه‌ای شدن و T_x دمای شروع تبلور (جوانه زنی) است. در منحنی‌های شکل ۲ دو قله گرمازا^{۱۳} به گونه‌ای مشخص مشاهده می‌شود که بیانگر تبلور دو مرحله‌ای در این آلیاژ است. از سوی دیگر افزایش قله دمای تبلور با افزایش نرخ گرمایش دلیلی بر کنترل- نفوذی بودن فرایند تبلور است. در جدول ۲ تغییرات دماهای جوانه‌زنی و قله دماهای تبلور در نرخ‌های گرمایش



شکل ۴- نمودار آرینیوس مربوط به تبلور فازهای کریستالی:
الف) $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ و ب) $\alpha\text{-Fe}$



شکل ۳- الگوی پراش اشعه ایکس آلیاژ $\text{Fe}_{51}\text{Cr}_{18}\text{Mo}_7\text{B}_{16}\text{C}_4\text{Nb}_4$
آئیل شده در دمای: الف) ۷۱۰° و ب) ۸۲۰° درجه سانتی گراد

بر حسب $\frac{1}{T_p}$ بیانگر $-\frac{E_a}{R}$ است [۱۲].

$$\ln \frac{\beta}{T_p^2} = -\frac{E_a}{RT_p} + C \quad (1)$$

در شکل ۴ نمودار آرینیوس مربوط به تبلور مرحله اول و دوم نشان داده شده است. باید توجه شود که در بررسی پدیده تبلور، دمای شروع قله تبلور در محاسبات به عنوان دمای شروع تبلور در نظر گرفته شده است (دماهای T_x در جدول ۲). بررسی‌ها نشان می‌دهد انرژی فعال‌سازی تبلور فازهای $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ و $\alpha\text{-Fe}$ در این آلیاژ به ترتیب 747 kJ/mol و 880 است.

مهم‌ترین عامل سینتیکی در تعیین مکانیزم جوانه‌زنی و رشد در آلیاژهای غیربلورین، ضریب اورامی^{۱۵} است. این پارامتر سینتیکی به کمک انجام آزمون گرماسنجی به صورت هم‌دما و غیرهم‌دما قابل محاسبه است. در این پژوهش تعیین ضریب اورامی به کمک رابطه Matusita (رابطه ۲) انجام شده

فاز $\alpha\text{-Fe}$ با ساختار مکعبی و پارامتر شبکه $a=2/86$ آنگسترم در نتیجه آئیل کردن آلیاژ در دمای ۸۲۰° درجه سانتی‌گراد متبلور شده است [۱۱ و ۱۲]. گفتنی است که تبلور فازهای $\alpha\text{-Fe}$ ، $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ و Fe_{23}C_6 در آلیاژهای 7170 ، $(\text{Fe}_{52.3}\text{Mn}_2\text{Cr}_{19}\text{Mo}_{2.5}\text{W}_{1.7}\text{B}_{16}\text{C}_4\text{Si}_{2.5})$ توسط Branagan [۱۳]، نیز گزارش شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد تشکیل نشدن فاز Fe_{23}C_6 در ساختار می‌تواند ناشی از کوتاه بودن زمان فرایند آئیل در این پژوهش باشد.

۳-۳- محاسبه انرژی فعال‌سازی تبلور و تعیین مکانیزم جوانه‌زنی و رشد

به منظور اندازه‌گیری انرژی فعال‌سازی تبلور از مدل Kissinger-Starink مطابق با رابطه ۱ استفاده شد. در این رابطه β نرخ گرمایش، R قله ثابت جهانی گازها، T_p دمای قله تبلور و E_a انرژی فعال‌سازی است. طبق رابطه ۱ شیب منحنی $\ln \frac{\beta}{T_p^2}$

است [۱۰].

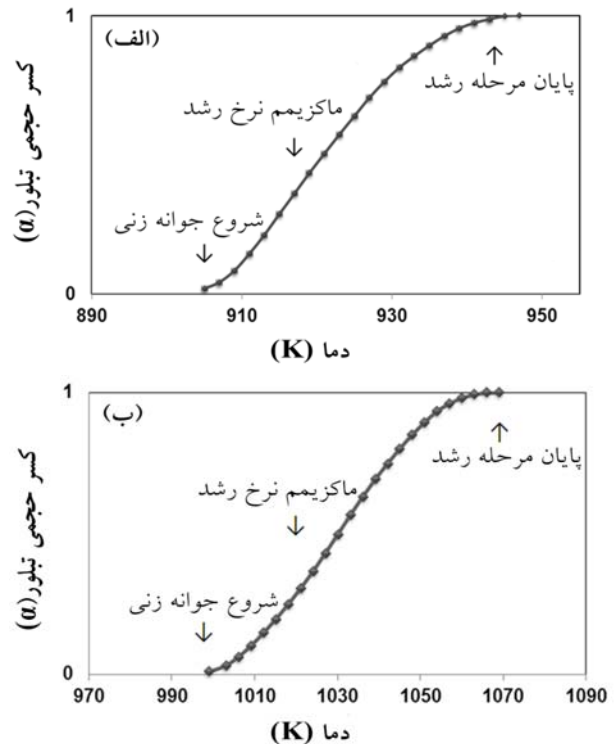
$$\ln[-\ln(1-\alpha)] = -n \ln \beta - 1.052(mE_a / RT) + C \quad (۲)$$

در جایی که α کسر حجمی تبلور یافته، β نرخ گرمایش، E_a انرژی فعال‌سازی، n ضریب اورامی و m پارامتر رشد است.

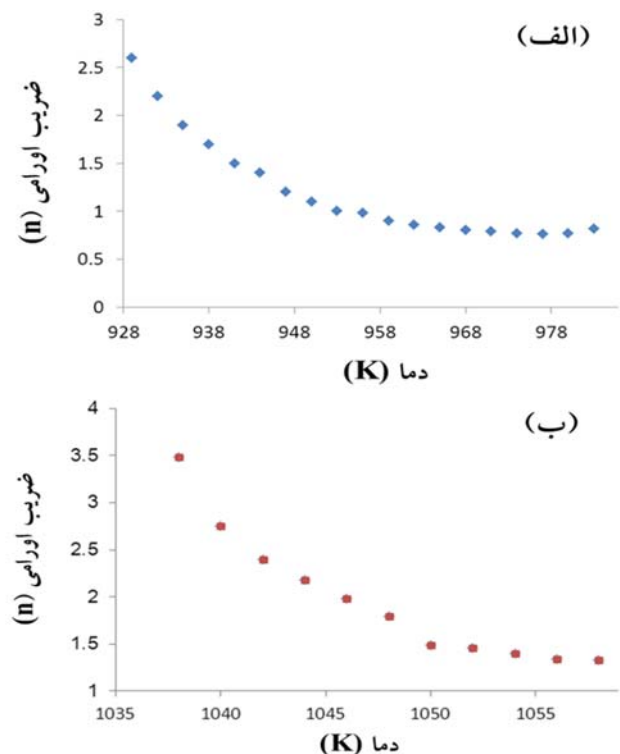
بر اساس این مدل با رسم منحنی $\ln[-\ln(1-\alpha)]$ بر حسب $\ln \beta$ در دمای ثابت و محاسبه شیب خط می‌توان ضریب اورامی را تعیین کرد. نکته قابل توجه این است که اگرچه برای بیشتر گروه‌های آلیاژی غیربلورین می‌توان رابطه فوق را به‌طور مستقیم به‌کار برد اما برای آلیاژهای غیربلورین پایه آهن این ضریب در طی استحاله تغییر کرده و تابع دما است. بنابراین محاسبه ضریب اورامی در یک دمای خاص برای آلیاژی که در طی تبلور مکانیزم ثابتی در جوانه‌زنی و رشد فازهای بلوری دارند می‌تواند قابل قبول باشد. اما در این پژوهش با فرض این‌که در حین تبلور مکانیزم ثابتی در جوانه‌زنی و رشد تغییر می‌کند، سعی شده محاسبه دقیق ضریب اورامی برای استحاله صورت گیرد. در شکل ۵ منحنی تغییرات ضریب اورامی با دما در تبلور مرحله اول و دوم داده شده است. افزون بر این، برای بررسی دقیق‌تر تبلور در مراحل مختلف جوانه‌زنی و رشد، تغییرات کسر حجمی ساختار متبلور شده با استفاده از نتایج آزمون گرماسنجی افتراقی رسم شده است. در هر دما کسر حجمی تبلور یافته α به کمک رابطه ۳ قابل محاسبه است [۹].

$$\alpha = \frac{S_i}{S_T} \quad (۳)$$

در این رابطه S_T مساحت ناحیه زیر قله تبلور و S_i مساحت ناحیه زیر قله تبلور بین دمای شروع تبلور و دمای مورد نظر روی پیک است. در شکل ۶ روند تغییرات کسر حجمی با دما برای تبلور فازهای α -Fe و $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی به‌دست آمده به‌صورت S شکل بوده که بیانگر کنترل-نفوذی بودن استحاله است و نشان‌دهنده سه منطقه مجزای جوانه‌زنی ($\alpha < 0.1$)، مرحله رشد ($0.1 < \alpha < 0.9$) و اتمام رشد ($\alpha > 0.9$) است. در نهایت با رسم منحنی $\ln[-\ln(1-\alpha)]$ بر حسب دما در نرخ گرمایش ثابت و



شکل ۵- منحنی تغییرات کسر حجمی با دما: الف) $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ و ب) α -Fe



شکل ۶- منحنی تغییرات ضریب اورامی با دما در تبلور فازهای: الف) $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ و ب) α -Fe

جدول ۳- تفسیر مقادیر عددی پارامترهای سینتیکی در رابطه ۴ [۹، ۱۵]

پارامتر	مقدار عددی	توضیح
رشد	۱	جوانه زنی در یک بعد
	۲	جوانه زنی در دو بعد
	۳	جوانه زنی در سه بعد
نوع استحاله	۱	کنترل‌شونده توسط فصل مشترک
	۰/۵	کنترل- نفوذی
نرخ جوانه‌زنی	۱>	نرخ جوانه‌زنی کاهش‌ی
	۰	نرخ جوانه‌زنی صفر- تمامی جوانه‌ها از قبل در ساختار وجود دارند
	۱<	نرخ جوانه‌زنی افزایش‌ی

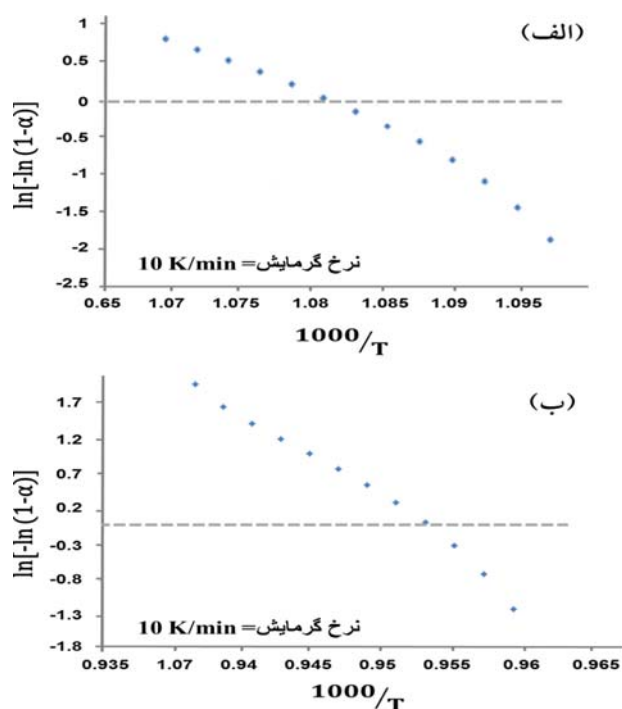
پارامترهای سینتیکی با رابطه ۴ بیان می‌شود [۱۴ و ۱۵].

$$n = b + pm \quad (۴)$$

در جایی که n ضریب اورامی، m پارامتر رشد، b نرخ جوانه‌زنی^{۱۸} و p پارامتر نوع استحاله^{۱۹} (کنترل- نفوذی^{۲۰} و یا کنترل‌شونده توسط فصل مشترک^{۲۱}) است. در جدول ۳ تفسیر مقادیر عددی پارامترهای رابطه ۴ ارائه شده است. با توجه به کنترل- نفوذی بودن استحاله (p برابر با ۰/۵) و مقدار به‌دست آمده برای پارامتر رشد می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم تبلور فازهای α -Fe و $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ از جوانه‌زنی در سه بعد به دو و سرانجام به یک بعد محدود می‌شود و نرخ جوانه‌زنی نیز از نرخ جوانه‌زنی افزایش‌ی به کاهنده تغییر می‌کند.

۳-۴- بررسی ریزساختاری

در شکل ۸- الف ساختار میکروسکوپی و الگوی پراش آلیاژ $Fe_{51}Cr_{18}Mo_7B_{16}C_4Nb_4$ در حالت غیربلورین نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با توجه به الگوی پراش هیچ فاز بلوری در ساختار قابل تشخیص نیست. یکی از ویژگی‌های بارز فولادهای نانوساختار به‌دست آمده از آنیل ساختارهای غیربلوری، ریخت (مورفولوژی) فازهای بلوری است. برای نمونه فاز α -Fe به‌صورت لکه‌هایی تیره در ساختار دیده می‌شود و یا فاز $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ دارای ریخت لایه‌لایه (پرلیتی) بوده و یا



شکل ۷- منحنی تغییرات $\ln[-\ln(1-\alpha)]$ برحسب $1000/T$ در تبلور فازهای: الف) $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ و ب) α -Fe

محاسبه شیب خط می‌توان پارامتر رشد^{۱۷} را به‌دست آورد. در شکل ۷ منحنی تغییرات $\ln[-\ln(1-\alpha)]$ با دما برای محاسبه پارامتر رشد نشان داده شده است. اندازه‌گیری شیب خط رسم شده بیانگر مقدار ۱ برای پارامتر رشد است. به‌طور معمول وابستگی بین ضریب اورامی و سایر

فازهای $\alpha\text{-Fe}$ و $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ در تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری بین ۱۰ تا ۲۰ نانومتر برآورد شد. در رابطه با فاز $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ باید توجه داشت کلنی‌های پرلیتی شکل این فاز، که اکثراً شش ضلعی بوده و لایه‌های آن با رنگ‌های تیره و روشن از یکدیگر قابل تفکیک هستند، به صورت پراکنده در تمام ساختار مشاهده می‌شود.

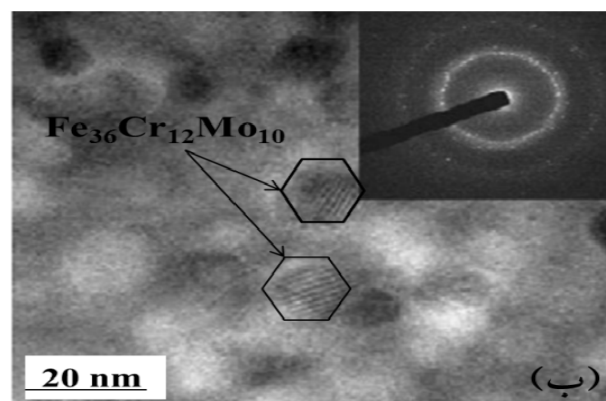
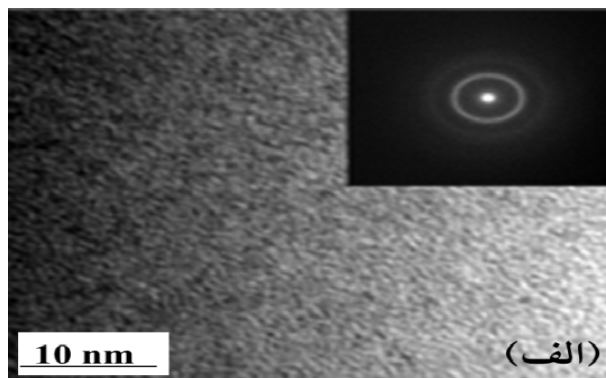
۴- نتیجه گیری

✓ فرایند تبلور در آلیاژ غیربلورین $\text{Fe}_{51}\text{Cr}_{18}\text{Mo}_7\text{B}_{16}\text{C}_4\text{Nb}_4$ دو مرحله‌ای بوده و منجر به تشکیل فازهای $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ و $\alpha\text{-Fe}$ می‌شود.

✓ انرژی فعال‌سازی تبلور فازهای $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ و $\alpha\text{-Fe}$ با استفاده از مدل Kissinger-Starink، به ترتیب ۷۴۷ و 88°kJ/mol اندازه‌گیری شد.

✓ مکانیزم تبلور فازهای $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ و $\alpha\text{-Fe}$ از جوانه‌زنی در سه بعد به دو و نهایتاً به یک بعد محدود شد و نرخ جوانه‌زنی نیز از نرخ جوانه‌زنی افزایشی به کاهنده تغییر کرد.

✓ بررسی‌های ریزساختاری نشان داد فازهای بلوری $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ و $\alpha\text{-Fe}$ با میانگین اندازه ۱۰-۲۰ nm به ترتیب با ریخت "راه راه" و "لکه‌های تیره" متبلور شده‌اند.



شکل ۸- ساختار میکروسکوپ الکترونی عبوری آلیاژ $\text{Fe}_{51}\text{Cr}_{18}\text{Mo}_7\text{B}_{16}\text{C}_4\text{Nb}_4$ در حالت: (الف) غیربلورین و (ب) تبلور یافته

بصورت "راه‌راه" در ساختار مشخص است [۱۶، ۱۷]. در شکل ۸- ب ریزساختار آلیاژ بعد از فرایند آنیل نشان داده شده است. در این شکل مناطق با رنگ روشن‌تر فاز اولیه غیربلورین بوده، مناطق با مورفولوژی "راه‌راه" (پرلیتی) فاز بلوری $\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$ و لکه‌های تیره فاز $\alpha\text{-Fe}$ است. اندازه بلورهای

واژه نامه

- | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| 1. metallic glass | 9. melt-spinning | 17. growth parameter |
| 2. soft magnetic properties | 10. ribbon | 18. nucleation rate |
| 3. devitrification | 11. energy dispersive spectroscopy | 19. type of transformation |
| 4. non-isothermal | 12. short range order | 20. diffusion control |
| 5. activation energy | 13. exothermic | 21. interfacial control |
| 6. X-ray diffraction pattern | 14. cubic | |
| 7. transmission electron microscopy | 15. Avrami exponent | |
| 8. differential scanning calorimetric | 16. volume fraction | |

1. Wang, W.H., Dong, C. and Shek, C.H., "Bulk Metallic Glasses", *Materials Science & Engineering R*, Vol. 44, pp. 45-89, 2005.
2. Schroers, J., "The Superplastic Forming of Bulk Metallic Glasses", *JOM*, Vol. 57, pp. 35-39, 2005.
3. Huang, X.M., Chang, C.T., Chang, Z.Y., Wang, X.D., Cao, Q.P., Shen, B.L., Inoue, A. and Jiang, J.Z., "Formation of Bulk Metallic Glasses in the Fe-M-Y-B (M= Transition Metal) System", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 460, pp. 708-713, 2008.
4. Wang, S.L. and Yi, S., "The Corrosion Behaviors of Fe-Based Bulk Metallic Glasses in a Sulfuric Solution at 70 °C", *Intermetallics*, Vol. 18, pp. 1950-1953, 2010.
5. Tan, M.W., Akiyama, E., Kawashima, A., Asani, K. and Hashimoto, K., "The Influences of Mo Addition and Air Exposure on the Corrosion Behavior of Amorphous Fe-Cr-P-C Alloy in De-aerated 1 M HCl", *Corrosion Science*, Vol. 38, pp. 349-65, 1996.
6. Greer, A.L., "Metallic Glass", *Materials Today*, Vol.12, pp. 14-22, 2009.
7. Solima, A.A., Al-Heniti, S., Al-Hajry A. and Al-Assiri, M., "Crystallization Kinetics of Melt-Spun Fe₈₃B₁₇ Metallic Glass", *Thermochemica Acta*, Vol. 413, pp. 57-62, 2004.
8. Chrissafi, K., Maragakis, M.I., Efthimiadis, K.G. and Polychroniadis, E.K., "Detailed Study of the Crystallization Behaviour of the Metallic Glass Fe₇₅Si₉B₁₆", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 386, pp. 165-173, 2005.
9. Minic, D.M., Maricic, A. and Adnadevic, B., "Crystallization of α -Fe Phase in Amorphous Fe₈₁B₁₃Si₄C₂ Alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 473, pp. 363-367, 2009.
10. Jain, R., Saxena, N.S., Bhandari, D. and Sharma, S.K., "Crystallization Kinetics of Cu_xTi_{100-x} (x=43, 50 and 53) Glasses", *Physica B*, 301, 341 -348, 2001.
11. Redjaimia, A., Prout, A., Donnadieu P. and Morniroli, J.P., "Morphology, Crystallography and Defects of the Intermetallic χ -Phase Precipitated in a Duplex ($\delta + \gamma$) Stainless Steel", *Journal of Materials Science*, Vol. 39, pp. 2371-2386, 2004.
12. Ahmadi, S., Shahverdi H.R. and Saremi, S.S., "Nanocrystallization of α -Fe Crystals in Fe₅₂Cr₁₈Mo₇B₁₆C₄Nb₃ Bulk Amorphous Alloy", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 27(6), pp. 497-502, 2011.
13. Branagan, D.J., Marshall, M.C. and Meacham, B.E., "High Toughness High Hardness Iron Based PTAW Weld Materials", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 428, pp. 116-123, 2006.
14. Starink, M.J., "Analysis of Aluminum Based Alloys by Calorimetry: Quantitative Analysis of Reactions and Reaction Kinetics", *Journal of International Materials Review*, Vol. 49, pp. 191-226, 2004.
15. Rho, I.C., Yoon, C.S., Kim, C.K., Byun, T.Y. and Hong, K.S., "Crystallization of Amorphous Alloy Co₆₈Fe₄Cr₄Si₁₃B₁₁", *Materials Science & Engineering B*, Vol. 96, pp. 48-52, 2002.
16. Ahmadi, S., Shahverdi H.R. and Saremi, S.S., "Effects of Nb Alloying on Nano-Crystallization Kinetics of Fe_{55-x}Cr₁₈Mo₇B₁₆C₄Nb_x Bulk Amorphous Alloy", *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 27(8), pp. 735-740, 2011.
17. Ahmadi, S., Shahverdi H.R., Afsari, M. and Abdollah-zadeh, A., "Nano-Crystallization of Fe₃₆Cr₁₂Mo₁₀ Phase in Fe_{55-x}Cr₁₈Mo₇B₁₆C₄Nb_x (X=0, 3, 4) Amorphous Alloys", *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 365, pp. 47-52, 2013.