

بودسی بلورینگی آلیاژ آمورف $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$

سیده اکرم هاشمی نژاد^۱، زهرا جمیلی شیروان^۲، محسن حداد سبزوارد^۳

چکیده

در این تحقیق رفتار بلورینگی نوارهای آلیاژ آمورف $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ که با روش Planar Flow Melt Spinning (PFMS) تهیه شده بودند، با پراش پرتو ایکس (XRD) و گرماسنج روبشی تفاضلی (DSC) در نرخ های گرمایش مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که بلورینگی این آلیاژ حین گرمایش شامل دو مرحله است. به منظور شناسایی فازهای بلورین نمونه هایی در محدوده دمایی $300 - 650^\circ\text{C}$ به طور همدما آنیل شدند. در مرحله اول بلورینگی، تشکیل فازهای Co_3B و $\text{Co}(\text{HCP})$ و در دومین مرحله بلورینگی فازهای FCC-Co و $\text{B}(\text{FeSi})_3$ مشاهده شد. با آنیل آلیاژ در بالاتر از دمای 600°C ، محلول جامد منظم تشکیل شد. انرژی فعال سازی ظاهری بلورینگی (E_c) مرحله اول آلیاژ آمورف با روش Kissinger و بلورینگی (n) و فاکتور فرکانس (A) با استفاده از معادله JMAK محاسبه شد. بدین منظور از نرخ های گرمایش $10 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ و $10, 20, 30, 40^\circ\text{C min}^{-1}$ استفاده شد. لذا مقدار $443/44 \text{ kJ mol}^{-1}$ برای E_c و مقادیر $1/1$ و $1/1084$ به ترتیب برای n و A تعیین شدند. همچنین خواص مغناطیسی نمونه های بلورینه شده در دماهای مختلف، با استفاده از دستگاه مغناطوسنج نمونه ارتعاشی (VSM) اندازه گیری شدند.

کلمات کلیدی: آلیاژ آمورف پایه کالت، بلورینگی، سینتیک، خواص مغناطیسی نرم.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد
akram.hasheminejad@gmail.com

^۲ دانشجوی دکتری گروه مهندسی مواد، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فردوسی مشهد

۱- مقدمه

آرایش اتمی غیر بلورین و تصادفی در فلزات آمورف، مجموعه بی نظیری از خواص فیزیکی، مکانیکی، مغناطیسی، خوردگی و ... را در این مواد فراهم نموده است که اغلب آنها را در مقایسه با همتای بلورینشان برتر می سازد. فلزات آمورف پایه کمالت دارای خواص مغناطیسی نرم عالی بوده که منجر به کاربرد وسیع آنها در دستگاههای الکترونیکی، کلاهک های ثبت داده های مغناطیسی، ضبطها، سنسورهای مغناطیسی و... شده است [۲و۱]. مشخص شده است که آلیاژسازی با درصد کمی از فلزات انتقالی مثل Fe, Mn, V و Cr با آلیاژهای آمورف پایه کمالت به طور مؤثری می تواند مغناطوتنگشی^۱ را به صفر کاهش دهد [۳].

فلزات آمورف از لحاظ سیستیکی موادی نیمه پایدار و از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدارند. بیشتر آنها در دماهای نزدیک دماهای اتفاق پایدارند و هنگامی که در معرض حرارت قرار می گیرند، تمایل به بلورینه شدن دارند. بلورینگی باعث تغییراتی در خواص فیزیکی نظیر خواص مغناطیسی این مواد می شود. بنابراین مطالعه رفتار بلورینگی و پایداری حرارتی آلیاژهای آمورف از دیدگاه کاربردی دارای اهمیت است.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از نوارهای آلیاژ آمورف $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ با عرض ۲ سانتی متر و ضخامت 1 ± 29 میکرومتر که با روش Planar Flow Melt Spinning (PFMS) تهیه شده بودند، استفاده گردید [۴]. پایداری حرارتی آلیاژ آمورف به کمک آنالیز حرارتی تفاضلی (DTA) با استفاده از دستگاه مدل NETZSCH 404 مورد بررسی قرار گرفت (DTA با هدف تعیین تمام دماهای بلورینگی مورد استفاده قرار گرفته است). اندازه گیری روی نمونه ای به وزن $2/0$ گرم، با نرخ حرارتی معادل $10^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ و در محدوده دمایی -1000 - 298 کلوین صورت پذیرفت.

الگوی پراش پرتو X (XRD) به کمک دستگاه با مدل BRUKER axs تهیه گردید. اندازه گیری ها روی نوار آمورف اولیه و نوارهای آنلیل شده صورت پذیرفت. به این منظور برش هایی از نوار اولیه (در ابعاد $2\times 2\text{ cm}$) به مدت نیم ساعت در اتمسفر گاز آرگون در دمایی در محدوده $650-350^{\circ}\text{C}$ با فاصله دمایی 50°C به طور همدما آنلیل شدند. الگوی پراش پرتو X به کمک اشعه Cu-ka، زاویه پراش (2θ) در محدوده $20^{\circ}-420^{\circ}$ و با گام 0.03° تهیه گردید.

رفتار حرارتی نمونه های آمورف این آلیاژ با استفاده از دستگاه آنالیز حرارتی تفاضلی DSC60 مدل Shimadzu بررسی شد. وزن نمونه های مورد آزمایش در حدود $1/6$ میلی گرم بود. سینتیک بلورینگی

^۱ Magnetostriction

غیرهمدمای نوارهای آمورف آلیاژ حاضر در محدوده دمای محیط تا 600°C به طور پیوسته در نرخ‌های گرمایش $10, 20, 30, 40$ و 80 Cmin^{-1} بررسی شد.

به منظور بررسی خواص مغناطیسی، حلقه پس‌ماند نمونه‌های آنیل شده و نمونه اولیه به کمک دستگاه مغناطوسنجی نمونه ارتعاشی (VSM) در دمای اتاق تهیه گردید.

۳- نتایج و بحث

۱-۳- فازهای بلورین

پایداری حرارتی آلیاژ آمورف $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ به کمک آنالیز حرارت دهی پیوسته (DTA) در نرخ حرارتی معادل 10°C/min مورد بررسی قرار گرفت. منحنی DTA به دست آمده در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به حضور دو پیک حرارت‌زا در منحنی، می‌توان نتیجه گرفت که آلیاژ حاضر در دو مرحله بلورینه می‌گردد. دمای شروع بلورینگی حدود 50.9°C و تکمیل آن حدود 620°C می‌باشد.

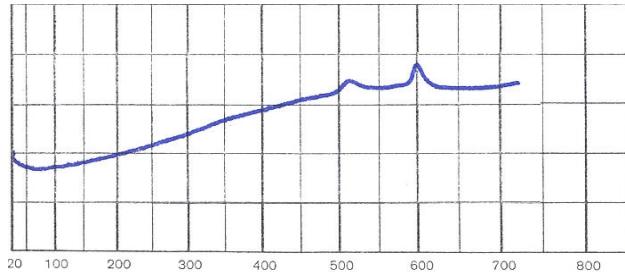
فاصله دو پیک بلورینگی در منحنی DTA در مقایسه با آلیاژهای $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{13}\text{B}_{11}$ [۳] و $\text{Co}_{67.2}\text{Fe}_{3.8}\text{Cr}_3\text{Si}_{14}\text{B}_{12}$ [۵] توسعه یافته است. که این مسئله را می‌توان به افزایش درصد کروم در آلیاژ نسبت داد. زیرا اتم‌های کروم از قطر بالاتری نسبت به سایر اتم‌های اضافه شده به آلیاژ برخوردارند که به عنوان موانعی جهت نفوذ دیگر اتم‌ها در آلیاژ (B, Si) عمل کرده لذا بلورینگی مرحله دوم و به عبارتی تشکیل ترکیبات بین فلزی در مرحله دوم را به تعویق می‌اندازند.

به منظور شناسایی فازهای بلورین تشکیل شده در مراحل بلورینگی، الگوی پراش پرتو X از نمونه‌های مختلفی که به طور هم‌دمای آنیل شده بودند، تهیه گردید که در شکل ۲ نشان داده شده است. در طول آنیل هم‌دما در دماهای $350, 400$ و 450°C ، هیچ نوع فاز بلورینی توسط نرم افزار شناسایی نشده است (شکل ۲ الف).

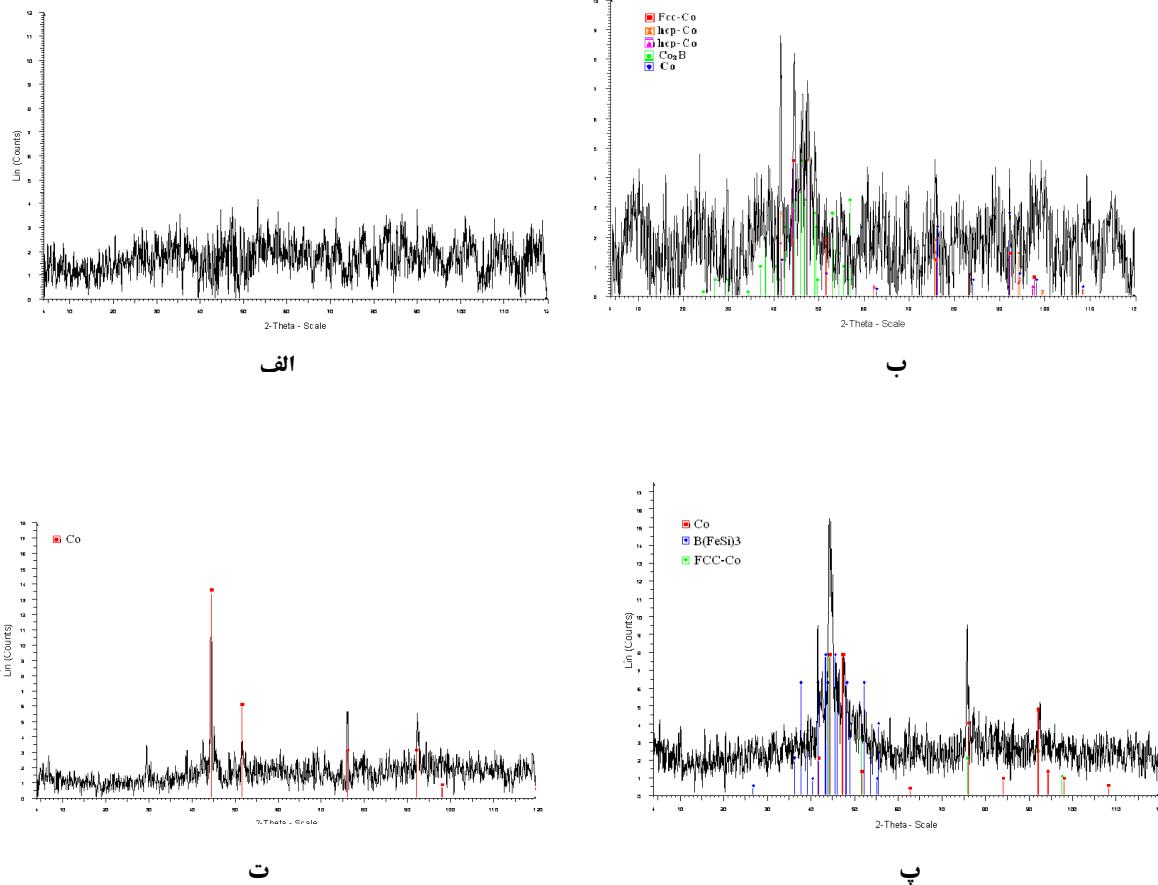
در نمونه آنیل شده در دمای 500°C فازهای FCC-Co و Co_3B شناسایی شدند که در شکل ۲ ب نشان داده شده است. همان‌طور که گزارش شده است [۶] تشکیل فازهای بلورین از دمای حدود 400°C آغاز شده است که این فازها به کمک TEM شناسایی شدند. لازم به ذکر است که تشکیل فازهای مشابهی در بلورینگی آلیاژ $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{13}\text{B}_{11}$ گزارش شده است [۳].

فازهای FCC-Co و $\text{B}(\text{FeSi})_3$ در نمونه آنیل شده در دمای 550°C مشاهده گردید (شکل ۲ ب) که از شفاف و تیز بودن پیک‌ها می‌توان به تکمیل بلورینگی آلیاژ در این دما اشاره کرد. از حضور فاز FCC-Co در این دما می‌توان نتیجه گرفت که فازهای Co_3B و HCP-Co در اولین مرحله بلورینگی تشکیل شده‌اند و استحاله پلی مورفیک HCP-Co به FCC-Co در دمای حدود 500°C شروع شده است. الگوی پراش پرتو X نمونه آنیل شده در دمای 650°C (بالاتر از دمای پیک دوم کریستاله شدن آلیاژ) در شکل ۲ ت نشان داده شده است. نرم افزار برای این نمونه فقط کالت با شبکه ناشناخته را شناسایی کرده است. با مقایسه موقعیت پیک‌های موجود در

الگوی پراش پرتو X در شکل های ۲ پ و ۲ ت، انطباق کاملی در موقعیت پیک های فاز FCC-Co در دو شکل مشاهده می گردد. که تایید کننده تشکیل فاز FCC-Co در دمای 650°C می باشد. به عبارتی یک استحاله نامنظم به منظم در این دما اتفاق افتاده است. حضور عناصری نظیر Cr, Fe, Si, B در سلول واحد کبالت منجر به تغییر ثابت شبکه کبالت شده است بنابراین شبکه کبالت توسط نرم افزار شناسایی نشده است.



شکل ۱: منحنی DTA مربوط به نوار آمورف $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ در نوخ گرمایش $10^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$.



شکل ۲: الگوی پراش پرتو X نمونه های آلیاژ آمورف $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ که به مدت نیم ساعت در دماهای مختلف به صورت هم دما آبیل شدند. (الف) 450°C , (ب) 500°C , (پ) 650°C , (ت) 650°C

۳-۲- سینتیک بلورینگی

شکل ۳ منحنی های DSC گرمایش پیوسته آلیاژ آمورف $\text{Co}_{67}\text{Fe}_{4}\text{Cr}_{7}\text{Si}_{8}\text{B}_{14}$ در نرخ های گرمایش $10^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ ، $20^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ ، $30^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ و $40^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$ را بر حسب (الف) (دما و ب) زمان نشان می دهد. در این تحقیق تنها بلورینگی مرحله اول بررسی شد. دمای شروع بلورینگی (T_x) (که به عنوان دمای بلورینگی در نظر گرفته می شود)، دمای پیک (T_p)، دمای انتهای بلورینگی (T_{final}) و آنتالپی اولین مرحله بلورینگی (ΔH_c) در نرخ های گرمایش مختلف که از آزمایشات DSC بدست آمده اند در جدول ۲ گزارش شده اند.

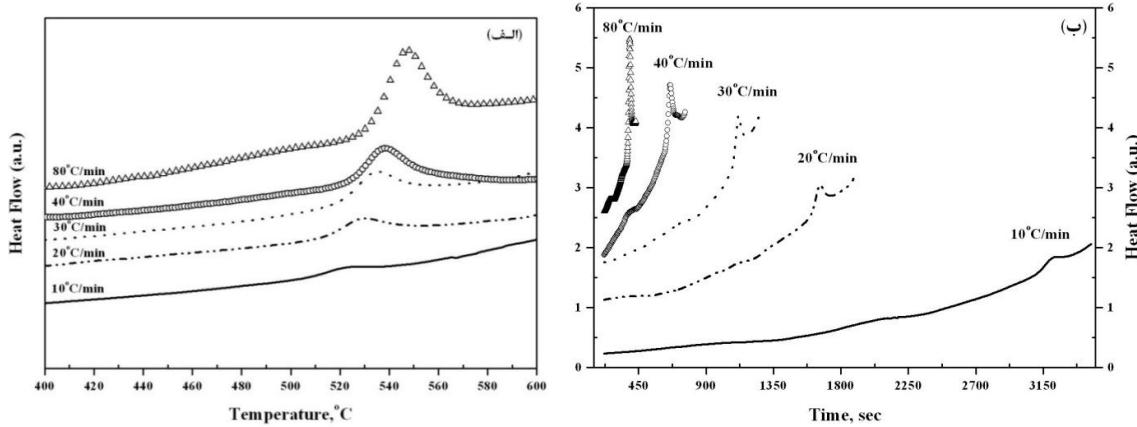
با افزایش نرخ گرمایش پیک های بلورینگی به سمت دماهای بالاتر منتقل می شوند و وسیع تر می شوند (شکل ۳-الف). همچنین با افزایش نرخ گرمایش بلورینگی سریع تر اتفاق می افتد (شکل ۳-ب).

برای توصیف فرایند بلورینگی همه فرایندهای وابسته به دما و زمان، نیاز به تعیین پارامترهای سینتیک از جمله انرژی فعال سازی بلورینگی (E_c)، فاکتور فرکانس (A) و توان بلورینگی (n) است.

۱-۳-۲- انرژی فعال سازی بلورینگی (E_c)

با درنظر گرفتن تغییرات دمای پیک بلورینگی (T_p) با نرخ گرمایش (β)، انرژی فعال سازی ظاهری هر مرحله بلورینگی یک آلیاژ آمورف تحت شرایط گرمایش خطی می تواند با معادله Kissinger تخمین زده شود که رابطه دمای پیک گرمایش با نرخ گرمایش را با معادله زیر بیان می کند [۷]:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = -\frac{E_c}{RT_p} + \ln\left(\frac{AR}{E_c}\right) \quad (1)$$



شکل ۳: منحنی های DSC غیرهمدما در نرخ های گرمایش مختلف بر حسب (الف) (دما و ب) زمان.

جدول ۲: دماهای مشخصه و آنالوپی بلورینگی آلیاژ آمورف $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ در نرخ‌های گرمایش مختلف

نرخ گرمایش ($^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$)	T_x ($^{\circ}\text{C}$)	T_p ($^{\circ}\text{C}$)	T_{final} ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_c (jg^{-1})
۱۰	۵۰۹/۶۵	۵۲۳/۳۱	۵۳۰/۴۶	۱۶/۸۲
۲۰	۵۱۴/۲۱	۵۳۰/۳۵	۵۴۶/۰۷	۲۹/۰۲
۳۰	۵۲۲/۵۶	۵۳۵/۴۹	۵۵۰/۲۶۵	۳۵/۷۵
۴۰	۵۲۳/۳۰	۵۳۸/۶۱	۵۶۳/۰۱	۴۱/۱۴
۸۰	۵۳۱/۳۸	۵۴۷/۹۵	۵۶۴/۳۷	۳۰/۰۳

با رسم $\ln(\beta/T_p^2)/T_p$ خط تقریباً مستقیمی بدست می‌آید که شیب آن (E_c/R) و محل برخورد با محور $y = \ln(AR/E_c)$ می‌باشد.

شکل ۴ منحنی Kissinger آلیاژ آمورف $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ را نشان می‌دهد. مقادیر E_c و A مربوط به اولین مرحله بلورینگی برای نرخ‌های گرمایش مختلف (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و $80^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$) به ترتیب $443/44 \text{ kJmol}^{-1}$ و $(s^{-1})^{1/0.84} \times 10^{49}$ تعیین شدند.

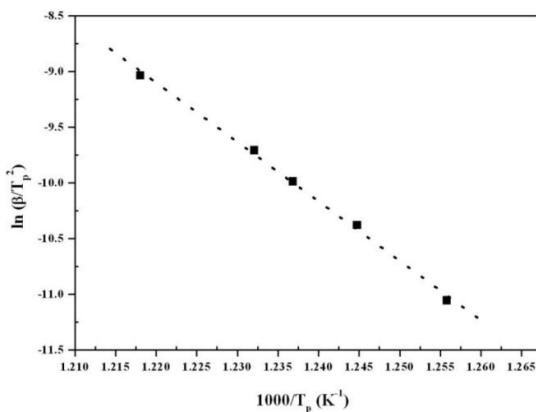
۳-۲-۲- کسر حجمی فاز بلورینه

کسر حجمی فاز بلورینه از محاسبات DSC با استفاده از فرضیه Borchardt با معادله (۲) بدست می‌آید [۷]:

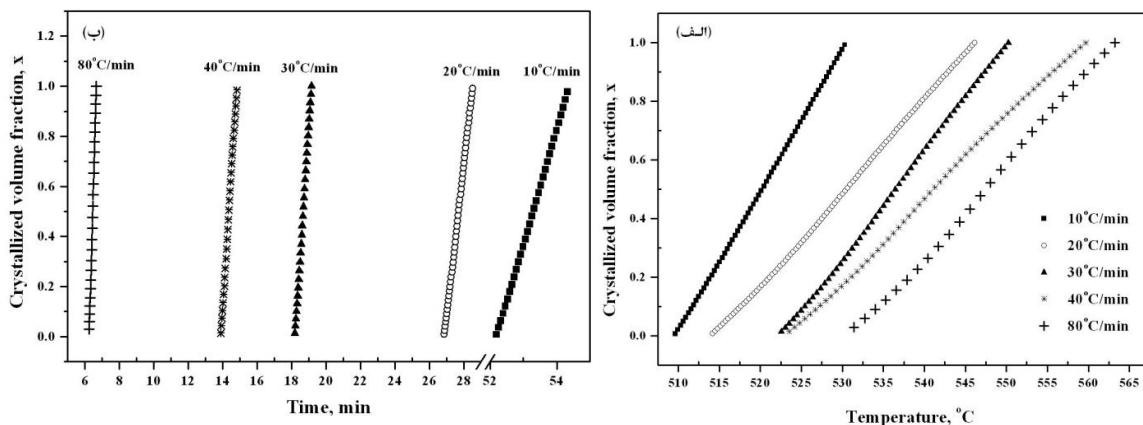
$$x(T) = \frac{\int_{T_i}^T \left(\frac{dH_c}{dT} \right) dT}{\int_{T_i}^{T_f} \left(\frac{dH_c}{dT} \right) dT} \quad (2)$$

که انتگرال مخرج کسر، کل مساحت گرمایش بین دمای T_i که بلورینگی در همان لحظه شروع می‌شود و دمای T_f که بلورینگی تمام می‌شود، را نتیجه می‌دهد و انتگرال صورت، مساحت بین دمای شروع و دمای T را نشان می‌دهد که T دمایی بین T_i و T_f است.

منحنی‌های کسر حجمی فاز بلورینه بر حسب دما در نرخ‌های گرمایش مختلف در شکل ۵-الف دیده می‌شوند. همانگونه که در شکل ۵ (الف و ب) دیده می‌شود، بلورینگی در نرخ‌های گرمایش بالاتر در دماهای بالاتر و زمان‌های نهفتگی کمتر و برای نرخ‌های گرمایش کمتر، در دماهای پایین‌تر و زمان‌های نهفتگی بالاتر اتفاق می‌افتد [۸].



شکل ۴: منحنی Kissinger برای تخمین انرژی فعال سازی بلورینگی غیرهمدمای آلیاز آمورف $\text{Co}_{0.7}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$



شکل ۵: منحنی های کسر حجمی فاز بلورینه (x) برحسب تابعی از (الف) دما و (ب) زمان در نویخ های گرمایش مختلف.

۳-۲-۳- تعیین توان بلورینگی به روش JMAK

داده های DSC معمولاً با فرمول JMAK (Johnson–Mehl–Avrami–Kolmogorov) تحلیل می شوند تا مکانیزم حاکم بر فرایند جوانه زنی و رشد تعیین شود.

کسر حجمی فاز بلورینه (x) در مدل JMAK می تواند با رابطه زیر برحسب تابعی از زمان بیان شود [۹]:

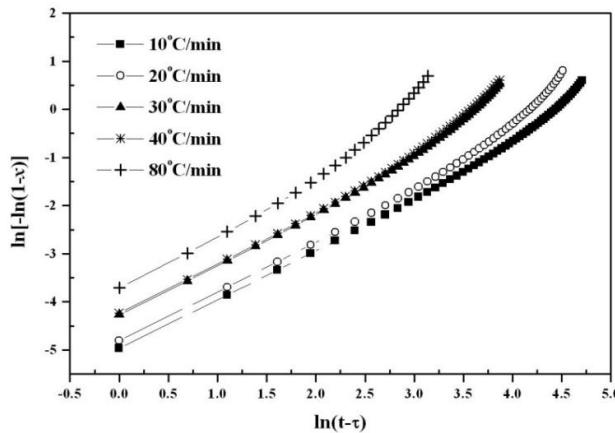
$$x = 1 - \exp\{-[k(t - \tau)]^n\} \quad (3)$$

x کسر حجمی فاز بلورینه (%)، τ زمان نهفتگی جوانه زنی، n توان بلورینگی (ویژگی های جوانه زنی و رشد در مدت بلورینگی را منعکس می کند) و k ثابت نرخ واکنش است که با انرژی فعال سازی و فاکتور فرکانس از طریق رابطه ای آرنسوی مرتب می شود.

بعد از مرتب کردن و دوبار لگاریتم گرفتن، معادله (3) می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\ln[-\ln(1-x)] = n \ln k + n \ln(t - \tau) \quad (4)$$

مقادیر n و k از شیب و محل برخورد منحنی $-\ln[-\ln(1-x)]$ بر حسب $(t - \tau)$ با محور y ها محاسبه می‌شوند. شکل (۶) نمودار JMAK رسم شده در دماهای آنیل مختلف را نشان می‌دهد. توان بلورینگی همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده است، تقریباً مقداری برابر $1/1$ دارد که مشخص می‌کند رشد این آلیاژ کنترل شونده نفوذی است و نرخ جوانه‌زنی تقریباً صفر دارد [۱].



شکل ۶: منحنی $-\ln[-\ln(1-x)]$ بر حسب $\ln(t - \tau)$ با استفاده از روش JMAK برای بلورینگی غیرهمدمای آلیاژ آمورف $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ در نرخ‌های گرمایش مختلف.

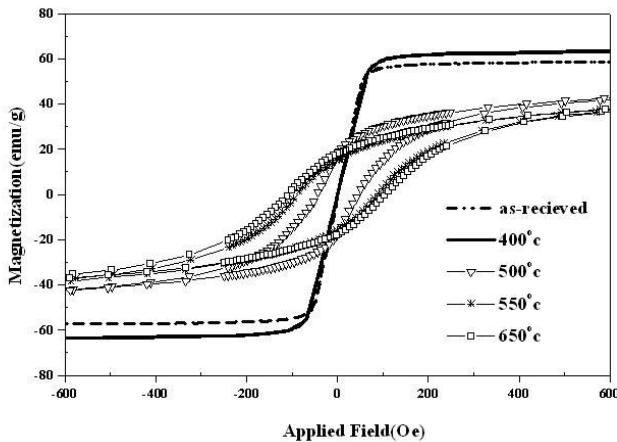
جدول ۲: اثر نرخ گرمایش بر روی پارامترهای سیستیک بلورینگی

β ($^{\circ}\text{Cmin}^{-1}$)	نرخ گرمایش، n	توان اورامی، k
۱۰	۱/۰۸	۰/۰۰۹۲
۲۰	۱/۱۱	۰/۰۱۱۷
۳۰	۱/۱۰	۰/۰۱۹۳
۴۰	۱/۱۰	۰/۰۱۹۹
۸۰	۱/۱۰	۰/۰۳۳۷

۳-۳- خواص مغناطیسی

شکل ۷ حلقه پس‌ماند نمونه‌های عملیات حرارتی شده و نمونه اولیه را در دمای اتاق نشان می‌دهد. با توجه به شکل افزایش مغناطش حالت اشباع (Ms) و کاهش وادراندگی (Hc) در مقایسه با نمونه اولیه در نمونه آنیل شده در دمای 400°C مشاهده می‌گردد. این تغییرات در نتیجه تشکیل فازهای نانوبلور در حجم محدود می‌باشد که در مقاله دیگری در مورد آلیاژ حاضر گزارش شده است [۶]. با افزایش دما افت خواص مغناطیسی (کاهش مغناطش حالت اشباع و افزایش وادراندگی) در نتیجه تشکیل فازهای بلورین مشاهده می‌گردد. افت خواص در دمای 550°C در مقایسه با دمای 500°C در نتیجه غیرهمگنی مگنتوبلورین بالای فاز $\text{B}(\text{FeSi})_3$ در مقایسه با فاز

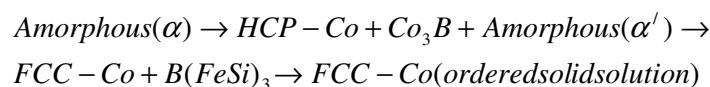
Co_3B به دلیل ساختمان پیچیده تر آن می باشد. در عوض با افزایش دما تا 650°C افت خواص مغناطیسی روند آهسته تری را طی می کند. که علت آن این است که محلول جامد FCC-Co در مقایسه با ترکیبات بین فلزی از غیرهمگنی مگنتو بلورین پایین تر و خواص فرومغناطیس بالاتری برخوردار است. نکته جالب این است که حد اکثر وادارندگی (H_c) اندازه گیری شده (حدود ۱۰۶.۳۰ اورست) در نمونه کاملاً "بلورینه شده" (نمونه ای که در دمای 650°C آنیل شده است) در مقایسه با آلیاژهای آمورف پایه کبالت نظیر $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{13}\text{B}_{11}$ (200 [۲] و 1700 Oe) ($\text{Co}_{0.75}\text{Cr}_{0.25}$)₈₀ Si_5B_{15} (~۴۲۰ Oe) ($\text{Co}_{73}\text{Pt}_5\text{B}_{10}\text{Si}_{12}$) [۱۰] و [۱۱] کمتر می باشد که این واقعیت را می توان به طبیعت فاز نظم یافته در آلیاژ حاضر با خاصیت مگنتو بلورین پایین نسبت به ترکیبات بین فلزی در آلیاژهای مطرح شده نسبت داد.



شکل ۷: حلقه پس ماند آلیاژ آمورف اولیه $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ و نمونه های آنیل شده در دماهای مختلف.

۴- نتیجه گیری

- نوار آمورف $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ که به روش PFMS تولید شده بود، در طی حرارت دهی چیوسته تا K ۱۰۰۰ در دو مرحله بلورینه می شود. فرآیند بلورینگی آلیاژ فوق در نتیجه آنیل هم دما تا بالاتر از پیک دوم بلورینگی به صورت زیر می باشد:



- سینتیک بلورینگی آلیاژ آمورف $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ به طور پیوسته در نرخ های گرمایش ۲۰، ۳۰، ۴۰ و $80^\circ\text{C min}^{-1}$ بررسی شد. انرژی فعال سازی بلورینگی (E_c) مرحله اول آلیاژ آمورف و فاکتور فرکانس (A) با روش Kissinger به ترتیب $443/44 \text{ kJ mol}^{-1}$ و $(S)^{-1} \times 10^{84} / 10^{26}$ محاسبه

شدنده. توان اورامی (n) ۱/۱ است که مشخص می‌کند رشد کنترل شونده نفوذی است و نرخ جوانه زنی تقریباً صفر است.

- خواص مغناطیسی آلیاژ آمورف اولیه با آنیل هم‌دما تا دمای 400°C بهود می‌یابد. افزایش بیش‌تر دما منجر به افت خواص خواص مغناطیسی (کاهش مغناطش حالت اشباع (Ms) و افزایش وادارندگی (Hc)) می‌گردد. نکته جالب این که حداکثر وادارندگی (Hc) در شرایط کاملاً "بلورینه شده در دمای 65°C (~ 106.30 Oe) کمترین مقدار را در میان آلیاژ‌های پایه کبات مشابه دارد.

تشکر و قدردانی

نویسنده‌گان این مقاله بر خود لازم می‌دانند که از آزمایشگاه تحقیقات گروه مهندسی شیمی جهت انجام آزمایشات، حمایت‌های مالی دانشگاه فردوسی مشهد و ستاد ویژه توسعه فناوری نانو تشکر و قدردانی نمایند.

۵- مراجع

- 1- Z.Z. Yuan, X.D. Chen, H. Xu, X.L. Qu, B.X. Wang, "Crystallization kinetics of ultrafine $\text{Co}_{74.4}\text{B}_{25.6}$ amorphous powder prepared by chemical reduction", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 422, 2006, P. 109-115.
- 2- Z.Z. Yuan, X.D. Chen, B.X. Wang, Z.J. Chen, "Crystallization kinetics of melt-spun $\text{Co}_{43}\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{31.5}$ amorphous alloy", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 399, 2005, P. 166-172.
- 3- I.C. Rho, C.S. Yoon, C.K. Kim, T.Y. Byun and K.S. Hong, "Crystallization of alloy $\text{Co}_{68}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{13}\text{B}_{11}$ ", Journal of Materials Science and Engineering , B 96, 2002, 48.
- 4- M. Haddad-Sabzevar, "Ribbon formation and solidification behavior in planar flow melt spinning process", Ph. D. Thesis, Stockholm, 1994.
- 5- L. Bednarska, B. Kotur, S. Mudry, M. Kovbuz, G. Haneczok and Karolus, "The influence of Cr, Mo and Mn on structural changes and magnetic properties of $\text{Co}_{75.5}\text{Fe}_{4.5}\text{Si}_6\text{B}_{14}$ amorphous alloy", Journal of Physics, Conference series 98, 2008, 062010.
- 6- زهرا جمیلی شیروان، محسن حداد سبزوار، "نانوبلورینگی نوارهای آمورف آلیاژ $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ "، هفتمین همایش دانشجویی نانو، دانشگاه تربیت مدرس، خرداد ۱۳۸۹.
- 7- Z.Z. Yuan, X.D. Chen, B.X. Wang, Y.J. Wang, "Kinetics study on non-isothermal crystallization of the metallic $\text{Co}_{43}\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5.5}\text{B}_{31.5}$ glass", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 407, 2006, P. 163-169.
- 8- M. Wu, G. Yang, M. Wang, W. Wang, W.D. Zhang, J. Feng, T. Liu, "Nonisothermal crystallization kinetics of ZnO nanorod filled polyamide 11 composites", Materials Chemistry Physics, Vol. 109, 2008, P. 547-555.
- 9- K. Song, X. Bian, J. Guo, X. Li, M. Xie, C. Dong, "Study of non-isothermal primary crystallization kinetics of $\text{Al}_{84}\text{Ni}_{12}\text{Zr}_1\text{Pr}_3$ amorphous alloy", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 465, 2008, P. L7-L13.
- 10- T.Y. Byun, Y. Oh, C.S. Yoon, C.K. Kim, "Crystallization and magnetic properties of $(\text{Co}_{0.75}\text{Cr}_{0.25})_{80}\text{Si}_5\text{B}_{15}$ metallic glass", Journal of Alloys and Compounds, 368, 2004, 283-286.
- 11- Chung-Sik Yoo, Sung K. Lim, C.S. Yoon, C.K. Kim, "Effect of Pt addition on the crystallization of Co-based amorphous metallic alloys", Journal of Alloys and Compounds, 359, 2003, 261-266.

Crystallization of $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ Amorphous Alloy

S.A. Hasheminezhad^{*}, Z. Jamili-Shirvan, M. Haddad-Sabzevar

* Materials and metallurgical Engineering Department, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad,
Box 91775-1111, Mashhad, Iran.
akram.hasheminejad@gmail.com

Abstract

Crystallization behavior of $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ amorphous ribbons where prepared by planar flow melt spinning (PFMS), has been investigated by X-ray diffraction (XRD) and differential scanning calorimetry (DSC) at different heating rates. It is found that $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ amorphous alloy exhibit two-stage crystallization on continues heating. In order to identify the products of crystallization in $\text{Co}_{67}\text{Fe}_4\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$ amorphous alloy the samples were isothermally annealed at the temperature range between 25-723°C. In the first stage of crystallization, formation of Co(HCP) and Co_3B phases and at the second stage of crystallization, formation of Co(FCC) and $\text{B}(\text{FeSi})_3$ were observed. Further heating upper than 600°C (second step of crystallization) give results the formation of ordered FCC-Co solid solution. The apparent activation energy (E_a) for the first stage of crystallization and frequency factor (A) using Kissinger equation were determined as 443.44 kJmol⁻¹ and $1.084 \times 10^{26}\text{s}^{-1}$. Crystallization exponent (n) was determined as 1.1 by JMAK method. The magnetic properties of annealed samples were measured using a Vibrating Sample Magnetometer (VSM).

Keywords: Amorphous alloy, Crystallization, Kinetics, soft magnetic properties.