

# ارائه روشی برای تولید آلیاژ مس - کروم با میزان حلالیت بالای کروم در زمینه مس

فاطمه مجیدی<sup>۱</sup>، غلامحسین اکبری<sup>۲</sup> و سید محمد حسین حجازی<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- مربی، پژوهشکده صنایع معدنی دانشگاه شهید باهنر کرمان

\*h.hejazi@mail.uk.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۸۹/۰۶/۰۸، تاریخ پذیرش: ۸۹/۰۸/۲۴)

## چکیده

آلیاژهای مس - کروم به دلیل داشتن هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، استحکام و مقاومت به خستگی و خوردگی خوب و شکل پذیری نسبتاً آسان، کاربرد گسترده‌ای دارند. این آلیاژها جزء خانواده آلیاژهای رسوب سختی پذیر محسوب می‌شوند. از این رو هر چه در هنگام تولید، کروم بیشتری در زمینه مس به صورت محلول درآید، می‌توان رسوبات بیشتر و پراکنده‌تری حین مرحله عملیات حرارتی ایجاد نمود و استحکام آلیاژ را بالا برد. به همین دلیل در پژوهش حاضر برای تولید این دسته از آلیاژها از روش ریخته‌گری در قالب مسی آبگرد استفاده شده است تا علاوه بر رسیدن به میزان حلالیت قابل قبول عنصر آلیاژی کروم در مس، هزینه‌های تولید نیز افزایش چندانی نداشته باشند. نتایج نشان دادند که به کمک این روش می‌توان به حداکثر حلالیت ۱/۱۲ درصد اتمی کروم در زمینه مسی آلیاژ دست یافت.

## واژه‌های کلیدی:

آلیاژ مس - کروم، قالب مسی آبگرد، حلالیت، سختی، استحکام.

## ۱- مقدمه

آلیاژهای مس - کروم به دلیل هدایت الکتریکی بالا و استحکام مناسب در دمای بالا، از جمله مواد مهم مهندسی در صنایع الکتریکی محسوب می‌شوند. کاربرد عمده این آلیاژها در ساخت الکترودهای جوشکاری مقاومتی، سوئیچ‌های خلأ ولتاژ بالا، قالب‌های ریخته‌گری و سیم‌پیچی ترانسفورماتورهاست [۱]. حداکثر حلالیت کروم در مس، در دمای یوتکتیک ۰/۸۲ درصد اتمی است (دیاگرام فازی مس -

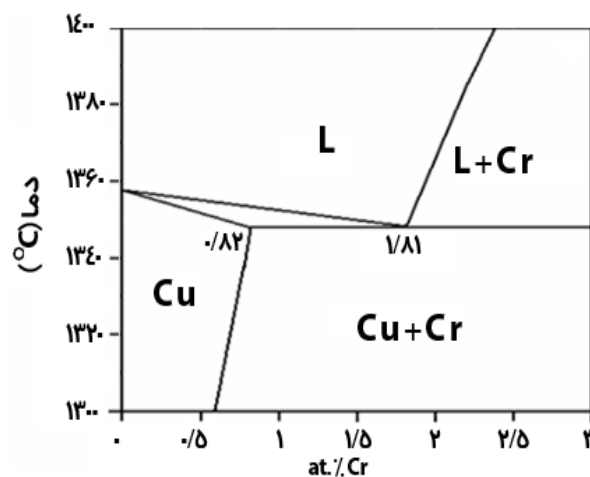
## کروم، شکل ۱).

این مقدار کروم موجود در محلول جامد، کسر حجمی رسوبات اندکی را در مرحله پیرسازی ایجاد می‌کند. لذا خواص مکانیکی مناسبی را فراهم نمی‌آورد [۲]. از این رو دست‌یابی به حلالیت بالای کروم در زمینه آلیاژ اهمیت ویژه‌ای دارد. به همین علت برای تولید این دسته از آلیاژها بیشتر از روش‌های انجماد سریع استفاده می‌شود.

کروم به روش‌های قبل در این تحقیق برای افزایش سرعت انجماد و رسیدن به حلالیت بیشتر عنصر کروم در زمینه مسی آلیاژ مس- کروم از روش ریخته‌گری در قالب مسی آبگرد استفاده شد. نتایج نشان داد که آلیاژ تولید شده به روش مذکور سختی و استحکام مناسبی را داشته و تولید صنعتی این آلیاژ با این روش کاملاً اقتصادی و مقرون به صرفه است.

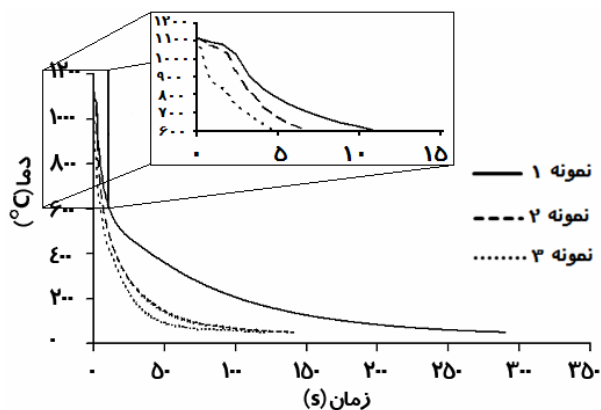
## ۲- روش تحقیق

برای تهیه آلیاژ مس- کروم، ۱۰۰۰ گرم مس الکترولیتی با خلوص ۹۹/۹۹ درصد وزنی به همراه ۱۱۰ گرم کروم الکترولیتی با خلوص ۹۹/۹۸ درصد وزنی در بوتله گرافیتی توسط کوره القائی ذوب شدند. دمای مذاب توسط آذر سنج دیجیتال کنترل شد. هنگامی که دمای مذاب به حدود ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد رسید، ریخته‌گری در قالب مسی آبگرد انجام شد. این قالب به شکل مکعب مستطیل به ابعاد ۲۰×۱۵×۱۰ سانتی‌متر مکعب به صورت دو تکه طراحی شد. به منظور خنک شدن قالب هشت ورودی و هشت خروجی آب در نظر گرفته شد. برای ریختن مذاب، سه محفظه استوانه‌ای شکل به قطرهای ۰/۵، ۱ و ۱/۵ سانتی‌متر و به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر درون قالب تعبیه شد. در انتهای هر محفظه نیز سوراخی ۲ میلی‌متری جهت عبور ترموکوپل نوع K به ضخامت ۰/۳ میلی‌متر سوراخکاری شد. درگاه اتصال هر سه ترموکوپل به یک دستگاه ثبت داده<sup>۴</sup> وصل و این دستگاه به کامپیوتر متصل گردید. به کمک چنین سیستمی، اطلاعات دمایی در فواصل زمانی ۰/۸ ثانیه ثبت گردیدند (شکل ۲). سرعت‌های سرمایش در لحظات اولیه انجماد از روی این داده‌ها استخراج شدند (شکل ۳). ترکیب شیمیایی آلیاژ با استفاده از دستگاه کوانتومتری تعیین شد. پس از برش عرضی نمونه‌ها توسط دستگاه میکروکاتر، برای تعیین بهینه دما و زمان، عملیات حرارتی پیرسازی در سه دمای ۴۵۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های مختلف بر روی نمونه‌ها انجام شد. سپس نمونه‌ها مانع و به منظور سختی‌سنجی توسط دستگاه الکتروپالیش اچ شدند. سختی‌سنجی



شکل (۱): دیاگرام فاز مس- کروم.

تنویک<sup>۱</sup> و همکارانش [۳] با به‌کارگیری روش انجماد سریع ذوب چرخشی توانستند حلالیت کروم را تا حداکثر ۳/۳ درصد اتمی در دمای محیط افزایش دهند. در حالی که کوریا<sup>۲</sup> و همکارانش [۴] با استفاده از روش افشانش پودر تنها به حلالیت کروم تا ۲ درصد اتمی دست یافتند. فرآیند تولید نسبتاً طولانی، پیچیده و بازدهی اندک این روش‌ها، سبب افزایش قیمت محصول نهایی می‌شود. برخی از محققین برای رفع این مشکلات از روش ریخته‌گری معمولی استفاده کرده‌اند. همتی [۵] با استفاده از روش ریخته‌گری ثقلی در قالب تبریدی به این نتیجه رسید که به علت سرعت سرمایش بالاتر این روش نسبت به حالت انجماد تعادلی، میزان کروم محلول در آلیاژ بیشتر از حالتی است که انجماد به صورت تعادلی صورت گیرد. پارسایی [۶] برای افزایش هرچه بیشتر سرعت انجماد، پس از رساندن دمای مذاب به ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد، ریخته‌گری را در قالب مسی همدم با نیتروژن مایع انجام داد. به این ترتیب سرعت سرمایش به حدود ۲۱۰ °C/s رسید. اما به علت گرم شدن قالب در حین ریخته‌گری و انجماد تا حدودی عملیات پیرسازی و تشکیل رسوبات همدموس<sup>۳</sup> نیز رخ داد. این امر سبب شد که با انجام عملیات پیرسازی بعدی، رسوبات تشکیل شده درشت‌تر شوند و سختی آلیاژ تولید شده به این روش کمتر از مقدار مورد انتظار باشد. با توجه به مشکلات عملی موجود برای تولید آلیاژ مس-



شکل (۳): منحنی‌های سرد شدن سه نمونه ریخته‌گری شده.

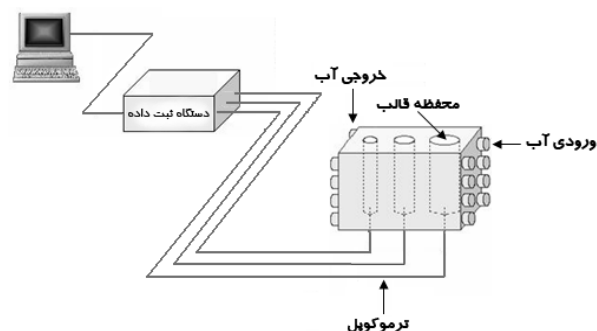
جامد به صورت محلول باقی می‌مانند. اندازه‌گیری شیب مماس بر منحنی‌های سرد شدن در لحظات اولیه انجماد نشان داد که سرعت سرد شدن نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۱۵۰، ۱۸۵ و  $292^{\circ}\text{C/s}$  است. بنابراین انتظار می‌رود که میزان کروم محلول از نمونه ۱ به ۳ افزایش یابد. حداکثر سرعت سرمایش به دست آمده از فرآیند ریخته‌گری در قالب مسی خنک شده در نیتروژن مایع حدود  $210^{\circ}\text{C/s}$  گزارش شده است [۶].

از آن جایی که در پژوهش حاضر سرعت سرمایش به  $292^{\circ}\text{C/s}$  نیز رسید از این رو می‌توان گفت به علت تماس مداوم قالب با آب، دمای قالب به میزان زیادی افزایش نمی‌یابد. در حالی که اگر ریخته‌گری در قالبی انجام شود که قبلاً در نیتروژن مایع خنک شده است، به دلیل عدم تماس مداوم قالب با ماده خنک‌کننده و افزایش دمای قالب در حین ریخته‌گری و انجماد، سرعت سرمایش کمتری حاصل می‌شود.

با وارد شدن اتم‌های بیگانه کروم در زمینه مس، به دلیل یکسان نبودن اندازه اتم‌های آنها، تغییراتی در فواصل اتمی مس رخ می‌دهد که تأثیر آن به صورت افزایش پارامتر شبکه قابل اندازه‌گیری است. تنویک و همکارانش [۳] با اندازه‌گیری پارامتر شبکه آلیاژ مس- کروم تا  $3/3$  درصد اتمی کروم، رابطه خطی زیر را به دست آوردند:

$$[\text{Cr}]_{\text{ss}} = \delta a / 0.026 \text{ (nm)} \quad (1)$$

در این رابطه  $[\text{Cr}]_{\text{ss}}$ ، میزان کروم محلول بر حسب درصد اتمی



شکل (۲): شماتیک قالب ریخته‌گری و دستگاه ثبت داده.

نمونه‌ها به کمک دستگاه ریزسختی سنج Struers مدل Duramin 20 انجام شد. از هر نمونه، حداقل ۱۴ بار آزمایش با بار  $245/2$  میلی‌نیوتن و زمان ۵ ثانیه به عمل آمد و در نهایت میانگین سختی‌های به دست آمده به عنوان سختی نمونه گزارش شد. حداکثر انحراف از میانگین سختی‌ها ۱۰ درصد بود. به منظور تعیین میزان حلالیت کروم، پارامتر شبکه هر نمونه از روی الگوی پراش اشعه‌ی ایکس به دست آمده به کمک دستگاه Advanced Bruker D8 تعیین شد. آزمایش XRD نمونه‌ها از زاویه‌ی  $2\theta = 40^{\circ}$  تا  $2\theta = 140^{\circ}$  و با وقفه‌های ۸ ثانیه در هر  $0/2$  درجه انجام شد.

### ۳- نتایج و بحث

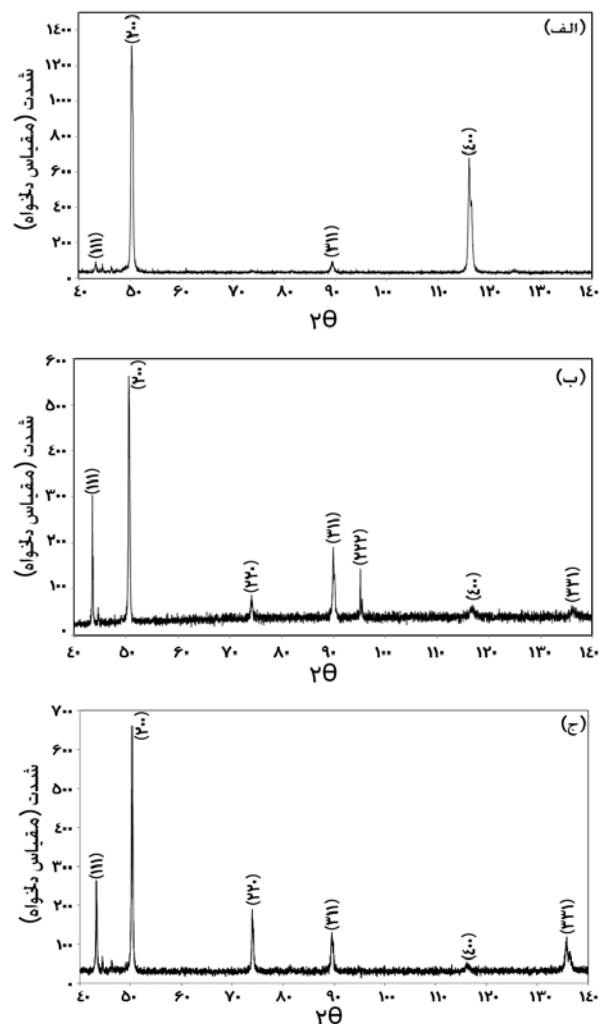
آنالیز کوانتومتری نشان داد که آلیاژ مورد بررسی از  $98/8$  درصد وزنی مس و  $1/2$  درصد وزنی کروم تشکیل شده است. بنابراین مابقی کروم اضافه شده به صورت اکسید و بخار از سیستم خارج شده است. نمونه‌های به قطر  $0/5$ ،  $1$  و  $1/5$  سانتی‌متر به ترتیب به صورت نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ نام‌گذاری شدند. شیب مماس بر منحنی سرد شدن در هر لحظه، سرعت سرد شدن در آن لحظه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳) می‌توان مشاهده نمود که سرعت سرد شدن هر سه نمونه در ثانیه‌های اولیه انجماد بسیار زیاد است. در این لحظات ضریب نفوذ عنصر آلیاژی کروم با سرعت بیشتری کاهش می‌یابد، در نتیجه اتم‌های کروم فرصت کمتری برای جابجا شدن در مذاب و تشکیل رسوب را پیدا می‌کنند و در مس

جدول (۱): پارامتر شبکه زمینه غنی از مس در آلیاژ و میزان کروم محلول.

نوع نمونه	$a_0$ (nm)	$\delta_a$ (nm)	[Cr] <sub>ss</sub> (at. %)
مس خالص	۳/۶۱۵۰	صفر	صفر
نمونه ۱	۳/۶۱۵۶	۰/۰۰۰۶	۰/۲۳
نمونه ۲	۳/۶۱۷۰	۰/۰۰۲۰	۰/۷۷
نمونه ۳	۳/۶۱۷۹	۰/۰۰۲۹	۱/۱۲

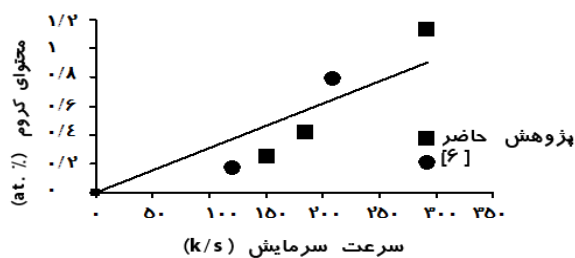
خواهد داشت. بنابراین برای دست آوردن دقیق اندازه پارامتر شبکه بهتر است از پیک‌هایی که نزدیک به  $\theta = 90^\circ$  یا  $\theta = 180^\circ$  هستند استفاده شود. با توجه به اینکه نمودار پارامترهای شبکه به دست آمده بر حسب عبارت  $\cos\theta \cdot \cot\theta$  خطی است، با برون‌یابی نمودار خطی مذکور به سمت صفر ( $\cos\theta \cdot \cot\theta \rightarrow 0$  یا  $\theta \rightarrow 90^\circ$ ) اندازه دقیق پارامتر شبکه به دست خواهد آمد (در مرجع ۷ جزئیات روش کوهن برای اندازه‌گیری دقیق پارامتر شبکه آورده شده است). بعد از اندازه‌گیری پارامترهای شبکه نمونه‌ها، با استفاده از رابطه (۱) میزان کروم محلول محاسبه شد. با توجه به اینکه پارامتر تجربی به دست آمده از آزمایش پراش اشعه X، زاویه تفرق است، هر چه میزان خطا در به دست آوردن این پارامتر کمتر باشد، محاسبات در به دست آوردن پارامتر شبکه با استفاده از رابطه برگ کمتر است. از آنجا که طبق فرمول برگ، رابطه فاصله بین صفحات (و بالطبع پارامتر شبکه) و زاویه پراش، سینوسی است، هر چه زاویه مذکور به  $90^\circ$  درجه نزدیکتر باشد (یعنی  $\theta = 180^\circ$ )، خطا در اندازه‌گیری آن، به میزان کمتری در دقت فاصله بین صفحات و پارامتر شبکه محاسبه شده اثر می‌گذارد. از سوی دیگر با رسم پارامترهای شبکه به دست آمده به ازای هر پیک بر حسب  $\cos\theta \cdot \cot\theta$ ، نموداری خطی به دست می‌آید. با برون‌یابی این نمودار به سمت مقادیر  $\cos\theta \cdot \cot\theta = 0$  (یا  $\theta = 180^\circ$ ) میزان دقیق پارامتر شبکه به دست می‌آید.

نتایج به دست آمده در جدول (۱) آورده شده‌اند. از این جدول پیداست که میزان حلالیت کروم در مس در نمونه ۳ با سرعت سرمایش  $292^\circ\text{C/s}$  برابر با  $1/12$  درصد اتمی است. در حالی که طبق گزارش پارسایی [۶]، میزان حلالیت کروم در آلیاژ تولید شده به روش ریخته‌گری در قالب خنک شده در نیتروژن مایع



شکل (۴): نمودار پراش اشعه X نمونه (الف) ۱، (ب) ۲ و (ج) ۳، در این نمودارها پیک‌های مربوط به فاز مس اندیس گذاری شده‌اند.

و  $\delta a$  اختلاف بین پارامتر شبکه آلیاژ مس - کروم و مس خالص آنیل شده است. در پژوهش حاضر برای تعیین پارامتر شبکه آلیاژ، از روش کوهن [۷] استفاده شد. طبق این روش با استفاده از رابطه برگ  $(\lambda = 2d \sin\theta)^2$  و رابطه بین پارامتر شبکه و فاصله بین صفحاتی در شبکه‌های مکعبی  $(d_{hkl} = a/(h^2+k^2+l^2)^{1/2})$ ، به ازای هر پیک مربوط به فاز مس در نمودار پراش اشعه X (شکل ۴) یک پارامتر شبکه به دست آمد. از طرفی با توجه به رابطه سینوسی بین زاویه اندازه‌گیری شده ( $\theta$ ) و پارامتر شبکه ( $a$ )، هر چه  $\theta$  به  $90^\circ$  درجه نزدیکتر باشد، خطا در اندازه‌گیری آن تأثیر کمتری در دقت اندازه‌گیری  $a$



شکل (۶): میزان حلالیت کروم بر حسب سرعت سرمایش.

اتمی و  $T$  سرعت سرمایش است.

در شکل (۷) منحنی‌های عملیات حرارتی پیرسازی نمونه‌ها در سه دمای ۴۵۰، ۵۵۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دمای عملیات حرارتی، به علت افزایش ضریب نفوذ عنصر آلیاژی، سختی حداکثر در زمان‌های کمتری رخ می‌دهد. به طوری که در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، حتی با گذشت ۲۴۰ دقیقه نیز سختی همچنان سیر صعودی دارد. اما در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و بعد از گذشت فقط ۲ دقیقه سختی حداکثر ایجاد می‌شود. از سوی دیگر به علت این که در دمای بالا تعداد جوانه‌ها کمتر و رسوبات حاصل درشت‌تر هستند، با افزایش دمای عملیات حرارتی، حداکثر سختی کاهش می‌یابد [۹].

اساساً هدف از مقاله حاضر بررسی ارتباط بین میزان سرعت سرمایش در مرحله انجماد و میزان کروم محلول در زمینه آلیاژ مس- کروم و سختی آلیاژ بعد از مرحله عملیات حرارتی است. بنابراین پیگیری بحث مذکور نیاز چندانی به اشاره به تغییرات ریزساختاری در حین عملیات حرارتی و نشان دادن شکل‌های میکروسکوپی ندارد. بحث‌های مفصل در مورد ارتباط بین سرعت سرمایش و ریزساختارهای حاصل شده از آلیاژ مس- کروم در مقاله دیگر نگارندگان انجام شده است [۱۰].

سختی نمونه ۳ در تمامی دماها و زمان‌های عملیات حرارتی بیشتر از سایر نمونه‌هاست. سختی این نمونه بعد از عملیات حرارتی در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴۰ دقیقه به ۱۶۱ HV رسید. با توجه به این که، این نمونه بیشترین سرعت سرمایش



شکل (۵): تأثیر روش‌های تولید آلیاژ مس- کروم در میزان حلالیت کروم.

با سرعت سرمایش  $210^{\circ}\text{C/s}$ ، تنها در حدود ۰/۴۱ درصد اتمی است.

در شکل (۵) حداکثر حلالیت کروم در آلیاژ مس- کروم تولید شده به روش‌های مختلف، با همدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به این که سرعت سرمایش در روش افشانش پودر  $10^4$  کلوین بر ثانیه و در روش ذوب چرخشی  $10^6$  کلوین بر ثانیه تخمین زده شده است (به کمک روابط ریاضی و بدون استفاده از ترموکوپل) [۸ و ۴]، می‌توان مشاهده کرد که به طور کلی با افزایش سرعت سرمایش، میزان حلالیت کروم در آلیاژ مس- کروم افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که با توجه به این که روش مستقیمی برای اندازه‌گیری سرعت سرمایش در مواد تولید شده به روش‌های افشانش پودر و ذوب چرخشی وجود ندارد، تعیین رابطه‌ای دقیق بین سرعت سرمایش و میزان حلالیت کروم در آلیاژهای تولید شده به این روش‌ها امکان‌پذیر نیست.

در شکل (۶) رابطه بین سرعت سرمایش و میزان حلالیت کروم در آلیاژهای ریخته‌گری شده در قالب خنک شده در نیتروژن مایع و قالب مسی آبگرد مشاهده می‌شود. با خطی‌سازی داده‌های شکل (۶) به روش حداقل مربعات تا سرعت سرمایش  $292^{\circ}\text{C/s}$ ، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$[\text{Cr}]_{\text{ss}} = 0.0037T \quad (2)$$

در این رابطه  $[\text{Cr}]_{\text{ss}}$  میزان کروم محلول بر حسب درصد

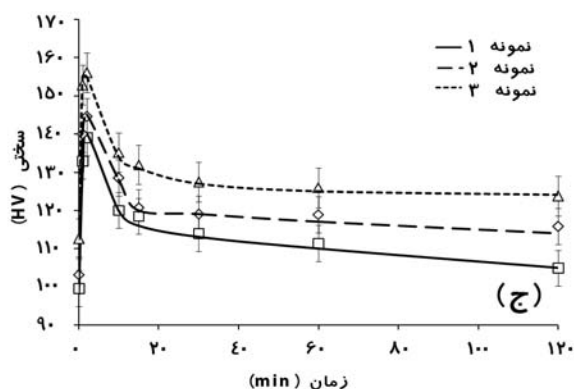
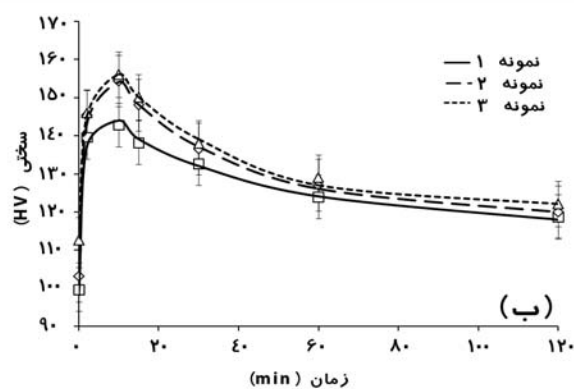
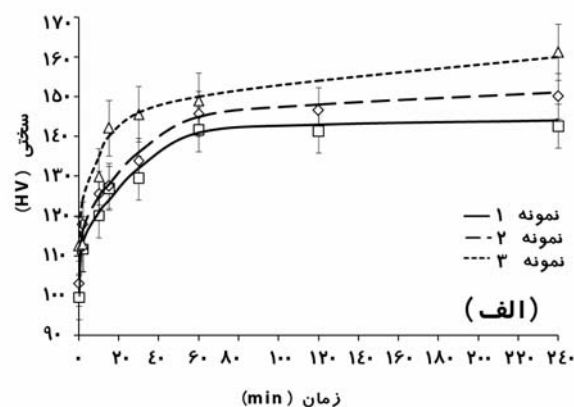
جدول (۲): سختی نمونه‌های خالص بلافاصله پس از ریخته‌گری، حداکثر سختی و کسر حجمی رسوبات در نمونه‌های پس از عملیات حرارتی  $450^{\circ}\text{C}$ .

نوع نمونه	سختی نمونه‌های	حداکثر سختی به	کسر حجمی
	غیرآلیاژی HV	دست آمده HV	رسوبات F
نمونه ۱	۸۰/۰۶	۱۴۲/۲۶	۰/۲۳
نمونه ۲	۸۹/۲۹	۱۵۰/۱۳	۰/۷۷
نمونه ۳	۹۲/۸۱	۱۶۱/۲	۱/۱۲

در همین رابطه کوریا و همکارانش [۴] توانستند با تولید آلیاژ مس با حدود ۲ درصد اتمی کروم، بعد از ۱ ساعت عملیات حرارتی در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد، به سختی HV ۲۵۷ دست یابند. این امر مؤید اهمیت حلالیت عنصر آلیاژی کروم و زیاد بودن کسر حجمی رسوبات در دست‌یابی به سختی حداکثر در این آلیاژ است.

به منظور دست‌یابی به رابطه بین کسر حجمی رسوبات و تأثیر آن در افزایش سختی آلیاژ، ابتدا لازم است مقدار آن معلوم باشد. باید به این نکته توجه کرد که نسبت وزن اتمی به دانسیته مس و کروم بسیار به همدیگر نزدیک است. به عبارت دیگر حجم مولی مس و کروم تقریباً با همدیگر برابرند [۴]. بنابراین می‌توان این گونه در نظر گرفت که مقدار درصد اتمی کروم در محلول جامد که توسط آزمایش XRD به دست می‌آید، تقریباً نسبتاً خوبی از کسر حجمی رسوبات کروم است. در جدول (۲) حداکثر سختی به دست آمده از نمونه‌های مختلف بعد از عملیات حرارتی در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۱ ساعت و همچنین سختی مس غیر آلیاژی بلافاصله پس از ریخته‌گری نشان داده شده است. علت افزایش سختی مس غیر آلیاژی از نمونه ۱ به نمونه ۳، افزایش سرعت انجماد و به تبع آن ریزتر شدن اندازه دانه‌هاست.

در شکل (۸) نمودار  $\Delta\text{HVN}$  (میزان افزایش سختی آلیاژ بعد از عملیات حرارتی به مدت ۱ ساعت در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  نسبت به مس خالص) بر حسب  $f^{1/2}$  (مجذور کسر حجمی رسوبات کروم) نشان داده شده است. برای دست‌یابی به رابطه‌ای هر چه دقیق‌تر بین میزان افزایش سختی و کسر حجمی رسوبات، از

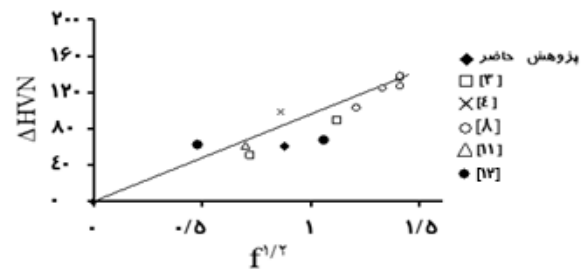


شکل (۷): منحنی‌های سختی-زمان و رده‌های پیرسازی،  
الف)  $450^{\circ}\text{C}$  (ب)  $550^{\circ}\text{C}$  و ج)  $600^{\circ}\text{C}$ .

را دارد، به نظر می‌رسد علت این امر به غلظت بالای عنصر محلول کروم در زمینه آلیاژ مربوط است، به طوری که در حین عملیات حرارتی پیرسازی، رسوبات همدوس بیشتری در زمینه ایجاد می‌شوند. به عبارت دیگر کسر حجمی رسوبات استحکام‌بخش افزایش می‌یابد.

## ۵- مراجع

- [1] M. Xie, G. Liu, X. Yong Lu, A. Shi, Z. Den, H. Jang and F. Zheng, "Investigation on the Cu-Cr-RE Alloys by Rapid Solidification", *Materials Science and Engineering*, Vol. A304, pp. 529-533, 2001.
- [2] M. A. Morris, E. Batawi and D. G. Morris, "Mechanical Properties of Rapidly Solidified Copper Alloys: Dependence on Composite and Microstructure", *Materials Science and Engineering*, Vol. 98, pp. 479-482, 1988.
- [3] M. J. Tenwick and H. A. Davies, "Enhanced Strength in High Conductivity Copper Alloys", *Materials Science and Engineering*, Vol. 98, pp.543-546, 1988.
- [4] J. B. Correia, H. A. Davies and C. M. Sellars, "Strengthening in Rapidly Solidified Age Hardened Cu-Cr and Cu-Cr-Zr Alloys", *Acta Mater.*, Vol. 45, No. 1, pp. 177-190, 1997.
- [۵] م. ح. همتی، "اثر میزان کروم و سرعت سرد کردن بر ریزساختار آلیاژ مس- کروم"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۳.
- [۶] ع. پارسایی، "تأثیر شرایط ریخته‌گری بر حلالیت کروم در مس و بهبود خواص آلیاژ به وسیله عملیات ترمودینامیکی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۸۴.
- [7] C. Suryanarayana, *X-Ray Diffraction: A Practical Approach*, pp. 157-161, Plenum Press, New York, 1998.
- [8] Z. B. Sun, Y. H. Wang and J. Guo, "Liquid Phase Separation of Cu-Cr Alloys During Rapid Cooling", *Non Ferrous Metals*, Vol. 16, pp. 998-1002, 2006.
- [۹] دی. ای. پورتر و کی. ای. ایسترلینگ، استحاله‌های فازی در فلزات و آلیاژها، م. ر. فضلی، مرکز نشر دانشگاهی تهران، چاپ اول، صفحه ۳۳۸-۳۴۲، ۱۳۷۹.
- [10] S. M. H. Hejazi, F. Majidi and G. H. Akbari, "A Cu-Cr Alloy with Nano and Microscale Cr Particles Produced in Water-Cooled Copper Mold", *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 17, No. 5, pp. 629-634, 2010.
- [11] N. J. Long, M. H. Loretto and C. H. Liold, "The Deformation Behaviour of Single Crystals of the Cu-Cr-SiO<sub>2</sub> System: Yield and Pre-Yield Behaviour", *Acta Metallurgica*, Vol. 28, pp. 709-719, 1980.
- [12] W. Koster and W. Knorr, "Property Changes During Age Hardening of a Cu-Cr Alloy", *Z. Metallkd.*, Vol. 45, pp. 350-356, 1954.



شکل (۸): نمودار تغییرات سختی بر حسب کسر حجمی رسوبات.

داده‌های مربوط به محققین دیگر [۳، ۴، ۸، ۱۱ و ۱۲] که در شرایط مشابه به دست آمده نیز استفاده شده است. با خطی‌سازی داده‌های به دست آمده به روش حداقل مربعات می‌توان به رابطه زیر دست یافت:

$$\Delta HVN = 96 f^{1/2} \quad (3)$$

ضریب ثابت رابطه فوق از اندازه‌گیری شیب نمودار  $\Delta HVN$  بر حسب  $f^{1/2}$  حاصل شده است.

## ۴- نتیجه‌گیری

- ۱- به کمک روش ریخته‌گری در قالب مسی آب‌گرد به علت تماس مداوم قالب با آب، دمای قالب به میزان اندکی افزایش می‌یابد و می‌توان به سرعت سرمایش  $292^\circ\text{C/s}$  دست یافت.
- ۲- با افزایش سرعت سرمایش، میزان حلالیت کروم در آلیاژ مس- کروم افزایش می‌یابد. به طوری که معادله  $[Cr]_{ss} = 0.0037 T$  رابطه بین سرعت سرمایش و میزان حلالیت کروم در آلیاژ مس- کروم را نشان می‌دهد.
- ۳- با افزایش دمای عملیات حرارتی پیرسازی از ۴۵۰ به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، سختی حداکثر آلیاژ مس- کروم در مدت زمان کوتاه‌تری حاصل می‌شود ولی مقدار آن کمتر است.
- ۴- میزان افزایش سختی آلیاژ مس- کروم نسبت به حالت غیر آلیاژی از رابطه  $\Delta HVN = 96 f^{1/2}$  تبعیت می‌کند.
- ۵- روش ریخته‌گری در قالب مسی آب‌گرد، به عنوان روشی مناسب برای تولید آلیاژ مس- کروم با محتوای کروم نسبتاً بالا قابل استفاده است.

## ۶- پی نوشت

- 1- Tenwick
- 2- Correia
- 3- Coherent
- 4- Data Logger
- 5- Cohen
- 6- Bragg