

مطالعه آلیاژ رسوب سخت مس-کرم در شرایط ریختگی، پیرسازی شده و پس از عملیات ترمومکانیکی*

محمد حسین همتی⁽¹⁾غلامحسین اکبری⁽²⁾

چکیده آلیاژ Cu-Cr با روش ریخته‌گری تغلی در یک قالب مسی گوه‌ای شکل در اتمسفر کنترل شده تولید گردید. ساختار و ترکیب آلیاژ با استفاده از میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش اشعه ایکس (XRD) و آنالیز EDS بررسی شد. تأثیر سرعت سرد کردن بر رفتار رسوب سختی، خواص مکانیکی و فیزیکی آلیاژ به طور مفصل مورد تحقیق قرار گرفت. تغییرات پارامتر شبکه، سختی و هدایت الکتریکی در سه منطقه کاملاً متمایز از گوه به میزان کرم محلول و رسوبی در حالت ریختگی نسبت داده شد. این نتایج ایجاد یک مرحله پیرسازی را پس از فرایند انجماد نشان داد. با اندازه‌گیری پارامتر شبکه مس، افزایش کرم محلول فوق اشباع در زمینه تا 1/7 درصد اتمی در نوک گوه محاسبه شد. هدایت الکتریکی و سختی نمونه‌های کار شده در شرایط ریختگی و پیرسازی در درصد‌های مختلف کاهش سطح مقطع اندازه‌گیری گردید. کار مکانیکی باعث افزایش سرعت رسوب‌گذاری و کاهش زمان استحکام‌بخشی شده و بازه زمانی عبور از حالت پیر شده به فرایبر شده را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی آلیاژ مس-کرم، پارامتر شبکه، سختی، هدایت الکتریکی، پیرسازی، کار سرد.

Investigation on Properties of Age-hardenable Cu-Cr Alloys in Various Conditions

M.H.Hemmati

G.H.Akbari

Abstract Cu-Cr alloy was produced by chill-gravity casting in a wedge-shaped mould. Structure and composition were investigated using scanning electron microscope, XRD, and EDS analysis. The effect of cooling rate on the as-cast structure and properties and aging behavior was studied in details. Variations of lattice parameter, hardness and electrical conductivity were related to the chromium concentration in the solution. Maximum solubility of chromium was obtained at the tip of the wedge-shaped sample and measured about 1.7 atomic %. Effects of rolling on aging properties including hardness and electrical conductivity were also investigated.

Key Words Copper-Chromium Alloys, Lattice Parameter, Hardness, Electrical Conductivity, Age Hardening, Cold Working

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ 86/9/3 و نسخه نهایی آن در تاریخ 87/5/11 به دفتر نشریه رسیده است.

(1) مربی، دانشگاه تربیت معلم سبزوار

(2) استادیار، بخش مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

مقدمه

در سال‌های اخیر آلیاژهای Cu-Cr به خاطر دارا بودن ترکیب مناسب خواص مکانیکی و فیزیکی، کاربرد گسترده‌ای در صنعت یافته‌اند. الکترودهای جوش‌کاری و کلیدهای ولتاژ بالا نمونه‌هایی از این کاربردها هستند. این آلیاژها از جنبه‌های مختلف فاشناسی، ساختار شناختی، خواص فیزیکی و خواص مکانیکی توسط محققان مورد کنکاش و بررسی قرار گرفته‌اند. به دلیل قابلیت رسوب سختی آلیاژ، روش‌های متنوع انجماد سریع برای افزایش کرم محلول در مس به خدمت گرفته شده است. به کمک روش‌های ذوب چرخشی با استفاده از کوره القایی در خلاء [1,3]، اتمیزه کردن مذاب در تماس با آب [6,4] و آلیاژسازی مکانیکی [8,7] میزان کرم محلول در مس را نسبت به حالت تعادلی افزایش داده‌اند. افزون بر روش‌های افزایش انحلال کرم، از پیروسی چند مرحله‌ای نیز در بهبود ترکیب خواص مکانیکی و فیزیکی استفاده شده است [9]. به‌کارگیری انواع عملیات مکانیکی در مراحل مختلف فرآورش آلیاژ نیز به عنوان راهی برای ایجاد خواص بهینه مطرح گردیده است [10]. تأثیر انجام تغییر شکل مکانیکی چند مرحله‌ای بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ توسط محققان بررسی گردیده است [11,13].

در مقاله حاضر با توجه به ویژگی‌های ریخته‌گری ثقلی- تبریدی در قالب گوه‌ای، ضمن بررسی فاشناختی این آلیاژ، میزان کرم محلول در زمینه با استفاده از تغییرات پارامتر شبکه محاسبه گردیده و تأثیر عواملی مانند میزان کرم محلول، دمای پیروسی و کار مکانیکی بر خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژ در شرایط عملیاتی گوناگون مورد

بررسی و آزمایش قرار گرفته است.

روش آزمایش

آلیاژی از مس و کرم با 2 درصد وزنی کرم در کوره القایی با حفاظت گاز آرگن ریخته‌گری شد. برای این کار ابتدا مس OFHC (99/996%) در یک بوتله گرافیتی ذوب و سپس کرم الکترولیتی (99/8%) به صورت تکه‌های ریز به آن اضافه گردید و دما به حدود 1200 درجه سانتیگراد رسانده شد. پس از افزودن کرم، عملیات ذوب به مدت 10 دقیقه در فرکانس 2/2 کیلوهرتز ادامه یافت تا انحلال و اختلاط کرم در مس به طور کامل انجام پذیرد. سپس آلیاژ مذاب در دو مرحله به سرعت در دو قالب از جنس مس به صورت گوه‌ای و تسمه‌ای ریخته‌گری ثقلی گردید. عملیات پیروسی آلیاژ ریخته‌گری تسمه‌ای شکل در دماهای 450، 500، 550 و 600 درجه سانتیگراد در مدت زمان‌های مختلف انجام پذیرفت. عملیات رسوب سختی گوه نیز در دمای 500 درجه سانتیگراد به مدت نیم ساعت انجام شد.

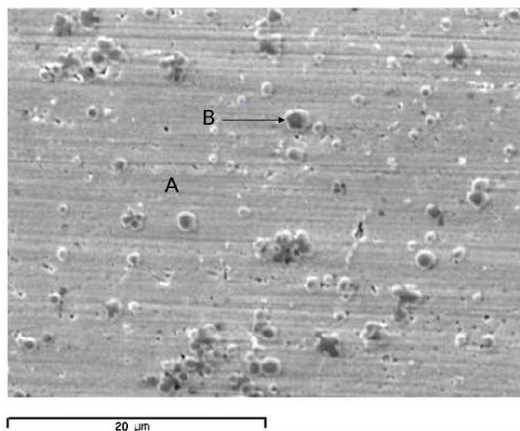
بر روی تسمه تغییر شکل سرد در سه مرحله با سرعت ثابت به مقدارهای 25، 50 و 75 درصد صورت گرفت. در هر مرحله تغییر شکل، هدایت الکتریکی و سختی پیش از عملیات پیروسی اندازه‌گیری شد. سختی نمونه‌ها در زمان‌ها و دماهای مختلف پس از پیروسی نیز به دست آمد. آزمون ریزسختی ویکرز آلیاژ ریخته‌گری گوه‌ای، هم در مقاطع عرضی و هم در مقطع طولی با نیروی 0/2 نیوتن و زمان باردهی 15 ثانیه و مطابق استاندارد ASTM E92 انجام پذیرفت. آزمون سختی ده بار برای هر نمونه تکرار گردید و میانگین نتایج به عنوان سختی در هر مقطع گزارش شد. هدایت الکتریکی مقاطع مختلف گوه براساس جریان‌های گردابی بر حسب IACS% (استاندارد بین‌المللی مس تابکاری شده) بر روی سطوح پرداخت‌شده

نتایج

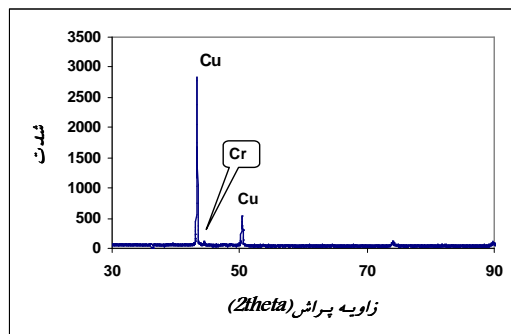
بررسی و تعیین فازها. شکل (1)، تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی آلیاژ با دو فاز مشخص شده را نشان می‌دهد. جدول (1) نتایج آنالیز نقطه‌ای نقاط A و B در شکل (1) را ارائه می‌کند. هر دو آنالیز وجود فازهای غنی از مس و غنی از کرم را نشان داد.

الگوی پراش اشعه‌ی ایکس و انطباق نمودار شدت بر حسب زاویه‌ی پراش بر فازهای احتمالی بانک اطلاعاتی قوی نرم افزار دستگاه پراش (EVA) در شکل (2) آمده است و قله‌های مربوط به مس و کرم در شکل نشان داده شده‌اند.

اندازه‌گیری گردید. گوه ریخته‌گری شده با استفاده از دستگاه ریزش با دقت 0/1 میلی‌متر در مقاطع عرضی به موازات قاعده گوه با طول‌های مساوی بریده و پارامتر شبکه آلیاژ توسط دستگاه سنجش پراش اشعه ایکس Bruker Advance D8 (XRD) اندازه‌گیری و محاسبه شد. اندازه‌گیری پارامتر شبکه با توجه به ساختار مکعبی با جوه مرکزدار (fcc) مس و تعیین زاویه‌ی پراش صفحات (222)، (400)، (331) و (420) و برون‌یابی تابع $\cos\theta\cot\theta$ انجام شد [14]. با استفاده از میکروسکپ الکترونی روبشی تصویر ریزساختار تهیه و آنالیز کمی EDS از نقاط A و B، به عنوان دو فاز مشاهده شده در زمینه تهیه گردید.



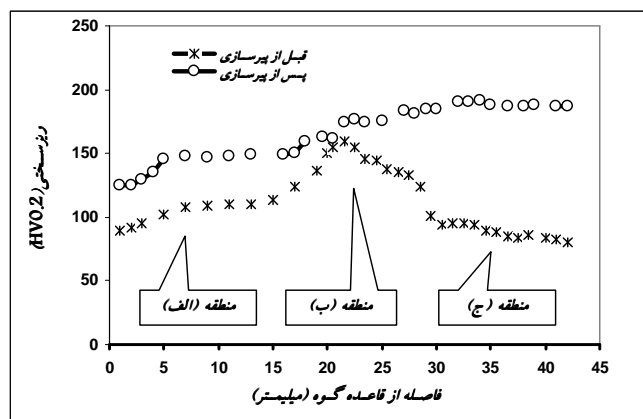
شکل 1 تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی که دو فاز A و B در آن مشخص شده و در جدول (1) آنالیز EDS آنها ارائه شده است.



شکل 2 الگوی پراش اشعه ایکس آلیاژ؛ قله‌های مربوط به مس و کرم بر نقاط بانک اطلاعاتی نرم‌افزار EVA منطبق گردیده است.

جدول 1 نتایج آنالیز نقطه‌های نقاط A و B در شکل 2.

فاز	درصد وزنی مس	درصد وزنی کرم
A	98/9	1/1
B	4/58	95/42

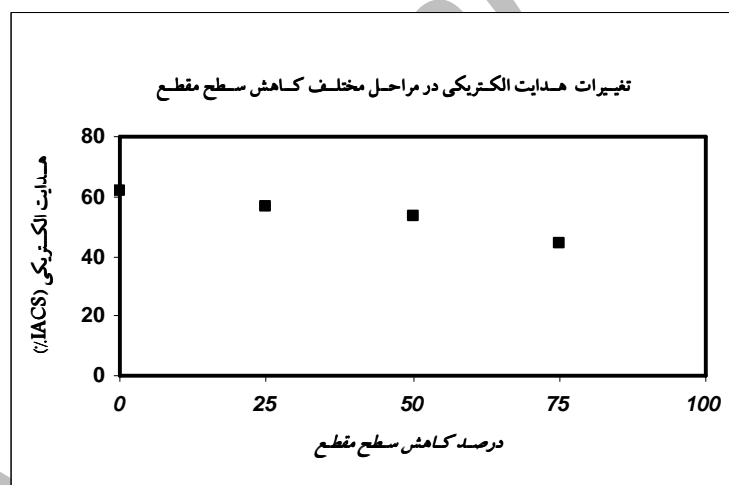
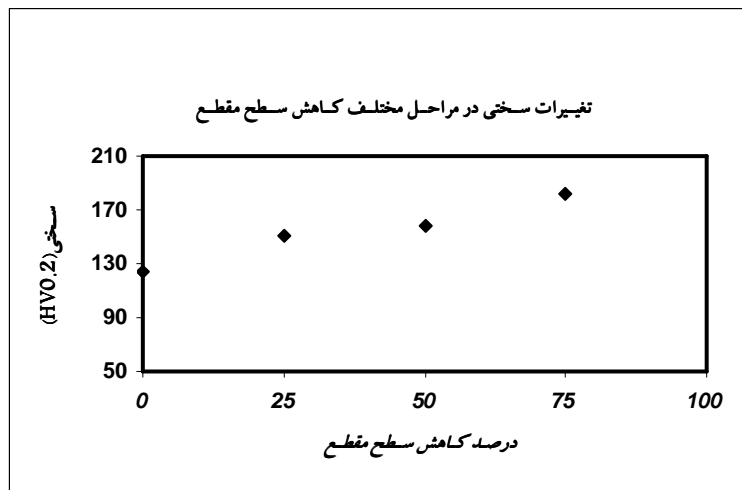


شکل 3 مقایسه تغییرات سختی بر حسب فاصله از قاعده گوه قبل و بعد از پیرسازی.

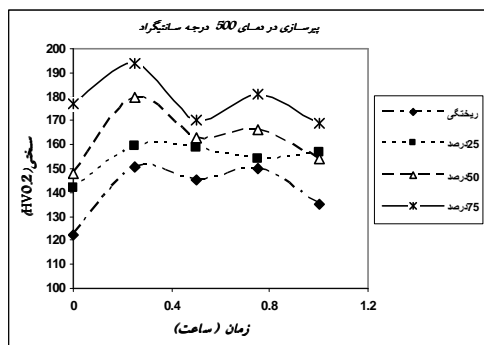
سختی روندی رو به افزایش را نشان می‌دهد. نمودارهای شکل (5)، سختی آلیاژ را در شرایط مختلف دمایی و زمانی پیرسازی با درصد کار سرد متفاوت نشان می‌دهد. در دمای پیرسازی 450 درجه سانتیگراد (الف) در شرایط ریختگی، سختی با افزایش زمان پیرسازی زیاد شده اما این روند صعودی در میزان کار سرد 25 و 50 درصد شدت بیشتری یافته است. در کار سرد 75 درصد با افزایش زمان پیرسازی، کاهش سختی مشاهده می‌گردد. در دمای پیرسازی 500 درجه سانتیگراد (ب) سختی در هر سه مقدار کار سرد ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. در 550 درجه سانتیگراد (ج) سختی مقاطع کار شده در اثر پیرسازی یا سیر نزولی داشته و با افزایش چندان محسوسی نداشته است. در دمای 600 درجه سانتیگراد (د) کاهش سختی در تمام مقاطع مشاهده می‌شود.

سختی سنجی. شکل (3) نمودار سختی گوه را بر حسب فاصله از قاعده در شرایط ریختگی و پس از پیرسازی در دمای 500 درجه سانتیگراد به مدت نیم ساعت نشان می‌دهد. تغییرات سختی گوه ریختگی به سه بخش کاملاً متمایز قابل تقسیم است. در منطقه (الف) سختی آلیاژ ریختگی بین 100 تا 120 ویکرز تغییر می‌کند اما با افزایش فاصله از قاعده به حداکثر 170 ویکرز می‌رسد و سپس دوباره کاهش یافته و حتی در نزدیکی نوک گوه به 90 ویکرز می‌رسد (منطقه ج). در منحنی سختی پس از پیرسازی، سختی آلیاژ در تمام طول گوه به‌طور پیوسته بالا رفته است اما میزان افزایش سختی در تمام مقاطع ثابت نیست. بیشترین اختلاف سختی مربوط به نوک و کمترین تفاوت مربوط به وسط گوه (منطقه ب) می‌باشد.

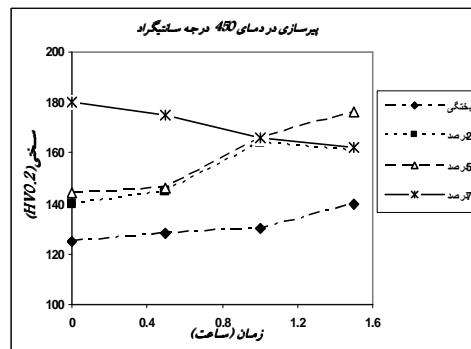
شکل (4)، تغییرات سختی و هدایت الکتریکی تسمه را در شرایط ریختگی و پس از انجام کار مکانیکی مقایسه می‌کند. با افزایش درصد کار سرد،



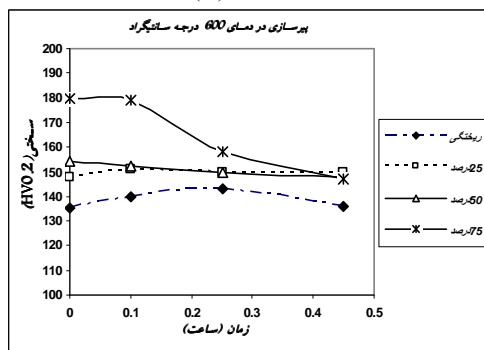
شکل 4 نمودار تغییرات سختی و هدایت الکتریکی تسمه ریختگی در میزان کار سردهای مختلف.



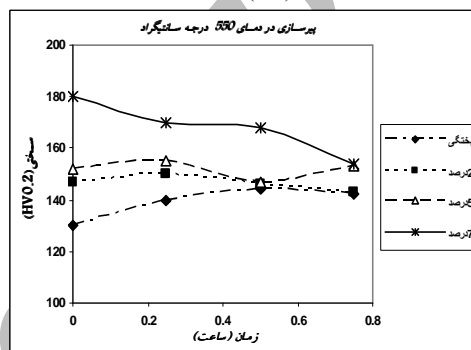
(ب)



(الف)

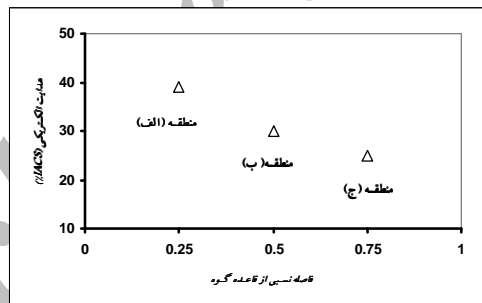


(د)



(ج)

شکل 5 نمودار تغییرات سختی نمونه‌های کار شده در شرایط مختلف پیرسازی.

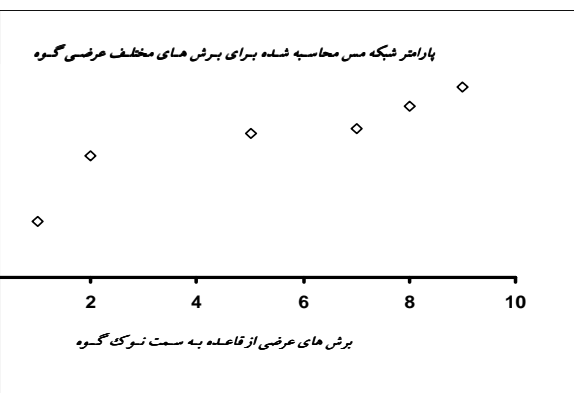


شکل 6 هدایت الکتریکی مناطق مختلف گوه.

مقاطع مورد شده با شرایط ریختگی نیز در شکل (4) مقایسه شده‌است. با افزایش میزان کار سرد هدایت الکتریکی مقاطع کاهش می‌یابد.

هدایت الکتریکی

هدایت الکتریکی برای سه منطقه نشان داده شده در شکل (3) به دست آمد، (شکل 6). با توجه به هدایت الکتریکی به دست آمده از این سه منطقه، ملاحظه می‌گردد که با افزایش فاصله از قاعده گوه، میزان هدایت الکتریکی کاهش یافته است.



شکل 7 محاسبه پارامتر شبکه آلیاژ در مقاطع عرضی

عملیات محلول‌سازی (شکل 3)، وجود کرم محلول در ساختار را تأیید می‌کند. در این ساختار هیچ گونه ترکیب بین فلزی بین مس و کرم تشکیل نشده و ساختار دو فازی است.

تغییرات سختی گوه ریختگی قابل تقسیم به سه منطقه کاملاً متمایز می‌باشد. در منطقه (الف) که نزدیک قاعده گوه قرار دارد و حداقل سرعت سرد شدن را داراست، میزان کرم محلول در مس نیز کمترین مقدار است. با نزدیک شدن به میانه گوه ضخامت کاهش و در نتیجه سرعت سرد شدن افزایش یافته است، اما به‌نظر می‌رسد شرایط در میانه گوه به گونه‌ای است که فرایندی موجب استحکام بخشی آلیاژ شده است؛ زیرا انتظار می‌رود با افزایش سرعت سرد شدن و در نتیجه بالا رفتن کرم محلول در زمینه مس، سختی کاهش یابد. این پدیده در منطقه (ج) به وضوح دیده می‌شود زیرا در این منطقه سختی به پایین‌ترین اندازه می‌رسد. در منطقه (ب) سرعت سرد شدن به قدری هست که کرم محلول در مذاب در حین خروج از ساختار مس با اندازه‌ای منجمد شود که بتواند به عنوان رسوب هم‌دوس مؤثر در افزایش سختی با اندازه 1 تا 100 نانومتر عمل نماید، البته اندازه این رسوبات هم‌دوس به طور دقیق‌تر در شرایط استحکام بخشی تا 4 نانومتر نیز گزارش شده است [15,16]. به عبارت دیگر به‌نظر می‌رسد، عملیات پیرسازی حین انجماد رخ داده باشد. انجام پیرسازی و بررسی تغییرات سختی این ادعا را تأیید

پارامتر شبکه

شکل (7)، پارامتر شبکه آلیاژ ریختگی به شکل گوه را در مقاطع عرضی مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با افزایش فاصله از قاعده گوه، پارامتر شبکه همواره رو به افزایش است.

بحث

تصویر میکروسکپ الکترونی رویشی (شکل 1)، ساختاری دو فازی به صورت یک فاز زمینه و یک فاز رسوبی را نمایش می‌دهد. این فاز رسوبی حین انجماد تشکیل شده است. ترکیب سنجی EDS نقاط A و B (جدول 1)، به ترتیب دو فاز غنی از مس و غنی از کرم را نشان می‌دهد. در مورد ساختار و ترکیب فازهای یاد شده با استفاده از الگوی پراش (شکل 2)، دو فاز Cu و Cr خالص شناسایی گردید که به ترتیب ساختار fcc و bcc دارند [15]. فاز پرکرم نتیجه وجود کرم بیش از حد انحلال در مس است زیرا سرعت سرد شدن مذاب به مقداری نبوده است که بتواند کرم را به صورت فوق اشباع در ساختار نگه دارد. علت وجود مس در فاز رسوبی کرم خالص قرار گرفتن محدوده ترکیب سنجی در مرز دو فاز است زیرا این نقاط کوچک بوده و پروب آنالیز نقطه‌ای دقیقاً روی آن قرار نگرفته است. اما وجود کرم در فاز غنی از مس به خاطر انحلال کرم در فاز مس است که به دلیل افزایش سرعت سرمایش در قالب فلزی رخ داده است. سخت شدن آلیاژ در اثر عملیات پیرسازی بدون

خالص بر حسب انگسترم و [Cr] میزان کرم محلول در شبکه مس بر حسب درصد اتمی است، می‌توان کرم محلول تقریباً 1/7 درصد اتمی در نوک گوه را به دست آورد. البته لازم به یادآوری است که این رابطه به دلیل مشاهده ارتباط خطی پارامتر شبکه و فاصله از قاعده قابل کاربرد است.

افزایش میزان کار سرد در تسمه ریختگی به دلیل ایجاد عیوب شبکه‌ای بیشتر از یک‌سو و همچنین شکستن رسوبات درشت و تبدیل آن‌ها به عنوان موانع حرکت نابجایی بر طبق قانون اوروان موجب افزایش سختی شده است. اما از سویی دیگر این پدیده‌ها موانعی در مقابل حرکت الکترون‌ها ایجاد کرده و موجب افزایش میانگین مسیر آزاد الکترون‌ها (MFP) و در نتیجه کاهش هدایت الکتریکی می‌شوند، (شکل 4).

برای 50 درصد کار سرد عملیات پیرسازی در 450 درجه سانتیگراد در مدت یک و نیم ساعت بیشترین سختی را به دنبال داشته است که در مقایسه با سختی حاصل از 75 درصد تغییر شکل و پیرسازی در دمای 500 درجه سانتیگراد به مدت 15 دقیقه مقدار کمتری را نشان می‌دهد، (شکل 5- الف و ب). همچنین ملاحظه می‌گردد با افزایش دمای پیرسازی به بیش از 500 درجه سانتیگراد، حتی در زمان‌های بسیار کمتر از زمان‌های مورد استفاده در دماهای 450 و 500 درجه سانتیگراد در مقدار کار سردهای متفاوت، فرایند پیرسازی رخ نداده است و در برخی موارد کاهش سختی نیز مشاهده می‌شود. وجود ذرات رسوبی کرم در مرحله انجماد در ساختار شکل (1) و افزایش عیوب و انرژی درونی آلیاژ در اثر کار سرد موجب گردیده است تا اتم‌های کرم محلول در مس در هنگام پیرسازی به جای تشکیل رسوبات مؤثر در سختی- بر اساس پدیده

می‌کند. همان‌گونه که منحنی پیرسازی در شکل (3) نشان می‌دهد، پس از پیرسازی سختی همواره سیر صعودی دارد. اختلاف سختی در حالت پیرسازی و ریختگی در منطقه (الف) کم است. پایین بودن مقدار کرم محلول در مس موجب کاهش رسوبات حاصل از پیرسازی و در نتیجه تفاوت کم سختی در دو حالت می‌شود. در منطقه (ب) تفاوت سختی در حالت پیرسازی و ریختگی بسیار ناچیز شده است. نبود اختلاف سختی در دو حالت به علت غالب نشدن سازوکار پیرسختی در آلیاژ است، زیرا همان‌گونه که اشاره شد احتمالاً رسوبات در مرحله انجماد با اندازه‌های مناسب برای استحکام بخشی شکل گرفته‌اند. در منطقه (ج) با به حداکثر رسیدن میزان کرم محلول، تفاوت سختی شرایط ریختگی و پیرسازی به میزان چشمگیری افزایش یافته است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که یکی از راه‌های اصلی افزایش استحکام این آلیاژ رسوب سخت، بالا بردن میزان کرم محلول در شرایط ریختگی است.

کاهش هدایت الکتریکی از قاعده به سمت رأس گوه (شکل 6) نیز افزایش کرم محلول در مس را در هر سه منطقه تأیید کرده و رابطه‌ای خطی بین انحلال کرم و هدایت الکتریکی را ارائه می‌کند که با نتایج تحقیقات دیگران [17,18] سازگار است. همچنین اندازه‌گیری پارامتر شبکه آلیاژ در مقاطع عرضی رابطه خطی بین پارامتر شبکه و فاصله از قاعده گوه را نشان می‌دهد. این رابطه افزایش کرم محلول در زمینه را تا نوک گوه تأیید می‌کند چرا که وجود کرم محلول باعث اعوجاج شبکه مس و افزایش پارامتر شبکه آن می‌شود. در مورد میزان کرم محلول در ساختار بر اساس رابطه [1,3]:

$$[Cr] = \delta a / 0.00026$$

که در آن δa اختلاف پارامتر شبکه آلیاژ با مس

پیرسازی رابطه مستقیم با میزان کرم محلول و هدایت الکتریکی رابطه معکوس با آن دارد به طوری که تفاوت سختی پس از پیرسازی از نوک گوه تا قاعده آن به حدود 75 ویکرز و تفاوت سختی در نوک گوه قبل و بعد از پیرسازی به بیش از دو برابر رسیده است. منحنی تغییرات سختی آلیاژ ریختگی گوه‌ای نیز نشان می‌دهد که می‌توان عملیات پیرسازی حین انجماد را با کنترل نرخ سرمایش انجام داد و خواص فیزیکی و مکانیکی متوسطی برای آلیاژ به دست آورد.

افزون بر این، کار مکانیکی باعث افزایش سرعت رسوب‌گذاری و کاهش زمان استحکام‌بخشی می‌شود و با انتخاب دما و میزان کار سرد مناسب می‌توان حداکثر سختی را در کمترین زمان ممکن به دست آورد. البته افزایش بیش از حد سرعت رسیدن به حداکثر سختی به دلیل بازه زمانی کوتاه‌گذر از حداکثر سختی می‌تواند به وقوع فرایند فرابپیرسازی منجر گردد.

آمادگی استوالد- به رسوبات بزرگ پیرامون خود پیوندند و قادر به تشکیل موانع حرکتی در برابر نا به جایی‌ها نباشند[19]. البته با توجه به احتمال انجام فرایند بازیابی و تبلور مجدد در حین عملیات حرارتی پس از کار مکانیکی، امکان غالب شدن مکانیزم‌های بازیابی و تبلور مجدد نیز وجود دارد که می‌تواند مورد پژوهش بیشتر قرار گیرد. تأثیر بالا رفتن دمای پیرسازی بر سرعت رسوب‌گذاری در حالت ریختگی نیز مؤید فعال‌شدن سریعتر مکانیزم نفوذی پیرسازی بر مبنای نمودار TTT آلیاژ است.

نتیجه‌گیری

با استفاده از روش ریخته‌گری ثقلی تبریدی می‌توان کرم محلول فوق اشباع در زمینه مس را تا 1/7 درصد اتمی افزایش داد. ریخته‌گری در قالب گوه‌ای الگویی قابل توجه از تأثیر سرعت سرد کردن بر میزان کرم محلول و به تبع آن سختی پس از پیرسازی را ارائه می‌نماید. با افزایش کرم محلول در طول گوه، سختی آلیاژ پیرسازی شده نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد. بنابراین، سختی پس از

مراجع

1. Tenwick, M.J., and Davies, H.A., "Enhanced strength in high conductivity copper alloys", Materials Science and Engineering, A 98, pp. 543-546, (1988).
2. Cantor, B., "Microstructure development during rapid solidification", Proceedings of the 22nd International Symposium on Materials Science, Denmark (2001).
3. Bell, A., and Davies, H.A., "Solid solubility extension in Cu-V and Cu-Cr alloys produced by chill block melt-spinning", Materials Science and Engineering A, 226-228, pp.1039-1041, (1997).
4. Su Juan-hua, Liu Ping, Dong Qi-ming and Ren Feng-zhang, "Aging study of rapidly solidified and solid-solution Cu-Cr-Sn-Zn alloy", Journal of Materials Processing Technology, Accepted in 22; In press, November (2007).

5. Xiaofeng Wang, A., Jiuzhou Zhao, A., and Jie Hea, "Investigation on the microstructure and mechanical properties of the spray-formed Cu-Cr alloys", *Materials Science and Engineering A*, 460-461, pp.69-76, (2007)
6. Dadras, M.M., and Morris, D.G., "Examination of some high-strength, high conductivity copper alloys for high temperature applications", *Scripta Metallurgica*, 38, pp.199-205, (1998).
7. Suryanarayana, C., Ivanov, E., and Boldyrev, V.V., "The science and technology of mechanical alloying", *Materials Science and Engineering A*, 304-306, pp.151-158, (2001)
8. Morris, D.G., and Morris, M.A., "Rapid solidification and mechanical alloying techniques applied to Cu-Cr alloys", *Materials Science and Engineering, A*, 104, pp.201-213, (1988).
9. Miyake, J., and Fine, M.E., "Two-step aging of a copper alloy to optimize combination of strength and electrical conductivity", *Scripta Metallurgica*, 25, pp.1573-1576, (1991).
10. Xu, C.Z., Wang, Q.J., and Zhang, M.S., "Microstructure and properties of ultra-fine grain Cu-Cr alloy prepared by equal-channel angular pressing", *Materials science and engineering A*, 459, pp. 303-308, (2007).
11. Ellis, T.W., Kim, S.T., and Verhoeven, J.D., "Deformation-processed copper-chromium alloys: role of age hardening", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 4, pp. 581-586, (1995).
12. Durachevich, G., Cvetkovski, V., and Jovanovich, V., "Effect of thermomechanical treatment on mechanical properties and electrical conductivity of a CuCrZr alloy", *Bull.Mate.Sci.*, 25, pp. 59-62, (2002).
13. Kim, S.T., Berge, P.M., and Verhoeven, J.D., "Deformation-processed copper-chromium alloys: optimizing strength and conductivity", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 4, pp. 573-580, (1995).
14. Cullity, D.B., "Elements of X-ray Diffraction", Addison, (1979).
15. Fuxiang, H., Jusheng, M., Honglone, N., and Zhiting, G., "Analysis of phases in a Cu-Cr-Zr alloy", *Scripta Metallurgica*, 48, pp. 97-102, (2003)
16. Correia, J.B., and Davies, H.A., "Strengthening in rapidly solidified age hardened Cu-Cr and Cu-Cr-Zr alloys", *Acta Metallurgica.*, 45, pp.177-190, (1996)
17. Szablewski, V, and Kuznicka, B., "Electrical properties of rapidly solidified Cu-Cr alloys", *Materials Science and Technology*, 7, pp. 407-409, (1991).
18. Sun and Guangying, "Effect of deformation and aging treatment on electrical conductivity of Cu-Cr alloy", *Materials Science and Technology*, 23, pp.419-422, (2005).
19. Ardell, A.J., "Precipitation hardening", *Metallurgical Transactions A*, 16, pp.2113-2165, (1985).