بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مواد و متالورژی

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مواد گرایش شناسایی و انتخاب مواد مهندسی

بررسی نانو ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ مس - کروم - تنگستن تولید شده به وسیله فرآیند آلیاژسازی مکانیکی

مؤلف :

مهدی عزیزی کرّانی

استاد راهنما :

دکتر غلامحسین اکبری

استاد مشاور :

پروفسور شهریار شرفی

بهمن ماه ۱۳۹۱

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش مهندسی مواد

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو : مهدی عزیزی کرانی

استاد راهنما : جناب آقای دکتر غلامحسین اکبری

استاد مشاور : جناب آقای پروفسور شهریار شرفی

داور ۱ : جناب آقای پروفسور مرتضی زند رحیمی

داور۲ : جناب آقای دکتر محمد رضا ایزدپناه

نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی در جلسه دفاع: جناب آقای مهندس سهیل سروشیان

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده : سرکار خانم مریم احتشام زاده

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

به پاس تعبیر عظیم انسانی شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند

این نوشتار را به به پدر و مادر عزیزم تقدیم می نمایم

تقدیر و تشکر

سپاس آفریدگار یکتا را که مرا در جاده‌های دانش بشری سوق داد تا با قطره ای از دریای بی‌کران علم آشنا شوم.

در ابتدا بر خود لازم می دانم، از زحمات بی شائبه و گران قدر پدر و مادر عزیزم که موفقیت‌های زندگی ام را مدیون حمایت‌های بی دریغ آنان می دانم، تشکر نمایم.

از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر اکبری که افتخار شاگردی ایشان را داشتم، به پاس راهنمایی‌ها، ژرف نگری‌ها، دقت و پیشنهادات ارزنده‌شان در تمامی مراحل تشکر می نمایم.

از استاد بزرگوار، جناب آقای پروفسور شهریار شرفی به خاطر مشاوره‌های ارزشمندشان در انجام این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از کلیه اساتید محترم بخش مهندسی متالورژی دانشگاه شهید باهنر کرمان مخصوصاً رؤسای سابق بخش جناب آقای پروفسور زند رحیمی و جناب آقای دکتر ایزدپناه و رئیس فعلی جناب آقای دکتر شرفی تقدیر و تشکر به عمل می آورم.

از اساتید محترم، جناب آقای پروفسور زندرحیمی و جناب آقای دکتر ایزدپناه به دلیل قبول زحمت داوری این پایان نامه و ارائه پیشنهادات اصلاحی در راستای بهبود تحقیق پیش رو، صمیمانه سپاسگذاری می نمایم.

همچنین از مسئولین محترم آزمایشگاه دانشگاه شهید باهنر کرمان سرکار خانم مهندس بقایی، سرکار خانم مهندس دادگری و سرکار خانم مهندس افضلی کمال تشکر را دارم.

در پایان، برای تمام همکلاسی‌ها و دانشجویان کارشناسی ارشد مهندسی متالورژی ورودی ۸۹ به ویژه آقایان مهندس سعید کشاورز و مهندس مجتبی محمدی که در این دوره تحصیلی روزهای خوشی را در کنارشان سپری کردم، آرزوی سعادت و کامیابی دارم.

مهدی عزیزی کرّانی

چکیده

نانوکریستال‌ها و به خصوص آلیاژهای پیرسخت شونده مس- کروم- تنگستن به دلیل خواص مطلوبی از جمله شکل پذیری، استحکام و هدایت رسانایی کاربردهای گسترده‌ای در صنایع الکتریکی، خودروسازی و جوشکاری دارند. روش‌های متنوعی از جمله آلیاژسازی مکانیکی و انجماد سریع در ساخت آن‌ها به کار گرفته شده است. در تحقیق حاضر آلیاژسازی مکانیکی با آسیاکاری مخلوط پودرهای مس، کروم و تنگستن در سه ترکیب مختلف، تحت ۳۰۰ دور بر دقیقه (۳۰۰rpm) با استفاده از اتانول و نسبت گلوله به پودر ۱ :۲۰ تحت آتمسفر آرگون آسیاب شدند. زمان‌های آسیاب ۴، ۱۲، ۴۸ و ۹۶ ساعت انتخاب گردید. برای جلوگیری از افزایش دمای فضای داخلی محفظه آسیاکاری، بعد از هر ۳۰ دقیقه آسیاکاری، ۱۵ دقیقه توقف لحاظ شد.

پودرهای آسیاکاری شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش اشعه ایکس (XRD) مورد مطالعه قرار گرفتند. اندازه کریستالی و کرنش داخلی با روش ویلیامسون- هال و پارامتر شبکه با روش تابع برون‌یاب اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان دهنده کاهش اندازه کریستالی تا حد نانومتری، افزایش کرنش داخلی و افزایش پارامتر شبکه با زمان آسیاکاری است.

سپس پودرهای آسیا شده، به وسیله پرس سرد فشرده شده و در دماهای ۴۵۰، ۶۰۰ و ۷۵۰ درجه-سانتیگراد تف جوشی شدند و در پایان، آزمایش ریز سختی سنجی در نمونه‌های قبل و بعد از فرآیند تف جوشی انجام گرفت. نتایج نشانگر این بود که در زمان‌های کم آسیاکاری سختی بعد از تف جوشی افت داشته و در زمان‌های بالای آسیاکاری سختی بعد از تف جوشی افزایش یافته است. همچنین بعد از فرآیند تف جوشی حل شدن اتم‌های کروم و تنگستن در کریستال‌های زمینه مس به دلیل کار سختی شدید، سبب افزایش سختی می شود.

همچنین نتایج حاصل از تصاویر SEM نشان داد که اندازه ذرات پودری، در ابتدای آسیاکاری درشت شده و بعد از رسیدن به مقدار بیشینه، کوچکتر می شود.

کلمات کلیدی: آلیاژسازی مکانیکی، مس-کروم- تنگستن، ریزسختی، تف جوشی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه ۲

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- آلیاژهای پر استحکام پایه مس ۵
۲-۱-۱- خواص مکانیکی ۶
۲-۲- آلیاژهای مس- کروم- تنگستن ۶
۲-۲- ۱- حد حلالیت ۷
۲-۳- روش انجماد سریع ۱۰
۲-۳-۱- روش افشانش پودر ۱۰
۲-۴- روش آلیاژسازی مکانیکی ۱۰
۲-۴-۱- عوامل مؤثر بر فرآیند آلیاژسازی مکانیکی ۱۲
۲-۴-۱-۱- نوع آسیا ۱۳
۲-۴-۱-۲- محفظه آسیا ۱۳
۲-۴-۱-۳- سرعت آسیاکاری ۱۴
۲-۴-۱-۴- زمان آسیاکاری ۱۴
۲-۴-۱-۵- جنس و ابعاد و نحوه توزیع گلوله‌ها ۱۴
۲-۴-۱-۶- نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۵
۲-۴-۱-۷- میزان پرشدن محفظه ۱۵
۲-۴-۱-۸- آتمسفر آسیاکاری ۱۵
۲-۴-۱- ۹- عامل کنترل کننده فرآیند ۱۶
۲-۴-۱-۱۰- دمای آسیاکاری ۱۷
۲-۴-۱-۱۱- شدت آسیاکاری ۱۷
۲-۵- مکانیزم آلیاژسازی مکانیکی ۱۷
۲-۶- فناوری نانو ۱۸
۲-۶-۱- تاریخچه فناوری نانو ۱۹
۲-۶-۲- تعریف فناوری نانو ۱۹

۲-۷- تحقیقات انجام شده بر روی آلیاژهای پر استحکام مس ۲۱

فصل سوم: مواد و روش پژوهش

۳-۱- مواد اولیه تهیه آلیاژ ۲۴
۳-۲- مراحل تهیه پودر آسیا شده و متغیرهای آن ۲۴
۳-۳- بررسی پودرها ۲۵
۳-۳-۱- بررسی با استفاده از پراش اشعه ایکس(XRD) ۲۵
۳-۳-۱-۱- تعیین پارامتر شبکه ۲۶
۳-۳-۱-۲- اندازه کریستال و کرنش داخلی ۲۶
۳-۳-۲-آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی(SEM) ۲۸
۳-۴- تفجوشی ۲۸
۳-۴-۱- پرس سرد ۲۸
۳-۴-۲- عملیات حرارتی ۲۹
۳-۴-۳- تست ریزسختی سنجی ۲۹

فصل چهارم: نتایج

۴-۱—الگوهای پراش و نتایج حاصل از آن ۳۱
۴-۱-۱- الگوهای پراش ۳۱
۴-۱-۲- پارامتر شبکه ۳۹
۴-۱-۳- اندازه کریستال ۴۰
۴-۱-۴- کرنش داخلی ۴۱
۴-۲- مورفولوژی و اندازه ذرات پودرهای آسیاکاری شده ۴۲
۴-۳- ریز سختی ۴۶

فصل پنجم: تحلیل و بحث نتایج

۵-۱- آنالیز پراش اشعه ایکس ۵۴
۵-۲- پارامتر شبکه ۵۴
۵-۳- اندازه کریستال ۵۶
۵-۴- کرنش داخلی شبکه ۵۷
۵-۵- بررسی مورفولوژی و اندازه ذرات پودرهای آسیاکاری شده ۵۸
۵-۶- ریز سختی ۶۰

فصل ششم: نتیجه‌گیری

۶-۱- نتیجه‌گیری ۶۴
۶-۲- پیشنهادات ۶۵

فهرست اشکال

شکل(۲- ۱): دیاگرام فازی آلیاژ مس- کروم. ۸

شکل(۲- ۲): دیاگرام فازی مس- تنگستن..... ۸

شکل(۲- ۳): تغییر پارامتر شبکه نسبت به زمان آلیاژسازی مکانیکی در مخلوط پودری با مقادیر مختلفی از عنصر آلیاژی و با اتم بزرگتر نسبت به اتم زمینه ۹

شکل(۳- ۱): الف) آسیاب گلوله سیاره ای و ب) محفظه آسیاب و گلوله‌ها در دو اندازه. ۲۵

شکل(۳- ۲): نمودار ویلیامسون - هال در ترکیب آسیا شده به مدت ۴ ساعت.....۲۸

شکل(۴- ۱): الگوی XRD حاصل از مخلوط پودری با ترکیب W ٪ ۳ – Cr ٪ ۳ – Cu در مدت زمان چهار ساعت آسیاکاری ۳۱

شکل(۴- ۲): الگوی XRD حاصل از مخلوط پودری با ترکیب W ٪ ۰/۵ – Cr ٪ ۰/۵ – Cu در زمان‌های ۴، ۱۲، ۴۸ و ۹۶ ساعت آسیاکاری ۳۳

شکل(۴- ۳): الگوی XRD حاصل از مخلوط پودری با ترکیب W ٪ ۱/۵ – Cr ٪ ۱/۵ – Cu در زمان‌های ۴، ۱۲، ۴۸ و ۹۶ ساعت آسیاکاری ۳۵

شکل(۴- ۴): الگوی XRD حاصل از مخلوط پودری با ترکیب W ٪ ۳ – Cr ٪ ۳ – Cu در زمان های۴، ۱۲، ۴۸ و ۹۶ ساعت آسیاکاری ۳۷

شکل(۴- ۵): الگوی XRD مقایسه ای، حاصل از مخلوط پودری با ترکیب W ٪ ۰/۵ – Cr ٪ ۰/۵ – Cu در زمان‌های ۴، ۱۲، ۴۸ و ۹۶ ساعت آسیاکاری ۳۸

شکل(۴- ۶): الگوی XRD مقایسه ای، حاصل از مخلوط پودری با ترکیب W ٪ ۱/۵ – Cr ٪ ۱/۵ – Cu در زمان‌های ۴، ۱۲، ۴۸ و ۹۶ ساعت آسیاکاری ۳۸

شکل(۴- ۷): الگوی XRD مقایسه ای، حاصل از مخلوط پودری با ترکیب W ٪ ۳ – Cr ٪ ۳– Cu در زمان‌های ۴، ۱۲، ۴۸ و ۹۶ ساعت آسیاکاری ۳۹

شکل(۴- ۸): تغییرات پارامتر شبکه مس بر حسب زمان آسیاکاری در سه مخلوط پودر ۴۰

شکل(۴- ۹): تغییرات اندازه کریستال بر حسب زمان آسیاکاری در سه مخلوط پودر ۴۱

شکل(۴- ۱۰): تغییرات کرنش داخلی بر حسب زمان آسیاکاری در سه مخلوط پودر ۴۲

شکل(۴- ۱۱): روند تغییر مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب W ٪ ۰/۵ – Cr ٪ ۰/۵– Cu، طی (a) ۴، (b) ۱۲، (c) ۴۸ و (d) ۹۶ ساعت آسیاکاری ۴۳
شکل(۴- ۱۲): روند تغییر مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب W ٪ ۱/۵ – Cr ٪ ۱/۵– Cu، طی (a) ۴، (b) ۱۲، (c) ۴۸ و (d) ۹۶ ساعت آسیاکاری ۴۴
شکل(۴- ۱۳): روند تغییر مورفولوژی و اندازه ذرات پودر در ترکیب W ٪ ۳ – Cr ٪ ۳– Cu، طی (a) ۴، (b) ۱۲، (c) ۴۸ و (d) ۹۶ ساعت آسیاکاری ۴۵
شکل(۴- ۱۴): تغییرات اندازه ذرات پودر مس بر حسب زمان آسیاکاری در سه مخلوط پودر .۴۶
شکل(۴- ۱۵): تغییر ریز سختی آلیاژ Cu-Cr-W بر حسب زمان آسیاکاری (قبل از زینتر) ۴۷
شکل(۴- ۱۶): تغییر ریز سختی آلیاژ Cu-Cr-W بر حسب زمان آسیاکاری تف جوشی شده در دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد ۴۷
شکل(۴- ۱۷): تغییر ریز سختی آلیاژ Cu-Cr-W بر حسب زمان آسیاکاری تف جوشی شده در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد ۴۸
شکل(۴- ۱۸): تغییر ریز سختی آلیاژ Cu-Cr-W بر حسب زمان آسیاکاری تف جوشی شده در دمای ۷۵۰ درجه سانتی گراد ۴۸
شکل(۴- ۱۹): تغییرات ریزسختی در ترکیب W ٪ ۰/۵ – Cr ٪ ۰/۵– Cu بر حسب دمای تف جوشی در زمان‌های ۴، ۱۲، ۴۸ و ۹۶ ساعت آسیاکاری ۴۹
شکل(۴- ۲۰): تغییرات ریزسختی در ترکیب W ٪ ۱/۵ – Cr ٪ ۱/۵– Cu بر حسب دمای تف جوشی در زمان‌های ۴، ۱۲، ۴۸ و ۹۶ ساعت آسیاکاری ۵۰
شکل(۴- ۲۱): تغییرات ریزسختی در ترکیب W ٪ ۳ – Cr ٪ ۳– Cu بر حسب دمای تف جوشی در زمان‌های ۴، ۱۲، ۴۸ و ۹۶ ساعت آسیاکاری ۵۰
شکل(۴- ۲۲): تغییرات ریز سختی در ترکیب W ٪۰/۵– Cr ٪۰/۵– Cu بر حسب زمان آسیاکاری در حالت آسیا شده و در سه دمای تف جوشی ۵۱
شکل(۴- ۲۳): تغییرات ریز سختی در ترکیب W ٪۱/۵–Cr ٪ ۱/۵ – Cu بر حسب زمان آسیا کاری در حالت آسیا شده و در سه دمای تف جوشی ۵۱

شکل(۴- ۲۴): تغییرات ریز سختی در ترکیب Cu – ۳٪ Cr – ۳٪ W بر حسب زمان آسیاکاری در حالت آسیا شده و در سه دمای تف جوشی ۵۲

فهرست جداول

جدول(۲- ۱): خواص فیزیکی مس، کروم و تنگستن. ۷

جدول(۳- ۱): شرایط آسیاکاری مورد استفاده. ۲۵

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

آلیاژهای زمینه مس تقویت شده با رسوبات فلزی طی سال‌های گذشته توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است و علی رغم تحقیقات زیاد انجام شده بر روی آن‌ها، هم اکنون نیز مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرند. هدف از بررسی‌های انجام شده بر روی این آلیاژها، دستیابی به هدایت الکتریکی و حرارتی بالا در کنار خواص مکانیکی مطلوب است. ویژگی‌های مذکور سبب شده تا این آلیاژها، کاربردهای مختلفی در صنایع مختلف و از جمله صنایع الکتریکی، خودروسازی، هوافضا و غیره داشته باشند.

از طرف دیگر با توسعه نانومواد و امکان پراکنده نمودن ذرات با ابعاد نانومتری در زمینه Cu، دستیابی به ترکیبی از خواص Cu و نانو ذرات فراهم شده و آلیاژ با کارایی مطلوب‌تر به دست می-آید. به عنوان مثال تهیه این آلیاژ با ساختار نانومتری سبب شده تا خواص مکانیکی آن تا حد قابل توجهی بهبود یابد.

روش‌های متنوعی شامل فرآیندهای ذوب و ریخته‌گری تا فرآوری حالت جامد از قبیل متالورژی پودر به منظور تولید این آلیاژها به کار رفته است. به ویژه آن که امروزه به منظور تهیه این آلیاژها با ساختار نانومتری، روش‌هایی نوین مانند واکنش درجا، انجماد سریع[1]، تغییر شکل پلاستیکی شدید، آسیاکاری پرانرژی، پراکنش، سل- ژل و غیره ارائه شده اند.

در میان این روش‌های نوین، فرایند آلیاژسازی و آسیاکاری مکانیکی به عنوان یک روش ساده و سازگار با محیط زیست برای تولید پودرهای آلیاژی محسوب می شود. آلیاژسازی مکانیکی[2] (MA)، شامل تغییر شکل تکراری(جوش خوردن، شکستن و جوش خوردن مجدد) ذرات پودری در یک آسیای پرانرژی است تا هنگامی که ترکیب موردنظر به دست آید. نشان داده شده است که دانه‌های دارای ابعاد نانومتری، تقریباً در هر ماده ای پس از مدتی آسیاکردن قابل دستیابی است.

سیستم آلیاژی Cu-Cr-W ازجمله سیستم‌های آلیاژی است که به دنبال تجزیه محلول جامد W و Cr در حین عملیات پیرسازی، رسوبات Cr و W در زمینه Cu تشکیل می‌شوند. البته تشکیل محلول جامد فوق اشباع به سبب حد حلالیت پایین آن‌ها در یکدیگر با روش‌های تعادلی امکان-پذیر نیست و با روش‌های غیرتعادلی و از آن جمله آلیاژسازی مکانیکی امکان پذیر است.

[1] Rapid Solidification
[2] Mechanical Alloying

آلیاژسازی مکانیکی علاوه بر اینکه روشی معتبر برای دستیابی به توزیع همگن و نانومتری فاز ثانویه در زمینه‌های فلزی است، گسترش حد حلالیت در بسیاری از سیستم‌ها را هم در پی دارد. از این‌رو با توجه به بررسی‌های صورت گرفته انتظار می رود کامپوزیت Cu-Cr-W به روش آلیاژسازی با ساختار ریزمیکرون و حتی نانومتری تولید شود. بنابراین با ریز کردن رسوبات Cr و W تا ابعاد نانومتری، بهبود چشمگیری در بسیاری از خواص الکتریکی و مکانیکی کامپوزیت حاصل خوهد شد. با این حال از جمله محدودیت‌های کامپوزیت Cu-Cr-W، رشد رسوبات Cr و W و انحلال مجدد آن‌ها در زمینه مس به خصوص در دمای بالا است. بنابراین باید شرایطی فراهم آید که دمای آلیاژسازی مکانیکی حتی الامکان در دمای پایین نگه داشته شود.

در پژوهش حاضر، با انجام فرآیند MA، محلول جامد فوق اشباع مس- کروم- تنگستن در ترکیبات مختلفی از مخلوط پودر تهیه شده و توسط تکنیک های XRD و SEM تشکیل محلول جامد فوق اشباع و روند تغییر مشخصه‌های ذرات و کریستال‌های آن در زمان‌های متفاوت آسیاکاری بررسی شدند. در ادامه، عملیات حرارتی تف جوشی در آلیاژ حاصل از آسیاکاری، در دماهای مختلف انجام گرفت. تغییرات سختی آلیاژ تحت عملیات حرارتی، با میکروسختی ویکرز مورد مطالعه قرار گرفت.

به طور کلی هدف از انجام این کار بررسی پارامترهای اندازه کریستال، پارامتر شبکه، کرنش داخلی، اندازه ذرات پودر و سختی آلیاژ بوده است و شرایط بهینه تولید آلیاژ در حین آسیاکاری با استفاده از پارامترهای بالا بررسی شده است.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات گذشته

۲-۱- آلیاژهای پر استحکام پایه مس

عنصر مس دارای خواص منحصر به فردی از جمله شکل پذیری، مقاومت به خوردگی و هدایت الکتریکی مناسب است. این عنصر دارای استحکام، سفتی، مقاومت سایشی و مقاومت خزشی نامناسب بوده و به همین دلیل برای اینکه مجموعه ای از خواص مطلوب را در کنار یکدیگر داشته باشیم، از آلیاژهای پایه مس به جای استفاده از عنصر خالص مس استفاده می شود [۲،۱].

فازهای تقویت کننده متفاوتی قابلیت قرار گرفتن در زمینه مس را دارند، اما عملکرد آن‌ها متفاوت است. هنگامی که فازهای تقویت کننده سرامیکی مانند اکسیدها، بوریدها وکاربیدها در زمینه مس قرار می گیرند، هدایت الکتریکی به شدت افت می کند. اما برای حفظ خواص مکانیکی به دلیل مقاوم بودن آن‌ها در برابر درشت شدن حین آنیل مناسب هستند [۳]. اگر از فازهای تقویت کننده فلزی قابل حل در مس مانند عناصر Ni، Au و Mn استفاده شود، با وجود استحکام به واسطه تشکیل محلول جامد، هدایت الکتریکی را به شدت کاهش داده و اگر از عناصر فلزی غیر قابل حل در مس مانند Cr، Mo، Nb، Mg، Be وW استفاده شود [۵،۴] با توجه به حلالیت ناچیزشان در مس هدایت الکتریکی را کم نمی کنند. اما در عین حال استحکام را نیز چندان افزایش نمی دهند [۳،۶]. بهترین شیوه برای افزایش استحکام و بهره مندی از هدایت الکتریکی مطلوب، استفاده از عناصر آلیاژی کم محلول به همراه به کارگیری شیوه استحکام دهی سختی رسوبی است [۷]. در این شیوه به کمک روش‌های تولید موجود و با ایجاد محلول فوق اشباع و انجام عملیات پیرسازی، رسوبات بسیار ریز و پراکنده ای در زمینه آلیاژ ایجاد می شوند. در نتیجه با خروج عنصر آلیاژی حل شده از محلول جامد فوق اشباع، هدایت الکتریکی که در اثر ایجاد محلول جامد کاهش یافته بود، دوباره افزایش می یابد. از سوی دیگر به دلیل حضور رسوبات ریز همدوس و پراکنده در زمینه آلیاژ، استحکام نیز افزایش می یابد.

یکی از نکات حائز اهمیت [۸] آن است که معمولاً اندازه ذرات فلز دوم در حد میکرون بوده و لذا رفع کامل تناقض بین استحکام و چکش خواری مشکل است. با توسعه نانو مواد و امکان پراکنده نمودن ذرات با ابعاد نانومتری در زمینه مس، دستیابی به ترکیبی از خواص مس و نانوذرات فراهم شده و آلیاژ با کارایی مطلوب تر به دست آمده است. شایان ذکر است تهیه این آلیاژها با ساختار نانومتری سبب شده تا خواص مکانیکی آن‌ها تا حد قابل توجهی بهبود یافته و بر کارایی محصولات به دست آمده از این آلیاژها افزوده شود [۹]. به عنوان مثال دیده شده است که هرگاه

اندازه ذرات تقویت کننده در آلیاژ از ابعاد میکرونی به ابعاد نانومتری کاهش یابد، استحکام آلیاژ ۲۰ درصد بهبود می یابد [۸].

۲-۱-۱- خواص مکانیکی

ملاحظه شده است که افزایش استحکام آلیاژهای زمینه مس ناشی از زمینه دانه ریز و ذرات پراکنده فاز ثانویه است. مرز دانه‌ها و مرزهای فرعی موانعی مؤثر در برابر حرکت نابجایی‌ها محسوب می شوند. لذا دانه‌های ریز سبب کاهش فاصله آزاد متوسط برای حرکت نابجایی‌ها شده، که استحکام زایی را به دنبال دارد. این استحکام زایی با کمک رابطه معروف هال- پچ[1] قابل تخمین است [۱، ۱۰].

$$\Delta\delta = k_y . D^{-1/2} \qquad (۱-۲)$$

که در آن $\Delta\delta$ میزان افزایش استحکام، D اندازه دانه و k_y مقداری ثابت است.

۲-۲- آلیاژهای مس- کروم- تنگستن

کروم به عنوان عنصر کم محلول در مس و تنگستن به عنوان عنصر غیر قابل حل در مس کاربرد فراوانی در آلیاژسازی دارند.کاربردهای فراوانی برای مواد با ساختار پایدار و استحکام در دمای بالا همراه با هدایت الکتریکی و یا حرارتی بالا مانند آلیاژهای مس- کروم – تنگستن وجود دارد. این کاربردها به دو دسته تقسیم می شوند. دسته اول کاربردهای الکتریکی مانند سوییچ‌های با کارایی بالا، الکتروموتورها و مبدل‌های حرارتی هستند. دسته دوم کاربرد در صنایع ساخت و تولید مانند اجزای خنک‌شونده، نازل موشک، کابل‌ها و سیم‌های مغناطیسی و نوک الکترودهای جوشکاری مقاومتی است. به سبب هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، آلیاژ مس-کروم- تنگستن بهترین فلز برای همه این کاربردها محسوب می شود [۱۱].

[1] Hall-Petch

در جدول (۲-۱) خواص کریستالوگرافی و فیزیکی سه عنصر مس، کروم و تنگستن آورده شده است.

جدول(۲- ۱): خواص فیزیکی مس، کروم و تنگستن [۱۲].

عناصر	ساختار کریستالی	پارامتر شبکه (A°)	شعاع اتمی (A°)	عدد اتمی	وزن اتمی gr/mol	دمای ذوب (˚C)	دمای جوش (˚C)
مس	FCC	۳/۶	۱/۲۸	۲۹	۶۳/۵۴	۱۰۸۴	۲۵۹۵
کروم	BCC	۲/۸۸	۱/۸۵	۲۴	۵۱/۹۹۶	۱۸۷۵	۲۶۶۵
تنگستن	BCC	۳/۱۶۴	۱/۴۱	۷۴	۱۸۳/۸۵	۳۴۱۰	۵۹۳۰

۲-۲- ۱- حد حلالیت

روش متداول تشکیل محلول جامد فوق اشباع، آنیل کردن فلز در حالت جامد و سرد کردن سریع از دمای بالا است. در این روش دامنه تشکیل محلول جامد فوق اشباع در یک سیستم آلیاژی محدود است. این روش، روشی تعادلی است و برای دستیابی به محلول‌های جامد فوق اشباع روشی مناسب نیست. در شکل‌های زیر دیاگرام فازی سیستم‌های آلیاژی دوتایی مس- کروم و مس- تنگستن مشاهده می شود. شکل‌ها نشان دهنده این هستند که حداکثر حلالیت کروم در مس ۰/۸۲ درصد اتمی و همچنین عنصر تنگستن در حالت جامد هیچ حلالیتی در مس ندارد.

بر طبق آخرین دیاگرام فازی منتشر شده توسط زنگ و همکارانش [۱۳]، که بر اساس محاسبات ترمودینامیکی ترسیم شده است، سیستم مذکور از نوع یوتکتیک تشخیص داده شده(شکل ۲-۱)، نقطه یوتکتیک در این دیاگرام در دمای ۱۳۴۸ درجه کلوین و ۱/۸۱ درصد اتمی کروم قرار دارد و حداکثر حلالیت کروم در مس در دمای یوتکتیک، ۰/۸۲ درصد اتمی است که با کاهش دما به سرعت کاهش می یابد.

مشاهده می شود که در حالت تعادل ترمودینامیکی انحلال دو طرفه Cr و Cu و بالعکس بسیار ناچیز است. دو عامل الکترونگاتیویته و شعاع اتمی بیش ترین تأثیر را روی حد حلالیت این سیستم دارد. با توجه به مطلب بالا و از طرف دیگر تفاوت زیاد نقطه ذوب اجزاء، روش مرسوم ذوب و ریخته گری برای تهیه محلول جامد فوق اشباع Cr در Cu قابل استفاده نیست. به همین دلیل تولید