

تشکیل پیوند بین ذرات در تف جوشی آلیاژ $Cu-10Sn-10Pb$ تهیه شده از مخلوط پودری

بهارک قربانیان اقدم^{۱*}، مازیار آزادبه^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

* baharak.ghorbanian@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۰/۲۶، تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۳/۲۰)

چکیده

در این پژوهش، پیوند بین ذرات نمونه‌های متالورژی پودر آلیاژ $Cu-10Sn-10Pb$ ساخته شده از مخلوط پودری مورد بررسی قرار گرفت. پودرهای مس، قلع و سرب با اندازه ذرات زیر ۱۰۰ میکرون با نسبت‌های وزنی فوق، مخلوط و تحت فشار ۵۵۰ مگاپاسکال فشرده سازی شدند. پس از بررسی‌های آنالیز حرارتی، نمونه‌ها در محدوده دمایی ۷۵۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۶۰ دقیقه تحت اتمسفر آرگون تف جوشی شدند. با مقایسه نتایج متالوگرافی و شکست‌نگاری، مقدار و نوع فاز مایع گذرا و یا فاز مایع پایدار بررسی و مطالعه شد. با افزایش دمای تف جوشی، به علت همگنی ناشی از نفوذ فاز مایع و تغییر آرایش دانه‌ها، استحکام پیوند بین ذرات قابل مقایسه با استحکام خود ذرات بوده و شکست درون دانه‌ای سهم بیشتری را نسبت به شکست مرز دانه‌ای به خود اختصاص می‌دهد.

واژه‌های کلیدی:

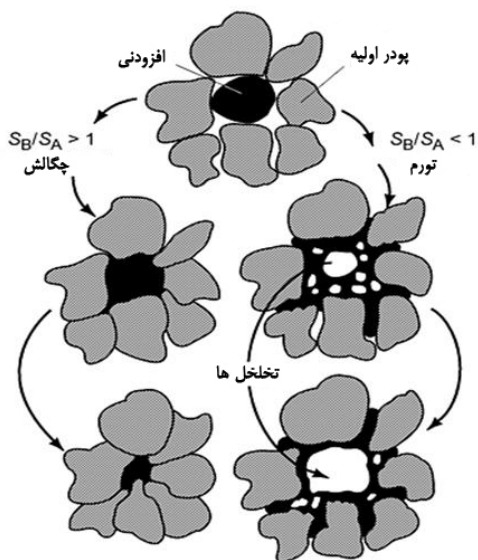
آلیاژ $Cu-10Sn-10Pb$ ، متالورژی پودر، فاز مایع گذرا، فاز مایع پایدار، شکست درون دانه‌ای، شکست مرز دانه‌ای

۱- مقدمه

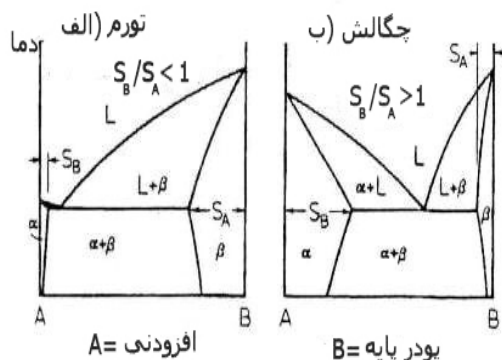
سرعت‌های زیاد، شوک و ارتعاش تحمل می‌کنند، سرب موجود در این آلیاژها که یک فاز نرمی بوده به عنوان روانساز جامد عمل کرده و حساسیت به ترک این آلیاژ را تحت شرایط مخصوص لغزش افزایش داده و فواید چشمگیری در کاهش اصطکاک مابین سطوح لغزش دارد و بنابراین باعث افزایش خاصیت ماشین کاری این آلیاژها می‌شود. مزیت اصلی مواد برنزی ساخته شده به روش متالورژی پودر، علاوه بر موارد فوق، قیمت کمتر آنها است و کاربردهای گسترده‌ای در یاتاقان‌ها،

در میان تکنولوژی‌های مختلف ساخت برخی قطعات، متالورژی پودر^۱ از کارآیی گسترده‌تری برخوردار است. یکی از مزایای اصلی این روش، قابلیت آن برای تولید قطعات با شکل پیچیده و دقت بالای ابعادی بوده و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است [۱]. ساخت یاتاقان‌های برنزی از سال ۱۹۲۰ توسط چریسلر^۲ و بروک^۳ آغاز شده است. آلیاژهای برنز دارای طیف وسیعی از کاربردهای صنعتی هستند [۲]. آلیاژهای $Cu-10Sn-10Pb$ با کد تجاری C۹۳۷۰۰، استحکام خوبی را تحت بارهای بالا در

اندیس‌های A و B، به ترتیب اشاره به انحلال پذیری پودرهای افزوده شده و پایه دارند. شکل‌های (۲) و (۳)، شماتیک و اثرات انحلال پذیری ذرات را نشان می‌دهند [۱].



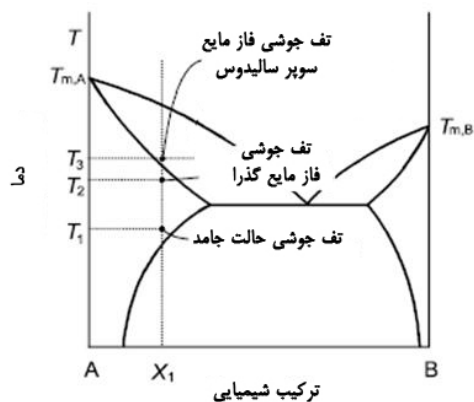
شکل (۲): شماتیک مربوط به چگالش و تورم ذرات [۱]



شکل (۳): اثر انحلال پذیری در چگالش و تورم در حین تفجوشی [۱]

همان‌طور که در این تصاویر مشاهده می‌شود آهنگ انحلال پذیری کم، منجر به تشکیل تخلخل در محل‌هایی که پودر افزوده شده، می‌شود و بنابراین حجم قطعه افزایش می‌یابد در حالی که آهنگ انحلال پذیری زیاد منجر به چگالش قطعه می‌شود. زمانی که انحلال پذیری مایع در پودر جامد اولیه کم باشد، فاز مایع در ساختار پایدار بوده بنابراین تفجوشی فاز مایع پایدار به وقوع می‌پیوندد. سرب در سیستم مس-قلع هیچ‌گونه

پوش‌ها و سایر قطعات کاربردی و صنعتی دارند [۳]. اگرچه یاتاقان‌های برنزی از پودرهای پیش‌آلیاژ شده کامل یا جزئی قابل تولید هستند، اما آن‌ها به‌طور عمده از مخلوط پودرها ساخته می‌شوند [۴]. تفجوشی قطعات پودری، به دو صورت فاز جامد و مایع انجام می‌گیرد که در فاز جامد، پودرها در حالت جامد تفجوشی می‌شوند [۵ و ۱]. تفجوشی فاز مایع در پودرهای پیش‌آلیاژی و مخلوط‌های پودری دیده می‌شود که مکانیزم پودرهای پیش‌آلیاژی از نوع سوپرسالییدوس^۴ و مخلوط‌های پودری، فاز مایع گذرا یا پایدار است. در شکل (۱) گستره دمایی انواع تفجوشی مشاهده می‌شود [۵].



شکل (۱): محدوده دماهای تفجوشی فازهای مایع و حالت جامد [۵]

معمول‌ترین محل‌های تشکیل فاز مایع، مرزدانه‌های داخل ذرات، نواحی گلوگاهی بین ذرات و داخل دانه‌ها است که نیروی کاپیلاری ناشی از توزیع مایع روی ذرات منجر به افزایش چگالش می‌شود [۶]. پس از تشکیل فاز مایع در مخلوط‌های پودری، واکنش‌های نفوذی بین اجزای تشکیل دهنده در طول گرمایش ایجاد می‌شوند که اثرهای متقابل بر پیوند بین ذرات در طول گرمایش دارند [۷ و ۱]. همراه با نفوذ مایع، آرایش مجدد ذرات انجام می‌گیرد. تریپذیری، جریان پذیری مایع و آرایش مجدد منجر به تغییرات سریع در حجم قطعه متراکم شده می‌شود [۴]. آهنگ انحلال پذیری SR به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_R = S_B/S_A \quad (۱)$$

و به کوره آزمایشگاهی سه منطقه‌ای منتقل شدند. با قرار گرفتن بوته در منطقه اول در دمای ۵۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه روانساز زدایی و متعاقباً با انتقال آن به منطقه وسط کوره، تف جوشی نمونه‌ها در دماهای مختلف ۷۵۰، ۷۷۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶۰ دقیقه تحت اتمسفر آرگون با دبی ۱ لیتر بر دقیقه صورت گرفت و سپس در منطقه سوم کوره به مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفته و پس از بیرون آوردن از کوره به صورت سریع در آب سرد شدند. مطالعات شکست‌نگاری حاصل از سطح مقطع نمونه‌های آزمایش ضربه و بررسی‌های ریزساختاری، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل CAM SCAN MV2300 و میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS PMG3 انجام گرفت.

۳- نتایج و بحث

نتایج مربوط به چگالی ظاهری و مورفولوژی پودرهای مصرفی به ترتیب در جدول (۱) و شکل (۴) مشاهده می‌شود.

جدول (۱): چگالی ظاهری پودرهای مصرفی

نوع پودر	مس	قلع	سرب
چگالی ظاهری [g/cm ³]	۳/۹۲	۳/۴	۴/۴۹
چگالی تئوری [%]	۴۴	۵۹	۴۰

از تصاویر مربوط به شکل (۴)، به خوبی مشاهده می‌شود که پودرهای قلع نسبت به سایر پودرها از کرویت زیادتری برخوردار بوده و پودرهای مس و سرب دارای شکل هندسی نامنظم هستند. از تقسیم جرم برحجم، چگالی خام نمونه‌های متراکم شده، ۷/۹۲-۷/۹۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب شد.

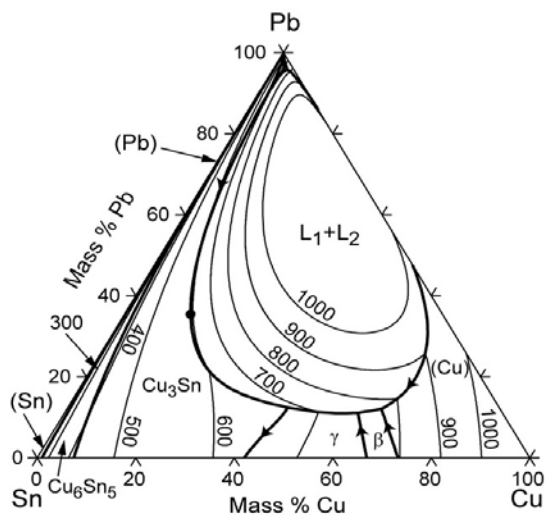
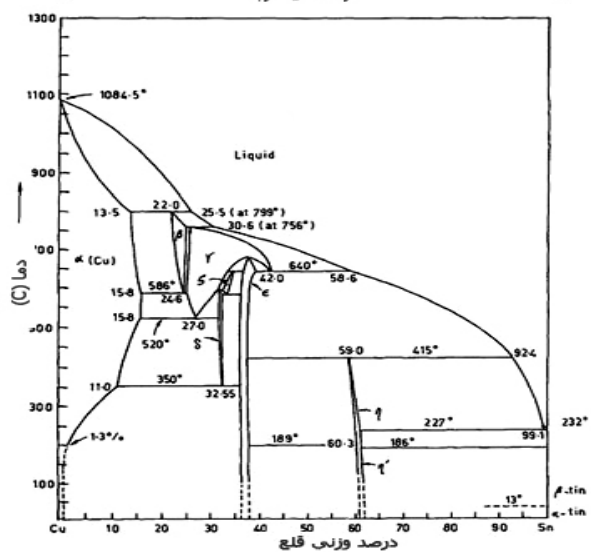
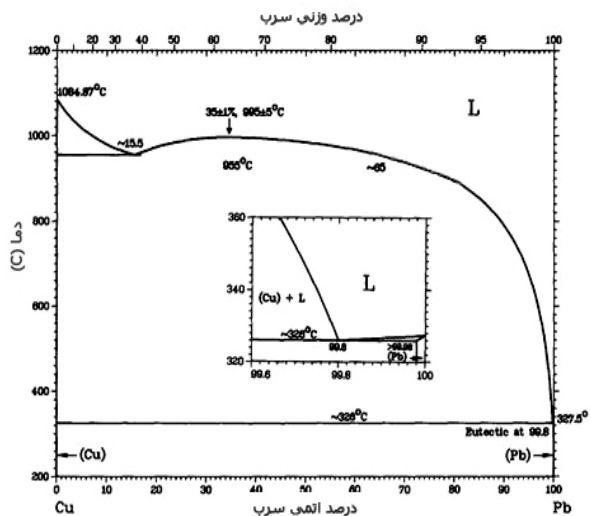
۳-۱- آنالیز حرارتی افتراقی (DTA)

جهت تعیین محدوده دمای تف جوشی، ابتدا آنالیز حرارتی DTA از نمونه خام گرفته شد، که در شکل (۵)، نمودار این آنالیز مشاهده می‌شود. در سیستم Cu-Sn-Pb، نقاط ذوب قلع و سرب، کمتر از دماهای تف جوشی مذکور بوده، بنابراین مذاب قلع در ۲۳۲ درجه سانتی‌گراد و مذاب سرب در ۳۲۷ درجه

حلالیتی نداشته و به صورت ذرات مجزا در ریزساختار دیده می‌شود. در حالی که انحلال پذیری قلع در مس، زیاد بوده و فاز مایع گذرا را تشکیل می‌دهد [۱]. بنابراین، تف جوشی آلیاژ ۱۰Sn-۱۰Pb-Cu از نوع فاز مایع گذرا و پایدار است. با افزایش دمای تف جوشی تغییراتی در نوع شکست درون دانه‌ای و مرز دانه‌ای مشاهده شد که در این مقاله با استفاده از تصاویر میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی، پیوند بین ذرات، ماهیت فازهای تشکیل شده و تغییرات ریزساختاری در دماهای تف جوشی گوناگون مورد بررسی قرار گرفت.

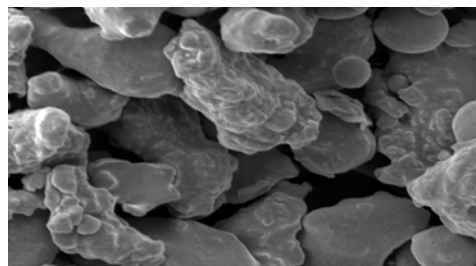
۲- مواد و روش تحقیق

پودرهای مس (با خلوص ۹۹/۸۹) و سرب (با خلوص ۹۹/۹۸) به روش اتمیزاسیون آبی به ترتیب در شرکت‌های متالورژی پودر آذر و سپنتا تولید شدند و پودر قلع (با خلوص ۹۹/۹۹) تولید شده به روش اتمیزاسیون گازی، محصول وارداتی از مالزی بوده که از شرکت کیمیای فلزات تهران خریداری شد. اندازه ذرات تمامی پودرهای مصرفی کمتر از ۱۰۰ میکرون بوده و چگالی ظاهری هر کدام از پودرها مطابق استاندارد ASTM B212 تعیین شد. عملیات مخلوط کردن پودرهای مس، قلع و سرب با نسبت‌های وزنی به ترتیب ۸۰، ۱۰ و ۱۰ به همراه ۰/۷۵ درصد وزنی روانساز استئارات لیتیم در همزنی با سرعت ۴۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه انجام شد. نمونه‌های آزمایش به ابعاد ۱۰×۱۰×۵۵ میلی‌متر توسط پرس هیدرولیکی تک محوره تحت فشار ۵۵۰ مگاپاسکال ساخته شدند. چگالی خام نمونه‌ها با اندازه‌گیری جرم با استفاده از ترازوی مدل KW305 با دقت اندازه‌گیری ۰/۰۱ گرم و تعیین ابعاد نمونه‌ها با استفاده از کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر به روش هندسی محاسبه شد. در ابتدا جهت تعیین محدوده دمای تف جوشی، آنالیز حرارتی افتراقی (DTA) با استفاده از دستگاه مدل LINSEI L62H1550 با آهنگ گرمایش ۱۰°C/min، از دمای صفر تا دمای ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه خام انجام گرفت. سپس نمونه‌ها در یک بوته سرامیکی که با پودر گرافیت پر شده بود، قرار گرفتند

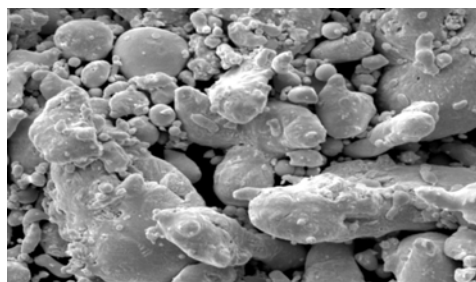


شکل (۶): دیاگرام‌های فازی دو تایی و سه تایی Sn و Pb، Cu [۱۰-۱۱]

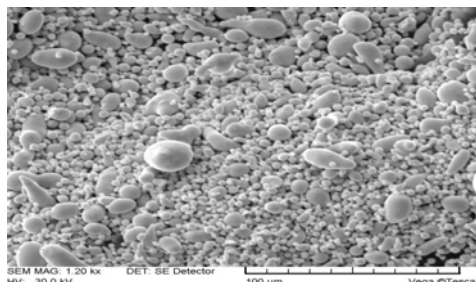
سانتی گراد تشکیل شده و در ساختار پخش می شوند که فاز مایع اولیه نام دارند [۸-۹]. بنابراین در دماهای تف جوشی فوق، قلع می تواند به داخل ذرات مس نفوذ کرده و یک خاصیت استحکام بخشی را در ساختار ایجاد کند و پیک‌های دما پایین منحنی DTA، اشاره به ذوب شدن ذرات قلع و سرب دارد.



مس

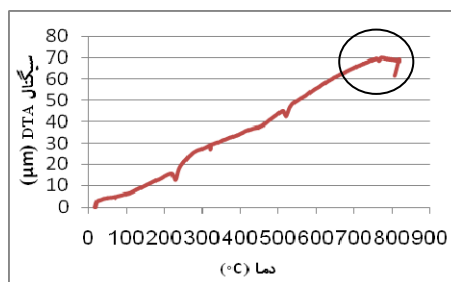


سرب



قلع

شکل (۴): تصاویر مربوط به مورفولوژی پودرها

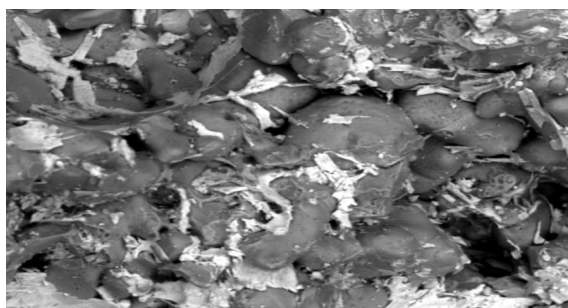


شکل (۵): منحنی DTA نمونه Cu-۱۰Sn-۱۰Pb بر حسب دما

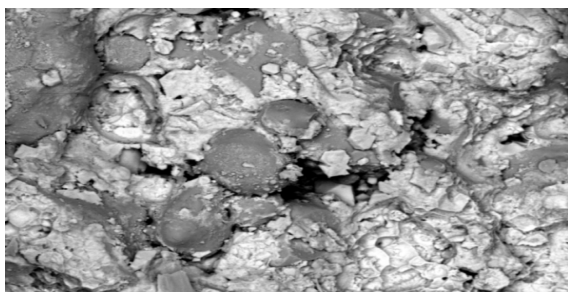
سانتی گراد در دمای ۷۷۰ درجه‌ی سانتی گراد هم تف جوشی شدند به دلیل پیک استحاله نشان داده شده در آنالیز حرارتی بوده و از اینرو حائز اهمیت است.

۲-۳- شکست نگاری

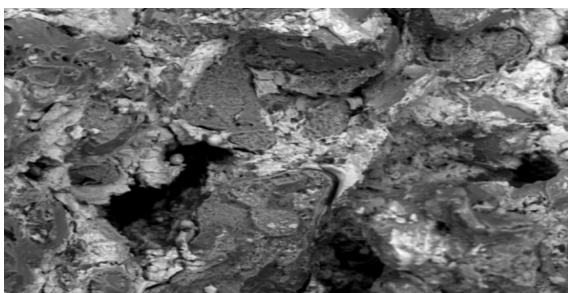
برای درک بهتر این که با افزایش دمای تف جوشی، چه تغییراتی در رفتار فاز مایع، نفوذ ذرات در همدیگر و استحکام اتصالات به وجود می‌آید، تصاویر مربوط به سطح شکست نمونه‌های حاصل از آزمایش ضربه در دماهای مختلف تف جوشی، در شکل (۷) آورده شده است.



۷۵۰°C



۷۷۰°C



۸۰۰°C

شکل (۷): تصاویر سطح شکست نمونه‌های تف جوشی شده در دماهای

مختلف به مدت ۶۰ دقیقه

پیک سوم که در محدوده ۵۲۰/۱-۵۱۳/۳ درجه سانتی گراد مشاهده می‌شود، می‌تواند در اثر استحاله زیر در دیاگرام فازی سه تایی Cu-Sn-Pb در دمای ۵۱۸/۷ درجه سانتی گراد باشد [۱۰]:

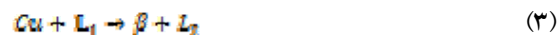


همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود انحلال پذیری سرب در مس جامد خیلی ناچیز بوده ولی انحلال پذیری قلع در مس زیاد است که ترکیب‌های استوکیومتری γ و δ به ترتیب فازهای Cu_3Sn و $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ هستند. ترکیب شیمیایی هر کدام از فازهای فوق به صورت جدول زیر است [۱۰]:

جدول (۲): ترکیب شیمیایی فازها در سیستم سه تایی Cu-Sn-Pb در دمای ۵۱۸/۷ درجه سانتی گراد (درصد وزنی) [۱۰]

نوع فاز	مس [%]	قلع [%]	سرب [%]
L_1	۰/۴۵	۰/۳۹	۹۹/۱۶
Cu_3Sn	۷۲/۷۱	۲۷/۲۹	۰
Cu	۸۵/۱۵	۱۴/۸۵	۰
$\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$	۶۶/۵۶	۳۳/۴۴	۰

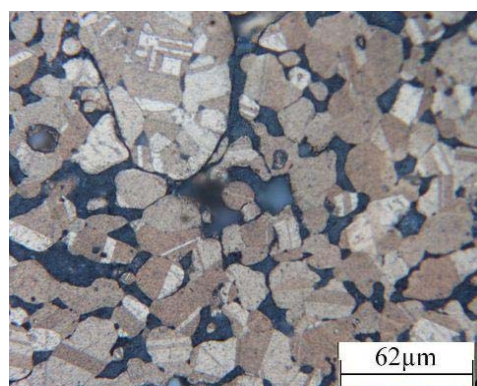
یک واکنش گرماگیر دیگر در دمای ۷۷۰ درجه سانتی گراد مشاهده می‌شود که باتوجه به دیاگرام فازی سه تایی Cu-Sn-Pb این استحاله را می‌توان به صورت زیر بیان کرد که ترکیب شیمیایی هر کدام از فازها در جدول (۳) مشاهده می‌شود [۱۰]:



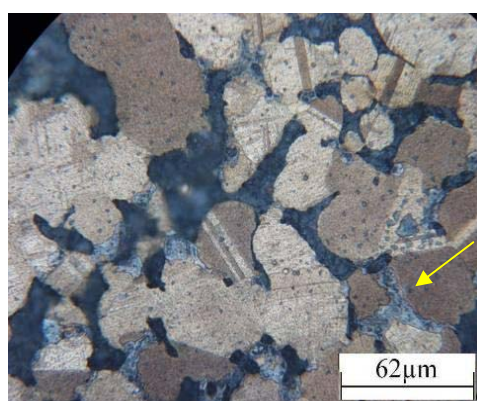
جدول (۳): ترکیب شیمیایی فازها در سیستم سه تایی Cu-Sn-Pb در دمای ۷۷۰ درجه سانتی گراد (درصد وزنی) [۱۰]

نوع فاز	مس [%]	قلع [%]	سرب [%]
L_1	۶۳/۸۰	۲۴/۰۵	۱۲/۱۵
Cu	۸۵/۳۸	۱۴/۶۲	۰
β	۷۸/۴۳	۲۱/۵۷	۰
L_2	۲/۹۳	۱/۳۶	۹۵/۷۱

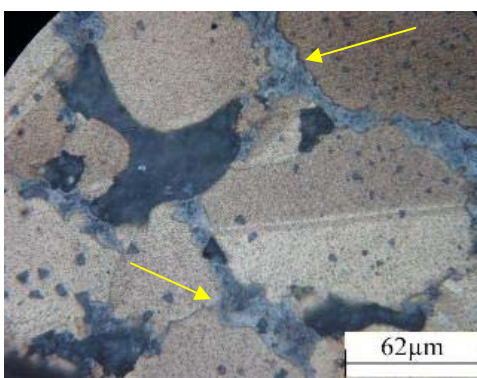
بنابراین علت این که نمونه‌ها علاوه بر دماهای ۷۵۰ و ۸۰۰ درجه



۷۵۰°C



۷۷۰°C



۸۰۰°C

شکل (۸): تصاویر ریزساختاری نمونه‌های تف‌جوشی شده در دماهای مختلف به مدت ۶۰ دقیقه

در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد پیوسته بودن حفرات، نشان‌دهنده کافی نبودن پیوند بین ذرات پودر برای رسیدن به خواص فیزیکی و مکانیکی مطلوب است. با افزایش دما تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، تغییر در آرایش ذرات پودر و دانه‌های تشکیل دهنده آن‌ها، باعث شده که تعداد حفرات کمتر و ساختار نسبتاً یکنواخت حاصل شود. در دماهای بالا، اندازه دانه‌ها بزرگتر

همان‌طور که مشاهده می‌شود در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، فاز مایع اولیه‌ای که از ذوب شدن سرب و قلع در دماهای پایین به وجود آمده است بین دانه‌های مس قرار گرفته و شکست دانه‌ها در امتداد این فاز صورت گرفته است و دانه‌های مس شکست نیافته به خوبی قابل مشاهده هستند.

در این دما به خاطر نفوذ و آرایش مجدد کمتر ناشی از دمای پایین تر تف‌جوشی، اتصال و پیوستگی فاز مایع به همدیگر کم‌تر بوده و در نتیجه به صورت فاز نازک و منقطع مابین دانه‌ها قرار گرفته است. در دمای ۷۷۰ درجه سانتی‌گراد مقدار فاز مایع به صورت چشم‌گیری بین ذرات افزایش یافته که آنالیز حرارتی DTA نیز پیکی را در این دما نشان داد. همچنین در این دما می‌توان به ضخیم شدن فاز مایع در اثر اتصال بیشتر ناشی از آرایش مجدد ذرات پی برد که تصاویر حاصل از میکروسکوپ نوری نیز در ادامه، مویید این مطلب است.

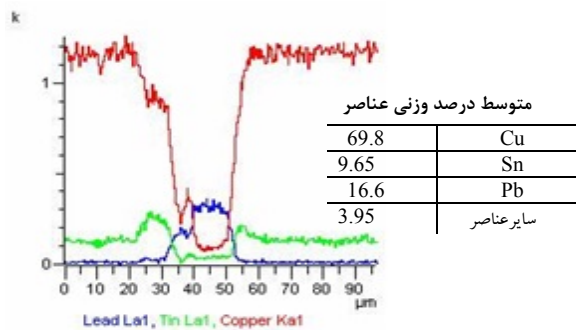
با افزایش دمای تف‌جوشی در ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، در اثر نفوذ بیشتر فاز مایع به درون ذرات زمینه، همگنی بیشتری در ساختار صورت گرفته و اتصال فاز مایع در نتیجه آرایش مجدد بهتر، زیادتر شده و فاز مایع تشکیل شده، نسبت به دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد ضخیم‌تر است.

استحکام این فاز مایع قابل مقایسه با استحکام ذرات زمینه بوده و باعث شکست درون دانه‌های ذرات شده است. بنابراین در دماهای کمتر شکست در امتداد فاز مایع و از طریق مرزدانه‌ها سهم بیشتری داشته ولی با افزایش دما، بیشترین سهم شکست از درون دانه‌ها انجام می‌گیرد.

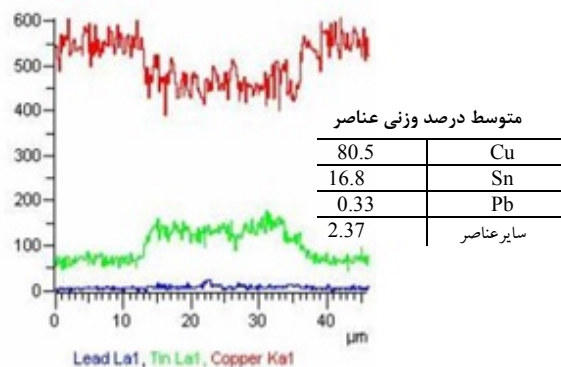
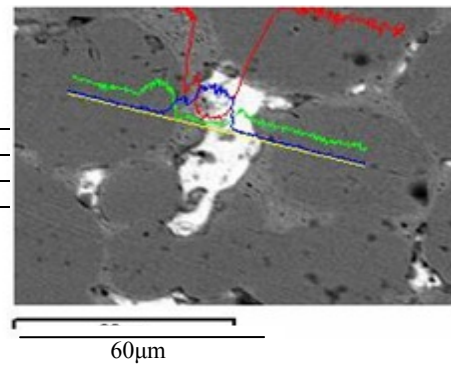
۳-۳- آنالیز ریز ساختاری

تغییرات ریزساختاری برای دماهای مختلف تف‌جوشی در شکل (۸)، با استفاده از میکروسکوپ نوری نمایش داده شده است. استحاله نشان داده شده در واکنش (۳) در تطابق خوبی با تصاویر میکروسکوپی در دماهای ۷۷۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد است که این فازهای مایع با پیکان مشخص شده‌اند.

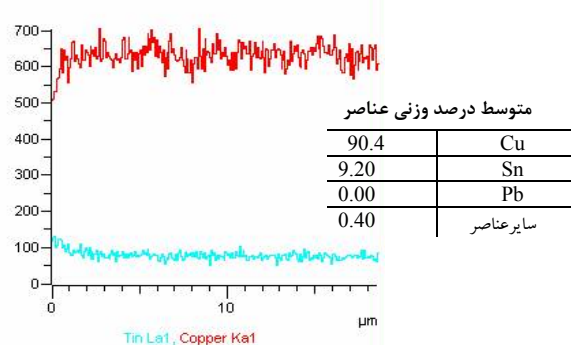
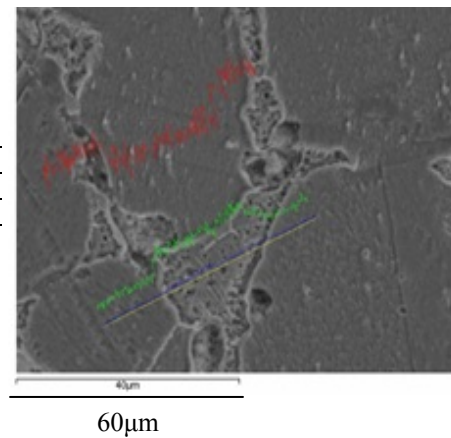
گرفت. در نواحی تجمع یافته فاز مایع در شکل (۹-الف)، مشاهده می‌شود که در منطقه سفید رنگ، میزان سرب بیشتر از میزان مس و قلع است و با دور شدن از این ناحیه مقدار سرب به شدت کاهش می‌یابد. بنابراین همان‌طور که ذکر شد سرب به دلیل عدم حلالیت با مس در اثر تف جوشی فاز مایع پایدار به مرزها نفوذ کرده و تشکیل جزایر سربی سفید رنگ می‌دهد.



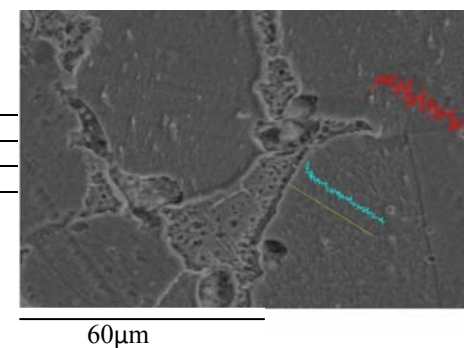
(الف)



(ب)



(ج)



شکل (۹): ریزساختار و آنالیز خطی EDX بعد از استحاله ۷۷۰ درجه سانتی گراد در ناحیه‌های (الف). سرب دار، (ب) بین ذرات، (ج).

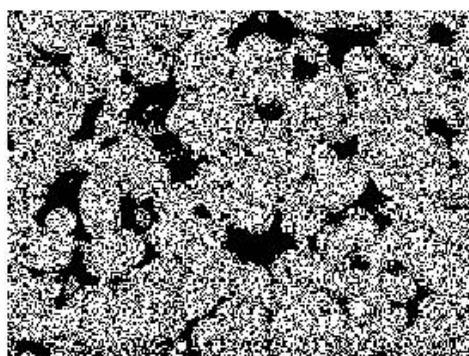
داخل ذره

در شکل (۹-ب)، میزان سرب به شدت کاهش یافته و قلع نیز در مناطق گلوبی تا مقدار متوسط ۱۶/۸٪ وزنی افزایش یافته

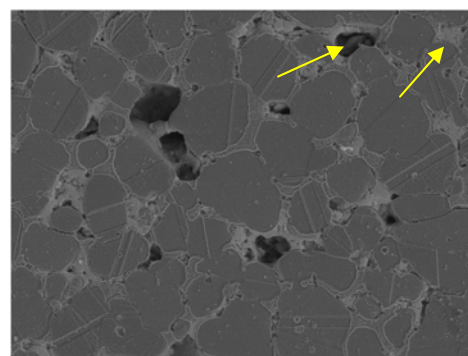
شده و رشد دانه اتفاق افتاده است، همچنین در اثر پرس شدن حفرات طبق تئوری پرس شدن حفره^{۱۱} از میزان آن‌ها کاسته شده و رفته رفته حفرات پراکنده با سایز بزرگ ظاهر شده‌اند. دوقلوهای مشاهده شده در تصاویر از نوع دوقلویی‌های حرارتی بوده که در صفحات (۱۱۱) مس، تشکیل می‌شود [۱۲]. در شکل (۹)، آنالیز خطی از مناطقی که فاز مایع تشکیل شده، انجام

تصاویر شکل (۱۰)، توزیع عناصر مس و قلع در همدیگر و سرب در ریز ساختار مشاهده می‌شود. به خوبی دیده می‌شود که مس و قلع خالص در ریزساختار وجود نداشته بلکه در همدیگر نفوذ کرده‌اند و فاز مایع گذرا تشکیل می‌دهند ولی مقدار فازهای مس و قلع به علت عدم انحلال‌پذیری در سرب، بسیار ناچیز بوده و ذرات سرب به صورت جزیره‌ای و پراکنده در ساختار و در داخل تخلخل‌ها قرار گرفته‌اند که این تخلخل‌ها با پیکان نشان داده شده‌اند و بنابراین فاز مایع پایدار تشکیل می‌دهند. بنابراین در شکل (۱۱)، آنالیز ریزساختاری فازهای تشکیل شده بعد از استحاله ۷۷۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود.

است، بنابراین مطابق متوسط وزنی عناصر موجود، فاز تشکیل شده در اطراف جزایر سربی و مرزدانه‌ها می‌تواند با ترکیب استوکیومتری Cu_3Sn باشد [۱۳]. که با دور شدن از مرز بین دانه‌ها (گلوبی‌ها) میزان مس افزایش یافته است، ولی نکته قابل توجه عدم وجود قلع یا مس خالص در زمینه هست که در شکل (۹-ج)، در ناحیه داخل ذرات، مقدار مس، تقریباً ۹ برابر قلع بوده که بیانگر این است که پس از تف‌جوشی، دانه‌های مس، خالص نبوده بلکه در اثر نفوذ متقابل مس و قلع، به صورت فاز $Cu-10Sn$ هستند. بنابراین در اثر تف‌جوشی فاز مایع گذرا می‌توان شاهد تشکیل ترکیبات بین فلزی مس/قلع با تغییرات دمایی در ریزساختار بود. با توجه به نقشه‌های پرتو X در



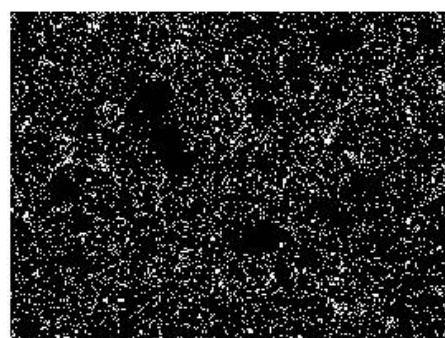
توزیع مس



200μm



توزیع سرب



توزیع قلع

شکل (۱۰): نقشه‌های توزیع عناصر بعد از استحاله در ۷۷۰ درجه سانتی‌گراد

به شکست مرزخانه‌ای دارد.

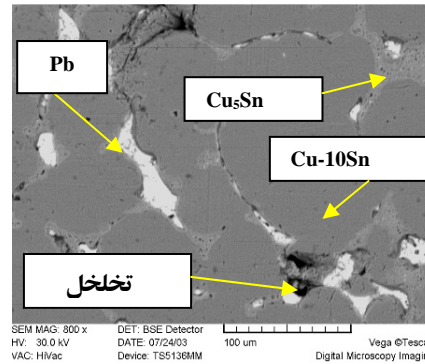
۵- با افزایش دمای تف جوشی پدیده‌های مربوط به آرایش مجدد و رشد دانه‌ها مشاهده می‌شود.

۵- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت مالی مدیر عامل محترم شرکت متالورژی پودر تبریز و همکاری شرکت‌های متالورژی پودر ایتوک، سهند و آذر به دلیل فراهم نمودن مواد اولیه مصرفی این پژوهش و انجام برخی مشخصه‌یابی‌ها، قدردانی می‌گردد. همچنین از همکاری‌های سرکار خانم دکتر آرزو ابیضی تشکر می‌شود.

۶- مراجع

- [1] R. M. German, P. S. Seong and J. Park, "Review: Liquid Phase Sintering", Springer Science Business Media, pp. 30-36, 2008.
- [2] H. I. Sanderow and L. F. Pease, "Property Comparison of P/M Bronze Bearings Manufactured in Europe and North California", International Journal of Powder Metallurgy, New York, Vol. 41, pp. 37-40, 2000.
- [3] G. S. Upadhyaya, Sintered Metallic and Ceramic Materials, Indian Institute of Technology, pp. 202-250, 1999.
- [4] ASM HandBook, Powder Metal Technologies and Applications, 1998.
- [5] S. Joong and L. Kang, "Sintering: Densification, Grain Growth & Microstructure", Elsevier Butterworth-Heinemann, pp. 1-20, 2005.
- [6] M. Azadbeh, H. Danninger and C. Gerl, "Evolution of Properties and Graded Densification During Sintering of Cu-20Zn Prepared from Prealloyed Powder", Euro PM-Sintering, pp. 1-5, 2011.
- [7] M. Azadbeh, Z. Razzaghi, "On Enhancing the Mechanical Properties of Alumix 431 via Synchronic Effects of Sintering and Heat Treatment", PM World Congress-PM Aluminium & Magnesium, pp. 1-8, 2010.
- [8] J. Liu and R. M. German, "Microstructure Effect on Dihedral Angle in Liquid Phase Sintering", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 32 A, pp. 165-169, 2001.
- [9] G. Sethi, A. Upadhyaya and D. Agrawal, "Microwave and Conventional Sintering of Premixed and Prealloyed Cu-12Sn Bronze", Science of Sintering, Vol 35, pp. 49-65, 2003.
- [10] 10-Phase Diagrams and Computational Thermodynamics", The National Institute of Standards and Technology, Metallurgy Division of MSEL, pp.1-2, 2000.



شکل (۱۱): آنالیز ریزساختاری نمونه‌های تف جوشی شده بعد از استحاله ۷۷۰ درجه سانتی‌گراد

۴- نتیجه‌گیری

۱- تف جوشی آلیاژ $\text{Cu}-10\text{Sn}-10\text{Pb}$ ساخته شده به روش مخلوط پودری همراه با شکل‌گیری فاز مایع صورت می‌گیرد و تف جوشی به علت قابلیت انحلال قلع در مس و عدم انحلال پذیری سرب در مس به ترتیب از نوع فاز مایع گذرا و پایدار است.

۲- در دمای ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد، نفوذ فاز مایع قلع به علت پایین بودن دمای تف جوشی به داخل ذرات مس به صورت کامل صورت نگرفته است و پیوند بین ذرات به علت کم بودن استحکام فاز مایع بین ذرات، کمتر از خود ذرات بوده و از اینرو، مکان‌های ترجیحی شکست هستند.

۳- با افزایش دمای تف جوشی در دمای ۷۷۰ درجه سانتی‌گراد مقدار زیادی فاز مایع در ساختار تشکیل می‌شود که آنالیز حرارتی DTA و تصاویر میکروسکوپی نیز این مطلب را تایید کرده و در نتیجه آرایش مجدد بیشتر، اتصال و به هم پیوستگی فازهای مایع، بیشتر شده و بنابراین به صورت گسترده در ساختار پخش می‌شوند.

۴- در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، به علت بالا بودن دمای تف جوشی، فاز مایع قلع به داخل ذرات مس، بیشتر نفوذ کرده و همین امر باعث همگن شدن بیشتر ذرات شده به طوری که استحکام فاز مایع بین ذرات، قابل مقایسه با استحکام خود ذرات زمینه بوده و بنابراین شکست درون دانه‌ای سهم بیش تری نسبت

۷- پی نوشت

- 1- P/M (Powder Metallurgy)
- 2- Chrysler
- 3- Brook
- 4- Supersolidus
- 5- Diffrential Thermal Analysis
- 6- Pore Filling Theory

- [11] S. Joong and L. Kang, "Sintering, Densification, Grain Growth and Microstructure", Elsevier's Science and Technology, London, England, pp. 208-209, 2005.
- [12] E. Dieter, Mechanical metallurgy, pp. 170-172, McGraw-Hill, New York, 1988.
- [13] C. Menapace, M. Zadra, A. Molinari, C. Messner, and P. Costa, "Study of Microstructural Transformations and Dimensional Variations During Liquid Phase Sintering of 10% Tin Bronzes Produced with Different Copper Powders", Powder Metallurgy, Vol. 45, pp. 67-74, 2002.