



گروه مهندسی مواد و متالورژی

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

عنوان:

تولید آلیاژ آمورف سیستم Al-Fe-Cu به روش آلیاژسازی مکانیکی

نگارش:

سید ایمان وهابزاده

استاد راهنما:

دکتر جلیل وحدتی خاکی

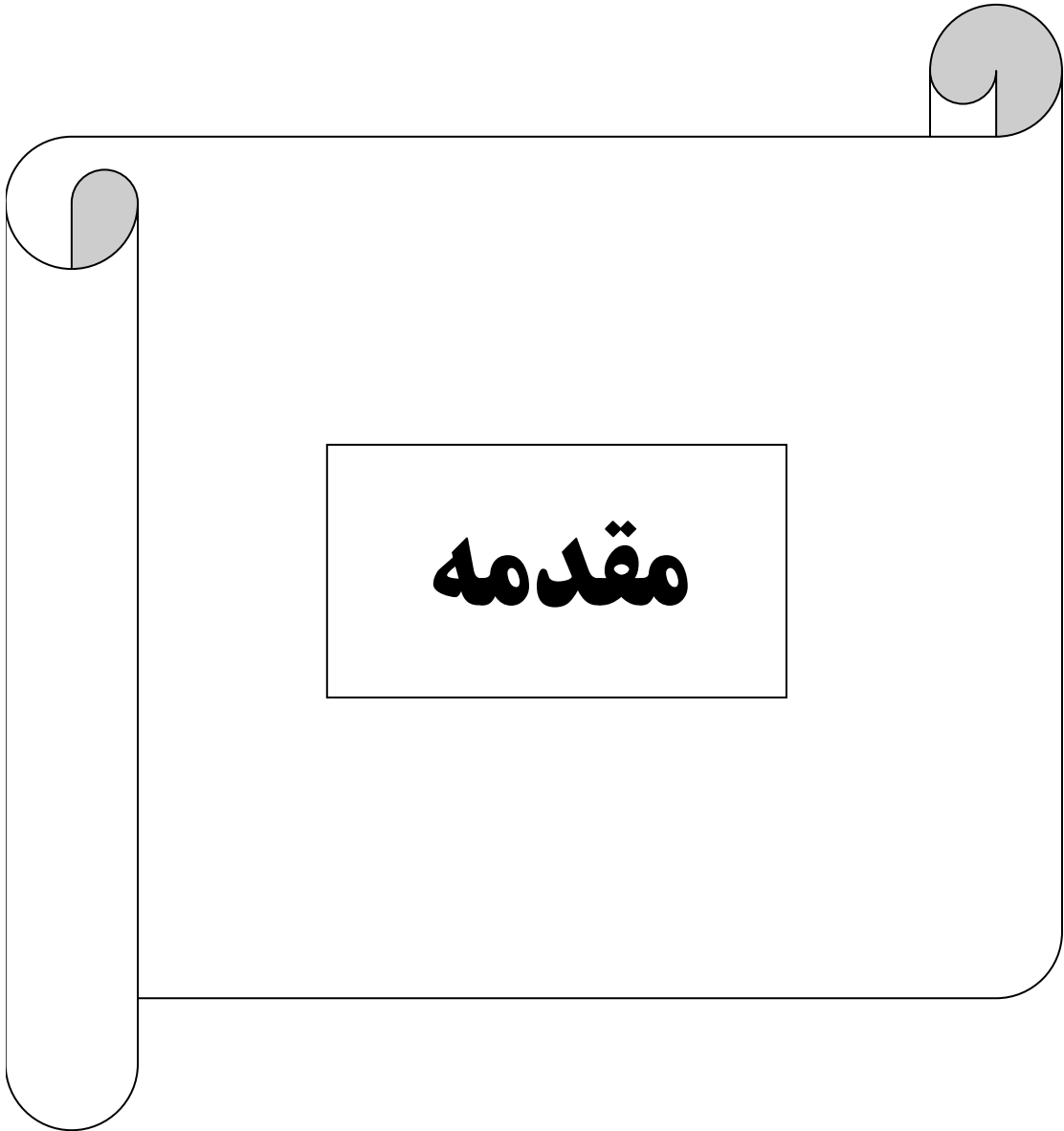
دکتر محسن حداد سبزواری

فهرست مطالب

۴	۱- مقدمه
۸	۲- مروری بر منابع مطالعاتی
۹	۲-۱- مقدمه
۱۰	۲-۲- شیشه
۱۲	۲-۲-۱- انتقال به شیشه
۱۳	۲-۳- شیشه فلزها
۱۳	۲-۳-۱- ساختار شیشه های فلزی
۱۹	۲-۴- روش های ساخت
۲۱	۲-۵- آلیاژسازی مکانیکی
۲۵	۲-۶- آمورف سازی حالت جامد
۲۷	۲-۶-۱- مدل ترمودینامیکی
۳۰	۲-۷- فرآوری آلیاژ آمورف به روش آلیاژسازی مکانیکی
۳۴	۲-۷-۱- اندازه دانه و میکروسختی
۳۵	۲-۷-۲- عوامل موثر
۳۸	۲-۸- مکانیزم آمورف شدن
۴۱	۲-۹- پیش بینی های تئوریک تشکیل فاز آمورف
۴۵	۲-۱۰- مقایسه بین آلیاژ سازی مکانیکی و انجماد سریع
۴۲	۲-۱۱- دلایل ممکن برای تبلور دوباره فاز آمورف
۵۷	۳- مواد و روش آزمایش
۵۸	۳-۱- مواد اولیه
۵۹	۳-۲- نام گذاری نمونه ها
۶۰	۳-۳- آسیاکاری نمونه ها
۶۱	۳-۴- تجهیزات به کار رفته
۶۱	۳-۴-۱- آسیای ماهواره ای
۶۱	۳-۴-۲- دستگاه پراش سنج اشعه ایکس
۶۱	۳-۴-۳- دستگاه تسلاسنج و مگنت
۶۲	۳-۴-۴- DSC
۶۲	۵- انتقال نمونه های آسیاکاری شده جهت آزمایشات XRD

۶۴	۴- نتایج و بحث
۶۵	۴-۱- نتایج XRD
۶۵	۴-۱-۱- مطالعه نتایج XRD نمونه‌های B
۶۸	۴-۱-۲- مطالعه نتایج XRD نمونه‌های A
۷۰	۴-۱-۳- نتایج کلی نمودارهای XRD برای دو سیستم B و A
۷۲	۴-۲- تغییرات اندازه‌دانه
۷۳	۴-۲-۱- تغییرات اندازه‌دانه نمونه‌های B
۷۵	۴-۲-۲- تغییرات اندازه‌دانه نمونه‌های A
۷۶	۴-۲-۳- تغییرات در اندازه‌دانه در سیستم‌های A و B
۷۹	۴-۳- تعیین درصد آمورف شدن
۷۹	۴-۳-۱- تعیین درصد آمورف شدن نمونه‌های B
۸۰	۴-۳-۲- تعیین درصد آمورف شدن نمونه‌های A
۸۱	۴-۴- جابه‌جایی پیک‌ها
۸۱	۴-۴-۱- جابه‌جایی پیک Al در نمونه‌های B
۸۲	۴-۴-۲- جابه‌جایی پیک Cu در نمونه‌های A
۸۳	۴-۵- پسماند مغناطیسی
۸۵	۴-۵-۱- نتایج آزمایشات پسماند مغناطیسی نمونه‌های B
۸۶	۴-۵-۲- نتایج آزمایشات پسماند مغناطیسی نمونه‌های A
۸۷	۴-۶- مقایسه کلی نتایج سیستم‌های A و B
۸۹	۴-۷- مکانیزم آمورف شدن
۹۲	۴-۸- نتایج آزمایشات DSC
۹۳	۴-۸-۱- نتایج آزمایش DSC نمونه آمورف B
۹۳	۴-۸-۲- نتایج آزمایش DSC نمونه آمورف A
۹۴	۴-۹- نتیجه‌گیری کلی
۹۷	۴-۱۰- پیشنهادات
۹۸	منابع و مآخذ

فصل اول



مقدمه

آلیاژهای آمورف^۱ و نانو کریستالین، مواد جدیدی هستند که همراه با محدوده شکل گیری وسیع دارای خواص بسیار مناسبی هستند که موجب به کارگیری آنها در کاربردهای مختلف و پراهمیتی می گردند. آلیاژسازی مکانیکی از مطلوب ترین روش های امروزی است که به سبب سرعت بالای فرآیند باعث پیشرفت در فرآوری آلیاژهای آمورف و نانو کریستال شده است [۱].

روش های ساخت آلیاژهای آمورف به طور کلی به دو دسته اصلی کوئنچ سریع (RS^۲) و حالت جامد (SS^۳) تقسیم می شوند. تکنیک های حاصل از SSA^۴ شامل بمباران تابشی^۵ و آمورف سازی تجمعی هیدروژن^۶، نفوذ داخلی لایه های فلزی چندگانه^۷، شیشه سازی و آمورف شدن تحت فشار^۸،

-
- 1 . amorphous alloy
 - 2 . rapid solidification
 - 3 . solid state
 - 4 . solid state amorphization
 - 5 . irradiation amorphization
 - 6 . hydrogen assisted amorphization
 - 7 . interdiffusion of metallic multi-layers
 - 8 . pressure-induced vitrification

آمورف سازی با محرکه مکانیکی^۱ و غیره بوده اند. تفاسیر تئوریک برای SSA می تواند به ناپایداری شبکه اتمی و محرک ترمودینامیکی تقسیم شود [۲].

آلیاژسازی مکانیکی^۲، فراوری بال میل کردن با انرژی بالاست و جزو روش های حالت جامد قرار می گیرد. این روش شامل جوش سرد مکرر ذرات، شکست و جوش خوردن مجدد آنهاست. نشان داده شده است که این تکنیک قابلیت فرآوری فازهای نیمه پایداری را که حاوی آلیاژهای شیشه ای هستند، دارا می باشد [۳]. این روش مکانیکی محدودیت نفوذی در واکنش های حالت جامد در دماهای پایین را از بین می برد که در نتیجه با آلیاژسازی و ریز شدن ذرات و دانه ها سطوح واکنشی که همان سطوح تماس میان مواد اولیه اند افزایش یافته و باعث تسریع فعالیت شیمیایی مواد می شود [۴]. مزیت عمده این فرآیند این است که امکان اختلاط عناصر اصلی با نقاط ذوب متفاوت یا آنهایی که در حالت جامد غیر قابل امتزاج اند را فراهم می سازد [۵].

در میان آلیاژها، آلیاژهای پایه زیرکون به خاطر قابلیت بالای آمورف شدن آنها معروفند. برخی بررسی ها روی سیستم Al-Fe-Zr از قدیم صورت گرفته است. فوگونولو^۳ و همکارانش آلیاژ $Al_{89}Fe_{10}Zr_1$ که به وسیله آلیاژسازی مکانیکی شکل یافته را بررسی کردند و به یک محلول جامد فوق اشباع نانو کریستال از $\alpha - Al$ که اندازه نانو کریستال های آن در حدود ۱۵nm تعیین شده بود، دست یافتند. خواص ابررسانایی این مواد نیز مورد توجه قرار گرفته است اما دمای انتقال به حالت ابررسانایی آنها پایین است (تقریباً ۹K) [۶].

برخی بررسی ها در خصوص مخلوط پودری عنصری $Al_{50}Fe_{50}$ صورت گرفته است [۷-۱۰]. ترکیبات بین فلزی نیز در طول آسیاکاری و یا پس از فرآیند آنیل شکل گرفته است. تشکیل فاز آمورف توسط

¹ . mechanically-driven amorphization

² . mechanical alloying

³ . Fogagnolo

الژاک^۱ و شینگو^۲ و هم چنین توسط ژئو^۳ و همکارانش در محدوده ۵۰-۸۵٪ آلومینیوم برای سیستم Al-Fe مطالعه شده است [۱۱ و ۱۲]. روش آلیاژسازی مکانیکی روشی مناسب برای تولید آلیاژ آمورف بر پایه نیکل، مس یا تیتانیوم نیز هست. مطالعات متعددی این روش را در خصوص آلیاژهای ZrAl-CuNi به کاربرده‌اند که آسیاکاری آلیاژهای Zr-Cu-Al و ZrNiTiCu منجر به شکل‌گیری ساختار آمورفی با پس از حدود ۸۰ ساعت آسیاکاری شده است [۱۳].

در این آزمایشات امکان آمورف شدن در سیستم Al-Fe-Cu بررسی شد. برای رسیدن به این هدف کار از سیستم Al-Fe آغاز شد. سیستم Al-Fe سیستمی است که با توجه به خصوصیاتش قابل توجه بوده است. با توجه به گرمای اختلاط بزرگ منفی این دو عنصر در هم (-41 kJ/mol) [۱۴] امکان تشکیل فاز آمورف برای این مخلوط با سرعت زیادی همراه است. آمورف این سیستم خواص مناسبی را نشان می‌دهد و ترکیبات بین فلزی حاصل از سیستم Al-Fe خواص مکانیکی خوبی به همراه مقاومت به اکسیداسیون مناسبی در دماهای بالا، دارا می‌باشند. تشکیل فاز آمورف می‌تواند این مقاومت در دماهای پایین تر را نیز بهبود بخشد. علاوه بر این با مراجعه به منابع ترمودینامیکی [۱۵]، درصدی از عناصر اولیه برای این سیستم انتخاب شد که در آن کمترین مقدار Fe برای تشکیل فاز آمورف موجود باشد. استفاده از ۲۰ درصد اتمی Fe در کنار ۸۰ درصد اتمی Al منجر به نتایج شد که در ادامه ارائه خواهد گردید. با توجه به یافته‌های پژوهشگران، استفاده از عنصر سومی مانند Cu میتواند موجبات بهبود خواص خوردگی و الکتریکی را فراهم کند. برای رسیدن به هدف نهایی که یافتن بالاترین درصد آمورف در سیستم Al-Fe-Cu است، جایگزینی ۲۰ درصد اتمی Cu به جای Al در سیستم اولیه آزمایشات یعنی Al-Fe در دستور آزمایشات قرار گرفت.

1 . Olesza
2 . Shingu
3 . Zhou

**مروری بر منابع
مطالعاتی**

۲-۱- مقدمه

آن طور که یافته‌ها نشان می‌دهد، مواد آمورف از زمانی که در ۷۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح محصولات شیشه در مصر و مسوپوتامیا^۱ یافت شده است، وارد زندگی بشر شده است [۱۶]. از آن زمان تاکنون روش‌های فراوانی برای تهیه و تولید مواد آمورف به کار گرفته شده است. هرچند فرآوری مواد آمورف روش‌های متعدد سنتی و مدرنی را شامل می‌شود، لیکن هرگاه صحبت از مواد آمورف به میان می‌آید، به این عبارت به چشم شیشه‌های شفاف که دارای ظاهری چشم‌نواز باشند، نگاه می‌شود. به طور کلی مواد آمورف که تا کنون حاصل شده‌اند دو بخش کلی را شامل می‌شوند: شیشه‌ها و شیشه‌فلزها. فرآوری این دو با هم هرچند در اصول یکسان است اما خصوصاً با پیدایش روش‌های جدیدی مانند آلیاژسازی مکانیکی که واکنش‌های آمورف سازی تحت یک سری شرایط موضعی صورت می‌گیرد [۱۷]، در عمل تا حدود بسیار زیادی متفاوت است. بنابراین لازم است که برای آغاز پیش از بحث روی آلیاژهای آمورف و شیشه‌فلزها، اندکی در خصوص شیشه‌ها نیز صحبت شود.

^۱ . Mesopotamia

۲-۲- شیشه

در میان سیستم‌های موجود در طبیعت، از آغاز تاریخ تمدن بشری شیشه‌ها بیشتر از سایر مواد در زمره مواد زیبا و سحرآمیز قرار می‌گیرند [۱۶]. گفته شده است که شیشه‌ها از سیلیکا و اکسیدهای Al, Ca, K, Mg و غیره از پیش از ۴۰۰۰ سال پیش ساخته شده بودند و اولین کالای حاصل از شیشه‌ها در حدود ۱۵۰۰ سال قبل از میلاد مسیح در مقبره توت‌موسیس^۱ سوم از فرمانروایان مصر باستان یافت شده است (شکل ۲-۱) [۱۶ و ۱۸]. شیشه‌های طبیعی مانند شیشه‌های معدنی آتش‌فشانی به گواهی اسناد باستانی از قدیمی‌ترین اشکال این شیشه‌ها بوده‌اند [۱۶].

یک شیشه به وسیله فقدان نظم اتمی بلند دامنه تعریف شده و انتقال شیشه‌ای بوسیله تغییری در خواص مشخص ترمودینامیکی مانند گرمای ویژه ضریب انبساط حرارتی مشخص شده است.



شکل ۲-۱- قدیمی‌ترین شیشه یافت شده (مصر باستان) [۱۶]

^۱. Tutmosis

مسئله یافتن تعریفی جامع و کامل برای شیشه از ده‌ها سال پیش مطرح بوده‌است اما شاید هنوز هم چنین تعریفی که مورد قبول همگان باشد یافت نشده‌است. یکی از تعاریف بسیار معروف که از سوی انجمن آزمون مواد امریکا (ASTM) در سال ۱۹۴۵ میلادی پیشنهاد شد شیشه را به صورت زیر تعریف می‌کند:

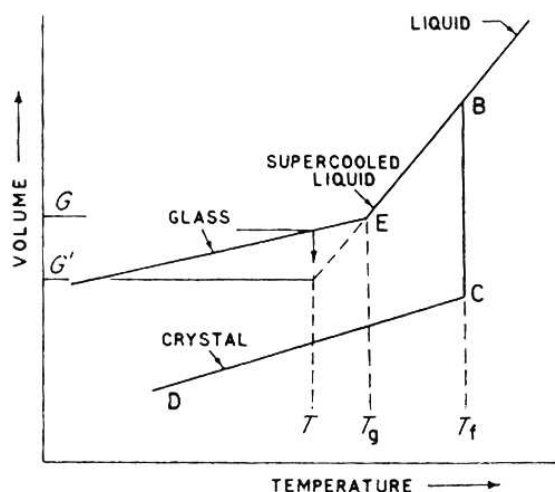
«شیشه ماده‌ای غیرآلی است که از حالت مذاب طوری سرد شده‌است که بدون آنکه تبلور یابد بصورت صلب در آمده‌است» [۱۸].

یکی از اشکالات تعریف بالا این است که همانگونه که در سال‌های اخیر ثابت شده است، شیشه را می‌توان از طرق بسیار متنوع دیگری به جز سرد کردن از حالت مذاب تهیه کرد. موارد مختلفی از جمله این مسئله و نیز منشا آلی داشتن شیشه‌سازها باعث شده است که تعریف بسیار عام و وسیع زیر برای شیشه به کار گرفته شود [۱].

بنابراین: " شیشه یک جامد آمورف است ". ماده‌ای را آمورف گویند که از نظر ساختاری دارای نظم پر دامنه نباشد. یعنی اجزا تشکیل دهنده آن (اتم، یون یا مولکول) در مقیاس چندبرابر اندازه خود از نظر چیده شدن در فضا دارای تناوب و نظم و ترتیب نباشند. مطابق این تعریف ماده آمورف و شیشه دارای معانی یکسانی هستند. آکادمی ملی علوم آمریکا تعریف دقیق‌تری برای شیشه پیشنهاد کرده است: " شیشه ماده‌ای است که از نظر آزمایش اشعه X، آمورف (بی شکل، غیربلوری) باشد و از خود رفتار ویژه انتقال به حالت شیشه‌ای، به نمایش می‌گذارد و آن عبارت است از تغییرات کم و بیش ناگهانی برخی از خواص مانند ظرفیت گرمایی و ضریب انبساط حرارتی از مقادیری که خاص جامدات بلوری است به مقادیری که ویژه مایعات است. دمای این تغییرات ناگهانی به دمای انتقال به شیشه یا T_g موسوم است [۱۸].

۲-۲-۱- انتقال به شیشه

ارتباط بین بلور، مایع و شیشه را می‌توان به آسانی به کمک نمودار حجم - دمای شکل ۲-۲ نشان داد. با سرد کردن مایع از حالت اولیه A، حجم به تدریج و به صورت یکنواخت در امتداد خط AB کاهش می‌یابد. اگر سرعت سرد کردن آهسته باشد تبلور قاعدتاً در دمای انجماد T_f انجام خواهد شد. در این دما حجم معمولاً به صورت ناگهانی از نقطه B تا C کاهش می‌یابد (به جز چند استثنا). از آن پس با کاهش دما حجم جامد در امتداد خط CD کاهش خواهد یافت. اگر سرعت سرد کردن به اندازه کافی بالا باشد عمل تبلور در دمای T_f انجام نخواهد شد. در این حالت، حجم مایع فوق سرمایش یافته^۱ (یعنی مایعی که به زیر دمای انجماد آمده اما انجماد حاصل نکرده و در نتیجه از نظر ترمودینامیکی در وضعیت فراپایدار قرار دارد) در امتداد خط BE (در ادامه خط AB) به کاهش خود ادامه می‌دهد. در دمای معینی که با T_g نشان داده می‌شود منحنی حجم - دما به صورت محسوسی تغییر شیب می‌دهد و تقریباً به موازات خط CD که مربوط به جامد بلوری است ادامه می‌یابد. T_g به دمای استحاله و یا انتقال به شیشه موسوم است [۱۸].



شکل ۲-۲ ارتباط بین حالات مایع، بلور و شیشه [۱۸]

^۱ . supercooled

۲-۳- شیشه فلز^۱ها

امروزه عبارت فلزات شیشه‌ای و یا فلزات آمورف به دسته‌ای از مواد فلزی غیر کریستالی اطلاق می‌شود که از طریق سرد کردن بسیار سریع مذاب آن‌ها در سرعت‌های سردکردن $10^4 - 10^8 \text{ K/s}$ بدست می‌آیند. بنابر مطالعات صورت گرفته، اولین فلز شیشه‌ای در سال ۱۹۶۰ توسط کلمنت^۲ و همکارانش بوسیله کوئنچ مذاب ترکیب نزدیک به یوکیکتیک آلیاژ Au-25at%Si ساخته شد [۱۹].

شیشه فلزها به خاطر ساختار نانو کریستالی آنها بدون حضور مرزدانه، ترکیبی غیر معمول از خواص را به دست می‌دهند مانند استحکام نسبتاً بالا، داکتیلیتی خمشی خوب، چقرمگی شکست بالا، مقاومت به خوردگی بسیار خوب و خواص مغناطیسی نرم مطلوب. به همین جهت است که شیشه فلزها کاربردهای متعددی در صنایع یافته اند [۲۰].

۲-۳-۱- ساختار شیشه‌های فلزی

فلزات شیشه‌ای (که گاه به نام فلزات آمورف یا شیشه‌های فلزی نیز خوانده می‌شوند) موادی غیر بلوری هستند که از فلزات خالص یا آمیزه‌ای از فلزات و شبه‌فلزات تشکیل می‌شوند. این مواد فلزی هستند زیرا خواص الکتریکی، مغناطیسی و نوری آنها عمدتاً فلزی است.

این شیشه‌ها به صورت نوار یا الیاف نازک (با استفاده از تکنیک‌های سردکردن بسیار سریع^۳) به طور مثال با عبور دادن جریان‌های مذاب از بین غلتک‌های دارای هدایت حرارتی بسیار زیاد یا روش‌های دیگر ساخته می‌شوند. از کاربردهای مهم آنها می‌توان از فرومگنت‌هایی بر پایه آهن آمورف نام برد

¹ . metallic glass

² . klement

³ . Rapid quench

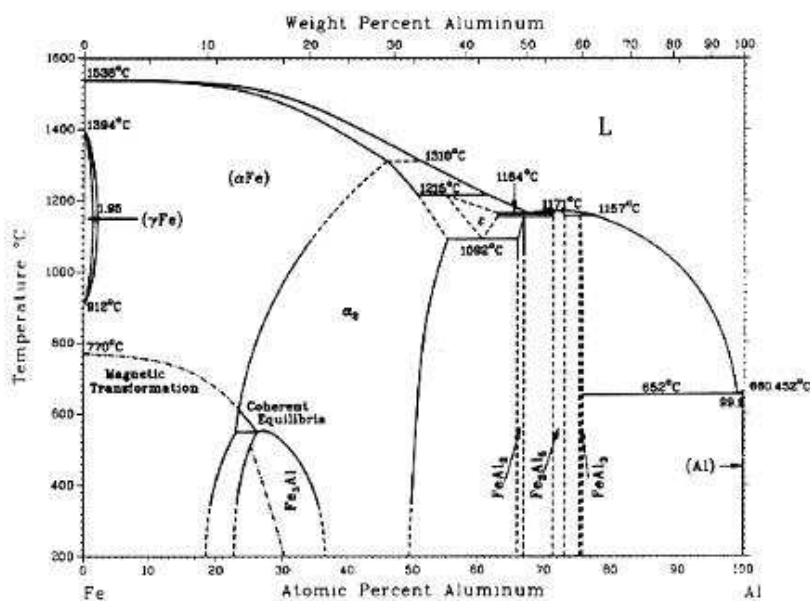
که در هسته‌های ترانسفورمرها استفاده می‌شود. این مواد دارای تلفات کم پسماندی در منحنی‌های هیستریزس و آزمایشات مغناطیسی بوده و علاوه بر این مقاومت الکتریکی آنها سه برابر مواد مشابه بلوری است. در نتیجه، کاربرد آنها می‌تواند منجر به حدود ۳۰٪ صرفه‌جویی در مصرف انرژی گردد. فلزات شیشه‌ای دارای استحکام مکانیکی بسیار بالایی هستند که در حد استحکام تئوریک می‌باشد. در نتیجه این مواد به صورت کامپوزیت‌های تقویت شده توسط الیاف می‌توانند در کاربردهایی که نیاز به نسبت‌های بالای استحکام مکانیکی به وزن وجود دارد مانند هواپیماهای سریع‌السیر، سفینه‌ها و غیره به کار گرفته شوند [۱۸].

فرآوری خارج از حالت تعادلی در سال‌های اخیر برای تولید موادی با خواص بهبودیافته، گسترش چشم‌گیری یافته‌اند. این روش‌ها شامل روش‌های RSP، رسوب از حالت تبخیری و MA^۱ می‌باشند. با وجود این که این حالت‌ها در اصل با هم فاصله عملیاتی زیادی دارند، اما هدف اصلی در تمام آنها که کنترل اساسی ریزساختاری با انعطاف بیشتر و بدانوسیل به بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی است، مشترک است. از میان آنها نشان داده شده است که MA می‌تواند روش مناسبی برای تولید فازهای غیرتعادلی به‌شمار رود [۲۱ و ۲۲]. فاز غیرتعادلی فرآوری شده شامل محلول‌های جامد فوق‌اشباع، بلور نیمه پایدار یا فازهای میانی شبه کریستالین و فازهای آمورف است [۲۲ و ۲۳]. در اکثر موارد و بسته به شرایط غالب، این روش‌ها شامل تولید ریزساختاری با اندازه دانه نانومتری، تشکیل رسوب یا الگوهای جدایش است [۲۴ و ۲۵]. آلیاژسازی مکانیکی روشی برای فرآوری یک پودر حالت جامد است که همراه با تکرار مسیر جوشکاری، شکست و جوش خوردن مجدد ذرات پودر در یک بال میل پرانرژی و خشک، صورت می‌گیرد [۲۱ و ۲۲].

^۱ . Mechanical alloying

مزیت عمده پروسه MA این است که یک پروسه حالت جامد بوده و بنابراین امکان اختلاط عناصر اصلی با نقاط ذوب متفاوت و یا آنهایی که در حالت جامد غیرقابل امتزاج اند را فراهم می‌سازد؛ که اغلب با روش‌های قدیمی بسیار سخت یا غیرممکن است.

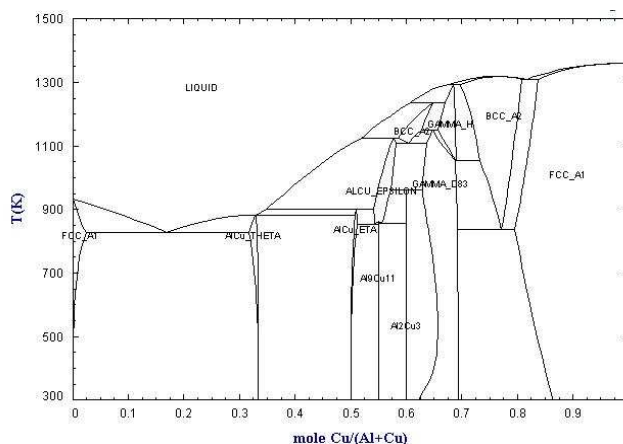
امکان آلیاژسازی Al با Fe، استحکام دما بالا را افزایش می‌دهد که مربوط به انتشار ذرات فاز ثانویه است. این تاثیر می‌تواند همراه با بالا رفتن کسر حجمی فاز ثانویه افزایش یابد که حاصل پیشرفت روش‌های امتزاج Fe در Al مانند RS و MA است. حلالیت جامد تعادلی Fe در Al در دمای اتاق تنها ۰٫۰۲۵ درصد اتمی است (شکل ۲-۳).



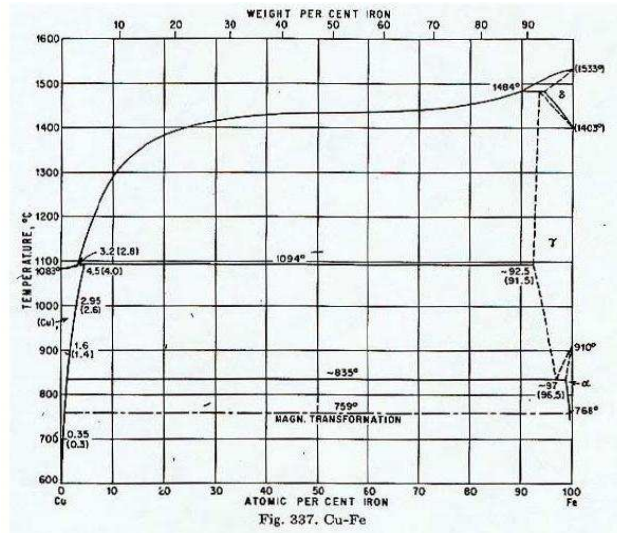
شکل ۲-۳- دیاگرام فازی آلومینیوم- آهن

ترکیبات بین فلزی دمای ذوب بسیار بالایی داشته و بنابراین می‌توانند در کاربردهایی در دماهای بسیار بالا هم سودمند باشند اما در دمای اتاق ترد و شکننده‌اند. به هر حال، نشان داده شده است که مواد نانوشده نسبت به مواد غیر نانو نرمی بیشتری دارند [۵]. از آلیاژهای پایه Al-Fe در زیبایی سازی بسته

بندی‌ها، صفحات معماری و صفحات لیتوگرافی استفاده می‌شود [۲۶]. شکل‌های ۲-۴ و ۲-۵ نیز به ترتیب دیاگرام‌های فازی آلومینیوم-مس و آهن-مس را نشان می‌دهد. در این دیاگرام‌ها نیز مشهود است که انحلال این عناصر در هم در حالت جامد یا صفر یا بسیار اندک است. سیستم نهایی مورد بحث یعنی Al-Fe-Cu دارای مقاومت به خوردگی و سایش بالا و همچنین استحکام قابل توجهی است. به دلیل همین خواص است که از آنها در قطعات و ابزار مهندسی مانند قالب‌ها، بوته‌ها، تسمه‌های انتقال و غیره استفاده می‌شود. تلاش‌های فراوانی نیز در دهه اخیر برای بهبود این خواص و علی‌الخصوص خواص خوردگی و سایش آن به کار گرفته شده است. یکی از این روش‌ها می‌تواند تولید فاز آمورفی در این ماده آلیاژی باشد که با افزایش مقاومت به سایش و خوردگی در این مهم تأثیرگذار باشد. علاوه بر این و با توجه به خصوصیات ذکر شده برای سیستم Al-Fe می‌توان با افزایش عنصر Cu به این سیستم موجبات بهبود خواص مغناطیسی و الکتریکی این آلیاژ را فراهم ساخت. فازهای آمورف ترکیب جالبی از خواص را دارا بوده و در نتیجه این ترکیب خواص، کاربردهای ساختار آمورف می‌تواند به عنوان پیش‌زمینه‌ای برای سنتز و فرآوری مواد نانو و میکرو و کنترل آنها مطلوب باشد.



شکل ۲-۴- دیاگرام فازی آلومینیوم-مس



شکل ۲-۵- دیاگرام فازی مس- آهن

با در نظر گرفتن مطالعات صورت گرفته می‌توان دریافت که آلیاژسازی مکانیکی قبلاً برای سیستم Al-Fe جهت تولید محلول‌های جامد فوق‌اشباع و فازهای آمورف با ترکیبات متفاوت آلیاژی به کار گرفته شده است [۱۵-۳۱ و ۲۷]. این محدوده‌های ترکیبی به دقت آسیاکاری‌های متفاوتی وابسته‌اند) انواع آسیاکاری (جدول ۲-۱).

جدول ۲-۱ محدوده‌های ترکیبی برای تولید آلیاژ آمورف بوسیله آلیاژسازی مکانیکی

مرجع	نوع آسیا	محدوده تشکیل فاز آمورف (درصد Fe)	بیشینه حلالیت در حالت جامد (درصد Fe)	محدوده ترکیب پودر (درصد Fe)
۲۸ و ۲۷	Horizontal	۱۷-۳۵	۱	۴-۴۲
۲۹	-	-	۳,۵	۳,۵
۳۰	Spex	۲۰-۵۰	-	۱۰-۶۰
۳۱	Spex	۲۰	-	۲۰
۱۵	Planetary	۲۰	-	۱۲,۵-۲۵

تشکیل شیشه در سیستم های فلزی عمدتاً در چهار سیستم دوتایی اصلی مورد مطالعه قرار گرفته است.

الف: سیستم فلزات انتقالی به شبه فلزات (که با علامت اختصاری T-M مشخص می شود)

ب: سیستم فلزات انتقالی (با علامت اختصاری TL,TE)

ج: سیستم فلزات قلیایی خاکی (AE) با عناصر کمیاب خاکی (RE) و فلزات ساده (S)

د: سیستم فلزات انتقالی - آکتینیدها (T-AC).

جدول ۲-۲ خلاصه ای از سیستم های فوق را به نمایش می گذارد.

جدول ۲-۲ سیستم های شیشه ساز دوتایی فلزی [۱۸]

گروه	ترکیب نمونه برای شیشه
T-M	$Pd_{80}Si_{20}$ $Ni_{80}P_{20}$ $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ Met-glass 2826
TE-TL	$Nb_{60}Ni_{40}$ $W_{45}Fe_{55}$ $Zr_{76}Fe_{24}$
TL-RE	$Co_{33}Gd_{67}$ $Ni_{30}Gd_{70}$
AE-AE	$Ca_{67}Mg_{33}$
AE-S	$Mg_{70}Zn_{30}$
AE-T	$Ca_{65}Pd_{35}$
S-RE	$Al_{30}La_{70}$
AC-T	$U_{70}Cr_{30}$

در میان سیستم های فوق، سیستم نخست که معمولاً حدود ۷۰-۸۰٪ آن از فلز انتقالی و بقیه آن از یک شبه فلز تشکیل می گردد بیشتر از بقیه مورد مطالعه قرار گرفته است.

مدل هایی که برای توصیف ساختار فلزات شیشه ای پیشنهاد شده است معمولاً در چهار گروه قابل دسته بندی است.

مدل های میکرو کریستالین (تئوری بلورک)، شبکه نامنظم، آرایش متراکم نامنظم کرات^۱ و آرایش نامنظم منشورهای مثلث القاعده^۲. مدل شبکه نامنظم بیشتر در مورد جامدات آمورف تک جزئی صادق است (از جمله فلزات تک جزئی). مدل های سوم و چهارم ساختار بیشتر فلزات آمورف را به خوبی توضیح می دهند [۱۸].

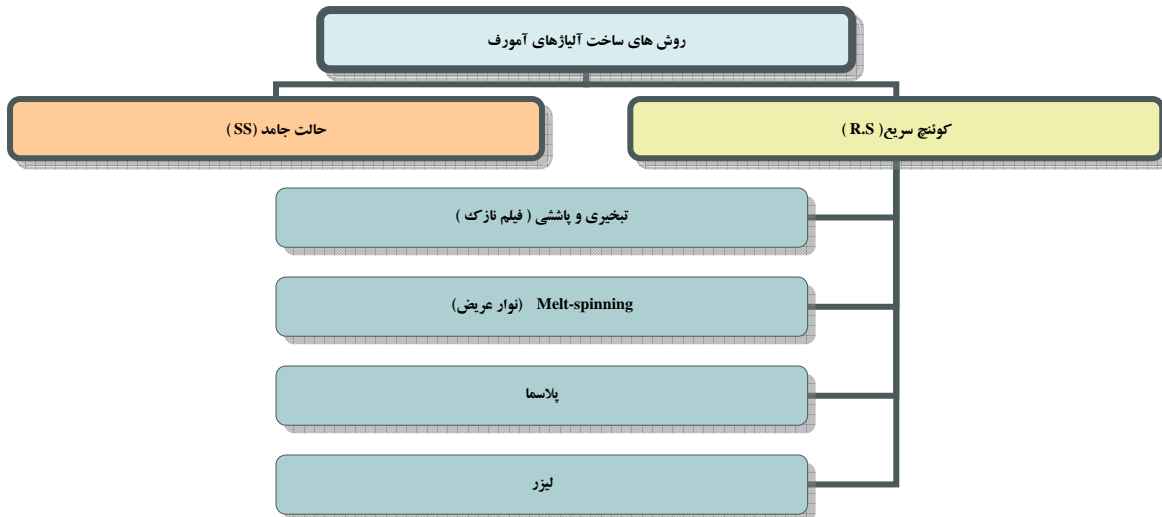
۲-۴- روش های ساخت

همانطور که اشاره شد، روش های ساخت آلیاژهای آمورف به طور کلی به دو دسته اصلی کوئنچ سریع (RS) و حالت جامد (SS) تقسیم می شوند. شکل ۲-۶ روش های ساخت آلیاژهای آمورف را نشان می دهد.

نیاز به سرعت بالایی که قبلاً گفته شد باعث شده است که تنها نوارها و فویل های نازکی با ضخامت کمتر از $100\mu m$ توسط این روش به جز آلیاژهای رقیق Pd-Ni-P پایه Pd تولید شود. اخیراً گروهی از شیشه فلزهای بالک از آلیاژهای پایه Mg, Zr, La بوسیله نرخ های سرمایش کمتر از $100 K/s$ حاصل شده اند [۱۹ و ۲۰].

¹ . Dense Random Packing of Spheres

² . Random Trigonal Packing



شکل ۲-۶ نمودار روش های ساخت آلیاژهای آمورف

همانطور که در شکل ۲-۶ مشاهده می شود که روش کونچ سریع به چند روش اصلی تقسیم می شوند. تکنیک های تبخیری و پاششی برای تولید فیلم های نازک آمورف و روش melt-spinning برای تولید نوارهای عریض مورد استفاده قرار می گرفتند. در هر دو روش نرخ سرمایشی بالا و سریعی برای پیشگیری از جوانه زنی فاز کریستالین لازم است [۳۲].

روش دیگری که آمورف سازی را بدون عبور از حالت مذاب در هیچ یک از مراحل شکل گیری، ممکن می سازد به واکنش های حالت جامد (SSA) معروفند که شامل بمباران پرتویی، آمورف شدن تحت تجمع هیدروژن، درون نفوذی فلزات عنصری، شیشه سازی تحت فشار و تغییر شکل یا آلیاژسازی مکانیکی است [۱]. آلیاژسازی مکانیکی ممکن ساخته است که این امر توسط واکنش های حالت جامد رخ دهد یعنی در طول آمورف سازی و تشکیل آلیاژ آمورف ماده در دمای واکنشی کم تر از دمای کریستالیزاسیون مورد عملیات قرار می گیرد. پس این روش شامل هیچ فرآیند کونچی که