

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

موضوع: متالورژی پودر آلومینیوم

گرد آورنده: بهروز شکرنازاد

پاییز ۱۳۸۸

فهرست مطالب

صفحه

بخش اول : متالورژی پودر

۴	مقدمه
۹	آشنایی با فرایند متالورژی پودر
۱۲	تعاریف مهم
۱۳	مراحل تولید در P/M
۱۳	روشهای تولید پودر
۱۷	آزمایش و ارزیابی پودر
۱۸	مخلوط کردن
۱۹	عملیات پیش از فشردن
۲۰	فشردن پودر
۲۵	تف جوشی (زینترینگ)

بخش دوم : تهیه پودر آلومینیوم

۳۱	۱- مقدمه
۳۵	۲- ساخت پودر
۳۶	▪ روشها عمده تولید پودر آلومینیوم
۴۰	▪ انجماد سریع

- ویژگی پودرهای فلزی ----- ۴۱
- ۳- ترکیب کردن پودر----- ۴۵
- پیش فشردن ----- ۴۶
- فشردن سرد ----- ۴۷
- زینتر کردن ----- ۴۹
- ترکیب کردن گرم ----- ۵۳
- شکل دادن حالت اسپری ----- ۶۰
- ۴- ویژگیها و کاربرد ها----- ۶۱
- مثال (۱) توسعه متالورژی پودر آلیاژهای VXXX ----- ۶۲
- مثال (۲) آلیاژهای استحکام بالا برای دمای بالا ----- ۶۴
- مثال (۳) آلیاژتجربی مدول و دما بالا: Al-Ti بوسیله آلیاژ کردن مکانیکی----- ۶۶
- نتایج----- ۶۷
- منابع و مراجع----- ۷۰

مقدمه :

تولید قطعات با پودر ، به بیش از پنج هزار سال پیش می رسد ، هم اکنون ، ستون آهنی با وزنی حدود شش تن در شهر دهلی هندوستان وجود دارد که در هزار و ششصد سال پیش به همین طریقه (متالورژی پودر) تهیه شده است .

در اواخر قرن هیجدهم ولاستون کشف کرد که می توان پودر فلز پلاتین را (که در طبیعت به صورت آزاد شناخته شده بود) پس از تراکم و حرارت دادن ، در حالت گرم با چکش کاری به بلوک تبدیل کرد . ولاستون جزییات متد خود را در سال ۱۸۲۹ ، منتشر کرد و اهمیت فاکتورهایی نظیر اندازه دانه ها ، متراکم کردن پودر باوزن مخصوص بالا و اکتیویته سطحی و غیره ... را توضیح داد.

همزمان با ولاستون و به طور جداگانه متالورژیست برجسته روسی پیوتر زابولفسکی در سال ۱۸۲۶ ، از این روش برای ساختن سکه ها و نشان ها از جنس پلاتین ، استفاده کرد.

در نیمه قرن نوزدهم ، متخصصین متالورژی به روش های ذوب فلزات با نقطه ذوب با دست یافتند و همین مساله باعث شد که مجددا استفاده از متالورژی پودر محدود شود هر چند تقاضا برای تولید قطعاتی مانند تنگستن از طریق متالورژی پودر ادامه یافت .

یکی از دلایل توسعه متالورژی پودر این است که در روش متالورژی پودر ، فلز تلف شده به مراتب کمتر از سایر روش ها است و حتی می توان گفت وجود ندارد . در این مورد هر یک کیلوگرم محصول ساخته شده با متالورژی پودر ، معادل است با سایر روشهای شکل دادن نظیر

برش و تراشکاری ، چون در روش هایی نظیر تراشکاری مقادیر متنابهی از فلز به صورت براده در می آید که تقریبا غیر قابل استفاده است . به علاوه یک کیلو گرم از بعضی از مواد ساخته شده با روش های متالورژی پودر می تواند کار ده ها کیلو گرم فولاد آلیاژی ابزار را انجام دهد .

در حال حاضر ، متالورژی پودر بیشتر در مواردی مورد استفاده قرار می گیرد که در ساختن محصولاتی با کیفیت عالی از مواد مناسب ، تقریبا کلیه روشهای دیگر غیر ممکن باشند . البته در مواردی مثل ساختن رشته های مقاومت خیلی کوچک لامپ که باید از تنگستن خیلی سخت (نقطه ذوب ۳۴۰۰ درجه سانتیگراد) درست شوند روشهایی نظیر تراشکاری ، کشیدن سیم و یا نورد غیر قابل استفاده اند و منحصرآ باید از روش متالورژی پودر استفاده کرد . به علاوه ، برای تهیه آلیاژهایی از دو فلز که نقطه ذوبشان با یکدیگر تفاوت زیاد دارند (مثل مس و تنگستن) ، بهترین راه عملی روش متالورژی پودر است. همین طور از این روش زیاد برای موادی که از یک فلز و یک غیر فلز نظیر الماس تهیه می شوند استفاده می شود . به طور کلی با توجه به موارد فوق بر حسب هزینه و سختی کار ، تکنیک متالورژی پودر به طور موفقیت آمیزی با روش های دیگر تولید ، می تواند رقابت کند . مثلا ، برای ساختن یک چرخ دنده فولادی از طریق تراشکاری ، یک کارگر ماهر باید در حدود ۳۰ ساعت کار کند در صورتی که یک کارگر نیمه ماهر می تواند این چرخ دنده را باروش متالورژی پودر ، در کمتر از ۱۰ ساعت تهیه کند . همچنین دقت ابعاد و سطح قطعات ساخته شده با این روش آن قدر عالی و بدون نقص است که هیچ گونه کار اضافی دیگر روی قطعه ضرورت پیدا نمی کند و بالاخره ، سرمایه گذاری برای صنعت متالورژی پودر ر به مراتب کمتر از سرمایه گذاری برای روشهای کلاسیک ساخت قطعات

است زیرا برای درهم جوشی درجه حرارت لازم بسیار کمتر از درجه حرارت ذوب فلزات است و در نتیجه کوره های مورد احتیاج به مراتب ارزانتراند.

متالورژی پودر رابطه نزدیکی با مهندسی برق نیز دارد، مثلا، رشته های نازک مقاومت و الکترودهایی که در لامپ دیده می شوند و نیز لوله های تولید اشعه X که تماما از جنس فلزاتی نظیر تنگستن، مولیبدن و یا تانتال اند با این تکنیک تولید می شوند. در سالهای اخیر، ابزارهای ساخته شده از سرمت (فلز-سرامیک) هم توسعه زیادی پیدا کرده اند و در کارهای ماشینی تغییرات اساسی داده اند به طوری که سرعت برش ده برابر قبل افزایش یافته است و همچنین مته ها و ابزارهای حفاری که از جنس فلزات سخت اند و به طریق متالورژی پودر تهیه می شوند میزان حفاری چاهها را در معادن فوق العاده افزایش داده اند. البته باید توجه داشت که بدون این تکنیک تقریبا جدید، امکان ندارد که ابزارهایی را که از جنس سرمت و یا فلزات سخت (از کاربیدهایی با نقطه ذوب بالا) ساخت، چون کاربید تیتانیوم که جزء تشکیل دهنده معمول در اغلب ابزارهای برشی است، نقطه ذوبی حدود ۳۱۵۰ درجه سانتی گراد دارد و اجزای تشکیل دهنده دیگر هم، نظیر کاربید زیر کونیم و نیوبیوم در ۳۵۰۰ درجه سانتیگراد و بالاخره کاربید تانتا در ۳۳۸۰ درجه سانتیگراد ذوب می شوند.

علاوه بر ابزارهای برش، تکنیک متالورژی پودر قادر است ابزارهای سوراخ کننده، حدیده های کشش سیم و وسایل مشابه دیگر را نیز تولید کند. و در کلیه این موارد هم، این گونه ابزارها کار خود را به خوبی انجام می دهند. به عنوان مثال یک قالب از جنس سرمت که برای ساختن تیغ به کار می رود در حدود دو هزار میلیون دفعه مورد استفاده قرار می گیرد، در حالی

که برای همین منظور یک قالب فولادی معمولی بعد از پانزده میلیون دفعه پرس باید تعویض شود. به همین ترتیب عمر غلطک های نوردی که از فلزات سخت ساخته می شوند ، در حدود صد مرتبه بیش از غلطک ایی است که از فولادهای نرم ساخته می شوند . بالاخره ، با یک حدیده کشش سیم از جنس فولاد، تا فرسودگی کامل ، به طور متوسط می توان هشتاد کیلو گرم سیم آهن تولید کرد ، در حالی که همین حدیده اگر از جنس کاربید های زینتر شده ، باشد قدرت تولیدی را معادل با ۵۰ تن سیم می یابد که در حدود شش صد مرتبه بیش از اول است .

باز برای مثال یک موتور جت را (که حال حاضر رکن اصل هواپیماهای مدرن است) در نظر بگیریم ، اولین چیزی که جلب توجه می کند این است که باظهور آن ، سرعت هوانوردی به دو برابر افزایش یافته است . نحوه کار این موتورها بر اساس مکش هوا از جلو و احتراق آن با سوخت در محفظه احتراق و خروج سریع محصولات احتراق از عقب است . درجه حرارت سوخت کامل گازها در حدود ۱۵۰۰ الی ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد است که فلزات و آلیاژهای معمولی نمی توانند درجه حرارت مزبور را تحمل کنند . در حال حاضر ، آلیاژهای ریختگی بااضافاتی نظیر کرم ، نیکل و یا کبالت ساخته می شوند که درجه حرارت های بیش از ۸۵۰-۹۰۰ درجه سانتیگراد را نمی توانند تحمل کنند ، به طور کلی بالاتر از این درجه حرارت را قلمروی فلزات بانقطه ذوب بالا کاربید ها و نیتريد هایشان می دانند که با استفاده از تکنیک های متالورژی پودر تولید می شوند .

در این مرحله ، یکی از مطلوب ترین مواد کاربرد تیتان است که به خوبی قادر است در مقابل ضربه های حرارتی (در حین سریع سرد شدن و سریع گرم شدن) مقاومت کند . با افزودن ۲۰ درصد کبالت به این ماده ، قدرتش در ۹۰۰ درجه سانتیگراد دو برابر بیش از بهترین فولاد مقاوم گرما میشود یکی از راه های مطلوب دیگر دستیابی به روش ها و وسایلی است که به نحوی درجه حرارت شیپوره جلوبرنده موتورهای جت را پایین بیاورند . یکی از این روشها تعرق و یاپس دادن بخار به سطح دیواره دهانه خروجی است بهمین ترتیب که مواد بخصوصی را در میان منافذ دیواره دهانه خروجی جت که از جنس مواد خلل و فرج دار است تزریق می کنند. این مواد به صورت بخار به سطح دیواره ، پس داده می شوند و به شکل دانه های عرق در می آیند و همین مساله درجه حرارت را در دهانه خروجی پایین می آورد. در این جا ، باید متذکر شد که این گونه مواد خلل و فرجدار نیز از طریق تکنیک های متالورژی پودر ساخته می شوند.

روش های مشابه دیگری هم برای ساختن یاتاقانهای بدون روغن (یاتاقانهایی که خوشان عمل روغنکاری رانیز انجام می دهند) به کار می روند . در این روش ها نیز پودر فلزات و گرافیت را با فشار زیاد فشرده کرده و مجموعه فشرده شده را زینتر می کنند و معمولا چنین مجموعه ای میتواند تا حدود ۳۵٪ از حجم خود ، ماده روغنی جذب کند و داشته باشد . وقتی در حین کار ، این گونه یاتاقان ها گرم می شوند ، روغن موجود در آن انبساط می یابد و به سطح یاتاقان پس داده می شود که به صورت فیلمی روغن د رسطح یاتاقان شکل می گیرد ، ولی مجددا درحین سرد شدن ، مواد مزبور مانند اسفنجی ، روغن را جذب می کند.

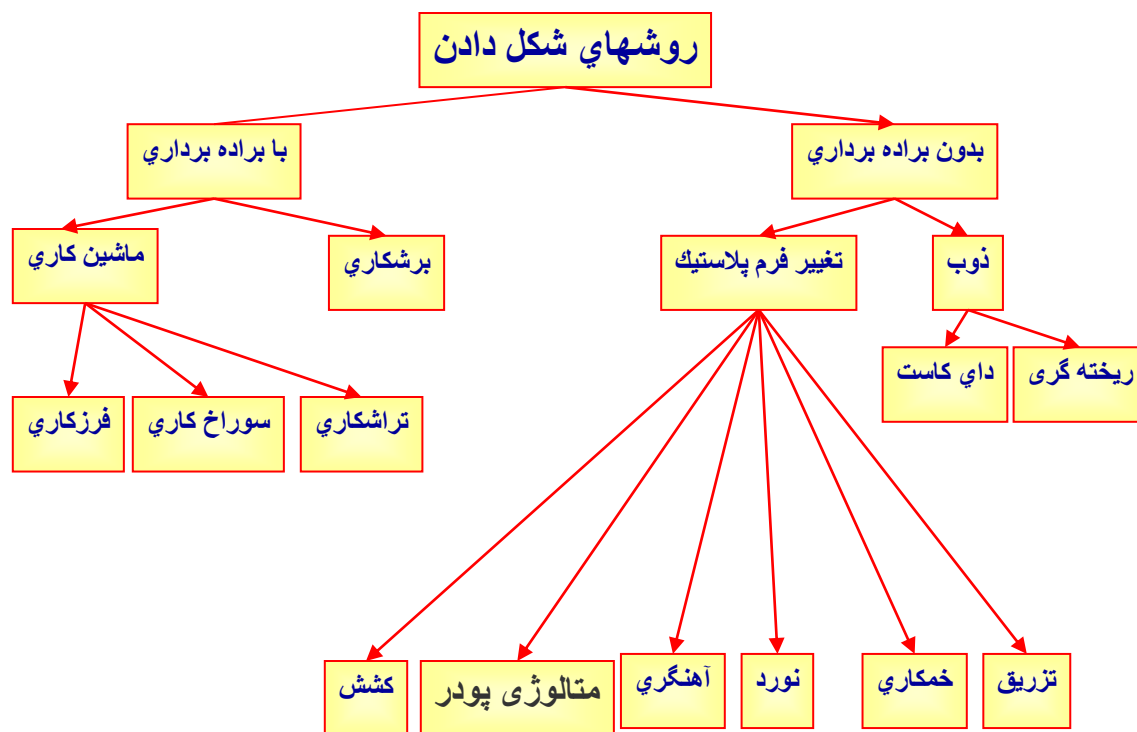
علی رغم مثالهای مذکور در فوق ، کلا با دیدی وسیعتر می توان دریافت که تکنیک متالورژی پودرروشی کاملا جدید نیست ، بلکه به طرق دیگر ، از زمان های خیلی قدیم وجود داشته است و به طوری که در مقبره های شاهان قدیم مصر نظیر توتاناخامن که در ۱۴ قرن قبل از میلاد مزیسته شواهدی دیده شده است . در حفاریهایی که در سال ۱۹۲۲ در کارنک انجام شد ، باستان شناسان ذخایر قابل ملاحظه ای در انجا به دست آوردند که حاکی از تمایل شدید این پادشاه به انواع فنون و هنر ها بوده است زیرا مقبره وی مملو از شاهکار های فنی بود و درمیان این شاهکار ها خنجر هایی مزین با پودرطلا مشاهده می شد که در واقع می توان گفت این نشانه ای از ابتدایی ترین طریقه استفاده از تکنیک متالورژی پودر است .

همچنین از روش مزبور قبایل قدیمی اینکاها در پرو استفاده می کرده اند چون آنها می دانستند که چگونه جواهرات را از زینتر کردن پودر فلزات گرانبها به دست آورند. ولی بعد از اضمحلال این قبایل این روش هم به بوته فراموشی سپرده شد و علم متالورژی پودر برای توسعه خود راههای دیگری در پیش گرفت .

آشنایی با فرایند متالورژی پودر :

متالورژی پودرروشی برای ساخت و تولید به روش شکل دهی قطعات فلزی و سرامیک است که اساس آن بر فشردن پودر مواد به شکل مورد نظر و تفجوشی آن است. تفجوشی در درجه حرارتی زیر نقطه ذوب صورت می‌پذیرد واکثر محصولات این روش شکل دهی نیازی به ماشین کاری بعدی ویا حتی عملیات حرارتی تکمیلی ندارند وعموما دانسیته بالا(گاهی دست نیافتی به روش های دیگر هستند).

در فلوچارت مقابل روشهای شکل دادن نشان داده شده است



متالورژی پودر بخشی کوچک ولی بسیار مهم از صنایع متالورژی می باشد. اولین کاربرد متالورژی پودر برای تولید پلاتین با دانسیته کامل بود که در قرن ۱۹ میلادی صورت گرفت چون در آن زمان امکان ذوب پلاتین به دلیل نقطه ذوب بالا وجود نداشت در آن زمان با اختراع برق توسط ادیسون صنعت الکترونیک از این ماده جهت تولید لامپ های روشنایی و یا مقاومت های الکتریکی برای تبدیل انرژی الکتریکی به گرما بهره می گرفتند. در اوایل قرن بیستم این روش به صورت عمده برای ساخت ابزارهای برشی به صورت اینسرت از جنس تنگستن کارباید توسط روش متالورژی پودر شکل داده شدند که این به خاطر خواص ویژه تنگستن برای این عملیات

نظیر سختی و استحکام بالا ، گرما سختی بالا و نیز ضریب انبساط حرارتی بسیار پایین نسبت به مواد دیگر بوده است.

در سال‌های ۱۹۵۰-۱۹۶۰ روشهای نوین مانند فرج پودر و ایزو استالیک گرم در صنعت متالورژی پودر بکار گرفته شد.

گرچه روش متالورژی پودر امکانات ویژه‌ای را جهت تولید بعضی قطعات خاص فراهم ساخته است، که تولید آنها از طریق روشهای دیگر غیر ممکن یا بسیار مشکل می‌باشد ولی زمینه‌های که باعث فراگیر شدن استفاده از این روش گردیده است، عبارتند از :

- زمینه‌های اقتصادی
- بهره‌وری انرژی
- انطباق زیست محیطی
- ضایعات بسیار پائین (گاهی بدون ضایعه)

با وجود تمامی مزیت‌های متالورژی پودر، محدودیت این روش در اندازه و شکل قطعات تولیدی و هم چنین گران بودن ابزار و تجهیزات تولید که ظرفیت‌های تولید کم را غیر اقتصادی می‌نماید، از نقاط ضعف این فن آوری در رقابت با دیگر فرآیندهای تولید است.

متالورژی پودر فرایند قالب گیری قطعات فلزی از پودر فلز توسط اعمال فشارهای بالا می باشد. پس از عمل فشردن و تراکم پودرهای فلزی، عمل تف جوشی (زینتر شدن) در دمای بالا در یک اتمسفر کنترل شده، انجام پذیرفته که در آن فلز متراکم، جوش خورده و به صورت ساختمان همگن و محکمی پیوند می خورد.

محصولات خاصی که توسط متالورژی پودر تولید می گردند عبارتند از :

چرخ دنده ها ، بادامک ها ، فیلتر ها و یاتاقانهای آغشته به روغن

مزایای متالورژی پودر :

- قابلیت دسترسی به رنج وسیعی از ترکیبات
- تکنیک ایجاد شکل مشبک و یا نزدیک به مشبک
- استفاده از موادی که در سایر فرایندها مشکل هستند
- حذف یا به حداقل رساندن ضایعات ماشینکاری
- حفظ تolerانس ابعادی مناسب
- ایجاد پرداخت سطح مرغوب
- تولید قطعاتی که به وسیله مقاومت سایشی و کششی و استحکام یافته نمی توان به

روشهای دیگر تولید کرد

- ایجاد تخلخل کنترل شده برای خود روانکاری و تصفیه

- سهولت تولید قطعات پیچیده و خاصی که تولید آنها از روشهای دیگر ممکن نباشد
- سازگاری با نیازهای تولید، میان اندازه تا تولید انبوه

محدودیت های متالورژی پودر :

- محدودیت اندازه و شکل
- قیمت بالای پودر فلزات در مقایسه با سایر روشها
- قیمت بالای ابزار و تجهیزات برای تولید کم
- قطعات ساخته شده با این روش بسیار خلل و فرج دارند(بدلیل اکسیداسیون سطحی ذرات و درکل حجم قطعه)
- قیمت بالای قالب ها و محفظه های پودر (چون فشار وارده بر قالب برای متراکم کردن پودر زیاد است لذا باید جنس قالب سخت و مقاوم باشد)
- امکان ساخت قطعات بزرگ محدود است

تعاریف مهم:

پودر: دانه های ریز یک جامد که بزرگترین بعد آن کوچکتر از ۱mm باشد

دانسیتته ظاهری پودر (دانسیتته حجمی) : عبارتست از جرم واحد حجم پودر بدون تکان

دادن آن

چگالی لرزشی (نشست) : عبارتست از چگالی قابل حصول برای پودر در اثر تکان دادن

آن

چگالی نظری (theoretical) : عبارتست از چگالی ماده ای که پودر از آن ساخته شده

(چگالی دانه پودر بدون تخلخل)

مواد افزودنی : این مواد ممکن است برای از بین بردن جدایش حاصل از انتقال پودر،

روانسازی ، برای فشردن ، به عنوان ماده ملات (همگیر) در جهت افزایش مقاومت خسته ،

آلیاژسازی پودر و بلاخره به صورت مواد کمک کننده تف جوشی مورد استفاده قرار گیرند.

مراحل تولید قطعه در P/M:

• تولید پودر و روشهای آن

• مخلوط کردن

• فشردن

• زینتر کردن

• عملیات نهایی

روشهای تولید پودر :

(۱) روشهای مکانیکی : مکانیسم های مورد استفاده در این روش عبارتند از : ضربه ، سایش (با استفاده از ایجاد اصطکاک بین ذرات) ، برش (که برش در این روش نوع کلیواژ است) و تراکم (برای مواد ترد و شکننده)
از جمله روشهای مکانیکی عبارتند از :

الف) ماشین کاری : که ماشین کاری خود برای ایجاد پودر مورد استفاده قرار نمی گیرد بلکه براده های حاصل از آن به عنوان پودر مورد استفاده قرار می گیرد
ب) آسیا کردن با آسیاهای قوی
ج) آلیاژ کردن مکانیکی : عبارتست از بکارگیری مواد مستحکم شده با پخش اکسید که مقاومت خزشی آنها در دماهای بالا زیاد است مانند آلیاژهای دارای نرمة های زیر میکرون اکسیدی

پودر تولید شده به روش مکانیکی نامنظم می باشد

(۲) روش الکترولیتی : عبارتست از رسوب دادن پودر فلز بر روی کاتد یک ظرف الکترولیز مانند تهیه پودر تیتانیوم ، آهن ، مس و...

(۳) روشهای شیمیایی که عبارتند از :

الف (تجزیه جامدات به کمک گازها : که احیا اکسید فلزات به وسیله گاز CO

وهیدروژن مثال خوبی برای این روش می باشد که برای جلوگیری از تف جوشی آن واکنش در دمای پایین انجام می شود.

ب (ته نشین سازی از مایع : عبارتست از تولید رسوب فلزات از نمکها و

ترکیبات آن مانند تولید پودر زیرکونیوم از نمکهای کلرید آن با افزودن منیزیم

ج (رسوب سازی از گازها : واکنش های فاز گازی را می توان بعنوان روشی

مناسب برای تولید پودر فلزات فعال بکار گرفت مانند واکنش تری اکسید مولیبدن با هیدروژن و تولید پودر مولیبدن

د (تجزیه گرمایی : در این روش پودر ، از تجزیه بخار و میعان آن بهره گیری می

شود . مانند تولید پودر نیکل از کربونیل آن (NiC_4O_4) با گرما دادن و تحت فشار قرار دادن آن

۴) روشهای اتمیزاسیون (افشانش) که عبارتند از :

الف (اتمیزاسیون گازی : گازهای مورد استفاده در این روش هلیوم ، ازت ، آرگون و

هوا می باشند که این گازها به عنوان سیالات متلاشی کننده جریان مذاب مورد استفاده قرار می گیرند

این روش بیشتر برای سوپر آلیاژها کاربرد دارد که با انتقال انرژی از گاز منبسط شونده

به جریان مذاب صورت می گیرد و سرعت زیاد گاز باعث خرد شدن فلز مذاب و تولید جریانی از

دانه های ریز مذاب شده که در حین حرکت در محفظه جمع آوری پودر سرد و منجمد می گردد. که در این حالت هر چه انرژی گاز زیاد باشد دانه پودر حاصل ریزتر خواهد شد

گداختگی مذاب در ناحیه بالاتر از منحنی مایع ، گرانروی آن را کاهش داده و منجر به طولانی شدن زمان انجماد و نهایتاً کرویت دانه های پودر خواهد شد.

ب) اتمیزاسیون آبی : افشانش با آب متداولترین فرایند برای تولید پودر فلزات و آلیاژی است که دارای نقطه ذوب زیر $1600^{\circ}C$ می باشند . که جهت دهی آب به سمت مسیر مذاب را می توان با استفاده از افشانک حلقوی ، چند تایی و یا منفرد عملی نمود این فرایند مشابه افشانش گازی است با این تفاوت که سرعت انجماد در این مورد بیشتر و ویژگیهای عامل متلاشی کننده مذاب نیز با حالت پیشین متفاوت می باشد . وجدایش در دانه های پودرهای آلیاژی حاصل از روش افشانش آبی ناچیز می باشد

فاصله افشانک تا مسیر حرکت مذاب ، در اینجا ، عامل چندان با اهمیتی نمی باشد ، زیرا تراکم پذیری آب کم و چگالی (مومنتم) آن از گاز بیشتر است .

ج) اتمیزاسیون گریز از مرکز : نیاز به کنترل اندازه دانه های پودر و همچنین

اشکالات موجود در تولید پودر فلزات فعال منجر به توسعه و بکار گیری این روش شده است

در این روش نیروی گریز از مرکز به صورت ورقه ای نازک باعث پرتاب دانه های فلز مذاب و انجماد آنها بصورت پودر می گردد

د) دیگر روشهای افشانش : از جمله دیگر روشهای افشانش عبارتند از:

افشانندهای پلاسمایی ، غلتکی ، بوته چرخان و انفجاری

در افشانش غلتکی ، یک آسیای غلتکی پر سرعت ، جریان مذاب را متلاشی می کند .
(دارای سرعت سرد شدن مذاب تند است)

برای تولید پودر درشت دانه دارای نقطه ذوب پایین می توان از روش بوته چرخان استفاده کرد .

در تکنیک تولید پودر در خلا فلز مذاب که با گاز هیدروژن اشباع شده از طریق یک افشانک به محفظه خلا وارد شده و در اثر متلاشی شدن به دانه های ریز پودر تبدیل می شود.
در روش افشانش پلاسمایی دانه های درشت پودر به یک مشعل پلازما پاشیده شده و ذوب می شوند ، حاصل این عمل پودر ریزی است که در قوس شتاب گرفته و به بیرون آن پرتاب می شود.

روشهای دیگری نیز برای تولید پودر با تکنیک افشانش وجود دارد که جملگی آنها بر انتقال همزمان حرکت و گرما به ماده اولیه مبتنی می باشد و تنها نحوه شتاب دادن و ذوب فلز در این روشها متفاوت است .

عوامل موثر روی اندازه ذرات حین اتمیزه کردن :

- دمای مذاب : با افزایش دمای مذاب به علت کاهش ویسکوزیته دانه ها ریزتر می گردند.
- قطر نازل : هر چه قطر کمتر باشد دانه ها ریزتر می گردند.
- فشار انژکتور : هر چه این فشار زیاد باشد دانه ها ریزتر می گردند.

- در اتمیزاسیون گازی اگر زاویه برخورد گاز و مذاب خیلی کم یابد دانه ها درشت میگردند و اگر خیلی زیاد باشد ممکن است نازل را بند آورد.
- در اتمیزاسیون گازی حالت دانه ها کروی تر است .



شکل ۱-۱) شکل ذرات در پودر های فلزی

آزمایش و ارزیابی پودر:

پودرمورد استفاده باید ابتدایا از سیلان خوبی برخوردار باشد تا به صورت یکنواخت در قالب تغذیه شود ,علاوه بر این باید چکالی ظاهری بالایی داشته باشد

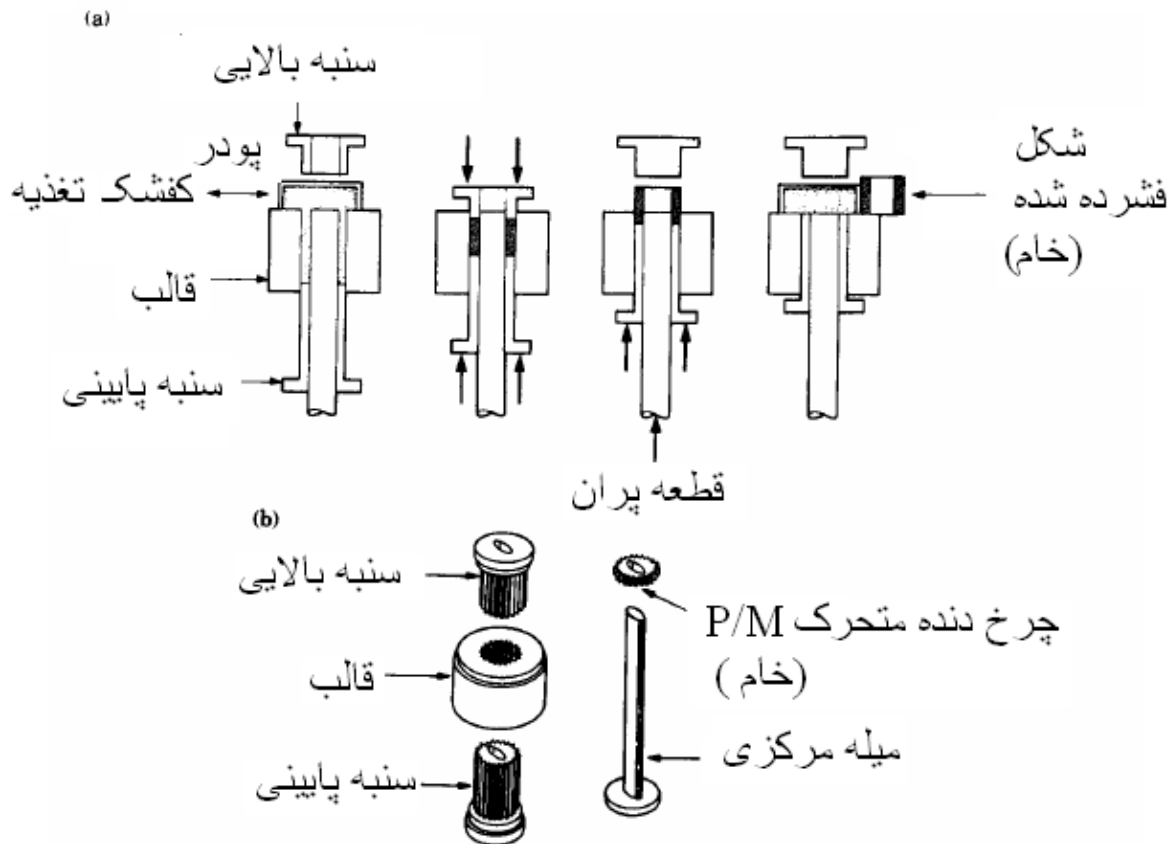
چرا که چگالی کم به معنای پر نشدن فضای خالی بین دانه های ریز حتی تحت فشار است یعنی باید تراکم پذیری به خوبی مشخص گردد ویا اینکه باید درصد خلوص پودر تهیه شده نیز امتحان شود ,علاوه بر این رطوبت و میزان ناخالصی موجود نیز به درستی تعیین گردند.

مخلوط کردن (امتزاج) :

مخلوط ایده ال ، مخلوطی است که همه ذرات هر ماده آن بطور یکنواخت پخش(توزیع) شده باشد . پودر های فلزات مختلف دیگر ماده ممکن است به منظور دستیابی به خواص فیزیکی و مکانیکی خاصی مخلوط گردند

روانسازها ممکن است برای بهبود ویژگی جریان یافتن (روان شدن) پودر با پودر مخلوط گردند مخلوط کردن زیاد ممکن است باعث کار سختی و سایش ذرات گردد

نسبت بالای مساحت رویه (ناحیه سطحی) به حجم پودر باعث حساس شدن به اکسیداسیون می گردد و ممکن است احتراق ایجاد نماید



شکل ۱-۲) a- فشردن پودر فلزی برای شکل دادن یک بوش . قسمت فشرده

شده خسته خام نامیده می شود b-ابزار خاص و قالب برای فشردن یک چرخ دنده

متحرک

عملیات پیش از فشردن

(۱) همگن کردن و اختلاط

عوامل موثر در همگن و مخلوط کردن مواد پودری مشتمل اند بر جنس و اندازه دانه ها ، نوع و اندازه مخلوط کن ، حجم نسبی پودر در مقایسه با حجم مخلوط کن و همچنین سرعت و زمان مخلوط سازی . بعلاوه فاکتوهای محیطی از قبیل رطوبت نیز بر سهولت مخلوط سازی تاثیر مگذارند.

(۲) روانسازی پودر :

روانسازی پودر های فلزی عمدتاً بوسیله استیاراتهای با مبنای آلومینیوم ، روی ، لیتیم ، منیزیم و کلسیم انجام می گیرد طول زنجیره مولکولی این مواد حدود ۱۲ تا ۲۲ اتم کربن بوده ، فعالیت سطحی آنها زیاد است و در دماهای نسبتاً کم ذوب می شوند .

(۳) خشک کردن پاششی : پودر ریز و سخت موادی از قبیل تنگستن ، مولیبدن ، کربور

تنگستن و اکسید آلومینیوم از جمله پودرهای کند جریان و دارای چگالی ظاهری کم می باشد با کلوخه سازی این پودرهای ریز می توان سیالیت آنها را افزایش داد بدین منظور پودر را با یک ماده آلی و عاملی فرار مخلوط شده و دوغابی می سازد که بدرون محفظه گرم شده ای پاشیده شده و در اثر نیروی کشش سطحی بصورت دانه های کلوخه شده کروی در می آید .

فشردن پودر :

هدف اصلی فشردن پودر عبارت است از تولید خسته باویژگیهای مورد نظر با ایجاد حداقل اصطکاک بین پودر و جداره قالب . برای این منظور باید نسبت نیروهای محوری به

شعاعی در حد امکان کاهش یابد تا سایش قالب به میزان کمینه آن رسیده و راندمان فشردن بهبود یابد. نسبت ارتفاع به قطر خسته نیز به منظور همگن کردن ویژگیهای قطعه کوچک انتخاب می شود.

فشردن پودر و افزایش چگالی انباشتی آن نیاز به اعمال نیروی خارجی دارد. فشردن پودر چند مرحله دارد که در مرحله نخست فشردن در اثر تغییر آرایش دانه ها و سر خوردن آنها بر روی یکدیگر تعداد نقاط تماس زیاد می شود فشردن بیشتر چگالی پودر را از طریق بزرگ شدن سطوح تماس در اثر تغییر شکل موم سان افزایش داده و باعث ایجاد کار سختی و در همان حال بوجود آمدن سطوح تماس تازه بین دانه ای می شود. در این مرحله سطوح تماس حالت تخت بخود می گیرد.

در خلال فشردن، جوش سرد ایجاد شده در سطوح تماس دانه ها باعث ایجاد استحکام خسته پودر می شود. استحکام پس از فشرده شدن، و پیش از تف جوشی خسته، استحکام خام نامیده می شود. با افزایش بیشتر فشار میزان تغییر شکل موم سان دانه های پودر نیز بیشتر شده و از سطوح تماس بین آنها به درون دانه ها و بطن خسته گسترش می یابد. در این حالت با کاهش میزان تخلخل دانه کاملاً کار سخت می شود. روشن است که هر گونه افزایش چگالی خسته پودر مستلزم وارد شدن فشار بیشتر از طرف عامل خارجی، بر آن است

فشردن پودر اغلب موارد، به کمک دوسمبه که یکی در بالا و دیگری در پایین قالب قرار گرفته انجام می شود سمبه بالایی پیش از مرحله پر کردن قالب از دهانه محفظه آن فاصله می گیرد.

موقعیت سمبه پایینی در هنگام تغذیه پودر به قالب اصطلاحاً وضعیت پر شدن نامیده می شود و ورود میزان معین و از پیش تعیین شده پودر به درون محفظه قالب را امکان پذیر می سازد . ریزش پودر بدرون قالب بوسیله یک کفشک خوراک دهنده لرزان صورت گرفته و سمبه پایینی در وضعیت فشردن پودر در موقعیتی قرار می گیرد که پودر بخش مرکزی محفظه قالب را پر نماید ، بدین وسیله پس از پر شدن قالب ، سمبه پایینی قدری پایین تر رفته و سمبه بالایی نیز بدرون قالب وارد می شود .

فشردن پودر با اعمال فشار از طرف هر دو سمبه انجام می شود و پس از پایان کار سمبه بالایی از محفظه قالب خارج شده و سمبه پایینی خسته را بیرون می اندازد .

پیوند هایی که در اثر فشردن پودر بین دانه های آن بوجود می آید تامین کننده استحکام قطعه خام حاصل از شکل دهی می باشد . بالا بودن چگالی انباشتی پودر به ایجاد پیوند های بین دانه ای کمک کرده و تمیز بودن سطح دانه ها استحکام پیوند ها را افزایش می دهد . بعلاوه اگر نیروی فشردن پودر زیاد باشد ، بیروهای برشی باعث خرد شدن لایه های نازک سطحی روی دانه ها خواهد شد .

هر چه دانه های پودر ریزتر باشند فشردن آنها مشکر تر خواهد بود زیرا منفذهای درشت ، در مقایسه بامنافذ ریز ، ساده تر فرو می ریزند ، از این رو است که آهنگ چگالش ، در اثر فشردن ، برای پودرهای درشت دانه تند تر است . پودرهای دارای تخلخل درونی مشکل فشرده شده و چگالش آنها در مرحله نخست شکل دهی تنها در اثر فروپاشی منافذ بزرگتر بین دانه ها

صورت می گیرد ، بهمین لحاظ تراکم پذیری این گونه پودرها در مراحل آغازین فشردن بالا است ولی در برابر چگالش زیاد مقاوم می باشد.

با زیاد شدن فشار شکل دهی ، چگالی خسته افزایش یافته ، که طبعا بهبود ویژگیهای قطعه تف جوش را نیز به دنبال خواهد داشت . البته هر چه فشار زیادتر شود قطعه در قالب جفت تر شده و لذا نیروی بیرون اندازی نیز زیادتر خواهد شد . روانسازی دیواره قالب و یا پودر اصطکاک جداره قالب رادر خلال بیرون اندازی کاهش می دهد. دراین حال نیز در اثر بیرون اندازی خسته ، تنش آن آزاد و نتیجتا ابعادش از ابعاد محفظه قالب بزرگتر خواهد شد. این رجعت کش سان معمولا کمتر از ۰,۳ درصد ابعاد قالب بوده، ولی وجود تنش و کرنش دیفرانسیلی در درون قطعه خام ممکن است باعث شکست آن گردد.

فشردن ، پودر را به توده ای شکل گرفته و دارای استحکام کافی برای جابجایی و انجام فرایندها بعدی تبدیل می کند. متداولترین روش فشردن پودر ، شکل دهی آن در قالب سخت و در اثر اعمال فشار در یک راستا (هم محور) است . نخستین مساله مورد نظر در فرایند شکل دهی دستیابی به قطعه خام دارای چگالی و استحکام مطلوب است. نیروی فشارنده پودر بطور یکنواخت به بطن آن منتقل نشده و لذا خسته پودری چگالی همگنی نخواهد داشت . ویژگیهای پودر واکنش آن در مقابل تنش های فشردن را تحت تاثیر قرار داده و بسته به نوع پودر ، اندازه و شکل آن و همچنین شکل قطعه می توان از شقوق مختلف فشردن استفاده کرد .

فشار را می توان بطور پیوسته و ناپیوسته اعمال کرد . سرعت انتقال نیرو به پودر نیز باعث تفاوت بین روشهایی از قبیل فشردن انفجاری و فشردن متعارف شده است ، بعلاوه دما متغیر دیگری است که بسته به روش انتخابی از دمای اتاق تا ۲۰۰۰ درجه سانتی گراد تغییر می کند . در روش ایزواستاتیک ، به عکس روش متعارف ، قالب قابلیت انعطاف داشته و فشار اعمال شده نیز به عکس فشار یک امتدادی در قالب سخت ، از همه طرف وارد می شود. پس از کنترل مناسب مخلوط ریخته شده در قالب آن را می فشارند تا چگالی آن بالا رود که محصول حاصل از این فشار قطعه خام نامیده می شود.

عمل فشردن پودر در قالب توسط یکی از انواع قالب های پرس (با ساختار کلی سمبه ماتریسی به همراه یک قطعه بیرون انداز) : پرس مکانیکی و ابزار صلب فشاری (به صورت دستی و ربای تولید قطعات کوچک) صورت می گیرد اما امروزه برای تولید انبوه و قطعات بزرگتر از پرس های هیدرولیکی و یا هیدرولیک_مکانیک و حتی پنوماتیک استفاده می گردد , در دهه ی اخیر از روش های دیگری نظیر نورد آهنگری و یا حتی فشار ناشی از موج انفجار نیز در PM بهره گرفته اند.

این فرایند همانند کار ایزواستاتیک سرد است چرا که در این فرایند عمل تبلور مجدد صورت نمی گیرد بلکه تنها در اثر فشار چگالی قطعه افزایش می یابد و مواد پودر به هم فشرده شده و بین مواد پیوند های ثانویه ای ایجاد می گیرد.

جدول مربوط به میزان فشار متعارف برای کاربرد های مختلف :

کاربرد	فشار فشردن (مگا پاسکال)
--------	-------------------------

فلزات متخلخل و فیلتر ها	۴۰_۷۰
-------------------------	-------

فلزات دیر گداز و کاربید ها	۱۰_۲۰۰
----------------------------	--------

قطعات ماشین	۱۵۰_۳۵۰
-------------	---------

یاتاقان ها و قطعات آهنی	۷۰۰_۱۶۵۰
-------------------------	----------

ترتیب متعارف فشردن قطعه نیز در شکل زیر نمایش داده شده است:

➤ گاهی اوقات قالب گیری قطعات کوچک به صورت تزریقی صورت می پذیرد یعنی پودر مورد نظر به حالت خمیری در می آید(دمای مواد پایین تر از مذاب است) و با سیالیت مناسب در داخل قالب پرس قرار می گیرد در این حالت فشار مورد نیاز بسیار پایین و این عمل با پرس های ساده تری صورت می گیرد.که از مزایای دیگر تزریق می توان به یکنواختی کامل تر دانه بندی محصول اشاره کرد.

فشردن ایزو استاتیک گرم:

انجام کار مکانیکی در دمای بالا تر از دمای تبلور مجدد را کار مکانیکی گرم می گویند ،گاهی در PM دو عمل فشردن و زینتر کردن را با هم انجام می دهند (در دمای بالای تبلور مجدد) که به آن عمل فشردن گرم می گویند که این کار در اثر نیروی فشاری ایزواستاتیک (فشار پایستار و در همه جهات کاملا مساوی را ایزو استاتیک می نامند.) انجام می گیرد.

مسلمتا سرعت عمل در این روش زیاد و هزینه تمام شده کمتر است اما علاوه بر این حصول برخی خواص از قبیل کاهش پدیده نفوذ **علل الخصوص** در ساخت اینسرت های برشی

جایی که چسبنده بودن براده به ابزار مطرح می گردد بهتر از مراحل قبلی ذکر شده است و همین امر زمینه را برای گسترش کاربردهای این فرایند فراهم ساخته است .

تف جوشی (زینترینگ)

عبارتست از حرارت دادن پودر دردمای زیر دمای ذوب فلز طوریکه در این دما پودرهای

فلزی بتوانند پیوند ایجاد کنند. (۷۰ تا ۸۰٪ نقطه ذوب)

یکی از مشخصه های مهم تف جوشی حساسیت شدید پیشرفت آن نسبت به دما است .

نیروی محرکه و مکانیزم تف جوشی دو مقوله متفاوتند . عامل نخستین که معمولاً انرژی

سطحی است ، نیروی لازم برای انتقال جرم را فراهم می سازد ، انرژی سطحی در واحد حجم با

قطر دانه پودر تناسب معکوس دارد و از این رو ریز شدن دانه ها باعث افزایش نیروی محرکه

فرایند خواهد شد و البته باید توجه داشت که تمام انرژی سطحی بصورت نیروی محرکه ظهور

نکرده بلکه مقداری از آن صرف ایجاد مرزدانه ها می گردد که این مرزها نیز دارای انرژی مرزدانه

ای می باشند . بنابراین نیروی محرکه موثر ممکن است بسیار کم و نتیجتاً آهنگ تف جوشی هم

کند باشد.

در عملیات تف جوش قطعه ی خام مرحله ی قبل در یک محیط با جو کنترل شده تا

دمایی در حدود ۷۰ تا ۸۰٪ دمای ذوب ماده حرارت داده می شود و به مدت کافی در این دما باقی

می ماند و بعد به حالت کنترل شده سرد می گردد، در حالی که در مورد موادی که اختلاف نقطه

ی ذوب بالا دارند دمای زینتر کردن می تواند بالای نقطه ذوب یک یا چند ماده تشکیل دهنده باشد .

خود عمل زینتر کردن از ۳ مرحله ی زیر تشکیل می شود:

- سوزاندن و پاک کردن مواد روانساز و چسب
- افزایش و نگه داشتن دمای بالا برای جوش خوردن بافت
- سرد کردن کنترل شده محصول نهایی برای حصول خواص نهایی

مراحل تف جوشی (زینترینگ) :

۱) مرحله نخست تف جوشی : تماس نقطه ای بین دانه های پودرمنجر به رشد گلوگاههایی می شود که آهنگ گسترش آنها بستگی به مکانیزم انتقال جرم داشته ، و هر چه سرعت رسیدن ماده از مجاری و مسیرها ی مختلف به منطقه تماس تندتر باشد تف جوشی نیز آهنگ بالاتری خواهد داشت .

در مرحله اول در یک محیط احیا کننده (محیطی که تا حدودی بازی است و مانعی برای اکسیداسیون مواد قطعه ی خام) قطعه ی خام حرارت می بیند تا چسب و یا مواد روان ساز از آن تبخیر گردند، در این مرحله ماده ی حاصل متخلخل می شود که خود همین مسئله در ساخت صافی ها و فیلتر ها چاره ساز است (به دلیل خلل و فرج ناشی از تبخیر چسب).

با تغییر اندازه دانه ها می توان مکانیزم غالب فرایند را نیز تغییر داد ، معمولا تف جوشی دانه های ریز تر بامکانیزم نفوذ سطحی انجام می شود و آهنگ میانگین تف جوشی نیز تندتر می باشد

بطور کلی ، رشد گلوگاه دانه های پودر ریزتر از آهنگ تند تری برخوردار بوده و با انتخاب زمان تف جوشی کوتاهتر و یا دماهای کمتر می توان به نتایج مطلوب دست یافت . در مقابل دانه های درشت تر کند تر تف جوش شده و برای دستیابی به نتایج مشابه با مورد پیشین نیاز به زمان تف جوشی طولانی تر یا دمای بالاتری می باشد.

۲) مرحله دوم تف جوشی : این مرحله از تف جوشی از نظر شکل گیری ویژگیهای قطعه از بیشترین اهمیت برخوردار بوده و مشخصه اصلی آن چگالش همراه با رشد دانه ها است . ساختار منافذ در مرحله میانی صاف شده ولی تا مرحله نهایی بصورت بهم پیوسته باقی می ماند . تغییرات ابعادی ناشی از تف جوشی در بسیاری از موارد مطلوب نبوده ، و در اینگونه موارد بمنظور کاهش میزان چگالش شکل دهی در فشار بالا انجام شده و زمان و دمای تف جوشی کاهش داده می شود . بعکس در مورد فلزات دیرگداز تاکید بیشتر ، بر چگالش قطعه است. لذاست که مرحله دوم تف جوشی را باید از زوایای متفاوت مورد توجه قرار داد .

در مرحله ی دوم باز هم دما افزایش می یابد(گاهی تا ۹۰٪نقطه ذوب مخلوط) تا مواد به خوبی به هم جوش بخورند و بعد تا مدتی دما ثابت می ماند تا موقعیت ساختاری مجموعه ثابت گردد.

در آغاز مرحله دوم جدایش منفذها از مرزدانه ها ناچیز می باشد . ولی با پیشرفت فرایند چگالش ، کمتر بودن تحرک منافذ باضافه کاهش نیروی پیوند دهنده آنها باعث جدایششان می گردد . جدایش منافذ از مرز دانه ها عامل محدود کننده چگالی نهایی ناشی از تف جوشی می باشد .

برای دستیابی به چگالی های تف جوشی بالا ، لازم است دشد دانه در خلال تف جوشی محدود شود ، آهنگ این رشد بهتحرک مرزدانه ، نیروی وارد برآنو نیروهای بازدارنده بستگی دارد .

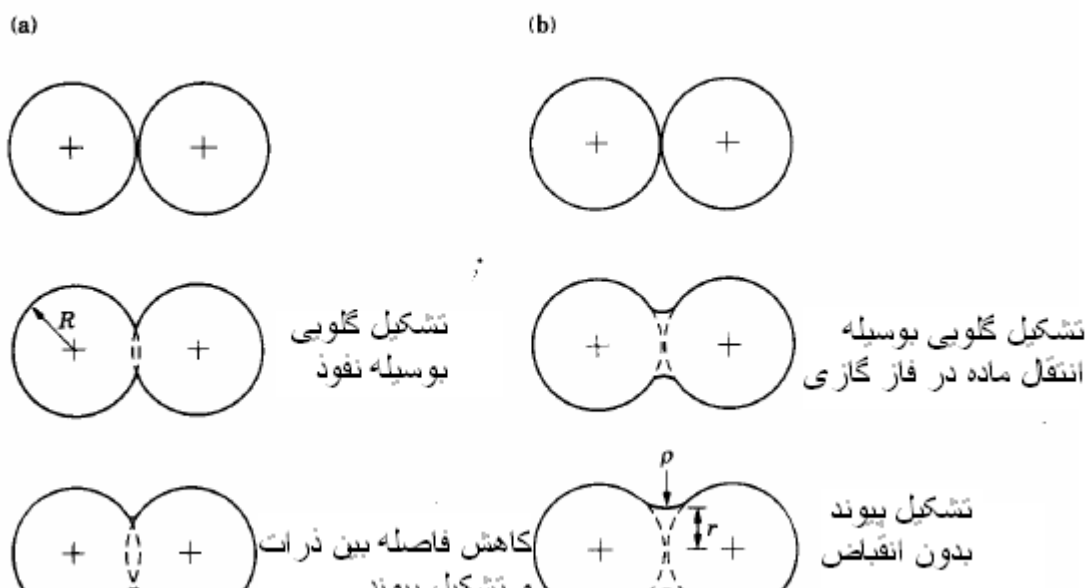
طولانی بودن زمان تف جوشی برای دستیابی به ویژگیهای مطلوب و چگالش قطعه ضروری است . از طرف دیگر دما برفرایند تف جوشی تاثیری پیچیده دارد و آهنگ نفوذ ، رشد دانه و جابجایی منافذ ، جملگی فرایندهای فعال شونده با گرما می باشند . در بسیاری از مواد این اتفاقات بستگی به مورفولوژی قطعه دارد ، بعلاوه چون ریز ساختار قطعه دائما در حال تغییر می باشد . بیشترین تاثیر دما بر آهنگ نفوذ و رشد دانه می باشد و آهنگ چگالش با افزایش ضریب نفوذ و کاهش اندازه دانه ها شدت می یابد.

۳) مرحله سوم تف جوشی : مرحله پایانی تف جوشی فرایندی کند است که در آن منافذ کروی مجزا ازهم بامکانیزم نفوذ حجمی منقبض می گردد. منفذی که بر روی مرز دانه قرار گرفته است بوسیله نیروی قابل ملاحظه ای که از زاویه دو وجهی کوچک ناشی می شود ، به مرز دانه وصل شده است. پس از گسسته شدن پیوند بین منفذ و مرز دانه ، لازمست منفذ آزاد شده

تهیجاها رابه سمت مرزدانه های اطراف هدایت نماید تا انقباض که فرایندی کند نیز هست ،
ادامه یابد .

همچنین در اثر طولانی شدن دوره گرمایش ، فرایند درشت شدن منافذ باعث خواهد شد
که اندازه میانگین آنها افزایش یافته ولی از تعداد آنها کاسته شود. تفاوت بین انحنا منافذ منجر
به رشد منافذ بزرگتر در قبال از بین رفتن کوچکترها، که ناپایدارند ، خواهد شد.

در مرحله ی آخر به منظور حصول خواص مناسب نهایی قطعه تحت کنترل حساب شده
ای سرد می گردد در این مرحله گاهی از گاز های خنثی برای افزایش سرعت سرد شدن بهره
می گیرند.



شکل ۳-۱) نمودار شماتیک برای دومکانیزم تف جوشی پودر

فشردن پودر باعث کاهش میزان تخلخل آن و در عین حال افزایش تعداد نابجایی درپودرمی شود با توجه به کاهش تخلخل انقباض حاصل از تف جوشی نیز کم شده و زیادتیر شدن نابجایی تند شدن آهنگ اولیه فرایند تف جوشی رابه دنبال خواهد داشت . بنابراین فشردن پودردر افزایش استحکام مکانیکی ، چگالی ، ثابت ماندن هندسه قطعه و کنترل ابعادی آن تاثیر مثبت بر جای می گذارد .

دلیل عمده استفاده از فرایند تف جوشی ، تاثیر آن بر ویژگیهای خسته پودر است ، و هر چه دامنه پیشروی آن بیشتر باشد ، معمولاً قطعه از کیفیت های بالاتری برخوردار می باشد. از نقطه نظر تف جوشی کوچک بودن دانه های پودر یک مزیت بحساب می آید و هر چه دانه ها ریز تر باشند آهنگ فرایند تندتر خواهد شد ، البته این ریزی پرس کردن (فشردن) دانه

ها رامشکل تر می کند. طولانی کردن زمان هر چند میزان تف جوشی قطعه را افزایش می دهد ولی هزینه رابالا برده و بعلاوه رشد دانه ها رابه همراه دارد.

دمای تف جوشی یکی از متغیرهای بسیار موثر بر تف جوشی است ، و هرچه افزایش یابد آهنگ فرایند نیز تند تر می شود ، لیکن هزینه های طراحی کوره و انرژی مصرفی در اثر بیشتر شدن دما فزونی می یابد

تف جوشی مخلوط های پودری بامشکلات زیادی مواجه است و برای همگن شدن قطعه و حذف گرادیان ترکیب شیمیایی باید دما و زمان کنترل شود. تف جوشی مخلوط پودرهای ریز دانه ، بخاطر کوتاه بودن مسیر های نفوذ با سهولت بیشتری انجام می شود واگر ضریب نفوذ دو مولفه پودر با هم اختلاف زیادی داشته باشد ممکن است . در قطعه منفذ ایجاد شود . این مساله ، بخصوص درحالیکه نقطه ذوب عنصر آلیاژی پایین تر باشد ، باعث متورم شدن قطعه می گردد. مثالی از این مورد افزایش آلومینیوم به آهن است ، که ذوب آلومینیوم درخلال تف جوشی باعث تورم قطعه می گردد. عدم کنترل چرخه تف جوشی نیز می تواند به تشکیل فازهای مخرب از قبیل ترکیبات بین فلزی شکننده بیانجامد .

تمام فلزات ، باستثناء چند مورد ، درخلال تف جوشی نیاز به نوعی حفاظت از اکسایش دارند ، زیرا اکسید سطح پودر اتصال دانه ها از طریق نفوذ راباشکال مواجه ساخته و از گسترش ویژگیهای مکانیکی جلوگیری می کند . اتمسفر تف جوشی همچنین می تواند به زدایش ماده روانساز وملات استفاده شده در فرایند فشردن پودر نیز کمک نماید.

با توجه به اینکه سطح دانه ها همیشه از قشر نازکی از اکسید پوشیده می باشد ، وجود اتمسفر احیاکننده نه تنها از اکسایش بیشتر آنها جلوگیری می کند بلکه هر گونه اکسید قبلی رانیز احیاء می نماید.

تف جوشی اغلب ویژگیهای مهندسی مواد را بهبود می بخشد حرکات اتمی باعث ایجاد پیوند بین ذرات شده و در نتیجه استحکام مکانیکی و دیگر ویژگیهای قطعه ارتقاء می یابد . به منظور تشدید فرایند تف جوشی می توان از فشار خارجی و یا افزودنیهای شیمیایی بهره گیری کرد ، اینگونه عملیات می تواند چگالی قطعه را به مقدار نظری آن برساندو از همین رو مورد توجه خاص محققین قرار گرفته است .

متالورژی پودر در انبوه سازی قطعات از کارایی چشمگیری برخوردار بوده و می توان از بهره وری ذاتی آن بنحو احسن استفاده کرد . از جمله مزایای انکار ناپذیر این تکنولوژی که تولید اقتصادی بسیاری از فراورده ها را میسر کرده است ، می توان به کنترل ابعادی وامکان ساخت قطعات دارای اشکال پیچیده اشاره کرد .

تهیه پودر آلومینیوم

مرحله پیشرفته ۱

تهیه شده به وسیله B.Verlinden از دانشگاه Levren و L.froyn از دانشگاه

Levren بلژیک

اهداف :

- درک تفاوت میان محصولات قراردادی و متالوژی پودر آلومینیوم با توجه به کاربردهای پتانسیلی .

- آگاهی یافتن از فرایندهای مختلف تولید و استحکام پودرهای الیاژ .

- شرح دادن توسعه دامنه ویژگی های مفید، فراتر از محدوده قرار دادی فراورده الیاژ های آلومینیوم .

- آگاهی یافتن از مزایا و معایب تولید آلومینیوم به وسیله متالوژی پودر

- آگاهی یافتن از پتانسیل آلومینیوم تولید شده به وسیله مسیر متالورژی پودر

گروه هدف / پیش نیاز :

دانشجویان : فوق لیسانس در علم متالوژی مواد ، مهندس مواد

مربی : تجربه پژوهش یا تدریس در متالوژی، علم مواد و مهندسی مواد .

زمان انتشار : ۱۹۹۴

EAA- انجمن آلومینیوم اروپا

۱- مقدمه

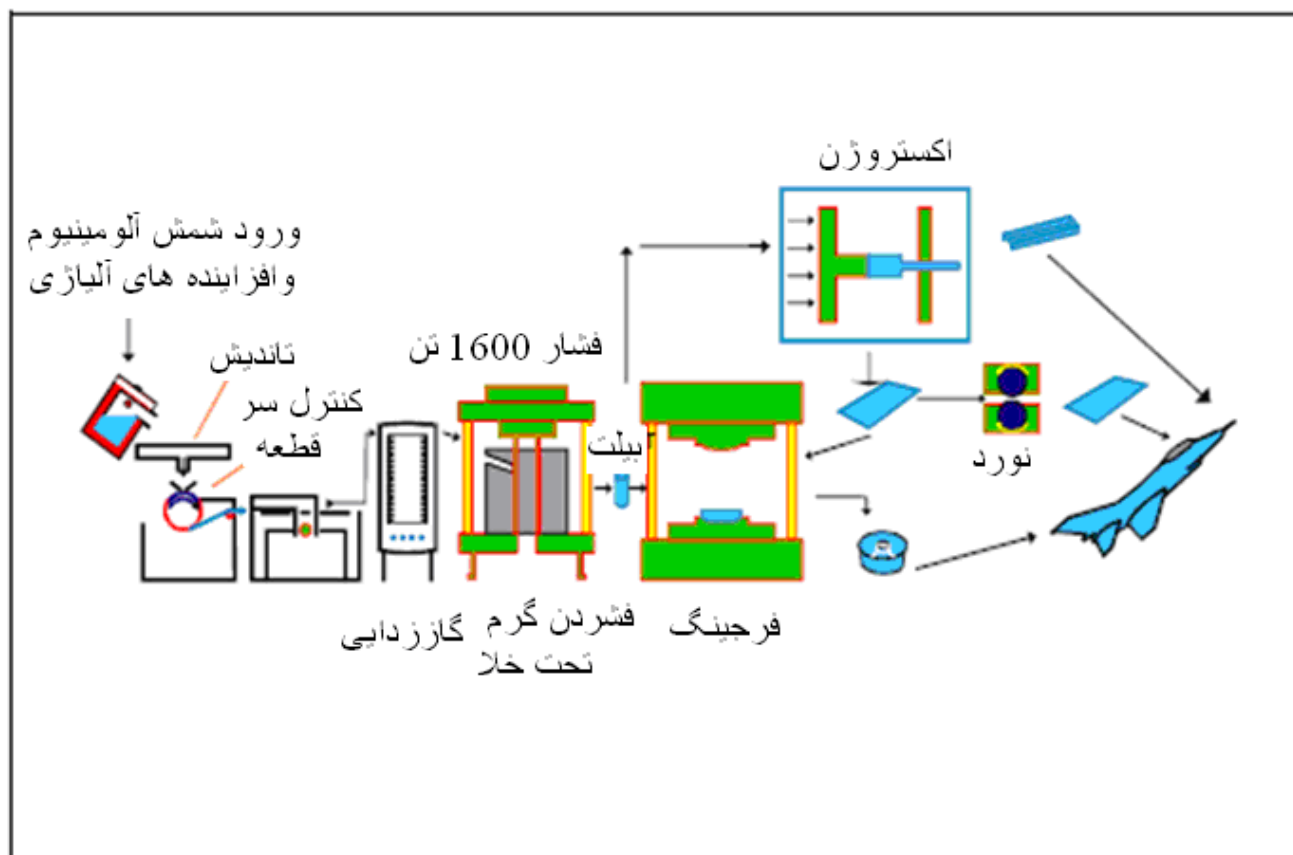
بهبود خواص آلیاژهای آلومینیوم در دسترس به صنعت آلومینیوم در کسب بازارهای جدید کمک خواهد کرد. آلیاژهای بدست آمده بوسیله روش شمش کلاسیکی بوسیله انتخاب دقیق ترکیب، عناصر آلیاژی و تکنیک ساخت و عملیات حرارتی و عملیات حرارتی مکانیکی بهبود می یابند. بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی و شیمیایی هر چند با روش شمش کلاسیکی یا روش های جدید توسعه یافته امکان پذیر است، متالورژی پودر از این لحاظ تواناییهای زیادی می آفریند استفاده از متالورژی پودر اهداف زیر را در پی دارد.

بخاطر سرعت بالای سرد کردن میکروساختار های خالص و همگن قابل دستیابی است. انتخاب وسیع ترکیبات آلیاژی این را امکان پذیر می سازد که خواص مناسب نظیر دانسیته و انبساط گرمایی و غیره بدست آید تکنیک متالورژی پودر برای محصولات مشبک و دارای پایداری گرمایی بهتر خواص خوردگی بالا مناسب است.

تولید آلیاژ های آلومینیوم متالورژی پودر اساسا به وسیله دو روش انجام می شود. برای ترکیباتی با عناصر آلیاژی با قابلیت انحلال پذیری بالا در حالت مایع، تکنیک استحکام سریع استفاده می شود. برای عناصر آلیاژی با قابلیت انحلال پذیری پایین در حالت مایع، مخلوط در حالت جامد ارجعیت دارد.

محصولات متالورژیکی پودر می توانند از طریق روش های مختلف تولید، ساخته شوند، اما در حالت کلی مراحل زیر می تواند نام برده شود: تولید پودر، اختلاط در مخلوط کردن پودرها با افزودن روان کننده ها، چسباننده ها، فشرده سازی سرد که در آخر به وسیله گاززدایی

، کلوخه سازی یا استحکام گرمایی دنبال می شود و سرانجام عملیات یک سری عملیات بعدی انجام می گیرد . مثالی از فرایند تولید خاص ساخت در شکل ۱-۲ آمده است



شکل ۱-۲) انجماد سریع (سریع سرد کردن)

اکثر آلیاژهای متالورژی پودر می توانند به سه زمینه کاربردی اصلی تقسیم شوند : کاربرد در چگالی پایین . کاربرد در استحکام بالا در دمای اتاق و دمای بالا . احیا در صنعت توسط افزودن لیتیم حاصل می شود . اگر چه برخی از آلیاژهای AL-LI تجاری (مانند

Li (AA۸۰۹۰, AA۲۰۹۰) به وسیله روش شمش کلاسیک تولید می شوند آلیاژهای حاوی Li زیاد از میان آلیاژهای فوق اشباع فراتر از حد حلالیت تعادلی به روش متالورژی پودر تولید می شوند و یک افزایش در استحکام می تواند از طریق استحکام دهی ذرات ظریف فاز دوم به دست آید.

آلیاژها برای کاربرد در دمای بالا به وسیله انجماد سریع آلیاژهای Al با خاک های کمیاب و یا فلزات انتقالی یا به وسیله آلیاژ کردن مکانیکی، تولید می شوند.

با وجود امکانات تکنیکی جالب توجه بازده اقتصادی حقیقی متالورژی پودر در صنعت آلومینیوم اغلب قابل نظر است. مانع اصلی استفاده گسترده از محصولات متالورژی پودر، قیمت بالا می باشد (تقریباً ۱,۵ تا ۲ برابر بخش های شمش) که منجر به نیاز به برخی تجهیزات ویژه و پیش بینی های ایمنی با بررسی پودر می شود

محدودیت دیگر کوچکی اندازه شمش فلزی که می تواند در ساخت محصولات و محدوده استفاده از آن ها تاثیر بگذارد. برخی مقاومت ها در استفاده از ترکیبات متالورژی پودر در کاربرد بحرانی باربر، منجر به محصور کردن استفاده از تکنیک های معتبر آزمایش غیر مخرب برای اشکار کردن خلل و فرج کوچک یا سایر نقص ها می شود. به نظر می رسد کاربرد تجاری محصولات متالورژی پودر در آینده نزدیک، محصور به آلیاژهایی با استحکام بالا برای اجزا هواپیما (نظامی) آلیاژهای مقاوم در برابر سایش برای موتورهای خودرو، آلیاژهای با ضریب بالا برای آلیاژهای محکم در دمای بالا برای موتور و کاربرد در بدنه هواپیما خواهد شد.

۲- ساخت پودر

- شیوه های اصلی تولید برای پودر Al
- استحکام سریع
- مشخصات پودر های فلز
- ملاحظات ایمنی

شیوه های اصلی تولید برای پودر AL

شیوه های اصلی تولید برای پودر Al

مواد متالوژی پودر آلومینیوم می تواند به وسیله روش های گوناگون ساخت، تولید شود. روش های اصلی تولید، یعنی آن هایی که در آن مواد به طور تجاری در دسترس باشند، عبارتند از:

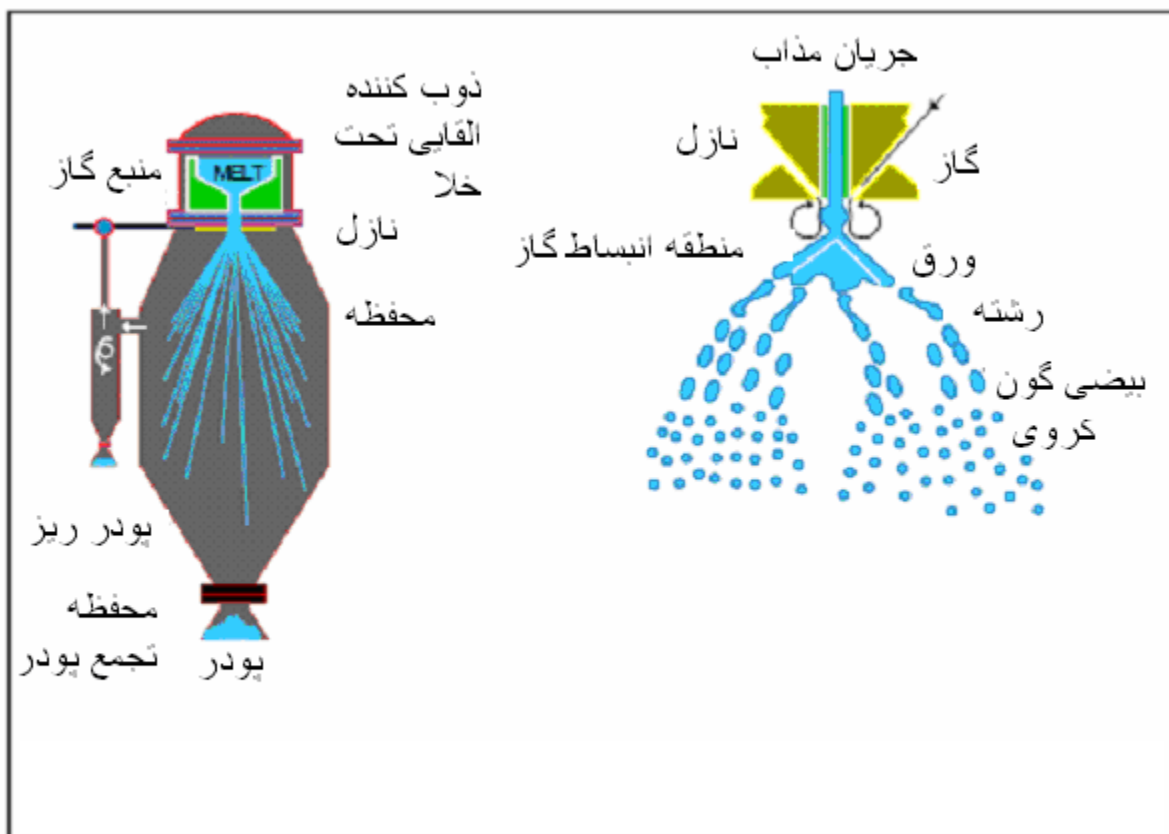
اتمیزه کردن ، ریسندگی ذوب و پودر سازی ثانویه نوارهای درون فلاکس ها و آلیاژ سازهای مکانیکی .

اتمیزاسیون شامل تشکیل پودر از جریان فلز گداخته می باشد که به ریز قطره ها خرد می شود. پودرهای عنصری و پیش آلیاژ شده می تواند تشکیل شود . در واقع، اغلب همه پودرها شامل می شود . یک جنبه مهم این تکنیک، استحکام سریع پودر از ذوب است . این تکنیک اصلی برای تولید پودرهای آلومینیوم ، اتمیزاسیون آب و گاز است . در اهمیت کمتر، اتمیزه کردن گاز و خلا و اتمیزه کردن سانتریفوژی می باشد . شیوه دیگر شامل تولید سریع نوار محکم (به عنوان مثال باریسندگی ذوب) و پودرسازی ثانویه نوار درون فلاکس ها می باشد که می تواند پودرسازی و اکستروود شود .

یک شیوه جالب برای تولید مواد مستحکم شده با پخش اکسید برای کاربرد در دمای بالا آلیاژ سازی مکانیکی در جایی که پودرها در یک ساینده مکررا به هم متصل شده، می شکنند مجددا جوش می خورند، می باشد .

ذوب فوق گرم در یک کوره القایی خلا صورت می گیرد و درون یک یا چند نازل ریخته می شود . یک انبساط سریع گازجریان مذاب را خرد می کند که ابتدا یک صفحه نازک تشکیل می شود و سپس رشته ها بیضی ها و کره ها شکل می یابند . پودر، تحت فشار جمع شده و یک چرخه اجازه می دهد که گاز خارج شده و بازیافت شود و ذرات بسیار ظریف در نهایت خارج شوند . فرایند اتمیزه کردن گاز، تعداد زیادی از عوامل متغیر را شامل می شود من جمله : ترکیب آلیاژ ، سرعت تغذیه فلز، دمای ذوب، ویسکوزیته ذوب ، فشار ، دمای گاز ، نوع گاز ،

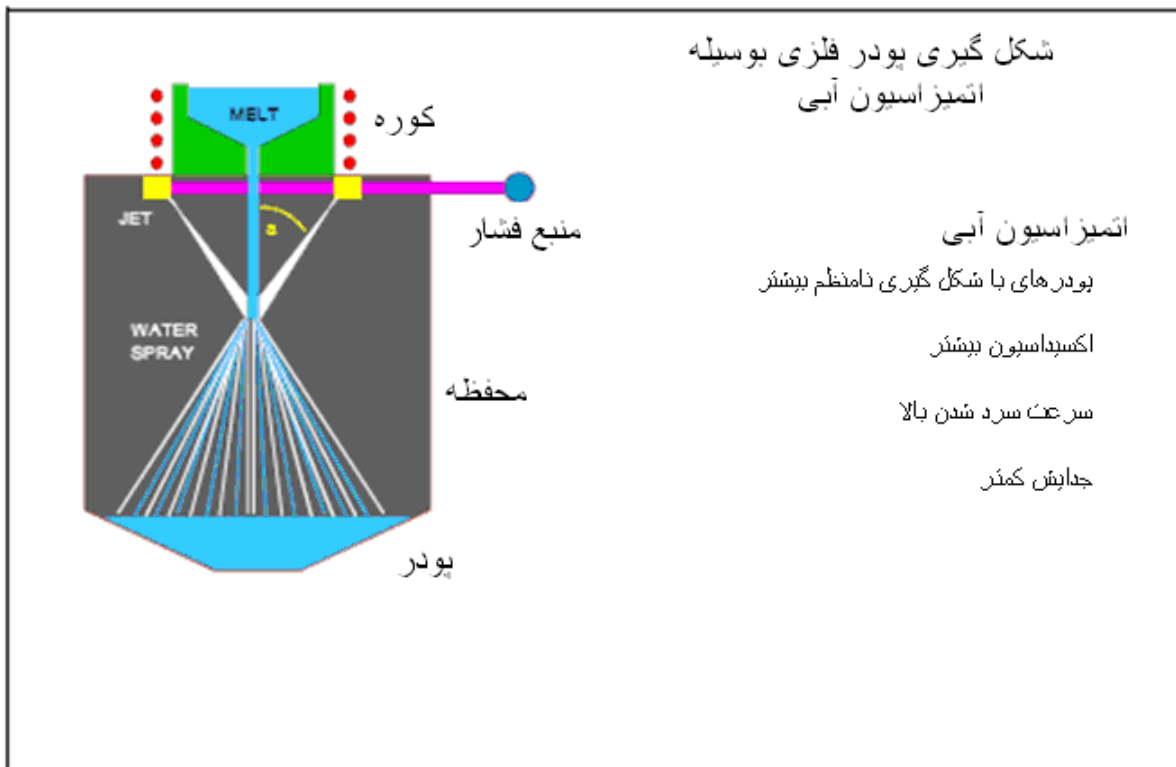
هندسه نازل ، مزیت اصلی متمیزه کردن گاز ؛ همگنی محصول ، فقدان آلودگی به علت شرایط کلی و خارجی فرایند و شکل کروی پودرهای تولیدی می باشد .



شکل ۲-۲ نمودار شماتیک یک اتمیزه کننده گاز بی اثر عمودی را نشان می

دهد

فرایند اتمیزه کردن آب شبیه به اتمیزه کردن گاز می باشد با این تفاوت که بخار فلز
گداخته توسط جت های آب متلاشی و تجزیه می شود (شکل ۲-۳ را ببینید) سرعت بالای
انجماد بیشتر از گاز است و در نتیجه جداسازی و جدایش شیمیایی پودر کمتر است. شکل
پودرها نا منظم تر بوده و سطح پودر ناهموارتر و اکسیده تر است. سرعت بالای اب باعث کاهش
اندازه متوسط ذرات می شود.



شکل ۳-۲) اتمیزاسیون آبی پودر

رابطه به شکل ساده به صورت زیر خواهد بود :

$$D=C/V \sin \alpha$$

که v سرعت آب، α زاویه میان بخار ذوب و جت مایع است و D اندازه متوسط ذرات و

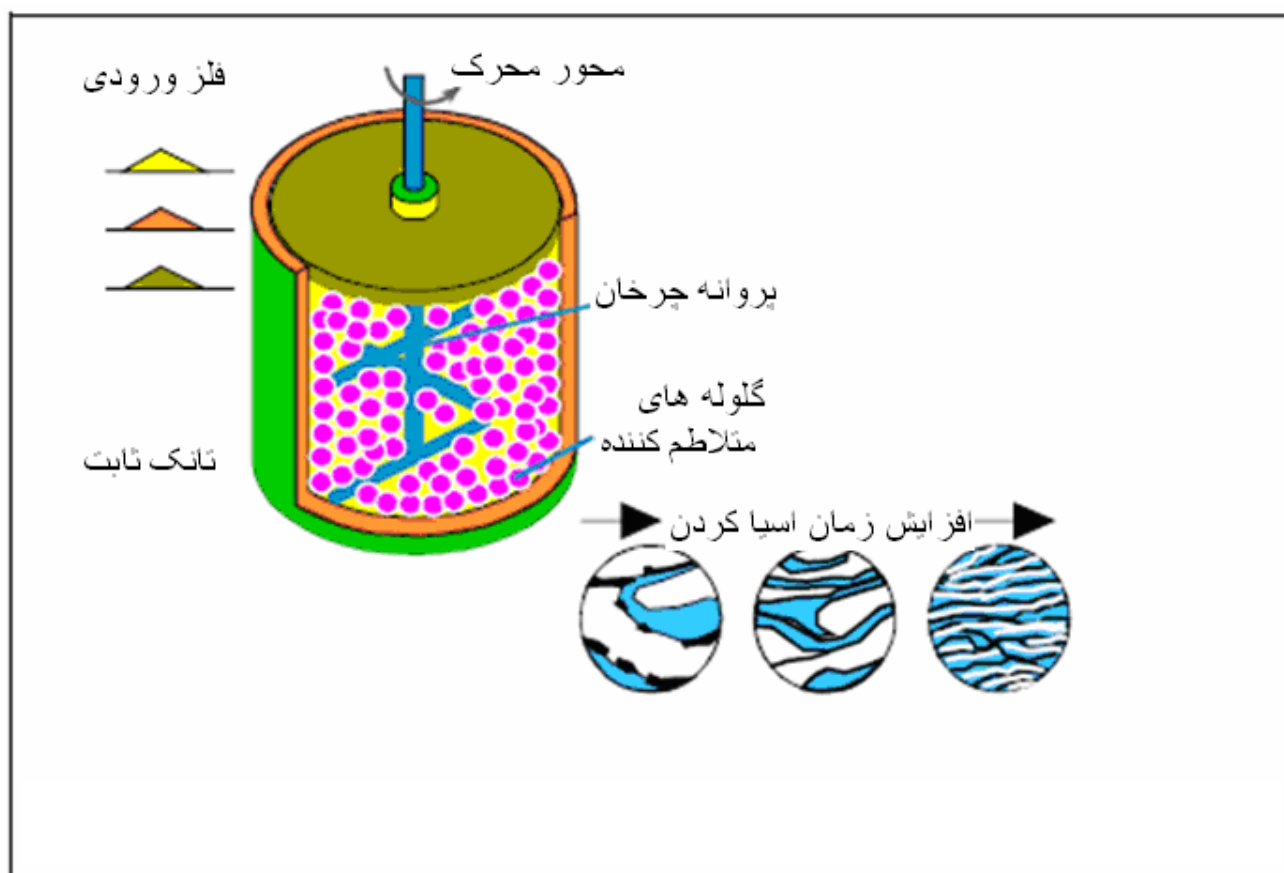
C ثابت متاثر از مواد و طراحی اتمیزه کننده می باشد .

آلیاژ سازی مکانیکی از مخلوطی از گلوله ها و پودر عنصری استفاده می کنند تا یک

پودر مرکب از میکرو آلیاژ ها در یک ساینده یا در اسباب گلوله ای پرانرژی دیگری تولید کنند

(شکل ۴-۲) آسیاب دوباره ، جوشکاری سرد ، شکستگی و دوباره جوشکاری پودر فلز منجر به تضمین تولید مواد همگن با پراکندگی یکنواخت می شود .

تعادل مناسب میان جوشکاری و آسیاب به وسیله ی انتخاب صحیح سیالات آلی (عوامل کنترل کننده فرایند) قابل دستیابی است به علت سرد کاری سنگین، استحکام پودرهای آلیاژ به طور مکانیکی آسان نیست . این تکنیک به طور منحصر به فرد، کار آمد نیست اما تا زمانی که به طور مساعد و منحصر به فردی آلیاژ ها ، اساسا برای کاربرد در دمای بالا ، تولید می شوند ، جالب و مورد توجه خواهد بود .

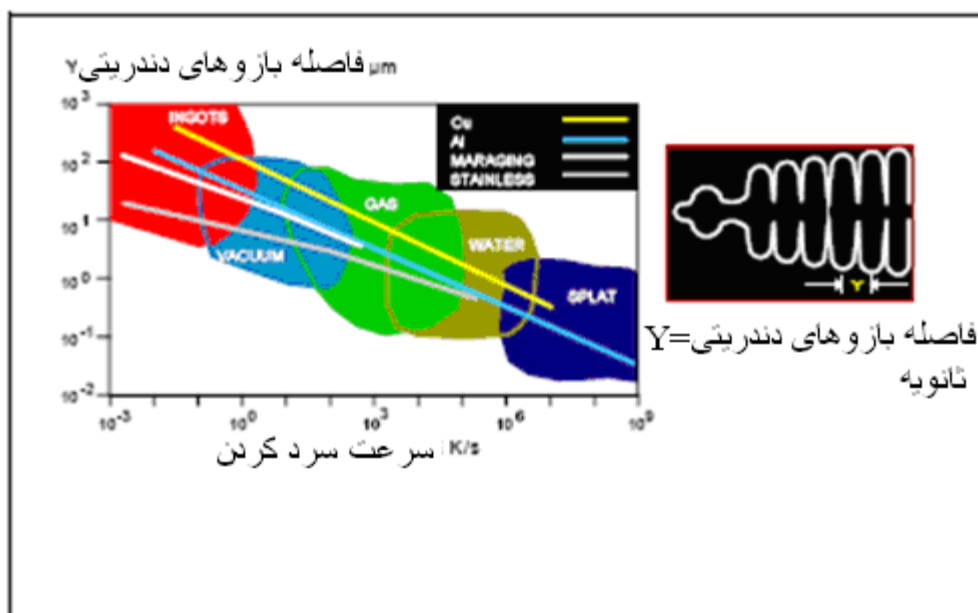


انجماد سریع

شکل ۴-۲) آلیاژ کردن مکانیکی

یک قسمت مهم اتمیزه کردن، انجماد سریع پودر از ذوب می باشد (در حدود ~
 10^2 K/S تا 10^4 برای اتمیزه کردن گازی K/S 10^4 تا 10^6 برای اتمیزه کردن آبی). تاثیر
مشهود افزایش سرعت انجماد، تصفیه ساختار میکروسکوپی ترکیب کننده ها می باشند. به نظر
می رسد که رابطه خطی میان سرعت خنک کردن و فاصله بازوهای دندریت ثانویه وجود دارد.
(شکل ۵-۲)

این تصفیه ساختار، تاثیر مهم و سودمندی بر ویژگی های محصولات متالورژی
پودر نظیر افزایش استحکام، طول عمر خستگی بهتر و بهبود مقاومت خوردگی دارد. تاثیر دیگر
افزایش سرعت خنک کردن، افزایش محدوده قابلیت انحلال مجاور برای عناصر آلیاژی در
مقادیر تعادل می باشد. این مورد، تولید آلیاژهای کم ثبات با ترکیباتی که به وسیله ی
متالورژی شمش کلاسیک قابل دست یابی نیست را امکان پذیر می سازد.



شکل ۵-۲) تصفیه فاصله بازوهای دندریتی ثانویه بوسیله انجماد سریع

ویژگیهای پودر فلزی

ویژگیهای یک پودر مهم می باشد زیرا معمولا انتخاب یک روش فرایند ویژه به وسیله این مورد انجام می شود . مشخصات پودر تقریبا یک روش پیچیده است نه فقط ویژگی های منحصر به فرد ذرات (اندازه ، شکل و غیره) بایستی تعیین شوند ؛ بلکه هم چنین مشخصات توده پودر (توزیع اندازه ذرات ، ویسکوزیته ظاهری و غیره) و خلل و فرج در توده پودر (اندازه متوسط خلل و خروج ها ، حجم خلل و خروج ها) . به طور کلی مشخصات زیر بایستی تعیین شوند :

ترکیب شیمیایی : ترکیب شیمیایی همانند حجم ناخالصی می تواند با شیوه های شیمیایی تجزیه و تحلیل معمولی تعیین شود ؛ فراتر از اطلاعات شیمیایی جرم ، اغلب نیازی برای دانستن شرایط سطح پودر وجود دارد (اکسیداسیون ، رشته های آلی قابل مشاهده ، پوشش سطح و غیره) اندازه گیری اتلاف وزن هیدروژن (ASTM E159) می تواند ایده ای در رابطه با اکسیداسیون سطح بیان کند ، هنگامی که میزان غلظت می تواند به وسیله انحلال اسید اندازه گیری شود . در برخی موارد خاص ، وسیله الکترونی طیف سنجی مورد نیاز است . ساختار درونی ذرات : جدایش ریز ، خلل و فرج داخلی و رسوب کردن می تواند به وسیله ی تکنیک های میکروسکوپی مرسوم مانند میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی مطالعه شود .

اندازه ی متوسط ذرات و توزیع اندازه ذرات : انواع رنج وسیعی از روش ها برای اندازه گیری توزیع اندازه ذرات در دسترس هستند ، یک شیوه از توانایی چشم برای دیدن ذرات با اندازه نا پیوسته در یک میکروسکوپ استفاده می کند (ASTM E20) روش مشهور دیگر الک کردن (غربال زنی) می باشد : پودر از طریق دسته ای از غربال ها با افزایش اندازه منفذ (Mesh) و مقدار پودر در هر غربال بهره برداری می شود ، وزن می شود . تکنیک های دیگر براساس اندازه گیری رسوبی، رسانایی الکتریکی ، پراکندگی نور یا حتی تکنیک های اشعه X برای بسیاری از پودرهای ظریف می باشند.

شکل ذرات : یک حالت ممکن برای شکل ذرات در شکل ۶-۲ نشان داده شده است شکل

ذرات بسیار مهم است و بایستی با توزیع اندازه در نظر گرفته شود ؛ که می تواند توسط میکروسکوپ الکترونی تعیین شود .



شکل ۶-۲) اشکال مختلف ممکن برای ذرات

مساحت رویه: مساحت سطح ویژه به صورت سطح بر واحد جرم بیان می شود (m^2/g)

و به شکل پودر ، بسیار وابسته است مساحت رویه می تواند توسط تکنیک جذب تعیین شود .

چگالی ظاهری : چگالی ظاهری پودر به معنای وزن بر واحد حجم پودر تعریف می شود

بعد از ریختن از طریق یک جریان سنجش Hall (ASTM B۲۱۲, ASTM B۲۱۳) و یا یک

حجم سنج SCOTT (ASTM B۳۲۹)

چگالی انباشتگی (لرزشی): چگالی انباشتگی، وزن تقسیم بر حجم بعد از ارتعاش پودر است

(ASTM B527)

دبی : دبی پودر فلز بر ویژگی های نهایی محصول متالورژی پودر تاثیر نمی گذارد اما برای پرکردن مناسب قالب در طول فشرده سازی ، مهم می باشد . دبی توسط جریان سنجش Hall قابل اندازه گیری است

ملاحظات ایمنی

برخی از پودرهای فلزات و ترکیبات فلزی تاثیرات مضر روی مصرف کنندگان در معرض این پودرها دارد . بررسی پودر نیازمند ملاحظات ایمنی مناسب و پاکیزگی می باشد . افرادی که در معرض غبار فلزی قرار دارند ، دچار بیماری های تنفسی یا دیگر معلولیت ها می شوند .

اندازه ی ذرات و وزن مخصوص مواد تا حد زیادی محل رسوب گذاری را برای ذرات زنده تعیین می کند . ذرات درشت کاملاً در پوسته ها به دام می افتند و به شش ها نمی رسند : ذرات ظریف ، در هر صورتی می توانند به شش برسند و ممکن است درون بدن حل شوند . در حال حاضر، نشانه های کلی برای تشخیص تاثیرات مفید تماس یا لمس معمولی انواع عمومی آلومینیوم و یا آلیاژ های آن وجود ندارد . در هر حال ، هنگام استفاده از پودرهای عنصری همانند عنصر آلیاژی ، مراقبت ویژه ای مورد نیاز است (مانند Cd,As,Ni,Cr)

عیب دیگر پودرهای آلومینیومی ، ناپایداری حرارتی آن ها در حضور اکسیژن است .

پودرهای آلومینیوم در حالتی که به طور بسیار ظریفی پودر شده باشند ، آتشگیر بوده (در هوا

می سوزد) و بالقوه قابل انفجار اند . پودرهای آلومینیوم به تماس بسیار کمی با اکسیژن در اتمسفر نیاز دارند (کمتر از ۰.۳٪) درجه حرارت احتراق پایینی داشته (کمتر از ۶۰۰°C) و محدوده قابل احتراق بسیار کمی دارند ($20-50 \text{ g/m}^3$) جلوگیری از آتش و انفجار به وسیله موارد زیر انجام می شود :

منابع آماده احتراق (مانند تخلیه الکترواستاتیک)

غبارزاینده

ترکیبات گازی اتمسفر

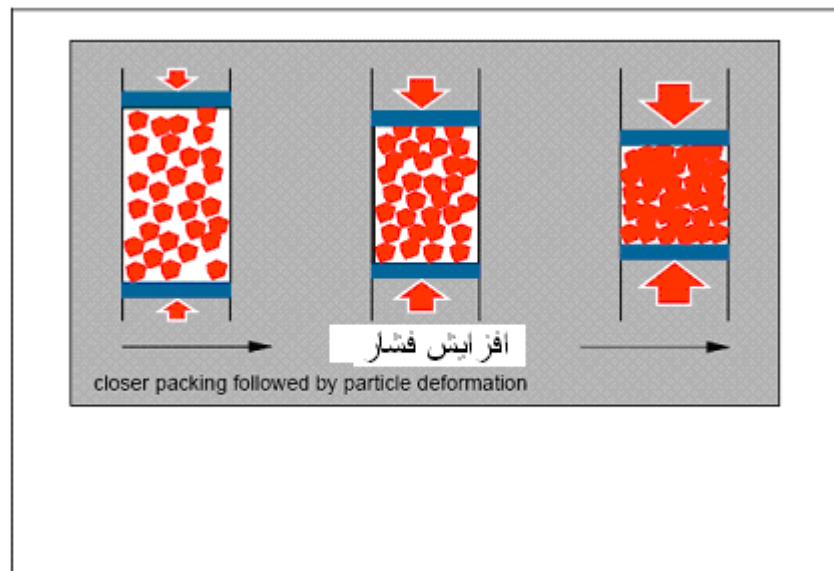
به علت این که مکانیسم آتش گیری و احتراق خود کار به طور قطعی شناخته نشده اند ، این مشخصات بایستی در رابطه با فرایند ، رفتار شیمیایی و بررسی هر نوع پودر ارزیابی شوند . اگر یک پودر آلومینیوم آتش بگیرد ، بایستی آتش با نهایت احتیاط مهار شود . بهترین راه برای پایان دادن به آتش سوزی پودر فلز استفاده، از عوامل اطفا حریق خشک میباشد . در آتش سوزی آلومینیوم به هیچ عنوان نباید از آب استفاده شود .

۳- ترکیب کردن پودر

پیش فشردگی

فشردگی سرد

کلوخه سازی
ترکیب کردن گرم
پس ترکیب کردن
شکل دادن اسپری



شکل ۷-۲) فشردن سرد برای یکی کردن پودر

در شکل ۷-۲) ذکر شده است که روش های مختلف فرایندی برای محکم کردن پودر در دسترس است . پس از تولید با افزودن روان کننده ها و چسباننده ها ، پودرها کاملاً آمیخته و مخلوط می شود . در اغلب موارد، یک فشردگی سرد انجام می شود ؛ اغلب به دنبال یک عملیات گاز زدایی صورت می گیرد . مرحله بعدی استحکام گرم است . این می تواند یک فرایند کلوخه

سازی یا یک تفسیر شکل گرم کلاسیک (ویا هر دو) باشد . سرانجام،چند عملیات پس از استحکام (براده برداری عملیات سطح فشردن ثانویه و ...) انجام می شود .

پیش فشردن

آمیختن و مخلوط کردن دو مرحله رایج پیش فشردگی در متالوژی پودر می باشند . آمیختن به معنای ترکیب پودرها با اندازه های مختلف و حالت شیمیایی یکسان می باشد . این مرحله انجام می شود تا توزیع اندازه ذرات مطلوب حاصل شود فشرده سازی پودرهای درشت آسان اما کلوخه سازی آن ها دشوار است. آن ها معمولا با پودرهای ظریف تر ترکیب می شوند تا فرایند کلوخه سازی تسهیل شود . مخلوط کردن پودر برای تهیه ترکیبات جدید آلیاژی انجام می شود . به طور تئوری ، هر ترکیب می تواند از پودرهای عنصری تولید شود. این عمل نیز رایج است که یک روان کننده با پودر مخلوط شود تا خردگی کم شده و خارج کردن از قالب بعد از فشرده سازی تسهیل شود . همراه با برخی از پودرها ، چسباننده نیز افزوده می شود تا استحکام ساده بالایی حاصل شود (محکم سازی قبل از استحکام گرم) . در طول کلوخه سازی چسباننده ها و روان کننده ها به واسطه مواد فشرده می سوزند .

فشرده سازی سرد

فشرده سازی سرد ، مرحله اول در شکل دهی پودرهای سست به شکل مطلوب محصول و استحکام کافی برای بررسی بیشتر است . این مورد اکثرا توسط فشرده سازی یک طرفه در یک قالب انجام می شود و یا در وسعت کمتر توسط فشردن ایزواستاتیک سرد (CIP) صورت می گیرد .

تکنیک های ویژه دیگر شامل قالبگیری تزریقی و فشرده سازی انفجاری می باشد. تصویر شماتیک فشرده سازی یک طرفه در شکل (۷-۲) داده شده است. در مرحله ی اول ذرات بازآرایی می شوند که موجب فشرده سازی بهتر می شود . افزایش فشار ، فشرده سازی بهتر و کاهش منافذ را به دنبال دارد . در فشار بالا ، ذرات منحصر به فرد تغییر شکل می یابند و برخی جوشکاری های سرد در بین ذرات صورت می گیرد که به مواد فشرده ساده، استحکام می بخشد . به علت اصطکاک دیواره ، متراکم کردن ذرات فشرده یکنواخت نخواهد بود . این مشکل می تواند به وسیله استفاده از روان کننده ها و به وسیله ی شارژ کردن از بالا و پایین به طور همزمان، کاهش یابد . طراحی قالب ها از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا بایستی در نظر بگیریم که محصولات ساده بعد از فشرده سازی باید بیرون رانده شوند .

این محدوده هندسه قالب می تواند به وسیله فشرده سازی یکسویه به دست آید. روش دیگری فشردن ایزواستاتیک سرد (CIP) است . قالب های محکم پودر، مملو از یک مایع در کنار یک تانک فشار بالا و یک فشار هیدرواستاتیک به وسیله ی تنظیم فشار مایع، به کار برده

می شوند . فشار خاصی بین ۳۰۰ تا ۴۰۰ مگا پاسکال اعمال می شود . این شیوه برای فشرده سازی یکنواخت و بزرگ سودمند است . در یک فشار معلوم چگالی بالاتر در فشرده سازی حاصل می شود (CIP) برای شکل های پیچیده بسیار مفید است اما دچار کنترل ابعادی کم ، می گردد .

فشرده سازی انفجاری تکنیکی است که اساسا در شرایط آزمایشگاهی استفاده می شود اما با برخی امکانات برای کاربردهای محدود در مقیاس صنعتی نیز قابل اجرا است . یک موج ضربه ای برای دستیابی به توان ترکیب کردن سریع استفاده می شود . هنگامیکه چگالی بالا به دست آید گرمای مینیمم مشاهده می شود (تا ۹۹٪ چگالی تئوری) با این تکنیک می توان از نتایج منفی کلوخه سازی یا ترکیب کردن گرم جلوگیری نمود .

قالبگیری تزریقی شیوه دیگری از ترکیب کردن پودر را فراهم می آورد . این شیوه شبیه به قالب گیری پلاستیک می باشد و تجهیزات مرسوم نیز قابل استفاده است . پودرها با چسباننده های ترموپلاستیک در اثر حرارت مخلوط شده و با قالبگیری تزریقی به شکل مورد نیاز در می آیند . قبل از کلوخه سازی چسباننده به وسیله سایش گرمایی و یا توسط استخراج حلال جا به جا می شود . این روش برای قسمت های کوچک اما پیچیده مناسب است .

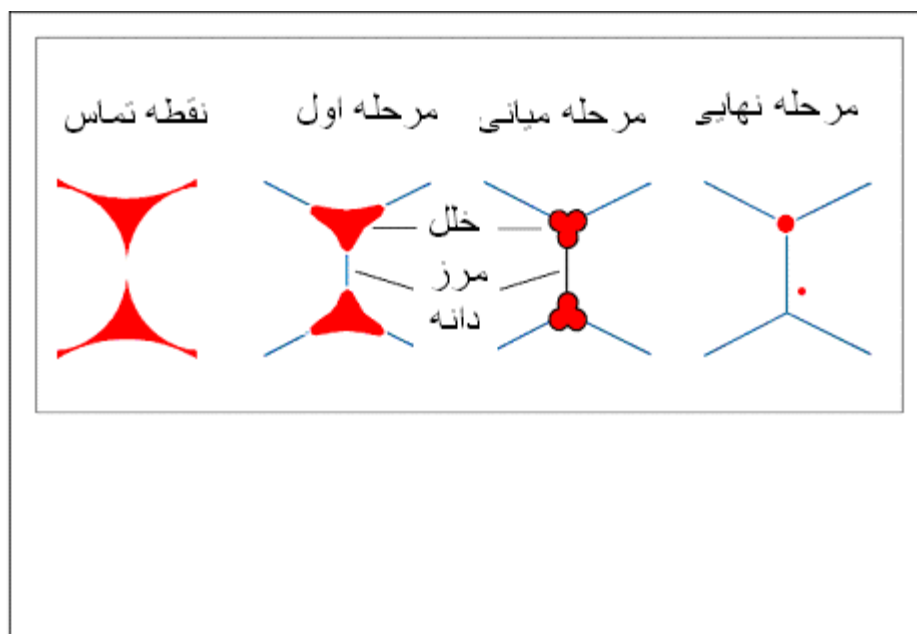
کلوخه سازی (زینترینگ)

هنگامی که یک پودر فشرده در یک اتمسفر محافظ تا دمایی پایین تر از نقطه ذوب عمده ترکیبات حرارت داده شود

متراکم کردن پودر توسط حذف کردن خلل و فرج ها رخ می دهد و محصول کلوخه سازی با استحکام مکانیکی زیاد، تشکیل می شود . در یک مقیاس میکروسکوپی چسبندگی هنگامیکه باریکه ها تشکیل می شوند و در نقطه تماس ذرات رشد می کنند، رخ می دهد . دمای کلوخه سازی نوعا در حدود 600°C است . نیروی محرک برای کلوخه سازی، کاهش در انرژی سطح پودر است و بسیار اندک می باشد . برای افزایش این نیروی محرک، کلوخه سازی با افزودن عناصر فعال و یا با ترکیبات اضافی که در دمای کلوخه سازی مایع می شوند، انجام می شود (کلوخه سازی فاز مایع).

پیشنهاد دیگر، اعمال یک فشار خارجی در طول کلوخه سازی است (کلوخه سازی فشاری) . بازده یک فرایند کلوخه سازی اساسا تحت تاثیر دما ، زمان ، ویژگی های اتمسفر محافظ ، چگالی ذرات فشرده ، اندازه ذرات و تشکیل ذرات می باشد. کلوخه سازی حالت جامد می تواند به سه مرحله (مشترک) تقسیم شود (شکل ۸-۲)

۱. پیوند ذرات پودر برای تشکیل باریکه ها .
۲. تفسیر هندسه خلل و فرج ها و انقباض ذرات فشرده .
۳. ایزوله کردن خلل و فرج ها به وسیله رشد بلورها ، حذف خلل فرج ها باقیمانده .

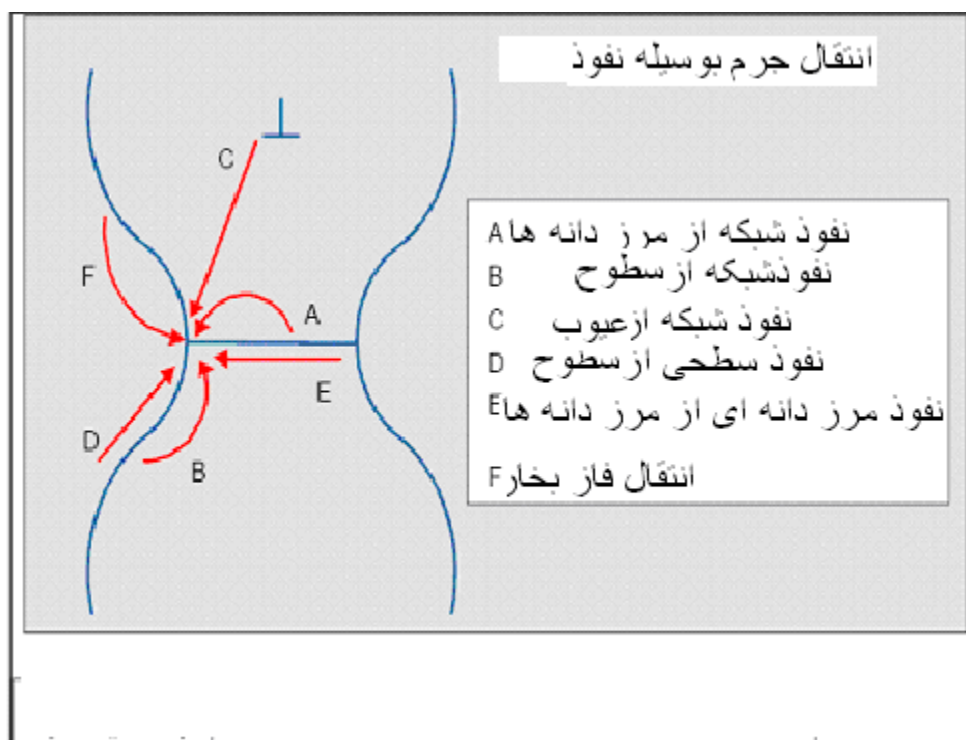


شکل ۸-۲) ترکیب کردن پودر: زینترینگ جامد مرحله (۱)

این فرایند کلوخه سازی شامل انتقال جرم بوسیله نفوذ نیز می شود . حداقل ۶ راه مختلف شناسایی شده است (شکل ۹-۲): بخش نفوذ شبکه از مرز دانه ها ، نفوذ شبکه از سطوح و صافی ها ، بخش نفوذ مرز دانه ای از مرز دانه ها ، بخش نفوذ سطحی از سطوح و انتقال فاز بخار از سطوح در حال حاضر مدل های بسیاری تشریح رشد باریکه ها و انقباض خلل و فرج هارا پیشنهاد می کنند

اما به علت پیچیدگی خلل و فرج ها در کل یک مدل کمی مورد قبول باقی می ماند تا توسعه پیدا کند . Ashby سیستمی از نمودارها را گسترش داده است (تصاویر مکانیسم کلوخه

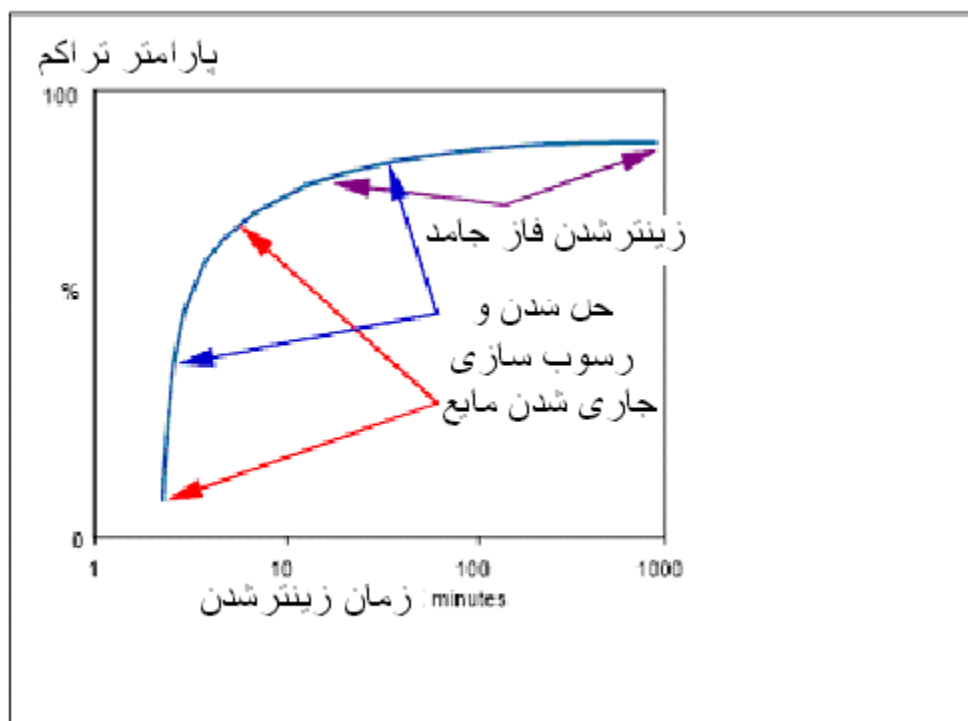
سازی) که در آن اندازه باریکه ها، انقباض باریکه ها و چگالی نسبی به عنوان تابعی از دما رسم شده اند و مکانیسم های کلوخه سازی قالب نشان داده شده است .



شکل ۹-۲) ترکیب کردن پودر: زینترینگ جامد مرحله (۲)

کلوخه سازی فعال شده اساساً به وسیله افزودن برخی فعال کننده ها به پودر حاصل می شود . حضور آنها در مرز بلورها، پخش در مرز بلورها را افزایش می دهد و انرژی فعال سازی

کمتری برای کلوخه سازی مورد نیاز است . کلوخه سازی فعال شده برای دمای پایین کلوخه سازی ، از زمان کوتاه تر کلوخه سازی و ویژگی های بهتر مناسب برخوردار است . در سیستم های چند جزئی (شامل پودرهای مخلوط) یک جزء می تواند در طول کلوخه سازی در حالت مایع باشد ، در نتیجه کلوخه سازی سریع به علت انتقال سریع جرم امکان پذیر شود .



شکل ۱۰-۲) ترکیب کردن پودر زینترینگ فاز مایع

کلوخه سازی فاز مایع در سه مرحله رخ می دهد (شکل ۱۰-۲) ابتدا فاز مایع، ذرات را مرطوب کرده و موجب بازآرایی ذرات و تراکم سریع می شود . در مرحله دوم ذرات کوچک حل

شده و مجدداً روی ذرات بزرگ رسوب می کنند . در مرحله سوم، کلوخه سازی فاز جامد کلاسیک روی می دهد .

روش سوم افزایش کلوخه سازی کلوخه سازی فشاری است . کلوخه سازی تحت یک میدان تنش خارجی انجام می شود . در مرحله اول یک استحکام سریع تا چگالی بالا به وسیله تغییر شکل (گرم) پلاستیک روی می دهد . در مرحله دوم متراکم کردن، مکانیسم خزش قابل استفاده است . در مرحله آخر، بخش کلوخه سازی نرمال، غالب می شود .

ترکیب کردن گرم (فرایند با چگالی بالا)

با عمل همزمان گرما و فشار امکان دستیابی به یک محصول متالورژی پودر بدون خلل و فرج های باقیمانده وجود دارد (ذرات متراکم بسیار چگال) . دستیابی به این مورد با یک فرایند کلوخه سازی ساده ، دشوار می باشد زیرا برخی از خلل فرج ها باقیمانده ، ثابت و پایدار می مانند و به سختی برطرف می شوند ، به خصوص زمانی که آن ها با گاز پر شوند . حذف خلل و فرج های باقیمانده موجب بهبود خواص مکانیکی محصول می شود ، اما به عبارت دیگر ، یک حرارت دهی طولانی می تواند باعث بدتر شدن برخی از خواص شود به علت درشت شدن ریز

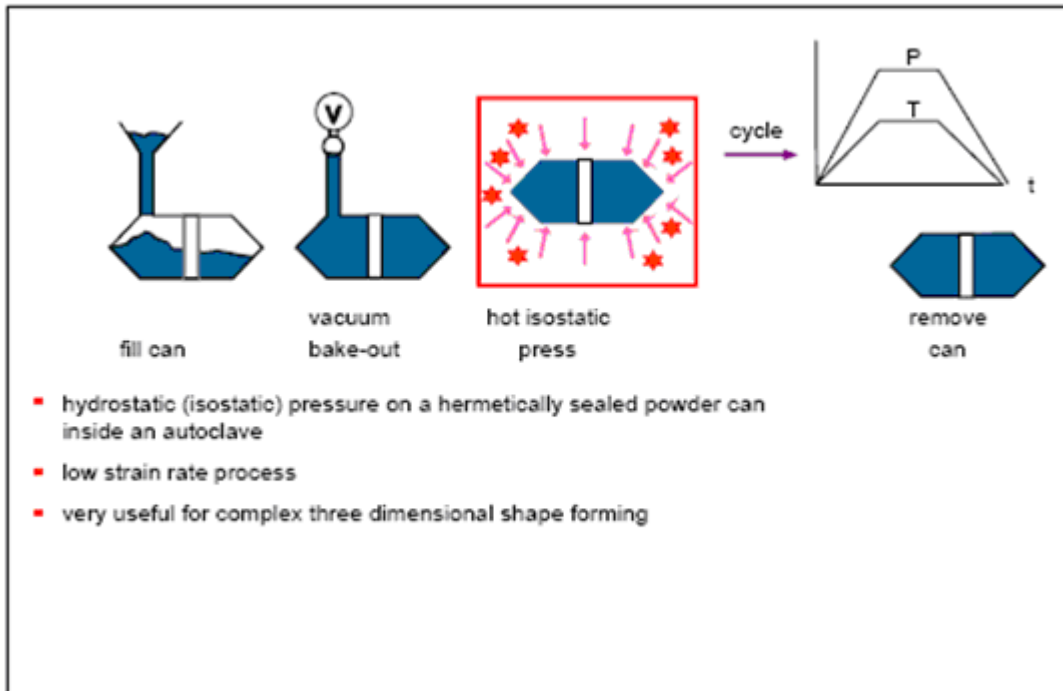
ساختار . ترکیب کردن گرم ، قیمت محصولات ظریف را افزایش می دهد ، بنابراین ارزش آن نظر به کارایی محصول مورد نیاز ضروری است .

تغییر شکل بیشتر، تحت فشار متراکم سازی گرم می تواند شکل دهی بیشتر محصول را در پی داشته باشد . ترکیب کردن حالت گرم بر روی محصولات کلوخه شده و یا به طور مستقیم بر روی محصولات پودری سرد انجام می شود . در بیشتر موارد ، ابتدا محصول قبل از ترکیب کردن گرم گاز زدایی می شود .

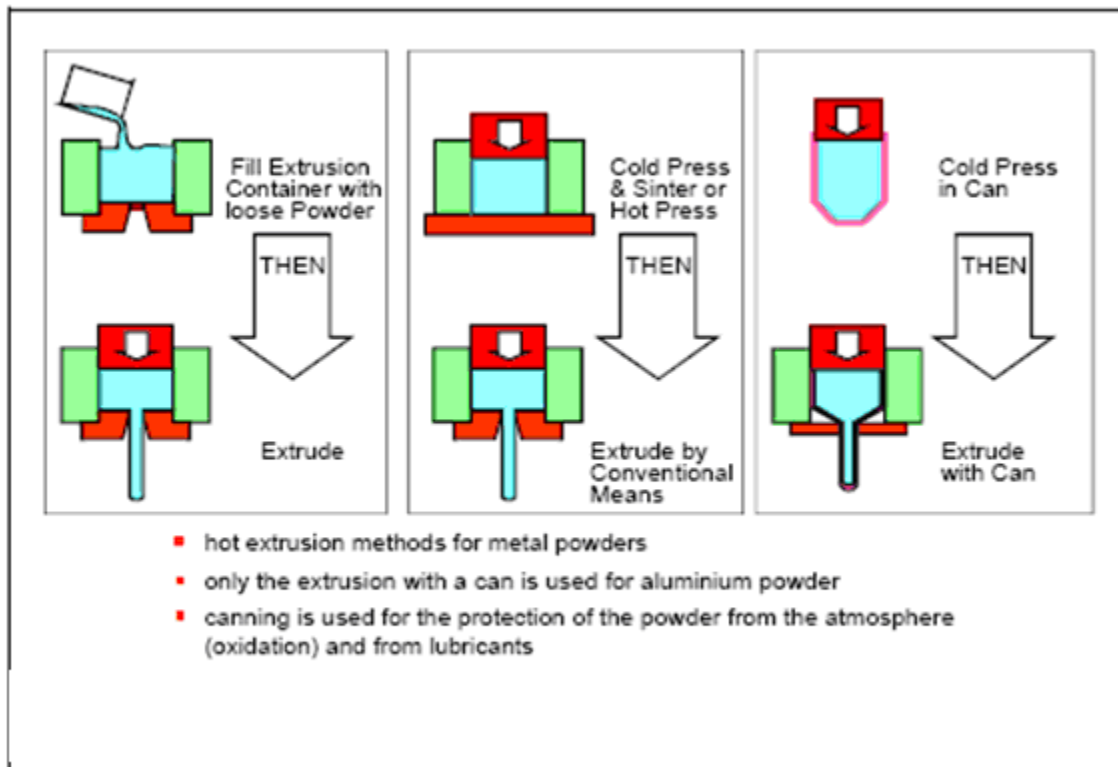
اکثر تکنیک های مهم ترکیب کردن حالت گرم عبارتند از : آهنگری ، استخراج و فشردن ایزواستاتیک گرم .

آهنگری یک حالت توام با تغییر شکل زیاد می باشد . روش تغییر شکل گرم برای شکل دهی و بیشتر برای متراکم کردن یک پودر پیش فشرده و پیش کلوخه شده استفاده می شود . روغن کاری تجهیزات برای حصول چگالی یکنواخت تری صورت می گیرد .

در یک فرایند فشردن ایزواستاتیک گرم (HIP) یک قوطی با پودر پر شده حرارت داده می شود و گاز زدایی می شود و سپس به طور سربسته، محکم می شود . این محفظه پودر، به طور هیدرواستاتیکی (اغلب حالت هم دما ارجحیت دارد) . در دماهای بالا متراکم می شود . (شکل ۱۱-۲) . سپس فشار آزاد شده و مواد قوطی این یک فرایند تغییر شکل کم است که به نهایت برای تشکیل شکل های پیچیده مفید است .



شکل ۱۱-۲) ترکیب کردن پودر فشردن ایزواستاتیک گرم (HIP)



شکل ۱۲-۲) ترکیب کردن پودر اکستروژن ۱

استخراج یک شیوه ی دیگر برای رسیدن به چگالی بالا می باشد . به طور تئوری سه روش برای استخراج پودر فلزات وجود دارد (شکل ۱۲-۲) : محفظه می تواند توسط پودرهای سبک که خارج شده اند پر شود ؛ پودر می تواند به طور سرد فشرده شود تا یک شمش فلز سرد حاصل شود که در صورت لزوم می تواند کلوخه سازی شود و یا پودر می تواند در یک قوطی متراکم شده گاززدایی و خارج شود تنها برای پودرهای آلومینیوم روش سوم اغلب استفاده می

شود . در قوطی نگه داشتن اساسا برای ایزوله کردن پودر از اتمسفر (اکسیداسیون) و از روان کننده های استخراج می باشد .

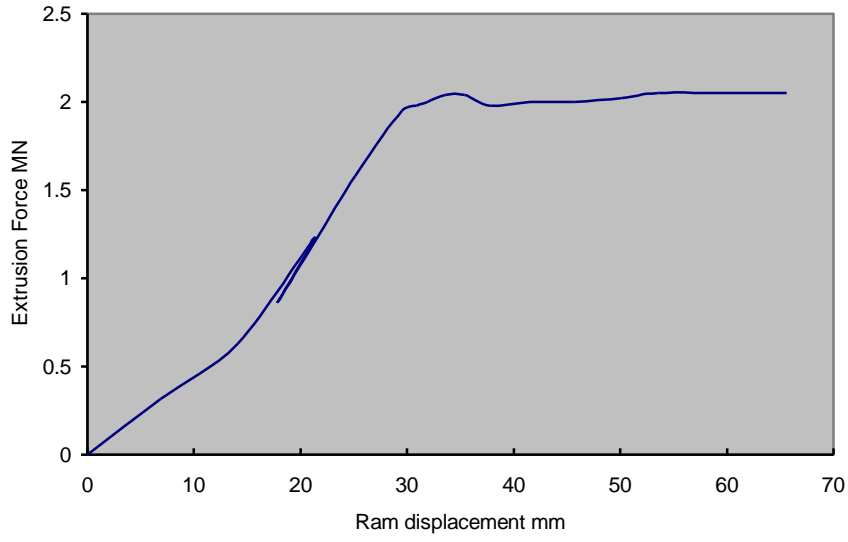
با انتخاب مناسب مواد قوطی،روغن کاری بهبود یافته و جریان بهتر فلز در سطح قالب حاصل می شود .

استخراج از یک قوطی با استخراج کلاسیک از یک شمش فلز تفاوت زیادی ندارد اما ازدیاد فشار اولیه به طور قابل توجهی متفاوت است همان گونه که در شکل ۱۳-۲ نشان داده شده است . برای یک شمش فلز جامد ، فشار به طور خطی افزایش می یابد در نتیجه برای پر کردن محفظه بر می گردد .

برای یک شمش فلز پودرافزایش فشار در طول برگشتن غیر خطی است زیرا پودر ابتدا تقریبا تا چگالی بسیار فشرده می شود.

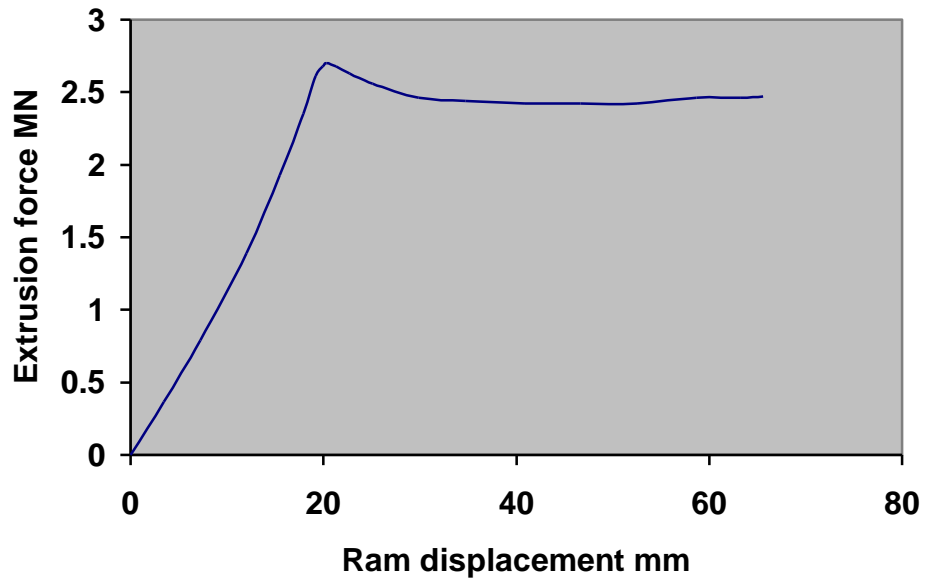
اگر چه متراکم کردن قبل از آغاز استخراج کامل می شود،ذرات پودر با اتصال بسیار ناچیز باقی می مانند،و استحکام مکانیکی کم خواهد بود . فقط پس از استخراج،مواد در معرض یک مرحله کافی تغییر شکل برشی ناشی از پیوند میان ذرات قرار می گیرند .

B(cast)ram speed 13mm



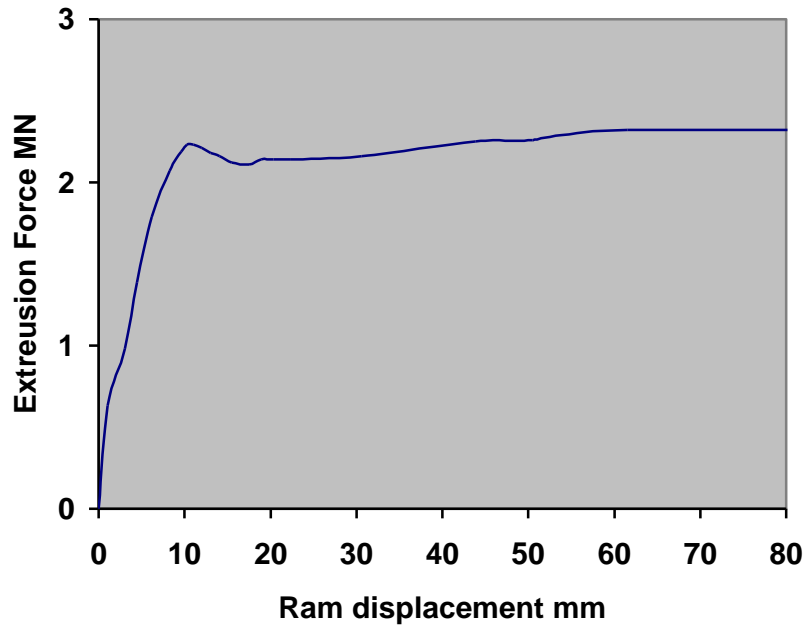
شکل ۱۳-۲)

A(powder)ram speed 13mm



شکل ۱۴-۲)

C(powder)ram speed 4mm



شکل ۱۵-۲)

فشار P مورد نیاز برای استخراج یک شمش فلز می تواند توسط عبارت زیر بیان شود

$$P = a' + b' \ln R$$

که R نسبت استخراج، a' سنجشی از مقدار کار اضافی و b' سنجشی از کار همگن می

باشد. همان گونه که در شکل ۱۶-۲) مشاهده می شود، کار اضافی در استخراج پودر بسیار

مهم تر از کار اضافی در استخراج یک شمش فلز ریخته گری می باشد این بدین علت است که واحد کار اضافی شامل فرایند تشکیل جوش های سرد، شکستن جوش و دوباره جوش خوردن می باشد .

پودر ظریف فشار استخراج بالاتری از پودرهای درشت نیاز دارد . زیرا جوش های بیشتری بعدا تشکیل شده و شکسته می شوند . یکی از رایج ترین کاربردهای استخراج گرم پودر، ترکیب کردن پودرهای آلیاژی به طور مکانیکی می باشد .

پس ترکیب کردن

پس از ترکیب پودر فلز یک عملیات فشردن سرد ثانویه انجام می شود ، به خصوص در مورد محصولات کلوخه سازی . این مورد برای بهبود صحت ابعادی (اندازه گیری) و/ یا برای افزایش چگالی (فشردن) مورد نیاز است . در برخی موارد یک فرایند سکه زنی انجام می شود تا به بالا و پایین محصول یک پیکر بندی مطلوب بدهد . هم چنین تعدادی از عملیات های تکمیل فلز استاندارد نظیر براده برداری ، عملیات حرارتی ، عملیات سطح و ... می تواند صورت پذیرد.

Powder, wt%	Extrusion Relationship	a/ b'
Al- 3.6Mn 0.95Al ₂ O ₃	P= 555 + 252.5 ln R	2.2
Al- 2.4Mn 1.09Al ₂ O ₃	P= 475.5 + 252.5 ln R	1.9
Al- 1.9Al ₂ O ₃	P= 277.5 + 252 ln R	1.1
Al- 0.26Al ₂ O ₃	P= 187.5 + 252.5 ln R	0.74
99.5 Al (cast)	P= 20 + 287.5 ln R	0.07

شکل ۱۶-۲) فشار اکستروژن و رابطه آن با R

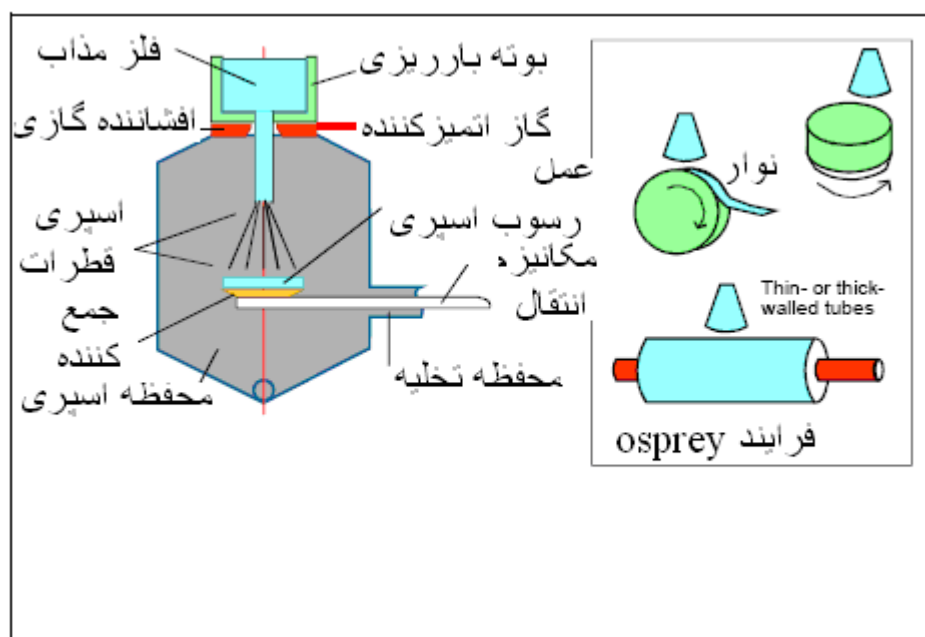
شکل دادن حالت اسپری

تشکیل اسپری یکی از مظاهر تکنولوژی متالورژی پودر است. مواد در شکل ۱ اسپری از قطرات فلزی مایع روی جزمورد عمل زده می شود تا شکل قبلی را تقویت کند. این شکل قبلی سپس به شکل های آسیاب مختلفی مستحکم می شود. دوفرایند اصلی تشکیل اسپری، OSPREY و رسوب گیری پلاسما می باشد.

در OSPREY بارآلیاژ در یک بوتله محکم واقع در بالای محفظه اسپری، ذوب القایی می شود. (شکل ۱۷-۲). در ناحیه اتمیزه کردن زیر بوتله، بخار فلز مایع به اسپری قطرات به وسیله ی گاز اتمیزه کردن تجزیه می شود.

(معمولا نیتروژن یا آرگون) بعد از اتمیزه کردن قطرات خنک شده و به سمت جز مورد

عمل شتاب می گیرند که در آن جا به شکل ۱ رسوب چگال، محکم می شوند.



شکل ۱۷-۲) تشکیل پودر با اسپری

ترکیبات می توانند توسط تزریق ذرات فاز دوم و یا توسط یک واکنش درجا با یک گاز تولید شوند. نتیجه ی ساختمان میکروسکوپی ذرات بلورهای ظریف است بدون جداسازی ماکروسکوپی عناصر آلیاژی و سرانجام با یک توزیع یکنواخت فاز دوم.

موادی که به طور موفقیت آمیزی به وسیله ی فرایند osprey تشکیل شده اند شامل چندین آلیاژ آلومینیوم (آلیاژ AlSi, ۷۰۹۰ آلیاژ ۷۰۷۵PM) و ترکیبات با شبکه آلومینیوم می باشند . آلومینیوم های جدید با ظرفیت بالای Si (بیشتر از ۲۰٪) اسپری شده اند و بیشتر ویژگی های مشابه آلیاژ تشکیل شده را نشان می دهند .

تشکیل اسپری پلاسما شبیه به فرایند osprey است اما استفاده از یک مشعل پلاسما برای تولید قطرات مایع می باشند اگر چه این فرایند برای مواد مذاب، بسیار مناسب تر است؛ ترکیبات جالبی بر مبنای AL و مقیاس آزمایشگاهی تولید شده اند .

۴- ویژگی ها و کاربردها

مثال ۱: توسعه آلیاژ های ۷XXX متالورژی پودر

مثال ۲: آلیاژ های با استحکام بالا برای دماهای زیاد

مثال ۳: یک آلیاژ آزمایشی با دمای بالا و ضریب زیاد : AL-Ti به وسیله آلیاژ

سازهای مکانیکی .

نتیجه گیری

بخش های متالورژی پودر آلومینیوم برای بهبود مشخصات مواد و یا در برخی موارد به علت قیمت پایین تولید (مانند شکل های پیچیده) استفاده می شود . در بیشتر کاربردها بخش های ، متالورژی پودر استفاده می شود به علت یکی (یابیشتر) از ویژگی های زیر : مدول یانگ

بالا تر، چگالی پایین تر، استحکام بیشتر در دمای اتاق: استحکام بهتر در دمای اتاق، مقاومت سایشی بهتر. تنوع زیاد قسمت های متالورژی پودر معمولا توسط سازندگان ماشین های بخاری استفاده می شود: ترکیبات سبک تر، لختی در شروع و پایان را کاهش می دهند.

قسمت های متالورژی پودر آلومینیوم برای نوار تسمه های متحرک، توپی و کلاهدک بست های اتصال استفاده می شود.

کاربردهای دیگر در ترکیبات اتومبیل دیده می شود. نیاز به مواد سبک و مقاوم در برابر خوردگی و هم چنین مواد محکم با دمای بالاتر، فواید قسمت های متالورژی پودر آلومینیوم را افزایش می دهد.

نکته مهم بخشهای متالورژی پودر آلومینیوم احتمالا تنوع گسترده ترکیبات آلیاژی می باشد که می تواند قاعده امکان دسترسی به ویژگی های ترکیب مطلوب را فراهم کند تعداد زیادی از این آلیاژ ها معمولا بررسی بررسی نشده اند. در پاراگراف بعدی تعداد مشخصی از این آلیاژ ها را بررسی می کنیم تا ایده ای در رابطه با کاربرد (پتانسیلی) آن ها بیان کنیم.

مثال ۱: توسعه آلیاژ های متالورژی پودر XXXV

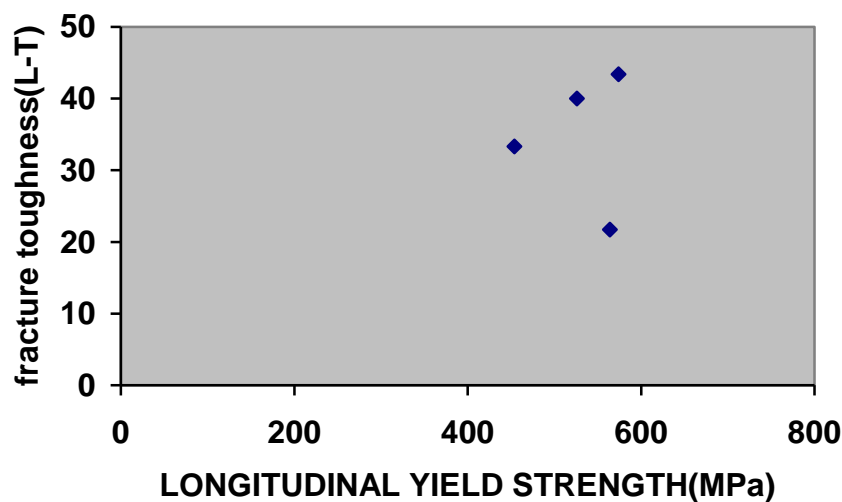
سری ۷۰۰۰ از آلیاژ های متالورژیکی پودر که از پودرهای متمیزه شده تولید شده اند از S ۱۹۵۰ بررسی شده است استحکام بالا رادارند اما قابلیت مفتول شدن میله های استخراجی بسیار پایین است (تقریبا کمتر از ۰.۱٪ طولی) از این لحاظ به نظر می رسد که این آلیاژ های

متالورژی پودرمقاومت خوردگی بهتر و محدوده خستگی بهتری از آلیاژهای شمش کلاسیک دارد. در هفتاد مورد اول ثابت شده است که استحکام (۶۵۴ Mpa) امتداد (۰.۸) مقاومت در برابر پوسته پوسته شدن محدوده خستگی (۲۰۷Mpa) دوام شکستگی ($۲۱\text{Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$) ترکیبات مناسب قابل دسترسی است. بهبود سفتی و استحکام به وسیله گاززدایی کشف شده است و تلاش هایی برای افزایش مقیاس اندازه شمش فلز پودر شده است تا برای ساخت صفحه ها و ورقه ها مناسب باشد. در ۱۹۸۰S چندین آلیاژ تجاری با استحکام بالا تهیه و ثبت شد. (شکل ۱۸-۲) ترکیبات شیمیایی ۷۰۰۰ سری کلاسیک، به وسیله افزودن عناصر واسطه نظیر Co, Zr یا Ni اصلاح شد.

ALLOY	Zn	Mg	Cu	Co	Cr	Zr	Ni	O	COMPANY
7064	7.1	2.3	2.0	0.2	0.1	0.2	-	0.2	KAISER ALUMINIUM
PM 61	8.5	2.5	1.5	0.6	-	0.2	-	0.2	KAISER ALUMINIUM
7090	8.0	2.5	1.0	1.5	-	-	-	0.35	ALCOA
7091	6.5	2.5	1.5	0.4	-	-	-	0.35	ALCOA
CW 67	9.0	2.5	1.5	-	-	0.14	0.1	0.35	ALCOA

شکل ۱۸-۲) ترکیب آلیاژهای استحکام بالای P/M

ترکیبات آلیاژهای متالورژی پودرتجاری با استحکام بالا برای فازهای رقیق بین فلزی رسوب می کند . انجماد سریع آلیاژ های متالورژی پودر ۷۰۰۰، مقاومت در برابر خوردگی بهتری را نسبت به آلیاژ های شمش ارائه می دهد . خوردگی در اثر تنش در آلیاژ های کلاسیک با تماس آهن افزایش می یابد . اما در آلیاژ های به سرعت مستحکم شده، آهن درمقادیر کم رسوب گیر افتاده و شروع شکاف با تاخیر رخ می دهد . برای آلیاژ های رسمی ، شکاف در طول مرزهای ممتد و صاف بلور رشد می کند هنگامیکه برای آلیاژ های متالورژی پودر، اندازه کوچک بلورها مسیر پرچین و شکنی را برای انتشار شکاف اعمال می کند و بنابراین افزایش در انرژی انکسار اعمال می شود . شکل ۱۹-۲ نشان می دهد که برای آلیاژ های متالورژی پودرتجاری، یک ترکیب عالی از استحکام و سفتی در قالب آهنگری حاصل می شود .



Strength and Fracture Toughness

شکل ۱۹-۲)

مثال ۲: آلیاژ های با استحکام بالا برای دماهای زیاد .

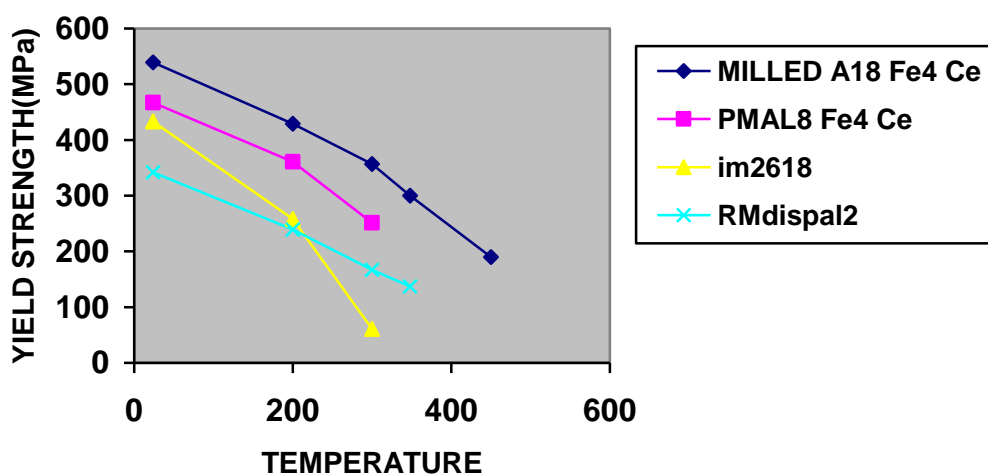
آلیاژ های آلومینیوم قرار دادی با استحکام بالا مانند AA۲۶۱۸, AA۲۲۱۴ یا AA۲۰۲۴ در دماهای بالای 200°C ، استحکام خود را از دست می دهند که اساسا به علت درشت شدن رسوبات آنهاست . برای برخی از کاربردهای مانند کمپرسورها، موتور جت، توربین های گاز اتوموبیل و اجزای موتور احتراق آلیاژ های آلومینیوم که استحکام خود را در حدود 300°C تا 400°C از دست نداده اند می توانند جایگزین آلیاژ های تیتانیوم یا فولاد شوند . برای حفظ استحکام بالا در دماهای زیاد داشتن یک توزیع یکنواخت از پخش کامل ذرات ظریف الزامی است که مرزهای بلور را محکم کرده و شبکه را سخت می کند .

پخش کامل Al_2O_3 , Al_4C_3 می تواند در یک شبکه آلومینیوم توسط آلیاژ سازی مکانیکی (MA) مطرح شود . مثالی از چنین آلیاژی "۲ dispal" نامیده می شود با ۱٪ وزنی O و ۲٪ وزنی منجر به ۱۰ تا ۲۰ درصد حجمی پخش ذرات می شود . این آلیاژ ثبات گرمایی بسیار مناسبی دارد اما در 300°C استحکام کششی آن نصف استحکام کششی اندازه گیری شده در دمای اتاق است (شکل ۲۰-۲) با این وجود استحکام آن در دمای بالا 250°C برای آلیاژ های I/M ۲۶۱۸ قرار دادی، بهتر است .

راه دیگر معرفی یک جز حجمی بالا از پخش کامل ذرات ظریف در یک شبکه آلومینیوم، استفاده از یک تکنیک انجماد سریع و فرایند متالورژی پودرمی باشد . تنوع سیستم های آلیاژی بررسی شده و هنوز در حال کشف است .

به طور کلی آلیاژ های آلومینیوم با فلزات واسطه (Cr,Ni,Fe,Co,Mn) و فلزات نادر زمین (Ce,La) امکانات جالبی را ارائه می دهد؛ سیستم های آلیاژی مانند Al-Fe-Ce, Al-Fe-V-Si, Al-Zr-Cr, Al-Cr-Zr-Mn مطالعه شده اند.

آلیاژ متالورژی پودر Al_8Fe_4Ce به مقدار کمی استحکام بالاتری در دمای اتاق نسبت به آلیاژ I/M۲۶۱۸ دارد و این استحکام در دماهای بالاتر بهتر حفظ می شود.

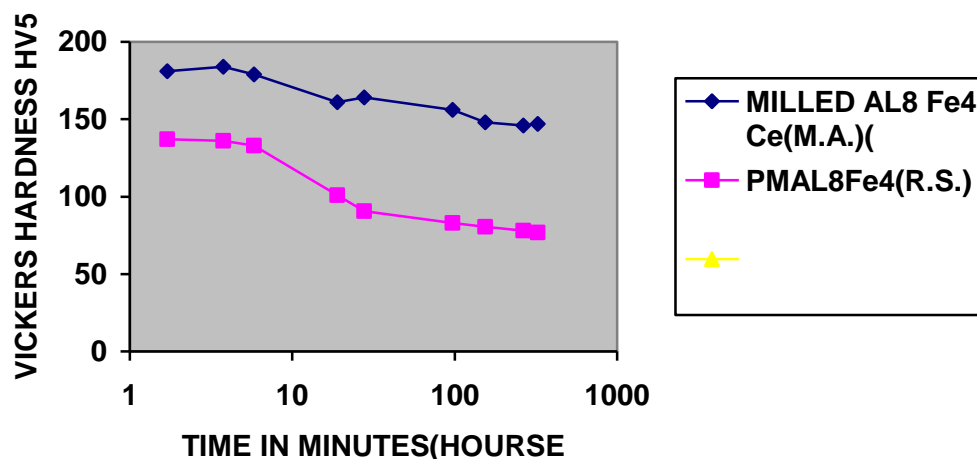


High Temperature Yield Strength of ۴ Alloys

(شکل ۲۰-۲)

ویژگی های مکانیکی آلیاژ های Al-Fe-Ce می تواند توسط توزیع کامل ذرات ظریف Al_2O_3, Al_4C_3 بهبود یابد. این پخش کامل ذرات به وسیله آلیاژ سازی مکانیکی سریع پودرهای جامد اضافه می شود (شکل ۲۱-۲). همان گونه که در شکل ۲۱-۲ دیده می شود ثبات

گرمایی پس از آلیاژ سازی مکانیکی (اندازه گیری شده به وسیله آزمایش سخت ویکرز) بهتر از ثبات گرمایی پس از استحکام ساده و سریع می باشد .



Thermal Stability of M,A.vsR.S.Powder Hardness after Exposure to ۴۵۰ °c Extrusions:

(شکل ۲۱-۲)

مثال ۳ : آلیاژ تجربی با دمای بالا و مدول زیاد AL-Ti به

وسیله آلیاژ کردن مکانیکی

آلیاژ های آلومینیوم که با یک ترکیب خاص ناشی از افزایش استحکام دمایی، سختی و

ثبات دمایی با آلیاژ های شمش قرار دادی مقایسه می شود ، می تواند عامل با ارزشی برای

جایگزینی آلیاژ های تیتانیوم برای پوسته و کاربردهای ساختاری در هواپیماها باشد .

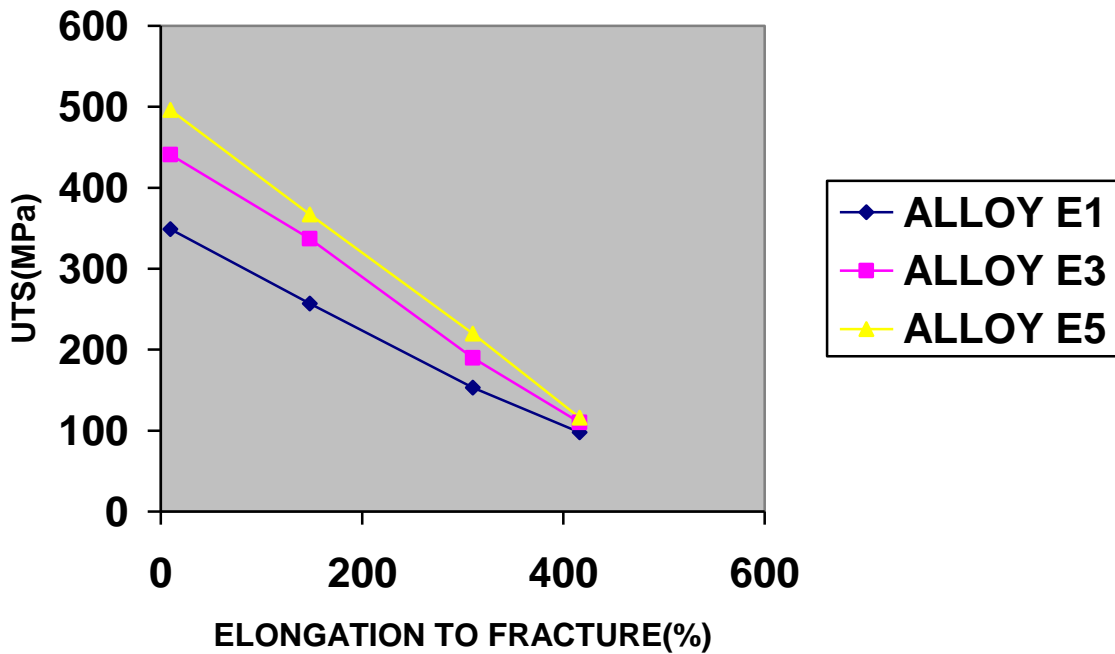
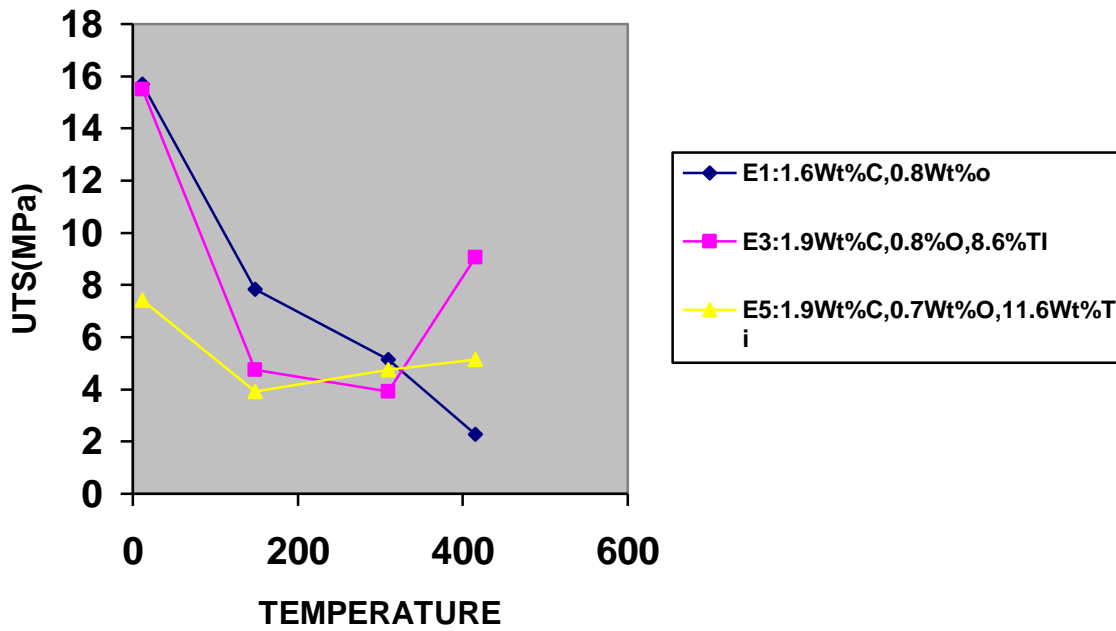
ترکیبات مبتنی بر آلیاژ های آلومینیوم قراردادی و معمول، حصول ضریب مطلوب بالایی

دارند اما استحکام بالایی را در دماهای زیاد از خود نشان نمی دهند و قابلیت مفتول شدن زیادی

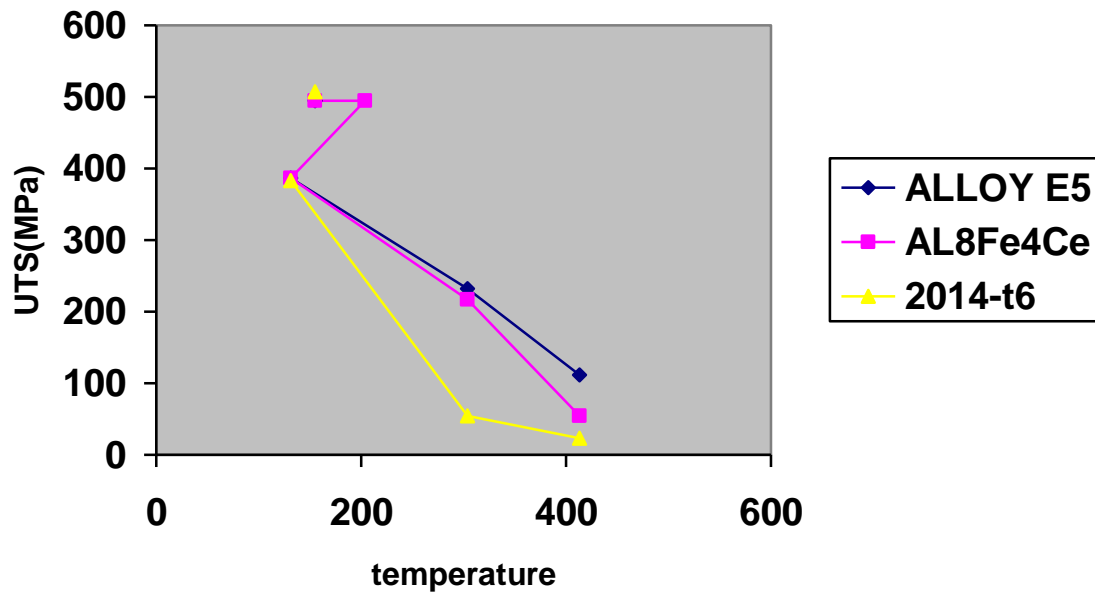
ندارند. به عبارت دیگر، اکثر آلیاژهای آلومینیوم به سرعت جامد شدن موجود برای کاربرد در دماهای زیاد ضریب کشسانی بالایی ندارند (۹۵ تا ۱۱۰ GPa مورد نیاز است). از هنگامی که به طور کلی تشخیص داده شد که حضور فاز با نقطه ذوب بالا و سخت می تواند در استحکام دمایی بالا و ضریب آلیاژهای آلومینیوم موثر باشد؛ آلیاژهای AL-Ti شامل بالای ۳۵٪ حجمی از پخش کامل ذرات Al_3Ti با اندازه ی بسیار کوچک فراهم شد. همان گونه که از شکل های زیر مشهود است، آلیاژهای AL-Ti ترکیبات بسیار جالبی از استحکام دمایی بالا، ضریب کشسانی بالا و قابلیت مفتول شدن بالا را ارائه می دهند. علاوه بر این آلیاژها برای افزایش مناسب ثبات ساختار میکروسکوپی پس از ۵۰۰ hrs قرار داشتن در دمای $510^{\circ}C$ کشف شده اند.

نتایج

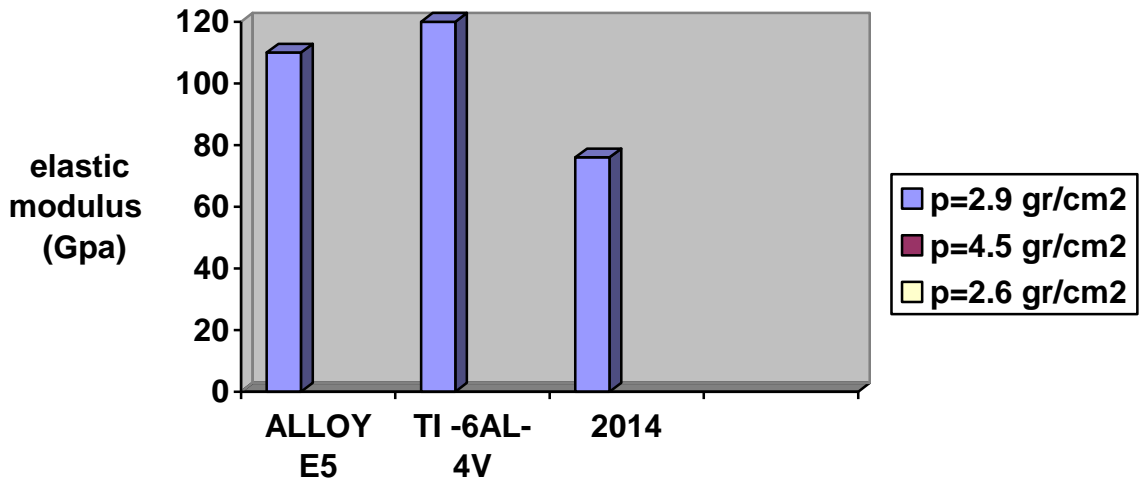
با توجه به بخش های قبل واضح است که فرایند متالورژی پودر آلیاژهای آلومینیومی امکان دست یابی به آلیاژهایی با ویژگی های بهتری از متالورژی شمش کلاسیکی را پیشنهاد می کند. آلیاژهای زیادی هنوز تحت بررسی هستند و به طور منظم ترکیبات جدید آلیاژ پیشنهاد می شود به علت مقایسه با آلیاژهای کلاسیک تنها تعداد کمی از این آلیاژهای جدید برای کاربردهای صنعتی استفاده می شود که شاید به علت موانع قیمت و این حقیقت که تعداد زیادی از خریداران مایل به استفاده از موارد جدید نیستند، باشد.



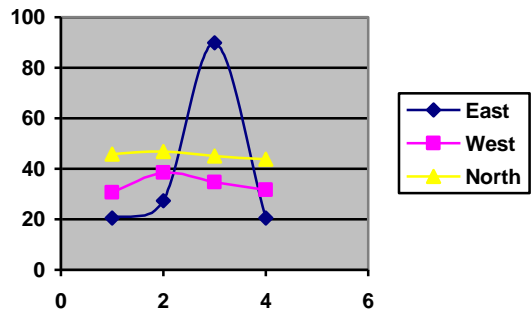
High Temperature PROPERTIES OF SOME Experimental ALTi Alloys prepared by Mechanical Alloying



Alloys E5 and AL8Fe4Ce High Temperature Strength of i/m 2014-t6 and Experimental
 and AL8Fe4Ce



ALLOY E5 in پودر متالورژی Room temperature Elastic Modulus and density of Comparison with Conventional TI and AL Alloys



منابع و مراجع

۱- متالورژی پودر نوشته لاندراال ژرمن ترجمه مجتبی ناصریان

۲- سایت www.sciencedirect.com

R.M. German: Powder Metallurgy Science

Princeton, New Jersey: American Powder Industries Federation, 1984.

F.V. Lenel: Powder Metallurgy Principles and Applications

Princeton, New Jersey: American Powder Industries Federation, 1980.

ASM Metals Handbook: Powder Metallurgy, Vol. 7, 9th ed.

American Society for Metals, Metals Park Ohio 44073, 1984.

V.S. Arunachalam, R. Sundaresan: Powder Metallurgy

in: Materials Science and Technology (ad. R.W. Cahn, P. Haasen, E.J. Kramer),

vol. 15 chap. 4, VCH, Weinheim, 1991.

J. Kumpfert, G. Staniek, W. Kleinekathöfer, M. Thumann: Mechanical Alloying of Elevated Temperature Al-Alloys

Proc. ASM International Conference "Structural Applications of Mechanical Alloying", ed. by F. M. Froes, J. J. de Barbadello, ASM Int., Metals Park, Ohio 44037, 1990

P. K. Mirchandani, R. C. Benn: Experimental High Modulus Elevated Temperature Al-Ti Base Alloys by Mechanical Alloying. 2nd International SAMPE Metals and Metals Processing Conference, Dayton, Ohio, 1988

G. J. Hildenman, M. J. Koczek: AGARD Lecture Series No. 174, New Light Alloys, September 1990

