

پروژه درس انجماد پیشرفته

انمایزینگ



منظور از انجماد سریع ، سرد کردن مذاب با سرعت بالا می باشد به گونه ای که تا حد ممکن از انجام استحاله‌ها به صورت تعادلی جلوگیری شود. جلوگیری از بلوری شدن آلیاژ مذاب یکی از اهداف انجماد سریع می باشد. به علت نیاز به سرعت سرد شدن زیاد ، از تکنیک های متداول کوئنچ نمی توان استفاده کرد. بخوبی نشان داده شده است که انجماد سریع آلیاژها، باعث گسترش محدوده قابلیت انحلال و میزان خلوص ریز ساختار و اغلب منجر به ظهور فازهای نیمه پایدار و بی نظم میشود. این اثرات کاربرد های مفیدی در بهبود بخشیدن به خواص مکانیکی و مغناطیسی مواد دارند. سرعت انجماد یک پارامتر قاطع است که شکل میکرو ساختار را در فرآیند انجماد سریع تماسی تحت تاثیر قرار می دهد.

تاریخچه

انگیزه اولیه از تولید جامد سریع سرد شده جلوگیری از جدایش دو فاز در سیستم های آلیاژی دوفازی بود.

اولین محلول جامد سریع سرد شده در سال ۱۹۵۹ از سیستم مس - نقره بدست آمد. انجماد سریع در ابتدا تنها در مقیاس آزمایشگاهی جهت تولید نمونه های ریز یا صفحات بسیار نازک استفاده می شد. امروزه از این تکنولوژی برای ریخته گری مداوم نوار آلیاژهای آمورف و تولید پودر آلیاژها و سوپر آلیاژها استفاده می شود.

عوامل مؤثر بر ریز ساختار حاصل از انجماد

- ترکیب آلیاژ
- گرادیان دمایی در مقابل جبهه انجماد پیش رونده
- سرعت فصل مشترک (سرعت انجماد)
- انرژی سطحی فصل مشترک جامد - مذاب
- نوع و میزان ناخالصی و اثرات آن بر جوانه زنی غیر همگن

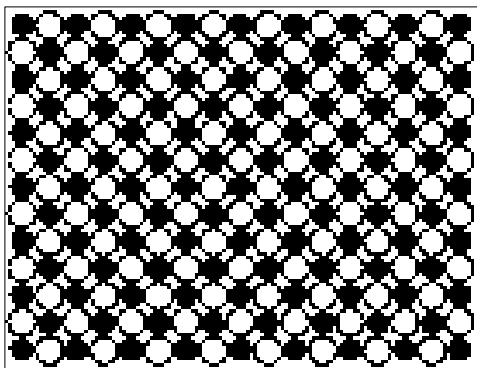
- رشد فاز جامد

اثرات انجماد سریع بر ریز ساختار

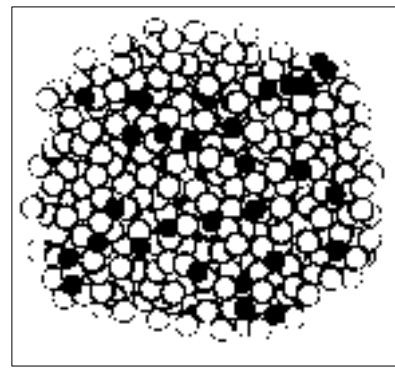
فرایند انجماد سریع اثرات قابل ملاحظه ای بر ریز ساختار حاصل از انجماد دارد. پاره ای از این تاثیرات

عبارتنداز:

- افزایش یکنواختی ترکیب شیمیایی
- نظم کم دامنه
- کاهش اندازه دانه
- افزایش حد فوق اشباع
- حصول ساختار کریستالی غیر تعادلی
- افزایش معایب و جاهای خالی



کریستالی



سریع سرد شده

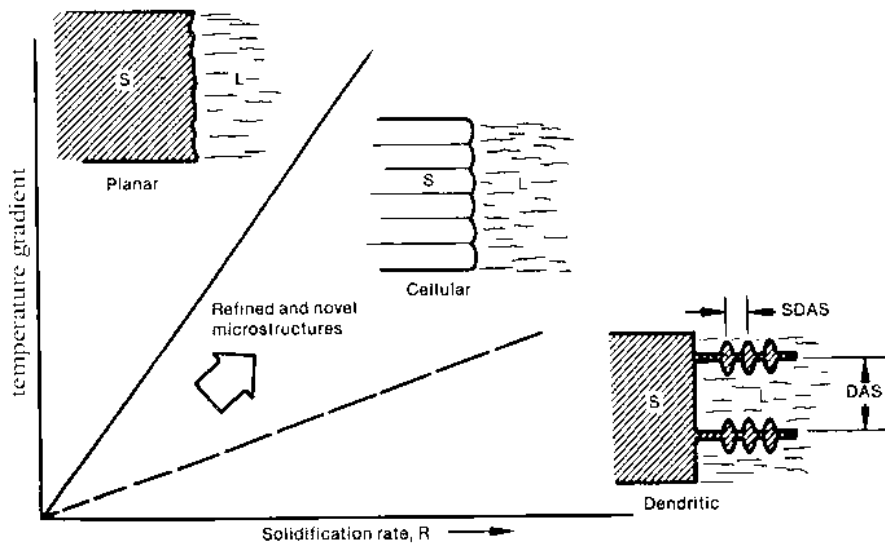
نتایج حاصل از تغییر ساختار

بطور کلی در اثر انجماد سریع تغییرات ساختاری را خواهیم داشت که نتایج قابل توجهی را به دنبال دارد. انجماد سریع منجر به کاهش اندازه دانه می شود که افزایش استحکام را به دنبال دارد. به یکنواختی ساختار و در پی آن افزایش حد تسلیم، تافنس شکست و مقاومت به خوردگی می انجامد. تعداد جاهای خالی افزایش می یابد و افزایش سرعت نفوذ را به دنبال دارد و پدیده رسوب در دمای پایین تر و زمان کوتاه تر انجام می شود.

اثرات تغییر سرعت انجماد

$$d = a(T_{ave}^{\circ})^{-n} = b t_f^n$$

$$T_{ave}^{\circ} = \frac{\Delta T}{t_f}$$



شرایط انجماد سریع

دو شرط اساسی برای انجماد سریع عبارتند از:

۱- خروج حرارت با سرعت بسیار بالا از جامد

۲- وجود یک بعد بسیار کوچک (مانند ورقه، پودر و

ریبون)

فاصله بازوهای دندریتی (μm)	سرعت سرد شدن (k/s)
500-5000	10^{-6} - 10^{-3}
50-500	10^{-3} -1
5-50	1- 10^3
0.5-5	10^3 - 10^6
0.05-0.5	10^6 - 10^9 and higher

فرآیند انجماد

در انجماد سریع فرض بر آن است که تنها رشد وجود دارد و جوانه زنی صورت نمی گیرد. یعنی در واقع به علت سرعت بالای انجماد، مرحله جوانه زنی خیلی کوتاه است.

دلایل رشد سریع

- فوق تبرید بالای مذاب در غیاب جوانه های غیر همگن مؤثر (ساختار پودری)
- حرکت سریع میدان دمایی (مشابه عملیات سطحی و یا جوشکاری توسط منابع پر انرژی توسط لیزر یا پرتو الکترونی)

اثرات حرکت سریع میدان دمایی

سرعت پیشروی فصل مشترک بزرگتر از سرعت نفوذ در یک فاصله بین اتمی می باشد و تعادل موضعی فصل مشترک جامد - مذاب از بین می رود. زمان برای منظم شدن اتمها در فصل مشترک ، به منظور کاهش شیب پتانسیل شیمیایی وجود نخواهد داشت. ترکیب جامد مشابه ترکیب مذاب شکل خواهد گرفت .

آلیاژهای حاصل از انجماد سریع

جالب ترین کاربرد انجماد سریع ، ایجاد فازهای آلیاژی جدید است .فازهای جدید به سه دسته تقسیم

بندی می شوند :

۱- محلول های جامد فوق اشباع :

نرخ کوئنچ بالا ، جوانه زنی و رشد فاز جامد ثانویه را به تاخیر می اندازد . اتم های محلول با غلظت بالاتر از حد تعادل ، در فاز جامد مادر باقی مانده و افزایش حد حلالیت و گستره همگن را در پی دارد (Cu-Ag).

۲- فازهای کریستالی غیر تعادلی :

در این حالت فازهای کریستالی تشکیل می شوند که تحت شرایط تعادلی به وجود نمی آیند (Au-Te)

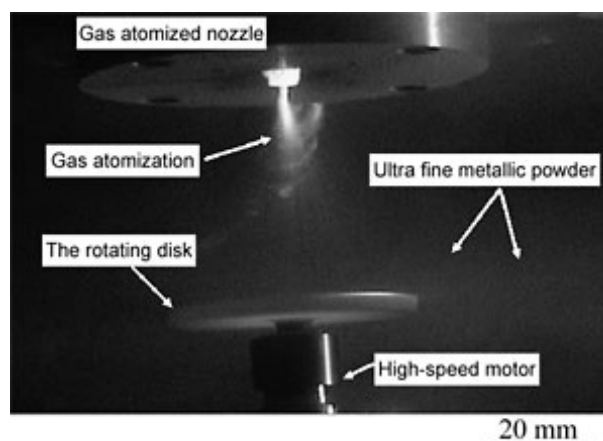
۳- فازهای آمورف :

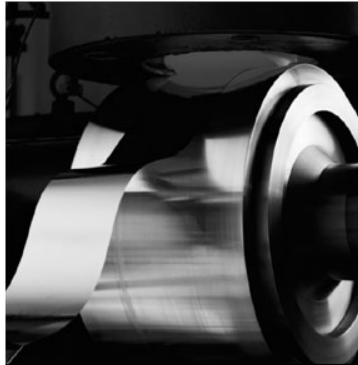
اگر شرایط خاص سینتیکی و ساختاری برقرار شود ، کوئنچ سریع مایع ، بخار و محلول باعث حذف فرآیند تبلور می شود . ساختار بدست آمده هیچ گونه نظم پر دامنه را نشان نمی دهد .

تکنیک های انجماد سریع

تولید محصولات انجماد سریع به دو روش زیر محدود می شوند :

- روش پودری (Atomization)





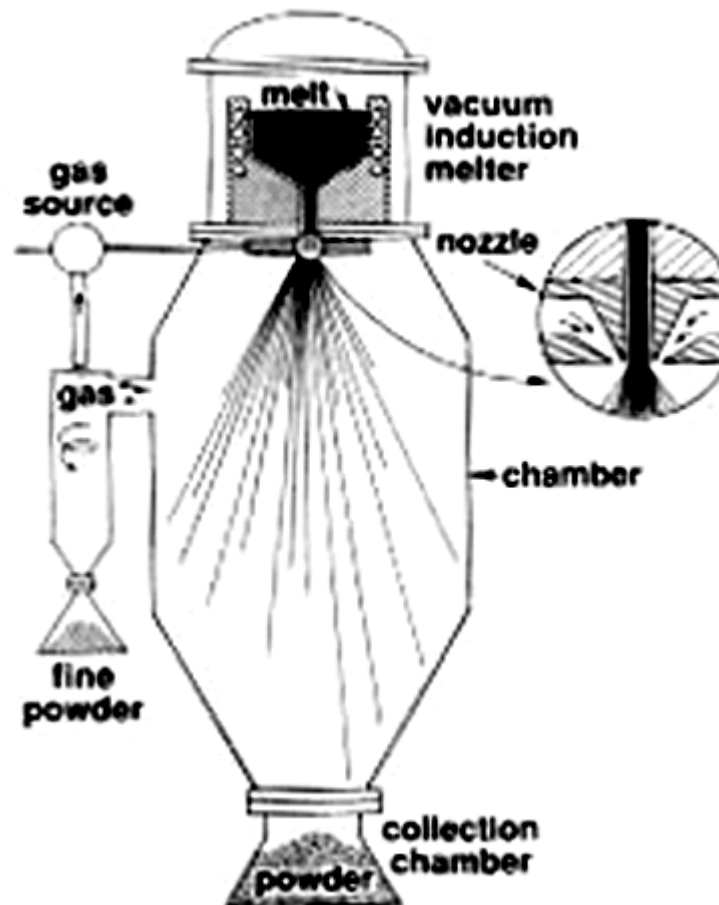
روش پودری (Atomization)

این روش به صورتهای زیر انجام پذیر می باشد :

- ۱ . اتمیزاسیون گازی
- ۲ . اتمیزاسیون گریز از مرکز
- ۳ . اتمیزاسیون الکتروود چرخنده
- ۴ . اتمیزاسیون گازی - انحلالی

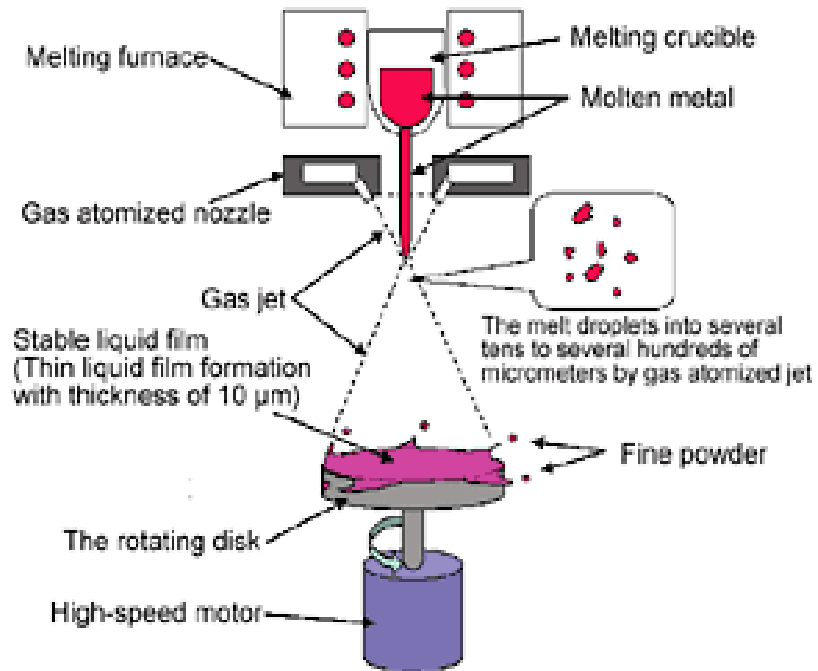
اتمیزاسیون گازی Gas Atomization

گاز ، آب یا امواج آلتراسونیک با سرعت زیاد به جریان مذاب برخورد کرده و آن را به قطرات کوچکی تبدیل می کند . انتقال حرارت در این روش به صورت همرفتی و تابش رخ میدهد . سرعت سرد شدن به اندازه ذرات بستگی دارد و در روش گازی یا آبی ، گستره سرد شدن ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ درجه سانتیگراد بر ثانیه و در روش آلتراسونیک یک میلیون درجه سانتی گراد بر ثانیه میباشد .

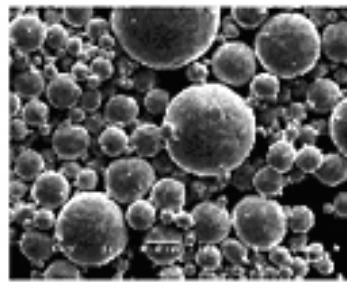


اتمیزاسیون گریز از مرکز Centrifugal Atomization

برخورد جریان مذاب به سطح دیسک چرخان ، باعث تبدیل مذاب به قطرات بسیار ریز می شود .انجماد هنگام پرتاب شدن ذرات مذاب اتفاق می افتد و با دمش گاز هلیوم ، انجماد با سرعت بیشتری صورت می پذیرد .ذرات عموماً کروی هستند .اندازه متوسط ذرات با افزایش سرعت دیسک کاهش می یابد . سرعت انجماد در حدود صد هزار درجه سانتیگراد بر ثانیه می باشد .

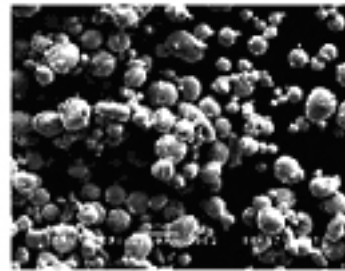


Tin-Lead alloy powders



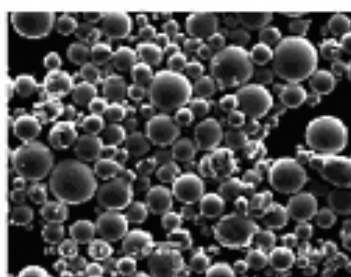
10 μm

Tin-Zinc alloy powders



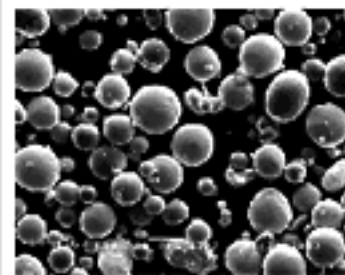
20 μm

Aluminum powders



20 μm

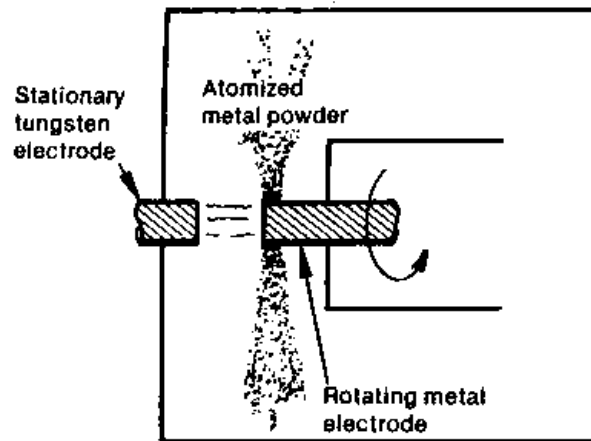
Copper powders



20 μm

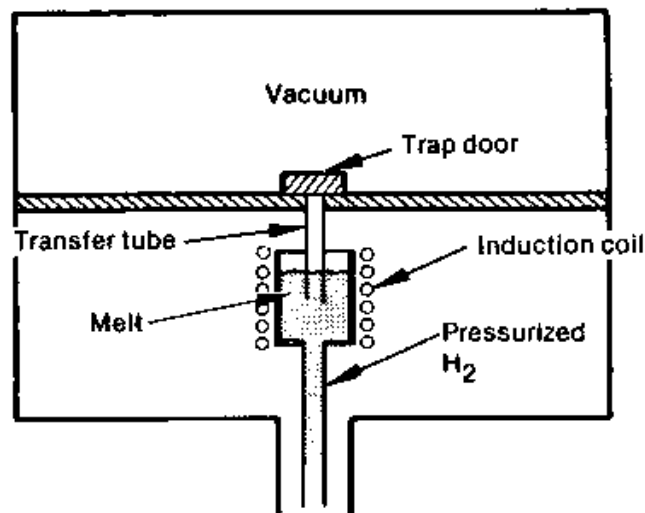
اتمیزاسیون الکتروود چرخنده Rotating Electrode A.

نمونه ای که می تواند در این روش مورد استفاده قرار گیرد باید به صورت میله استوانه ای باشد . عامل ذوب ، قوس الکتریکی به وسیله الکتروود تنگستن میباشد . چرخش نمونه باعث اتمی شدن مذاب می شود و به وسیله جریان گاز انجماد صورت می گیرد . سرعت انجماد در حدود ۱۰ درجه سانتیگراد بر ثانیه می باشد .



اتمیزاسیون گازی انحلالی Dissolved Gas A.

در این روش مذاب فوق اشباع از یک طرف تحت فشار هیدروژن و از طرف دیگر مواجه با خلاء می باشد . خلاء باعث تبخیر و اتمی شدن مذاب می شود . انتقال حرارت تنها به صورت تابش رخ می دهد . سرعت انجماد ۱۰۰ درجه سانتیگراد بر ثانیه می باشد .



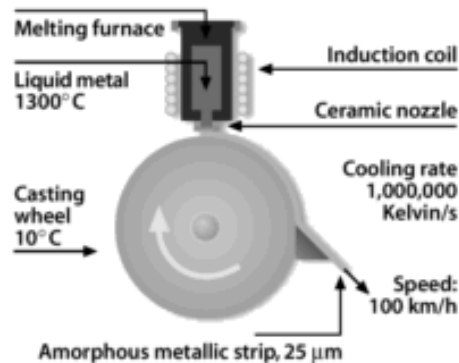
روش نواری (Thin-Strip)

این روش به صورت های زیر انجام می شود :

- روش چرخشی Melt Spining
- روش دوغلتکی Twin Roller Quenching
- روش قطره معلق Pendant Drop
- روش استخراج مذاب Melt Extraction

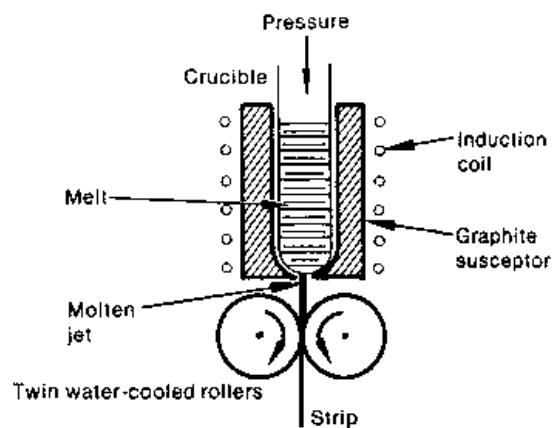
روش چرخشی Melt Spining

در این روش مذاب بر روی یک سطح فلزی به شکل استوانه در حال چرخش برخورد کرده و به صورت ورقه ای منجمد می شود. سرعت سرد شدن در حدود یک میلیون درجه سانتیگراد بر ثانیه است .



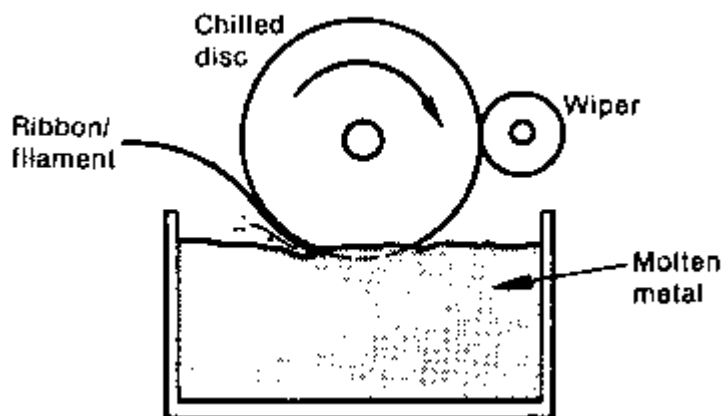
روش دو غلتکی Twin Roller

با ریزش مذاب بین دو غلتک در حال چرخش ، مذاب از دو سمت سرد می شود . در این روش ذرات ساختار یکنواخت تری دارند . نرخ سرد شدن بیش از یک میلیون درجه سانتیگراد بر ثانیه میباشد . شکل ذرات شدیداً به اندازه و محل ورود بین غلتک ها بستگی دارد .



روش استخراج مذاب Melt Extraction

در این روش دیسک مدور به مقدار بسیار کم در سطح مذاب فرو رفته و باعث پرتاب شدن مذاب به بیرون می شود. ضخامت ورقه های تولیدی و سرعت سرد شدن، شدیداً به سرعت چرخش دیسک وابسته است. سرعت سرد شدن از ده هزار تا یک میلیون درجه سانتیگراد بر ثانیه می باشد. در صورت لبه دار بودن دیسک، محصول به صورت پودری به دست می آید.



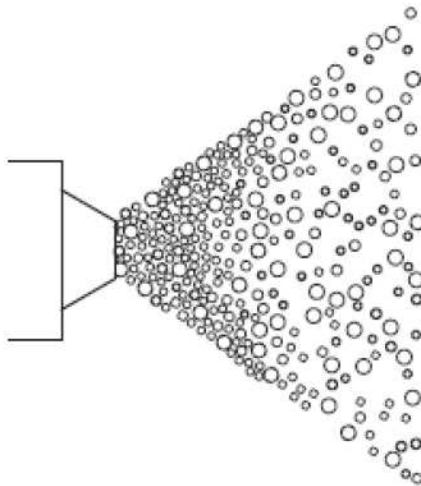
مقدمه ای بر اتمیزه شدن

اتمیزه شدن یا اتمایزینگ به فرایند تجزیه مایع یا مذاب به قطرات کوچک اشاره دارد. یک مثال کلاسیک از اتمیزه شدن، رویداد طبیعی ریزش مایع از یک ظرف است. وقتی شما مایع را میریزید و ظرف را به تدریج بالا میبرید، جریان مایع باریک میشود و به قطرات کوچکی در همان نقطه شکسته میشود. این تجزیه مایع مثال ساده ای از اتمیزه شدن است که در شکل زیر نشان داده شده است.



اتمیزه شدن یک جریان مایع

اسپری مجموعه ای از حرکت قطرات کوچکی هستند که معمولاً نتیجه اتمیزه شدن هستند. در شکل زیر نمایشی از اسپری کردن یک تفنگ را میبینید. قابل توجه است که قطرات کوچک موجود در اسپری دارای اندازه های متفاوتی هستند.



جریانی از اسپری با تنوع اندازه ذرات

یک قطره در واقع یک ذره کوچک از مایع است که یک شکل تقریباً کروی دارد. دلیل اینکه ذرات گرد هستند، کشش سطحی مایع است. برای یادآوری باید گفت کشش سطحی ویژگی مایع است که باعث ایجاد قطرات و حبابهای صابونی میشود تا یکدیگر را به صورت کروی بکشند و از پهن شدن ذرات روی سطح جلوگیری میکنند. این ویژگی باعث میشود که پیوندهای مایع ناپایدار باشند به طوری که به قطرات کوچک تجزیه یا اتمیزه شوند. وقتی دمای مایع افزایش می یابد کشش سطحی کم میشود.

عوامل موثر بر اسپری کردن

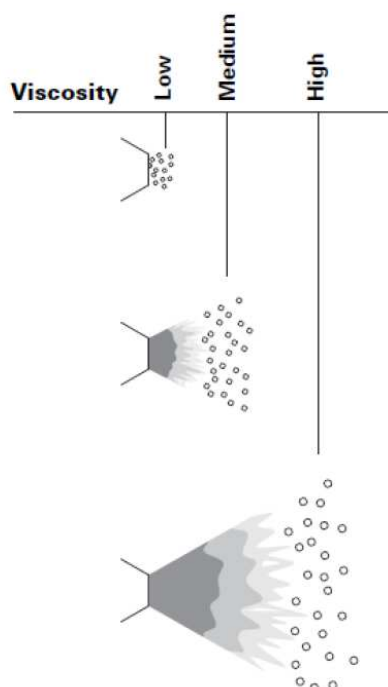
فاکتورهای مختلفی بر روی اندازه ذرات و اینکه چگونه مایع بعد از بیرون آمدن از یک دهانه اتمیزه میشود تاثیر دارند که مهمترین آنها کشش سطحی، ویسکوزیته و دانسیته است.

کشش سطحی

کشش سطحی تمایل به پایداری یک مایع را دارد و از تجزیه به قطرات کوچک جلوگیری میکند.

ویسکوزیته

ویسکوزیته اثری مشابه با کشش سطحی روی اندازه قطرات دارد. ویسکوزیته باعث میشود که مایع در برابر تلاطم و سرخوردن لایه های مایع روی هم مقاومت کند و تمایل کمتری به تجزیه شدن از خود نشان بدهد. در نتیجه هر چه ویسکوزیته بالاتر باشد متوسط اندازه دانه ذرات بزرگتر میشود.



دانسیته

دانسیته باعث میشود که مایع در برابر شتاب مقاومت کند. مشابه با ویژگیهای کشش سطحی و ویسکوزیته، دانسیته بزرگتر را هم تمایل به ایجاد متوسط ذرات بزرگ را دارد.

بررسی هایی روی اتمیزه کردن مذاب با گاز و به مایع تبدیل کردن گاز از طریق تبرید:

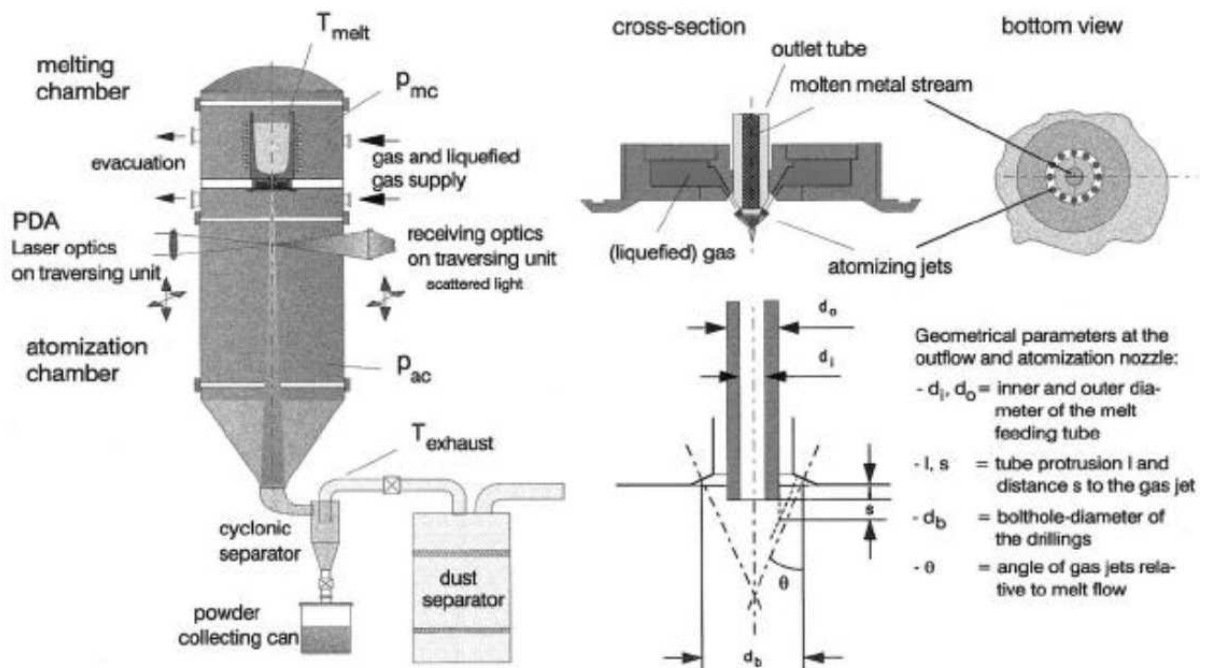
کاربرد مدرن پودر و تکنیک های فرایند نیاز به کیفیت های پودری بسیار مخصوصی دارد که ممکن است مرتبط با ریز ساختار، مورفولوژی یا خلوص باشد. مهم ترین جنبه ی کیفی، اغلب اندازه ذرات توصیف می شود.

اندازه ذرت (و شکل ذره) یکی از پارامترهای اساسی در تکنیک زینترینگ است و یک پارامتر قاطع برای تکنیک های جدیدتر مثل قالبگیری تزریقی فلز metal injection molding یا laser sintering/rapid prototyping. برای فرایندهای اسپری کردن حرارتی (thermal spraying processes using powder) با استفاده از پودر، اندازه ذره تحت تاثیر پارامترهای مهمی مثل سرعت های رسوبگذاری، اندازه ی ذره ی دوباره ذوب شده و کیفیت سطح ته نشین قرار دارد. تنها نمونه های کمی از میدان وسیعی از کاربردها در تکنولوژی فرایند پودری وجود دارد. بنابراین پودرهای مورد نیاز یک رنج وسیعی از اندازه ذرات را می پوشانند اما وابسته به کاربرد مخصوص اغلب فقط یک اندازه ی محدودی برای آن گفته می شود. در نتیجه کنترل و تنظیم توزیع اندازه ذرات یکی از مهمترین اهداف در طول اتمیزه کردن مذاب است.

دستگاه اتمیزه کردن و اساس فرایند:

دو تا واحد دستگاه اتمیزه کردن با گاز خنثی (inert GA) در ATZ-EVUS برای آزمایشات LGA (liquid gas atomization) و GA (gas atomization) استفاده می شود. در اصل ساختمان هر دو واحد خروجی یکسان است (شکل ۱). اختلاف های اصلی، اندازه و ظرفیت های مذاب است (واحد آزمایشگاه بالای ۳۰kg و واحد پایلوت ۱۰۰kg برای هر بچ). واحدها مجهز به سیستم های تحویل گاز و گاز مایع هستند که فشارهای اتمیزه شده ی بالای ۱۰۰ بار (گاز) و ۲۵۰ بار (گاز مایع) را اجازه می دهند. پارامترهای مهم فرایند مثل فشار اتمیزه شدن، دمای بسیار بالای ذوب و فشار محفظه اندازه گیری می شود و مستقیم به وسیله ی کامپیوتر که اطلاعات کسب شده را کنترل می کند، ثبت می شود. مصرف گاز به ترتیب به

وسیله ی قطع فشار انبار گاز و اندازه گیری ها تعیین می شود. سرعت های سیلان مذاب نمی تواند مستقیم اندازه گیری شود. سرعت های جریان مذاب در ابتدا به وسیله ی تغییرات قطرهای خارجی در محدوده ای از ۱/۷ تا بالای ۴mm در بررسی های حاضر از پیش تنظیم می شود. ذوب شمش به وسیله ی گرمای القایی انجام می شود. بوته ی گرمای القایی آزمایشگاهی مستقیماً واقع شده بالای آرایش نازل خروجی ثابت است (شکل ۱). ته خروجی بوته به وسیله ی یک در پوش میله ای بسته می شود که برداشته می شود تا جریان مذاب شروع شود. بنابراین بوته و تاندیش یکی هستند، در حالی که در واحد صنعتی پایلوت این ها بخش های جدا از هم هستند. در این مورد یک تاندیش مقاومت به گرما با یک خروجی ته باز بالای نازل قرار گرفته اند و به وسیله ی نوسان کردن سیم پیچی القایی که بوته را در بر می گیرد، پر شده اند. به وسیله ی کنترل سرعت پاشش مذاب، تقریباً یک سطح ثابتی از مذاب کنار تاندیش به دست می آید که بنابراین در یک فشار metallo-static شرایط پایداری بیشتر در طول اتمیزه شدن نتیجه می شود. مذاب به یک دمای بسیار گرم معین می رسد T_S (نوعاً $200-100$ °C بالای دمای مذاب T_m)، به این دلیل که یک ریزش بدون مشکل از میان لوله ی تغذیه (خروجی) ایجاد کند. کنترل گرمای مذاب به وسیله ی دوره های سیکل گرم کردن و سرد کردن انجام می شود. این باعث می شود تا دمای نوسانات در طول اتمیزه شدن در رنج تقریباً $T_S \pm 20$ °C باشد. روند گاز و مایع کردن GA با راه های تقریباً یکسانی به ترتیب از طریق شروع جریان مذاب بسیار گرم همزمان با جریان گاز و بعد سیستم سرد کردن تا دماهای سرمازایی برای LGA در طول آزمایشات حاضر به کار برده می شود. ذرات اتمیزه شده خنک شده و قبل از عبور از جداکننده ی چرخشی منجمد می شود و در یک جمع کننده ی پودر ته نشین می شوند. سیال اتمیزه سیستم را از طریق یک جداکننده ی گرد و غبار و فیلترها رها می کند. یک مکنده ی قدرت بالا، فشارهای زیر اتمسفری (sub-atmospheric) را در کنار محفظه ی اتمیزه در طول GA به دست می آورد.

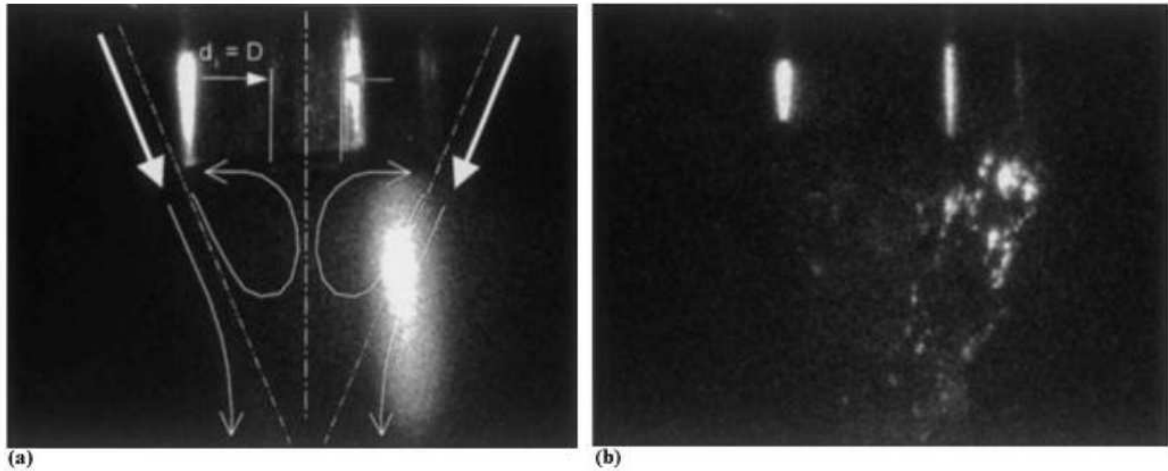


شماتیک نشان داد شده ای از واحد آزمایشگاهی اتمیزه شدن مجهز به PDA (طرف چپ) با سطح مقطع و نگاه ته نازل اتمیزه شدن محدود (راست بالا) و شرح خلاصه ای از نازل (راست پایین) که موقعیت هندسی اصلی ریزش را نشان می دهد.

یک شماتیکی از حوزه ی جریان گاز پیرامون خروجی لوله ی تغذیه ی مذاب در شکل (a) نشان داده شده است. یک ناحیه ی جریان گردشی متناوب درون مخروط جت گازی وجود دارد که مذاب را با لبه ی لوله برخورد می دهد که مذاب به سمت خارج کنده می شود و اتمیزه می شود (شکل (b) ۲).

PDA (Phase-Doppler Anemometry):

PDA یک تکنیک تداخل سنجی نوری برای اندازه گیری همزمان اندازه ذرات و سرعت است. این تکنیک استفاده شده اثر دوپلر را برای سرعت و اختلاف فاز (تغییر زاویه ی فاز) به جهت اطلاعات اندازه از نور پراکنده شده ای که به وسیله ی یک ذره ای که از میان یک حجم اندازه گیری شده تولید می شود، عبور می کند.



شماتیک نشان داده شده از (a) حوزه ی جریان گاز پیرامون خروجی لوله و (b) مطابق با عکس سرعت بالا از شکسته شدن مذاب در لوله ی خارجی.

نازل های اتمیزه شدن:

نازل های اتمیزه شدن که برای آزمایشات حاضر استفاده می شود، به نوع چند جتی منحصر هستند (شکل ۱)، یعنی گاز (مایع شده) از سوراخ هایی که به طور هم محور آرایش یافته اند و بسیار نزدیک به خروجی مذاب هستند، خارج می شود، بنابراین اندازه حرکت بالایی هنگام برخورد به مذاب به دست می آید. مذاب مستقیماً در لوله ی تغذیه ی مذاب اتمیزه می شود. پارامترهای ابعادی نازل های مورد استفاده در جدول ۱ لیست شده است. برای آزمایش های LGA که در فشارهای پایین (LP) ≤ 20 بار انجام می شود، یک نازل با یک بخش خروجی نسبتاً بزرگ باید استفاده شود، به این دلیل که یک سرعت جریان جرم مخصوصی از گاز مایع شده را حفظ کند که وقتی که سیستم به طور صحیحی خنک می شود همانند یک سیال غیرقابل تراکم رفتار می کند.

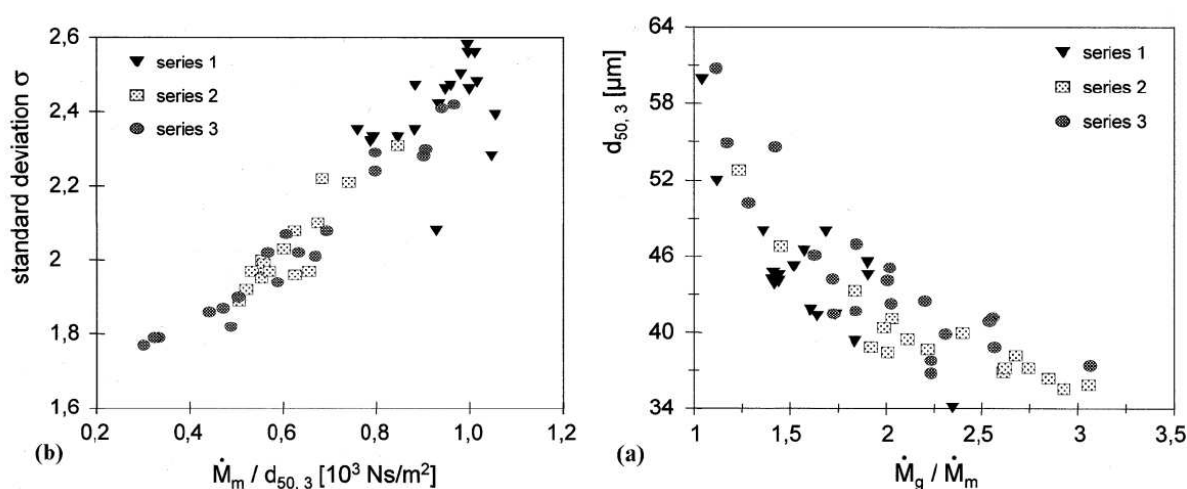
برای گاز تراکم پذیر تحت شرایط از قبل معین شده در فشارهای گازی کاربردی پایین، یک نسبت فشار بحرانی بیرونی- داخلی نازل ($P_0/P_i=0.528$ برای هوا یا N_2) به دست آمده که گاز با سرعت صوت خارج می شود. به علاوه فشار افزایش یافته ی P_i سرعت سیال گاز را بالا می برد، اما سرعت خروج گاز را تغییر

نمی دهد. اما با افزایش فشار $P_0, (P_i)$ در خروج به طور همزمان افزایش می یابد و گاز به یک موقعیت تحت انبساط زیاد می رسد. انبساط بعدی گاز باعث ساختار پیچیده ای از موج های ضربه ای با برخورد های فشاری و انبساطی درون جت می شود که گاز به طور دوره ای با سرعت صوت شتاب داده می شود و دوباره آهسته به طرف پایین می آید. به طور موضعی، میتوان گفت که شرایط مافوق صوت می تواند ایجاد شود. ناحیه ی موج ضربه ای به وسیله ی نوع نازل کاربردی محدود می شود و ناحیه ی برخورد با مذاب توسعه می یابد. این یک ویژگی نوعی از این نوع آرایش نازل است که جت های با سرعت بالای گاز مکشی را در لوله تغذیه ی مذاب تولید می کند. یک فشار منفی می تواند در ورودی مذاب اندازه گیری شود که به وسیله ی هندسه ی لوله و موقعیت نسبی آن با جت های گازی و به علاوه یک تابعی از فشار اتمیزه کردن تعیین می شود. به طور عادی فشار منفی شدیدی استفاده می شود تا موقعیت لوله ی خروجی تنظیم شود تا یک جریان مذاب بدون مشکلی تأمین شود. همراه با قطر خروجی لوله ی تغذیه ی مذاب، شرایط فشار در لوله ی خروجی به میزان زیادی روی جریان مذاب مؤثر است و برای این که یک انتخاب اولیه ای از سرعت جریان مذاب نیز ایجاد کند، استفاده می شود. به هر حال دقت موقعیت نازل، حضور مذاب و نوسانات فشار درون محفظه ی اتمیزه کردن در طول یک دور (مسیر) می تواند موقعیت روزنه ی (سوراخ) لوله ی مذاب را به طور نمایشی تغییر دهد.

اتمیزه کردن گازی

فشار اتمیزه شدن، سرعت جریان گاز را تعیین می کند و شرایط سرعت (اولیه) در بخش اتمیزه شدن را نشان می دهد. بنابراین این مهم ترین تغییر پارامتر است که روی عملکرد اتمیزه شدن اثر می گذارد. چون سرعت جریان مذاب همزمان تغییر می کند، وابستگی برابند اندازه ذرات به شرایط فرایند نمی تواند صرفاً به وسیله ی فشار کاربردی شرح داده شود. اما کاملاً به عنوان تابعی از نسبت سرعت جریان جرم (M_g^0/M_m^0) گاز/مذاب بیان می شود. دیاگرام ها در شکل زیر نتایجی از بیشتر از ۵۰ دور از اتمیزه شدن آلیاژ Al-Cu است که با سه سری مختلف انجام می شود. قطرهای خروجی مذاب مساوی بودند، پیش رفتگی لوله و دمای خیلی بالای مذاب درون محدوده تقریبی $\Delta L = \pm 0, 15mm$ و $\Delta T_s = \pm 20K$ ثابت نگه داشته می شود.

همان طور که پیش بینی می شود، میانگین اندازه ی ذرات جرمی به طور پیوسته با افزایش سرعت سیال جرمی گاز / مذاب از $60\mu\text{m}$ در $M_g^0/M_m^0 \sim 1$ به پایین تر از $35\mu\text{m}$ در $M_g^0/M_m^0 \sim 3$ کاهش می یابد (شکل (a)). در مقایسه، عرض های توزیع اندازه که به وسیله ی نسبت $\sigma = d_{84}/d_{50}$ بیان می شود، فقط یک وابستگی ضعیف به فشار اتمیزه شدن کاربردی یعنی به M_g^0 را نشان می دهد و می تواند مرتبط با سرعت جریان مذاب موجود باشد. وقتی که قطر میانگین جرمی در محاسبات در فرم M_m^0/d_{50} باشد، ارتباط بهتری به دست می آید (شکل (b)).



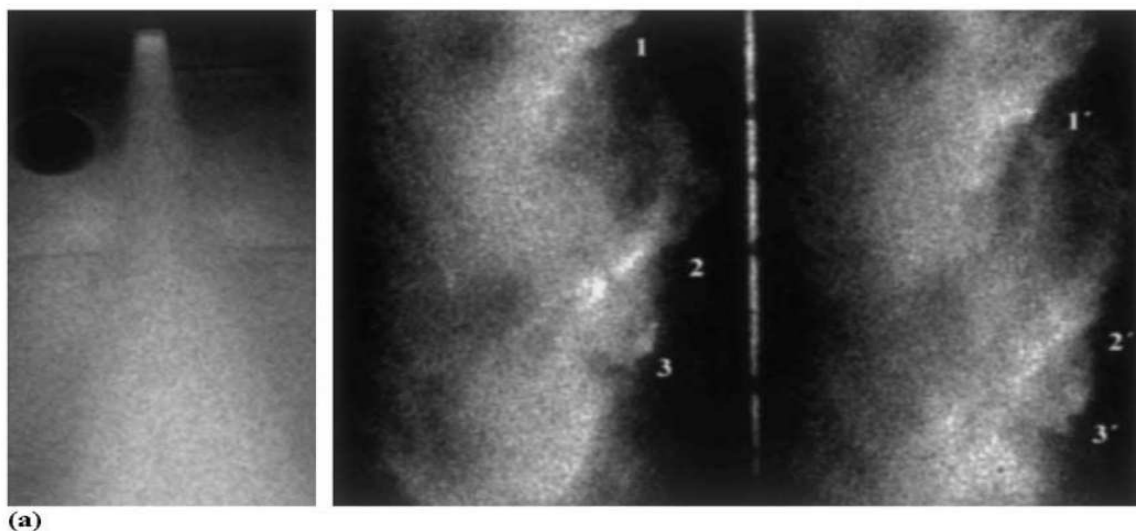
پارامترهای میانگین $d_{50,3}$ جرمی به عنوان تابعی از نسبت جریان جرمی مذاب/جامد (a) و انحراف استاندارد (σ) به عنوان تابعی از نسبت سرعت جریان جرمی و اندازه ی ذره ی متوسط (b) برای گاز نیتروژن که پودر آلیاژ CuAl را اتمیزه می کند.

مایع شدن گاز تبریدی اتمیزه شدن گازی

در این روش، مایع شدن گازهای تبریدی (LGA) را میتوان با نازل های محدودی شبیه به GA انجام داد. برای مقایسه و برای اینکه ذرات اتمیزه شده ریز باشند فشار اتمیزه شدن بالاتری نسبت به آنچه که در GA استفاده شده است، به کار برده می شود، چرا که مایع سرمازا به طور عمده یک سیال تراکم پذیر است

و نسبت به گاز تحت همان فشار با سرعتی کمتری خارج می شود. به هر حال گاز مایع شده ای که از نازل خارج می شود، منبسط میشود، چون انتقال گرما به اطراف همیشه اتفاق می افتد.

به دلیل اثرات انبساطی، سرعت های بالای گاز مایع شده را میتوان به وسیله ی PDA در فشارهای اتمیزه شدن ۲۰ بار اندازه گیری کرد. بالاترین سرعت در مرکز جت در یک فاصله ی ۱۲۰-۱۰۰ mm از نازل خروجی در ۲۱۲m/s ثبت شده است که چهار مرتبه بیشتر از سرعت مورد انتظار از محاسبات ساده براساس فشار واقعی و روزه ی نازل اتمیزه شدن می باشد. حرکت دادن حجم اندازه گیری شده ی PDA درون نواحی خروجی جت، سرعت های قطرات کوچک را تا رنج بین تقریباً ۶۰-۲۰ m/s در یک فاصله ی ۱۸mm از مرکز اسپری کاهش می دهد. حدس تصاویر سرعت بالای موفق، سرعت هایی را در ناحیه ی خارجی اسپری از ۴۰~ تا بالای ۱۳۰ m/s می دهد (شکل (a)). در فشارهای اتمیزه شدن به کار برده شده ی بالاتر (۲۵۰-۱۰۰ بار) اسپری قطرات کوچک گاز مایع شده، بسیار چگال می شود به طوری که نه اندازه گیری های PDA و نه سرعت بالای تصویرگیری، نتایج معقولی را برای تعیین سرعت های اسپری کردن به دست نمیدهد



(a) فوتوگرافی از جت گاز مایع شده که مذاب با ۲۰۰ بار را اتمیزه می کند (چپ) و سپس تصاویر سرعت بالای (راست) یک جریان، فشار پایین جت گاز مایع شده در ۱۴ بار را ثبت می کند.

مقدار سرعت های ارزیابی شده به صورت 134m/s (۱-۱) ، 122m/s (۲-۲) ، 103m/s (۳-۳) ، (b) اندازه های ذره با میانگین جرمی به عنوان تابعی از نسبت سرعت جریان جرمی گاز/مذاب برای گاز مایع شده که مس، NdFeB و آلیاژ قلع را متمیزه می کند. (منحنی بالایی تصویری از فشار پایین، منحنی پایین تر فشار بالای متمیزه کردن، با ذکر نازل های مختلف به کار برده شده)

فشارهای متمیزه شدن بالا، تأثیر اثرات انبساط را به دلیل سرعت های جریان جرمی بالاتر، مینیمم می کند، چون می تواند به طور جزئی با کاهش سرعت های قطرات کوچک اندازه گیری شده در طول PDA نشان داده شود. به هر حال فقط خروجی ترین قسمت جت می تواند به دلیل میزان بالای دانسیته ی قطرات مایع، اندازه گیری شود. بنابراین دیدن ذرات فلزی در طول LGA محدود به این بخش است که نماینده ای برای جت کامل نیست. بازدهی و ویژگی های متمیزه شدن شبیه به آنچه که در طول GA مشاهده شده، هستند. برآیند اندازه های ذره با افزایش M_g^0/M_m^0 کاهش می یابد و باعث مینیمم شدن نسبت های سرعت جریان جرم در مقایسه با GA می شود. در مقایسه با GA این مینیمم شدن یک نتیجه ای از استفاده از ماکزیمم فشارهای گاز مایع شده است. با افزایش فشار، متمیزه شدن باعث کاهش بیشتر اندازه های ذره و توسعه ی این تکنیک می شود.

می توان نشان داد که نسبت سرعت جریان جرمی گاز/مذاب فاکتور غالبی برای بازدهی متمیزه شدن است. سرعت جریان جرمی روی توزیع اندازه تأثیرگذار است. بنابراین پارامترهای نام برده شده به دقت برای متمیزه شدن بهینه تنظیم شده است. اثر ویژگی های ماده روی برآیند توزیع ذره نیز اثبات شده است. تقریباً اندازه ذره ی جرم میانگین به عنوان تابعی از نسبت سرعت جریان جرمی گاز / مذاب ثابت های وابسته به ماده را می دهد که برای توصیف درشت شدن ذره با افزایش ویسکوزیته های مذاب و کشش های سطحی لازم است. برای GA و سیستم نازل مورد بررسی، این ثابت با یک مینیمم از اندازه های ذره ی متوسط قابل حصول و شرایط کاری بهینه برای متمیزه شدن ریز در مصرف گاز پایین یکسان است. به عنوان یک نتیجه، اساساً برای تولید پودرهای ریزتر سرعت سیال باید اصلاح شود. فرایندهای LGA با طراحی های نازل محدود شده شباهت زیادی دارد. در مقایسه با GA حد پایین تر اندازه های ذره ی به دست آمده، به وسیله ی فشار

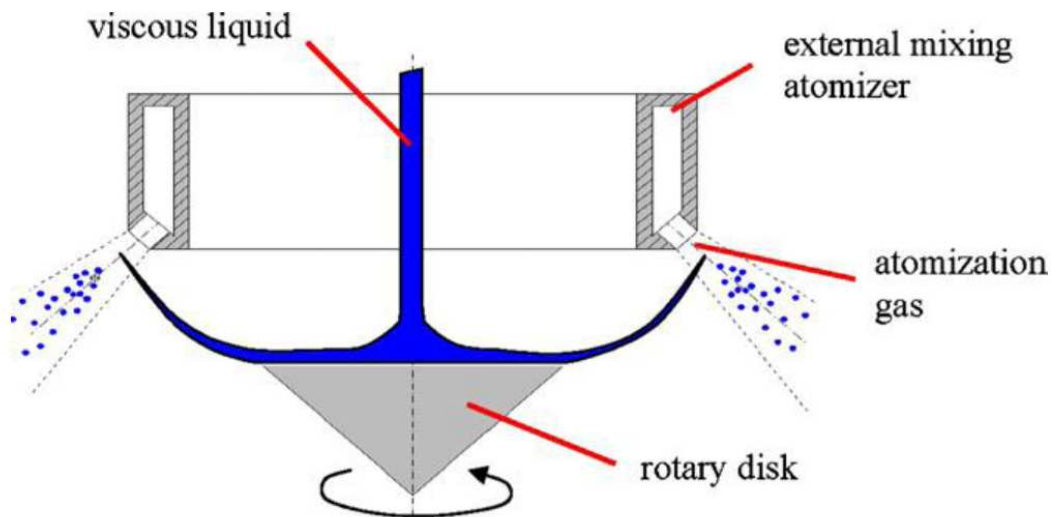
ماکزیمم به کار برده شده، تعیین شده است. سرعت های سرد کردن به دست آمده با LGA نسبت به GA بالاتر هستند.

نکته‌ی دیگر این که نتایجی از اندازه گیری‌های PDA گزارش شده تا نشان دهد که این دستگاه با ارزش برای مشخصه‌ی اسپری مذاب و کنترل خطی است.

طراحی افشانک برای اتمیزه کردن مذاب ویسکوز:

افشانک (prefilming):

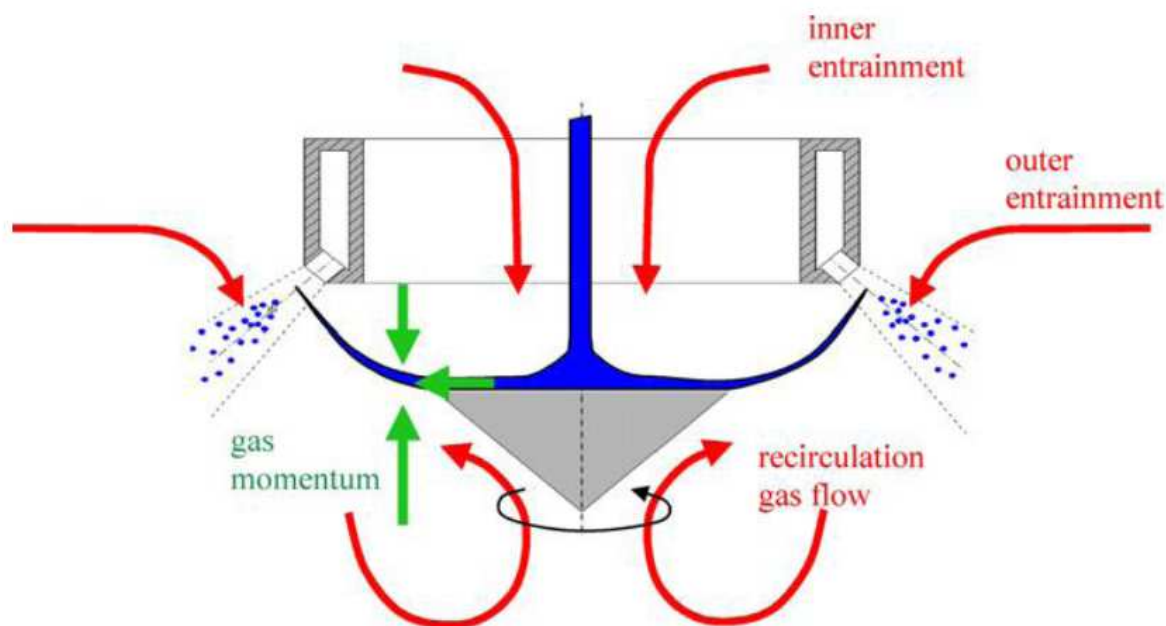
هدف از توسعه، طراحی یک افشانک برای مایعات و مذاب های با ویسکوزیته ی بالا است که اندازه قطرات کوچکی تولید کند. افشانک ترکیبی **prefilming** که اینجا معرفی می شود، ترکیبی از یک افشانک چرخشی تک سیال و یک افشانک مخلوطی خارجی با دو سیال است. مزیت این طراحی خاص این است که ماده ی تغذیه در ابتدا به وسیله ی یک دیسک چرخشی به دلیل نیروی گریز از مرکز پهن شود و به موجب آن، سطح مایع اولیه قبل از فرایند اتمیزه شدن گازی افزایش یابد. افشانک چرخشی در مد تشکیل ورقه عمل می کند. به طوری که در اطراف دیسک چرخشی یک **free prefilm** تشکیل شده است. سپس این **prefilm** به درون ناحیه‌ی اتمیزه شدن افشانک مخلوط خارجی به وسیله‌ی نیروهای آیرودینامیکی ذاتی در حوزه ی جریان گاز هدایت می شود. در شکل زیر شرحی از افشانک ترکیبی **prefilming** را نشان می دهد. به منظور تأمین اتمیزه شدن پایدار، نیروهای آیرودینامیکی استفاده می شوند تا بدنه‌ی افشانک را از آمدن به محل تماس محافظت کند و به وسیله‌ی بخش‌هایی از مایع (مذاب) مسدود شود. یک سرعت جریان جرمی گاز به اندازه ی کافی کوچک درون افشانک، بدنه ی افشانک را محافظت می کند.



شرحی از افشانک ترکیبی prefilming

قاعده ی کلی سیالیت جریان گاز افشانک ترکیبی prefilming در شکل بعد نشان داده شده است. انواع جریان موضعی مختلف نیاز به مشخصه ای دارد که گاز محیط (محاصره) با گاز اتمیزه شدن برخورد کند.

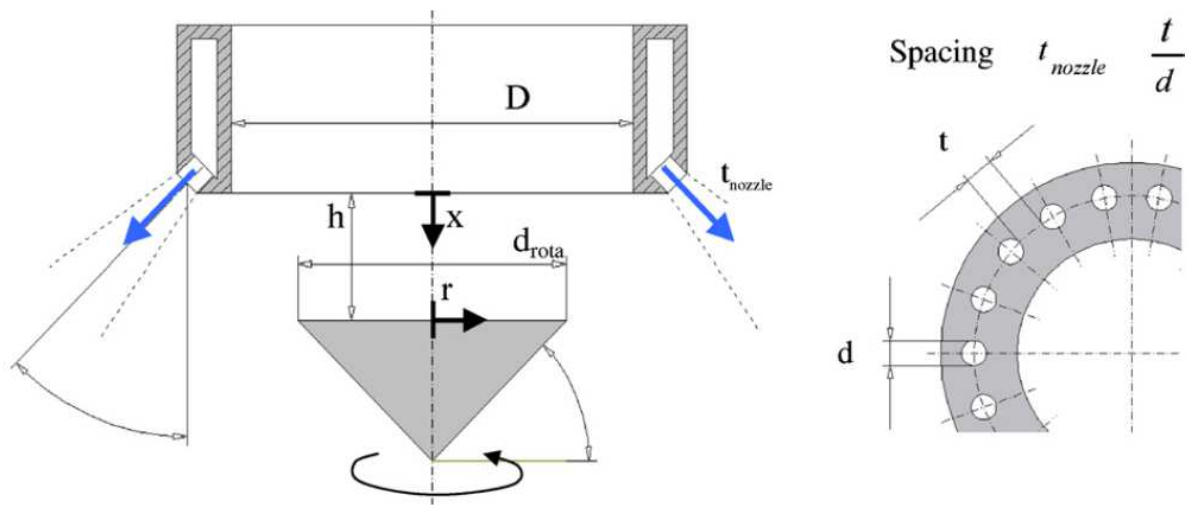
جریان آهسته ی (Entrainment) داخلی از طریق اتمایزر انتقال جریان مایع به بخش اتمیزه شدن می رسد. جریان آهسته ی خارجی مستقیماً به بخش اتمیزه شدن می رسد و جریان گاز در حال چرخش از زیر دیسک چرخشی به بخش اتمیزه شدن می رسد. حرکت فیلم اساساً وابسته به نیروهای داخلی و آیرودینامیکی است که به وسیله ی توزیع اندازه حرکت جریان داخلی، اندازه حرکت جریان گاز در حال چرخش و اندازه حرکت خود فیلم ایجاد می شود. هدف از طراحی افشانک ترکیبی prefilming این است تا اندازه حرکت جریان گاز در حال چرخش ماکزیمم شود، در جایی که فیلم مایع نزدیک به خروج گاز انتقال یابد.



انواع جریان افشانک ترکیبی [3]prefilming

شبیه سازی عددی

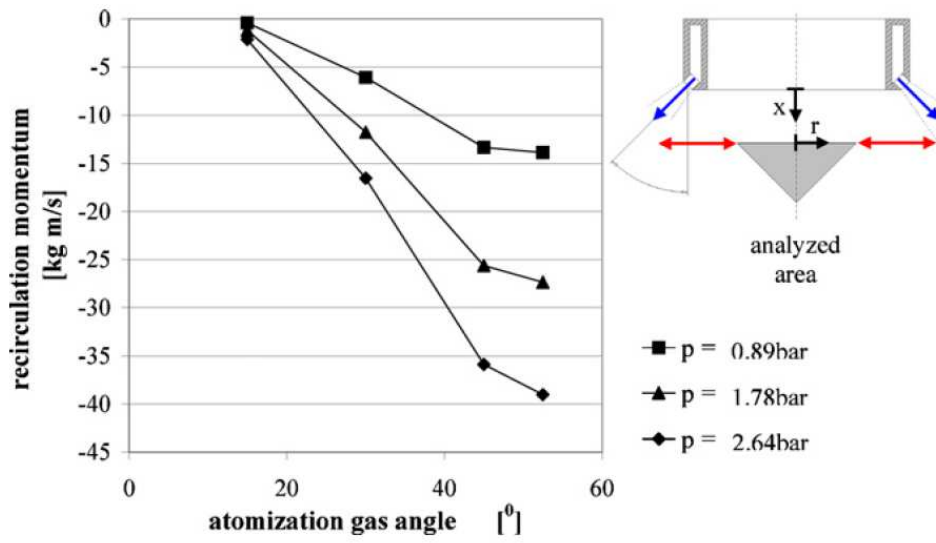
به منظور طراحی افشانک مناسب برای اتمیزه کردن مذاب ویسکوز از شبیه سازی عددی استفاده می شود. در شکل زیر، پارامترهای ساختمانی مورد بررسی دستگانه نشان داده شده است. هدف از شبیه سازی عددی این است که شرایطی نتیجه شود که ماکزیمم اندازه‌ی حرکت گاز روی فیلم مایع با جریان آزاد در مقابل محور اصلی جهت گاز اتمیزه شدن فعال شود. چون بالاترین اختلاف سرعت بین گاز و مایع و بنابراین کارآمدترین بخش اتمیزه شدن نزدیک به خروجی گاز اتمیزه شدن است، اندازه حرکت گاز در حال گردش باید ماکزیمم باشد تا فیلم مایع را به سمت خروجی گاز اتمیزه شدن انتقال دهد.



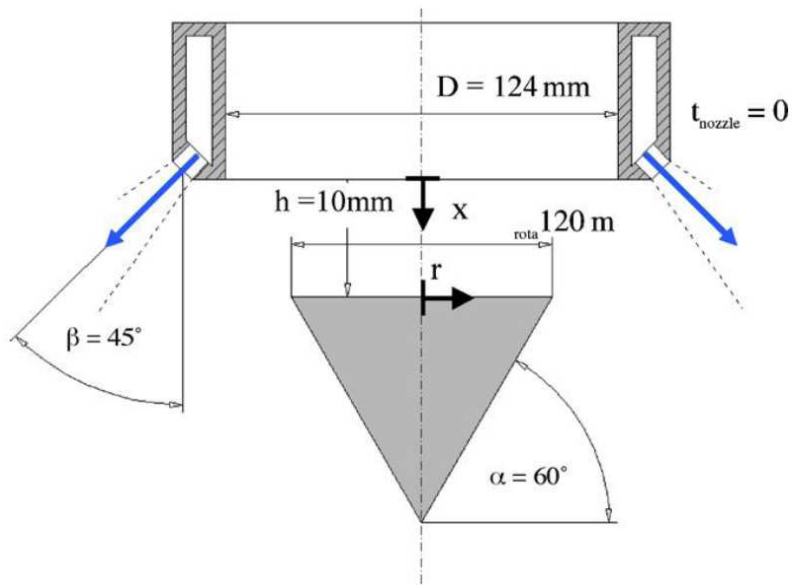
پارامترهای سازنده ی مورد بررسی طراحی افشانک ترکیبی

در شکل زیر (a) وابستگی اندازه حرکت در حال گردش به زاویه ی خروجی گاز اتمیزه شدن نشان داده شده است. در اندازه حرکت گاز گردشی با زوایای خروجی گاز بالای 15° ، اندازه حرکت گردشی بر واکنش غلبه دارد و با افزایش زاویه ی خروجی، افزایش می یابد. یک اندازه حرکت گردشی بالای قابل قبول در زوایای خروجی بین 45° و 50° اتفاق می افتد. بنابراین زاویه ی خروجی گاز اتمیزه شدن برای طراحی افشانک ترکیبی با 45° تنظیم می شود.

در همین روش برای زاویه ی خروجی گاز، همه ی پارامترهای سازنده ی افشانک به طور جداگانه با تغییر آزمایش ها در شبیه سازی تعیین می شود. در شکل بعدی (b) نتیجه ی تنظیم پارامترهای بهینه را برای افشانک ترکیبی prefilming نشان می دهد. طراحی براساس اتمیزه شده مذاب های معدنی در یک دمای 1873^0K انجام میشود که در آن ویسکوزیته ی مایع 1pas و سرعت جریان جرمی مذاب 300kg/h است. یک شیر گاز فاصله گذاری را از صفر انتخاب می کند. بنابراین از یک شکاف نازل به عنوان هندسه ی خروجی جریان گازی استفاده می شود.



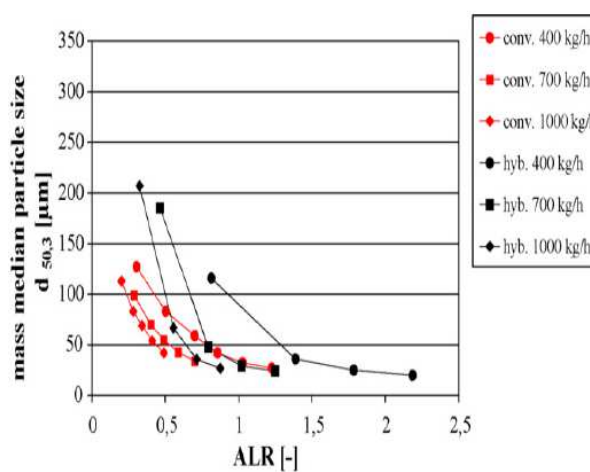
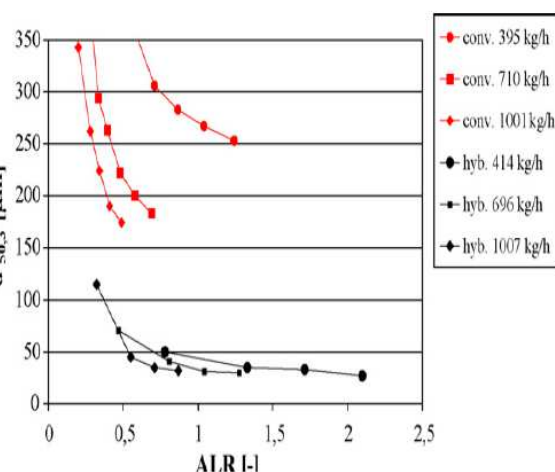
a. اندازه حرکت گردشی روی فیلم غیرسیال



b. نتیجه پارامترهای متمیزه شدن

آزمایشات مدل

در شکل های زیر نتایج آزمایشی اتمیزه شدن آب و گلیسیرین نشان داده شده است. اندازه ی قطرات با جرم متوسط در اسپری کردن به وسیله ی پراش لیزر در مقابل نسبت جریان جرمی هوا به مایع (ALR) رسم شده است. کارایی افشانک ترکیبی در مقایسه با یک افشانک سقوط آزاد (free fall) معمولی افزایش یافته است. افشانک سقوط آزاد وسیله ی متداولی برای تولید پودر است. وقتی آب با ویسکوزیته ی پایین اتمیزه می شود (شکل a)، کارایی ترکیب پایین است. برای سرعت جریان جرمی مایع ثابت در ALR یکسان (نسبت هوا به مایع یکسان) افشانک ترکیبی اندازه ذرات درشت تر تولید می کند. در این مورد افزایش انرژی سطحی مخصوص قبل از اتمیزه شدن سودی ندارد. افزایش انرژی سطحی فقط وقتی مفید است که ویسکوزیته افزایش یابد. شکل b نشان می دهد که در ALR ثابت، افشانک ترکیبی، ذرات ریزتری نسبت به افشانک متداول برای اتمیزه شدن گلیسیرین ویسکوز تولید می کند. در این مورد یک اندازه ذره با جرم متوسط کمتر از $3\mu\text{m}$ به دست می آید.

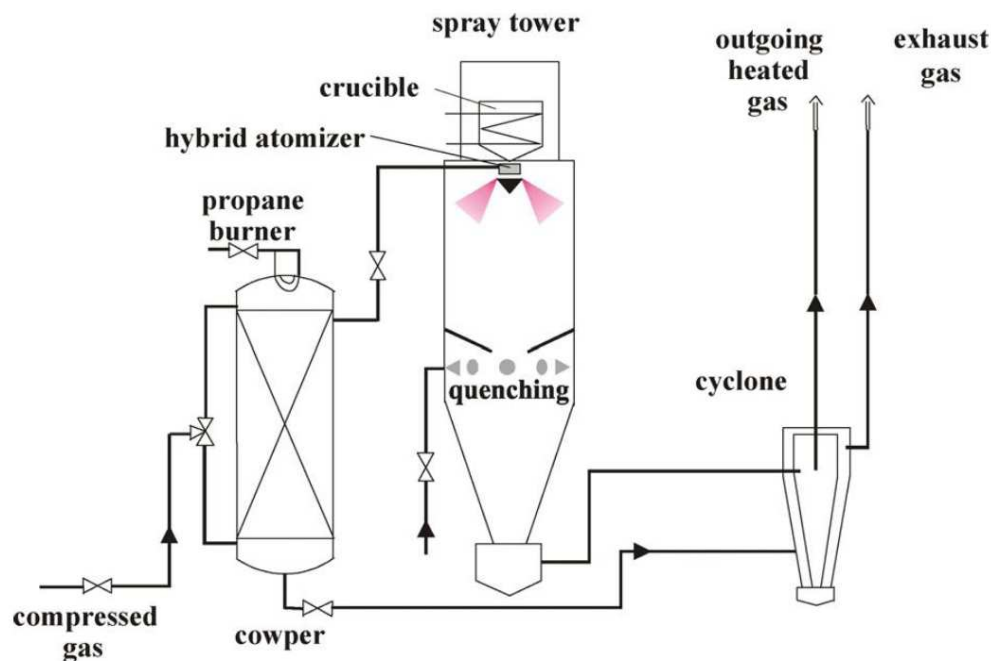


b. نتایج آزمایشی برای اتمیزه شدن گلیسیرین به وسیله ی هوا

a. نتایج آزمایشی برای اتمیزه شدن آب به وسیله ی هوا

آزمایشات مذاب

برای اتمیزه شدن مذاب های ویسکوز به وسیله ی روش افشانک ترکیبی، یک واحد صنعتی برای اتمیزه شدن گاز به کار گرفته شده است. ترتیب آن در شکل زیر نشان داده شده است. بخش اصلی واحد صنعتی، یک برج اسپری است (حدود ۵/۵m ارتفاع). روی برج اسپری ماده به وسیله ی یک دستگاه گرمکن القایی ذوب می شود. وقتی ماده اتمیزه می شود، از سرباره ی کوره بلند برای آزمایشات استفاده می گردد. دمای مذاب قبل از اتمیزه شدن در ۱۸۱۳ تا ۱۸۴۳K با یک دمای متوسط ۱۸۲۶K اندازه گیری شده است. در میان عمق بوته ی ریخته گری مذاب به دلیل گرانش در سرعت های جریان جرمی مذاب بالای ۳۰۰kg/h

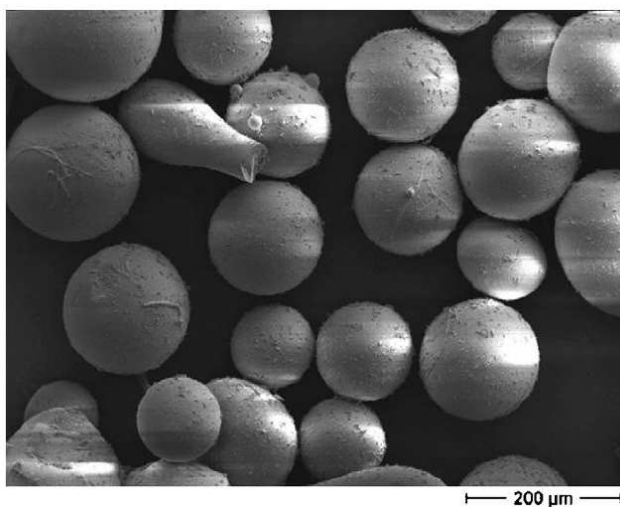


انجام تجربی واحد صنعتی اتمیزه شدن گاز گرم و نازل اتمیزه شدن

به بیرون جریان می یابد. افشانک ترکیبی در زیر بوته قرار می گیرد که با استفاده از گاز گرم شده عمل می کند. دماهای گاز بالای ۱۲۷۳K و فشار گاز بالای ۲bar در داخل آزمایش های اتمیزه کردن ترکیبی پی برده شده است. گاز گرم به وسیله ی مبدل حرارتی ناپیوسته (cowper) تولید می شود. ماده ی بالک سرامیکی داخل cowper به وسیله یک کوره ی پروپانی گرم می شود. بعد از این فرایندهای گرم شدن، گاز

یا بخار کمپرس شده در میان cowper دمیده می شود. مقادیر از پیش تنظیم شده ی دمای گاز و فشار گاز اتمیزه شدن به وسیله ی مخلوطی از گاز گرم شده از cowper با گاز درون اتاق به دست آمده است. قطرات کوچک مذاب نتیجه شده در اسپری ممکن است کونچ شود و حدود ۲m زیر نازل اتمیزه شدن جامد گردد. پودر جامد شده در ته برج اسپری جمع آوری می شود. بخشی از پودرها در زیر سیکلون ته نشین می شود.

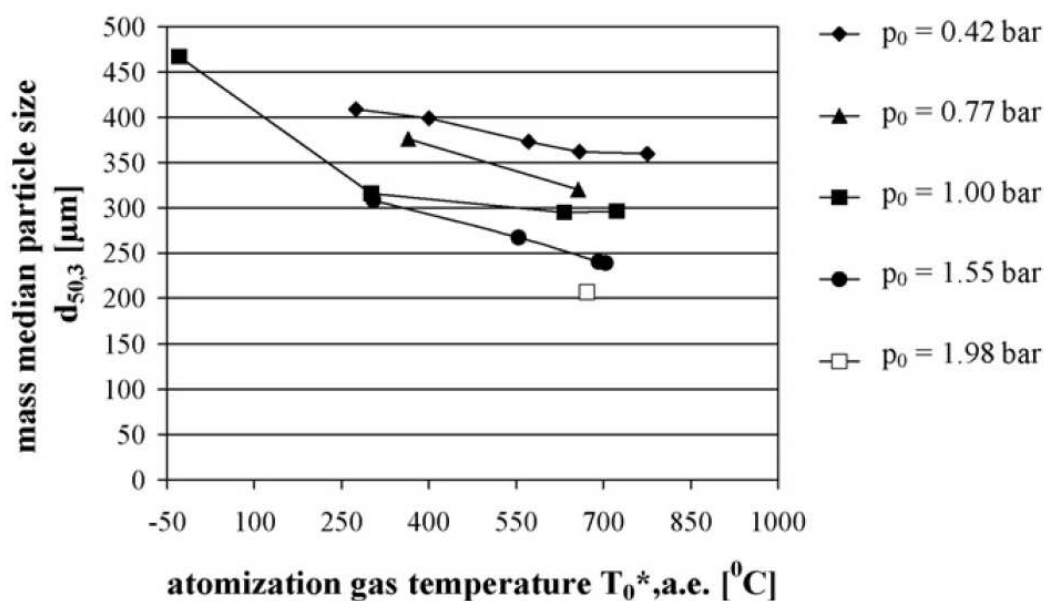
شکل زیر هم یک تصویر SEM از پودر اسپری شده از آزمایش اتمیزه شدن مذاب معدنی با استفاده از سیستم اتمیزه شدن ترکیبی را نشان می دهد. کسری از ذرات اسپری شده در محدوده ۱۱۰ تا ۳۵۰ μm در شکل نشان داده شده است. اساساً ذرات دیده شده کروی هستند. در کل کسر ذرات به ذرات فیبری، بالای ۹۰٪ می باشد.



میکروگرافی از ذرات مذاب مینرالی اتمیزه شده با گاز گرم (اندازه ذرات ۱۱۰-۳۵۰ μm)

شکل زیر اندازه ذراتی که از اتمیزه شدن این مذاب سرپاره ای معدنی در دماها و فشارهای گازی اتمیزه شدن مختلف ناشی می شود را نشان داده است. متوسط اندازه ذره بر حسب دمای گاز اتمیزه شدن رسم شده است. دمای گاز درج شده در گراف، دمای بعد از انبساط است. ماکزیمم دمای گاز قبل از انبساط ۱۲۷۳K است. با افزایش دمای گاز و افزایش فشار گاز، اندازه ی ذره کاهش می یابد. برای تنظیم شرایط

آزمایشی مینیمم متوسط اندازه ذره به دست آمده $210\ \mu\text{m}$ است. در مقایسه با آزمایش های مدل و ویژگی های گلیسیرین، مینیمم اندازه ذره بزرگتر است. این نتایج از ماکزیمم دمای گاز اتمیزه شدن قابل دسترس در تأسیسات به دست آمده است. دمای به دست آمده هنوز در مقایسه با دمای مذاب بسیار پایین است. قبل و در مدت فرایند تجزیه، مذاب سریعاً خنک شده است، بنابراین ویسکوزیته افزایش می یابد و کارایی تجزیه محدود شده است.



نتایج آزمایشی اتمیزه شدن مذاب مینرالی در سرعت $1500\ \text{min}^{-1}$ در دیسک زاویه ای

آنالیز انجماد در فرایند اسپری به روش اتمیزه کردن:

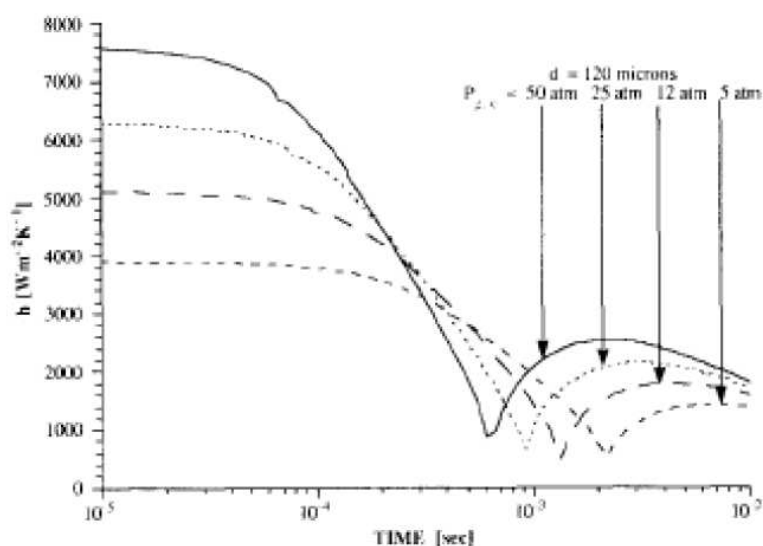
اسپری به روش اتمیزه کردن یک فرایندی برای تولید ذرات است. در این فرایند جریان مذابی از فلز با پراکندگی مناسبی از قطرات به وسیله ی جت گازی با سرعت بالا تفکیک شده است. براین قطرات نیمه جامد شده به سمت یک زیر لایه (جایی که برخورد می کنند) هدایت می شوند و به شکل میله هایی سریعاً جامد شده جمع آوری می شوند. سرعت های بالای جامد شدن به دلیل نازکی میله ها و استخراج سریع گرما در اتمسفر خنثی در طول برخورد به دست می آید. مدل به صورت زیر می باشد: تولید قطرات فلزی به وسیله ی فشار بالای اتمیزه شدن گاز خنثی که واکنش گاز - قطره و برایندی از توابع اندازه ی قطره را در

بردارد، مدل جوانه زنی فاز جامد مورد انتظار که به اندازه‌ی قطره بستگی دارد، تاریخچه‌ی گرمایی و جامد شدن قطرات در پرواز. تأثیر پارامترهای فرایند مثل فشار گاز اتمیزه کردن، زاویه‌ی ترشوندگی، ویژگی‌های هندسی اتمایزر و بوته‌ی تغذیه، فاصله‌ی بین نازل‌های اتمیزه کردن و زیرلایه، روی ساختار نهایی ارزیابی می‌شود. به عنوان نتیجه‌ی آنالیز، انتخاب بهینه‌ی پارامترهای فرایند می‌تواند برای تولید ریزساختار مناسب ایجاد شود.

نکات:

(۱) کاهش قطر روزنه‌ی لوله‌ی ریزش، یکنواختی اندازه‌ی ذره در رسوب را بهبود می‌دهد. افزایش فشار باعث باریک شدن محدوده‌ی اندازه می‌شود.

(۲) ضرایب انتقال گرما شدیداً با زمان تغییر می‌کند، ابتدا منحنی قبل از گذشت یک هزارم ثانیه کاهش شدیدی می‌یابد و به یک مینیمم موضعی می‌رسد، دوباره به یک ماکزیمم موضعی افزایش می‌یابد و سپس به طور آهسته کاهش می‌یابد. بالاترین مقادیر ضریب انتقال گرما مربوط به اندازه‌های قطره‌ی کوچک هستند.



تکامل ضریب انتقال گرمایی ($\text{wm}^{-1}\text{k}^{-1}$) بر حسب زمان (s) برای فشارهای در رنج ۵-۵۰ atm با اندازه μm

۳) تاریخچه‌ی گرمایی، از دست دادن حرارت در اثر سرد شدن را نشان می‌دهد. مقادیر تحت تبرید از محدوده‌ی ۱۶۵K-۱۵۷ برای قطراتی با اندازه‌های ۱۲۰-۲۰ μm که در فشار ۱۲atm اتمیزه شده‌اند و یک زاویه‌ی ترشوندگی ۹۰° دارند شروع میشود. وقتی که حفره‌ی برای جوانه زنی فعال وجود داشته باشد، فقط مقادیر تحت تبرید ۳K-۱ مورد نیاز است. به طور عکس، زمان‌های جوانه زنی با افزایش فشار اتمیزه کردن کاهش می‌یابد. زاویه‌ی ترشوندگی اثر شدیدی روی پارامترهای جوانه زنی دارد. برای یک انتخاب بسیار خوب از پارامترهای فرایند آگاهی از زاویه‌ی ترشوندگی لازم است.

۴) سرعت‌های گاز به طور سریع با فاصله کاهش می‌یابد. اتمیزه کردن در ناحیه‌ی برخورد بین گاز و مایع در سرعت‌های گازی فوق صوت فقط برای فشارهای خیلی زیاد ۹atm اتفاق می‌افتد.

۵) سرعت‌های قطرات تغییرپذیری (قابلیت تنظیم) خوبی را با فشار اندازه‌ی قطر و فاصله‌ی پرواز نشان می‌دهد. کوچکترین اندازه‌ی قطرات بالاترین سرعت‌های ماکزیمم را دارند. بزرگترین قطرات در اندازه‌ی آن‌هایی هستند که بالاترین سرعت‌ها را در هر فشار اتمیزه کردن دارند.

۶) رنج سرعت‌های فریز کردن از $8/5 \times 10^4$ تا $2/4 \times 10^3$ K/S است. پارامتر فرایند اصلی مؤثر بر سرعت فریز کردن، اندازه‌ی قطرات است.

۷) مقدار کسر جامد شده‌ی به دست آمده از قطرات در طول فرایند جامد شدن، وابسته به اندازه و فشار است. با اندازه‌ی قطره‌ی بزرگتر و فشارهای اتمیزه کردن پایین‌تر قطرات شامل کسر جامد شده‌ی کمتری هستند.

۸) سرعت انتشار پیشین جامد-مایع در طور از دست دادن حرارت $3-6,7$ m/s است و این سرعت بعد از پس دهی حرارت $2-6$ mm/s می‌شود.

۹) در این روش در مقایسه با فرایند اتمیزه کردن جریان جت گازی سرعت بالای معمولی، پودرهای ریزتر با توزیع اندازه ی باریکتری به دست می آید.

۱۰) اندازه ی ذره پودرهای آماده شده شدیداً تحت تأثیر حالت ذرات نمک در جریان گاز است. مقدار نسبی بالاتر ذرات نمک در جریان جت گازی، سرعت پرواز ذرات نمک و اندازه ی باریکتر ذرات نمک، باعث اندازه ی ریزتر پودرهای اتمیزه شده می شود.

آنالیزهای فرایندهای اتمیزه کردن:

اتمیزه کردن سوخت‌های سیال می‌تواند مخلوطی از ترکیبات قابل احتراق (جامد، مایع، گاز) باشد. تجزیه‌ی هر سوخت سیال به دلیل بعضی از پدیده‌ها مثل اغتشاش، واکنش ایرودینامیکی، میکرو احتراق اتفاق می‌افتد. یک قطری برای قطره ی پایدار برای هر پدیده وجود دارد. فرایندهای اتمیزه کردن پیچیده شامل این ترکیب پدیده هاست. قطر نهایی قطره معادل با قطر مینیمم است. این استدلال سازماندهی محاسبات قطر نهایی قطره و البته بحث در مورد فرایند اتمیزه کردن را آسان می‌کند.

به طور متداول اتمیزه کردن مایع خالص در نظر گرفته می‌شود و این توجه معمولاً براساس پدیده ی انتخاب شده ای است که فرض می‌شود به طور کامل بر فرایند اتمیزه کردن غلبه کند. مثال هایی از این پدیده‌ها به صورت زیر هستند: ۱) اغتشاش مایع در یک اتمایزر ۲) ارتعاش مایع که به وسیله ی اغتشاش مایع تولید می‌شود ۳) ارتعاش مایع که به وسیله ی واکنش با گاز اطراف تولید می‌شود ۴) اغتشاش گاز اتمیزه کردن ۵) واکنش ایرودینامیکی بین مایع و گاز به دلیل اختلاف سرعت.

ترکیب کردن مایع‌ها می‌تواند به وسیله ی analogy مایع خالص بحث شود. در نظر گرفتن یکی از پدیده‌های انتخاب شده، مقداری را برای قطر ماکزیمم، d_i ، حالت پایدار قطره در شرایطی که برای پدیده ی تحت نظر فرض می‌شود، ایجاد می‌کند. به هر حال پدیده‌های مختلفی می‌تواند به طور همزمان در هر فرایند اتمیزه کردن اتفاق بیفتد. این پیشنهاد شده است که قطر متوسط نهایی، d_i ، را محاسبه کنیم که معادل با کوچکترین مقدار در میان مقادیر دیگر، d_i ، است:

$$d = \min[d_i]$$

معادله (۱)

چون هر قطره ای با قطر d_i بزرگتر از d در پدیده ای که قطراتی با کوچکترین مقدار d تولید می‌شود، ناپایدار است.

حال مشکلی که وجود دارد این است که چطور معادله ی (۱) را توجیه کنیم. اینجا در مورد مایعی که به وسیله ی فشار خودش اتمیزه شده است مثالی زده شده که در آن ترکیب سه پدیده ی ۱ و ۲ و ۳ اتفاق افتاده است. به دلیل سرعت زیاد مایع و برآیند شدید اغتشاش توسعه یافته، جدایش اولیه ($i=1$) مایع به طور ناگهانی بعد از خروج از دهانه ی نازل اتفاق می افتد. با بررسی این فرایند هم به صورت تئوری و هم به صورت تجربی، مقدار قطر d_1 قطرات تولید شده می تواند تعیین گردد.

سپس اگر اختلاف زیادی در سرعت قطره اولیه و سرعت گاز وجود داشت، جدایش ثانویه ($i=2$) قطرات به دلیل واکنش ایرودینامیکی بین گاز و قطرات اتفاق می افتد. با استفاده از مقیاس تشابه weber این ممکن است تا قطر d_2 برای قطره ی حالت پایدار که در پدیده ی جدایش ثانویه تولید شده است، تعیین گردد. سپس اگر مایع شامل بعضی از اجزایی باشد که وقتی قطره پیش گرم می شوند، بتوانند به تولیدات گازی تجزیه شوند، ریز احتراق قطره می تواند اتفاق افتد و این یک ($i=3$) احتمال سوم. جدایش قطره است. آنالیز مناسب مقدار d_3 را برای قطر قطرات حالت پایداری که در پدیده ی جدایش ماده ی زیر احتراق تولید شده اند به دست می دهد

بر طبق معادله ی (۱) قطر d قطرات تولید شده در فرایند اتمیزه شدن کلی به صورت زیر است:

$$[d_2, d_3]$$

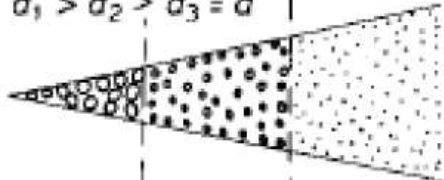
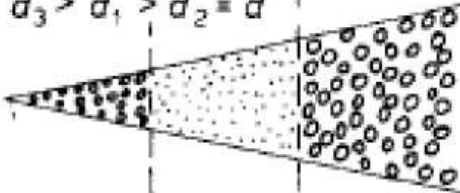
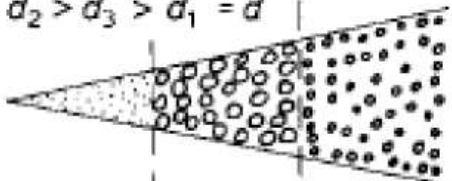
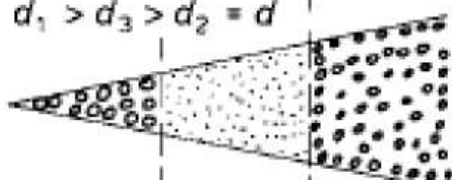
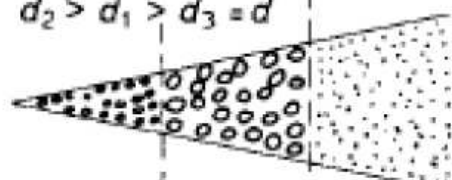
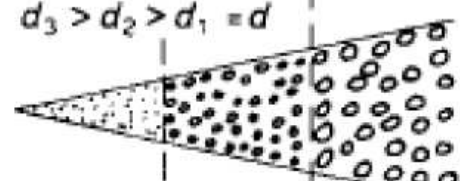
و شش مقدار احتمالی برای قطر وجود دارد (شکل ۲):

مورد ۱ وقتی که $d_1 > d_2 > d_3$ است. بر طبق معادله ی (۲) قطر متوسط قطرات نهایی که در فرایند اتمیزه شدن کامل تولید می شود، $d \equiv d_3$ است. بنابراین مکانیزم قاطع پدیده ی جدایش ماده ی ریز احتراق است و تعیین مقدار d از در نظر گرفتن ریز احتراق نتیجه می شود. تجزیه ی اولیه ی اغتشاش نه وابسته به ایرودینامیک قطره و نه وابسته به مکانیزم گرمایی ریز احتراق است که همیشه دارد اتفاق می افتد و بنابراین این را باید همان مورد ۱ در نظر گرفت. قطرات بزرگی که در جدایش اولیه تولید می شوند- اگر زمانی برای پیش گرم کردن آن‌ها به اندازه ی کافی وجود نداشته باشد- نخست با جدایش ثانویه برخورد می کنند که قطرات کوچکتری را تولید می کند و بعد از پیش گرم کردن مناسب آن‌ها فرایند جدایش سوم می و نهایی که قطرات کوچکتری تولید می کند را تحمل می کنند. به هر حال اگر پیش گرم کردن قطرات به اندازه ی کافی سریع باشد، زمانی برای جدایش ثانویه وجود ندارد و ریز احتراق قطرات به طور ناگهانی بعد از جدایش اولیه اتفاق می افتد. بنابراین در مورد (۱) پیدایش جدایش ثانویه ی ایرودینامیکی محتمل است اما قطعی نیست.

به تناسب همه ی موارد دیگر هم به همین نحو می شود. مورد (۲) وقتی است که $d_3 > d_1 > d_2$ که بعد از جدایش اولیه (اغتشاش) جدایش ثانویه (ایرودینامیکی) اتفاق می افتد و قطعی است که $d = d_2$. فرصتی برای جدایش سوم (ریز احتراق) وجود ندارد، زیرا توجه به پدیده ی ریز احتراق قطره، قطر d_3 بزرگتر از قطر d_2 را برای پدیده ی ترکیب قبلی می دهد ($d_3 > d_2$).

مورد (۳) وقتی است که $d_2 > d_3 > d_1$. جدایش اولیه ای (اغتشاش) که ظاهر می شود نخست قطر نهایی ($d = d_1$) را تعیین می کند و هیچ ترکیب پدیده ی دیگری نمی تواند اتفاق بیفتد، زیرا بسیاری از قطرات مجبورند قطرشان را افزایش دهند ($d_2 > d_1$ و $d_3 > d_1$).

مورد ۴ وقتی است که $d_1 > d_3 > d_2$. جدایش اولیه (اغتشاش) قطرات بزرگی را تولید می کند و جدایش ثانویه (ایرودینامیکی) است که غالب است ($d = d_2$). اگر پیش گرم کردن قطره خیلی سریع بعد از جدایش اولیه اتفاق افتد، احتمال سوم وجود دارد، احتمال ریز احتراق می تواند بعد از ایرودینامیکی اتفاق افتد.

Case number	Order of diameters and symbolic scheme of jet	Statement about possible means of disintegration with the decisive mechanism in capitals
1	$d_1 > d_2 > d_3 = d$ 	Yes : turbulent MICROEXPLOSIVE Prob.: aerodynamic
2	$d_3 > d_1 > d_2 = d$ 	Yes : turbulent AERODYNAMIC No : microexplosive
3	$d_2 > d_3 > d_1 = d$ 	Yes : TURBULENT No : aerodynamic microexplosive
4	$d_1 > d_3 > d_2 = d$ 	Yes : turbulent AERODYNAMIC Prob.: microexplosive
5	$d_2 > d_1 > d_3 = d$ 	Yes : turbulent MICROEXPLOSIVE No : aerodynamic
6	$d_3 > d_2 > d_1 = d$ 	Yes : TURBULENT No : aerodynamic microexplosive

مقادیر قطری ممکن در مثال مطرح شده ی تمیزه کردن.

مورد ۵ وقتی است که $d_2 > d_1 > d_3$. فرصتی برای جدایش ایردوینامیکی وجود ندارد که اتفاق بیفتد. زیرا جدایش اولیه قطراتی کوچکتر از قطر تولید می‌کند. بنابراین بعد از جدایش اولیه، قطعاً جدایش سوم (ریز احتراق) ($d=d_3$) ظاهر می‌شود.

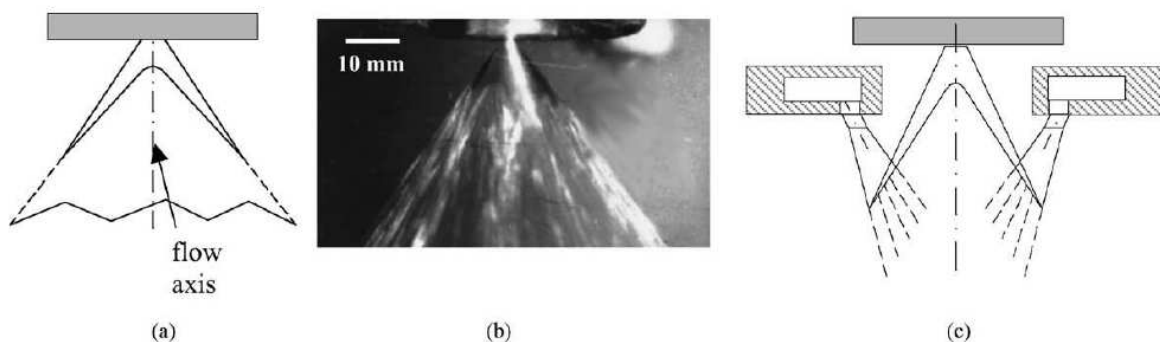
مورد ۶ وقتی است که $d_3 > d_2 > d_1$. هیچ فرصتی برای پدیده‌های جدایش سوم یا دوم وجود ندارد. زیرا جدایش اولیه (اغتشاش) کوچکترین قطرات را تولید می‌کند و بنابراین قطر قطرات نهایی $d=d_1$ است.

فرایند اتمیزه شدن برای پودر فلزی:

یک فرایند اتمیزه شدن جدیدی توسعه یافته است که ترکیبی از اتمیزه شدن گازی و فشاری است. مذاب با فشار نازل به صورت یک فیلم نازک توخالی مخروطی شکل خارج می‌شود. بعد از مرحله‌ی پیش‌فیلم (pre-filming)، مذاب به وسیله‌ی یک جریان گازی که با یک حلقه‌ی نازل فرستاده می‌شود، اتمیزه می‌شود. اهداف این بررسی این است تا یک توزیع اندازه‌ی کم و مصرف پایین گاز به طور خاص را در مقایسه با تکنیک اتمیزه شدن گازی متداول به دست آوریم. هر دو باعث کارایی بالاتر و قیمت‌های پایین‌تر می‌شود. قلع و برخی آلیاژها به طور موفقیت‌آمیزی با این تکنیک اتمیزه می‌شود. قطرهای میانگین جرمی از آزمایشات مختلف بین ۲۰ تا $100 \mu\text{m}$ است. آنالیزهای الک کردن پودر قلع، توزیع اندازه ذره‌ی نزدیک به هم را نشان می‌دهد.

تکنیک اتمیزه شدن جدید یک نازل فشاری متداولی را استفاده می‌کند و یک اختلاف فشار بالای 1/0MPa فلز مذاب شده را به درون یک محفظه‌ی چرخشی هل می‌دهد، به طوری که مذاب به داخل جریان می‌یابد، تا وقتی که به اندازه‌ی کافی فشار به آن وارد شود تا نازل فشاری را در میان یک روزنه‌ی استوانه‌ای کوچک رها کند. در خارج، به دلیل نیروی گریز از مرکز یک فیلم نازک مخروطی تولید می‌شود. (شکل (a) ۱). ضخامت فیلم با جهت جریان کاهش می‌یابد. شکل (b) فوتوگرافی از فرایند CHA (Atomization Centrifugal Hydraulic): اتمیزه شدن هیدرولیکی گریز از مرکز را در هنگامی که

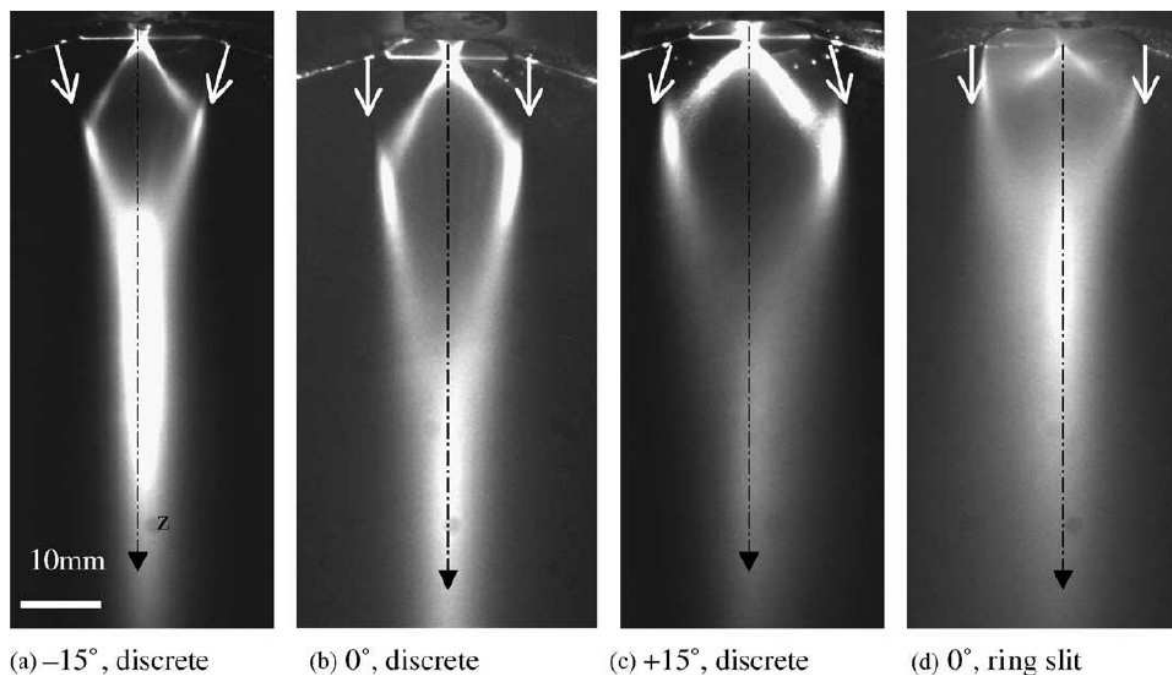
مذاب نازل فشاری را ترک می کند نشان می دهد. بعد از ۱۵-۱۰mm مسافت در سطح مخروط، فیلم نازک پیوسته شروع به جدا کردن روزنه های کوچک تشکیل شده می کند. این امر باعث جدایش لیگامنت های (پیوندهای) بزرگ می شود. فیلم نازک سطح ایده آلی را برای جدایش کارآمد در میان قطرات کوچک به وسیله ی جت های گازی با سرعت بالا فراهم می کند. یک شماتیکی از این فرایند در شکل (c) نشان داده شده است.



شماتیکی از CHA. (a) مقطع عرضی فیلم مخروطی. (b) فوتوگرافی CHA با آلیاژ قلع. (c) شماتیکی از تکنیک اتمیزه شدن جدید (۷)

جزئیات فرایند اتمیزه شدن شناخته و بررسی نشده است. به منظور توسعه ی این فرایند آزمایشات اولیه به جای فلز ذوب شده با آب و به جای نیتروژن با هوا انجام می شود. هدف از این آزمایشات مطالعه ی واکنش بین جریان گازی و فیلم مایع می باشد. در طول این بررسی، چندین پارامتر تغییر می کند (سرعت جریان آب، سرعت جریان گاز یا فشار گاز در نازل گازی و طراحی نازل گازی). شکل یک مثالی از تصاویر light sheet لیزری را نشان می دهد. ناحیه های روشن (بدون روکش) فیلم آب و ذرات اتمیزه شده را نشان می کند. فیلم آب از نازل خارج می شود و یک فیلم مخروطی را می سازد که به وسیله ی جریان گازی اتمیزه می شود (پیکان های سفید برای نشان دار کردن خروج جریان گاز و جهت جریان اولیه استفاده شده است). به طور کلی نازل های جت جدا از هم (آرایه ی محوری روزنه های استوانه ای) و زوایای برخورد محوری مختلف (15° ، 0° ، -15°) استفاده شده است. میتوان مشاهده کرد که جهت های جریان گاز

مختلف مؤثر بر رأس زاویه ی فیلم آب به صورت مخروطی است. علاوه بر این از نازل ring-slit استفاده شده است. تصویر light sheet لیزری نشان می دهد که فیلم آب بیشتر مؤثر است (شکل زیر). همچنین مشاهده میشود که بسیاری قطرات به نازل گازی برخورد می کنند که می تواند باعث مشکلات مهمی در مورد فلز ذوب شده گردد.



تصاویر متمایز شدن laser light sheet آب با تکنیک متمایز شدن جدید، طراحی های نازل گازی مختلف، جریان گازی ثابت 45 kg/h ، جریان آب ثابت تقریباً 50 kg/h (۷)

تکنیک متمایز شدن جدید ترکیبی از یک نازل فشاری (تمایز شدن هیدرولیکی گریز از مرکز) و یک نازل گازی توسعه یافته است. این تکنیک به وسیله ی مشاهده ی الگوهای جریان با laser light illumination و اندازه گیری فشار استاتیکی در مجاورت مذاب خروجی اصلاح شد. برای اولین بار، فلزهای ذوب شده (قلع خالص و بعضی آلیاژها) با این روش جدید با استفاده از سرعت های جریان گازی مختلف به طور موفقیت آمیزی متمایز شدند. پودر قلع به وسیله ی الک کردن و laser light diffraction آنالیز شد. هر دو تکنیک اندازه گیری نتایج مختلفی را برای قطر متوسط توده (d_{50}) و

مشخصه ی توزیع اندازه ذره (d_{84}/d_{50}) ارائه می دهد. کاهش در اندازه ی متوسط ذره با افزایش سرعت جریان گاز می تواند به وسیله ی یک قانون اکسپوننشالی منفی توصیف شود. برای مقایسه با دیگر تکنیک های اتمیزه شدن این نیاز وجود دارد تا همان روش ها برای آنالیز پودر فلزی را استفاده کنیم. آنالیز الک کردن نشان می دهد که یک متوسط قطره ذره بزرگتری که تقریباً $15\mu\text{m}$ است، بزرگتر از آنی است که به وسیله ی **lazer light diffraction** و یک نسبت قطر بسیار بهتر (d_{84}/d_{50}) در حدود $1/6$ اندازه گیری می شود. یک توزیع اندازه ذره ی باریک، پارامتر کلیدی برای بازده و بهره وری بالاتر است.

رسوب به روش اسپری با استفاده از تکنیک اتمیزه شدن ضربه ای:

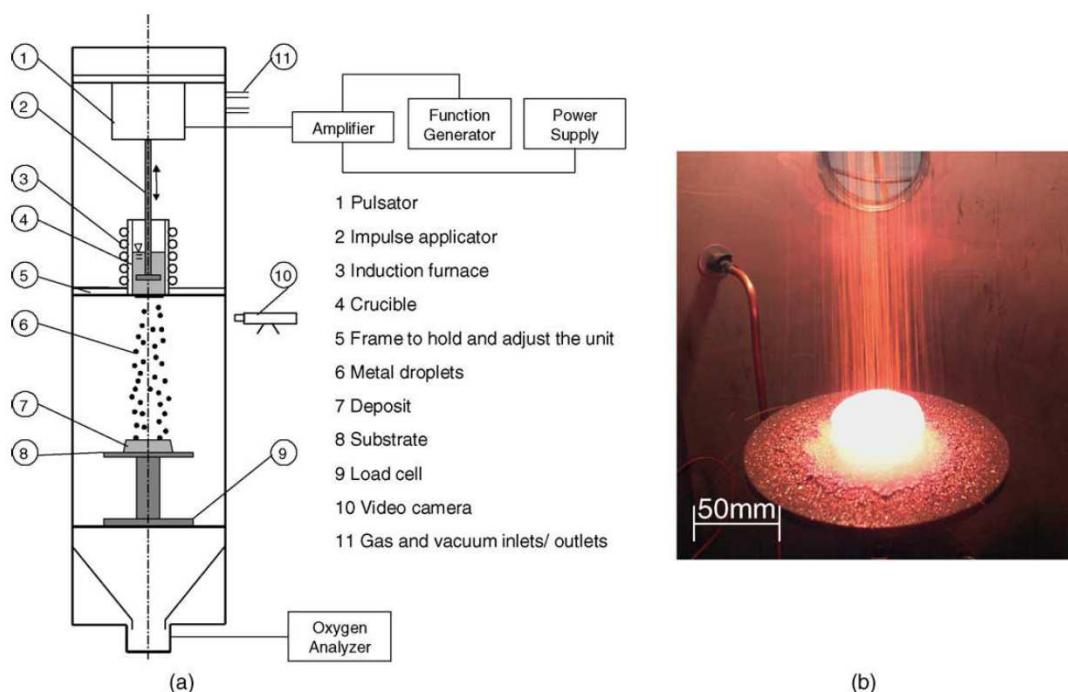
اتمیزه شدن ضربه ای تکنیک جدیدی است که برای رسوب به روش اسپری استفاده شده است. این تکنیک تک سیال باعث مشخصه های اسپری مختلف و شرایط ضربه ی متفاوت قطرات می شود در مقایسه با تکنیک اتمیزه کردن گازی که تکنیک متداول مورد استفاده برای رسوب به روش اسپری است. آزمایشات رسوب با آلیاژ Cu-6wt\%Sn انجام می شوند تا تناسب اتمیزه کردن ضربه ای را بالا ببرند تا ماده ی متراکمی تولید کنند. براساس این آزمایشات، مدلی توسعه داده شده تا تاریخچه ی گرمایی و سرعت های انجماد موضعی ماده ی رسوب شده را شبیه سازی کند. مطالعات عددی نشان می دهد که چطور شرایط سرد کردن مختلف بر روی سرعت انجماد ماده تاثیر می گذارد.

مراحل آزمایش:

یک شماتیکی از فرایند اتمیزه کردن ضربه ای (a) و یک تصویری از رسوب به روش اسپری (b) در شکل نشان داده شده است.

فلز در یک بوته ی القای گرمایی ذوب می شود. ترموکوپل داخل مذاب دمای واقعی مذاب را نشان می دهد. بعد از رسیدن به دمای مناسب، مذاب در میان روزنه ی صفحه ی فلزی در عمق بوته به وسیله ی اعمال کننده ی ضربه که به پولساتور متصل شده است، هل داده می شود. قطرات قبل از این که روی زیر

لایه در محفظه ی اسپری فرود آیند در میان اتمسفر گاز خنثی (نیتروژن) خنک می شود. در اتمسفر خنثی با ۲۰۰ppm اکسیژن در برج به وسیله ی سه مرتبه پاکسازی با گاز خنثی به دست می آید.



(a) واحد اتمیزه شدن ضربه ای (b) تصویری از رسوب به روش اسپری

در نتیجه این که یک آلیاژ مسی (Cu-6wt%Sn) به وسیله ی اتمیزه کردن ضربه ای اتمیزه می شود و سپس روی یک زیر لایه ی چرخان رسوب داده می شود تا یک رسوب استوانه ای تولید کند. ماده دانسیته ی بالا و بازده بسیار قابل قبولی را نشان می دهد.

چهار پارامتر به طور قابل توجهی مؤثر بر سرعت انجماد هستند که شامل جریان مذاب، خنک سازی

زیرلایه، بهبود

مقاومت اتصال بین رسوب و زیرلایه و انتقال گرما است. اگر رسوب از لحاظ ضخامت کمتر از یک میلی متر شد، جریان مذاب و خنک سازی زیر لایه می تواند تا سرعت های سرد کردن بالایی را برای کل رسوب با ۶۰mm ارتفاع تامین کند.

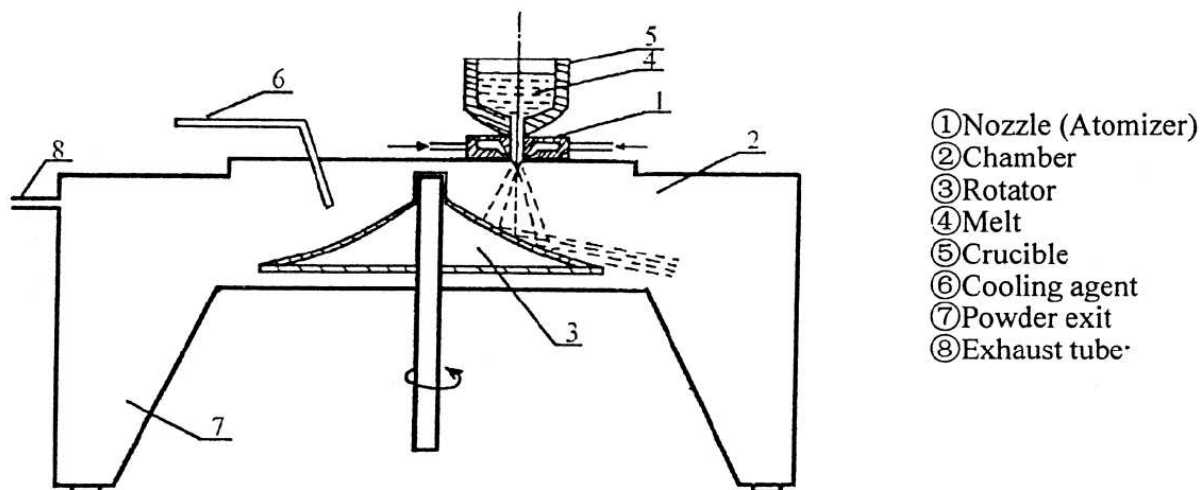
مطالعه ی انجماد سریع با تکنیک اتمیزه کردن و تولید پودرهای آلیاژ فلزی:

تکنیک های اتمیزه کردن گاز خنثی با فشار بالا (HPIGA)، اتمیزه کردن گازی آلتروسونیک (USGA)، اتمیزه کردن چرخان گریز از مرکز (CSA) و اتمیزه کردن با سریع سرد کردن دو مرحله ای (TSQA) استفاده می شوند تا پودرهای آلیاژی فلزی مختلفی را تولید کنند و این پودرها مورفولوژی ها و ساختارهای مختلفی دارد. سرعت سرد کردن در این روش ها حدود 10^3-10^5K/S است. سرعت سرد کردن این تکنیک سریع سرد کردن دو مرحله ای به طور قابل توجهی بالاتر از آنی است که در یک اتمیزه کردن گازی تک مرحله ای متداول و اتمیزه کردن گازی آلتروسونیک به دست می آید. اما پودرهایی که به وسیله ی تکنیک سریع سرد کردن دو مرحله ای آماده می شوند، یک مورفولوژی ورقه ورقه شده با یک شکل دیسکی دارد.

آزمایش:

دستگاه اتمیزه کردن گازی فشار بالا که با دیسک چرخشی گریز از مرکز ترکیب شده است، در شکل زیر نشان داده شده است. این دستگاه اساساً شامل سه بخش است: نازل ها، دیسک چرخان و کوره ی ذوب القایی. ساختار نازل هایی که در آزمایش ما استفاده شده، به فرم باریک مدور است. آن ها به طور متداول در دو روش گوناگون مورد استفاده هستند: نازل مسدود و نازل سقوط آزاد. تمایز پودرها را با یک گاز اتمیزه کردن دینامیکی با فشار $4-8 \text{Mpa}$ تولید می کند، سپس ذرات ذوب شده به وسیله ی فشار بالای گاز شتاب داده می شوند و با چرخاننده ی مخروطی شکل برخورد می کنند (چرخاننده از مس ساخته شده است، ماکزیمم سرعت چرخش 7000rpm بود). ذرات مذاب شده به طور پیوسته می شکنند، به سرعت پرواز می کنند، به وسیله ی نیروی کشش سطحی کروی می شوند. عامل سردکننده آب یا نیتروژن مایع

است. گاز خنثی اتمیزه شدن مثل نیتروژن یا آرگون استفاده می شود تا جریان مذاب شکسته شود و پودرهای مذاب سرد شوند.

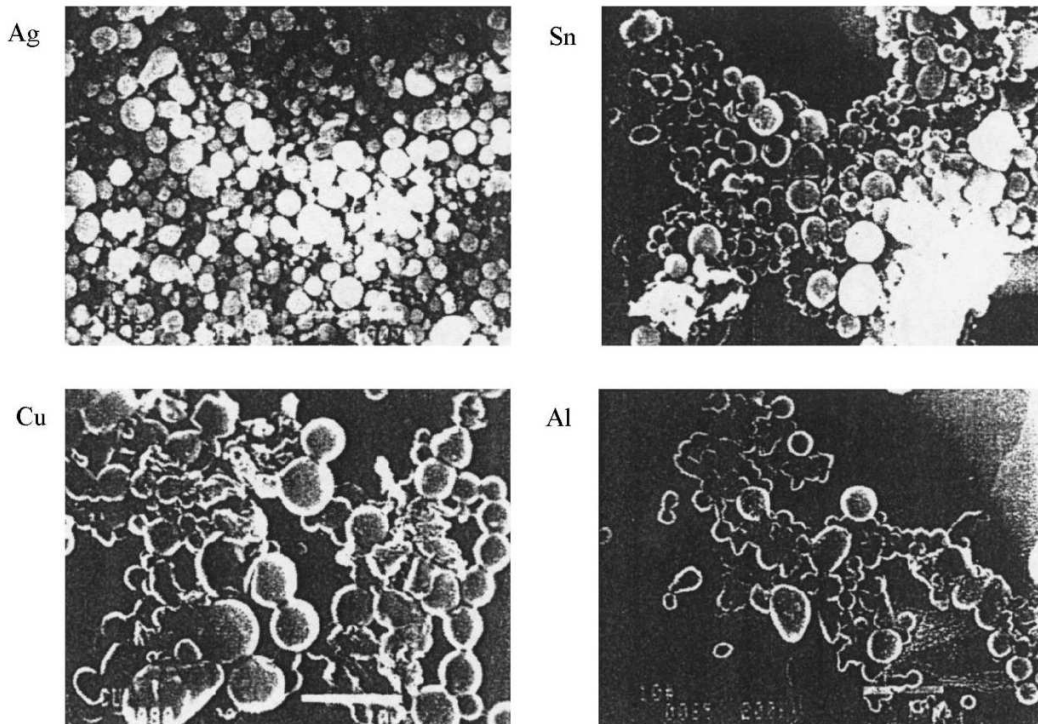


شکل ۱. دستگاه اتمیزه کردن HPGCRD (۸)

فرایند تولید پودرهای آلیاژ فلزی به صورت زیر است. اول، فلز یا آلیاژ در یک کوره ی القایی ذوب می شوند. دوم، مذاب درون اتمایزر جریان می یابد و به قطرات مذاب با اندازه های مختلف به وسیله ی گاز خنثی اتمیزه می شود. یک اندازه ی بحرانی از پودرها در یک فاصله ی پرشی کوتاه بین اتمایزر و دیسک چرخان وجود دارد، قطراتی که کوچکتر از اندازه ی بحرانی هستند، قبل از این که آن ها به دیسک برسند، جامد خواهند شد، آن ذرات درشت تر در حالت مذاب خواهند بود. دیسک چرخان فقط ذرات بزرگتر را می شکند. سرانجام همه ی ذرات با اندازه های مختلف به وسیله ی عامل سرد کننده جامد خواهند شد، در یک مخزن جمع آوری می شوند، آب تخلیه می شود، در خلأ خشک می شود و به وسیله ی الک طبقه بندی می شوند. توزیع اندازه ذره ی پودرهای اتمیزه شده به وسیله ی روش رسوب گذاری ثقلی اشعه ایکس و SEM اندازه گیری می شود.

مشخصه ی بعضی از پودرهای خیلی ریز فلزی

شکل ۲ اندازه و مورفولوژی بعضی از پودرهای فلزی اتمیزه شده را نشان می دهد که زیر SEM مشاهده شده اند. مورفولوژی این پودرهای، کروی یا شبه کروی است. متوسط اندازه ی ذره و مورفولوژی تقریباً مرتبط با بعضی پارامترهای اتمیزه شدن مثل دمای خیلی بالای مذاب، سرعت جریان جرمی مذاب و گاز، فشار گاز اتمیزه کردن و سرعت چرخش دیسک چرخان می باشد. نتایج تجربی نشان می دهد که پودرهای Ag, Cu, Sn, Al بسیار ریز هستند. قطر متوسط جرمی آن ها (D_{50}) معمولاً به کوچکی $12\ \mu\text{m}$ - ۸ است که به وسیله ی رسوب گذاری ثقیلی اشعه ی ایکس اندازه گیری می شود، قطرهای متوسط حدود $5\text{-}6\ \mu\text{m}$ است که به وسیله ی SEM اندازه گیری می شود. مقدار اکسید پودرهای آلومینیم معمولاً کمتر از $0.3\text{wt}\%$ است، مقدار اکسید برای آلیاژهای بر پایه ی نیکل کمتر از $0.3\text{wt}\%$ است.



SEM مورفولوژی های Ag, Cu, Sn, Al تولید شده به وسیله ی تکنیک HPGCRD

تکنولوژی اتمیزه کردن جامد و فرایند فلز و آلیاژ مذاب:

یک تکنولوژی اتمیزه کردن جامد با یک جریان جت گازی سرعت بالا توسعه یافته است که شامل ذرات نمک به عنوان واسطه ی اتمیزه کردن می باشد. پودرهای آلیاژی و فلزی با اندازه ذره ی ریزتر، با این تکنولوژی نسبت به آن هایی که با تکنولوژی اتمیزه کردن گازی معمولی تولید می شوند یک توزیع اندازه ی باریکتر و سرعت سرد کردن بالاتری دارند. فاکتورهای مؤثر روی اندازه ذره ی پودرهای فلزی آماده شده به ویژه اثر ذرات نمک Na-Cl آنالیز شده اند.

[1] V.Erukhimovitch and J.Baram, “Analysis of solidification in spray atomized and codeposited metal-matrix composites” ,Material Engineering Department; Ben-Gurion university of negev; Beer-shva; Israel.

[2] C.Czisch, U.Fritsching , “Atomizer design for viscous-melt atomization”
Chemical Engineering Department, University Bremen, Badgasteiner Str.
3,28359 ,Bremen, Germany

[3] Gerhard Wolf*, Hans Wilhelm Bergmann,”Investigations on melt atomization with gas and liquefied cryogenic gas” ,ATZ-EVUS, Kropfersrichter Strabe 6-8, D-92237 Sulzbach-Rosenberg, German.

[4] Enrica Boscoa,*Stefano Enzob, MNarcello Bariccoa , “X-ray analysis of microstructure in Au-Fe melt spun alloys “ , A Dipartimento di Chimica IFM-INFM, Universit “adi Torino, via Pietoro Giuria 9,Torino 10125, Italy

[5] Zhonghua Zhanga,*Yan Wangb, Xiufang Biana, “Microstructure selection map for rapidly solidified Al-rich Al-Ce alloys” ,The Key Laboratory of Liquid Structure and Heredity of Materials, School of Materials Science and Engineering, Ministry of Education,

[6] N.Ellendt a, R. Schmidt a, J. Knabea, H. Henein b, V. Uhlenwinkel , “Spray deposition using impulse atomization technique” , A Universitat Bremen, SFB 372, Badgasteinerstr. 3, Bremen 28359, Germany

[7] Stanislav Lagutkin b, Lydia Achelis a, Sheikhal Sheikhaliev , “Atomization process for metal powder”

a University Bremen, SFB 372, Badgasteiner Str.3,28359 Bremen, Germany

[8] J. Cai a,b, G.C. Mac, Z. Liud, H.F. Zhang a, Z.Q. Hua ,”Influence of rapid solidification on the microstructure of AZ91HP alloy” , a Shenyang National Laboratory for Materials Science, Institute of Metal Research,

[9] Chen Zhenhuaa,* ,Chen Ganga, Yan Honggea, Chen Dingb , “Solid atomization technology and process of molten metal and alloy”, School of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 140082, PR China