

مقدمه

آشنایی با متالورژی پودر

در مواردی که ساخت قطعه از روشهای دیگر امکانپذیر نباشد و یا مشکلی باشد چه در مورد فلزات و چه در مورد سرامیکها از متالورژی پودر استفاده می شود.

۱- ساخت قطعات متخلخل مثل فیلترها

۲- مواد دیرگداز فلزی و غیر ظریف (دمای ذوب مواد دیرگداز بالاست و شکل دادن آنها مشکل است).

الف) سرامیک های نسوز و یا دیرگداز ظریف مثل: سرامیک شمع اتومبیل یا پلاتین

ب) فلزات نسوز و یا دیرگداز ظریف مثل: فیلمانهای لامپ التهایبی

۳- ساخت قطعات کوچک و ظریف که احتیاجی به ماشینکاری ندارند و دقت بالایی مورد نیاز است. نظیر:

الف) چرخ دنده های کوچک (ساعت)

ب) قطعات ماشین های تکثیر و کپی

ج) قطعات ظریف لوازم صوتی

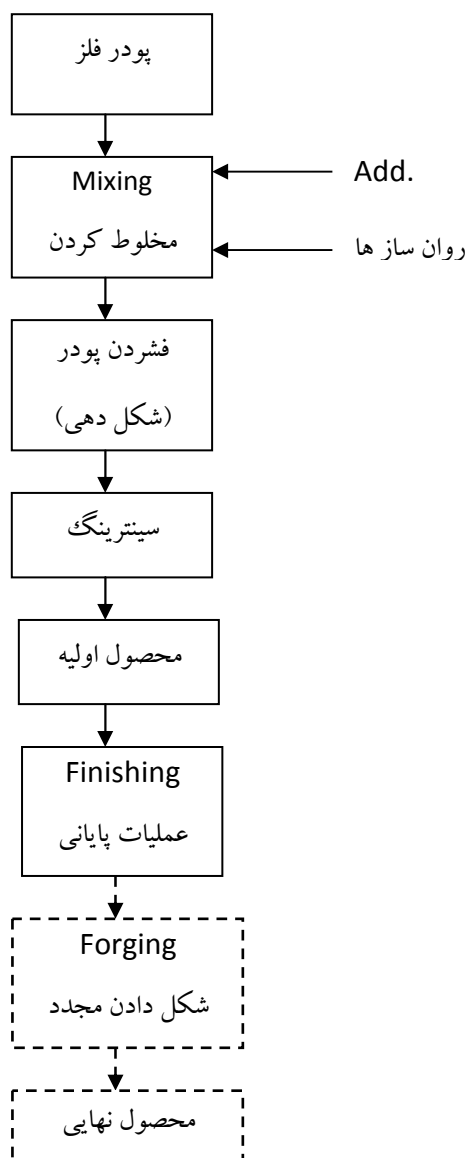
۴- مواردی که هموژن بودن قطعه مد نظر باشد. (در مواردی ممکن است پدیده Coming یا غیر یکنواخت بودن ساختار بوجود آید)

۵- تهیه مخلوط آلیاژی که به طریق ریخته گری امکان پذیر نیست.

۶- مواردی که جنبه های اقتصادی مدنظر باشد. بطور مثال اگر بخواهیم به دلیل گران بودن مواد مصرفی دورریز کمتر باشد.

۷- ساخت قطعات و ابزارهای بسیار سخت مثل: تیغهای الماسی

فلوجارت تولید قطعات به روش متالورژی پودر



انواع روشهای متالورژی پودر

PM - ۱

AUTOPM - ۲

- روش PM: برای قطعات غیر متحرک با قطعاتی که استحکام زیادی نمی خواهند استفاده می شود.
- روش Auto PM: برای قطعاتی که نیاز به استحکام و خواص مکانیکی دارند مانند قطعات خودرو

فصل اول: آشنایی با روش های تولید پودر فلزات

مقدمه:

به طور کلی روش های تولی پودر فلزات به سه دسته: ۱- روش های فیزیکی ۲- روش های شیمیایی ۳- روش های مکانیکی تقسیم بندی می گردد.

روش های فیزیکی

تمامی فلزات را به این علت که قابلیت ذوب شدن دارند می توان از این روش تهیه کرد. هر چه فلزی نقطه ذوب پایین تر و فشار بخار کمتر (پرت کمتر) و اکتیویته کمتری با محیط داشته باشد کاربرد این روش بیشتر است.

روشهای فیزیکی تهیه پودر

- ۱- روش اتمایزینگ (افشانش)
- ۲- روش گریز از مرکز (دیسک چرخان)
- ۳- روش اتمایزینگ در خلأ
- ۴- روش استفاده از امواج مافوق صوت
- ۵- روش استفاده از محیط پلاسما

۱-۱ روش اتمایزینگ (افشانش): (ATOMAIZING)

از نظر قیمت این روش گران ترین روش می باشد.

مقایسه پودرهایی که از این روش در سال ۱۹۸۱ در آمریکا تهیه شده است در جدول زیر آورده شده است. با وجود گرانی این روش اتمایزینگ کاربرد بیشتری دارد. نحوه ی کلی ایت روش برخورد یک سیال با مذاب است.

پودرها	مقدار کل پودر	مقادیر اتومایزینگ
Fe	۱۵۷۸۵۰	۷۸۹۰۰
Cu	۱۸۱۴۰	۱۵۴۰۰
آلیاژهای Cu	۳۱۷۵	۳۱۵
At	۳۶۳۰۰	۳۶۳۰۰
Ni	۴۵۵	-
Sn	۹۱۰	۹۱۰

در این روش مذابی را تهیه کرده پس مذاب از یک نازل خروجی خارج می گردد و سیالی مثل: آب- گاز یا هوا با سرعت خاصی به مذاب برخورد کرده و مذاب را به صورت اسپری در می آورد که با انجماد آن پودر فلزی تهیه می شود. اندازه ذرات پودر که با این روش تهیه می شود کمتر از $200 \mu m$ و اگر اندازه ذرات بیش از این مقدار باشد به آن اتومایزینگ گفته نمی شود. بطور کلی هر فلزی که امکان ذوب شدن آن وجود دارد (دارای فشار بخار فلز بالا باشد) می توان از آن پودر تهیه کرد.

ذره پودر است $200 \mu m < D_i$ اندازه ذرات

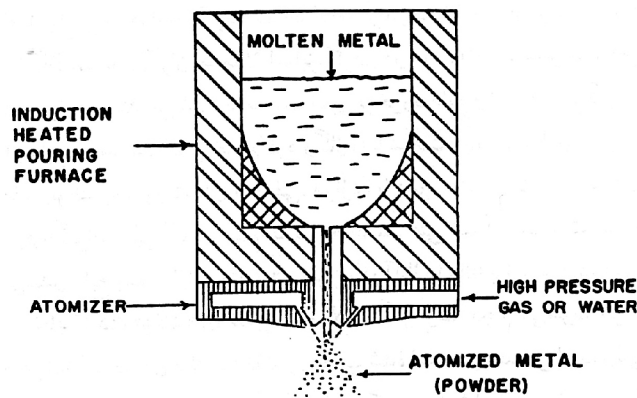
اتومایزینگ بطور کلی از یک کوره و یک برج خنک کننده تشکیل شده است. قسمت کوره شامل فلزی را به مذاب فلز تبدیل می کند که معمولاً کوره های الکتریکی می باشد. قسمت دوم برج خنک کننده می باشد که در این قسمت جتهایی وجود دارد که با فشار زیاد یک سیال را (آب یا گاز) به سمت خروجی مذاب با فشار هدایت می کند. این امر موجب عملاتی به نام اسپری کردن می شود. نتیجه آن تهیه پودر فلز می باشد. هر چه سیالیت مذاب بیشتر باشد و سرعت سیال جت با مذاب بیشتر باشد ذرات پودر میکرونیزه تر می شود. عامل اتومایزینگ نیروی اسپری ناشی از سیال می باشد.

اتمازینگ گازی

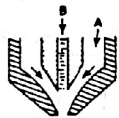
گازهای مورد استفاده (هوا-ازت N_2 - آرگون Ar)

تفاوت اتمازینگ آبی و گازی

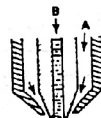
- ۱- پودر فلزات توسط اتمازینگ آبی دارای آلودگی بیشتر است.
- ۲- پودر اتومازینگ گازی به مراتب با کروی تر است چون دیرتر خنک می شود و شکل پودر اتمازینگ آبی بیشتر سوزنی است.
- ۳- تعداد دانه های سوزنی یا آبی به مراتب بیشتر است. چون فلز سریعتر خنک شده و ریزتر است.
- ۴- ارتفاع برج خنک کننده دستگاه بیشتر از دستگاه آبی است.



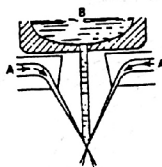
شکل ۸- پروسه اتماز کردن به صورت شماتیک



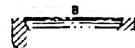
سیستم کاملاً بسته با مخلوط شدن داخلی



سیستم نیمه بسته با مخلوط شدن خارجی



سیستم باز سقوط آزاد به شکل ۷
مایع اتماز شونده = B

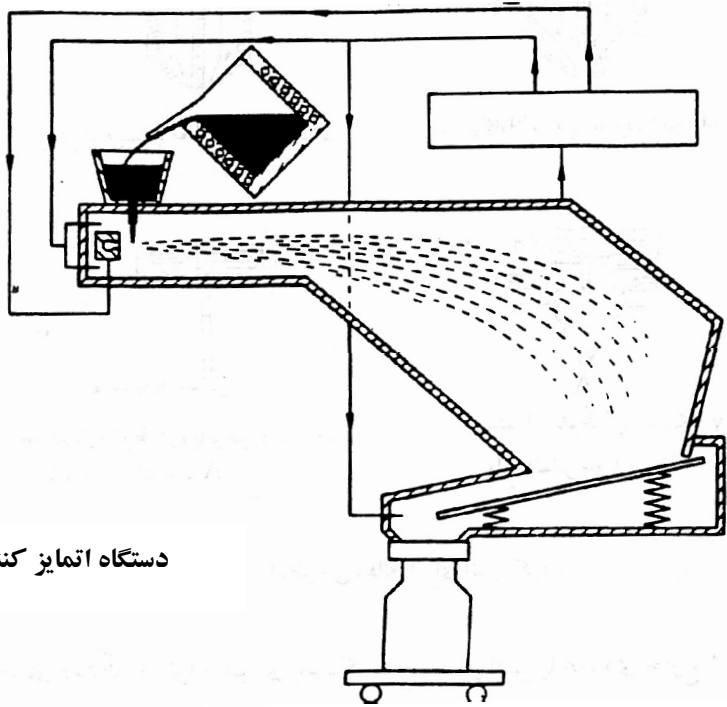


شکل ۱۰- دستگاه اتماز کننده افقی با گاز

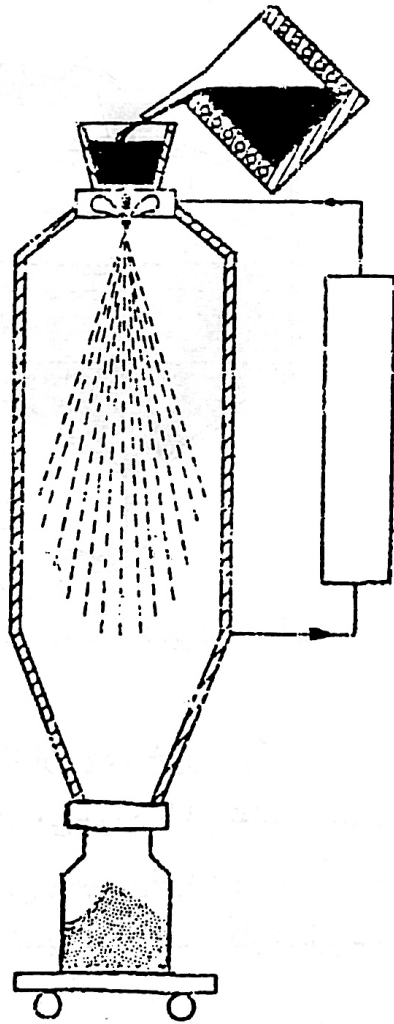


سیستم باز سقوط آزاد با برخورد عمودی
مایع اتماز کننده = A

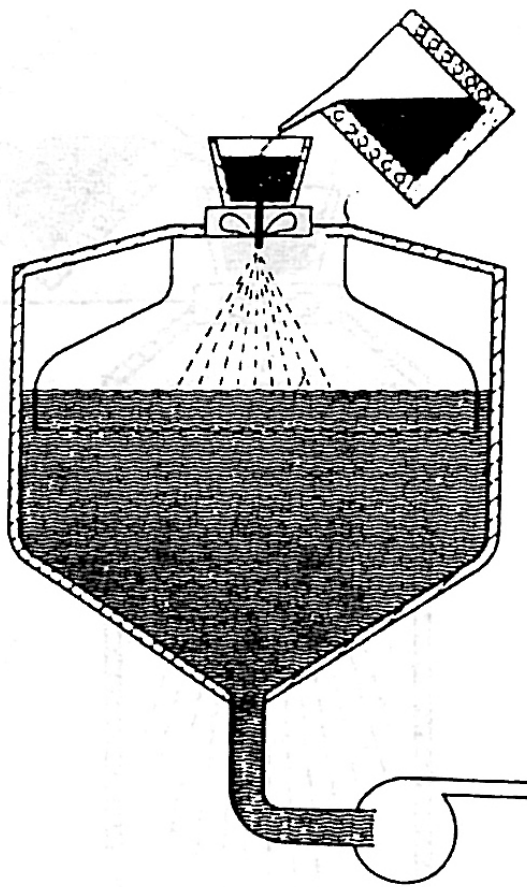
طراحی دهانه ها برای اتماز کردن



دستگاه اتمایز کننده افقی با گاز



دستگاه اتمایز کننده عمودی با گاز

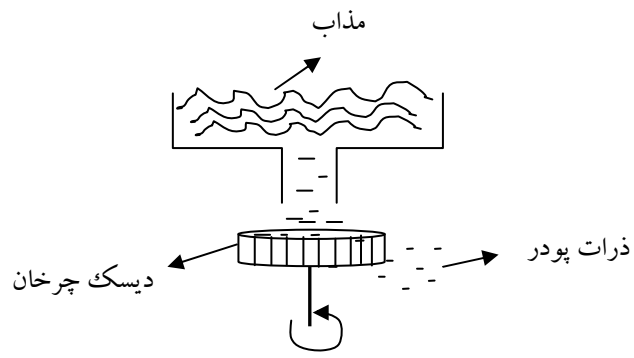


دستگاه اتمایز کننده با آب

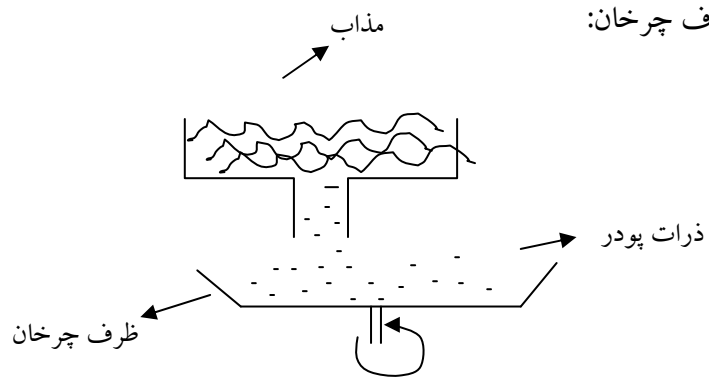
۲-۱ روش گریز از مرکز

- این روش به چند نوع است:
- الف) دیسک چرخان
 - ب) ظرف چرخان
 - ج) الکتروود چرخان
- عمودی ←
- افقی ←

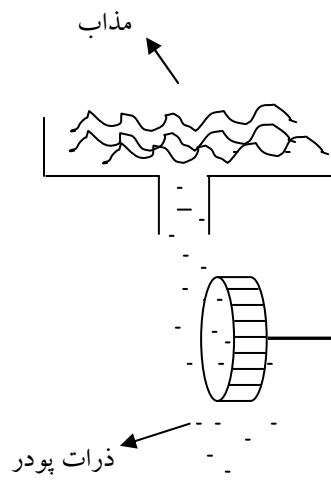
الف) استفاده از دیسک چرخان افقی:



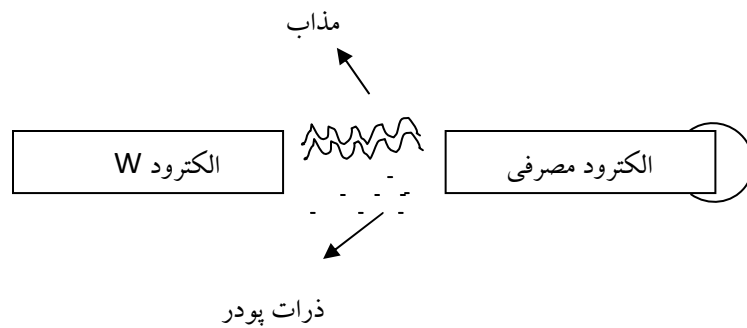
ب) استفاده از ظرف چرخان:



ج) استفاده از دیسک چرخان عمودی



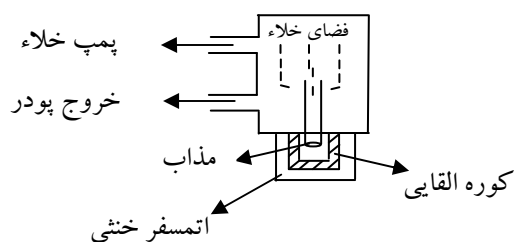
(د) استفاده از الکتروود چرخان



در روش الکتروود چرخان فلزی که می خواهیم از آن پودر تهیه کنیم به شکل الکتروود مصرفی در آورده و الکتروود غیر مصرفی که از طریق آن اتصال ولتاژی می شود معمولاً تنگستن است. الکتروود مصرفی حرکت چرخشی دارد و مصرف می شود و نیروی گریز از مرکز موجب تهیه مذاب و پرتاب آن می شود که به این طریق پودر تهیه می گردد. اختلاف ولتاژ بوجود آمده بین دو الکتروود باعث ذوب شدن الکتروود مصرفی می گردد و حرکت چرخشی باعث پخش شدن ذرات به اطراف می گردد.

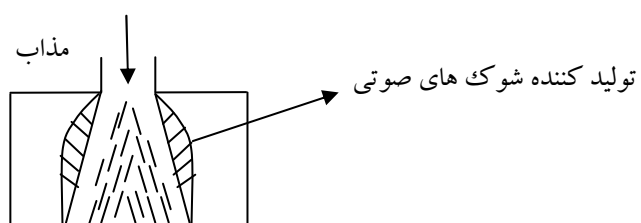
۱-۳ روش در خلأ

در این روش دیگر سیالی با مذاب برخورد نمی کند و اختلاف فشار باعث می شود که مذاب از لوله به طرف فضای خلأ رفته و سپس به اطراف پراکنده می شود و به صورت پودر درآمده و در راه باز گشت به صورت ذرات انجماد یافته از فضا خارج شود. عامل اتومایزینگ اختلاف فشار می باشد و هرچه فلزی فشار بیشتری داشته باشد تهیه پودر آن توسط این روش مشکل تر است.



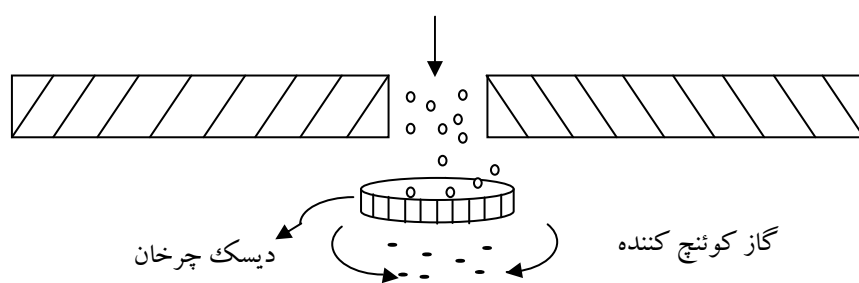
۴-۱ روش استفاده از امواج مافوق صوت (التراسونیک)

پودری که در این روش به وجود می آید بسیار نرم و سرعت پودر در حدود ۲ برابر سرعت صوت می باشد. (PM)



۵-۱ روش استفاده از محیط پلاسما

این روش شبیه الکتروود چرخان است که بعداً بطور کامل توضیح داده خواهد شد. در این روش ذرات به محض برخورد به دیسک نیروی گریز از مرکز آنها پرتاب شده و با هوای سرد برخورد می کند و ذرات بدست می آید.

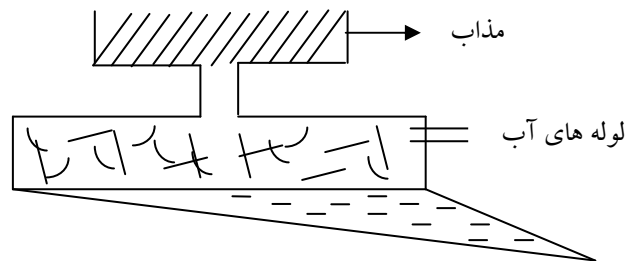


انواع روشهای اتمایزینگ

بطور کلی روش اتمایزینگ با سیال به دو نوع اتمایزینگ آبی و گازی تقسیم بندی می گردد.

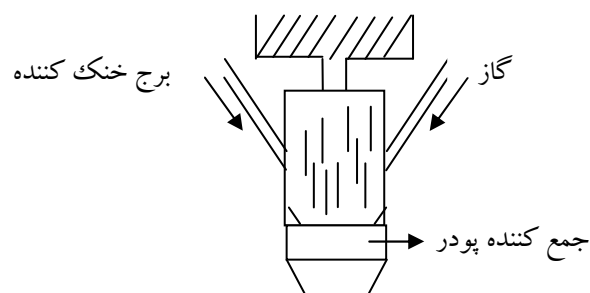
۱- روش اتومایز آبی

دانه هایی که توسط این روش تهیه می شود شکل بی قاعده می باشند و مقدار اکسیژن در آنها به خصوص در سطح زیاد است یعنی ذرات تهیه شده نسبتاً اکسید شده است. روش سرد کردن روش سقوط آزاد است. در این روش آب را اکسیژن زدایی می کند و در داخل محفظه گاز خنثی وارد می کنند تا اکسیژن کمتر وارد شود. ذرات پودر ریز و نامنظم و اکسید هم بیشتر است.



۲- روش اتمایزینگ با گاز

به علت سرعت سرد شدن پایین در این روش ، ذرات به وجود آمده دارای شکل نامنظم می باشد و گوشه های تیز ندارند و معمولاً توسط گازهای خنثی (Ar) این عمل انجام می شود. به این روش محدود شده (Confined) نیز گفته می شود و سرد شدن در این روش محدود شده است. در این روش ارتفاع مخزن به ۶ متر هم می رسد و طول آن هم زیاد است. برج خنک کننده برای خنک کردن و عدم چسبیدن ذرات هم به کار می رود. در این روش برج خنک کننده و در روش با آب مخزن کننده وجود دارد. به علت بی قاعده شدن ذرات از طریق اتمیزه کردن با آب این است که سرعت سرد شدن در این روش تقریباً دو برابر سرعت سرد شدن با گاز است. ذرات پودر درشت و منظم و اکسید هم کمتر است.



مراحل جدا شدن جریان مذاب (تشکیل ذرات پودر)

مرحله ۱: تشکیل موج اولیه از مذاب

مرحله ۲: جدا شدن مذاب در اثر نیروهای برشی

به تکه مذاب نیروهایی از سیال داده می شود که بصورت نیروهای برشی بوده و دو تیپ دارد:

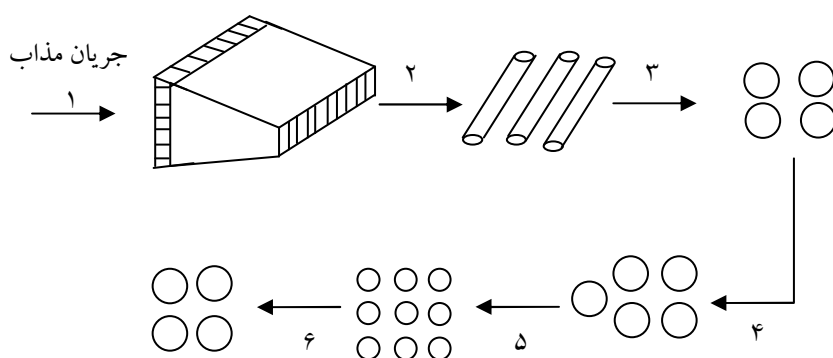
الف- زمانی که مذاب از نسر کشش سطحی بالا باشد ($\uparrow \gamma$) و سرعت سرد شدن ($\downarrow C.R$) ذرات شکل استوانه یا میله دارند مثل خنک شده در هوا.

ب- زمانی که مذاب از نظر کشش سطحی پایین باشد ($\downarrow \gamma$) و سرعت سرد شدن ($\uparrow C.R$) مثل خنک شدن در آب شکل بی نظم و قاعده به خود می گیرد.

مرحله ۳: تشکیل ذرات ریزتر

مرحله ۴: تغییری در تیپ ذرات بوجود نمی آید. اگر کروی شوند، کروی باقی می مانند و اگر سوزنی شوند سوزنی باقی می مانند.

مرحله ۵: ذرات ریز تبدیل به ذرات درشت می شوند. توجه شود که گاهی تشکیل کلوخه می دهند که خطرناک است.



فاکتورهای مؤثر بر روی اندازه ذرات

رابطه اول:

$$d_{50} = kd \left(A \left(1 + \frac{jm}{jg} \right) \right)^{0.5}$$

$$A = \frac{u_m \cdot d_0 \cdot Y}{v_g \cdot v_g^2 \cdot \rho_m}$$

jg : سرعت خروج گاز

jm : سرعت خروج مذاب

Y : کشش سطحی مذاب

K : ثابت تجربی

u_g : ویسکوزیته گاز

u_m : ویسکوزیته مذاب

d : قطر اولیه جریان مذاب یا ستون مذاب

v_g : سرعت گاز هنگام برخورد با جریان مذاب

$d_{50} = d_h$: قطری است که حداکثر ۵۰٪ ذرات از آن عبور کنند

ρ_m : دانسیته مذاب

این قانون در مورد گازها صادق می باشد. هر چه d_{50} کمتر باشد ذرات ریزتر می باشند. مثلاً فلزی با ذرات $d_{50} = 40$ ریزتر از فلزات با ذرات $d_{50} = 50$ می باشد.

این رابطه برای اتمایزینگ گازی صادق است ولی برای اتمایزینگ آب می توان با یک ضریب فرمول را بکار برد.

رابطه دوم: (روابط زمان کروی شدن)

$$T_{sph} = \frac{3\pi^2 \mu (r_1^4 - r_2^4) r_2}{4\nu\sigma r_1} = 1c$$

در این رابطه:

r_1 : شعاع ذره کروی

T_{sph} : زمان کروی شدن (انجماد)

μ : ویسکوزیته سیال

T_2 : شعاع کره قبل از کروی شدن

σ : کشش سطحی مناسب

V : حجم یک ذره

T_{spn} بیشتر در نتیجه احتمال کروی شدن کمتر از احتمال بی قاعده شدن بیشتر است.

هرچه T_{spn} بیشتر شود احتمال بی قاعده شدن بیشتر است. (هرچه زمان کروی کردن بیشتر باشد احتمال کروی شدن کمتر است و هرچه T_{spn} افزایش یابد احتمال بی قاعده شدن بیشتر است چون در این صورت زمان بیشتری باید در فضا قرار گیرید تا کروی شود). پس اگر قبل از جامد شدن کروی شود شده است و اگر نشود دیگر کروی نخواهد شد.

قطره مذابی برای کروی شدن ۵ ثانیه نیاز دارد و زمان انجماد ۸ ثانیه است. حال اگر زمان T_{spn} ۱۰ ثانیه شود قطره مذاب نیمه کروی می شود.

رابطه سوم:

فاکتورها تماماً انتقال حرارتی هستند.

$$T_{sol} = \frac{d p_m c p_m}{6 h c} \ln \left[\frac{T_i - T_g}{T_m - T_g} \right] + \frac{\Delta H_m}{T_m - T_g}$$

d : قطره ذره

h_c : ضریب انتقال کنوکسیون

p_m : دانسیته مذاب

T_g : دمای اولیه گاز اتومازیک

T_i : دمای اولیه مذاب

ΔH_m : گرما نهان ذوب

T_m : دمای ذوب فلز

cp : ظرفیت حرارتی فلز

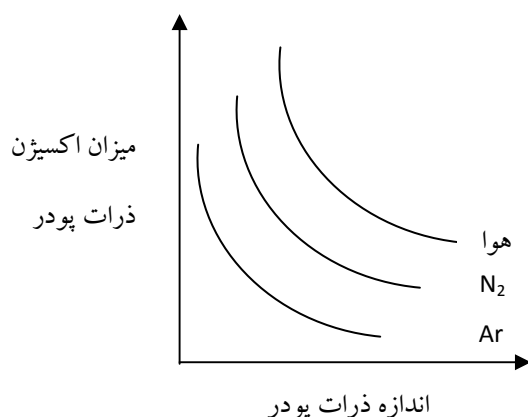
T_{sol} زمان انجماد (لحظه ای که ذره مذاب شروع به منجمد شدن می کند تا پایان انجماد ذره)

تمرین: با توجه به سه رابطه مذکور، افزایش پارامترهای زیر در شکل و اندازه پودر چگونه است؟

$d_0 =$ قطر نازل مذاب خروجی، حجم ذره $v_g, j_m, j_g, T_g, T_m, d, h, c p_m, j_m, v_g$

میزان اکسیژن ذرات پودر

هرچه میزان اکسیژن در پودر کمتر باشد، پودر بهتر است.



اگر اتمایزینگ با آب انجام شود به علت اینکه فلزات در دمای بالا و بخار آب واکنش اکسیداسیون می دهند بنابراین اکسیداسیون ذرات پودر بیشتر از حالتی است که اتمایزینگ با گاز انجام می شود. هرچه فوق گداز مذاب بیشتر باشد چون دما بالاتر می رود اکسیداسیون بیشتر می شود. میزان اکسیژن موجود در ذرات پودر تابع اندازه ذرات است و هرچه ذرات ریزتر باشند به دلیل افزایش سطح تماس آن ها اکسیداسیون بیشتر می شود. در نمودار بالا تحت شرایط یکسان هوا در اتمایزینگ استفاده شود اکسیداسیون ذرات بیشتر از زمانی است که N₂ استفاده می شود و این به دلیل خنثی بودن گاز N₂ است.

گازهای خنثی دیگر نظیر Ar و He اکسیداسیون به مراتب کمتر از N₂ ایجاد می کند. از طرفی اندازه ذرات نیز هرچه بیشتر باشد اکسیداسیون آن ها کمتر است.

با تکنیک های جدید و با استفاده از گاز خنثی اکسیژنی که در دانه های پودر وجود دارد تقریباً برابر همان مقدار اکسیژن در داخل مذاب اولیه است.

با تکنیک های جدید و با استفاده از گاز خنثی اکسیژنی که در دانه های پودر وجود دارد تقریباً برابر همان مقدار اکسیژن در داخل مذاب اولیه است.

تقریباً ۹۰-۸۰٪ اکسیژنی که در طول عملیات اتمایزینگ وارد ذرات پودر می شود در لایه هاس سطحی دانه های پودر متمرکز شده است و ده درصد باقیمانده بصورت محلول در داخل ذرات پودر قرار دارد یا اینکه صورت بسیار ریز اکسیژن ها در ساختار دانه های پودر توزیع شده است.

به همین دلیل روش های اتمایزینگ با آب یا گاز در نهایت به دلیل خنک شدن دانه های پودر در آب برای تهیه فلزات فعال نظیر Ti مناسب نمی باشد.

فاکتورهای مهم روی آلودگی پودر

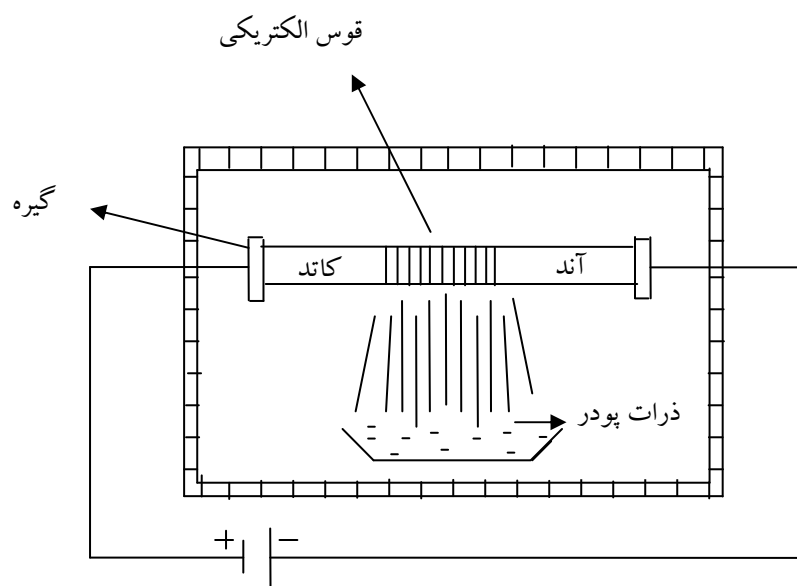
۱- نوع سیال برخورد کننده

۲- اندازه ذرات

۳- دمای مذاب

روش الکتروود چرخان (REP)

این دستگاه مطابق شکل زیر می باشد.



کاتد: الکتروود ثابت تنگستن

آند: الکتروود چرخان مصرفی

روش REP برای فلزات فعال نظیر Ti روش گرانی است. در این روش قطعه ای که قرار است پودر شود قسمتی از آن را وارد مخزن با اتمسفر کنترل شده کرده که الکتروود مصرفی چرخان می باشد و کاتد که الکتروود ثابت از جنس تنگستن W می باشد به قطب مثبت وصل می شود و بین دو الکتروود اختلاف پتانسیل برقرار می شود.

الکتروود مصرفی در حین انجام عمل قوی با سرعت زیاد در حال چرخش است. عمل قوی باعث ذوب الکتروود مصرفی شده و نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخش الکتروود مصرفی باعث می شود که ذرات ذوب شده به اطراف پرت گردد. می توان به جای W از مشعل پلاسما استفاده کرد که این روش PREP می گویند. هرچه سرعت بیشتر باشد امپرینگ زیاد تر می شود.

یکی از روش های تولید پودر با کیفیت بالا که معمولاً برای فلزات فعال (اکتیواسیون قوی دارند) روش REP است. هیچگونه تماس یا آلورگی سیال اتویزه با مذاب وجود ندارد و ذوب و پودر شدن همزمان با هم انجام می شود.

در روش الکتروود چرخان (REP) اتمسفر مخزن کنترل شده بوده و معمولاً از گاز خنثی مثل He استفاده می شود. سرعت سرد شدن ذرات در این روش نسبتاً زیاد است و دستگاه های آن روش از اندازه آند به دو دسته تقسیم می شود:

آند کوتاه: در مواردی که فلز پودر شونده ترد و شکننده باشد یا اینکه فلز بیش از حد نرم باشد از روش آند کوتاه استفاده می شود. قطر آند در این روش ۸۹mm و طول آن حداکثر ۲۵۰mm می باشد. در هر مرحله که پودر تهیه می شود ۸۰٪ آند مصرف می شود (حدود ۱۶۰mm) و تعویض الکتروود در این حالت تنها با دست صورت می گیرد.

آند بلند: حداکثر قطر آند ۶۳/۵mm و طول آن تا ۱۸۳۰mm می رسد و اصول گاز مشابه با آند کوتاه است. در هر دو روش سرعت چرخش آند برای قطر ۶۳/۵mm برابر ۱۵۰۰۰rpm و اگر قطر کوچکتر باشد ۲۵۰۰۰rpm است. در این روش ابعاد الکتروود ها کاملاً بایستی دقیق باشد و سطح آن ها باید کاملاً صاف باشد تا از لنگ زدن آن ها در هنگام چرخش جلوگیری شود. قطر الکتروود ها باید در تمامی طول همگن باشد و اگر همگن نباشد در توزیع اندازه دانه ها اثر می گذارد.

فاکتورهای مؤثر بر اندازه ذرات (روش گریز از مرکز)

- ۱- کشش سطحی مذاب
 - ۲- نیروی گریز از مرکز
 - ۳- خواص دینامیکی ذره
- با استفاده از بالانس نیروهای گریز از مرکز و کشش سطحی مذاب رابطه ای برای قطر ذرات بدست می آید.

رابطه چهارم:

$$d = \frac{3.464}{W} \sqrt{\frac{\gamma}{p \cdot D}}$$

p: دانسیته آلیاژ

D: قطر الکتروود

d: قطره یک ذره

W: سرعت چرخش

γ : کشش سطحی

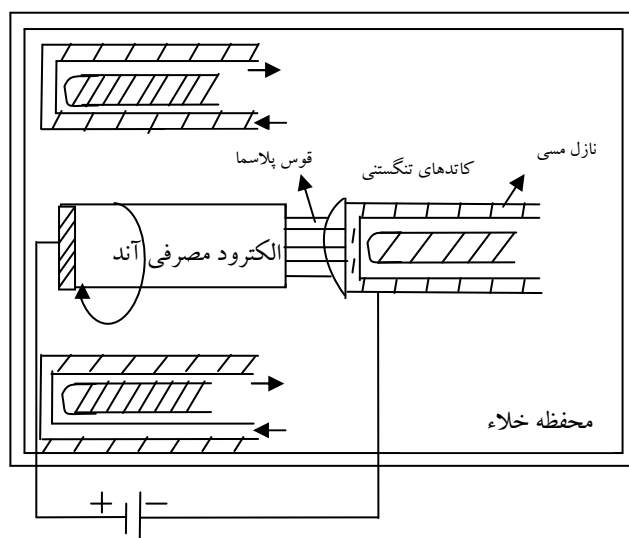
رابطه پنجم:

$$dso = \frac{k}{w\sqrt{D}}$$

K: ثابت

روش الکتروود چرخان با قوس پلاسما : (PREP)

چون در این روش از تماس مذاب با قطعات سیستم جلوگیری می شود، پودر بدست آمده فوق العاده تمیز و منحصر به فرد است. در این رو پودر بدست آمده دارای ترکیبی شیمیایی شبیه الکتروود اولیه است و ناخالصی کمتر دارد. فلزاتی نظیر Ti در حالت مذاب با اغلب مواد واکنش داده و آلوده می شود در حالی که با این روش می توان پودر تمیزی از Ti بدست آورد.



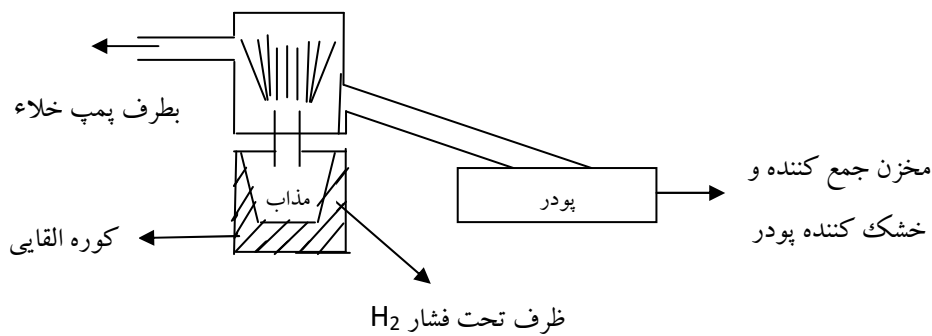
پودری که با این روش تهیه می شود در بسته، بسته بندی می شود و با گازهای خنثی و یا خلاء پر می شود تا اکسید نشود. از جمله کاربردهای تولید پودر به روش PREP تولید پودر فولاد ساده کربنی جهت مصرف در ماشین کپی است. ذرات درشت پودر که در این روش تولید می شود شامل، آلیاژهای CO و Cr می باشد. و آلیاژهایی که برای ساخت قطعات مصنوعی در داخل بدن استفاده می شود.

مزایای منحصر به فرد روش (PREP):

- ۱- تهیه پودر بسیار تمیز
- ۲- توزیع اندازه های دانه ها در رنج کوچک و مشخص
- ۳- پودر های تولید شده با این روش بسیار کروی و دارای کیفیت سطحی بسیار بالا می باشد. به طور مثال اندازه دانه ها در رنج ۲۰-۴۰ میکرون است و در رنج ۱-۸۰ میکرون نیست.

روش اتمایزینگ در خلاء

در این روش مذاب مسافت زیادی را پیموده و بالا می رود و در هنگام پایین آمدن منجمد می شود. پودر آلیاژهای پایه (Base) نظیر Ni-Co-Fe-Al از این طریق تهیه می شود. (منظور از Fe فولاد هاست) خشک شدن پودر توسط دمیدن گاز خنثی به روی پودر انجام می شود. پودری که از این روش تهیه می شود کاملاً کروی بود. مواد از خلوص نسبتاً بالاتری نسبت به سایر روشها بجز روش الکتروود چرخان برخوردار است. بجز یک مخزن خلاء و مذاب (اختلاف فشار) وجود دارد که باعث مکش مذاب می ود. و در نتیجه در محفظه خلاء و پودر ایجاد می شود.



مزایای این روش:

- ۱- فشردن گاز در محفظه ذوب سبب افزایش سرعت مذاب در لوله سرامیکی شده و زمان تماس با سرامیک را کاهش می دهد. این امر خود سبب کاهش آلودگی می شود.
- ۲- این روش نیاز به ظرف نگهدارنده مذاب نمی باشد و مذاب مستقیماً از کوره وارد محفظه می گردد.
- ۳- تمیزه کردن در جهت بالا سرعت خنک شدی ذرات را دو برابر می کند.
- ۴- بدون تجهیزات اضافی یا کمکی برای خنک کردن، ذرات پودر با همان سرعت خنک کردن در روشهای دیگر خنک می شوند.

کاربرد این روش:

پودرهای تهیه شده در این روش برای ساخت دیسکهای توربین و پوشش دادن پرهای توربین بکار می رود.

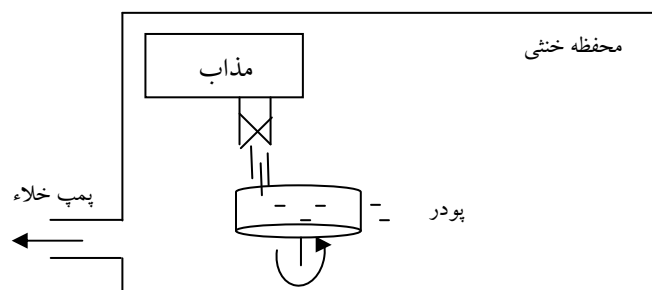
نکات

- ۱- هرچه Δp بیشتر شود (اختلاف فشار بین مخزن و محیط خلاء) اسپرینگ بازمه زیادتر می شود.
- ۲- در خلاء مذاب آلود می شود بیشتر نسبت REP دارد.

روش دیسک چرخان

در این روش باریکه ای از مذاب روی دیسک در حال چرخش می ریزد و مذاب در حین تماس به علت نیروی گریز از مرکز به اطراف پخش می شود و بصورت پ و در در می آید. البته سرعت دیسک و جریان مذاب خیلی مهم است. اگر سرعت دیسک کم باشد مذاب بصورت منفرد و نوار باریک در می آید. اتمسفر کنترل شده گاز Ar با He برای جلوگیری از اکسیداسیون ذرات است. پودر بدست آمده دارای ذرات کروی بودن و هر چه سرعت دیسک بیشتر باشد اندازه ذرات پودر کروی کوچکتر است. سرعت مذاب نیز باید زیاد باشد و چون با کم بودن سرعت مذاب، مذاب در حال تماس با دیسک تکه تکه خواهد شد. هر چقدر جریان مذاب کمتر باشد باریکه مذاب کمتر شده و سرعت تمیزه کردن کمتر می شود. بنابراین اندازه ذرات کوچکتر می شود. پودرهای به دست آمده در این روش در منابع فضایی در ساخت قطعات موتورها به کار می رود.

تذکره: روش دیسک چرخان می تواند برای انجماد سریعتر بکار رود که در آن صورت انتقال حرارت را بین روش از طریق هدایت خواهد بود.



فلزاتی که با انجماد سریع حاصل می شوند دارای خواص زیر می باشند.

- ۱- استحکام
- ۲- داکتیویته بالا
- ۳- سختی بالا
- ۴- خواص مغناطیسی
- ۵- مقاومت به خوردگی خوب

روش تهیه پودر با سرعت مافوق صوت

در این روش انتقال حرارت برای انجماد سریع به روش کنوکسیون انجماد می گیرد. اتمیزه کردن با استفاده از موج ماورای صوت انجام می گیرد. در این روش گاز پر سرعت (مافوق صوت) بصورت پلسی به مذاب برخورد می کند و موجب پودر شدن آن می شود. سرعت شتاب ذرات گاز تا دو ماخ (MAKH) می رسد. و فرکانس این موج به ۶۰-۹۰ کیلوهرتز (KHZ) می رسد. معمولاً اندازه ذرات پودر در این روش تا $30\mu m$ می رسد و به همین علت انجماد آن سریع است.

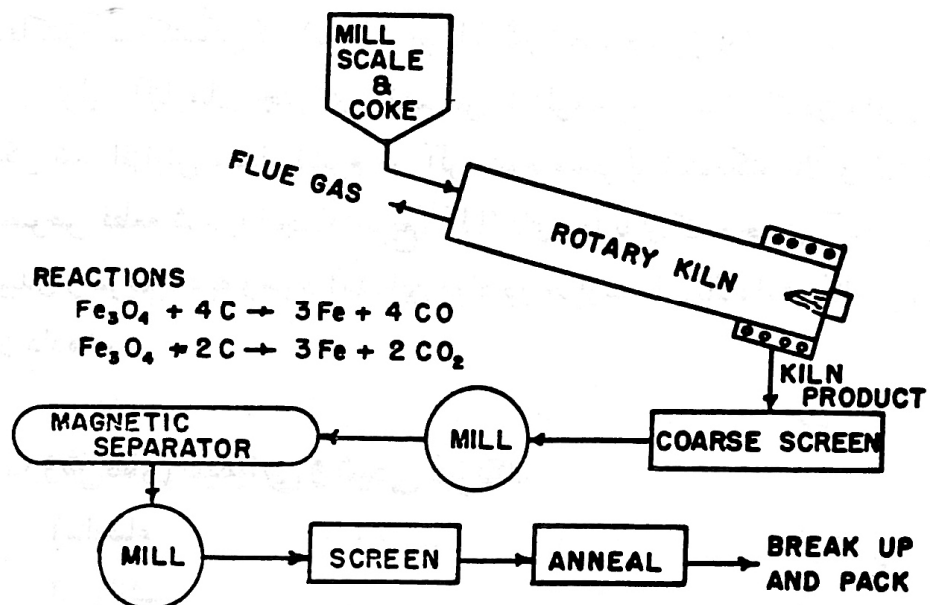
$$\text{عدد ماخ} = \frac{\text{سرعت گاز } V}{\text{سرعت صوت } \frac{m}{sec}} = \frac{V}{331}$$

روشهای شیمیایی تهیه پودر

- ۱- احیاء اکسیدها
- ۲- رسوب از محلول ها
- ۳- تجزیه حرارتی
- ۴- تردی شیمیایی
- ۵- تجزیه هیدریدی
- ۶- الکتروود شیمیایی

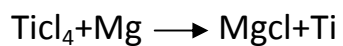
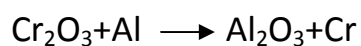
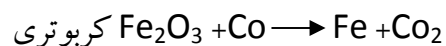
روش احیاء اکسیدها

پودر فلزاتی نظیر Cu-Te-W-Mo با این روش بصورت اقتصادی قابل تولید است. مثلاً اکسید آهن را با یک ماده احیا کرده و ذرات پودر متخلخل می گیرند، اکسیژن را از اکسید آهن خارج می کنند و چون جای اکسژن خالی می ماند متخلخل می شود و به روش مکانیکی آن ها را پودر می کنند.



نمایش شماتیک احیاء با کربن در کوره های دوار

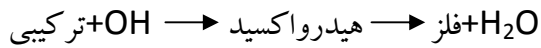
بطور مثال:



مهمترین متغیر در عمل احیاء اکسیدها دمای احیاء کردن است. اگر دما بسیار بالا باشد سبب سینتر شدن بی موقع و توده ای شدن (آکلومره شدن) یا کلوخه ای شدن می شود.

پودر Ni و Mo اغلب توسط این روش تهیه می شود زیرا دمای ذوب آنها بالاست و از این روش در دمای پایین تری می توان از آنها پودر تهیه کرد که صرفه اقتصادی دارد.

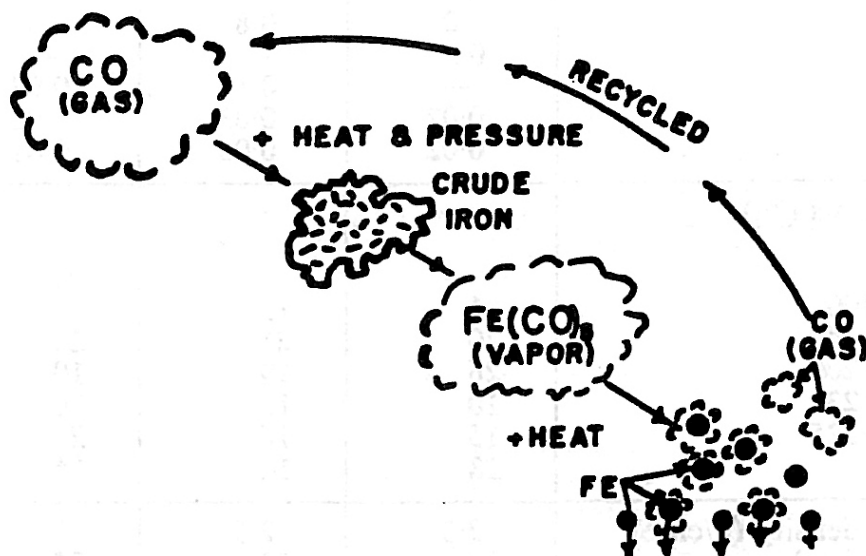
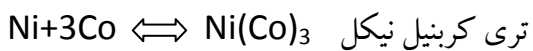
روش رسوب کردن محلولها



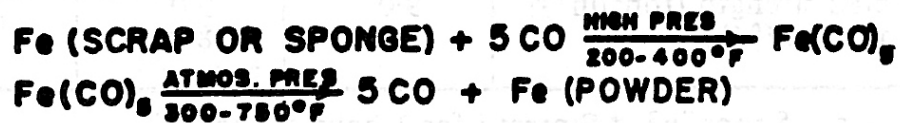
در این روش ابتدا یک ترکیب از فلز هیدروکسیدها یا کربناتها از محلول رسوب داده می شود. سپس با حرارت دادن یا روش تجزیه، فلز را از آن جدا می کنیم مثل روش احیا، در این تجزیه کردن فلز اسفنجی تهیه می شود.

روش تجزیه حرارتی

مهمترین موادی که بصورت اقتصادی و با روش قادر به پودر شدن هستند Fe و Ni است. در این روش ابتدا کربونیل این فلزات را تهیه کرده و پس کربونیل را در دمای خاص تجزیه و فلز را خارج می کنیم.



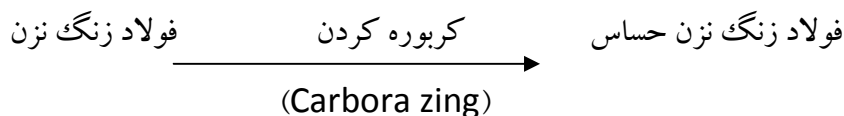
REACTIONS



نمایش شماتیک روش کربنیل

روش تردی شیمیایی

یکی از روشهای تهیه پودر فولاد زنگ نزن، این روش است. در این روش با کربوره کردن در فولاد زنگ نزن ایجاد خوردگی بین دانه ای می کند و فولاد زنگ نزن حساس تولید می کند.

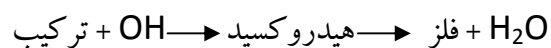


نکات

۱- قدرت اکسیژن گیری Si بیشتر از C است و روشهای شیمیایی نیاز به مرحله تکمیلی به نام روهای مکانیکی دارد.

۲- در روش احیاء، اکسیدها اکسیژن گیری با C را کربوتری و با Si را سلسیوتری می گوئیم.

۳- در روش رسوب کردن محلول ها فلزی مانند Ni، Ag، Cd به کار می رود.

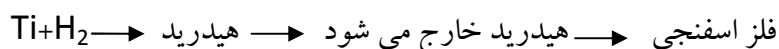


۴- در تردی شیمیایی در مرز دانه ها کاربرد کرم به وجود می آید بنابراین اطراف آن فقیر از کرم می شود و اختلاف E سبب ایجاد جریان می شود. بنابراین خوردگی بین دانه ای بوجود می آید و باعث جدا شده دانه می شود.

روش تجزیه هیدریدی (هیدرید-هیدرید)

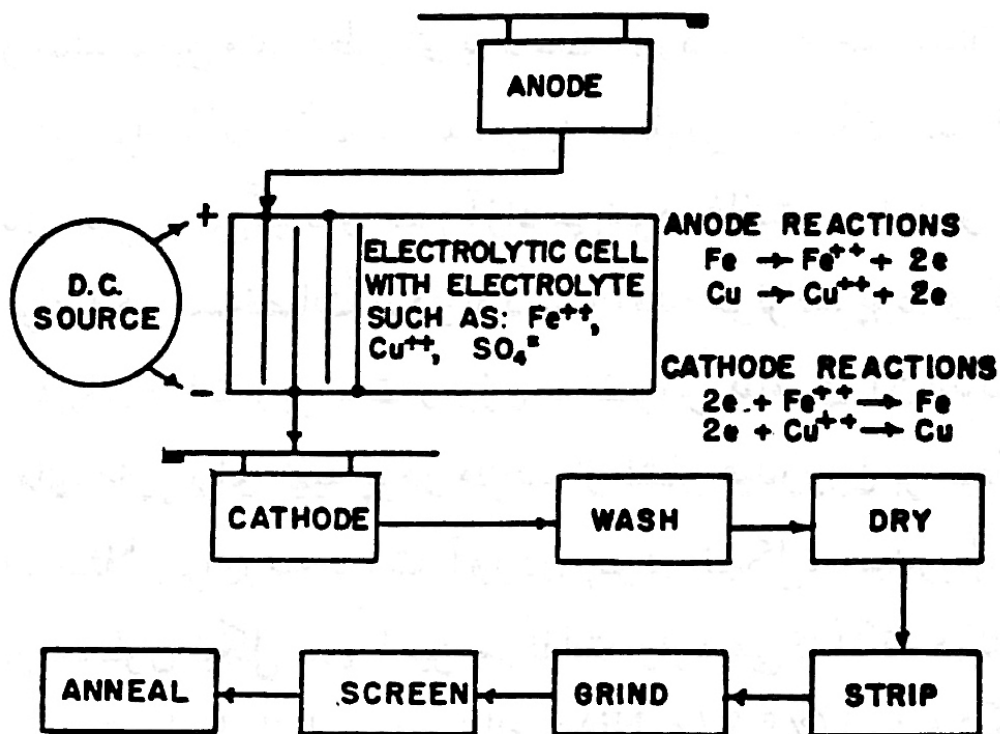
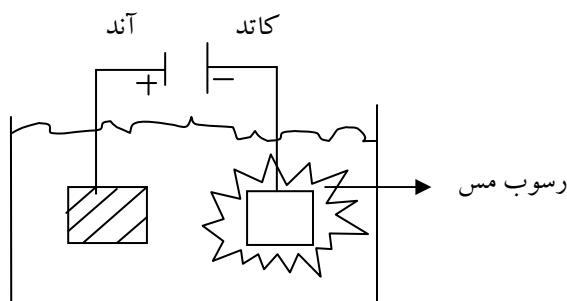
این روش برای تهی Ti و Zr مناسب است. این روش را هیدرید نیز می نامند. در این روش فلزات بصورت چیپس (ذرات ریز) با دمیدن هیدروژن یا قرار دادن در محیط هیدروژنی هیدریده کرده (با هیدروژن در دمای بالا حرارت می دهند).

سپس هیدریتها را خرد کرده و در خلاء حرارت داده و دهیدریده می کنند که در این حالت سینتر شده و H_2 خارج می شود و فلز باقی می ماند. پودر بدست آمده شبیه کیک اسفنجی می باشد (senter cake) بعد این کیک اسفنجی را آسیاب کرده و پودر نرم بدست می آید.



روش الکتروشیمیایی تولید پودر

پودر هایی که به این روش تهیه می شوند بسیار خالص می باشند و دارای کیفیت بسیار بالایی می باشند ولی به دلایل اقتصادی برای تمام فلزات قابل استفاده نیست. در حال حاضر شکل (بیل الکتروشیمیایی) Ag-Cu-Fe و گاهی اوقات Mn که از این طریق به طور اقتصادی قابل تولید هستند.



نمایش شماتیک فرآیند الکترولیز برای تهیه پودر

عوامل مؤثر در کیفیت پودر بدست آمده از روش الکتروشیمیایی

$$PH - 1 \text{ محیط (محلول): } PH = -\log[H_+]$$

- ۲- دما: بطور کلی هرچه دما افزایش یابد فرآیند الکتروشیمیایی سریعتر انجام می شود ولی این مقدار یک اپتیوم دارد. زیرا افزایش بیش از حد دما باعث رسوب ترکیبات مسی و اختلال در فرآیند الکتروشیمیایی می شود.
- ۳- سرعت سیر کوله شدن الکتروولیت به دلیل ایجاد پدیده پلاریزاسیون (تجمع یونهای + و - در یک منطقه که باعث کند شدن پروسه می شود برای رفع این قضیه باید سیر کوله شود)
- ۴- دانسیته جریان: (نسبت جریان عبوری به سطح) هر چه جریان بیشتر فرآیند الکتروشیمیایی بهتر
- ۵- اندازه و نوع کاتد و آند و فاصله آنها: هر چه مس ناخالص تر باشد اکتیویته مس کمتر می شود و احیا مشکل تر میشود و فاصله آنها به مقاومت الکتریکی بستگی دارد.
- ۶- مدار و نوع مواد اضافه شونده: ADDETIVE: موادی هستند که جهت جلوگیری از رسوب ترکیبات فلزی به محلول الکتروولیت اضافه می شوند چون رسوب ترکیبات فلزی موجب اختلالات در پروسه الکتروشیمیایی می شود.
- ۷- زمان خارج کردن رسوب ها از کاتد: اگر ناخالصی زیاد شود ناخالصی ها وارد کاتد می شود و به آن لجن وان می گویند. زمان خارج کردن پوشش از یک کاتد بستگی به خلوص مس آندی و کاتدی دارد کاتد یک فلز خنثی مثل Pt می باشد و آند فلزی است که می خواهد پودر شود.

	Reduced	Atomized	Electrolytic
Chemical analysis (%):			
Fe	98	98.5	99
C	0.1	0.1	0.05
O	1.0	0.8	0.5
SiO ₂	0.2	—	—
Si	—	0.1	0.02
S	0.02	0.03	0.01
P	0.02	0.03	0.01
Sieve analysis (%): (mesh)			
+ 70	—	—	3
- 70 + 100	1	11	13
- 100 + 140	20	25	25
- 140 + 200	26	19	10
- 200 + 230	10	15	10
- 230 + 325	15	16	24
- 325	28	14	15
Apparent density (g/cm³)	2.3	2.5	3.2
Flow rate (sec)	33	25	25
Green density (g/cm³)*	6.2	6.2	6.7
Sintered strength (tons/in²)†	9.0	9.0	9.0
Elongation (%)†	8.0	8.0	7.0

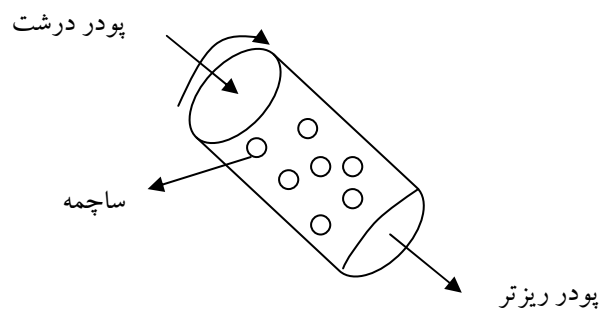
* Compacted at 25 tons/in². † Sintered for 1 hour at 1150° C.

مشخصات پودرهای مختلف آهن

روش فوق پودر دارای گوش های تیز می باشند برای اینکه در متالورژی پودر از ان استفاده می شوند باید مرحله آسیاب کردن روی آن ها انجام شود.

روش آسیاب کردن

در روش فوق فلزی که می خواهند به صورت پودر تهیه شوند ابتدا تکه تکه و سپس با اعمال نیروهای ضربه ای و سایشی پودر در می آید. یکی از انواع آسیاب ها، آسیاب های گلوله ای (Ball, Mill) است. گلوله هایی که از سختی بالا برخوردارند مثل چدن سفید کروم دار و نسبت به سایش مقاوم اند، همراه با فلز مورد نظر را در این روش استوانه ای می ریزند. گلوله ها می توانند از جنس فولاد زنگ نزن یا آلومینیوم باشند. در این روش بهتر است از فلزات تُرد استفاده شود.



حرکت آسیاب با گلوله ها به دو صورت است:

۱- ارتعاشی ۲- چرخشی

(نوع ارتعاشی بهتر است)

فلزات نرم در این روش به علت به کار سختی و تغییر فرم پذیری کمتر به حالت پودر در می آیند. آسیاب کردن اگر در حالت تر انجام می گیرد دانه ها ریزتر می گردد. در آسیاب کردن به علت اینکه دانه ها سائیده می شوند و سطح زیادی تشکیل می شود تمایل فلز با اکسیژن و تشکیل لایه های اکسیدی زیاد می شود. بنابراین باید اتمسفر نیز در این روش کنترل شود.

نکات

۱- مشکل روش آسیاب کردن مسئله سیتترینگ و جوش خوردن ذرات به یکدیگر است.

$$\frac{Ball}{Powder} = 0.1 \quad \text{و} \quad V \propto \frac{1}{\sqrt{d}} \quad \text{سرعت چرخش}$$

۲- برای جلوگیری از جوش سرد ماده ای ارگانیکی (PCA) مثل الکل به آن اضافه می کنند که خود تبخیر می شود و باعث می شود حرارت ناشی از اصطکاک دفع شود.

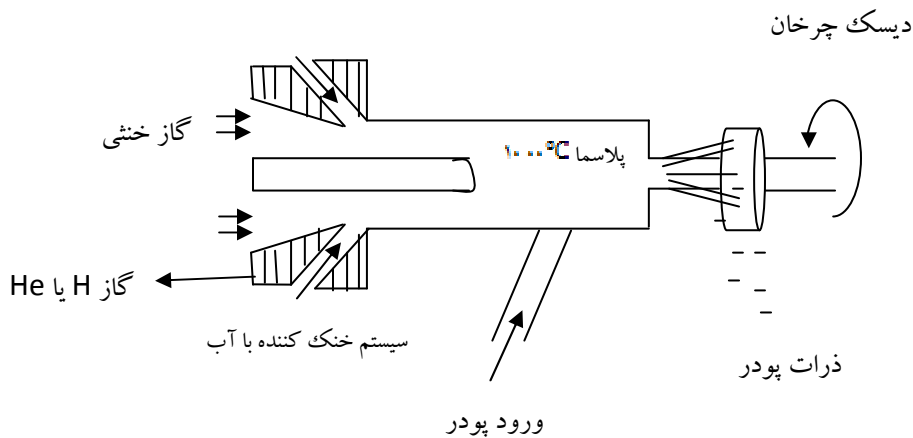
$$Charge = Powder + Balls + PCA + Ar \text{ (g)}$$

۳- از طرفی مناطقی به نام مناطق مرده وجود دارد که ساچمه در آن ها حرکت نمی کند و پودر ها جمع نمی شوند، بنابراین حرارت در این منطقه زیاد است و باعث اکسید شدن پودر می شود.

روش های کاهش مناطق مرده:

الف- ارتعاش دادن به دستگاه ب- شیب دار کردن استوانه ج- گذاشتن دریچه برای خروج مواد زائد
روش میکروآتمایزینگ:

قطر دانه در این روش بین ۳۰-۰/۵ میکرومتر است که از مشعل پلاسما استفاده می شود. فلز وقتی به منطقه پلاسما رسید ذوب می شود و مذاب تولید شده بر اثر برخورد با سرعت زیاد به دیسک چرخان به صورت ضرات بسیار ریزی در می آیند که توسط دیسک پرتاب می شوند.



فصل دوم: خواص پودر فلزات

خلوص و تمیز کردن پودرها

انواع مواد آلوده کننده: مواد آلوده کننده می توانند به صورت دو حالت جامد و گاز وجود داشته باشند و اگر میزان آن ها از یک حدی خارج شود باید به طریقی آن ها را از پودر تصویه کرد.

۱- ناخالصی های جامد: این ناخالصی ها می توانند به صورت سرامیکی (انواع اکسیدها) یا ارگانیک (مواد الی و ترکیبات کربن دار) باشد. مواد سرامیکی می توانند از جدار بوته ها وارد مذاب و پودر شوند و مواد ارگانیکی در پروسه های بسته بندی وارد پودر شوند.

۲- آلوده کننده های گازی: مثل N_6 و O رطوبت که می توانند در کلیه مراحل تهیه پودر جذب گردند.

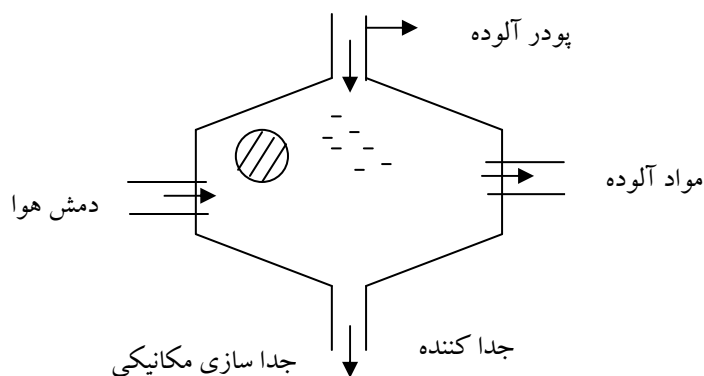
تصفیه سازی پودر از مواد جامد

۲- روش الکترواستاتیکی

دو روش دارد: ۱- جداسازی مکانیکی

جداسازی مکانیکی

از کمپرسور استفاده می شود که با سرعت ها و دبی های مشخص هوا را وارد دستگاه می کند با توجه به اینکه معمولاً اکسیدهای فلزی نسبت به فلز وزن مخصوص کمتری دارند بنابراین از این خاصیت استفاده کرده و با دمش هوا پودر آلوده را با معلق نگه داشتن اسیدها پاکسازی می کنند.

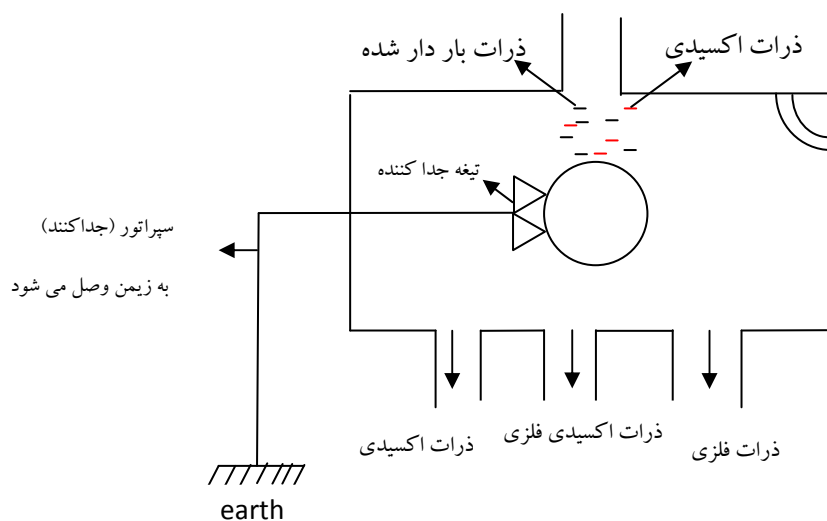


روش الکترو استاتیکی

آلوده کننده های جامد نظیر انواع اکسیدها: $MgO-ZrO_2-Al_2O_3$ برای جذب کردن آنها از پودرهای از روش الکترو استاتیکی استفاده می شود. قبل از اینکه روش الکترواستاتیکی صورت گیرد در صورت امکان جداسازی مکانیکی انجام می گیرد. در این روش ذرات را باردار می کنیم و چون فلزات بارشان را زود از دست می دهند و مواد سرامیکی (مواد آلوده کننده) بار خود را نگه می دارد. این عمل مهم برای جدا کردن آلودگی از ذرات پودراست. یعنی ذرات پودر بدون آلودگی زودتر از استوانه باردار جدا می شوند. برخی پودرها بسته به شرایط مثل چسبیدن آلودگی به آنها هنوز آلوده می مانند و در مرحله بعد آلودگی ها جدا می شوند و در پایان ذرات دورریز غیر فلزی توسط تیغه های پاک کننده جدا می شوند. ذرات آلوده در مرحله دوم را دوباره می توان تصفیه کرد.

۱- در روش جداسازی مکانیکی هر چه وزن قطعه بیشتر باشد و شکل آن آیرودینامیکی تر باشد، سرعت حدی بیشتر است.

۲- وزن مخصوص اکسیدها کمتر از وزن مخصوص فلزات است. بنابراین بادمش هوا جدا می شود. در بعضی موارد قبل از اینکه عمل تمییز کردن انجام گیرد. بعلت وجود تنش های باقیمانده در پودر بر روی پودر عملیات آنیل کردن صورت می گیرد که باعث می شود فلزهای مضر پودر از بین رفته و این عمل علاوه بر تنش (دائمی) موجب افزایش داکتیلیته پودر گردد در مورد پودرهایی که سطح مخصوصی زیادی دارند مقداری گاز در سطح و داخل آن ها جمع شده است که لازم است این گازها خارج شوند. روش میکرواتمایزینگ مخلوطی از پلاسما و دیسک چرخان می باشد. بنابراین علاوه به ریز بودن کیفیت پودر بالا است.



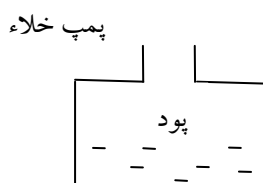
روشهای خارج کردن گاز از درون پودر

- ۱- روش گاز زدایی استاتیکی سرد
- ۲- روش گاز زدایی دینامیکی سرد
- ۳- روش گاز زدایی استاتیکی گرم
- ۴- روش گاز زدایی دینامیکی گرم
- ۵- روش الکترو دینامیکی

۱- روش گاز زدایی استاتیکی سرد

در این روش پودر مورد نظر را داخل ظرف سر بسته ای می ریزند و مجرای خروجی ظرف را به خلاء وصل می کنند و در دمای محیط به مدت یک یا چند روز این حالت قرار می دهند و گاز بر اثر دیفوزیون خارج می شود. اشکال این روش آن است که مدت زیادی می گیرد و همچنین گاهی اوقات اگر دانه ها بسیار ریز باشند ممکن است دانه های پائینی گاز زدایی نشود.

$$\text{روش استاتیکی سرد} = \frac{\Delta \text{ppm}}{\text{ppm}_0} \times 100 = \text{راندمان گاز زدایی}$$



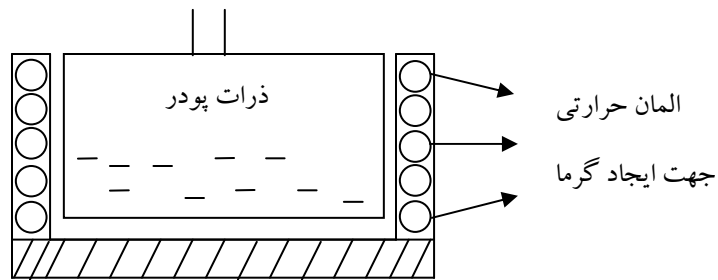
۲- روش گاز زدایی دینامیکی سرد

در این روش مقداری از عیوب روش قبلی برطرف شده است. به این صورت که دانه های پودر با سرعت کنترل شده در مخزن بالا و پائین می رود و بر اثر خلأیی که وجود دارد گازها خارج می شود و به این ترتیب گاز زدایی بهتر انجام می شود و سیستم ارتعاش دهنده نیز در این دستگاه وجود دارد که به خروج گاز کمک می کند.

۳- روش گاز زدایی استاتیکی گرم

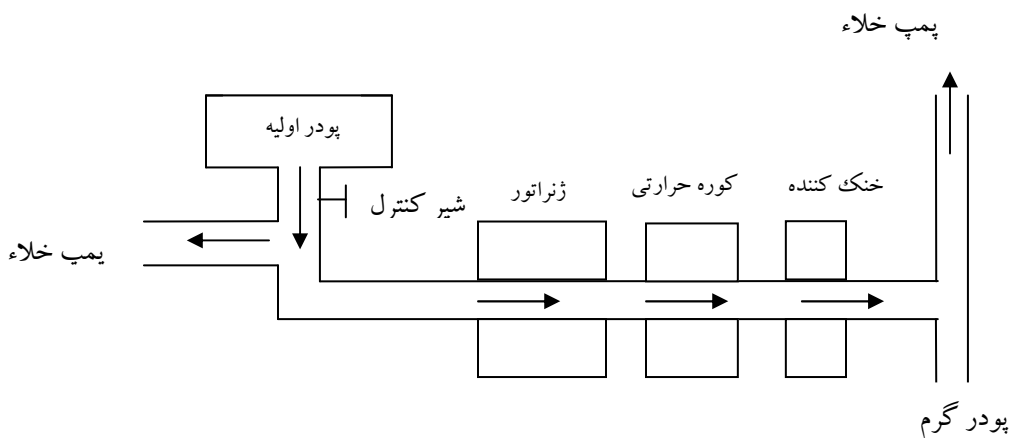
این روش مشابه روش گاز زدایی استاتیکی سرد است ولی با این تفاوت که دما بالاتر می باشد و گازها مویلیت بیشتری می یابند و راحت تر خارج می شوند و این عمل زودتر انجام می گیرد.

اگر دما را افزایش دهیم مویلیته گاز را افزایش می دهد و این امر باعث افزایش راندمان می گردد.



۴- روش گاززدایی دینامیکی گرم

در این روش پودرها با روش کنترل شده ای وارد مخزن می شوند و توسط ویراتور حرکت ارتعاشی تولید شده که باعث جلوگیری از جوش سرد بین ذرات و مسدود شدن جدارها می شود. پودر توسط المنت های کوره حرارتی گرم شده و توسط آن گاز خارج می شود. خنک کننده باعث جلوگیری از سینتر شدن پودرهای گرم می شود.



۵- روش گاز زدایی الکترو دینامیکی

در این روش میدان مغناطیسی می تواند گازهای همراه پودر را بصورت یونیزه در آورد. موقعی که این گازها یونیزه شد توسط پمپ خلاء به سمت توری (قطب منفی) جذب می گردد. و گاز از پودر جدا می شود.

اندازه و توزیع دانه ها

بعد از تهیه کردن و جدا کردن آلودگی ها (الودگی های گازی و جامد) مرحله بعد دانه بندی است. توزیع اندازه دانه ها در خواص پودر خیلی مآثر است چون پودر بدست آمده دارای یک سایز نمی باشد و ما توزیعی از ذرات ریز و درشت داریم.

روش اندازه گیری	حد تقریبی میکرون
۴۵ > سرند	
میکروسکپ (نور سفید)	۱۰۰ -۰/۲۵
میکروسکپ (ماوزای بنفش)	۱ -۰/۱۱
میکروسکپ (الکترون)	۱/۰ -۰/۰۰۴
الترامیکروسکپی	۲/۰ -۰/۰۱
جذب گازها	۲۰/۰ -۰/۰۰۲
جذب از محلول	۵۰ -۰/۰۱
ته نشینی (جاذبه زمین)	۵۰ -۱/۰
ته نشینی (نیروی گریز از مرکز)	۵۰ -۰/۰۵
الوتریشن	۱۰ -۱
نفوذپذیری	۱۰۰ -۰/۵
دیفوزیون	۰/۱ -۰/۰۰۰۱
اشعه ایکس	۰/۰۱ -۰/۰۰۰۰۱
توربیدیمتری	۵۰ -۰/۰۵

متمدهای تعیین اندازه ذرات

۱- آزمایش غربال (تست الک)

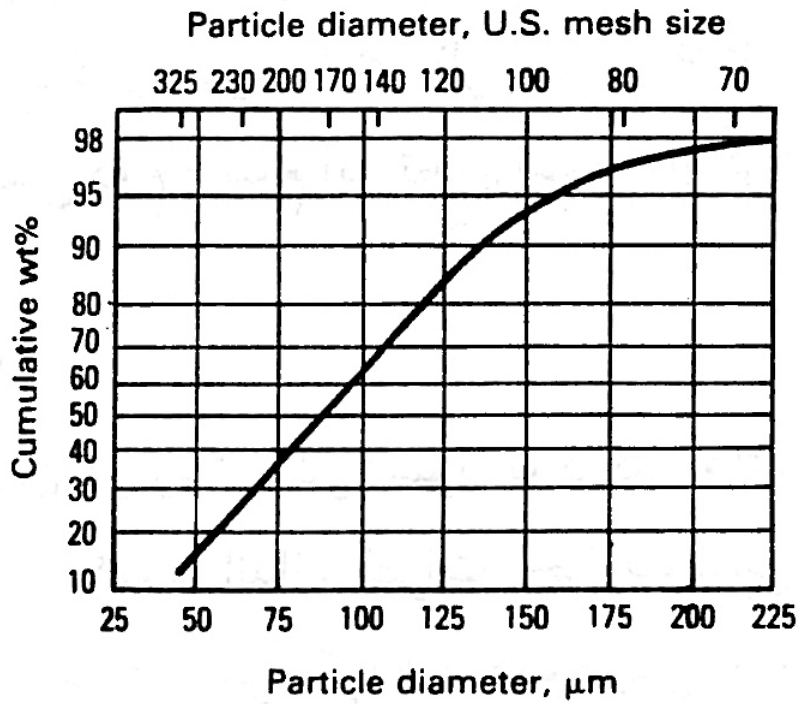
غربال: برای دانه بندی غربال هایی که سوراخ های مربع شکل دارند ترجیح داده می شوند. تعداد سوراخ های غربال در واحد اینچ را (مش) کی گویند. با انتخاب توری ها با مش های مختلف اندازه دانه ها را مشخص می

کنند. اشکال عمده این روش گیر کردن دانه های پودر در غربال است. حداکثر اندازه دانه های قابل عبور از سوراخ غربال 1.1D می باشد. (D: قطر سوراخ غربال)

شماره میش			سوراخ نامی میکرون	شماره میش			سوراخ نامی میکرون
Tyler	A.S.T.M.	B.S.		Tyler	A.S.T.M.	B.S.	
—	۲۵	—	۷۰۷	—	۸۰	—	۱۷۷
۲۴	—	۲۲	۷۰۱	۸۰	—	۸۵	۱۷۵
—	۳۰	—	۵۹۵	—	۱۰۰	—	۱۴۹
۲۸	—	۲۵	۵۸۹	۱۰۰	—	۱۰۰	۱۴۷
—	۳۵	—	۵۰۰	—	۱۲۰	—	۱۲۵
۳۲	—	۳۰	۴۹۵	۱۱۵	—	۱۲۰	۱۲۴
—	۴۰	—	۴۲۰	—	۱۴۰	—	۱۰۵
۳۵	—	۳۶	۴۱۷	۱۵۰	—	۱۵۰	۱۰۴
—	۴۵	—	۳۵۴	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۸۸
۴۲	—	۴۴	۳۵۱	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۷۴
—	۵۰	—	۲۹۷	—	۲۳۰	—	۶۳
۴۸	—	۵۲	۲۹۵	۲۵۰	—	۲۴۰	۶۱
—	۶۰	—	۲۵۰	—	۲۷۰	۳۰۰	۵۳
۶۰	—	۶۰	۲۴۶	۲۷۰	—	—	۵۲
—	۷۰	—	۲۱۰	۳۲۵	۳۲۵	۳۵۰	۴۴
۶۵	—	۷۲	۲۰۸	۴۰۰	۴۰۰	—	۳۷

منافذ نامی غربال های استاندارد

انواع نمودارهای دانه بندی: ۱- نمودار حرارتی ۲- نمودار تجسمی

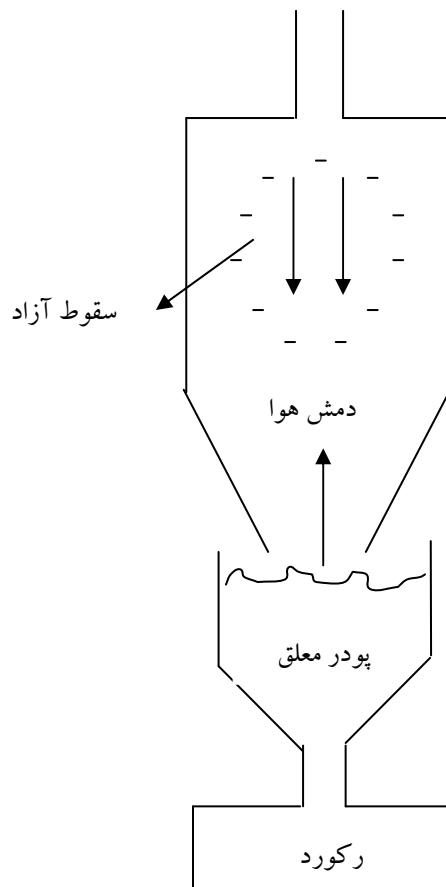


توزیع اندازه ذرات برای نیکل، آهن و آلیاژهای با پایه آلومینیوم

۲- آنالیز هوای رولرز (RULLERS AIR ANALYZER)

در این روش پودر توسط سقوط آزاد آنالیز می شود. پودرهای سنگین تر احتیاج به سرعت هوای بالاتری دارند و پودرهای سبک تر احتیاج به سرعت هوای کمتر دارند. اگر سرعت هوا برابر با سرعت خطی سقوط آزاد ذرات با اندازه های مشخص گردد ذره مشخص معلق می گردد. یعنی با هر سرعت هوا یک سری از ذرات معلق و یک سری از ذرات سقوط آزاد می کنند و به همین ترتیب آنالیز صورت می گیرد. اندازه ذرات پودر که در این روش آنالیز می شوند ۴۰-۵۰ میکرون کن می باشد.

$$\text{IF } V=V_c \implies \text{جسم معلق} \qquad \text{IF } V>V_c \implies \text{جسم به طرف پایین}$$



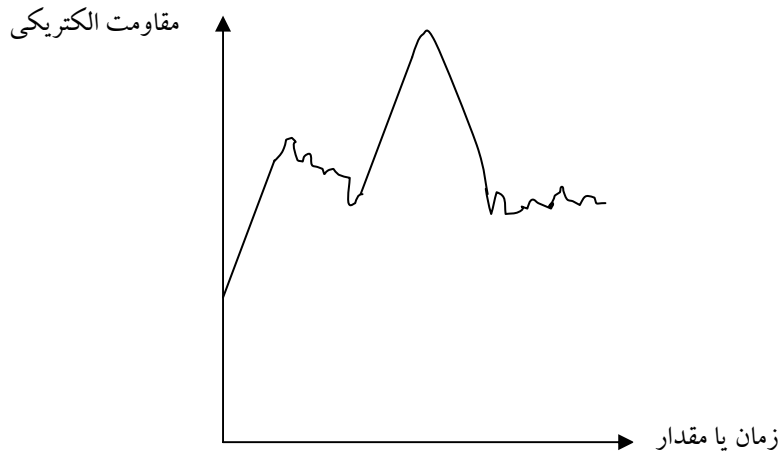
۳- روش الکترون (ELECTRO ZONE SIZE ANALYZING)

در این روش میتوان از یک نوع مایع که مقاومت الکتریکی خاصی دارد استفاده می شود. موقعی که پودر از مایع عبور می کند. چون ذرات هادی می باشد و مقاومت الکتریکی ندارند. بنابر این مقاومت الکتریکی مایع در این محل کمتر شده و جریان بیشتری عبور می کند.. مقدار جریان عبور کننده حاکی از مقدار ذرات پودر است که این مقدار جریان مذکور ثبت می گردد. هر چه ذرات پودر بزرگتر باشد جریان بیشتر و مقاومت نیز کمتر است. اشکالات این روش عبارتند از :

۱- اگر ذرات پودر بزرگ باشد ممکن است مسیر نازل بسته شود.

۲- در هر دفعه بین ۲۰-۵ میلیگرم پودر را آنالیز می کنیم.

۳- اندازه پودر در مایع بین ۱-۵۰ μm و اگر بیشتر باشد نتیجه دقیقی به دست نمی آید.



روش میکروسکوپی (MICROSCOPY)

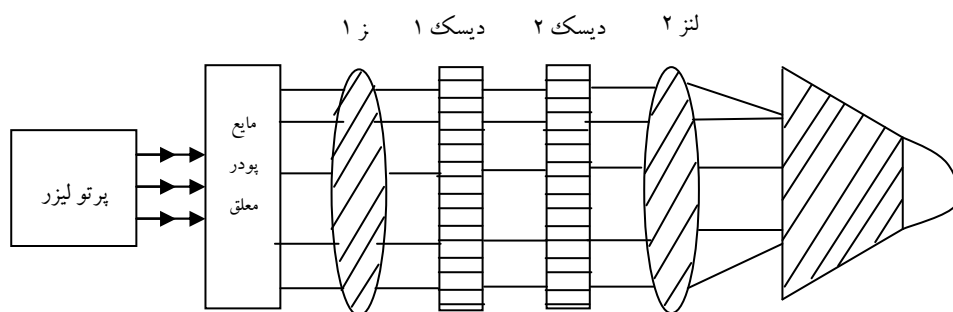
در این روش ذرات پودر بر روی یک نوار چسب ریخته می شوند و توضیح اندازه ها بصورت چشمی تعیین می شود.

محدودیت ها

- ۱- وقت گیر است.
- ۲- احتیاج به شخص متخصص دارد.

روش تفرق نور

دامنه کار این روش ۰/۹-۳۰۰ است. در این روش ذرات پودر را در مایع مخصوصی مخلوط می کنیم سپس پرتو نورانی یا پرتو لیزر برخورد می کند و با توجه به اندازه ذرات زاویه های تفرق خاصی را ایجاد می کند که پس از عبور از لنزها و دیسک ها در آخر متمرکز شده و توسط سلول حساس به نور ثبت می شود.

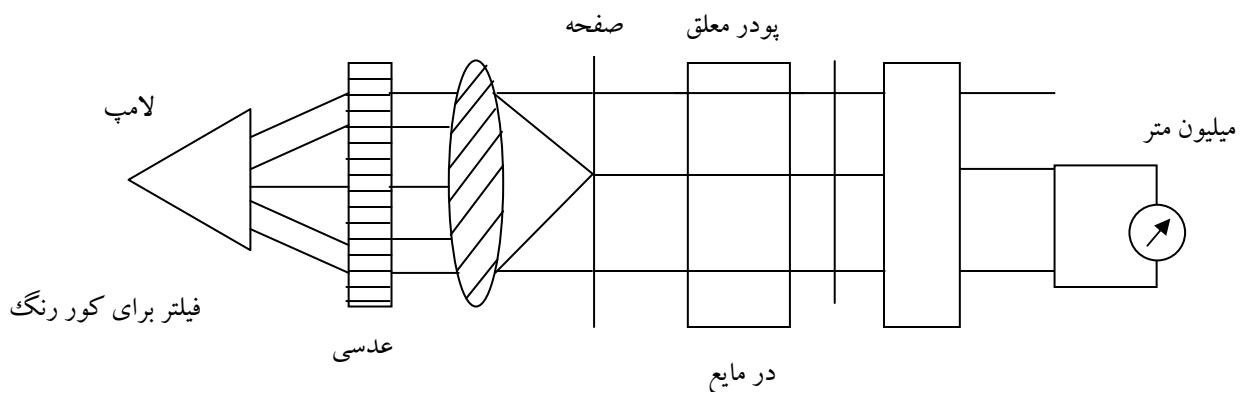


دیسک ۱ ثابت است و لی دیسک ۲ می چرخد و یک سری زاویه های خاصی را پدید می آورد. زاویه های
تفرق با اندازه دانه ها رابطه معکوس دارد.

روش رسوب دادن

وقتی پودر را در یک محلول معلق می کنیم پودرهایی که دارای اندازه های درشت تر هستند سریعتر ذوب
رسوب می کنند.

حداقل اندازه ذرات پودر که در این روش اندازه گیری می شود 0.1μ است.



نکات

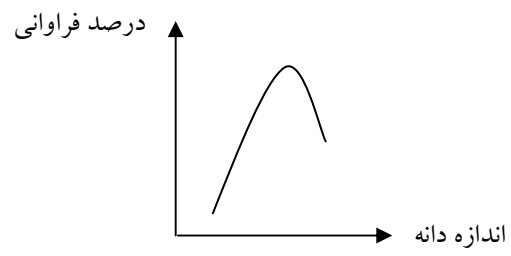
عدد دانه با اندازه دانه نسبت معکوس دارد و هرچه عدد بزرگتر باشد دانه ریز تر است.
پس از اینکه توسط یکی از روش های ذکر شده توزیع دانه ها مشخص گردید منحنی های زیر رسم
می گردد.

$$1- \text{در غربال} \quad f = Ri = \frac{m_i}{m_0} \times 100$$

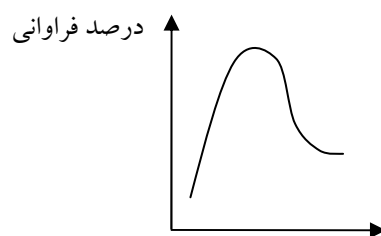
۲- در آنالیز هوایی رولز که ما بر اساس قانون استوک کار می کنیم.

انواع نمودارهای توزیع ذرات

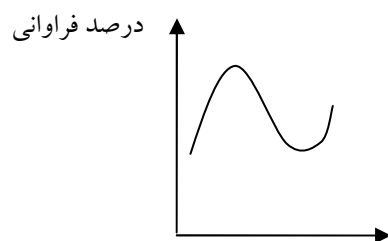
حالت اول: توزیع متقارن: (توزیع ذرات ریز و درشت برابرند)



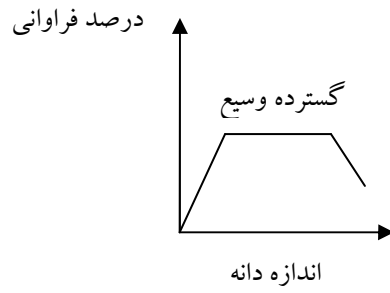
حالت دوم: توزیع متمایل به دانه هاتی ریز



حالت سوم: توزیع متمایل به دانه های درشت



حالت چهارم: توزیع دوگانه (گاهی درشت و گاهی ریز)



حالت پنجم: توزیع نامنظم

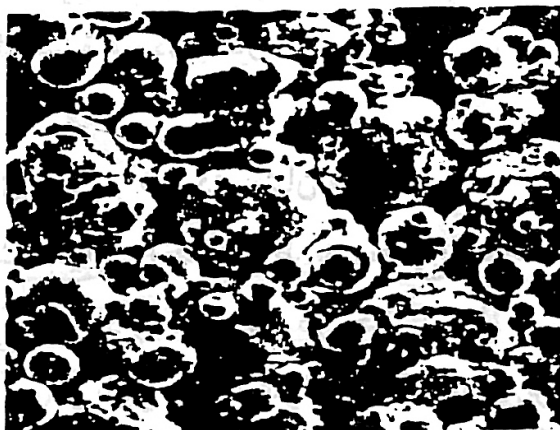


نکات

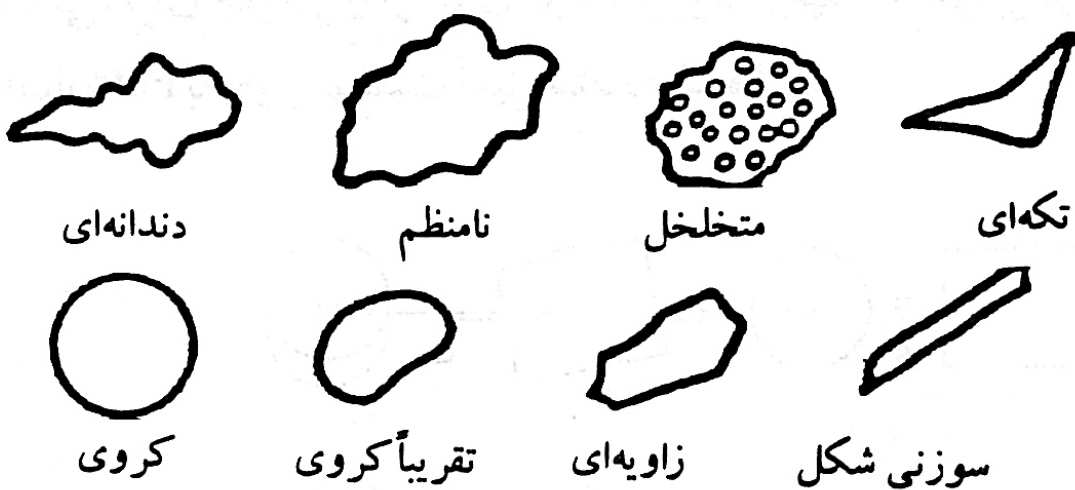
توزیع متقارن بهتر است چون هم ذرات ریز داریم و هم ذرات درشت.

شکل ذرات (مورفولوژی)

- | | | |
|-----------------|-----------------|----------------|
| ۱- شکل سوزنی | ۲- شکل گوشه دار | ۳- شکل شاخه ای |
| ۴- شکل رشته ای | ۵- پولکی شکل | ۶- کروی نامنظم |
| ۷- سوزنی نامنظم | ۸- بی شکل | ۹- کروی |



پودر اتمایز شده با آب و گاز



شکل‌های مختلف پودر فلزات

خواص پودر

- ۱- دانسیته ظاهری
- ۲- سیلان پودر
- ۳- قابیلت فشردن (تراکم پذیری)
۴. سطح مخصوص

دانسیته ظاهری: برای این منظور وزن پودر در حالت فشرده نشده را محاسبه کرده و سپس پودر را در درون قالب ریخته و فشرده می کنیم و حجم آن را بدست می آوریم. در این روش پودر به میزان h فشرده می شود و حجم پودر با استفاده از h و قطر استوانه استاندارد محاسبه می شود. پس از بدست آوردن می توان دانسیته ظاهری را با استفاده از رابطه $\rho = \frac{M}{V}$ بدست آورد.

عوامل مؤثر بر دانسیته ظاهری (ρ_{pp})

- ۱- اندازه دانه
- ۲- توزیع اندازه دانه
- ۳- شکل و وضع صافی سطح
- ۴- تخلخل دانه

نکات

$$C.R \uparrow, \gamma b \rightarrow \text{اذرات نامنظم} \quad \gamma_{Cu} = 50 \frac{gr}{cm}, \gamma_{AL} = 200 \frac{gr}{cm}$$

$$gr/m^2$$

سطح مخصوص

پس Cu سوزنی تر است.

۲- هرچه دانسیته ظاهری بیشتر شود دانسیته خام و سینترینگ بیشتر می شود.

تأثیر اضافه کردن دانه های ریز به دانه های پودر درشت را می توان توسط نمودار ذیل بررسی کرد که سه حالت دارد.

۱- حالت اول:

در صورتی که دانسیته دانه های ریز بیش از دانه های درشت می باشد یا در صورتی که سطح دانه های ریز خیلی بیشتر از دانه های درشت باشد و به صورت دانه های ریز کروی باشد.

۲- حالت دوم:

(پل زدن): باعث کاهش دانسیته می گردد که بر اثر قرار گرفتن دانه های ریز بین دانه های درشت می باشد تا یک مقدار خلل و خروج را پر می کند ولی بعد از آن خودش حجم می گیرد.

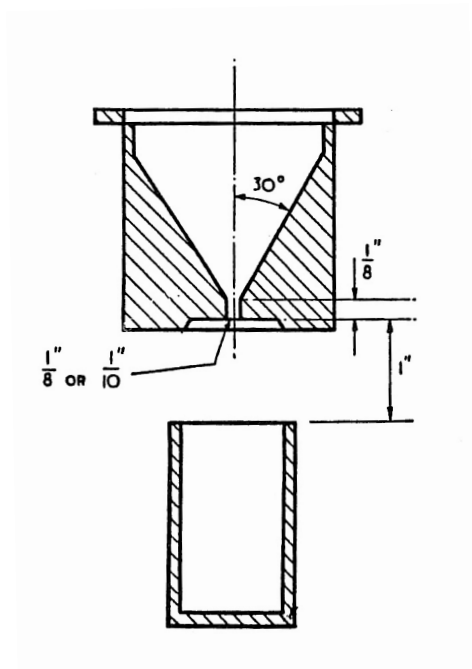
۳- حالت سوم:

دانه های ریز سطح خشن و زیر است و نمی تواند حفره ها را پر کند و دانسیته پائینی دارد.

$$P_{th} > P_r > P_z > P_g > P_{app}$$

سرعت سیلان پودر

برای اندازه گیری سیلان پودر از قیف فالومتر استفاده می شود به این صورت که زمان لازم برای خروج ۱۵۰ پودر به عنوان سرعت مطرح است.



فلوتر هال و طرف استاندارد برای اندازه گیری سرعت جریان و وزن مخصوص ظاهری

به عنوان مثال سرعت سیلان شکر بیشتر از آرد است. پودر هم همینطور است و اگر سیلان کافی نداشته باشد به راحتی وارد قالب نمی گردد.

دانسیته پودر پس از ضربه به عوامل زیر بستگی دارد:

- ۱- شکل دانه پودر
- ۲- تخلخل ذره
- ۳- توزیع اندازه دانه

قابلیت فشردن

قابلیت فشردن معیاری است برای تراکم پذیری پودر که آن را توسط اعمال فشار فشرده می کند و دانسیته پودر فشرده شده را اندازه می گیرد که دانسیته فشردن معیاری برای قابلیت فشردن پودر است.

دانسیته فشردن تابع عوامل زیر است:

- ۱- اصطکاک بین دانه ای
- ۲- ماهیت پودر (داشتن تخلخل)
- ۳- فشار فشردن

بطور کلی ذرات کروی فشردگی آن ها بیشتر است.

نکات

۱- هر چه سرعت پر شدن قالب بیشتر شود زمان تولید قطعه کمتر می شود.

۲- هرچه ضریب تراکم پذیری افزایش یابد سرعت قطعه سازی بالاتر است بعضی فلزات مثل Mg, W, Mo دارای ضریب تراکم پذیری یا کاملیت شدن کمتر و بعضی مثل Cu Al، بیشتر است.

سطح مخصوص

پودر	مساحت سطح مخصوص (cm/g)
Fe احیاء شده	
مش ۳۲۵-۷۹٪ ریز	۵۱۶۰
مخلوط نرمال	۱۵۰۰
مش ۳۲۵-۱٪، درشت	۵۱۶
مخلوط نرمال آهن اسفنجی	۸۰۰
مخلوط نرمال Fe اتمایز	۵۲۵
مخلوط نرمال Fe الکترولیز	۴۰۰
Fe کربنیل، ۷ میکرون	۳۴۶۰
تنگستن احیاء شده، ۰/۶ میکرون	۵۰۰۰
رسوب نیکل ۶ میکرون	۳۰۰۰

مساحت سطح مخصوص پودرهای تجاری

پارامترهای مؤثر بر روی قابلیت فشردن

۱- سختی

۲- شکل دانه

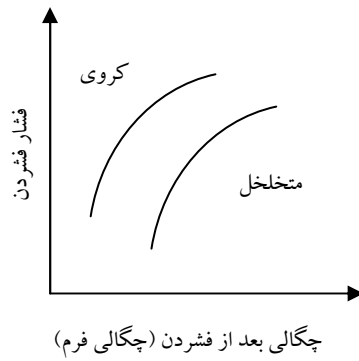
۳- تخلخل ذره

۴- توزیع اندازه دانه

۵- استفاده از مواد روان کننده (جامد)

۶- وجود مواد غیر فلزی مثل اکسیدها قابلیت فشردن را کم می کند.

۷- اضافه کردن عناصر آلیاژی باعث سخت شدن دانه ها می شود و قابلیت فشردن را کم می کند.



فشردن پودر

بعد از تعیین خواص پودر با فشردن شکل قطعه مورد نظر پودر بدست می آورند که روشهای مختلفی دارد و شامل دو قسمت می باشد:

۲- رفتار پودر هنگام فشردن

۱- روش های فشردن

اهداف فشردن پودر

۲- بدست آوردن ابعاد نهایی

۱- بدست آوردن شکل مورد نظر

۴- بدست آوردن استحکام مورد نظر

۳- بدست آوردن تخلخل مورد نظر (در فیلترها)

انواع دانسیته

۱- دانسیته تئوری

۲- دانسیته حقیق

۳- دانسیته ظاهری

برای کاهش اصطکاک بین ذرات از مواد روان کننده مانند پودر گرافیت به میزان حدود ۰.۴٪ استفاده می شود که قابلیت تراکم پذیری را افزایش می دهد ولی مانع از سینتر شدن می شود بنابراین سعی می شود با گرافیت کمتری تراکم پذیری را افزایش داد.

فصل سوم: فشردن



روشهای همراه با اعمال فشار

۱- فشردن در قالب

ابتدا اشکال مختلفی را که می توان از طریق فشردن تولید نمود کلاسه بندی می کنیم:

کلاس ۱: دارای ضخامت کم می باشد و پله ای ندارند. ($t < ۰/۲۵$)

کلاس ۲: فقط ضخامت نسبت به کلاس ۱ تغییر می کند. ($t > ۰/۲۵$)

کلاس ۳: فقط یک طرف آن می تواند پله دار (لبه دار) باشد. ضخامت آن ها محدودیتی ندارد و فقط قاعده آن ها می تواند پله ای بوده یا باشد.

کلاس ۴: این کلاس می تواند چند پله ای باشد. در این کلاس قطعات دنداندار نیز وجود دارند.

ابزار و وسایل لازم برای فشردن پودر

۱- منبع انرژی

۲- قالب با شکل مورد نظر

۳- سنبه (پانچ) بالایی و پایینی با استحکام و طراحی مناسب

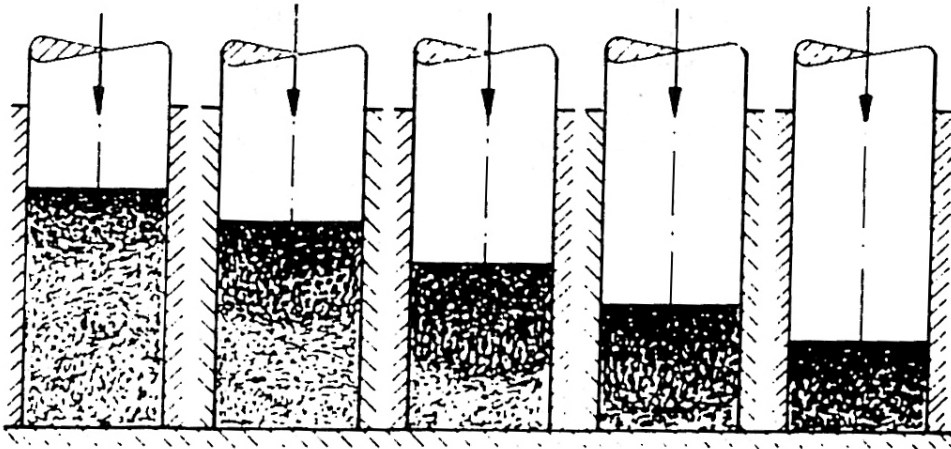
۴- میله های ماهیچه ای

۵- ابزار کنترل برای سرعت و مقدار فشار برای حرکت سنبه ها، میله های ماهیچه ها، حرکت قالب، پرکردن قالب از پودر، خارج کردن قطعه از قالب.

انواع فشردن در قالب

۱- فشردن یک جهته

فشردن در قالب بصورت یک جهته که در آن پدر توسط یک محفظه وارونه وارد قالب می گردد. پانچ پایینی تا انتها بالا آمده است. پانچ پایینی به سمت بالا می رود و پودر وارد قالب می گردد. و سپس پانچ بالایی به سمت پایین می رود. و پودر وارد محفظه شده را فشرده می کند و قطعه بوجود می آید.



قالب با فشار از یک طرف

محدودیت های این روش

- ۱- دانسیته غیر یکنواخت
- ۲- ضخامت کم
- ۳- شکل قطعه محدود است.

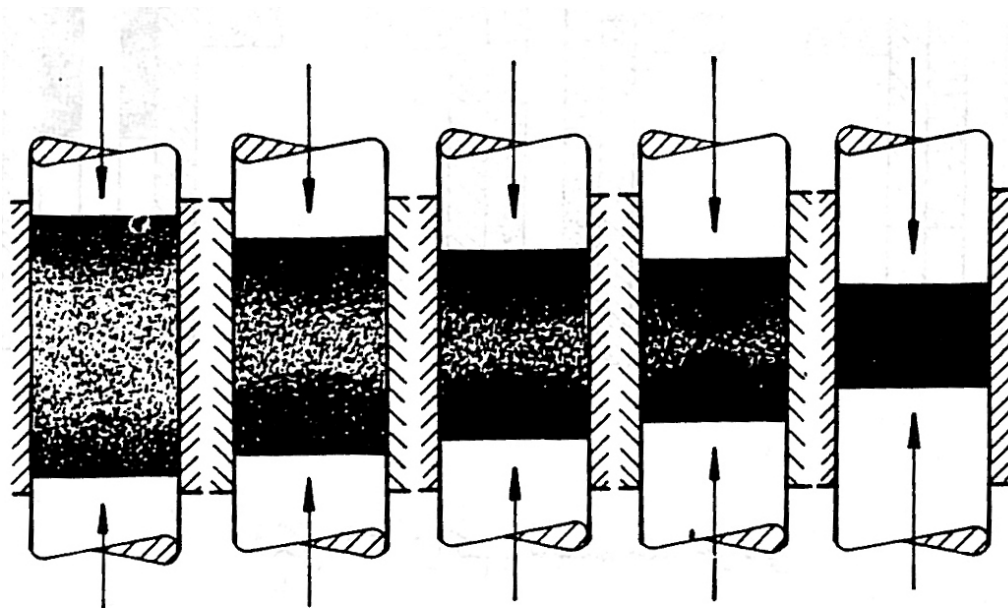
این روش برای کلاس یک کاربرد دارد.

در این روش نیرویی که با دانه های پودر در قسمت بالایی قطعه وارد می شود. بسیار زیاد است. پس دانه ها دانسیته بالایی دارند ولی نیرویی که به دانه های پودر در قسمت پایینی وارد می شود کم است و پودر در این قسمت دانسیته کمی دارد. بنابراین باید ضخامت قطعه کم باشد تا اختلاف دانسیته کاهش یابد.

۲- فشردن دو جهته

این روش برای کلاس ۱ و ۲ بکار می رود.

این روش کاملاً شبیه روش قبلی است منتهی در روش فشردن پانچ پایینی و بالایی همزمان باعث فشردن قطعه می گردند. بنابراین دانسیته در پایین و بالای قطعه یکسان است.



قالب با فشار از دو طرف

محدودین های این روش

۱- دانسیته غیر یکنواخت می باشد.

۲- ضخامت قطعه باید کم باشد. ولی از روش قبل ضخامت بیشتر می باشد.

۳- شکل قطعه باید ساده باشد.

مزایای این روش

۱- سادگی
۲- ارزان بودن نسبی

۲- فشردن دوجته با قالب شناور

در این روش قالب ثابت نمی باشد زیرا وقتی که پانچ به پایین حرکت می کند به علت اصطکاک بین دانه های پودر قالب می تواند در جهتی که نیروی بیشتری به آن اعمال می گردد حرکت کند و به این ترتیب سایش قالب کمتر است. برای خارج شدن قطعه پانچ باید پایین بیاید.

محدودیت های این روش

۱- شکل این قطعه باید بسیار ساده باشد.

۲- تجهیزات این روش بسیار گران قیمت است.

مزایای این روش

با اینکه فشار دو جهته است ولی سایش قالب کمتر است.

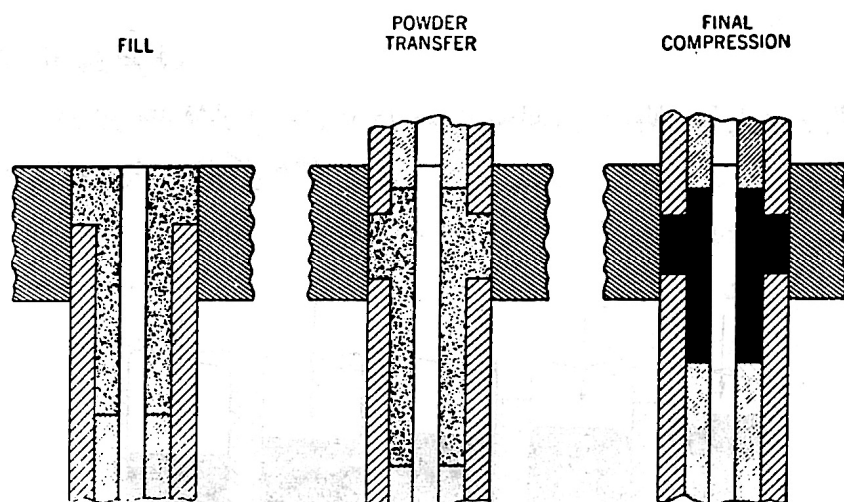
نکات

۱- عدم یکنواختی دانسیته خام اثر مضرتری در سینتر شدن دارد. باعث دفرموجی شدن قطعه می گردد.

۴- فشردن چند جهت با قالب ثابت

این روش نسبت به روش قبلی خیلی کامل تر است و هر کدام از پانجهای بالایی و پایینی از چند قطعه تشکیل شده است. در این مرحله اول پودر را مانند حالت های قبلی وارد قالب می کنند و در مرحله بعدی پانچ بالایی پایین می آید و همراه با قالب فشرده می شود. و پودر را داخل قالب فشرده می کند.

نکته: در این روش آنچه مهم است این است که در هر کدام از قسمت های این پانچ ها می تواند جداگانه حرکت کنند. به این ترتیب اول قسمت های پایینی فشرده می شوند و در نهایت پانچ پایینی می آید و قطعه خارج می گردد



تراکم با سیستم چند حرکتی

محدودیت های این روش

- ۱- پرچیدگی این روش
- ۲- گران بودن

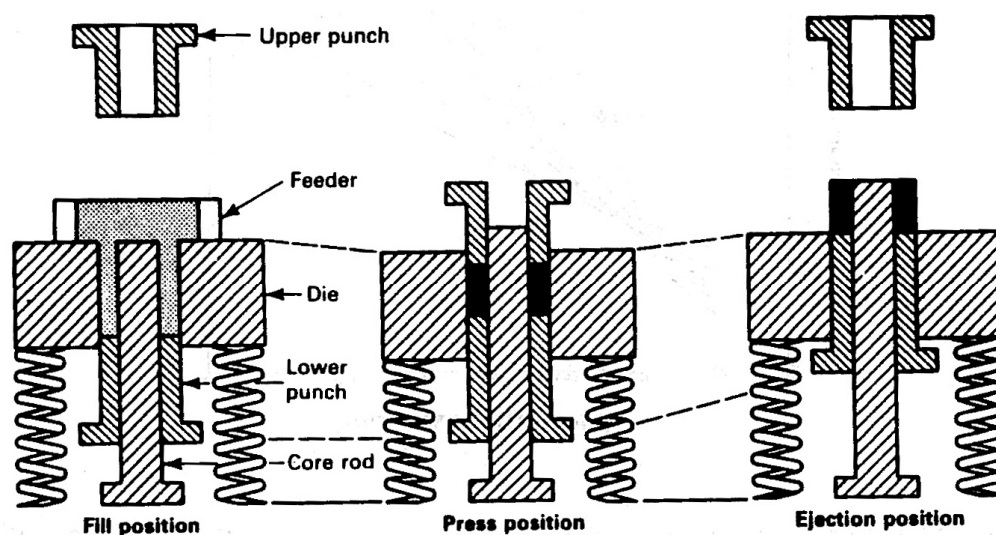
مزایای این روش

۱- ساخت قطعات کلاس های ۱ و ۲ و ۳

۲- با کنترل حرکت پانچ می توان بیش از یک پانچ از چندین قسمت تشکیل داد و دانتیسه را در تمام قسمت های قطعه توزیع کرد.

۵- فشردن چند جهته با قالب شناور

از محدودیت های این روش شناور بودن آن است. و علاوه بر مزایای روش قیلی می توان به سایش کمتر قالب اشاره کرد.



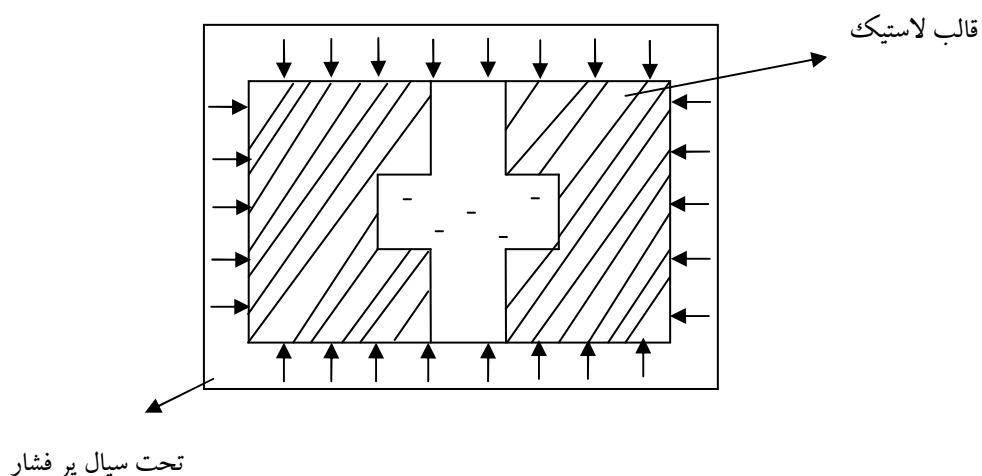
تراکم در قالب های شناور

۶- فشردن عکس العملی

از مزایای این روش تولید قطعات با اشکال و سوراخ هخای متعدد می باشد که این روش مشابه روش فشردن چند جهته با قالب شناور است. در این روش پاشیدن پودر به اطراف وجود ندارد.

فشردن ایزواستاتیک

در روش فشردن با قالب هر چند که پانچ ها کنترل می شود ولی باز هم قسمتهای مختلف قطعه دارای دانسیته متفاوتی می باش. ولی در روش فوق می توان قطعه ای با دانسیته یکسان تولید کرد. این روش برای پودرهایی که قابلیت فشردن کمی دارند قابل استفاده است. بعنوان مثال می توان به تهیه قسمت چینی (سرامیکی) شمع اتومبیل اشاره کرد و جنس ماهیچه را از فلز یا لاستیک می توان ساخت.



انواع روش فشردن ایزواستاتیک

دو روش فشردن ایزواستاتیک وجود دارد:

۱- روش خشک (یا فشردن گرم)

در این روش پودر را در محفظه ای که به شکل قطعه مورد نظر است قرار می دهند محفظه در برابر حرارت مقاوم است. این قالب انعطاف پذیر است. (مانند لاستیک) اطراف این قالب ها را طوری که از تغییر شکل دادن آن ها جلوگیری می کند پس از آن توسط گاز پرفشار و گرم پودر هم فشرده و هم سینتر می شود و دانسیته آن کاملاً یکنواخت می شود. در این روش پانچ وجود ندارد همچنین در این روش قاب چند بار مصرف می شود ولی در روش تر قالب یک بار مصرف می شود.

۳- روش تر

در این روش ابتدا پودر را داخل قالب می کند و هوا از پودر خارج کرده و این محفظه را در یک محفظه بزرگتر تحت فشار سیال قرار می دهند. بعد از شکل گیری قطعه خام آن را سینتر می کند.

در روش ایزواستاتیک چون اعمال نیرو به صورت ایزواستاتیکی است به تمام قسمت های قطعه به یک اندازه نیرو اعمال می شود. در روش ایزواستاتیک خاصیت الاستیکی و ارتعاشی دارد پس گاز با فشار وارد محفظه می گردد و اعمال نیرو می کند.

فشردن به روش رها کردن سریع انرژی

فشار در مدت زمان 10^6 S به قطعه اعمال می گردد. سرعت کوبیدن 10^4 ft/Sec و فشاری که به کار می رود 10^7 - 10^6 Psi می باشد دانسیته خام قابل از سینتر شدن ۹۵٪ می باشد.

مزایای این روش

۱- قطعات بزرگ را می توان با این روش تولید کرد.

- ۲- از پودرهایی با کیفیت پایین می توان استفاده کرد.
- ۳- در مواردی می توان از قطعه بدون سینتر کردن استفاده کرد. با این روش می توان لوله های مولیبدنی به طول ۲ متر و طول یک متر تولید کرد. (Mo قابلیت تراکم بسیار کمی دارد).

معایب این روش

- ۱- انتخاب مواد روان ساز برای قالب به خاطر فشار خیلی زیاد مشکل است.
- ۲- جنبه ایمنی قالب بر اثر فشار زیاد بسیار مهم است.
- ۳- به خاطر عدم سرعت تولید بالا مشکل اقتصادی دارد.
- ۴- چون تلرانس بوجود آمده خیلی زیاد نمی باشد مشکل کنترل ابعادی وجود دارد.

فورجینگ اکستروژن- نورد

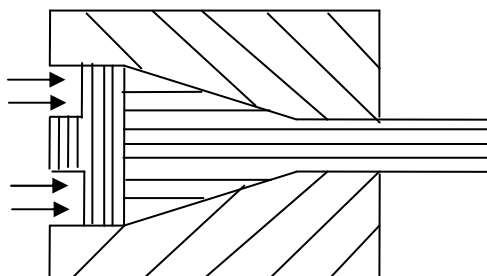
فورجینگ: برای شکل دادن پودرها اولین بار این روش برای تهیه لنت های سوخت در رآکتورهای اتمی استفاده می شد. و امروزه برای ساخت قطعات مختلف کاربرد دارد. برای اینکه در هنگام اعمال فشار به پودرها، پودر متلاشی نشود، آن را در داخل محفظه ای قرار دهند و سپس به محفظه فشار وارد می کنند. دانسیته ای که از طریق فورجینگ بدست می آید می تواند خیلی نزدیک به دانسیته تئوری باشد. اگر قبل از عملیات پودر را گرم کنید احتیاج به سینتر نیست و قطعه نهایی تولید می گردد. افزایش دانسیته در این روش سریع اتفاق می افتد. نمودار فوق تغییرات دانسیته را از زمانی که انچ بالایی با پودر برخورد می کند تا زمانی که پانچ متوقف می شود تا قطعه نهایی تولید گردد را نشان می دهد.

اکستروژن: اگر پودر با قالب اکستروژن فشرده شود محصول منقطع می شود. برای جلوگیری از این امر دو روش وجود دارد.

روش اول

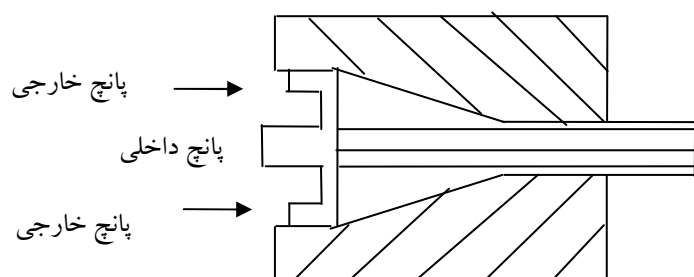
در این روش از یک پانچ دو قسمتی که دارای دو قسمت داخلی یا خارجی است استفاده می شود.

روش کار به این صورت است که در یک حالت پانچ خارجی ثابت و پانچ حرکت کرده و فویل را پاره می کند و راه خود ادامه می دهد.



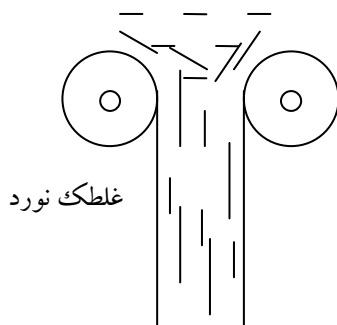
روش دوم

بعد از اینکه یک نیروی اولیه به محفظه اعمال شده و فشار داخل محفظه افزایش یافت سپس نیرویی به پانچ خارجی وارد می گردد و مطابق شکل انچ داخلی و خارجی با هم حرکت می کنند.



نورد

با استفاده از این روش می توان دانسیته بالایی به دست آورد. هر چه فاصله بین دو غلطک بیشتر باشد دانسیته کاهش می یابد تا زمانی که پودر میریزد چسبندگی کافی وجود ندارد. فاصله بین دو غلطک حدود چند دهم میلیمتر تا ۰/۵ میلیمتر می باشد. بعد از اینکه یک ورقه بدست آمد آن را زتر می کند و مجدداً نورد می کند تا به ضخامت مورد نظر برسند.



فشردن ارتعاشی

کلیه روش هایی که تا کنون توضیح داده شد می تواند به صورت ارتعاشی هم وجود داشته باشد. با استفاده از ارتعاش با فشار کمتر می توان به دانسیته بیشتری دست پیدا کرد. معمولاً یک فرکانس خاص باید یک حالت اپتیم داشته باشد.

محدودیت های این روش

- ۱- گران بودن
- ۲- نیاز به تجهیزات بسیار

مزایای این روش

در این روش می توان از پودرهایی که قابلیت فشردگی کمی دارند استفاده کرد.

۲- روش های بدون اعمال فشار

روش جاذبه ای (Gravity)

در این روش پودر را تحت وزن خودش به داخل قالب می ریزند و ممکن است در مواردی مقداری ارتعاش هم ایجاد شود تا پودر به راحتی وارد قالب گردد. سپس پودر به همراه قالب با هم گرم می شوند تا قطعه نهایی بدست آید. در این روش قطعه خام بدست نمی آید و جسمی که تولید می شود متخلخل می باشد. و برای تولید فیلترها به کار می رود.

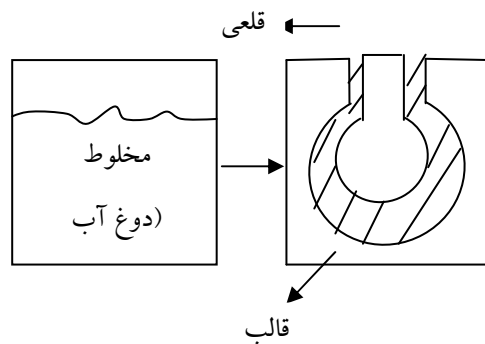
محدودیت های این روش

- ۱- ممکن است قطعه به قالب بچسبد.
- ۲- ممکن است در هنگام سینتر کردن انقباض شدید.
- ۳- برای اشکال پیچیده قالب خوب پر نمی شود.
- ۵- برای تولید زیاد به قالب های فراوانی نیاز است.

روش دوغ آبی (Slip Casting)

در این روش پودر را با یک مایع مخصوص که اغلب آب است و در مواردی می تواند مواد آلی (الکل) باشد مخلوط می کنند تا ذرات پودر به صورت معلق درون این مایع باقی بماند. سپس این مخلوط را درون قالب

میروزند. قالب خاصیت جذب آب دارد و آب مخلوط را جذب می کند و قطعه نهایی تشکیل می شود و آنم را از قالب خاج می کند. اغلب مواقع قالب یکبار مصرف است. این روش برای سرامیک هایی مثل قوری و وسایل بخاری بکار می رود. در این روش قطعات بدتس آمده متخلخل می باشند و سطح شکست آن ها دارای حباب های هوا می باشند.



روش پیوسته

در این روش خمیری از پودر به وسیله آب مایعات مشابه تهیه می کنند. و یک سری مواد نگهدارنده برای جلوگیری از رسوب ذرات پودر به آن اضافه می کنند سپس خمیر تهیه شده روی نوار نقاله ریخته می شود و توسط غلطکی ضخامت آن کنترل می شود. خمیر تهیه شده از داخل کوره ای که درار شیب حرارتی است عبور می کند. این روش تخلخل تا ۹۰٪ است و در تهیه باطری های CDNI بصورت جامد استفاده می شود و سطح صافی بدست می آید.

رفتار پودر هنگام فشردن

یکی از اساسی ترین مسئله متالورژی پودر، رفتار پودر هنگام فشردن می باشد زیرا کیفیت قطعه بستگی به رفتار پودر هنگام فشردن دارد. در مرحله فشردن شدن پودر دو پروسه اتفاق می افتد.

- ۱- حرکت جمعی ذرات پودر
- ۲- تغییر شکل و شکست ذرات

۱- حرکت جمعی ذرات پودر

حرکت جمعی ذرات پودر بهنگام پایین آمدن صورت می گیرد و تخلخل کاهش می یابد. این حرکت جمعی موجب می شود که محل های خالی پر شود. این حرکت توسط اصطکاکی که بین دانه های پودر و جداره قالب می باشد محدود می گردد و اگر دانسیته ظاهری کم باشد وقتی فشرده میشوند این حرکت آسانتر می گردد. ذرات کوچکتر بهتر می توانند حرکت کنند و جاهای خالی را پر نمایند.

تمام خواصی که در اثر اصطکاک دانه های پودر با یکدیگر و دانه های پودر با جداره قالب مؤثرند در حرکت جمعی ذرات پودر نیز مؤثر خواهد بود. حرکت جمعی ذرات پودر با افزایش فشار کم شده و فشارهای زیادی موجب می شود که کانال های زیادی پر شده و مسدود گردند و امکان حرکت کاهش می یابد. در این روش هر چه میزان فشار زیادتر باشد حرکت دسته جمعی کمتر خواهد بود.

۲- تغییر شکل و شکست ذرات

تغییر شکل و شکست ذرات باعث می شود که میزان تخلخل کاهش بیابد. یکی از مکانیزم های اصلی افزایش دانسیته تغییر شکل در دانه های پودر می باشد. تغییر فرم های لاستیک در دانه های پودر انجام می گیرد قابل برگشت است و هر چه مدول دانسیته دانه های پودر کمتر باشد تغییر فرم در لاستیک دانه ها و قطعه ها ایجاد می شود، بیشتر است. تنش باقیمانده در نقاط مختلف قطعه به دانه های پودر اعمال می شود.

قسمت های عمده ای از مواد بطور قابل ملاحظه ای کار سرد می شود که باعث می شود با افزایش فشار تخلخل کمتر شود. بطوریکه برای افزایش فشار نیروی زیادی را اعمال کنیم و افزایش فشار تا مراحل آخر امکان پذیر نیست چون استحکام پودرها افزایش می یابد و اگر ترد باشد شکسته می شود و خرد می گردد. هر چه مواد نرم تر باشد تغییر فرک آ» ها زیادتر و اعمال فشار کمتری لازم است تا تخلخل پر شود. بطوری که نرم ترین مواد مناسب ترین مواد برای افزایش استحکام از طریق تغییر فرم دانه های می باشد. بنابراین استفاده از مواد تکفاز و فلزات خالص مناسب تر از استفاده از آلیاژها و موادی که آنیل شده اند می باشد.

مواد آنیل شده مار سخت شده و نیروی لازم برای فشرده شدنشان سریعاً افزایش می یابد.

در مورد استفاده از آلیاژها برای ساخت قطعه ای برنجی بهتر است از پودر روی و مس بطور جداگانه استفاده شود. در فشارهای زیاد (نظیر فورجینگ و نورد) موادی که قابلیت تغییر فرم کمی دارند شکسته می شوند و آن مواد داخل حفره های درون پودر رفته و باعث افزایش دانسیته می گردند. که پودرهای متخلخل نیز این رفتار را دارند.

در روش ایزواستاتیک، حرکت جمعی ذرات بهتر انجام می شود و دانسیته افزایش پیدا می کند.

در روش فشردن با انرژی (HERP) مکانیزم افزایش دانسیته بیشتر به طریق شکل دادن دانه های پودر می باشد. در روش ارتعاشات حرکت ذرات پودر باعث افزایش دانسیته می گردد. در روش های فورجینگ اکستروژن و نورد، تغییر فرم و شکست ذرات خیلی سخت عمدتاً از طریق ذرات و تغییر فرم می باشد.

در طول فشردن یکی از تغییرات اساسی که رخ می دهد بسته شدن حفره است که در این مرحله حفرات ایزوله می شود و حرکت در داخل حفره ها مشکل می گردد. وقتی حفره های بسته می شود، هوای داخل آن ها محبوس می شود و این هوای محبوس شده اهمیت زیادی در مراحل سینتر کردن و مراحل بعدی دارد. اگر اندازه دانه ها کاهش پیدا کند و یا ذرات متخلخل استفاده شود و محبوس شدن هوا زیادتر شده در فشردن در قالب حرکت دانه بیشتر جهت اعمال نیرو می باشد به شکل عدسی می شود.

↑ افزایش دانسیته → ↑ تغییر شکل دانه های پودر

↑ تغییر فرم الاستیک در دانه ها و قطعات → ↑ مدول الاستیسیته دانه های پودر

↑ دانسیته → ↑ حرکت جمعی ذرات

↑ تخلخل → ↑ فشار

دانسیته خام قطعه فشرده شده

دانسته خام نه تنها معیار مؤثر فشار فشردن است بلکه رفتار ماده در طول سینتر شدن را نیز توسط دانسیته خام می توان مشخص کرد. بطور کلی اگر سرعت اعمال فشار زیاد باشد راه حفره ها مسدود شده و حفره ها خوب پر

نمی شوند. دانه های ریز دارای اصطکاک بیشتری هستند و هنگام حرکت ذرات متوقف می گردند و دانسیته کمتر می شود.

عوامل مؤثر بر افزایش دانسیته خام

۱- افزایش فشار فشردن

۲- افزایش اندازه دانه (یا افزایش دانسیته ظاهری)

۳- کاهش سختی یا استحکام پودر

۴- کاهش سرعت فشردن

دانسیته در طول قطعه متغیر است و به طرف مرکز قطعه زیاد می شود و علت آن توزیع تنش و اصطکاک بین قالب و ذرات پودر است. بطور کلی نواحی کناری قطعه با قالب در تماس است، دانسیته کمتری دارند و فشار اعمال شده به نواحی بالایی بیشتر از نواحی پایینی است و این امر منجر به افزایش دانسیته بالایی می شود. هر قسمت از قطعه که سختی بالاتری دارد دانسیته بالاتری نیز دارد.

گاهی اوقات از توزیع دانسیته خام استفاده نمی کنند تا خواص مطلوب را بدست آورند. بعضی از نواقص را از توزیع دانسیته مشخص بدست می آورند. هرچه قدر کمتر باشد موقعی که قطعه سینتر می شود انقباض بیشتری صورت می گیرد. از این روش می توان برای کنترل ابعاد قطعه استفاده نمود.

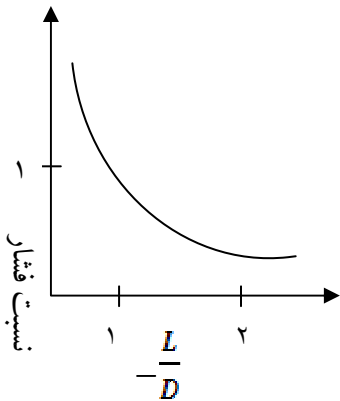
توزیع دانسیته خام

توزیع دانسیته خام بستگی به ارتفاع قطعه (L) و قطر قطعه (D) دارد که اگر: $L/D \rightarrow 0.5$ باشد.

توزیع دانسیته در داخل قطعه یکنواخت می باشد.

وقتی که: $۲ \rightarrow L/D$ فشار به پانچ پایینی به صفر می رسد و قسمت های پایینی دارای دانسیته کمی خواهند شد.

۰- نسبت فشار در نتیجه: $۲ \rightarrow L/D$ استوانه ای



قطعه دیسکی $\downarrow \frac{L}{D} \Rightarrow$ قطعه میله ای یا استوانه ای $\downarrow \frac{L}{D} \Rightarrow$

فشار اعمالی به پانچ بالایی / فشار اعمالی به پانچ پایینی = نسبت فشار

نکات

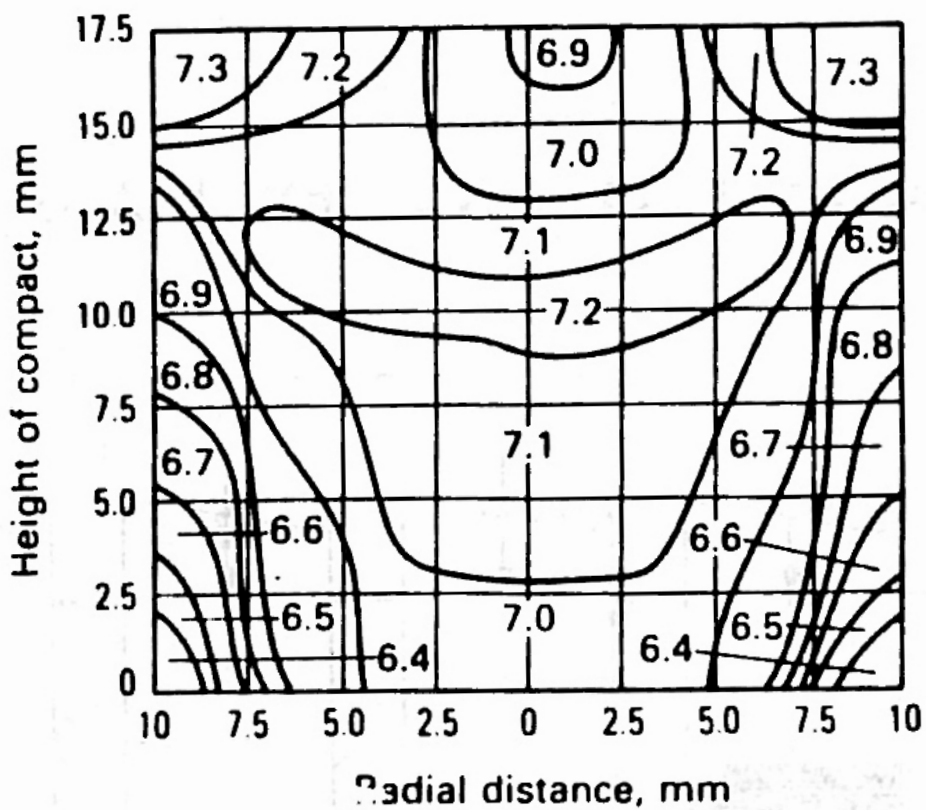
۱- هرچه دانسیته خام بیشتر باشد سینترینگ بیشتر و نهایتاً قطعه بهتر چگال می شود و هرچه سرعت اعمال فشار در مرحله دمپرینگ کمتر باشد دانسیته خام بیشتر افزایش می یابد.

۲- به طور کلی در مرحله فشردن هرچه از طرف غالب به طرف مرکز برویم میزان چگالی بیشتر می شود و در واقع دانسیته خام افزایش می یابد و هرچه از بالا به پایین بیاییم دانسیته کاهش می یابد.

۳- هرچه نسبت L/D افزایش یابد نسبت فشار به سمت صفر می رود و یعنی پانچ پایینی هیچ نیرویی اعمال نمی کند.

۴- در رابطه هکل B پارامتر ثابتی است و هرچه ذرات کروی تر شوند B به سمت صفر میل می کند.

۵- به طور کلی هرچه ذرات آلیاژی تر شوند تنش تسلیم و خواص مکانیکی آلیاژ افزایش می یابد و دانسیته خام کاهش می یابد و ذرات کروی مقاومت بیشتری در برابر کروی شدن دارند.



توزیع وزن مخصوص را در پودر نیکل متراکم شده از یک طرف (بالا) نشان می دهد

روش هایی که موجب یکنواخت کردن دانسیته می شوند

- ۱- استفاده از فشار زیاد
- ۲- استفاده از روان کننده ها برای کاهش اصطکاک
- ۳- استفاده L/D کمتر باید سعی کنیم که این نسبت تا حد امکان کم باشد (یعنی قطعه میله ای شکل باشد).
- ۴- استفاده از فشردن دو جهته
- ۵- استفاده از اصول قالب شناور
- ۶- فشردن اولیه بعضی از قسمت ها

۷- تعویض نوع پودر

در عمل معمولاً از مجموعه ای از روش های فوق استفاده می گردد.

رابطه Hekel

رابطه ای وجود ندارد بین دانسیته خام و فشار اعمالی و فاکتورهای دیگر ارتباطی برقرار کند ولی یک رابطه تجربی موسوم به رابطه Hekle وجود دارد که ارتباط بین دانسیته خام و فشار اعمالی را نشان می دهد.

$$\log(1 - D) = [\log(1 - D_0 - B)] - \frac{P}{3_s}$$

$$D = \frac{Pg}{pth} = \text{دانسیته تئوری / دانسیته خام}$$

$$D_0 = \frac{p_{app}}{pth} = \text{دانسیته تئوری / دانسیته ظاهری}$$

S: فشار تسلیم پودر P: فشار اعمالی B: یک ثابت بسیار کوچک

اگر S به شدت کاهش و B افزایش و p_{app} هم افزایش یابد در نتیجه p_g افزایش می یابد.

B: برای ذرات کرمی D: نسبت دانسیته خام به دانسیته تئوری

استحکام مکانیکی و کیفیت خام قطعه

قطعه ای که از قالب خارج می شود استحکام آن قطعه به علت درگیری مکانیکی ذرات است و هیچ بانندی بین ذرات وجود ندارد و ناهمواری های سطح باعث افزایش استحکام می شوند.

عواملی که باعث افزایش استحکام می شوند:

۱- ناهمواری های سطح دانه ای پودر

۲- افزایش سطح پودر (با بی قاعده بودن و کاهش اندازه دانه های پودر سطح افزایش می یابد).

۳- کاهش دانسیته ظاهری پودر (هرچه کمتر باشد استحکام خام بیشتر می شود).

۴- اکسیداسون سطحی و آلودگی دانه های پودر (هرچه اکسیداسیون کمتر باشد درگیریها بیشتر می باشد و در نتیجه استحکام خام بیشتر است)

۵- افزایش دانسیته خام (هرچه P_g بیشتر باشد استحکام خام افزایش می یابد).

۶- کاهش مواد اضافه شده به پودر و مواد روان کننده مثل گرافیک، (کاهش این موارد باعث افزای اصطکاک شده و درگیری ذرات بیشتر می شود و استحکام افزایش می یابد).

مواد خیلی سخت که مدول الاستیسیته بالایی داشته باشند به سختی فشرده می شوند. چون قسمت عمده ای که در آن تغییر فرم ایجاد می شود از نوع الاستیک است و بازگشت آن بعد از برداشتن نیرو نامطلوب است و موجب بوجود آمدن نقائصی می گردد.

اگر در طول فشردن تغییر فرم پلاستیک خیلی زیاد باشد به علت درگیری ذرات فرم الاستیک به وجود آمده به راحتی نمی تواند باگشت نماید و موجب می شود که تنش های باقیمانده وجد داشته باشد و این تنش ها با گذشت زمان آزاد می شود و اتصال بین دانه ها کاهش می یابد و قطعه ریزش می نماید.

نقائصی که می توانند در مواد خام به وجود آیند به طور جدی استحکام قطعه را کاهش می دهند.

نقائصی که استحکام قطعه را کاهش می دهند

۱- پوسته، پوسته شدن (به صورت عدسی)

۲- ترک های صفحه ای (در جهت عمودی اعمال فشار و به صورت ترک های پهن)

دلایل تشکیل نواقص

- ۱- بازگشت تغییر فرم الاستیک روی حفره های صفحه ای که در اثر فشردن بوجود آمده اند می تواند به صورت ترک هایی در آیند.
- ۲- تنش های اعمالی، در طول خارج کردن قطعه در هنگام فشردن نیرو اصطکاک به سمت بالا و در موقع خروج نیروی اصطکاک به سمت ایین اعمال می شوند و باعث ایجاد ترک و ورقه شدن قطعه می شود.
- ۳- طراحی مناسب قالب ایجاد تغییر شکل های الاستیکی در قالب منجر به ایجاد نواقصی در قطعه خام می گردد.
- ۴- فشار های زیاد در هنگام فشردن باعث ایجاد تمرکز تنش و حساس شدن قطعه به ترک خوردن می باشد.
- ۵- فصل مشترک بین نواحی با دانسیته خام مختلف محل اشاعه ترک خواهد بود.
- ۶- استفاده از مواد روان کننده زیاد از درگیری مکانیکی جلوگیری می کند.
- ۷- هوای محبوس شده در حفره های ایزوله موجب تمرکز تنش می گردند.

روش های جلوگیری از نقائص به وجود آمده: (جلوگیری از پوسته شدن)

- ۱- استفاده از یک پودر با استحکام خام بیشتر
- ۲- کاهش تنش های اعمال شده هنگام خروج قطعه
- ۳- استفاده از پودری که با تراکم پذیری بهتر
- ۴- تغییر نوع و مقدار ماده روان کننده
- ۵- طراحی مناسب قالب

تاول زدگی

در صورتی که پانچ کاملاً مماس با قالب باشد و هوای خروجی از قالب نتواند از بین پانچ و قالب عبور کند در قطعه تولیدی حالت موج (Bulge) یا تاول زدگی ایجاد می شود.

استفاده از مواد روان کننده

قسمت عمده ای از انرژی صرف غلبه بر اصطکاک می گردد. برای کاهش اصطکاک و بهبود کیفیت پودر از مواد روان کننده استفاده می شود که مواد روان کننده می شود که مواد روان کننده می توانند جامد یا مایع باشد.

اهداف استفاده از مواد روان کننده

۱- کاهش استفاده از بین دانه های پودر و پانچ و بین دانه های پودر و میله های ماهیچه و بین ذرات پودر در هنگام اعمال فشار

۲- کاهش در مصرف انرژی

۳- ایجاد سهولت خروج قطعه پس از فشردن

۴- کاهش اصطکاک و در نتیجه سایش دانه ها

۵- از خرد شدن و شکستن قطعه جلوگیری می کند.

روش های اضافه کردن مواد روان کننده

۱- روغن کاری خارجی: آغشته کردن جداره های داخلی قالب با مواد روان کننده (مشکلات تکنیکی دارد).

۲- مخلوط کردن مواد روان کننده با پودر: در این روش دانه های پودر را با مواد روان کننده مخلوط می کنند که روان کننده می توان جامد باشد نظیر: گرافیت.

اثرات مطلوب مواد روان کننده

۱- کم کردن اصطکاک
۲- کم کردن فشار لازم برای خارج کردن قطعه

اثرات نامطلوب مواد روان کننده

- ۱- تأثیر بر روی دانسیته ظاهری: در ابتدا موجب افزایش دانسیته ظاهری می شوند و با اثر خود ماده روان کننده موجب کاهش دانسیته ظاهری (p) می گردد.
- ۲- تأثیر روی دانسیته خام مشابه به حالت ۱
- ۳- اثر استحکام خام که معمولاً آنرا کاهش می دهد.

فصل چهارم سینترینگ

سینتر کردن عبارت است از حرارت دادن قطعه و ایجاد پیوند متالورژیکی بین ذرات پودر یا عمل جوش دادن ذرات پودر اعم از سرامیکی، فلزی و کامپوزیتی به یکدیگر در اثر حرارت دادن در زمان مناسب که موجب کاهش تخلخل و پر شدن حفرات می گردد.

مراحل سینتر کردن

۱- باندها اولیه بین ذرات

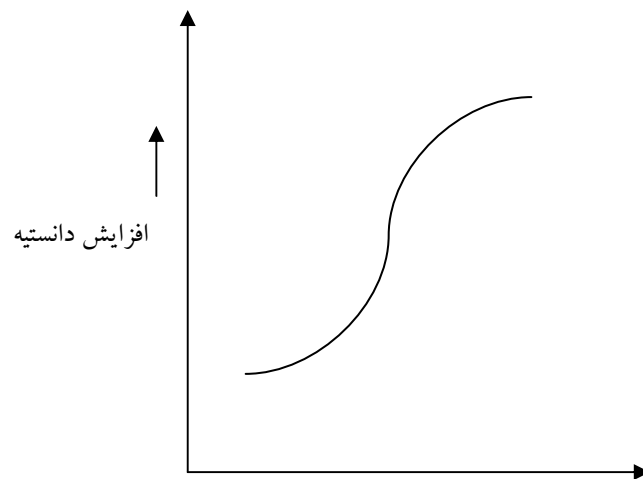
۲- رشد گلوئی (گلوئی شدن)

۳- بسته شدن کانال های تخلخل

۴- گرد شدن حفره ها

۵- افزایش دانسیته یا انقباض حفره ها

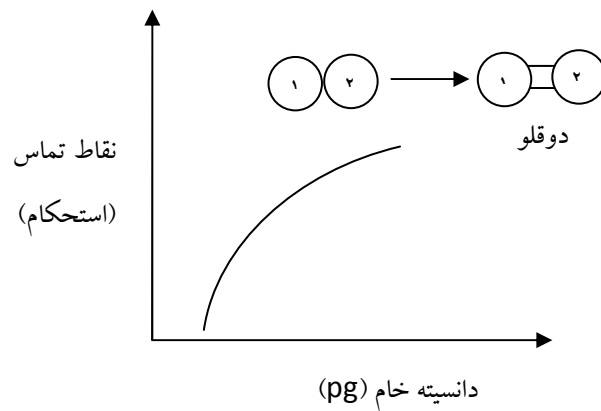
۶- درشت شدن حفره ها



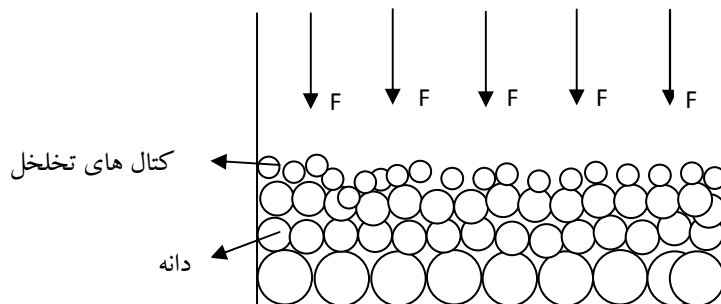
دمای سینتر شدن: T_z

$$0.5 T_m < T_z < 0.9 T_m$$

باند اولیه بین ذرات: در این مرحله تغییر ابعادی نداریم یا به عبارتی تغییر دانسیته نداریم.



دوقلو شد باعث ایجاد مرزخانه ها می شود و این عمل توسط دیفوزیون صورت می گیرد و فصل مشترک به صورت متالورژی می باشد. زمان دوقلو شدن می تواند خیلی کوتاه باشد. هرچه دانسیته اولیه قطعه خام بیشتر باشد، استحکام قطعه در این مرحله زیادتر می شود و یا اینکه استحکام نقاط تماس در این مرحله زیاد می گردد. در بسیاری از پروسه های متالورژی پودر که منظور تولید قطعات متخلخل باشد، عمل سینتر کردن، در همین مرحله خاتمه می یابد.



رشد گلوئی

محل اتصال بین دو دانه را گلوئی (NEEK) می گویند. در اینجا جابجائی فلز نیز صورت می گیرد و مواد از جاهای دیگر حرکت می کنند و به منطقه گلوئی در می آیند و سپس (NEEK) ضخیم می گردد. در این مرحله تغییر ابعاد و حجم نداریم و تنها شکل حفرات تغییر می کند. هر چه زمان بیشتری می گذتر حفره تمایل به گرد شدن پیدا می کند.

اگر قطعه در این مرحله پولیش واج شود، مرز دانه ها مشخص می گردند و ارتباط بین حفرات در این مرحله نیز وجود دارد و در ادامه ارتباط قطع می شود و حفرات به صورت گرد در می آیند. در این مرحله اندازه دانه افزایش یافته و در نتیجه کل ذرات به یکدیگر می چسبند و یک توده متراکم و تخلخل تشکیل می دهند.

بسته شدن کانال های تخلخل

اگر رشد گلوئی ادامه داشته باشد باعث می گردد کانال های تخلخل بسته گردد. اگر قطعه خروجی بیش از ۱۰٪ تخلخل داشته باشد در این صورت حفرات از نوع باز هستند و اگر درصد تخلخل کمتر از ۵٪ باشد در این صورت حفرات از نوع بسته هستند.

اگر فشار کم باشد درصد تخلخل بالا می رود و حفرات باز بوجود می آیند. میزان درصد تخلخل را از روی مقدار نفوذ آب در قطعه یا اختلاف بین دانسیته تئوری و عملی به دست می آورد.

تخلخل $> 5\%$: حفرات بسته حفرات باز: تخلخل $< 10\%$

گردش حفرات

این مرحله که در ادامه رشد گلوئی صورت می گیرد که در حین مسدود شدن کانال ها گرد شدن حفرات صورت می گیرد در این مرحله حفرات کاملاً کروی می شوند.

انقباض حفرات

در این مرحله که با انقباض و کاهش حجم حفرات همراه است دانسیته افزایش می یابد. اگر در داخل حفرات گاز موجود باشد در دمای بالا گاز خارج می شود و هرچه دانسیته خام زیادتر باشد اهمیت این مرحله کمتر است.

درشت شدن حفرات

در این مرحله حفرات کوچکتر کمکم از بین می رود و حفرات کوچک بزرگتر می شوند. بنابراین در حجم کلی حفرات تغییر نمی کند ولی اندازه متوسط حفرات بزرگتر می گردد.

نکات

۱- در مرحله رشد گلوئی سرعت رشد برابر است با $\frac{dx}{dt}$: برابر نصف قطر گلوله

۲- درشت شدن حفرات: حفرات کوچک به یکدیگر متصل شده و تشکیل حفرات بزرگ را می نماید و باید در نظر داشت که اندازه حفرات بزرگ می شود ولی درصد حجمی یا درصد حجمی تخلخل تغییر نمی کند.

مکانیزم های دیفوزیون

۱- سطحی (سطح - گردنه)

۲- انتقال بخار (سطح - گردنه)

۳- مرزی (مرزدانه - گردنه)

۴- شبکه ای (مرزدانه - گردنه)

۵- نابجائیه (نابجائی - گردنه)

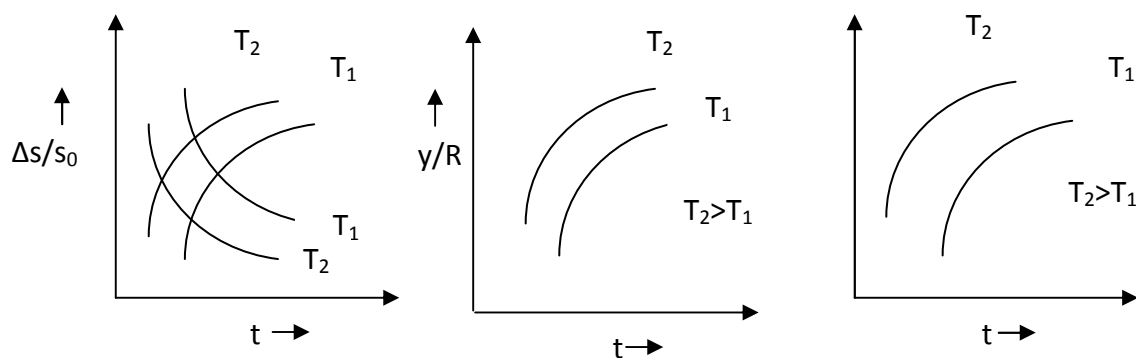
۶- شبکه (سطح - گردنه)

در هر روش یکی از مکانیزم هایی که سریعتر هستند کنترل کننده مکانیزم سینترینگ می باشند.

نیروی محرکه سینتر شدن

با توجه به مکانیزم سینترینگ نیرو محرکه متفاوت است و بنابراین فرمول های سینترینگ نیز متفاوت است. انتقال یک قطعه خام قبل از سینتر شدن را می توان به صورت یک واکنش شیمیایی در نظر گرفت.

بنابراین کاهش انرژی آزاد سیستم برابر کاهش انرژی سطح حفرات داخل قطعه می باشد که منجر به استجانه سینترینگ می شود. مثلاً در بعضی مواقع حجم حفرات تغییر نکرده است ولی سطح حفرات تغییر می کند هرچه سطح داخل حفرات زیادتر باشد نیروی محرکه زیاد تر است و ممکن است در دو قطعه درصد حفرات یکسان باشد ولی سطح حفرات یکسان نباشد.



$$T_{\text{hom}} = \frac{T_z}{T_m}$$

به طور کلی انرژی فصل مشترک دو دانه پودر که به هم متصل است بیشتر از انرژی فصل مشترک دو دانه پودر است که سینتر شده می باشد. بنابراین دانه های پودر سعی دارند با یکدیگر سینتر شوند. توسط سینترینگ کلیه خواص قطعه از جمله هدایت گرمایی، هدایت الکتریکی، استحکام و دانسیته افزایش می یابد.

P_g = دانسیته خام ρ_t = دانسیته تئوری ρ_r = دانسیته سینترینگ پس از سینتر شدن

$$T_{\text{hom}} = \frac{T_z}{T_m}$$

T_{hom} : دمای همولوگ

T_z : دمای سینترینگ (برای سینتر کردن T_{hom} باید نزدیک ۱ باشد)

اگر T_{hom} افزایش پیدا کند انرژی سطحی و کشش سطحی با هم برابر می شوند. بنابراین روابط زیر را می توان در رابطه با سینترینگ ارائه داد:

به طور کلی روابطی که در فرآیند سینتر کردن مهم هستند عبارتند از:

۱- روابط انرژی سطحی ۲- روابط فشار بخار ۳- روابط غلظت جاهای خالی

نکات

۱- در آلیاژ روی و کادمیوم ۹۰٪ انتقال جرم (دیفوزیون اتم) توسط مکانیزم تبخیر و کندانس یا (انتقال بخار) انجام می گیرد و ۱۰٪ توسط ما بقی مسیر دیفوزیون کنترل کننده انتقال بخار است.

۲- نیروی محرکه لازم برای تبدیل قطعه خام به سینترینگ کاهش سطح حفرات می باشد. یعنی هر چه ΔS بیشتر باشد پتانسیل بیشتر است.

۳- هر چه T_{hom} افزایش یابد انرژی سطحی و کشش سطحی با هم برابر می شوند.

۴- اگر مکانیزم هایی که باعث انجام پروسه می شوند مستقل از هم باشند مکانیزمی که سریع ترین است کنترل کننده پروسه می باشد و اگر به هم وابسته باشند کندترین آن کنترل کننده واکنش است.

مدل I (رابطه انرژی سطحی)

$$ps = pv - \gamma \left[\left(\frac{1}{p} - \frac{1}{X} \right) \right] \quad X: \text{ نصف طول گردنه}$$

a: شعاع دانه

$$\frac{1}{p} > \frac{1}{X} \quad \text{مقدار } X \text{ در برابر } p \text{ بسیار زیاد است پس در نتیجه:}$$

γ : کشش سطحی

$$P = \frac{X^2}{2(a-X)}$$

P: شعاع انحنا

P_s : فشار یا کشش جامد

$$P_s = P_v - \frac{\gamma}{r}$$

P_v : فشار یا تنش حفره

$p_v = 1\text{atm}$ در نظر می گیریم:

$$P_s = p \text{ min } X=0 \quad P_s = p_v \quad 1\text{atm} \quad X \rightarrow p \rightarrow$$

در مرحله اول سینتر شدن فرمول (I) کاربرد دارد. در جدول زیر مقادیر ح به نسبت $\frac{\gamma}{p}$ در مراحل مختلف سینتر شدن آورده شده است. همانطور که ملاحظه می شود در مراحل اولیه سینتر شدن به علت این که تشکیل شود خیلی کم است.

مدل II

این حالت مشابه فرمول I است.

$$P_s = P_v - \frac{2\gamma}{r}$$

جدول مدل (فرمول) I

	psi		
۰/۰۰۱	۷۵۰۰	۱۴۵۰۰۰	۲۹۰۰۰
۰/۰۱	۷۲۵۰	۱۴۵۰۰	۲۹۰۰۰
۱	۷۲/۵	۱۴۵	۲۹۰
۱۰	۷/۲۵	۱۴/۵	۲۹
۲۰	۷/۷	۷/۲۵	۱۴/۵

جدول مدل (فرمول) II

	psi		
۰/۱	۱۴۵۰	۲۹۰۰	۵۸۰۰
۱	۱۴۵	۲۹۰	۵۸۰
۱۰	۱۴/۵	۲۹	۵۸
۱۰۰	۱/۴۵	۲/۹	۵/۸

روابط فشار بخار

اگر فشار بخار در سطح مسطح را P_0 و فشار بخار در سطح غیر مسطح در (مقعر) را P در نظر بگیریم می توان نوشت:

$$\frac{p - p_0}{p_0} = \frac{\gamma v_0}{RTP}$$

T: درجه حرارت (K)

P: شعاع انحنا

V_0 : حجم مولی فلز در نواحی نزدیک گلوئی P کاربرد دارد.

R: ثابت گازها

$$P < P_0 \quad P > P_0$$

P: شعاع انحنا گلوئی

P_0 : فشار در سطح صاف

بر اساس این رابطه انتقال جرم از سطوح مسطح (صاف) به سمت گردنه (سطح مقعر) صورت می گیرد.

نکته:

فشار بخار فلز در ناحیه محدب بیشتر از فشار در ناحیه مقعر است. بنابراین این اتم ها تمایل دارند از ناحیه محدب به سمت ناحیه مقعر (گردنه) مهاجرت نمایند. در نتیجه در سطح مقعر (گردنه) ضخیم تر می گردد.

تمام پارامترها ثابت است بنابراین برای این که رابطه فوق صادق باشد باید $P_0 > p$ باشد پس نتیجه می شود که فشار بخار در سطح مسطح بیشتر از فشار بخار در سطح غیر مسطح است و اتم ها تمایا دارند که از منطقه مسطح بخار شوند و به منطقه غیر مسطح (گلوئی) بروند.

$$P > p_0 \quad \text{سطح مقعر} > \text{سطح محدب}$$

انرژی تشکیل دهنده جای خالی (Q)

غلظت جای خالی را این طور تصور می کنند که جای خالی داخل یک سیال وجود دارد که این سیال فشار در نواحی محدب و مقعر متفاوت است.

در ناحیه گلوئی شدن:

$$C \propto \exp \frac{-Q}{RT}$$

$$\frac{P - p_0}{p_0} = \frac{-\lambda v_0}{RTQ}$$

در نواحی دورتر از گلوئی شدن:

$$\frac{P - p_0}{p_0} = \frac{-2\lambda v_0}{RTQ}$$

چون رابطه غلظت و فشار مستقیم است می توان نوشت:

C: غلظت جای خالی در جامد نزدیک گلوئی

C₀: غلظت جای خالی در خود جامد

$$\frac{C - C_0}{C_0} = \frac{-2\lambda v_0}{RT\alpha}$$

برای اینکه رابطه صادق باشد باید $C > C_0$ باشد. یعنی غلظت جاهای خالی در ناحیه گلوئی از غلظت جاهای خالی در نواحی دیگر بیشتر است که این خود نیروی محرکه ای برای دیفوزیون جاهای خالی در نواحی دورتر از گلوئی و در سطح محدب می توان نوشت: (رابطه ۶)

$$\frac{C - C_0}{C_0} = \frac{-\lambda v_0}{RT\rho}$$

C: غلظت جای خالی در نواحی محدب

C_0 : غلظت جای خالی در جامد C گلوئی (مقعر) $C_0 < C$ جامد $C < C_0$ محدب

در رابطه ۶ برای اینکه معادله صادق باشد بنابراین غلظت جاهای خالی در نواحی محدب کمتر از داخل دانه است. این اختلاف غلظت ها هستند که می توانند انرژی اکتیواسون برای سینتر شدن و انتقال جرم را انجام دهند.

نکات

اتم ها از جایی که فشار بخار بیشتر به سمتی که فشار بخارشان کمتر است می روند. بنابراین تنها از مناطق مسطح به جایی مقصد حرکت می کنند و این باعث رشد گلوئی می شود.

غلظت جاهای در ناحیه این که تحت پوشش قرار گرفته است با غلظت جاهای خالی فلز متفاوت است. غلظت در این نواحی به: (رابطه ۷)

$$C = C_0 \exp\left(\frac{SV}{RT}\right)$$

S: تنش که روی ناحیه مرزی مورد نظر عمل می کند که در حالت کششی (+) تحت در حالت فشاری (-) است.

V: حجمی که یک اتم یا جای خالی اشغال می کند.

C: غلظت جاهای خالی در مرز دانه ها در حالتی که تحت فشار تنش قرار گرفته باشد.

C_0 : غلظت جاهای خالی در مرز دانه ها در حالتی که تحت فشار قرار ننگرفته باشد.

در رابطه ۷ به دلیل فشاری بودن تنش C_0 منفی می باشد پس: $C > C_0$

پس به این دلیل است که دیفوزیون انجام می گیرد و انتقال جرم صورت می پذیرد.

در یک قطعه که توسط متالورژی پودر (PM) تولید شده است یک حفره ایزولی را در نظر می گیریم غلظت جاهای خالی در نزدیکی و اطراف حفره به صورت ذیل محاسبه می گردد.

$$C_T > C_0 > C_p$$

رابطه ۸:

$$\frac{C - C_0}{C_0} = \frac{-2\lambda v_0}{RTV}$$

C: غلظت جاهای خالی در نزدیک سطح حفره

V_0 : حجم مولی فلز

C_0 : غلظت جاهای خالی در جامد

در رابطه ۸ باید: $C > C_0$ باشد، یعنی غلظت در نزدیکی حفره بیشتر از غلظت جاهای خالی در داخل قطعه است.

با توجه به مدل های ارائه شده در رابطه ۸-۱ در هر مرحله از سینتر کردن یکی یا مجموعه ای از این روابط فعال می شوند و سینتر شدن هم انجام می گیرد.

هرچه فشار بخار بالاتر و نقطه ذوب کمتر باشد پمکانیزم حاکم به سینترینگ مکانیزم تبخیر کندانس می گیرد. این مکانیزم از روابط فشار بخار تبعیت می کند.

مکانیزم های انتقال جرم

۱- تبخیر و کندانس شدن

۲- دیفوزون شبکه ای

۳- دیفوزیون از طریق مرزانه ها

۴- دیفوزیون در سطح

۵- تغییر فرم در اثر خزش

تبخیر و کندانس شدن

این نوع انتقال جرم در مورد فلزاتی روی می دهد که نقطه ذوب پایین و فشار بخار بالایی در هنگام سینتر شدن دارند نظیر (Zn, Cd) مکانیزم عمل به این صورت است که:

نکات

- ۱- هرچه فشار و نقطه ذوب کمتر باشد مکانیزم حاکم به سینترینگ مکانیزم تبخیر تبخیر و کندانس می گردد.
 - ۲- در دیفوزیون شبکه ای هرچه نقطه ذوب فلز کمتر باشد Q کمتر است.
 - ۳- دیفوزیون اتم ها و حرکت جای خالی در نتیجه اختلاف غلظت بخش های مکانیکی، فشار بخار، انرژی اکتیواسیون دیفوزیون اتمی، دانسیته نابجایی می باشد.
- عواملی نظیر محل جاهای خالی که غلظت آن زیاد است و یا محل هائی که غلظت جای خالی در آن ها کم است و یا جهت دیفوزیون دارای اثرات متفاوتی است که منجر به حالات ۹ گانه زیر می شود:
- هرچه نقطه ذوب فلز کمتر باشد Q کمتر است دیفوزیون اتم ها و حرکت جای خالی در نتیجه: اختلاف غلظت بخش های مکانیکی فشار بخار، انرژی اکتیواسیون دیفوزیون دانسیته نابجایی می باشد که نهایتاً منجر به پیشرفت پروسس سینترینگ می گردد.

حالت	مبدأ جای خالی	مقصد جای خالی	تأثیر رشد گلوئی
۱	سطح مقعر گلوئی	سطح محدب دانه	گرد شدن حفره ها
۲	سطح گلوئی	مرز دانه ها	رشد گلوئی
			گرد شدن حفره ها
			انقباض حفره ها
۳	سطح گلوئی	نابجائی ها	رشد گلوئی
			گرد شدن حفره ها
			انقباض حفره ها
۴	حفره های کوچک گرد	حفره های بزرگ انرژی اتمی	درشت شدن حفره ها
۵	حفره های کوچک گرد	دیفوزوین شبکه ای	انقباض حفره ها
			درشت شدن حفره ها
۶	حفره های کوچک گرد	نابجائی	انقباض حفره ها
			درشت شدن حفره ها
۷	نابجائی	مرز دانه ها	درشت شدن دانه ها
۸	نابجائی	سطوح ذرات	رشد گلوئی
			گرد شدن حفره ها
۹	مرز دانه ها	مرز دانه ها	رشد گلوئی
			انقباض حفره ها

در این ۹ حالت هنوز مشخص نشده است که کدام یک از این حالت ها دقیقاً انجام می گیرد. رابطه کلی که بتوانیم تمام این حالات را در نظر بگیریم و سرعت رشد گلوئی شدن را مشخص کنیم به صورت زیر است:

$$\frac{X^m}{a^n} = \frac{K.d.y.t}{RT}$$

n: توان شعاع ذره

X: نصف قطر گلوئی

m: توان مربوط به پهنای گلوئی

D: دیفوزیویته حجمی

t: زمان

اگر دیفوزیون از طریق حجمی باشد در نتیجه: $n=2$ و $m=5$

به جز حالت ۹ که در آن $m=1$ و $n=2$ می باشد.

دیفوزیون از طریق مرزدانه ها

در این روش مکانیزک به این صورت است که در مرزدانه هائی که به حفره نزدیک است، وقتی که دو دانه به هم نزدیک شدند و گلوئی را تشکیل دادند. مرزدانه ای که به گلوئی چسبیده است و یا به آن نزدیک است به داخل حفره دیفوزیون می کند.

به دو دلیل زیر در دمای بالا دیفوزیون از طریق شبکه تعیین کننده و در دمای پایین از طریق مرز دانه تعیین کننده است.

۱- حجم شبکه به طور کلی بیش از حجم مرزدانه هاست.

۲- انرژی اکتیواسیون دیفوزیون در مرزدانه حدود نصف انرژی اکتیواسیون دیفوزیون شبکه است پس زمانی که دما پائین می آید انرژی لازم برای غلبه بر اکتیواسیون کم می شود، ولی انرژی از طریق مرزدانه ها زیاد تر است در حالت اول که دمای بالا می باشد دیفوزیون از طریق مرزدانه ها صورت می گیرد ولی چون حجم دانه کم است دیفوزیون از طریق مرزدانه ها ناچیز است.

دیفوزیون در سطح

در این نوع دیفوزیون اتم ها در سطح جای خود را با جاهای خالی عوض می کنند. بنابراین اتم ها در سطح حرکت می کنند. چون اتصال اتم ها در سطح ضعیف تر از داخل قطعه است، انرژی اکتیواسیون دیفوزیون در سطح قطعه کمتر است و دیفوزیون در سطح خیلی راحت می تواند انجام گیرد.

دیفوزیون در سطح از دیفوزیون در مرز دانه ها و شبکه راحت تر صورت می گیرد. دیفوزیون را می توان طبق رابطه ۱۰ محاسبه کرد. دیفوزیون اگر چه خیلی سریع است ولی لازم می باشد که نسبت حجم/ سطح زیاد باشد، یعنی قطعه پر از حفره باشد و سطح زیادی داشته باشد.

$$Q_S > Q_B > Q_g$$

هر چه دانه های پودر اولیه سینتر باشد نسبت S/V زیاد می شود و این نوه دیفوزیون سهم بیشتری پیدا می کند. از طریق تجربه و بررسی مشاهده شده است که در رابطه ۱۱ ضرائب $m=2$ و $n=6$ را دارانی باشد این مکانیزم در بعضی موارد نیز گرد شدن حفره ها و یا بسته شدن مجرای بین حفره ها نقش دارد.

تغییر فرم در اثر خزش

در این روش به دلیلی بالا بودن دما در قسمت ها مختلف از قسمت ها گلوئی به علت فشارهای بوجود آمده طبق رابطه های ۴ و ۳ دیفوزیون صورت می گردد و باعث می گردد که متشابه به مکانیزم خز انتقال جرم داشته باشیم. به طور کلی به دلیل فشارهای زیادی که در قسمت های مختلف دانه ها به وجد می آید چون دما بالاست مکانیزم های مختلف خزش انجام می گیرد و ماده جابجا می شود.

استحاله در طول سینتر شدن

هرگونه استحاله و تغییر فازی که در گرم کردن قطعه رخ می دهد در سینتر کردن نیز ممکن است اتفاق افتد. این استحاله عبارتند از:

۳- دگرگرنی فازها

۲- آلیاژی شدن

۱- رشد دانه ها

۴- تغییرات دانسیته و ابعاد ۵- تغییر شکل در سینتر شدن

نکات

۱- در دیفوزیون کاهش یابد چون احتمال دیفوزیون دانه ای کاهش می یابد لذا سهم یا حجم دیفوزیون مرزدانه ای بیشتر می شود و بنابراین دیفوزیون حاکم در دمای پایین دیفوزیون مرزدانه هاست.

۲- به طور کلی حجم شبکه بیشتر از حجم مرزدانه هاست و غلظت اتمهای مرزدانه $b=10^{-6}$ است. یعنی از هر چند میلیون اتم یکی در مرزدانه است.

۲- در دیفوزیون سطحی $m=2$ و $n=6$ و در دیفوزیون مرزدانه ای $m=2$ و $n=5$ می باشد و در دیفوزیون سطحی تغییرات X بیشتر می باشد.

رشد دانه ها

مرزدانه دارای انرژی زیادی نسبت به خود دانه می باشد و تمایل دارند که کاهش یابند. بنابراین دانه ها تمایلی به رشد دارند و در نتیجه انرژی زیادی برای رشد اکتیواسیون وجود دارد:

عواملی که از رشد دانه ها جلوگیری می کند

۱- وجود حفره ها ۲- محل برخورد مرزدانه ها با سطح خارجی ۳- مواد آلوده کننده

وجود حفره ها

در متالورژی عامل عمده ای که از رشد دانه ها جلوگیری می کند وجود حفره هاست. حفره ها باعث می گردند که حرکت مرزدانه ها محدود و متوقف گردد.

محل برخورد مرزدانه ها با سطح خارجی

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\gamma b}{2\gamma s}$$

این پدیده در دمای بالا رخ می دهد. مطابق شکل مشاهده می شود که به اندازه L باید به طول مرزدانه ها اضافه شود و بنابراین منجر به جلوگیری مرزدانه می شود. در متالورژی پودر چون درات به شکل پودری شکل می باشند مسئله بسیار مهم است.

مواد آلوده کننده

منظور از مواد آلوده کننده موادی هستند که به سطح دانه های پودر چسبیده است (مثل گرافیت) که در هنگام سینتر شدن این مواد در مرزدانه ها تجمع می کنند و به عنوان مانعی عمل می نمایند. بنابراین با توجه به عوامل ذکر شده از طریق جذب مواد آلوده کننده توسط خارجی رشد دانه در متالورژی پودر محدود می شود. بنابراین تنظیمات PM دارای کریستال های (دانه ای) می باشند.

نکته دیگری که در متالورژی پودر باید در نظر گرفت جهت گیری دانه ها قطعه در این روش می باشد. جهت دانه ها در این روش یکسان نیست و جهت مرجع کریستالی مشابه نورد، اکستروژن و فورجینگ و ... وجود ندارد و جهت دانه ها کاملاً راندوم و اتفاقی است و هیچ نوع خاصیتی در جهت مشخص وجود ندارد. بنابراین در این روش خواص مکانیکی و الکتریکی در جهات مختلف یکسان است و قطعه کاملاً هموزنی می باشد.

آلیاژی شدن

آلیاژهایی که از این روش به دست می آیند کیفیت بالایی دارند و بسیار ممکن می باشند و ممکن است از روش های دیگر آلیاژسازی این کیفیت حاصل نشود و تنها روشمان متالورژی پودر می باشد.

در این روش ابتدا دانه های پودر مورد نظر را مخلوط کرده و سپس فشرده می کنند. اگر منظور آلیاژسازی از عناصر اصلی باشد، عمل اتصال این ذرات توسط دیفوزیون انجام می گیرد.

در آلیاژهای شدن اگر دیفوزیون شبکه ای کنترل کننده باشد در این صورت حفرات به عنوان مانع عمل می کنند و به این ترتیب از سرعت آلیاژی شدن کم می شود. اگر دیفوزیون از نوع سطحی کنترل کننده باشد هرچه حفره ها زیادتر باشند سرعت سینتر شدن و آلیاژی شدن سریع می شود.

اگر دیفوزیون از طریق مرزدانه ها کنترل کننده باشد هرچه دانه های پودر اولیه ریزتر باشند آلیاژی شدن زودتر انجام می شود و در نتیجه سینتر شدن هم سریعتر انجام می شود.

در طول سینتر شدن و در طول مراحل مختلف، مکانیزم های متفاوتی از دیفوزیون فعال می شوند و در هر مرحله ممکن است یکی از آن ها عمل کنند. یکی از روش هایی که برای تعیین میزان آلیاژی شدن استفاده می شود فاکتورهای F می باشد.

m_1 : جرم ماده منتقل شده از مرز بین دو ذره در زمان t

m_2 : جرم ماده منتقل شده از مرز بین دو ذره در زمان

$$F = \frac{m_1}{m_2}$$

آلیاژ سازی انجام شده $F=1 \implies$

تأثیر عوامل مختلف در آلیاژی شدن

۱- دما

۲- زمان آلیاژی شدن

۳- اندازه دانه های پودر

۴- وضعیت پودر

۵- تخلخل

دما

دما مؤثرترین عامل در آلیاژی شدن است. آلیاژی شدن به طور مستقیم تابع دیفوزیون اجزا آلیاژ است و دیفوزیون نیز به شدن تابع دما است.

$$D = D_0 \exp \frac{(-Q)}{RT}$$

زمان آلیاژی شدن

هرچه زمان آلیاژی شدن بیشتر باشد در نتیجه میزان آلیاژی شدن افزایش می یابد. ولی شدت اثر زمان مانند اثر دما نمی باشد.

بنابراین با زمان زیادتری و دمای کمتری میزان آلیاژی شدن یکسانی نمی توان بدست آورد

نکات

۱- بعضی از آلیاژها در ریخته گری به دلیل اختلاف وزن مخصوص همگن نمی باشد. بنابراین از پودر آن استفاده می کنند.

۲- بعضی مواقع ضریب کامپوزیت شدن (Composition) قطعه خام ۰/۷ است یعنی ۷۰٪ آلیاژی شدن صورت گرفته است.

اندازه دانه ها پودر

هرچه اندازه دانه اولیه کمتر باشد، درصد آلیاژی شدن سریعتر است. چون هر چه ریزتر باشند آلیاژ مسافت کمتری را طی می کند.

تخلخل

هرچه دانه پودر اولیه ریزتر متخلخل باشد بخصوص تخلخل های سطحی پودر زبر و خشن باشد موجب می شود و آلیاژی شدن سریعتر انجام می شود.

↑ آدیفوزیون ⇔ ↑ سطح مخصوص ⇔ ↑ تخلخل

پودر با سطح خشن موقعی که تماس پیدا می کند، بیشتر از یک نقطه تماس دارند. علاوه بر این یک لایه متخلخل مسیرهای دیفوزیون زیادتری تولید می کنند و نمی توانند انتقال جرم زیادتری بوجود آورند.

وضعیت پودر

۱- اگر پودر که استفاده می شود از عناصر خالص مربوط به آن آلیاژ باشد.

۲- پودر خود آلیاژی باشد.

۳- یا اینکه سطح این پودرها با یک عنصر دیگر پوشیده شده باشد. این عوامل باعث می شوند سرعت آلیاژی شدن متفاوت باشد.

حالت اول) بعضی از ذرات پودر از عناصر خالص (A و B) تشکیل شده باشد. در این حالت سرعت دیفوزیون کمترین مقدار و زمان دیفوزیون کمترین مقدار و زمان دیفوزیون بیشترین مقدار ممکن را دارا می باشد.

حالت دوم) یک پوششی از یک عنصر اگر روی عنصر دیگر وجود داشته باشد در این حالت سرعت دیفوزیون زیاد و عناصر به راحتی دیفوزیون می کنند و زمان متوسط است.

حالت سوم) در این حالت سرعت دیفوزیون بیشتر و سرعت آلیاژی شده ماکزیمم مقدار و زمان آلیاژی شدن کمترین مقدار را دارد. ولی تهیه ذرات پودر آلیاژی ممکن است برای بعضی عناصر مشکل می باشد.

دگرگونی فازها

کلیه تغییر فازهایی که ممکن است در دمای بالا در قطعات معمولی انجام گیرد در سینتر شدن هم دمای بالا صورت می گیرد. (سینتر کردن W حدود ۲۶۰۰ است)

تغییر فازها ممکن است از فصل مشترک ها و فصول انجام گیرد. در متالورژی پودر وجود پودر تعداد حفره های زیاد باعث می گردد. جوانه های زیادتری تولید گردد و دانه ها فاز جدید بسیار ریزتر باشند.

نکته:

حفره هایی که داخل قطعه تولید شده به روش متالورژی پودر هستند به عنوان مانع حرارتی عمل می کنند بنابراین اگر برقرار باشد که با استفاده از کوئچ کردن تغییر فاز انجام گیرد بایستی این نکته مورد نظر قرار گیرد.

عواملی که در سینتر کردن مؤثر است (تأثیر متغیرهای مواد در فرآیند سینتر کردن)

۱- ترکیب دانه ها:

ترکیب دانه ها می تواند در نیروی محرکه سینتر شدن مؤثر باشد.

۲- آلودگی های سطح:

آلودگی های سطح مثل اکسیدها که باعث می شوند که انرژی سطح دانه پودر کاهش یابد علاوه بر این کهنهروی محرکه لازم برای سینتر شدن کمتر گردد و از این نظر اکسیدها عناصر مطلوبی برای سینتر کردن می باشند. به طور کلی در سینتر کردن گاهی اوقات واکنش هایی که بین ناخالصی های و فلز اصلی اتفاق می افتد نامطلوب است و باید سعی شود که ناخالصی ها وجود نداشته باشد.

۳- فازهای رسوبی:

فازهای رسوبی که در اثر عملیات سختی رسوبی در قطعه پیر سخت شده به وجود آمده است به عنوان مانعی برای رشد دانه ها عمل می کند. بنابراین دانه ها ریز باقی می مانند و در نتیجه مرزدانه ها زیادتر می شود و سرعت دیفوزیون از طریق مرزدانه ها افزایش خواهد یافت و در نتیجه سینتر شدن سریع خواهد شد.

۴- وجود نواقص ساختمانی:

وجود نواقص ساختمانی نظیر نابجایی ها می توانند باعث شود که سرعت سینتر شدن زیاد شود زیرا دیفوزیون از طریق نابجایی ها خیلی سریعتر از دیفوزیون از طریق مرزدانه ها است.

۵- دانه های متخلخل:

دانه های متخلخل سبب افزایش سرعت سینتر شدن می گردد.

۶- اندازه دانه ها:

هرچه قدر اندازه دانه ها سینتر باشد مرزدانه ها زیاد تر می گردد. بنابراین سرعت سینتر شدن افزایش می یابد. دانه های ریزتر میدان تخلخل بیشتری دارند. به عبارتی با ثابت بودن متغیرها با کاهش اندازه دانه، نیروی محرکه برای سینتر شدن افزایش می یابد، چون فصل مشترک جامد و حفره ها افزایش می یابد، بنابراین دیفوزیون از طریق سطح افزایش می یابد.

۷- به طور کلی نوع مکانیزم دیفوزیون (مثلاً از طریق با سطح یا مرزدانه یا غیره) بر روی رشد کلونی (زنجیر شدن) مؤثر می باشد.

۸- تعداد جوانه ها:

با ذرات پودر کوچک دانه ها grain زیادتری دارند (زیرا در زمان تولید سرعت سرد شدن بالا بوده است)

چون ذرات پودر ریز مرزدانه های بیشتری دارند پس دیفوزیون افزایش می یابد. هرچه ذرات پودر کوچکتر باشند دانه های زیادتری دارند و باعث افزایش دیفوزیون می گردند. یعنی موقع تولید سرعت سرد شدن بیشتر است.

۹- شکل دانه:

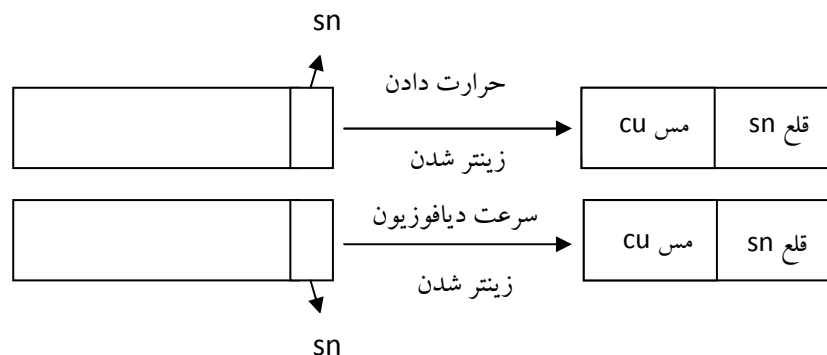
هرچه شکل دانه از حالت کروی خارج شود سینتر شدن تسریع پیدا می کند چون فصل مشترک ها افزایش پیدا می کند.

۱۰- زبری سطح:

هرچه سطح دانه خشن تر باشد (میکروسکوپی و ماکروسکوپی) بنابراین نقاط تماس زیادتر و سینتر شدن سریعتر صورت می گیرد.

۱۱- دانسیته خام:

دانسیته خام هرچقدر کمتر باشد فشردگی در قطعه کمتر می باشد و سینتر کردن سریعتر صورت می گیرد چون سطح داخلی قطعه افزایش پیدا می کند و این حفره ها سطوح بیشتری دارند و دیفوزیون از طریق سطح سریعتر می باشد. این نوع دیفوزیون سریعتر از دیفوزیون سطح قطعه می باشد.



هرچه دانسیته خام قطعه افزایش یابد در واقع سینتر شدن افزایش می یابد. قطعه ای که دانسیته خام بالاتری دارد بیشتر سینتر می شود ولی سرعت دیفوزیون و سینتر شدن آن کمتر می باشد. (نمودار A و B)

۱۲- دما:

همان طور که آلیاژی شدن به شدت به دما وابسته است سینتر شده نیز به شدت تابع دما می باشد.

هرچه زمان زیادتر باشد سینتر شدن نیز افزایش می یابد ولی با گذشت زمان سینتر شدن کم می شود و شیب منحنی های فوق با گذشت زمان کاهش می یابد.

سرعت سینتر شدن بالا می رود. $t \rightarrow 0 \rightarrow$

تغییرات دانسیته و ابعاد

تغییرات دانسیته و ابعاد در قطعات متالورژی پودر p/l مهم است مخصوصاً اگر تولید انبوه باشد و قطعات کوچک باشند در مواردی که ممکن است تغییر حجم نداشته باشیم ولی تغییر وزن داشته باشیم و در این صورت خارج شدن گازها یکی از روش های ارزیابی دانسیته پارامتر چگالی شدن ($d.p$) است. در شرایطی واقعی مقدار این پارامتر بین ۰-۱ است. اگر قطعه موقع سینتر شدن اصلاً تغییر نکند و برابر قطعه خام باشد صفر است.

(دانسیته خام - دانسیته تئوری) / (دانسیته خام - دانسیته سینتر شرن) = پارامتر چگال شدن

توسط این پارامتر می توان فهمید تا چقدر بر اثر سینتر شدن تغییر دانسیته می دهد.

عوامل مؤثر بر روی تغییر ابعاد

۱- انقباض و ناپدید شدن حفره ها

انقباض و ناپدید شدن حفره ها باعث تغییر ابعاد حفره ها و کاهش ابعاد آن ها می شود.

۲- گازهای محبوس شده

وقتی قطعه به صورت خام فشرده می گردد بعضی از حفرات به صورت ایزوله در می آیند که این حفرات گازی محبوس شده و وقتی که قطعه تحت دمای بالا قرار می یگیرد این دما باعث بالا بردن فشار در حفرات ایزوله می شود. این مکانیزم در حفرات کوچک اثر زیادی ندارد ولی در حفرات بزرگ تأثیر زیادی دارند به طوری که این نوع تغییر ابعاد مهم نیست زیرا در همان لحظه اول سینتر کردن عمل می کند و در ادامه سینتر شدن تغییر ابعاد متوقف می گردد.

۳- واکنش شیمیایی

۱- بعضی از این واکنش های می تواند مثل گازهای محبوس شده عمل کرده و باعث تغییر فرم گردند. به طور مثال O_2 موجود در حفرات چدن ها می تواند تولید گاز O_2 کند یا باعث ابعاد H_2O می گردد که این کار باعث ایجاد فشار زیاد و ابعاد تغییر فرم می شود که این حالت در قطعات مسی مشاهده می شود.

۲- اکسیداسیون داخلی قطعه که بر اثر حرارت (سینتر شدن و O_2 در حفرات قطعه توسط دفوزیون صورت می گیرد و باعث ایجاد اکسید می شود که اکسید دانسیته کمتر از قطعه اصلی دارد و باعث ایجاد افزایش حجم و در نتیجه باعث افزایش فشار داخل قطعه می شود و تغییر فرم به وجود می آورد. این حالت بیشتر در کوره هایی که اتمسفر کنترل نشده دارند مشاهده می شود.

۴) آلیاژی شدن: وقتی که چند پودر فلزات خالص را با هم مخلوط می کنند و آلیاژی از آنها تولید می کنند این آلیاژی شدن منجر به افزایش حجم می گردد.

نکات

پارامتر چگال شدن معیاری از راندمان سینترینگ است به طور کلی هر چه dp افزایش یابد راندمان سینترینگ بیشتر است.

آنچه مسلم است قطعه که از حالت خام سینتری شود دانسیته زیاد و تخلخل کم می شود.

$$\text{Prosity}=1-dp$$

۵- مواد روان کننده (این مواد اغلب مواد هراروالی هستند)

اگر مواد روان کننده موقع سینتر کردن به صورت گازی درآیند و اگر این گازها در داخل حفره ها محبوس می شوند بر اثر فشار آوردن باعث تغییر فرم می گردد.

بررسی انبساط و انقباض

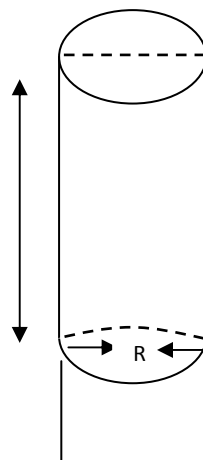
برای بررسی این دو اثر عوامل مختلفی توسط پارامتر نسبت انقباض تعیین می گردد.

$$\text{نسبت انقباض} = \frac{R}{A}$$

A: انقباض در جهت محوری

R: انقباض در جهت شعاعی

اگر شرایط ایده آل و خوب باشد بایستی نسبت انقباض بالا با ۱۰ شود یعنی انقباض محوری و شعاعی هر دو یکسان باشد.



انقباض شعاعی

عواملی که باعث می شود $1 > \frac{R}{A}$ باشد

a- حفره های صفحه ای در قطعه خام :

حفرات صفحه ای در قطعه خام باعث می گردد که دیفوزیون محوری کاهش و انقباض در جهت شعاعی باشد. عوامل به وجود آورنده حفرات پهن و صفحه ای:

۱- تغییر فشردن بر اثر فشردن زیاد قطعه

۲- بزرگ بودن اندازه دانه ها

۳- پولکی بودن دانه ها

b- پوسته پوسته شدن:

این اثر در قطعه به عنوان مانع انتقال جرم می باشد و باعث می شود که انقباض در جهت محوری به وجود آید.

عوامل مؤثری در پوسته پوسته شدن

۱- فشار زیاد در اثر فشردن قطعه

۲- طراحی بر قالب

۳- استحکام کم قطعه

۴- استفاده از مواد روان کننده

c- ساختار دانه ها پهن

دانه های پهن دارای قطر زیادی می باشند و این امر سبب می شود که در هنگام فشرده شدن انقباض در جهت شعاعی بیشتر صورت گیرد.

$$d - \text{نسبت } \frac{L}{D} \text{ کم}$$

اگر این نسبت کم باشد در نتیجه دانسیته در جهت شعاعی کمتر از دانسیته در جهت طولی است و انقباض در جهت شعاعی زیادتر می باشد.

عواملی که باعث می شوند $R/A < 1$ شود

(a) تنش های محوری

تنش هایی که در جهت محور بر روی دانه های پودر توسط پانچ عمل می کند باعث می شود که تماس دانه ها در این جهت بیشتر شود و مکانیزم Nabowabering در دیفوزیون حاصل گردد.

برای فعال شدن این مکانیزم، دیفوزیون بر اثر نیروی ثقلی دانه های پودر یا در اثر فشردن حادث می شود تنش های داخلی باعث ایجاد این مکانیزم می شود.

$$(b) \text{نسبت } \frac{L}{D} \text{ زیاد}$$

دانسیته در جهت محوری کم بوده و انقباض در این جهت زیاد می شود و باعث کاهش نسبت $R/A < 1$ می گردد.

تغییر شکل در سینتر شدن:

تغییرات شکل می تواند در سینتر شدن به صورت نامطلوبی ظاهر گردد و شکل قطعه را هم بزند و این موقعی اتفاق می افتد که نواحی از قطعه که دانسیته خام آن بیشتر است کمتر منقبض گردد.

اگر نیرو توسط پانچ از یک طرف به قطعه وارد شود شکل آن به صورت مقابل خواهد بود.

اگر نیرو در دو جهت پانچ به قطعه اعمال شود شکل قطعه سینتر شده به صورت مقابل است البته اختلاف ابعاد بسیار کم است. دانسته در وسط قطعه کم و انقباض زیاد شده است.

متصل کردن (Joining):

یکی از موارد استفاده متالورژی پودر اتصال است که برای قطعات پیچیده کاربرد دارد و توسط روش فوق به یکدیگر متصل می گردد.

انواع سینتر شدن

سینتر شدن در فاز مایع (Liquid Phase Sintering):

در تمام یا قسمتی از مراحل سینتر کردن یک فاز مایع روی ذره وجود دارد دو وضعیتی برای سینتر شدن فاز مایع وجود دارد:

۱- اجزایی که برای سینتر کردن بکار می روند دارای نقطه ذوب پایین می باشند و فاز مذاب را تشکیل می دهند. مانند ذرات Cu-Sn فلز مذاب را تشکیل می دهد.

۲- روش دیگر آ « است که جزئی که فراتر است و فاز مایع را تشکیل می دهد از بیرون به سیستم وارد می کند نظیر (Fe)

روش اول وقتی به کار می رود که بخواند دانسیته بسیار بالایی داشته باشند و یعنی دانسته نزدیک به دانسیته تئوری باشد. در این حالت خواص مکانیکی و ساختار خوبی بدست می آید. در این حالت بعد از سینتر کردن انقباض قابل ملاحظه ای بوجود می آید ولی در روش دوم که مذاب از خارج وارد می شود قطعه می تواند منقبض و منبسط شود و این عمل قابل کنترل است و عمل یعنی وارد کردن فاز مایع از خارج به سیستم در هر شرایطی می تواند انجام شود. برای بعضی مواد سخت یا دارای اجزای سخت که فشردن آن ها خیلی مشکل است و به راحتی نمی توان دانسیته بالایی بدست آورد، روش سینتر کردن در یک فاز مایع تنها راه درست کردن آن ها است.

ویژگی های لازم برای سیستم فاز مایع:

۱- ترکیب آلیاژ به گونه ای باشد که با توجه به دیاگرام یک فاز جامد و مایع بتواند تا مدتی در کار فاز جامد باقی بماند و به سرعت از بین نرود.

۲- فاز جامد حلالیت محدودی در فاز مایع داشته باشد.

۳- مقدار فاز مایع به اندازه کافی باشد یعنی به اندازه ای باشد که سطح دا خیس کند.

۴- اندازه پودر (جزئی که جامد است) باید به اندازه نسبتاً ریز باشد تا دانسیته سریعاً افزایش پیدا کند.

۵- افزایش دانسیته توسط سینتر کردن انجام می گیرد نه توسط فشردن بنابراین ممکن است دانسیته خام قطعه کاملاً کم باشد.

کم بودن دانسیته خام قطعه می تواند سبب گردد که ایجاد قطعه شدیداً تغییر کند که یکی از عوامل محدود کننده استفاده از فاز مایع است.

مراحل سینتر شدن در فاز مایع

مرحله اول: liquid flow یا rearrangement:

وقتی از فاز مذاب تشکیل می گردد قسمت عمده ای از فاز جامد جابجا شده است و گازهایی که در قطعه فشرده شده از قبل وجود داشته است می تواند از طریق مذاب از قطعه خارج گردد. در این روش اگر از دانه های کروی استفاده شود و درصد حجمی مذاب ۳۵ باشد ثابت شده است که می توان دانسیته کامل رسید. انرژی سطحی برای فصل مشترک جامد-مایع باشد کمتر از مایع-مایع و یا جامد-جامد باشد. برای اینکه مذاب سطح جامد را ترکند باید: $F < 0$

$$\frac{Y}{P} : \text{انرژی فصل مشترک جامد-گاز}$$

$$\gamma_{LG} : \text{انرژی فصل مشترک مایع-گاز}$$

$$\gamma_{SL} : \text{انرژی فصل مشترک جامد-مایع}$$

ΔF : تغییر انرژی آزاد برای ترک کردن سطح جامد باید منفی باشد.

$$C > C_0 <$$

اگر رابطه فوق برقرار باشد سطح جامد می تواند ترک شود و دیفوزیون در مایع صورت گیرد.

(اگر $F > 0$) باشد تر شدن انجام می گیرد.

مرحله دوم: حل شدن یا رسوب دوباره:

اگر در جامد حلالیت محدود در مایع داشته باشد مرحله دوم اتفاق می افتد. در مرحله دوم نیز باعث افزایش دانسیته می گردد و شدت آن به اندازه مرحله اول نمی باشد. هرچه اندازه دانه کوچکتر باشد حلالیت در فاز مایع بیشتر می گردد و باعث می گردد حل شدن راحت تر باشد. دانه های خیلی کوچک به طور کامل در مذاب حل می شود و رشد دانه های بزرگ بر اثر رسوب دانه های کوچک حل شده در مذاب بر روی آن ها انجام می گیرد و در اثر برخورد دانه ها با یکدیگر انقباض صورت می یگیرد. انتقال جرم از طریق دیفوزیون از مذاب سریعتر صورت می گیرد.

مرحله سوم: به هم پیوستن:

اگر جامد به طور کامل با مذاب تر نشود، در نقاطی از قطعه بعضی از ذرات به طور مستقیم در حال تماس جامد-جامد می باشند که این امر سبب می شود که در اینم نقاط افزایش دانسیته از طریق مذاب مختل گردد.

عرق کردن: (Sweating):

فلز مایعی که اصطلاحاً فاز جامد را تر نکند تمایل به خارج شدن از قطعه را دارد. به این حالت عرق کردن اطلاق می شود (حالت فوق در زمانی صادق است که پودر تولید مذاب کند)

مقدار فاز مایع:

مقدار مذابی که در قطعه وجود دارد در حالت سینتر کردن به دلایل مختلفی مقداری کاهش می یابد. تغییر طول می دهد. اگر فاز مذاب در جامد حل شود و مقدار مذاب کمتر از حداکثر حلالیت در جامد باشد. تمام مذاب در همان لحظه اولیه از بین می رود و در این حالت هیچ گونه افزایش دانسیته نخواهیم داشت.

(این موضوع در مس و فولادها مشاهده گردیده است).

بعضی از سیستم های واقعی سینترینگ

۱- در قطعات ساخته شده از فولاد اگر از مس استفاده کنید، چون Cu دمای ذوب پایین تری دارد پس می تواند فاز مذاب را تشکیل دهد و Fe را تر کند. از طرفی آهن را تر کند (ولی حلالیت مس در آهن زیاد است)؟؟
مقادیر کمی C داشته باشیم، به جای اقباض، انبساط داریم. اگر مقدار Cu را افزایش دهیم دانسیته حالت معمولی بوجود می آید و انقباض و افزایش دانسیته خواهیم داشت. بیشتر اوقات از مس به این روش استفاده می گردد.

۲- تولید برنز استفاده از پودر Cu و Sn می باشد که ذرات قلع بر اثر دما ذوب شده به داخل مس نفوذ می کند و تشکیل برنز می دهد. مقدار Sn ذوب شده بستگی به اندازه و توزیع دانه های Sn دارد. اگر دانه های Sn ریز

باشد در نتیجه Sn سریع ذوب می شود و به طور یکنواخت در قطعه پخش می شود. اما اگر ذرات درشت باشند تا مدت زیادی مذاب باقی می ماند.

۳- تولید کاربیت های ساخته شده یکی از سیستم ها کاملاً تنگستن و کاربید کبالت است. در طول سینتر کردن فاز فلزی، مذاب را تشکیل می دهد و فاز کاربیدی جامد باقی می ماند و بر خلاف سیستم های قبلی مذاب تا انتهای عملیات باقی می ماند.

در ان موارد اگر قبلاز سینتر کردن و به وجود آوردن مذاب، قطعه را پیش گرم کنند چون هیدروژی اتمسفر میتواند با اکسیدهای نقطه ترکیب شود و قطعه را تمیز کند و در نتیجه با خواص بهتری ساخته می شود.

در این قطعات با افزایش مقدار فلز موجود در کاربیدها و. کاهش اندازه ذرات کاربیدها افزایش دانسیته پودر صورت می گیرد و اغلب افزایش دانسیته ای که در این قطعات رخ می دهد تا زمان طولانی به طول می انجامد و افزایش دانسیته کامل صورت می گیرد.

فاز فلزی که موجب افزایش تافنس می شود به صورت مدام و پیوسته وجود دارد.

تراوش

حالت دوم سینتر کردن تراوش می باشد. یکی از راه های معمول این است که قطعه را داخل مذاب مورد نظر قرار می دهید و مذاب های الیازی شونده بر اساس خاصیت موئینگی در قطعه نفوذ می کند و در مدت کم مسافت زیادی را طی می کند. حرکت مذاب از طریق حفره ها در ۳ حالت صورت می گیرد.

در انجام این کار فشار فشردن اندازه دانه های پودر، تخلخل قطعه و مؤثر هستند. در عمل سینتر کردن اگر فاز جامد به طور قابل ملاحظه ای در مذاب باشد ممکن است فرسایش سطحی اتفاق افتد و این امر باعث به وجود آمدن حفره های نامطلوب در سطح قطعه سینتر شده بود.

برای جلوگیری از این کار مذاب را با فلز اصلی آلیاژ می کنند که در این صورت حلالیت جامد در مذاب کم می شود.

در این روش به خاطر حفره های ریزی که در اغلب دانه های پودر وجود دارد و فاز مذاب نمی تواند در آنها نفوذ کند به دانسیته ۱۰۰ نمی رسیم.

بطور مثال اگر از Fe خالص استفاده شود حلالیت آن در Cu-Fe کاهش می یابد.

فشردن گرم

این روش را به طور گسترده ای برای مواد دیرگداز و سرامیک های و مواد سخت و با استحکام بالا به کار می برند ولی امروزه برای فلزات و آلیاژها نیز از این روش استفاده می شود.

در این روش اگر چه فشار و دما همزمان به قطعه اعمال می شد ولی فشار از دما بالا نیست.

در نمودار صفحه بعد فشار در روش عادی و فشردن گرم مقایسه شده است.

فشار (Psi)	F دما	درصد دانسیته تئوری
۴۰۰۰۰	۱۱۵۰	۸۸
۶۰۰۰۰	۱۱۵۰	۸۸
۸۰۰۰۰	۱۱۵۰	۹۳
۱۰۰۰۰۰	۱۱۵۰	۹۷
۸۵۰	۱۱۰۰	۹۷
۸۵۰	۱۱۵۰	۶۹
۸۵۰	۱۲۰۰	۸۶
۸۵۰	۱۲۱۲	۹۶
۱۷۵۰	۱۱۰۰	۸۲
۱۷۵۰	۱۱۵۰	۸۵
۱۷۵۰	۱۲۰۰	۹۲
۱۷۵۰	۱۲۱۲	۹۸

اتم‌سفر سینتر کردن

اتم‌سفر ۳ وظیفه اصلی را در عملیت سینتر کردن بر عهده دارد:

- ۱- حداقل کردن و یا ممانعت کردن از هر نوع واکنش شیمیایی بین قطعه و محیط اطراف.
- ۲- تمیز کردن و بالا بردن درجه خلوص قطعه از طریق از بین بردن ناخالصی‌هایی که جذب قطعه می‌گردد و همین‌طور پوسته‌های اکسیدی و عناصر و ترکیبات خارجی که در فاز موجود می‌باشد و (هرچه دانه‌ها پودر تمیزتر و عاری از اکسید باشد. لایه پودر بهتر دیفیوژیون می‌کند. سینتر شدن بهتر صورت می‌گیرد).
- ۳- فراهم کردن یک یا چند جزء شیمیایی که با قطعه آلیاژ بدهند و خواص قطعه سینتر ده را بهبود بخشد. به‌طور مثال اتم‌سفر می‌تواند C یا N داشته باشد و در سطح نمونه فولادی نفوذ کند.

انواع اتم‌سفر مورد استفاده در عمل سینتر کردن

- ۱- هیدروژن
- ۲- نیتروژن
- ۳- هیدروژن- نیتروژن
- ۴- گازهای رفورمه شده هیدروکربنی
- ۵- آرگون+ هلیوم
- ۶- خلاء

۱- هیدروژن

مهمترین ویژگی‌های هیدروژن خالص عبارت است از:

۱- به شدت زیادی فلزات را احیا می کند.

۲- بسیار قابل اشتعال است و کار کردن با آن احتیاج به نکات ایمنی دارد.

۳- بسیار سبک است.

۴- هدایت حرارتی بسیار زیادی دارد و بنابراین این اتلاف انرژی حرارتی زیاد می شود.

۵- هزینه استفاده زیادی دارد.

بنابراین استفاده از هیدروژن محدود به کوره ها کوچک می شود که اتلاف گاز و یا اتمسفر کمتر باشد.

یکی از استفاده های اتمسفر هیدروژن است که برای تمیز کردن اتمسفر از گازهای راکد می باشد که قبل از دمش گاز هیدروژن دمیده می شود اصطلاحاً گروه را پرچ (Parging) می کند.

۲- نیتروژن

نیتروژن خالص این اشکال را دارد که با اغلب فلزات می تواند ترکیب شود و ممکن است مطلوب نباشد. نیتروژن خاصیت احیا کنندگی مشابه هیدروژن را ندارد.

در اثر ترکیب نیتروژن با فلزات نیتريدهايي به وجود می آید که رسوب نیتريد های ایجاد شده می تواند موجب تردی آلیاژ شود. (به دلیل فاز ترد کننده)

یکی از روش های تهیه گاز N تجزیه آمونیاک (NH_3) است که حدود ۷۵٪ N_2 و ۲۵٪ H_2 و مقداری بخار آمونیاک حاصل می گردد.

۳- نیتروژن + هیدروژن

مطابق دو روش فوق می توان از آن مخلوط گازی استفاده کرد و از تجزیه NH_3 استفاده می شود.

۴- گازهای رفورمه شده هیدروکربنی

کلیه گازهای حاصل از سوزاندن هیدروکربن ها حاصل می شود و دارای قیمت پایینی است. در این روش مورد استفاده قرار می گیرند.

هیدروکربن ها به دو صورت می سوزند:

Exogaz - ۱

Endogaz - ۲

Exogaz - ۱

در این روش هوای کامل و اضافی به محفظه احتراق می دهند و هیدروکربنی به طور کامل می سوزد.

هیدروکربن مصرفی می تواند گاز طبیعی، پروپان، بوتان و گاهی اوقات کُک باشد. ۹۰-۷۰٪ از این گازها را N_2 تشکیل می دهد. از جمله خواص این گازها عبارت است از:

۱- کم بودن قابلیت اشتعال

۲- هدایت حرارتی کم

۳- سهولت تولید خوب

Endogaz - ۲

در این روش با درصد کمتری هوا و هیدروکربن به طور ناقص می سوزد (در حضور کاتالیزور) بنابراین گاز احیا کننده و اشتعال پذیری دارد.

۵- آرگون + هلیم

هزینه تولید این گازها زیاد است و قادر به احیاء کردن نمی باشد. هدایت حرارتی He بالا ولی Ar هدایت حرارتی کمی دارد.

۶- خلاء

در مواردی که فلزات و آلیاژها تمایل زیادی به هیدرید شدن و اکسید شدن دارند، قطعات PM را در خلاء سینتر می کنند مانند فولادهای زنگ نزن Ta، Be، Zr، Ti و

وقتی از این اتمسفر استفاده می شود در حالتی که ماده روانساز درون قطعه محدود باشد برای اینکه مواد روان ساز باعث آریب بردن خلاء نشوند باید اول یک زیتر اولیه انجام داد تا مواد روان ساز خارج شوند.

کوره های سینترینگ

این کوره ها شامل ۳ منطقه کلی می باشد

۱- منطقه ورودی (اولیه) یا پیش گرم کن.

۲- منطقه پخت (سینترینگ) یا ناحیه با دمای بالا

۳- ناحیه خشک کن

ناحیه اول	ناحیه دوم	ناحیه سوم
منطقه پیش گرم کن	منطقه سینترینگ	منطقه خنک کن
حداکثر دما 800°C	حداکثر دما 1100°C	

منطقه اول

در این منطقه قطعه تا 800°C گرم می شود. بنابراین اگر مواد روان ساز در قطعه باشد تبخیر می شود و بعد از اینکه مواد روان ساز خارج شد وارد ناحیه دوم می گردد. حداکثر دما در ناحیه اول و دوم بستگی به نوع آلیاژ دارد. سرعت گرم شدن در ناحیه اول باید کم باشد تا قطعه ترک نخورد.

منطقه دوم

در این ناحیه ذرات قطعه به یکدیگر سینتر می شوند. حداکثر دمای سینترینگ در این منطقه به نوع آلیاژ و نوع کوره بستگی دارد.

منطقه سوم

در این منطقه قطعه به آرامی خنک می شود و دمای قطعه نهایی باید به اندازه ای باشد که در موقع خروج با هوا واکنش ندهد.

نحوه انتقال قطعات در داخل کوره

۱- با استفاده از تسمه توری

۲- با استفاده از غلطک (فولادهای آلیاژی)

۳- روش هل دادن

روش های هل دادن بر دو نوع است:

۱- روش متناوب برای فلزات معمولی

۲- روش مداوم برای کاربردها

فصل پنجم کاربرد متالورژی پودر

موارد کاربرد متالورژی پودر

یکی از موارد استفاده از تکنیک متالورژی پودر (P.M) تهیه قطعات دیرگداز می باشد که به روش های دیگر قابل تولید نمی باشد. به دلیل این که فلزات دیرگداز دارای $TMP < 4000^{\circ}C$ می باشند مانند Mo-Nb-Ta-W.

(Colidige Process)

به علت شکننده بودن W بعداً میله هایی از جنس W به وسیله روش متالورژی پودر (P.M) تهیه می شود، سپس آن ها را در دمای $1500^{\circ}C$ با چکش و ضربه شکل می دهند و سپس در دمای بالا توسط کشش عمیق فاصله های لامپ تهیه می کنند که برای T_3 و Mo این روش نیز کاربرد دارد.

برای گرم کردن این فلزات می توان از مقاومت الکتریکی خود آن ها استفاده کنیم. به این ترتیب که جریان مورد نیاز ۲۰۰ و پتانسیل کمتر از ۲۰۰ می باشد. به این صورت دما به $3100^{\circ}C$ می رسد.

موارد استفاده از W و Mo

در فیلمان ها به علت درجه حرارت بالا رشد دانه های فلز سریع می باشد که منجر به پدیده ای موسوم به seting-off می شود مع نوعی خزش است و فیلمان در اثر وزن خودش خزی می کند.

برای جلوگیری از پدیده خزیه فیلمان اکسید تورم اضافه می کنند و مقاومت خزشی آن را چند هزار برابر می کند. (۵ hr → ۲۰۰۰ hr)

در مواردی که از آلومینا (Al_2O_3) یا سیلیکات ها استفاده می شود در این صورت عمر فیلمان بسیار زیاد می شود مثل لامپ های اتومبیل که بسیار تکان می خورند.

از W در جوشکاری، محفظه کوره (به علت ضریب انبساط پایین) یادر مواردی که قرار است شیشه یا فلز آب بندی شود استفاده می شود. در کنتاکت الکتریکی نیز از W استفاده می شود.

فلز Mo دارای نقطه ذوب 21610°C می باشد و روش ساخت آن (Coldge) می باشد و در لامپ های الکتریکی به عنوان پایه نگهدارنده W به کار می رود. در کوره های الکتریکی از المان Mo استفاده می گردد تا 1700°C نیز کار می کند.

موارد استفاده از Ta و Nb %

فلزات تانتالیم (Ta) و نیوبیم (Nb) دارای مقاومت به خوردگی بالا می باشند. روش شکل دادن آن ها همان روش Coldge می باشند ولی در آن ها از اتمسفر خلاء استفاده می گردد.

از کاربردهای عمده Ta در مواردی است که خوردگی زیاد است و در وسایل پزشکی و وسایل مورد استفاده در بدن نیز استفاده می شود (مولد بیومتریال)

Ta در دمای بالا مقاومت به اکسیداسیون کمی دارد.

مواد دیگری که در متالورژی پودر به کار می روند عبارتست از: زینیم، رودیم، ایریدیم، پلاتینم. از موارد دیگر کاربرد روش (PM) تولید ابزار آلات برش و سرمنت ها (مخلوط سرامیک و فلز) می باشد. آلبوم تصاویر در آخر کتاب عباس ترابی کاربردهای متنوعی از متالورژی پودر ارائه داده است.

بیومتریال ها

بیو به معنی حیات و متریال به معنی هوا. بیومتریال ها آلیاژهایی هستند که در بدن انسان یا بعضاً موجودات زنده دیگر به کار برده می شوند. با توجه به اینکه متابولیسم فعالیتی هر موجود زنده فرق می کند. برای مثال میزان سیانور در بدن انسان باید کمتر از 1PPM باشد. بنابراین بیومتریال ها آلیاژی می باشند بسیار خنثی و غیر فعال

(یعنی با بدن واکنش نمی دهد و وارد خون نمی شود لذا قطعات بیومتریال توسط تکنیک های بسیار بالا که میزان آلودگی عناصر در آن ها کم می باشد تولید می شود. مثل روش پلاسما که آلودگی آن کم است.

ساخت ابزار برش یکی از تولیدات متالورژی پودر تولید کاربید های سمانته شده است که در آن سختی زیاد مارید حفظ شده و چقرمگی (Toughness) لازم به آن اضافه می شود. این مواد به فلزات سخت (Hard metal) معروف هستند.

تکنیک (Schroter)

ایده استفاده از فاز چسبنده همراه (Binder Metal) برای کاهش تردی از Schrppter است. در تکنیک مذکور کاربید را با فلز چسبنده مخلوط و در آن سینترینگ با فاز مایع می باشد. که این اساس تکنولوژی مدرن تولید کاربید ها می باشد. ترکیبات اصلی در این تکنیک کاربید تنگستن (WC) فلز کبالت (Co) می باشد. البته برای مصارف خاصی کاربیدهای دیگر نیز به کاربید تنگستن اضافه می شود. این ترکیب چند کاربیدی (Multi-Carbid Comp) به ویژه ماشینکاری فولاد را در سرعت های زیاد بهتر کرده است. علاوه بر کاربید کاربیدها به عنوان ابزار برش از آن ها در محلهایی که مقاومت در برابر سایش و استحکام فشاری (Comperessive Strenght) لازم است نیز استفاده می گردد.

کاربیدهای سمانته شده

کاربیدهای سمانته شده ماده ای مرکب از ذرات سخت کاربید که در یک فاز چکش خوار گرفته اند را می گویند. این ماده دارای سختی بالا چقرمگی خوب و مقابل به فرسایش بالا می باشد. مشخصات مذکور باعث گردیده که از این متریال در تهیه ابزارهای برش و قطعات فرسایشی استفاده کرد. کاربید تنگستن بیشتر در تولید کاربیدهای سمانته شده قرار می گیرد. اما از کاربید تیتانیوم، کاربید نئوبوم، و کاربید تانتالیم هم استفاده می شود. به طور معمول فاز چسبنده فلز کبالت می باشد.

تولید کاربیدهای سمانته شده

تولید کاربیدهای سمانته شده یک تولید تیپیک متالورژی پودر است. معمولاً تولید کنندگان کاربید پودر مورد نیازشان را خود تولید می کنند. برای تولید کاربید تنگستن پودر فلز را با Lamp Black (ماده ای با حدود ۹۰ درصد کربن) مخلوط می کنند.

مخلوط حاصله در قایق های گرافیکی به داخل کوره کربن کاری برده می شود. کربونیزه کردن در اتمسفر هیدروژن و در حرارت ۱۶۵۰-۱۳۷۰ درجه سانتیگراد انجام می شود. پس از کربونیزه شدن کلوخه های آگلومره شده نخست خرد و سپس آسیاب و غربال می شوند. کاربید تیتان که در ترکیب بیشتر فولادهای برشی موجود است. در محدوده فلزات سخت قرار دارد و درجه دوم اهمست پس از کاربید تنگستن می باشد. اکسید تیتان را با Lamp Black (دوده) مخلوط و پس از خشک کردن بریکت و بعد کربوریزه می شود. حرارت لازم برای کربوریزه کردن بین ۲۳۰۰-۲۱۰۰ درجه می باشد.

کاربرد کاربید سمانته شده

ابزار برش: در جدول زیر کاربیدهای سمانته شده مختلف آورده شده است.

کاربیدها بطور وسیعی در ساخت قالب های کشش سیم میله و لوله استفاده می شود. همچنین در نوک مته های حفاری از کاربید تنگستن استفاده می گردد. در صنایع شیمیایی در جایی که مقاومت دو برابر خوردگی و اکسیداسیون علاوه بر مقاومت در برابر سایش لازم است از کاربید کروم یا کاربید تیتان پیوند شده با آلیاژ کرم- نیکل (Cr-Ni) استفاده می شود. کاربید های سمانته شده بطور فزاینده ای در ساختن قطعات فرساینده و تجهیزات تغییر شکل دهنده (مثل غلطک های نورد گرم و سرد) استفاده می شود.

تولید ابزار از الماس مصنوعی

اساس متد تولید مصنوعی بر پرس سرد و سینترینگ و یا پرس گرم می باشد از پرس گرم در تولید ابزارهای الماس با کیفیت بالا استفاده می شود. در این روش مقدار مشخص پودر الماس دستی در قالب ریخته و سپس

لایه دیگر از فلز ماتریس به آن اضافه می شود. سپس پرس شده و وارد کوره می کنند و دوباره پرس می کنند. فلز ماتریس نگهدارنده الماس در موقع برش می باشد و باید با ریتمی ساییده شود که با سایش ذرات الماس هماهنگی داشته باشد. معمولاً موادی که به عنوان چسبنده (Binder) یا متریال زمینه به کار برده می شوند عبارتند از: مس - برنج - برنز - کبالت - آهن فولاد و کاربیدهای می باشد.

ابزارهای الماسه در انواع مختلف برای حفاری برش و اره کردن مواد سخت مانند کوارتز و کاربیدها و غیره به کار می رود.

یاتاقان های باردار شده با روغن (یاتاقان های خود روغن کار)

مهمترین یاتاقان تولید شده با روش متالورژی پودر یاتاقان باردار شده متخلخل است که روغن با نیروی اسمزی در آن نگهداری می شود. یاتاقان های متخلخل از برنز و آلومینیوم یا آلیاژهای آهن ساخته می شوند. یاتاقان های مذکور ب سه گروه تقسیم می شوند. یاتاقان های بنزی سینتر شده یا یاتاقان های اهنی سرد شده و یا یاتاقان های آهنی - برنزی سینتر شده. هرچه یاتاقان روغن بیشتری در خود نگه دارد دارای کیفیت بالاتری می باشد.

تولید آلیاژهای نسوز

تکنیک PM بطور وسیعی برای تولید فلزات نسوز و آلیاژ های آن ها (مانند تنگستن - مولیبدن - تانتالیم . تئوبیوم) کاربرد دارد. این آلیاژ ها دارای دانسیته بسیار بالا و استحکام خوب و قابلیت ماشین کاری و خواص جالب دیگر برای مصارف خاص می باشند. این فلزات برای پوشش های حفاظتی در مقابل تشعشع بکار می روند. از آلیاژهای W-Cu و W-Ag برای تهیه کنتاکت های برقی به روش PM استفاده می گردد. همچنین از آلیاژ مذکور جهت تهیه فیلترها نیز استفاده می شود.

سرمت (CERMET)

سرمت آلیاژ مقاوم در برابر حرارت است که با همجوشی پودر فلزات و مواد سرامیکی تولید می شود. بیشتر سرامیک ها در مقابل عوامل اکسید کننده مقاومت بالایی از خود نشان داده اند. این خاصیت با شکل پذیری (انعطاف پذیری) فلزات