"Powder Metallurgy" – P.M. P(1)

powder mixing → pre-alloyed powder → particle

$d_{ave} < 1^{mm}$ ذرات [در متالورژی پودر] . به هر یک ذرات پودر particle می‌گویند .

* خصوصیات متالورژی پودر :

① کیفیت سطحی خوب ② شکل پیچیده ③ دقت ابعادی بالا ④ ارزان‌تر از ریخته شده و کار شده

[illegible]

⑤ قطعات کوچک : چون باید فشرده شوند سپس زینتر شوند . از لحاظ میزان فشار امکانات محدودیت داریم .

⑦ ساخت قطعات دیرگداز ⑥ کنترل بیشتر روی میکروساختار : اندازه دانه در حد نانو می‌تواند باشد . در ریخته‌گری حتماً به ذوب نیاز داریم

Green Compact: بعد از فشردن   Sintered part : بعد از زینتر

چگالی
- حقیقی (عادی) : theoretical (در حالت بالک)
- ظاهری : apparent (در حالت پودر)
- بعد از فشردن : green
- بعد از زینتر : Sintered

هدف در PM : نزدیک شدن به ρ_{th} .

یا کاربیدهای WC – Co که اگر بخواهند ریخته‌گری شوند چون دما بالا می‌رود کاربیدها تجزیه می‌شوند .

* علت ارزان بودن P.M. :

① عدم نیاز به رسیدن به Tm ← برای تولید قطعات دیرگداز ② عدم عیوب ریخته‌گری ③ عدم نیاز به تراشکاری

④ تمیز بودن محیط کار و عدم تلفات ماده ⑤ امکان اتوماسیون خط تولید و افزایش تولید .

تخلخل
- باز ← در مواردی که خاصیت روغنکاری بخواهیم ، implant ها (Ti_base) تا مدول به استخوان نزدیک باشد .
- بسته

قطعه متخلخل را با ریخته‌گری هم می‌توان تولید کرد ولی با متالورژی پودر ، تخلخل‌ها یکنواخت‌تر بوده و قابل کنترل‌تر بوجود می‌آید .

پودر ریزتر ← امکان قفل مکانیکی در همدیگر زیاد چون سطح زیاد است .

آتمایز کردن یا روش atomization : مذاب پودر در زیر فشار Ar یا H_2 سرد شده و سپس آتمایز .

محیط اتمیزه آب ← از کروی شکل در می‌شوند چون انجماد سریع است .

پس در محیط سرد ذرات کروی و هم‌اندازه ← تخلخل بیشتر از حالت ذرات غیرکروی است . با پرس تخلخل ↓

$d < 10 \mu m$: ریز $d > 10 \mu m$: درشت

فهرست درس :
- تولید پودر
- آزمایش‌های بررسی خواص فیزیکی
  - Flow Rate
  - توزیع اندازه ذرات پودر
  - استحکام خام
- مستحکم‌سازی : پرس (CP) ، (CIP) (HIP)
- زینترینگ
-

یکی از کاربردهای P.M. : ⓐ تولید آلیاژهایی که فازهای کاربیدی دارند : WC – Co [کاربیدهای سمنته]
در دماهای بالا WC تجزیه می‌شود ← به P.M. تولید می‌شوند . ⓑ کامپوزیت زمینه فلزی Al/Al_2O_3

صحیفه سند :
تاریخ :

لیست پیوست کدینگ حسابهای "معین"

P.M.

P (2)

از کاربردهای متالورژی پودر :

① * تولید کارباید سمنته WC _ Co : پودر خالص Co و WC را در mixing ← خشک و آسیاب . Co نرم بوده و WC را در خود نگه می‌دارد (مثل چسب) . Co نقش دیگری هم دارد : جلوگیری از انتشار ترک حاصل از ضربه در کاربید فاز ترد WC .

② * کامپوزیت زمینه فلزی :

Matrix: Cu - Mg - Al - Ti

Reinforcement: کاربیدها ، اکسیدها

③ Internal Oxidation : پودر Cu و Al : تحت شرایطی برای اکسید شدن Al فراهم می‌شود —— $Cu - Al_2O_3$

Al تقویت شده با ذرات یا نوار (الیاف) : { Discontinuosly Reinforced Alumina (DRA)

تقویت گسسته

$\rho_{app} \sim \frac{1}{3} \rho_{th}$

* مراحل قالب‌گیری پودر :

① filling position

② press position [سنبه بالائی (و در دو طرفه: سنبه پائینی) حرکت کرده و پرس را انجام می‌دهند]

③ ejection position : استحکام به اندازه‌ای است که وقتی سنبه پائینی بالا می‌آید برای خروج، قطعه آسیب نبیند

حجم قبل از پرس

چگالی بعد از پرس

$$(\text{Compaction ratio}) \quad c = \frac{V_i}{V_f} = \frac{\rho_g}{\rho_a} > 1$$

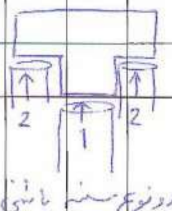
حجم بعد از پرس

چگالی ظاهری (قبل از پرس)

در غیر اینصورت : نسبت حجم ↑ ، قالب بزرگتر و سنبه هم بزرگتر و حرکت مشکل‌تر و احتمال اصطکاک ↑

نمی‌خواهیم c خیلی بزرگ باشد . حدود 3 — 1 کافی است . چیزی که اهمیت دارد این است که c در همه جا باید یکسان باشد تا چگالی در همه جا یکنواخت باشد .

اگر نمونه (محصول) ارتفاع متفاوتی داشته باشد :



دو نوع سنبه پائینی داریم .

تا نسبت ارتفاع‌ها یکسان باشد .

در شرایطی که m یکسان باشد : $c = \frac{V_i}{V_f} = \frac{h_i}{h_f} = \frac{\rho_{\text{بعد از پرس}}}{\rho_{\text{ظاهری}}}$

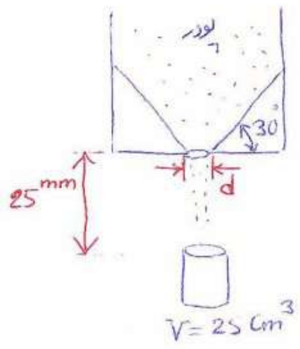
در قسمت ① : if: $h_i = 6$, $h_f = 3$

در قسمت ② : $h_i = 4$ باشد

در قسمت ② ، h_f باید $\underline{\underline{2}}$ باشد تا $c = \frac{4}{2} = \frac{6}{3}$ شود . اگر از یک سنبه استفاده می‌کردیم : در قسمت ① ، اختلاف ارتفاع $6 - 3 = 3$ می‌شد و در قسمت ② هم همین اختلاف ارتفاع را خواهیم داشت یعنی $h_f = 4 - 3 = 1$ و در نتیجه $C = \frac{4}{1} = 4$ در حالیکه در قسمت 1 ، $c = \frac{6}{3} = 2$ است ← چگالی در قسمت 2 بیشتر خواهد بود (ρ ظاهری یکی است) ← سه موقع [illegible]

به شکل [illegible] ←

تاریخ | شماره سفارش یا فاکتور | رسید انبار | قرارداد | شماره پرسنلی | شرح | نام ریز حساب | جمع | شماره حساب | صفحه



* چگالی ظاهری :

$d = 0.1^{in} \leftarrow$ Hall Flowmeter

$d = 0.2^{in} \leftarrow$ Carney "

وزن ظرف پائین در حالت پرشدگی کامل با ترازو خوانده شده

$$\rightarrow \rho = \frac{m}{V} \;,\; \left.\begin{array}{l} V = 25\,cm^3 \\ m = V \end{array}\right\} \rightarrow \rho = V$$

عوامل موثر روی ρ_{app} :

① شکل ذرات : غیرکروی باشد ← ρ_{app} کم

② اندازه ذرات : ذرات هم اندازه درشت موجب کاهش ρ_{app} می‌شود. ذرات خیلی ریز (زیر 5μm) هم ρ_{app} را کم می‌کند چون سطح ذرات زیاد شده و اصطکاک زیاد ← ذرات ایجاد پل می‌کنند و فضای خالی ایجاد می‌شود ← ذرات باید هم ریز و هم درشت باشند.

③ رطوبت

④ صافی سطح ذرات ← موثر در میزان اصطکاک.

Carney ← برای پودرهایی که به راحتی پائین نمی‌آیند مثلا مرطوب باشند.

* نرخ روانی : (Flow Rate) یا (میزان سیالیت) :

از Hall flowmeter استفاده می‌شود. زمان ریزش پودر را اندازه می‌گیرند برای مقدار خاصی پودر. t ↑ یعنی F.R. ↓ و سرعت تولید ↓.

* تعیین چگالی خام (نمونه‌های تخلخل) :

$m < 100^{gr} \rightarrow$ دقت : 0.001 gr

$m > 100^{gr} \rightarrow$ " : 0.01 gr

برای نمونه شکل ساده و غیر متخلخل : $\rho = \frac{m}{V}$

برای نمونه شکل پیچیده و غیرمتخلخل : $\rho = \frac{A}{A-B}\rho_w$

A : وزن نمونه (خشک) در هوا

B : وزن نمونه (خشک) در آب

ρ_w : چگالی سیال

$$\text{ارشمیدس} = \underset{\text{وزن نمونه در هوا}}{W(a)} - \underset{\text{وزن نمونه در آب}}{W(f)} = V_{\text{نمونه}} \times \rho_w$$

$$V_{\text{نمونه}} = \frac{W(a)}{\rho_{\text{نمونه}}} = \frac{W(a)-W(f)}{\rho_w} \rightarrow \rho = \frac{W(a)}{W(a)-W(f)}\rho_w$$

شکل پیچیده ← V به راحتی بدست نمی‌آید ← از ارشمیدس استفاده می‌کنیم.

برای نمونه متخلخل قبل از زینترینگ : $\rho_G = \frac{A\,\rho_w}{B-(C-E)}$

A : وزن نمونه بدون روغن (خشک) در هوا

B : وزن نمونه حاوی روغن (تر) در هوا

C : وزن نمونه حاوی روغن (تر) در آب + وزن سیم

E : وزن سیم در آب

$$\text{میزان تخلخل (نسبی)} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{خام}}}{\rho_{\text{تئوری}}}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{\rho_G}{\rho_{th}}\right) \times 100$$

لیست پیوست کدینگ حسابهای "معین"

ضمیمه سند :
تاریخ :

P(4)

$$\frac{B-A}{S}$$ } حجم روغن

درصد تخلخل باز $$= \frac{B-A}{[B-(C-E)]\,\underset{\downarrow}{(S)}} \times 100 = \frac{\frac{B-A}{S}}{\frac{B-(C-E)}{1}}$$ } حجم نمونه

دانسیته روغن

دانسیته آب $= 1\ \frac{gr}{cm^3}$

روغن خارج شده باشد : Dry density $= \frac{A}{B-(C-E)} \times \rho_w$

روغن حضور داشته باشد : Wet density $= \frac{B}{(B-(C-E))} \times \rho_w$

* برای نمونه های تخلخل، استحکام فشاری گزارش می شود.

* Densification Parameter
$$\begin{cases} \text{خام} = \frac{\rho_g - \rho_a}{\rho_{th} - \rho_a} \\ \text{زینتر} = \frac{\rho_s - \rho_g}{\rho_{th} - \rho_g} \end{cases}$$

ρ_{th} را ۱۰۰٪ می گیریم یا از عدد دانسیته، ρ_s و ρ_g درصد آن عدد می شود مثلا اگر $\rho_s = 87\%$ میشود 87٪ آن عدد مطلوب ρ_{th}

ρ_g : دانسیته بعد از پرس ρ_a : دانسیته قبل از پرس ρ_s : دانسیته بعد از زینترینگ

پودر مخلوط : $\rho_1 \times Vol\%(1) + \rho_2 \times Vol\%(2)$

* تغییرات ابعادی (میزان انقباض پس از زینتر):

بیشترین بعد قالب : $l_{D.e} = l_0$ l_f : بیشترین بعد نمونه بعد از زینترینگ

بعد از زینترینگ، انقباض داریم پس $l_f < l_0$ (معقوله)

$\Delta l = l_0 - l_f$ $l_f = l_0 - \Delta l = l_0\left(1 - \frac{\Delta l}{l_0}\right)$

$\rightarrow l_0 = \frac{l_f}{\left(1 - \frac{\Delta l}{l_0}\right)}$ Dimensional Change $= \frac{\Delta l}{l_0} \times 100$

حجم پس از زینترینگ

$$\frac{\rho_G}{\rho_S} = \frac{V_f}{V_0} = \left(\frac{l_f}{l_0}\right)^3 = \left(1 - \frac{\Delta l}{l_0}\right)^3$$

حجم نمونه خام

$$\rightarrow \boxed{\frac{\rho_S}{\rho_G} = \frac{1}{\left(1 - \frac{\Delta l}{l_0}\right)^3}}$$

درصد انقباض : $\frac{\Delta l}{l_0}$

حین خروج نمونه از پرس، Spring back داریم (تغییر فرم الاستیک) که در روابط دیده نمی شود. با داشتن ابعاد نهایی نمونه می توان آن را محاسبه کرد.

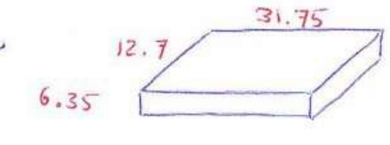
پس Δl کوچکتر خواهد شد؛ چون l_f بزرگتر می شود.

$(l_{dia})\ l_0 = \frac{l_f}{\left(1 - \frac{\Delta l}{l_0}\right)}$

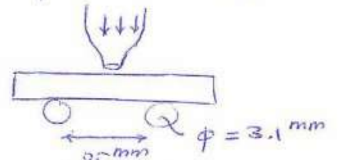
* تعیین استحکام خام (green) و نمونه زینترشده (TRS) :

Transverse Rupture Strength

نمونه استاندارد داریم :



سه تست bending انجام می‌دهیم.



عدد فشردن پودر برای تهیه نمونه خام $P = \frac{F}{A}$ → نیروی پرس

$A = 31.75 \times 12.7$

(Compression Pressure)

max نیرو قبل از شکست که توسط نمونه تحمل می‌شود

$$S = \frac{3}{2}\,\frac{F \times L}{t^2 .\ W}$$

S : استحکام نمونه خام یا زینترشده

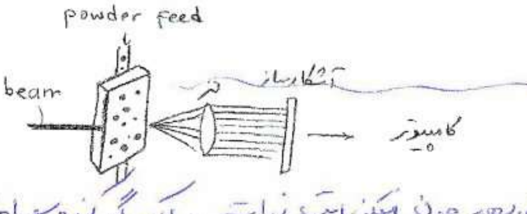
t : ضخامت

W : عرض

با تغییر ابعاد نمونه اگرچه t ، W و L را تغییر می‌کند اما S ثابت است چون F هم تغییر می‌کند (متناظر)

TRS : استحکام نمونه زینترشده است.

* برای خروج نمونه از پرس از lubricant استفاده می‌کنیم: بصورت پودر مخلوط شده با پودر اصلی [درصد وزنی آن باید 0.5 _ 3 %wt باشد چون دانسیته کمی دارد و حین زینترینگ خروج داشته و ایجاد تخلخل می‌کند] یا به جداره قالب زده می‌شود. اصطکاک را کم می‌کند.



* Laser Particle Size Analyzer :

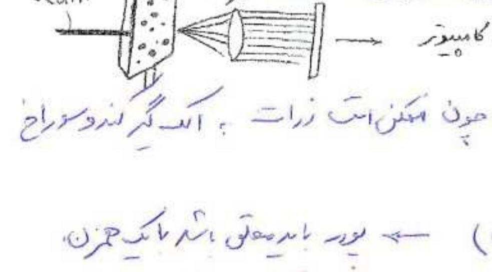
وقتی ذرات خیلی ریزتر از mesh آلک باشد، خطا رخ می‌دهد چون ممکن است ذرات به آلک گیر کنند و سوراخ آن بسته شود و خطا رخ دهد.

سیستم دستگاه
- تر → پودر در مایع (آب مقطر، استون) → پودر باید معلق باشد با یک همزن.
- خشک → پودر در جریان گاز خنثی (پودر باید دی‌آگلومره باشد)

اساس کار: برخورد نور لیزر (He ، Ne و ...) به پودر معلق است: نور پراکنده شده در اثر برخورد با ذرات به توسط لنز به آشکارساز جمع شده و توسط کامپیوتر آنالیز می‌شود و توزیع اندازه دانه را بدست می‌دهد.

Smal particle → زاویه پراکندگی بزرگتر می‌شود

Large particle → " " کوچکتر "



شدت نور رابطه مستقیم با قطر ذرات دارد.

◦ عدد متناظر 84.13 را به عدد متناظر 50% تقسیم می‌کنیم؛ اگر به 1 نزدیک باشد → ذرات پودر هم اندازه اند.

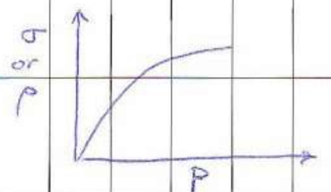
توزیع اندازه دانه پودر روی خواص جریان‌یابی پودر اثر دارد و درنتیجه روی پرشدن قالب و زمان آن اثر خواهد داشت. پودر ریز → جریان کمتر به دلیل اصطکاک بیشتر.

صمیمه سند :
تاریخ :

لیست پیوست کدینگ حسابهای "معین"

تاریخ | شماره سفارش یا فاکتور | رسید انبار | قرارداد | شماره پرسنلی | شرح | نام ریز حساب | جمع | شماره حساب

P(6)



با افزایش فشار پرس ، ρ و σ زیاد می‌شود

Compactibility : رابطه‌ی P و σ

Compressibility : ″ P و ρ

* افت هیدروژن :

برای تخمین میزان اکسیژن همراه با پودر از تخمین بسیار خوب استفاده می‌شود.

درصد افت هیدروژن بیشتر باشد ← اکسیژن بیشتری داخل پودر است که ناخواسته است چراکه ناخالصی و اکسیداسیون زیاد می‌شود.

وزن نمونه پس از احیا + قایقک ↑ وزن نمونه اولیه + قایقک ↑

$$H_2\ loss = \frac{A - B}{C} \times 100$$

↓ وزن نمونه اولیه

3^{mm} درون قایقک می‌ریزیم ← $30^{min} - 60^{min}$ در معرض گاز هیدروژن ← تغییرات جرم ← میزان افت هیدروژن بدست می‌آید. یعنی اکسیدهای پودر احیا می‌شود و اکسیژن آن خارج می‌شود.

خطا : برخی اکسیدها احیا نشوند : Al_2O_3 ، MgO .
پودر رطوبت داشته باشد.
وجود مواد فرار در پودر که کاهش وزن ایجاد می‌کند.

تذکر : lubricant های مورد استفاده در Mechanical Alloying ، در طول تهیه پودر ، به نمونه‌ها ضربه ، فشار و سایش اعمال می‌شود ؛ برای جلوگیری از جوش سرد پودرها از این مواد استفاده می‌شود.

(PCA) Process Control Agents : (مواد کنترل کننده فرایند)

موادی که موجب می‌شوند فرایند خرد شدن بهتر صورت گیرد [کاهش اصطکاک بین خود نمونه و جداره و سنبه]

Mechanical
- alloying پودرهای زیر تبادل اتمی دارند
- milling پودر فقط مکانیکی درگیرند

اگر فقط پرس کنیم ← بهبود خروج از قالب و کاهش اصطکاک و جلوگیری از هدر رفتن فشار پرس با lubricant فراهم می‌شود. خیلی نباید استفاده کرد چون روی خواص اثر می‌گذارد.

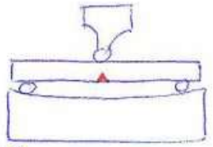
(Weight %) $W_L = \frac{(1-f)\rho_L}{(1-f)\rho_L + f\rho_P}$

چگالی بعد از پرس $\frac{\rho_G}{\rho_{th}}$ ← f : fractional density

ρ_L : Lubricant densi

ρ_P : Powder density

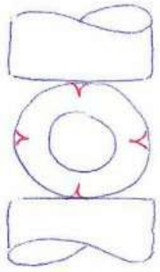
○ فشار تراکم روی استحکام نمونه خیلی موثر است. تست های اندازه گیری استحکام:



تست خمش سه نقطه (گسیختگی عرضی)

(a)

ترک : —



(b)

تست خرد شدن شعاعی برای نمونه های استوانه ای

اگر استحکام نمونه زینتر شده خیلی بالا باشد، بجای تست های بالا، تست کشش انجام می دهند.

(b) → $$k = \frac{F(\overset{\text{قطر}}{D} - \overset{\text{ضخامت}}{T})}{\underset{\text{طول نمونه}}{L}T^2}$$

F : نیروی تحمل توسط نمونه قبل از شکست

---

* تولید پودر : Powder Production

1- Powder Production Via Atomization } اتمیزه آبی / اتمیزه گازی

روش صنعتی تولید پودر است. فلز مذاب در معرض جت هایی که هدایت کننده گاز یا آب هستند، قرار می گیرد.

گاز ↓ H_2, He

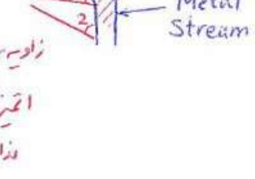
اساس: تولید مذاب و تبدیل مذاب به ذرات ریز.

برخی پودرها را بایستی با اتمیزه گازی تولید نمود. مذاب می تواند آلیاژی باشد و چون انجماد سریع داریم می تواند محلول فوق اشباع هم تولید شود. سرعت انجماد زیاد است ← ساختار ظریفی دارند.

* مزایای روش: ① امکان پودر آلیاژی ② عدم تبعیت از منحنی های حد حلالیت و فوق اشباع شدن

③ ساختار ظریف و ریزدانه ④ پارامترهای قابل کنترل فرایند: فشار مذاب، زاویه برخورد جت با مذاب، دمای مذاب و ...

↓ می توان اندازه، شکل و ترکیب شیمیایی پودر را کنترل کرد.



زاویه برخورد عامل اتمیزه کننده - مذاب

اتمیزه آبی ← شکل پودر نامنظم است و از حالت کروی دور می شود. پودر حاصل مرطوب است و وارد خشک کن می شود.

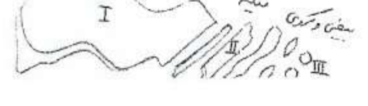
(A.R.) aspect ratio: نسبت بزرگترین بعد پودر به کوچکترین آن

برای کره A.R. = 1 . برای پودر معمولاً A.R<5 است.

اتمیزه گازی ← شکل پودر کروی می شود که به سرعت سرد شدن مذاب ربط دارد. گاز با برخورد به Metal Stream انرژی جنبشی خود را به آن می دهد و به صفحات نازک، سپس سیلندرهای نازک و سپس ذرات بیضوی و سپس ذرات کروی تبدیل می کند (شکل زیر).

سرعت سرد شدن قطرات در اتمیزه گازی از آبی کمتر است ← نیروهای سطحی و کشش سطحی، مذاب را به کره تبدیل می کند.

↓ نیروهای اضافی در سطح قطرات داریم



با افزایش فشار، قطر متوسط ذرات کمتر می شود.

فشار و سرعت گاز با قطر پودر حاصل، نسبت عکس دارد.

ادامه در P(1*).

ضمیمه سند :
تاریخ :

لیست پیوست کدینگ حسابهای "معین"

تاریخ | شماره سفارش یا فاکتور | رسید انبار | قرارداد | شماره پرسنلی | تاریخ ثبت حساب | جمع | شماره حساب

P(8)

* ارتفاع برج اتمیزه آبی کمتر از اتمیزه گازی است بعلت سرعت سرد شدن بیشتر اتمیزه آبی .

کوره ذوب < القایی → بمنظور ارتعاش مذاب
مقاومتی

کوره در خلأ تا اکسیداسیون نباشد

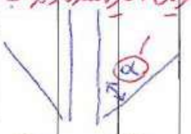
استوانه روش گازی باریک تر است اما طول بیشتری دارد .

تولید پودر به روش اتمیزه
① آبی
② گازی
③ الکترود گردان (REP)
④ سانتریفیوژی → مذاب روی یک دیسک گردان ریخته می شود

در اتمیزه گازی وقتی گاز زیر مذاب می رود ، مخروطی از اغتشاش ایجاد می کند : حالت موجی روی مذاب ایجاد می کند → نوارهایی از مذاب → بیضی → کروی .
(مخروطی شکل)

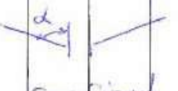
ص 16 جزوه ضمیمه :

زاویه جریان اتمیزه کننده و مذاب



Free Fall
(سقوط آزاد)

در Free Fall بیشتر نیروهای برشی برای اتمیزه بکار می رود. در این حالت مذاب قبل از اتمیزه شدن مسافت زیادی را طی می کند .



Confined → جریان مذاب تا زمانی که سیال اتمیزه برخورد کند در منطقه ای محدود می شود
(محدود)

در Confined : گاز در همان اول مسیر به مذاب ضربه می زند و قطرات حاصل کوچکتر خواهند بود چون بیشتر نیروی ضربه ای دارد تا برشی. اما ممکن است سوراخ های پاشش یا هدایت کننده گاز مسدود شوند.
در اتمیزه آبی بیشتر free fall استفاده می شود.

در اتمیزه آبی ، وقتی آب به مذاب برخورد می کند ، حباب گاز ایجاد می شود که می تواند مذاب را پراکنده کند.
م مذاب کم باشد → با نیروی فشار گاز به پایین می آید نه اینکه تحت نیروی ثقل. در اتمیزه گازی ، اغتشاش در اثر انبساط گاز ایجاد می شود.
اتمیزه گازی معمولا بصورت مخروطی با زاویه ی بزرگ است [ص 16 شکل 7]

حالت مطلوب در اتمیزه ، ذرات کروی و جدا از هم (دی اگلومره) است .

* پارامترهای موثر :
- قطر پاشش : نباید جریان مذاب زیاد باشد .
- محل خروج پودر جامد از پاشش باشد .
- پودرهای خیلی ریز (fine) می توانند با جریان گاز به خروجی بروند و در cyclone جمع آوری شوند .

اتمیزه < اولیه
ثانویه → اگر سرعت گاز زیاد باشد و انجماد صورت نگیرد ، در قسمت های پایین تر هم اتمیزه صورت می گیرد و ریزتر می شود . در اتمیزه آبی ، اتمیزه ثانویه نداریم .

در اتمیزه گازی چون مذاب فرصت بیشتری برای انجماد دارد ، در اثر کشش سطحی ، کروی تر می شود تا اتمیزه آبی .

پودر کروی < تولید قطعات صنعتی
قطعات متخلخل

$$d_m = d_t \cdot k \left[\frac{V_m}{V_g} \cdot \frac{1+\left(\frac{M}{G}\right)}{We} \right]^{1/2}$$ (قطر متوسط ذرات)

V_m : ویسکوزیته (سینماتیک) فلز

V_g : ویسکوزیته گاز

d_t : قطر Metal Stream

$$\frac{1}{We} = \frac{\sigma}{V^2 \rho \, d_t}$$

σ : کشش سطحی مذاب

V : سرعت گاز اتمیزه کننده

ρ : دانسیته فلز

d_t : قطر جریان مذاب

$$V = \frac{G}{S \cdot \rho_g}$$

V : سرعت گاز

G : آهنگ جریان گاز بصورت جرمی

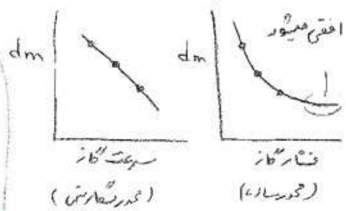
S : سطح نازلی که گاز از آن خارج می شود.

ρ_g : دانسیته گاز

$$\longrightarrow \quad d_m = d_t \cdot k \left[\frac{V_m}{V_g} \; \frac{\left(1+\frac{M}{G}\right)}{G^2 \cdot \rho \cdot d_t} \cdot \sigma \cdot s^2 \cdot \rho_g^2 \right]^{1/2}$$

M : جریان مذاب (از تغییر قطر سوراخ مذاب، تغییر می کند)

سرعت گاز ↑ ← dm ↓.



$$G = \left(\frac{G'}{1000} \cdot \rho_g \right) / 1000$$

G : mass flow rate (kg/sec)

G' : gas flow rate (L/min)

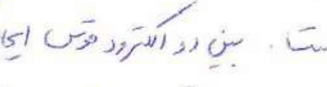
محدودیت در تولید پودر با dm خیلی کوچک داریم. خواص پودر تولیدی از لحاظ درجه خلوص بخاطر به کار بردن گاز خنثی یا وجود خلأ است روی مذاب.

می توان از اتمیزه دومرحله ای استفاده کرد: مذاب بصورت ذره ای وارد محفظه شده و در اثر نیروی گریز از مرکز، ریزتر می شود. (الکترود گردان)

* فرایند الکترود گردان. (REP)

الکترود مصرفی همان فلزی است که می خواهیم پودر شود. الکترود دیگر تنگستن است. بین دو الکترود قوس ایجاد می کنیم ← با چرخیدن الکترود، قطرات تشکیل شده در نوک الکترود، به ذرات ریزتر تبدیل می شود. محیط اطراف، گاز خنثی یا خلأ است. الکترود بصورت افقی وارد می شود. ممکن است الکترود عمودی باشد و قطرات روی صفحه دیگری که چرخان است، بیفتد و بعد ریزتر شوند.

محدودیت در سرعت الکترود و کوچک کردن dm داریم ← دو مرحله ای کار می کنیم.



فرایند REP

سرعت الکترود زیاد ← dm↓

اندازه پودر از اتمیزه گازی بزرگتر است اما اگر دو مرحله ای باشد (الکترود بصورت عمودی) ذرات ریزتر حاصل می شود.

---

* برای قطعات صنعتی (بدون تخلخل با خواص مکانیکی بالا) پرس گرم استفاده می شود. در پرس سرد پودرهای کروی باندازه کافی تغییر شکل نمی دهند ← فضاهای خالی پر نمی شود و بعد از زینتر هم باقی می ماند (برخلاف پرس گرم) ← استحکام پرس گرم ↑.

* در پرس سرد، ذرات ریزتر از 44 µm نبایستی بیشتر از 25% باشد.

آسیاب مکانیکی : Mechanical Milling

یکی از روش های تولید پودر است که ماده اولیه بصورت جامد بوده. بیشتر برای پودرهای سرامیکی مطرح است تا پودر فلزی. برای فلزات ترد می توان پودر به روش مکانیکی تولید کرد. مواد ابتدا ذرات در حد mm خرد می شوند ← Crushing : خرد شدن بین دو صفحه فلزی دندانه دار و ضربه زدن (hammer mill)

P(10)

راندمان بازدهی آسیاب : میزان انرژی آسیاب در واحد زمان بیشتر است و سریع‌تر کار می‌کند.

حالت ایده‌آل : کلاً 50% حجم بال‌میل پر شده باشد: گلوله + پودر

نیروهایی که در Ball mill به پودر وارد می‌شود:
نیروهای ضربه‌ای - سایشی
" برشی
" فشاری

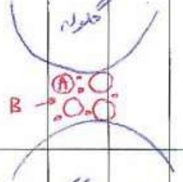
بین ذرات ریز، اصطکاک زیاد بوده و سایش زیاد است

* یکی از پارامترهای مؤثر در آلیاژسازی مکانیکی (Mechanical Alloying (MA))، BPR است. یعنی Bull - to - Powder Ratio : ↑ BPR ← انرژی بیشتر به مواد می‌دهیم و زمان را کم می‌کنیم؛ سایش کم می‌شود و خیلی مطلوب نیست.

گلوله‌ها معمولاً توزیع اندازه دارند (ریز و درشت) : حرکت‌ها اتفاقی شده و کار بهتر و سریع‌تر انجام می‌شود. 50% حجم توسط گلوله پر می‌شود. اتمسفر Ball Mill گاز خنثی یا H2, N2 است.

PCA : همان lubricant است. نقش: به سطح ذرات چسبیده ← پودر می‌تواند ریزتر شود و از آگلومره شدن جلوگیری می‌کند. [اثر روی تنش سطحی]

اگر ذرات ترد باشند، خرد می‌شوند بر خلاف ذرات داکتیل که تغییر فرم می‌دهند و لایه لایه می‌شوند.



هر ذره بزرگتر از اندازه اولیه ایجاد شده که به این حالت Cold Welding می‌گویند.

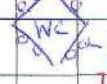
← در زمان‌های اولیه آسیاب، ذرات به هم می‌چسبند و قطر ذرات بزرگتر از قبل می‌شود و با انجام کار سرد روی ذرات، کارسختی (Strain Hardening) رخ داده و ذرات ترد شده و شکسته و لایه لایه می‌شوند.

* مواد PCA هیدروکربنی هستند. از یک طرف موجب ریزتر شدن پودر می‌شوند و از طرفی حضورشان کربن به پودر می‌دهد و کاربید (ترد) ایجاد می‌کنند.
↓
ذرات وقتی ریز می‌شوند، سطح زیاد شده و در هم قفل می‌شوند.
↓
PCA جلوی این را می‌گیرد و نمی‌گذارد آگلومره شود (به هم جوش نخورد)

* کاربرد آسیاب مکانیکی:
① آلیاژسازی مکانیکی
② کاهش قطر ذرات پودر فلزی و غیرفلزی

[نکته: پودر نرم باشد [ذرات نرم و داکتیل] ← حین آسیاب تغییر فرم می‌دهند و خیلی ریز نمی‌شوند و PCA هم نرم در ریز کردن است؛ اگر ذرات ترد باشند با آسیاب + PCA می‌توان به نانو رسید]

③ قرار دادن پودر روی ذرات پودری دیگر: کاربیدهای سمنته



11% wt (binder)

④ کامپوزیت‌سازی (Al - SiC)
Matrix 90% Vol.
10% Vol.
مرحله Mixing و Milling روی ساختار زمینه خیلی مؤثر است و می‌خواهیم ذرات SiC پراکنده شوند. [عدم clustring]

⑤ مستحکم‌سازی اکسید روی زمینه (ODS)

قرار دادن Al_2O_3 در زمینه Cu، آلیاژسازی مکانیکی نسبت بگیم آسیاب مکانیکی است. [ODS] . ابتدا Mixing و بعد در آسیاب قرار می‌دهیم. چون تبادل اتم صورت نمی‌گیرد.

* در آلیاژسازی مکانیکی، تبادل اتم داریم:

$$Cu-[Al] + Cu_2O \xrightarrow{M.A.} Al_2O_3 + Cu$$

پودر خالص Cu

پودر Al خالص 1% wt

با XRD می‌توان تشخیص داد: پیک XRD پهن می‌شود چون:

① انبساط در شبکه در اثر حل شدن عنصر دیگر.

② اندازه دانه کوچکتر به دلیل مرزهای فرعی.

③ با حل شدن Al در Cu، تنش بالا رفته و جای خالی زیاد میشود.
یا با کار سرد انجام شده تنش بالا می‌رود.

در حین آسیاب Cu_2O احیا می‌شود و O را به Al می‌دهد و Al اکسید می‌شود و از شبکه خارج میشود و Cu زمینه خالص می‌ماند و روی آن Al_2O_3 تشکیل می‌گیرد.

در نتیجه شبکه انبساط خودش را از دست می‌دهد و پیک آن‌ها به Cu خالص بر می‌گردد و زاویه بزرگترین پیک به سمت θهای بیشتر بر می‌گردد.

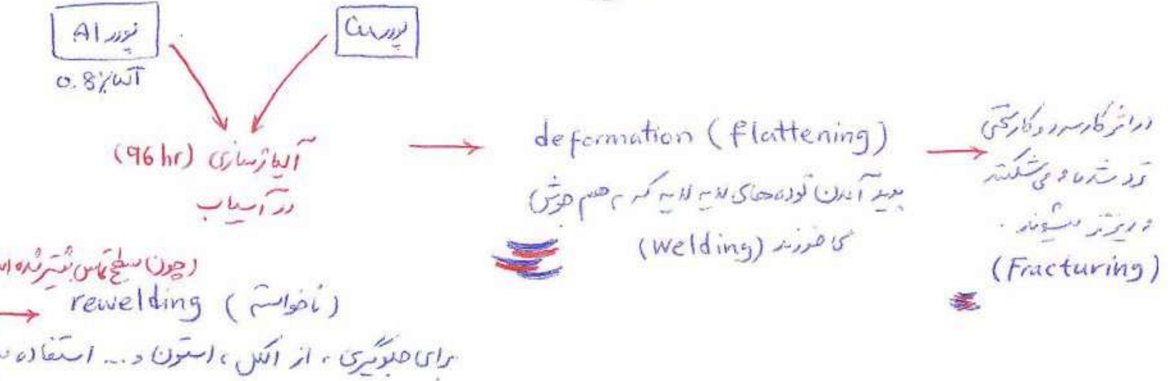
% Vol. Al_2O_3 زیاد باشد، پیک آن را در XRD می‌بینیم.

آسیاب مکانیکی: مخلوط کردن پودر Cu و پودر Al_2O_3،

روش دیگر آلیاژسازی مکانیکی Cu و Al: ذوب کردن → پودر → ورق نازک‌تر ایجاد کرده → حرارت می‌دهیم تا O_2 نفوذ کردن به وسط ورق هم برسد و با Al واکنش دهد. (Internal oxidation Casting)

دما را بالا نگه می‌داریم تا همه جا پخش شود و زمان هم می‌دهیم تا استحکام بالاتر برود. ذوب حاصل را می‌توان اتمیزه کرد تا پودر آلیاژی تولید شود

حلالیت Al در Cu زیاد است اما درصد Al را کم می‌گیریم تا Al_2O_3 کمتر باشد.


پودر Al
0.8% wt
پودر Cu
آلیاژسازی در آسیاب (96 hr)
deformation (flattening)
به هم آمدن توده‌های لایه لایه که به هم جوش می‌خورند (welding)
در اثر کار سرد و کارسختی ترد شده‌اند و می‌شکنند و ریزتر میشوند.
(Fracturing)
(چون سطح تماس بیشتر شده است)
rewelding (ناخواسته)

برای جلوگیری، از الکل، استون و ... استفاده میشود.

شرایط آلیاژشدن: تماس خیلی نزدیک ذرات به هم و ریز شدن ذرات، مرزدانه زیاد میشود و محل‌های انتقال اتم زیاد می‌شود؛ پس د
و تنش بالاست.

الکل و استون از ابتدا افزوده می‌شوند و جلوی rewelding را می‌گیرند. [مخصوص برای پودر داکتیل]

بعد از آلیاژسازی پودر اکسیدانت Cu_2O اضافه می‌کنیم → $Cu + Al_2O_3$

* Mechanochemical Synthesis: آسیاب کردن همراه با انجام واکنش شیمیایی:

$$Al + C \rightarrow Al_4C_3 + Al_{(matrix)}$$

[بین Al و C واکنش رخ می‌دهد در زمینه پخش می‌شود]

P(12)

$$Cu[Ti] \xrightarrow[+O_2]{argon} Cu + TiO_2$$

Ti از شبکه Cu خارج شده و با O_2 واکنش می‌دهد.

پودر آلیاژی دوباره وارد آسیاب میشود

* : Double Milling / Double Mechanical Alloying

ابتدا آلیاژسازی مکانیکی (Milling) انجام می‌دهیم ⟵ ریز شدن ذرات، بهم زدن ذرات و ایجاد تماس بیشتر ⟵ فعالیت حرارتی پودرها امکان‌پذیر ⟵ تشکیل ترکیبات بین فلزی ⟵ مواد دوباره در آسیاب [جهت ترکیب] ⟵ دانه‌ها کوچک می‌شوند.

با انجام M.A. روی مواد، پودرها درشت‌تر شده، فرایند راحت‌تر میشود. چون با اعمال ضربه، انرژی داخلی مضاعف وارد آنها شده و فعال شده‌اند.

---

grain size: $D = 10\text{–}100$ nm

$$D = \frac{0.9\,\lambda}{B\,\cos\theta}$$ (معادله شرر)

λ ⟵ طول موج اشعه X

B ⟵ پهنای پیک max در وسط پیک

θ ⟵ زاویه براگ (از مرتفع‌ترین نقطه شیب پایه)

$$\beta_s = \frac{0.9\,\lambda}{D\,\cos\theta} + 2\varepsilon\tan\theta$$ (Bs) (معادله Wiallumsoun-Hall)

β_s ⟵ پهنای پیک اصلاح شده در وسط پیک max.

D ⟵ grain size

ε ⟵ کرنش داخلی شبکه

$$\longrightarrow B_s\cos\theta = \frac{0.9\,\lambda}{D} + 2\varepsilon\sin\theta$$

جمع $B_s\cos\theta$ برحسب $\sin\theta$ خطی میشود.

$$B_s^2 = B_e^2 - B_i^2$$

B_e ⟵ نمونه آلیاژی آسیاب شده

B_i ⟵ مربوط به پودر آنیل شده (پودر آسیاب نشده که کار مکانیکی شده)

در زمان‌های مختلف، β_s و θ های مختلف داریم و خط را رسم می‌کنیم با شیب... D متغیر است.

$B_s\cos\theta$ برحسب $\sin\theta$: خطی می‌شود.

---

* تولید پودر فلزی به روش احیاء اکسید (oxide Reduction):

ماده اولیه اکسید پودر فلزی [پودر اکسید فلزی]، با حرارت دادن اگر چه برحسب به هم چسبیدن پودرها میشود. در دمای اتاق اکسید فلزی پودر است.

$$M + O_2 \rightarrow MO_2$$
$$\Delta G_i^\circ = -RT\ln K = RT\ln P_{O_2}$$

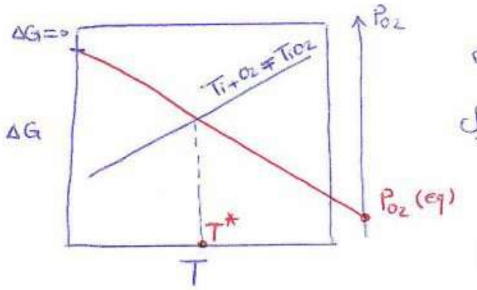
MO_2 خود به خود به M تبدیل نمیشود. از یک عامل احیایی باید استفاده کرد: CO، H_2، CO_2

و در دمای بالا هم باید احیا شود.

اکسید فلزی ابتدا خرد میشود.

احیا بصورت ناقص: اکسیدی ⓪ / احیا شده

با داشتن T و ΔG° ، P_{O_2} بدست می‌آید. از دیاگرام الینگهام نیز می‌توان استفاده نمود.



$P_{O_2}=0.2\,atm$ در شرایط معمول ولی P_{O_2} (تعادلی) معمولاً برای فلزات در حدود $10^{-8}\,atm$ است ← اکسیدها در شرایط معمول پایدارتر هستند ← نیاز به عامل احیا کننده داریم مثل CO.

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$$

$$\Delta G^\circ = -RT\ln\frac{P_{CO_2}^2}{P_{O_2}\cdot P_{CO}^2} = 2RT\ln\left(\frac{P_{CO}}{P_{CO_2}}\right) + RT\ln(P_{O_2})$$

با داشتن T، ΔG° و P_{O_2} از دیاگرام الینگهام، $\left(\frac{P_{CO}}{P_{CO_2}}\right)$ بدست می‌آید.

$$MO_2 + 2CO \longrightarrow M + 2CO_2 \qquad \Delta G^\circ = -RT\ln\left(\frac{P_{CO_2}}{P_{CO}}\right)^2 = 2RT\ln\left(\frac{P_{CO}}{P_{CO_2}}\right)$$

شرط احیا شدن: $\frac{P_{CO}}{P_{CO_2}}$ بزرگتر از عدد محاسبه شده باشد [در روابط بالا]

در این روش، قسمت‌های مرکزی پودر ممکن است احیا نشود؛ چون تماس با عامل احیا کننده ندارد. ادامه صفحه P(2*)

---

* تولید پودر فلزی به روش الکتروشیمیائی : (Electrodeposition)

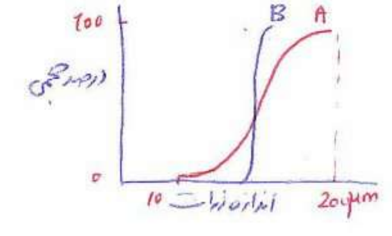
یک محلول با غلظت کم، آمپر بالا در کاتد، اسیدیته بالا و هم زدن کم داشته باشیم تا توده شل و اسفنجی روی کاتد بنشیند. بکارگیری الکترولیتی هم می‌توان الکترولیت مثل سولفات سدیم ← می‌توان جریان کمتر در نظر گرفت. با تنظیم پارامترها مثل: غلظت یون مورد نظر در محلول، i_a ، i_c ، دمای حمام الکترولیت، ولتاژ، نسبت کاتد و آند، اندازه کاتد و آند، فاصله آند و کاتد و اندازه حمام می‌توان پودر در اندازه نانو هم تولید کرد. ادامه صفحه P(2*)

منسجم سازی پودر : Consolidation

۱- زینتر پودر loose Sintering (Pressureless Forming) :

فقط با حرارت دادن و بدون اعمال فشار در قالب و اتمسفر خنثی در زمان کافی. پودر نباید به قالب بچسبد. روی سطح st. st. ، Cr_2O_3 داریم. (st. st. یا گرافیتی)

محصول متخلخل و هم شکل با قالب است. اندازه تخلخل به اندازه پودر وابسته است. پودر معمولاً کروی و هم اندازه استفاده می‌شود.



پودر B توزیع کمتری دارد و ذرات تقریباً هم اندازه هستند. برای قطعات متخلخل حالت B بهتر است ولی مشکل آن اکسیداسیون است. اکسید حین زینترینگ احیا نمی‌شود و زینتر نمی‌شود ← پودر خالص را [illegible]

P(14)

اکسیدهای پایدارتر حتی در زینترینگ هم احیا نمی‌شود و از تماس مستقیم فلز با فلز جلوگیری می‌کند و اعمال فشار هم نداریم تا خرد شوند.

مشکل دیگر روش بدون فشار: چون اعمال فشار نداریم، باید با قالب در کوره زینتر قرار بگیرد و ← ممکن است به قالب بچسبد. ← با اعمال فشار جزئی، تخلخل را کم کرده و قطعه را از قالب بیرون می‌آوریم و در کوره زینتر قرار می‌دهیم. میزان فشار هم جنس پودر بستگی دارد.

2- روش‌های سرد: "Cold forming" یا "Room. Temp."

1- پرس سرد: قالب نباید تغییر فرم پلاستیک بدهد و الاستیک هم باید محدود باشد.

2- پرس ایزواستاتیک سرد (CIP)

3- نورد سرد (Rolling)

3- روش‌های گرم: Sinter + Pressure

در دمای T_s (زینترینگ) اعمال فشار هم داریم. قالب نباید تغییر فرم بدهد و شوک حرارتی ببیند.

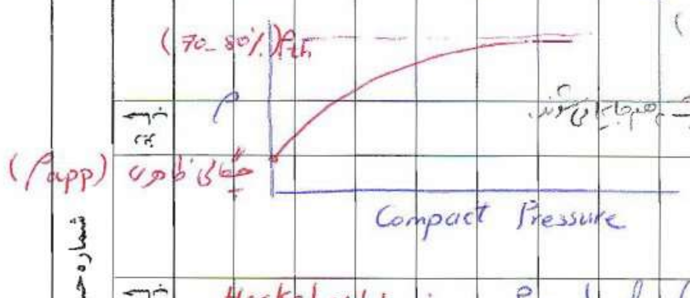
1- پرس گرم (hot pressing): قالب و سنبه گرافیتی است.

2- پرس ایزواستاتیک گرم (HIP)

3- نورد گرم (Hot Rolling)

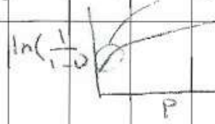
* پرس سرد:

هدف تولید قطعه با چگالی و داکتیلیتی بالا در مورد قطعات گفته شده است.



ساختار ریزتری دارد (در مورد قطعات گفته شده)
خواص مکانیکی دارد

نمودار غیرخطی است چون ذرات پودر اول جابجا می‌شوند.



رابطه‌ی Heckel: $P = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{1}{1-\boxed{D}} + B\right)$ → برای CIP هم برقرار است: در ایزواستاتیک در P برابر، D بیشتر از پرس می‌شود، چون فشار را از همه جهت داریم. در پرس اصطکاک داریم و بازدهی کمتر است.

دانسیته خام (ρ_G)

چگالی نسبی $= \frac{\rho_G}{\rho_{th}}$

رابطه‌ی Balshin: $\ln P = -\frac{A_1}{D} + B_1$

1-D: تخلخل را نشان می‌دهد.

$\uparrow \frac{1}{1-D} \leftarrow \uparrow P$

لیست پیوست کدینگ حسابهای "معین"
ضمیمه سند :
تاریخ :
صفحه :
تاریخ
شماره سفارش یا فاکتور
رسید انبار
قرارداد
شماره پرسنلی
شرح
نام ریز حساب
شماره حساب
جمع

(از حوزه) در die pressure در 750 MPa، شیب نمودار عوض می‌شود. در P بیشتر، شیب کم است به دلیل کارسختی که در پودر صورت گرفته است و مقاومت نشان می‌دهد ← چگالی کم می‌شود چون کمتر حرکت داریم. شیب برای مواد مختلف فرق دارد به دلیل σ_y متفاوت.

کاربرد روان‌ساز: کم کردن اصطکاک بین پودر و دیواره ← افزایش دانسیته و یکنواختی در چگالی. موقع خروج از قالب هم آسیب کمتر می‌شود.

مشکل روان‌ساز: ① چگالی کم ← با برداشتن بار ← رفتار الاستیکی متفاوت از پودر و انبساط بیشتر ← آسیب‌ها ← موقع خروج، سنبه بالایی فشارش $\frac{1}{3}$ کاهش می‌یابد و یکدفعه حذف نمی‌شود.

② قبل از زینترینگ باید از قطعه خارج شود.

$\frac{H}{D}$ ↑ و x ↑ ← غیریکنواختی در چگالی ↑

تولید قطعات کاربید سمنته با استفاده از پرس سرد:

additive reinforcement Carbides (Nb, Ta)C → مانع رشد WC می‌شوند

WC، Co را در خود حل نمی‌کند اما Co حدود 20% WC را در خود حل می‌کند. با کاهش دما این حلالیت کم می‌شود.

اگر آلیاژ 10% Co باشد، فاز WC + liq در 1400°C داریم که در liq حدود 40% Co داریم.

← زینترینگ در این دما را liq. phase sintering می‌گویند.

با آگلومره شدن زمان تخلیه قالب کمتر می‌شود. فاز WC تیزگوشه نیست و کروی می‌شود و جریان‌یابی زیاد شده است و چون سایز زیاد شده ← سطح کم می‌شود.

این 3 را وارد قالب کرده و چون ریز هستند ← 10% Co + 90% (WC, VC)
خیلی کم

و اصطکاک زیاد است ← آگلومره می‌کنیم. اندازه ذرات را با دستگاه Spray Dryer زیاد می‌کنیم. به ترتیب زیر:

← Ball-Mill (wet) Attrition ← آسیاب 11(hr) ← مواد در حالی در Mixer تا رسوب نکند

← حرارت ← Spray Dryer [مثل اتمیزاسیون: در غیاب بخار آب و N_2 یا Ar]

(با پارافین نقش روان‌ساز را دارد)
← آگلومره خواهد شد ← پرس انجام می‌شود ← زینترینگ
(ذرات کروی شکل و بزرگ و هم‌سایز که سطح تماس را کم کرده‌ایم) و نرخ روانی زیاد شده است.

liq. phase sinteri: حفره‌ها و تخلخل‌ها بهتر پر شده می‌شود چون نفوذ بهتر شده و زینترینگ کوتاه می‌شود.

معایب: کنترل باید با دقت صورت بگیرد.

مقداری تخلخل داریم چون ρ_{th} نداریم اما می‌خواهیم تخلخل صفر باشد چون مقاومت به سایش مطرح است ← یک مرحله HIP نیز روی محصول انجام می‌شود.

در حالت معمولی باید در قوطی قرار داد اما در اینجا چون زینتر شده است در قوطی نیاز نداریم ← در سوم فشار Ar گرم؛ دما بالاست و P کمتر نیاز است.

P(16)

پرس ایزواستاتیک سرد (Cold Isostatic Pressing) or (CIP):

یک قالب (bag) داریم که flexible است از جنس رزین و پلیمر. مادامی که فشار داریم، شکل ماده را دارد و با قطع فشار به حالت اول برمی‌گردد.

در bag، پودر یا قطعه پرس شده قرار می‌دهیم و در محفظه قرار می‌دهیم.

برای روش محدودیت طول نداریم چون فشار هم جانبه است اما محدودیت فشار داریم چون می‌خواهیم هم یکنواخت باشد.

مزیت: از lubricant استفاده نمی‌شود و دیگر آلودگی نخواهد بود. به دلیل عدم اصطکاک چگالی بهتر است. یعنی نیروی کمتری نیاز داریم.

Wet bag ← کندتر از Dry bag ولی می‌توان چند قالب را با هم پرس کرد. در wet از همه جهت تحت فشار است ولی dry اینطور نیست.

Dry bag

در پرس ماندل کیفیت سطح بالاست

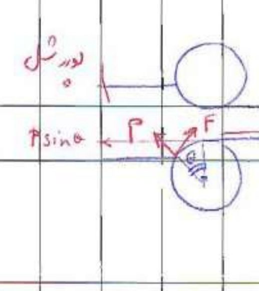
عیوب:
① کیفیت سطحی قطعه پایین است وابسته به سطح داخلی bag است.
② عمر مفید آن کم است اما چون پلیمر ارزان است چندین بار می‌توان از آن استفاده شود.
③ روش کندی است
④ تجهیزات گران است اما قالب (bag) ارزان.

در CIP هم مثل پرس سرد، فشار آرام آرام برداشته می‌شود. هم چنین lubricant نداریم چون تنش الاستیک در قطعه نداریم.

محصول CIP را می‌توان با نورد و اکستروژن دنبال کرد.

* نورد سرد: (Cold Rolling)

محصول strip (تسمه) است.



$F\cos\theta > P\sin\theta$

$\rightarrow \frac{F}{P} > tg\,\theta \rightarrow \boxed{\mu > \tan\theta}$

$\rightarrow \boxed{tg^{-1}\mu > \theta}$

زاویه بین غلتک و پودر با اصطکاک (μ)
باشد تا نورد انجام شود.

$\uparrow\mu$ ← تسمه چگال‌تر خواهد بود.

لیست پیوست کدینگ حسابهای "معین"
صحیفه سند:
تاریخ:
تاریخ
شماره سفارش یا فاکتور
رسید انبار
قرارداد
شماره پرسنلی
شــــــرح
نام ریز حساب
جمع
شماره حساب
صفحه:

$$D_s = D_p \frac{1+R\theta^2}{h}$$

D_s چگالی محصول

D_p چگالی پودر

h فاصله بین غلتکها (roll gap)

R شعاع غلتک

عوامل افزایش چگالی :

① افزایش چگالی پودر

② افزایش اصطکاک بین پودر و غلتک

③ افزایش R

افزایش h ، چگالی را زیاد نمی‌کند. ↓h ← ضخامت قسمت ↓

برای افزایش ضخامت قسمت ، h را زیاد نمی‌کنیم بلکه قطر غلتک را زیاد می‌کنیم تا ρ کم نشود

بعد از نورد مقداری تغییر فرم الاستیک برمی‌گردد.

تغذیه قبل از نورد همیشه باید ارتفاع ثابتی داشته باشد تا فشار و نسبت پودر یکسان باشد.

انجام نورد سرد در چندین پاس ← بین هر پاس باید آنیل صورت بگیرد.

برای عدم اکسیداسیون ، ۲ فرآیندهای قبلی باید در اتمسفر خنثی صورت بگیرد.

* پرس گرم (Hot Pressing) :

هم‌زمان با اعمال فشار ، زینترینگ هم داریم : هر دو را با هم داریم ← فشار کمتری نیاز داریم نسبت به پرس سرد.

در پرس سرد بهتر بود پودر همگی کروی نباشد ، شکل نامنظم باشد تا درهم قفل مکانیکی شوند. در پرس گرم این موارد اهمیتی ندارد

توزیع اندازه ذرات پودر مهم نیست حتی شکل نامنظم ذرات مثل پرس سرد باعث قفل شدن ذرات درهم نمی‌شود.

عیوب : تجهیزات پیچیده‌تر از پرس سرد / نیاز به کوره در اطراف سنبه (القایی ، مقاومتی) ، قالب معمولاً گرافیت است چون P کم است و شوک حرارتی را تحمل می‌کند و تراشکاری ساده‌تر آن / اتمسفر باید احیایی و خنثی باشد تا در دمای بالا اکسیداسیون رخ ندهد.

مواد اولیه : پودر یا قطعه خام . قطعه خام بهتر است چون اکسیداسیون کمتر بوده و تخلخل هم کمتر است.

سیکل اعمال فشار و حرارت می‌تواند مثل HIP باشد.

پرس ایزواستاتیک گرم : (HIP) or (Hot Isostatic Pressing)

فشار آن از پرس گرم بیشتر است. قالب از ورق (Can) یا (قوطی) است یا از جنس فولاد کم کربن (نه

کوره مثل پرس گرم است. سیکل مثل پرس گرم است. داخل قوطی ، قطعه یا پودر داریم. فشار از طریق گاز H_2 ، Ar اعمال می‌شود روش CIP واسطه داریم اما نه مایع [برای CIP مایع است اینجا گاز].

در CIP ، bag از جنس رزین داشتیم اما در HIP ، Can داریم از جنس ورق فولادی

از عایق استفاده می‌شود تا حرارت بیرون نزند ← بدنه HIP سرد است.

سیکل روش مثل پرس گرم است {
زینتر و فشار توأماً
فشار کمتر نسبت به حالت سرد

ضمیمه سند :
تاریخ :

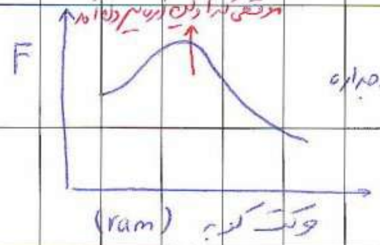
لیست پیوست کدینگ حسابهای "معین"

تاریخ	شماره سفارش یا فاکتور	رسید انبار	قرارداد	شماره پرسنلی	شرح	نام ریز حساب	شماره حساب

P(18)

در اکستروژن گرم به کمک یک نیرویی به پودر یا قطعه پرس شده و از [illegible] وارد می کند:

$F \propto \ln(R)$ $R = \frac{A_0}{A_f}$ نسبت اکستروژن



ماده بیرون آمد ← کاهش اصطکاک بین مواد و جداره قالب ← کاهش نیروی لازم.

بهتر است پودر را اکستروژن گرم کنیم و قطعه را داخل قوطی پرس کرده و بعد سطح بالای قوطی را می برند و بعد داخل اتوکلاو گرم کرده و بعد سوراخ را پر کرده و پیش گرم کرده و بعد مجموعه را اکستروژن می کنند. قبل از پیش گرم باید گاز زدایی هم بشود.

↑R ← فشار بیشتری لازم داریم و قطعه چگال تر می شود.

بدلیل نیروهای برشی، ذرات بهتر بهم پیوسته می شود اگر بخواهیم R را زیاد در نظر بگیریم

اگر R کم باشد، چگالی قطعه کم خواهد بود.

اکستروژن ذرات حتماً گرم است چون پیوسته کردن ذره ها از روزنه R ۰/۱ مشکل است.

↑R ← فشار اکستروژن ↑ و اگر خیلی زیاد باشد ترک پیوسته ایجاد می شود

↓R ← ↓P

جمع

max(R) = 2.5

صفحه :

P(o*)

• آسیاب: دو نوع است: سیاره‌ای، attrition.

چهار استوانه روی صفحه است و در خلاف جهت هم دوران می‌کنند.

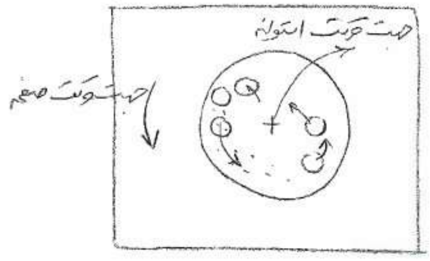
← یک نیروی سانتریفیوژی داریم. ضربه در اثر سقوط گلوله هم

هم داریم.

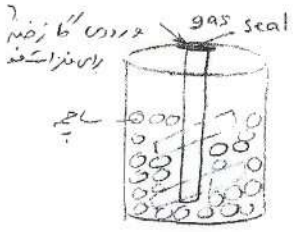
پودر ترد ← خرد می‌شود.

" نرم ← تغییر فرم پلاستیک

• Planetary ball mill: (سیاره‌ای)



• Attrition ball mill:



بازوهای افقی که با هم زاویه دارند

بازوها به یک شفت متصل هستند.

* پارامترهای دخیل در آسیاب:

1- نوع آسیاب 2- جنس و ظرفیت محفظه آسیاب (ضد سایش)

فولادی، Cr دار، Al_2O_3، کاربید سخت

3- سرعت آسیاب 4- زمان آسیاب

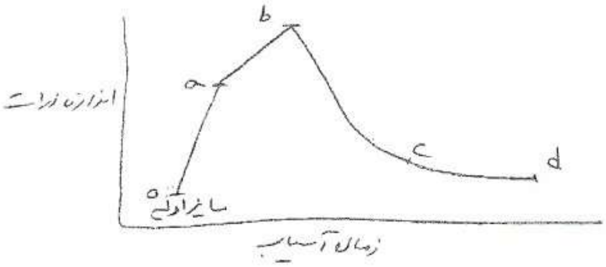
5- نوع، اندازه و توزیع اندازه ساچمه‌ها و شکل ساچمه‌ها

6- BPR (نسبت ساچمه به پودر (نسبت وزنی))

7- اتمسفر محفظه آسیاب (Inert، N_2)

8- PCA (کنترل کننده فرایند) 9- دمای آسیاب.

نیروهای اعمال شده در آسیاب {
ضربه‌ای ← BPR↑ انرژی بیشتری به سوار داده‌ایم و اگر ساچمه‌ها زیاد باشند، ضربه‌ها کم می‌شود.
↙ زمان کم می‌شود.
اصطکاکی
برشی ← وقتی توزیع اندازه داریم در ساچمه‌ها، نیروهای برشی موثرتر می‌شود و زمان آسیاب کم و کیفیت نهایی بهتر.
فشاری ← از سه سوی شکل پودر را
در سه‌بعدی ترکیب می‌کند.



o ← a: جوش سرد، تغییر فرم پلاستیک

a ← b: "

تا b جهت cold welding اندازه ذرات بزرگ می‌شود

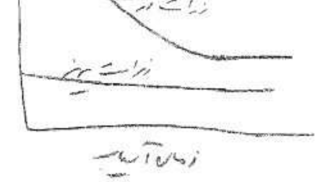
اما بین b و c سختی زیاد شده و در c می‌شکند.

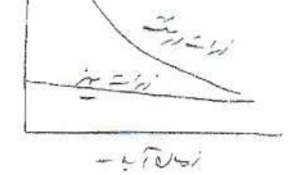
d: پایان آسیاب.

استئاریک اسید

PCA بعنوان lubricant (روان ساز) است: اسید استئاریک (پودر جامد). به ذرات پودر می‌چسبد و ذرات پودر را محصور

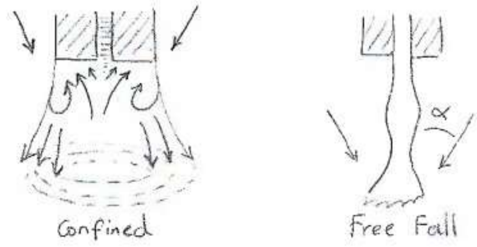
اینها ریزتر می‌شوند و دیگر آگلومره نمی‌شوند چون در کشش سطحی ذرات اثر می‌گذارد.





P (1*)

تولید پودر به روش اتمیزه :

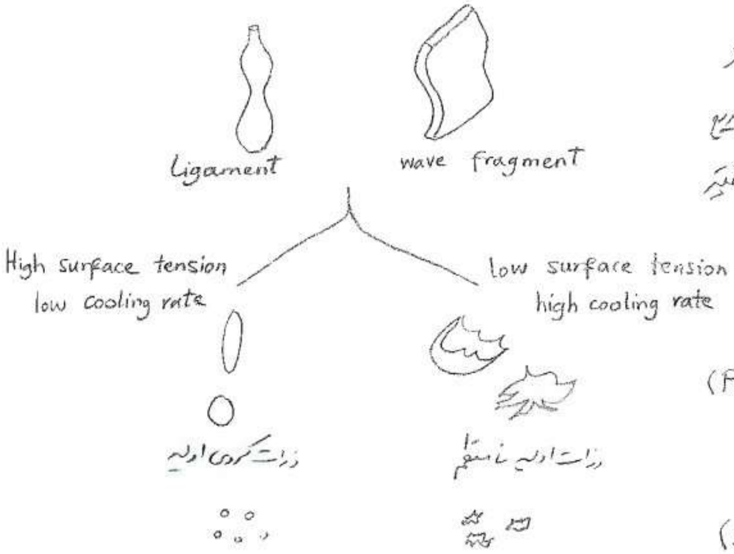

α
Confined
Free Fall

I : wave Formation

α : زاویه برخورد سیال اتمیزه کننده به metal stream . α کوچکتر باشد ، ذرات درشت‌تر می‌شوند ولی α بزرگتر ← برخورد دقیقتر ← ذرات ریزتر

تذکر : در اتمیزه آبی سرعت سرد شدن بالاست و S.A. را نداریم

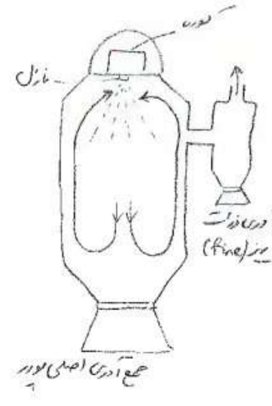
در اتمیزه گازی اگر سرعت و فشار گاز بالا باشد در پایین‌تر باز هم لیگامنت‌ها خرد می‌شوند (معمولاً در اتمیزه گازی انجماد سریع نداریم) ← اثر گاز اتمیزه وجود دارد و ذرات باز هم کوچکتر می‌شوند شرط عدم انجماد .


Ligament
wave fragment
High surface tension
low cooling rate
low surface tension
high cooling rate
ذرات کروی اولیه
ذرات اولیه نامنظم

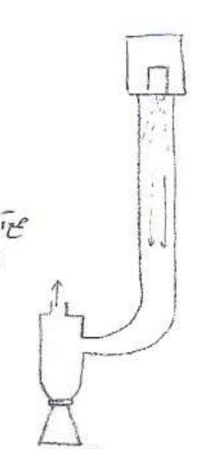
(Primary atomization)

(Secondary atomization)
(S.A.)

تذکر : محصول اتمیزه بهتر است ذرات کروی و جدا جدا از هم باشد .


پودر
نازل
جمع آوری ذرات ریز (fine)
جمع آوری اصلی پودر

محصول : ذرات پودر کروی آگلومره شده


جمع آوری پودر

محصول : ذرات پودر کروی و جدا جدا از هم

قطر محفظه بهتر است کمتر است . در سمت چپ عمده پودر از پایین خارج می‌شود و ممکن است به بالا برود و با دیواره برخورد کند پس خروج پودر باید طوری باشد که با دیواره برخورد نکند و بالا نرود ذرات fine همراه با گاز خروجی خارج می‌شوند.

← { قطر محفظه بهتر است کم باشد . / خروج پودر بهتر است از پایین باشد . }

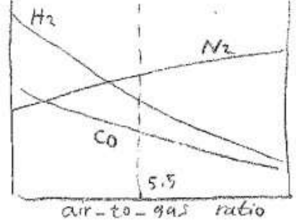
---

* در تولید پودر آهن به روش اتمیزه آهن کم کربن :

بعد از تولید پودر در کوره کمربندی یک عملیات آنیل شکل می‌گیرد و برای اینکه جذب اکسیژن نداشته باشیم محیط را احیایی می‌کنیم ! N_2 هم وارد محفظه می‌شود تا اکسیدی نباشد (محیط) ← آمونیاک را تجزیه می‌کنه ← N_2 , H_2

بعد از فرایند آنیل ذرات دوباره به هم می‌چسبند و باید دوباره خرد شوند . ذرات کوچکتر بهتر احیا می‌شوند پس قبل از احیا یک مرحله خرد کردن داریم یا دانه بندی . در کوره می‌توان درصد کربن را نیز کم کرد . (Exothermic Gas)

؟ : Page 23



$\frac{air}{gas} > 5.5$ ⟶ گرمازا : درصد CO و H_2 کم است

$\frac{air}{gas} < 5.5$ ⟶ گرماگیر : CO, H_2 عمدتاً احیایی اند درصد زیادی دارند .

○ در کوره ترکیب محیط به اندازه حجم محفظه متغیر است .

P(2*)

IRON powder By atomization: Melt High C → atomize (air or H_2O)

$\xrightarrow{\text{control C/oxide ratio}}$ Grind $\xrightarrow{\text{beam furnace}}$ Anneal → Grind → iron Powder

خرد کردن ذرات تا احیا بهتر صورت بگیرد.

کربن و O_2 با هم از پودر گرفته می‌شود. کربن و O_2 خروجشان محیط احیایی را تنظیم می‌کند

اگر پودر محصول غیر کروی بود ← اتمیزه آبی بوده و اگر متخلخل بود یعنی اتمسفر کوره آنیل، اکسیدی بوده است و تخلخل حین خروج گاز ایجاد شده است.

---

* مراحل تولید پودر آهن به روش احیای اکسید: • IRON by carbon reduction

بمنظور کنترل گوگرد ↑ احیاکننده ↑

سنگ آهک + کک + سنگ آهن در لوله‌های SiC → Kiln reduction (کوره طبقه‌طبقه) → توده هم‌چسبیده اسفنجی → خردکن

→ جداکردن مواد گنگ غیرمغناطیسی → خردکن → جداکردن مغناطیسی

→ کوره کمربندی با اتمسفر H_2 و N_2 برای احیا → آنیل → پودر آهن

میزان O_2 هم کم می‌شود.

زمان احیا طولانی است چون در حالت جامد صورت می‌گیرد. بدلیل خروج گاز CO، تخلخل هم ایجاد می‌شود.

• IRON by hydrogen reduction

پوسته‌های اکسیدی حاصل نورد گرم (Mill Scale) → Grind → جداکردن مغناطیسی → حرارت در معرض هوا (اکسیژن)

← همه اکسیدها به Fe_2O_3 تبدیل می‌شوند تا احیا راحت‌تر انجام شود. چون $\Delta G > 0$ تری دارد.

→ کوره کمربندی با اتمسفر H_2 → احیا → توده هم‌چسبیده → Grind

→ آسیاب → Iron powder

بمنظور افزایش Papp چون در روش احیا تخلخل زیاد است و Papp کم است

در اینجا تخلخل‌ها نسبت به قبلی کوچکتر است.

---

* تولید پودر مس به روش الکتروشیمیایی:

$\underbrace{\text{آند مس، محلول CuSO4، کاتد Pb، آنیزال}}_{\text{سل الکترولیز}}$ → رسوب پودری روی کاتد

→ تراشیدن، فیلتر و شستن → خشک کردن، پودر دندریتی است → کوره کمربندی → احیا

(اکسیدهایی که در مراحل قبل ایجاد شده‌اند دوباره احیا شده و خوشه‌ها از بین رود)

→ Grind → Cu Powder

شکل پودرها بصورت فشرده شده اسفنجی است

شکل ذرات به زمان خردکردن بستگی دارد.

قبل از قرار دادن در کوره، دندریتی است. تیزکردن سطح کاتد در انجام پودر روی آن مؤثر است.

P(3*)

* ادامه تولید پودر به روش الکتروشیمیایی:

معتقد بالابودن خلوص پودر تولیدی در کاتد، خلوص فلز در آند باید بالا باشد. رسوب روی کاتد با برس کنده شده و شسته می‌شود تا الکترولیت حذف شود و از فیلتر استفاده می‌کنیم. پودر روی فیلتر، جمع می‌شود و بعد خشک شده و دانه‌بندی می‌شود. جریان مورد استفاده DC است.

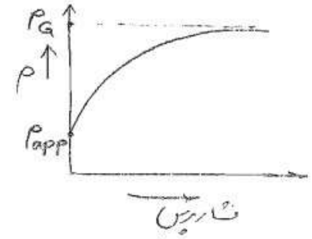
برای تولید توده سل روی کاتد، در الکترولیت غلظت یون مس را کم می‌گیریم و دانسیته جریان در کاتد را بالا گرفته و اسیدیته محلول نیز بالا و البته سرعت به هم خوردن محلول کمتر ← رسوب پودری متخلخل خواهیم داشت.

---

* Die Pressing: (پرس سرد)

$1-D$: تخلخل

$$D = \frac{\rho_g}{\rho_{th}}$$



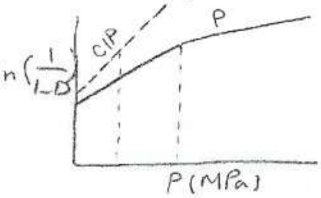
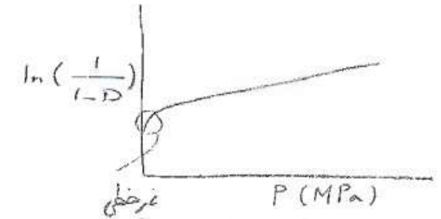
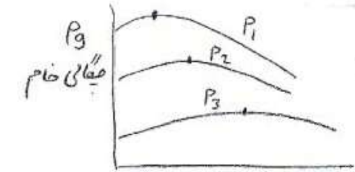


Fig 4 — 36 صفحه



برای فشردن پودر از روان‌ساز استفاده می‌شود { به صورت پودر مخلوط شده با پودر اصلی در حد (۱تا۲) / به دیواره قالب زده می‌شود

زدودن روان‌ساز مشکل است.



$P_1 > P_2 > P_3$

نمونه‌ها متخلخل هستند

در هر فشاری، max چگالی در یک درصد خاص از روان‌ساز فراهم می‌شود

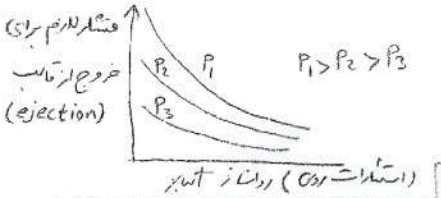
w_l: میزان روان‌ساز $\quad w_l = \frac{(1-f)\rho_L}{\rho_L(1-f)+\rho_P f}$

فشار زیاد ← $\downarrow w_L \leftarrow \uparrow f$

f: چگالی نسبی $\quad \rho_L$: چگالی روان‌ساز

هدف استفاده از روان‌ساز: کم کردن اصطکاک بین پودر و دیواره و پودرها با هم ← چگالی ↑ و راندمان ↑ و غیریکنواختی، در قطعه خام. موقع خروج از قالب نمونه خام است و کمک به خروج آن می‌کند

مشکل روان‌ساز: چگالی کم ← با برداشتن بار یکدفعه منبسط می‌شود و قطعه آسیب می‌بیند ← فشار را کم کم برمی‌داریم – قبل از زینترینگ باید زدوده شود.
← مقدار زیاد آن، حجم زیادی دارد و بعد از زینترینگ تخلخل ایجاد می‌کند

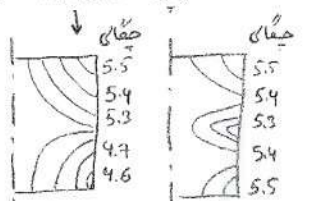


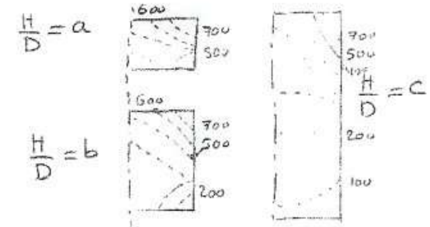
$P_1 > P_2 > P_3$ فشار پرس

فشار لازم برای خروج، توسط سنبه پایینی اعمال می‌شود و با افزایش w_l، فشار لازم ↓ اما w_l نمی‌تواند زیاد باشد به دلیل معایب بالا.

یک مشکل پرس، غیریکنواختی چگالی است:

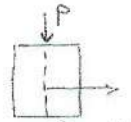
(پرس دوطرفه نمونه استوانه‌ای)





$c > b > a$

(پرس یک‌طرفه برای نمونه‌های استوانه‌ای)



فشار در اینجا < P

خصوصاً وقتی ↑ $\frac{H}{D}$ چون اصطکاک بین ذرات پودر با هم و با دیواره زیاد می‌شود

پس ↑ $\frac{H}{D}$ ← عدم یکنواختی چگالی ↑

در دوطرفه، در وسط کمترین چگالی را داریم اما در یک‌طرفه در انتها چون از سنبه دور است.

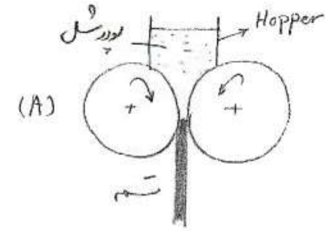
برای نمونه با ارتفاع $h = 6^{mm}$، غیریکنواختی نداریم اگر شکل نمونه ساده باشد و اصطکاک سطح نداشته باشد [در حالت یک‌طرفه]
در حالت دوطرفه، یکنواختی بیشتر است.

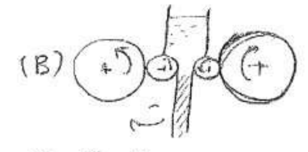
ادامه پرس سرد
پشت صفحه

P(۴*)

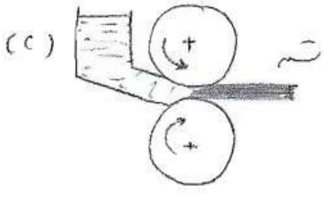
* نورد :

با نورد می‌توان strip را بصورت چندلایه هم تولید کرد.

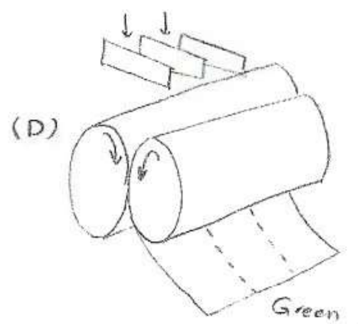




برای اعمال فشار بیشتر و چگالی بیشتر



در حالت افقی نیروی ثقل داریم اما در حالت عمودی باید فشار بیشتر پودر باشد چون نیروی ثقل نداریم.



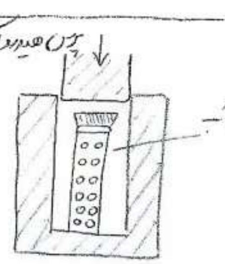
Green Strip
بصورت چندلایه.

در حالت (A) فشار بیشتر پودر در حال ارتفاع پودر (شکل) است پس باید همواره ارتفاع پودر ثابت باشد یعنی سطح مقطع باید یک ارتفاع معین داشته باشد تا فشار اولیه ثابت ← چگالی یکنواخت

در نورد گرم فشار کمتری لازم است چون قطعه گرم است. بعد از نورد سرد دانسیته بالاست و برای پاس‌های بعدی نورد سرد باید در بازه آنیل شود. بعد از زینتر تسمه نورد سرد، نورد گرم هم صورت می‌گیرد معمولاً و بعد سرد شده و بصورت Coil جمع می‌شود.

---

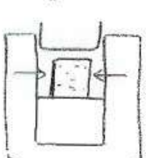
* پرس ایزواستاتیک:



پودر داخل bag و bag داخل perforated tube (support) قرار می‌گیرد که سوراخ سوراخ است. bag بصورت پلاستیکی است و برای اینکه شکل قالب را کج نگیرد درون ورق سوراخ سوراخ قرار می‌گیرد. سوراخ بودن بدلیل اینکه فشار سیال به bag منتقل شود.

بشرط کم بودن قطر bag، چگالی یکنواختی داریم بدلیل فشار هم طرفه. در جهت شعاعی افت فشار داریم.

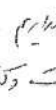
Dry bag (Fixed mold or bag)



bag در محفظه fix است و بیرون نمی‌آید و پودر داخل آن ریخته می‌شود. و بعد محصول بیرون می‌آید.

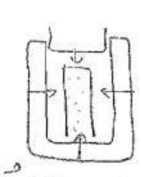
در این حالت قابلیت اعمال فشار به چند قطعه را نداریم.

از انتها پیشرفت نداریم. اگر در روش ← تغییر شکل مقاومت که در انتها فشرده شده نداریم.



چون در روش محکم‌تر از bag است دیگر تغییر شکل نمی‌دهد.

wet bag (removable mold)



bag بصورت شناور است. بعد از اعمال فشار، bag به حالت اولیه خود برمی‌گردد چون flexible است.

این فرایند کندتر است اما قابلیت استفاده همزمان برای چندین bag را دارد. bag بیرون محفظه از پودر پر می‌شود و بعد به محفظه می‌آید و بعد از اعمال فشار بیرون آمده و تخلیه می‌شود.

قطعه شناور است ← از همه طرف فشار داریم.

P(S*)

* در hot pressing محصولی که می‌خواهد پرس شود، می‌تواند پودر یا قطعه خام باشد. قطعه خام بهتر است چون فشرده شده است و ذرات نسبت به هم جابجا شده اند و بین آنها فضاهای خالی کمتر است، انتقال حرارت بهتر است هم چنین اکسیداسیون هم کمتر است

---

* آلیاژسازی مکانیکی : (M.A.) Mechanical Alloying :

Ball mill $\xrightarrow[\text{معمولاً از glovebox استفاده میشود}]{\text{حین حمل ذرات}}$ Steel can / M.A. → اکستروژن (پودر پیش گرم شده است) → Hot Rolling → عملیات حرارتی ↓ ماشینکاری

↓ پرس سرد هم انجام می‌دهند قبل از اکستروژن تا مراحل بعدی کوتاه‌تر شود به دلیل کاهش تخلخل [پودر غیرفعال]

تذکر: پودر غیرفعال را پرس سرد می‌کنیم اما پودر فعال را در glovebox قرار می‌دهیم. بعد degassing و بعد گرم کردن

Double mechanical alloying (dMA) or Double Milling :

elemental or/and prealloyed powders: Al Fe Mn — PCA (الکل، استون، اسید استئاریک)

→ M.A. I

↓

فازها به صورت تعادلی یا غیرتعادلی ایجاد می‌شوند. غیرتعادلی مثل آمورف یعنی بدون نظم و تقارن ← در XRD پیک نمی‌دهد چون شبکه کریستالی ندارد مواد نانوکریستالاین (اندازه دانه <100nm) و محلول فوق اشباع هم غیرتعادلی اند

↓

Heat Treatment (ایجاد ترکیبات بین فلزی Fe-Al)

↓

M.A. II

(خرد کردن ترکیبات بین فلزی ایجادشده و ریز کردن دانه‌ها یعنی آسیاب مجدد)

↓

Degassing

معمولاً در قوطی می‌ریزیم و پرس سرد انجام می‌دهیم و هوا را خارج می‌کنیم و قوطی حاوی مواد خام را پیش گرم کرده و بعد

↓

Extrusion
(به صورت گرم است)

با انجام M.A. زینترینگ ساده‌تر می‌شود چون پودر فعال شده است، به خاطر داشتن انرژی.

از PCA تا حد ممکن کم استفاده می‌کنیم چرا که ذرات هیدروکربنی دارد ولی برای rewelding نیاز داریم که PCA باشد تا رخ ندهد

بعد از M.A.II پودر در قوطی دربسته ← پرس سرد ← پیش گرم ← اکستروژن گرم

dMA:

یک بار M.A. کرده‌ایم که برای ریزتر کردن و تماس بیشتر و همگن کردن ذرات. در حال حالت پودری خارج از آسیاب حرارت می‌دهیم تا ترکیبات بین فلزی ایجاد شود که فازهای مطلوب هستند؛ بعد دوباره در آسیاب قرار می‌دهیم این بار دیگر عناصر نداریم و ترکیب فلزی داریم ← اندازه دانه و ذرات کوچک‌تر می‌شود.

mechanochemical Synthesis:

یعنی آسیاب همراه با واکنش شیمیایی :

$$Al + C \longrightarrow \underbrace{Al_4C_3}_{\text{ذرات پراکنده در زمینه}} + \underset{\text{زمینه}}{Al}$$

عامل گازی: آرگون حاوی O_2

$$Cu[Ti] + \longrightarrow Cu + TiO_2$$

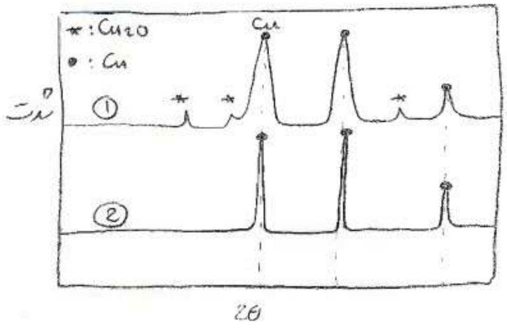
Ti از شبکه Cu خارج می‌شود؛ در داخل آسیاب این فرایند را داریم.

پس: عامل گازی حین آسیاب با پودر واکنش می‌دهد.

P(6*)

* ادامه آلیاژسازی مکانیکی:

Cu_2O : اکسیدانت



① به پودر آلیاژی Cu_2O اضافه کرده و 48hr آسیاب می‌کنیم.

② پودر مرحله قبل پرس شده و بعد زینتر شده است (حین زینتر یک احیا داریم) و فقط پیک Cu خالص را داریم. پیک Al_2O_3 نداریم چون کم است.

حل شدن Al در شبکه Cu [مرحله اول آسیاب که پودر Al و Cu خالص داریم] ← پیک Al حذف شده و پیک بلند Cu کوتاه و پهن می‌شود. وقتی پیک Al را داریم یعنی آلیاژسازی هنوز صورت نگرفته است. البته با انجام آلیاژ شدن بلندترین پیک Cu علاوه بر کوتاه و پهن شدن، به سمت زاویه های کوچکتر هم می‌رود. میزان آلیاژ شدن به زمان آسیاب بستگی دارد و به کره آسیاب، سرعت آسیاب و عملکرد ...

در مرحله سوم Cu_2O اضافه می‌شود [اکسیدانت] : خروج Al از شبکه Cu، پیک Cu به حالت اولیه برمی‌گردد.

محصول: $Cu+Al_2O_3$ (دوزینا)

لازمه آلیاژ شدن در مرحله اول آسیاب، تبادل اتم‌هاست و لازمه تبادل اتم، ترکیب شدن فواصل و نازک شدن و افزایش سطح ذرات است.

* پهن شدن پیک‌ها: تنش (کرنش) داخل شبکه به دلیل ضربه در حین آسیاب مکانیکی، اندازه دانه کوچکتر شدن (به علت نانو) [نه اندازه ذرات] مربوط می‌شود.

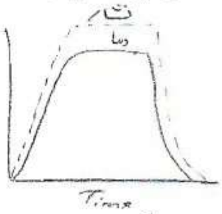
$\phi_{Al} > \phi_{Cu}$ ϕ : قطر اتمی

$\lambda = 2d\sin\theta$ $d = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}}$ Al وارد Cu می‌شود ← d↑ ← θ↓

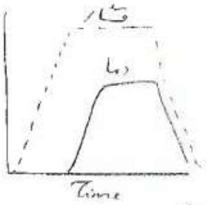
---

* پرس ایزواستاتیک گرم: (HIP)

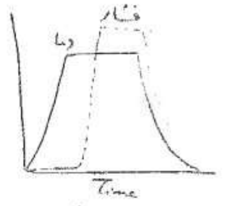
بیشتر برای قطعات پودری و کنترل بکار می‌رود. سیکل‌های مختلف دما و اعمال فشار داریم:



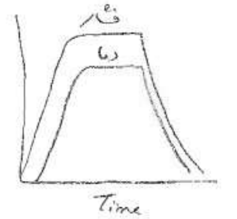
از لحاظ اقتصادی به دلیل کوتاه‌ترین زمان مطرح است.



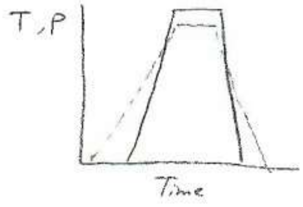
اول فشار داریم یعنی کار سرد روی نمونه انجام شده و بعد دما اعمال می‌شود که در شرایط تبلور مجدد، استخراج رشد و دمای تبلور مجدد کم می‌شود



حرارت برای نرم کردن نمونه و بعد اعمال فشار؛ مثلاً برای قطعات ترد

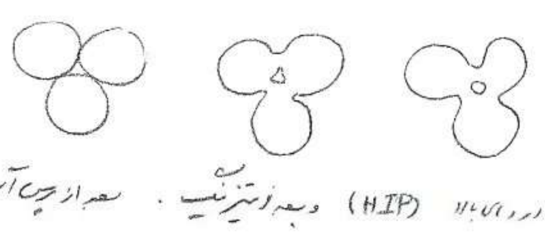


برای جلوگیری از ترک برداشتن



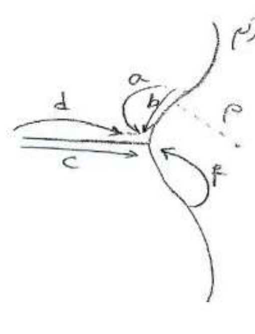
فشار توسط گاز Ar اعمال می‌شود یعنی سیال گاز است چون دما بالاست.

زینترینگ در حالت جامد : (Sintering)



در ابتدا تخلخل‌ها گوشه‌دار هستند اما در مراحل نهایی زینترینگ بصورت کروی در می‌آیند.

برای از بین بردن این حفره، اعمال فشار گاز Ar در دمای بالا (HIP) و بعد زینترینگ. بعد از هیپ آن زینترینگ کنیم، همواره حفره داریم.



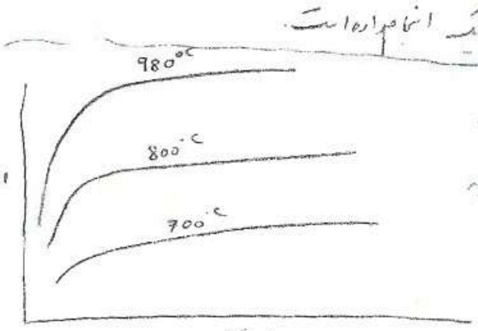
برای فلزات نداریم چون T_b بالاست و تبخیرش کم

مسیرهای نفوذ:

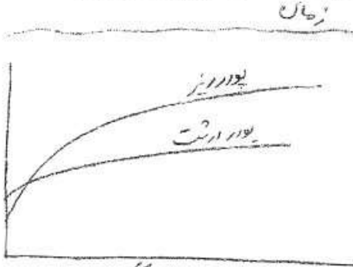
- سطحی
  - تبخیر و میعان (EC) = f
  - نفوذ سطحی (b)
- حجمی
  - نفوذ مرزدانه‌ای (GB) : مرز بین دو پودر / مرز داخل خود پودر
  - نفوذ حجمی (VD)
  - جریان پلاستیک (Plastic Flow)

• مسیرهای سطحی در دماهای پایین و مسیرهای حجمی در دماهای بالا صورت می‌گیرد.

جریان پلاستیک : با تغییر فرم نابجایی‌های ایجاد شده و اگر با جاهای خالی تداخل انجام کند ← صعود نابجایی که جریان پلاستیک است چون پودر تغییر شکل پلاستیک انجام داده است.



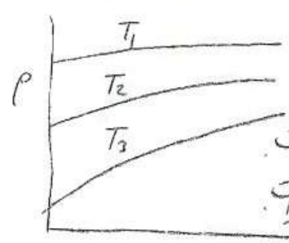
با افزایش زمان، شیب منحنی کم می‌شود. در °980 شیب منحنی بیشتر است چون نیروی محرکه بیشتر است.



$t = 0$ ← چگالی پودر ریز کمتر است چون سطح ذرات زیاد است و ایجاد پل می‌کند و اصطکاک هم زیاد است.

$t > 0$ ← دانسیته پودر ریز بیشتر است چون :

① انرژی سطحی ↑ ، ② سطوح ذرات محدب‌تر است، ③ مسیر نفوذ کوتاه‌تر است.



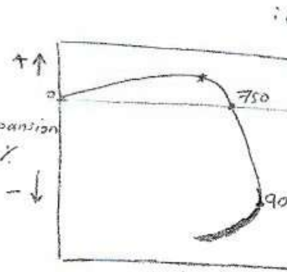
$T_1 > T_2 > T_3$

در T_1 شیب کمتر است یعنی فشار تأثیره ندارد چون دما فاکتور مهمی در زینترینگ است.

در T_1 تغییرات ابعادی حین زینترینگ کمتر است.

فشار ↑ ← تغییرات ابعادی ↓

منحنی دیلاتومتری :



نمونه پرس شده را با rate کم به °925 رسانده و مدتی نگهداری با همان rate سرد کرده‌اند

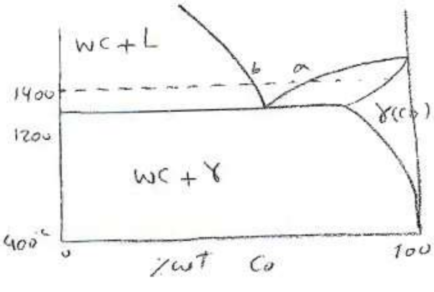
از صفر با افزایش T، انبساط داریم (+) چون پودر فلزی منبسط می‌شود. بعد از یک دمایی انقباض داریم (°750) چون زینترینگ داریم همراه انقباض است و تخلخل کم می‌شود. و بعد از °900 انقباض در اثر سرد شدن داریم.

P(8*)

با انجام زینترینگ، موقعیت ذرات پودر عوض می‌شود و دیگر پودرهای را
نمی‌توان شناسایی نمود.

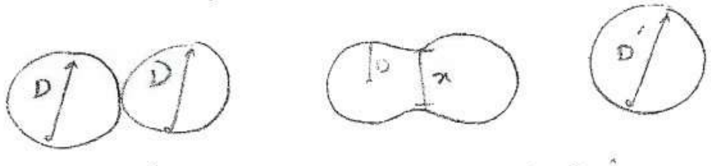
وجود اکسیدهای فرد شده در سطح ذرات اصلاً مطلوب نیست و چقرمگی
و انعطاف پذیری را کم می‌کند.

* زینترینگ کاربیدهای سمنته: (Liquid phane sintering)



برای زینترینگ، دمای 1400° می‌رود. برای قطعه ،Co=10%
در T=1400°C، W و مذاب در تعادل هستند، فاز مذاب ترکیب
b دارد. به این حالت liquid phase sintering
می‌گویند. Co یک مقدار WC را در خود حل می‌کند اما Co در
WC حل نمیشود.

تغییرات ابعادی با زمان در ابتدا زیاد و با گذشت زمان کم میشود
چون نیروی محرکه کم میشود. در ابتدا گلوگاه حالت تیز دارد و
با گذشت زمان رشد می‌کند و شعاع انحنا بیشتر می‌شود یا $\frac{x}{D}$ ↑ میشود.

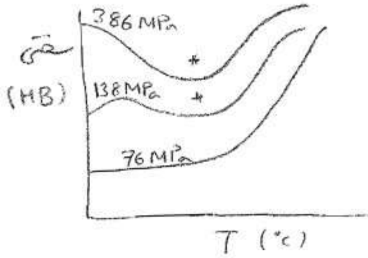


با ثابت بودن حجم: D'=1.26D اما سطح کم میشود:

$S_1 = 2(\pi D^2)$ $S_2 = \pi(1.26D)^2$

← انرژی سطحی کم میشود.

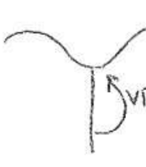
حین زینترینگ هر سطح غیر مستوی می‌خواهد صاف شود چه
محدب و چه مقعر.



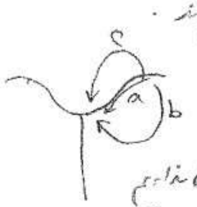
هرچه تخلخل کم شود، سختی زیاد می‌شود. افت سختی به دلیل چیست
کار سختی کم بوده (افزایش فشار پرس) که تبلور مجدد ص
گرفته چون دمای تبلور مجدد کم شده است و به دلیل sinter
دوباره زیاد می‌شود.

نفوذ حجمی: مبدأ داخل شبکه است ← انقباض داریم
و فاصله مراکز ذرات به هم نزدیک میشود

نفوذ سطحی: انقباض در نمونه نداریم؛ در دمای کمتر است
و تغییرات ابعادی نداریم و بین ذرات اتصال
ایجاد می‌شود.



VD: مبدأ داخل شبکه است
سطح و در این حالت دو دانه
به هم نزدیک میشوند.



در a و b، انقباض نداریم
چون نفوذ سطحی است. هم چنین در c.

شرط انجام نفوذ راحت تر، وجود نقایص
شبکه‌ای است.

مرز دانه دارای جای خالی و نابجایی است و انتقال اتم
امکان‌پذیر است. گلوگاه بیشترین جای خالی را دارد
در سطح [illegible] هم بی‌نظمی‌ها زیاد است.