

تراکم پودرهای فلزی با روش دینامیکی

دکتر محمدعلی صادقی

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر محمود شاکری

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندس حمیدرضا داغیان

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

تراکم پودرهای فلزی، به کمک پرس، روشی است که به صورت وسیع در متالورژی پودر مورد استفاده است. اکستروژن، کارهای حرارتی، چکش‌کاری دورانی، و پرس متناوب از جمله روشهای دیگر برای تراکم پودرهای فلزی می‌باشد. اخیراً، روشهایی دینامیکی، برای تراکم مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، با استفاده از سقوط وزنه پودر برنز متراکم شده، و نتایج به دست آمده با روش پرس مقایسه شده است.

Dynamic Compaction of Metal Powders

M.Sadghi, Ph.D – M. Shakeri Ph.D. – H. R. Daxhyani M.Sc

Mech. Eng. Dept. Amirkabir Univ. of Tech.

ABSTRACT:

Die pressing of metal powders, is a widely used method in powder metallurgy. Extrusion, hot-working, and cyclic pressing, are some of the other methods for compaction of metal powders.

In recent years, interest has been developed in dynamic method of compaction. In this paper drop hammer is used to compact bronze powders, and the results are compared with die pressing method.

مقدمه

که در آن v حجم مخصوص، n تعداد مراحل، و Δt زمانی است که حجم از v_i به v_{i-1} می‌رسد. معمولاً به کلیه روشهای تراکم که نرخ تراکم آنها بیشتر از ۱۰ بر ثانیه است، روشهای دینامیکی گویند. روشهای دینامیکی معمولاً به دو گروه تقسیم می‌شوند.

روش دینامیکی تراکم پودر، روشی جدید است، که در آن به علت سرعت زیاد تراکم می‌توان در درجه حرارت‌های پائین به دانسیته نسبی بالاتری دست یافت. طبقه‌بندی روشهای مختلف تراکم پودر براساس توزیع فشار وارده بر پودر می‌باشد. بدین منظور پارامتری به نام "نرخ تراکم"^۱ به صورت زیر تعریف می‌شود (۱)

- ۱- روشهای تراکم دینامیکی تک‌محوری
- ۲- روشهای تراکم دینامیکی همگن

$$R_c = \sum_{i=1}^n (v_{i-1} - v_i) / v_i \cdot \Delta t$$

۱- روشهای تراکم دینامیکی تکمحوری

در این روش معمولاً "بار از یک جهت وارد می شود" روشهای تراکم دینامیکی تکمحوری، عمدتاً "عبارتند از:

۱-۲ تراکم تکمحوری بادی - مکانیکی

در این روش، نرخ تراکم بین $10/sec$ تا $100/sec$ است، در آن از انبساط ناگهانی یک گاز در فشار بالا استفاده شده، و سمبه را با سرعت زیاد به حرکت درمی آورند. برخورد سمبه به ستون پودر باعث تراکم آن می شود. (۱)

۱-۲ تراکم تکمحوری مغناطیسی

در تراکم تکمحوری مغناطیسی نرخ تراکم بین $20/sec$ تا $100/sec$ می باشد. در این روش برای سرعت دادن به سمبه از یک کویل استفاده می شود تخلیه یک خازن با ظرفیت زیاد در مسیر کویل باعث ایجاد میدان مغناطیسی شدید و حرکت دادن سمبه می گردد.

۱-۳ تراکم تکمحوری بالستیک

نرخ تراکم در این روش زیاد است و بین $200/sec$ تا $500/sec$ می باشد. عامل حرکت سمبه در این روش، انفجار شیمیائی است. با این روش توانستند پودر تیتانیم را تا ۹۵% دانسیته تئوری آن متراکم کنند (۲) معمولاً برای کنترل ساده تر، از انفجارهای ضعیف استفاده می کنند، ولی با وجود این، از جمله نقایص این روش می توان شکست قالب در اثر پدیده اسپالینگ آن، را نام برد.

۱-۴ تراکم تکمحوری انفجاری

نرخ تراکم در این روش بیش از روشهای ذکر شده فوق است و بین $1000/sec$ تا $10000/sec$ می باشد در این روش، انفجار مواد شیمیائی، مستقیماً "یک صفحه را با سرعت زیاد به حرکت درآورده، و برخورد صفحه با ستون پودر باعث تراکم آن می شود.

۲- تراکم دینامیکی همگن

واژه تراکم دینامیکی همگن به روشهایی از تراکم پودر اطلاق می شود که در آن ضربه فشاری به طور ناگهانی به تمام سطوح خارجی پودر وارد می گردد. از جمله روشهای تراکم دینامیکی همگن، می توان روشهای زیر را نام برد:

۱-۲ تراکم دینامیکی همگن با استفاده از مخزنی که تحت ضربه قرار می گیرد

در این روش نرخ تراکم بین $10/sec$ تا $100/sec$ است. در این حالت پودر را داخل یک ظرف قرار داده و آن را داخل یک مخزن هیدرولیکی نگه می دارند. با انفجار یک ماده شیمیائی، پیستون روی مایع فشار وارد آورده، و پودر با فشار هیدرواستاتیکی که از همه طرف به آن وارد می شود، متراکم می گردد. از این روش برای تولید قطعات آلایز تیتانیوم (۱) و پودر آهن احیاء شده (۳) استفاده شده است.

۲-۲ تراکم ایزودینامیکی مغناطیسی

نرخ تراکم در این روش بین $20/sec$ تا $100/sec$ می باشد. عامل ایجاد فشار تراکم در این روش، مشابه تراکم تکمحوری مغناطیسی

است، با این اختلاف که در این روش کویل دور ستون پودر قرار گرفته، و فشار از اطراف به ستون پودر وارد می آید. در ضمن با ثابت نگهداشتن دو انتهای ستون پودر، عملاً "فشار از همه طرف به آن وارد می شود.

۳-۲ تراکم ایزودینامیکی انفجاری

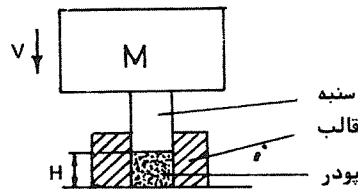
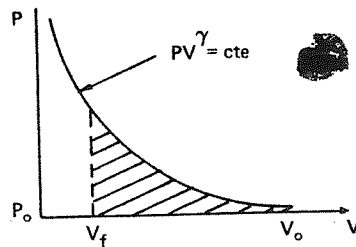
نرخ تراکم در این روش مثل روش تراکم تکمحوری انفجاری زیاد است و بین $100/sec$ تا $10000/sec$ می باشد. در این روش مواد منفجره در همه طرف ستون پودر قرار گرفته، و پس از انفجار ستون پودر متراکم می گردد.

تراکم پودر به وسیله سقوط وزنه

برای حالت تراکم شبه استاتیک^۳، رفتار پودر را در محدوده الاستیک می توان مشابه رفتار گازهای کامل در شرایط آدیاباتیکی فرض کرد (۴)، در نتیجه:

$$P \cdot v^\gamma = Cte \quad (1)$$

که در آن P فشار، v حجم و γ ضریب ثابت است. در روش سقوط وزنه، وزنه M با سرعت v به سمبه برخورد کرده و باعث تراکم ستون پودر می شود، شکل (۱) معادله حرکت وزنه برای فشردن پودر در محفظه ای با سطح مقطع A به صورت زیر است:



شکل ۱

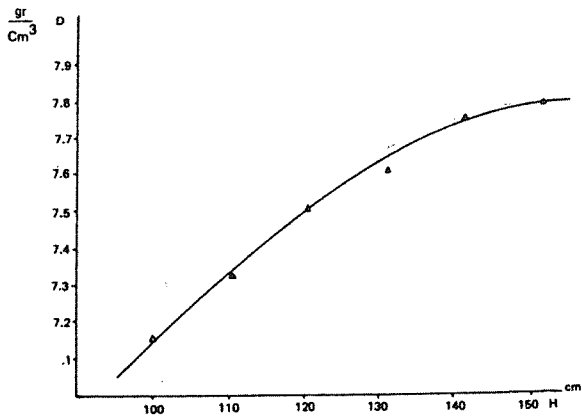
$$M \frac{dv}{dt} = -PA \quad (2)$$

که در آن P فشار طی تراکم می باشد. با استفاده از شرایط اولیه، فشار اتمسفر و حجم ظاهری پودر نتیجه می شود،

$$M \frac{dv}{dr} = \frac{KA}{v^\gamma} \quad (3)$$

که در آن $K = P_0 V_0^\gamma = PV^\gamma = cte$ می باشد. با توجه به اینکه حجم پودر $V = AH$ بوده و رابطه تغییرات ارتفاع

و سرعت با رابطه $v = -\frac{dH}{dt}$ بیان می شود، خواهیم داشت:



شکل ۲- منحنی تغییرات دانسیته با افزایش ارتفاع سقوط وزنه

نتایج بدست آمده و بحث درباره نتایج:

۱- مقایسه نتایج بدست آمده از سقوط وزنه و نتایج استاتیک

هدف از این آزمایش، مقایسه خواص مکانیکی نمونه برنزی تراکم شده توسط روش "سقوط وزنه" و روش استاتیکی است. بدین منظور باید ارتفاع سقوط وزنه را مشخص نمود. برای تعیین ارتفاع سقوط وزنه، ابتدا کار انرژی مصرفی برای تراکم استاتیک پودر برنز را محاسبه می‌نمایم. این انرژی برابر سطح زیر منحنی "تغییر مکان - فشار" می‌باشد (۴). مقدار این انرژی برابر می‌شود با:

$$W = 26.7 \text{ kg}\cdot\text{m}$$

انرژی جنبشی حاصل از سقوط وزنه باعث تراکم پودر می‌گردد. این انرژی را برابر انرژی حاصل از کار استاتیکی تراکم پودر برنز قرار می‌دهیم:

$$W = \frac{1}{2} Mv^2$$

$$v = \sqrt{29H}$$

در نتیجه

$$MgH = W$$

$$H = \frac{W}{Mg} = \frac{26.7}{30} = 0.89 \text{ m}$$

بنابراین برای اینکه کار مصرفی در روش یکسان بوده، ارتفاع سقوط وزنه باید ۸۹ سانتیمتر باشد. برای اینکه کار حاصل از اصطکاک را نیز منظور کرده باشیم، ارتفاع را $H = 100 \text{ cm}$ در نظر می‌گیریم. در ضمن برای اینکه بتوانیم سختی دو نمونه را مقایسه کنیم، آنها را در کوره با اتمسفر محافظت ازت در 825 سانتیگراد سنتیره می‌نماییم (۵). نتایج در جدول (۱) نشان داده شده است.

$$\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dH} \quad (4)$$

در نتیجه با استفاده از رابطه (۴)، رابطه (۳) به صورت زیر درمی‌آید،

$$Mv \frac{dv}{dH} = \frac{KA^{1-\gamma}}{H^\gamma} \quad (5)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه (۵) و قرار دادن شرایط اولیه، $v = v_0$ وقتی $H = H_f$ است، نتیجه می‌شود،

$$\frac{1}{2} M (v_0^2 - v^2) = \frac{KA^{1-\gamma}}{1-\gamma} (H_0^{1-\gamma} - H^{1-\gamma}) \quad (6)$$

وقتی سرعت وزنه به صفر می‌رسد، $v = 0$ ، ارتفاع ستون پودر، $H = H_f$ (ارتفاع نهایی)، خواهد شد در نتیجه:

$$\frac{1}{2} Mv_0^2 = \frac{KA^{1-\gamma}}{1-\gamma} (H_0^{1-\gamma} - H_f^{1-\gamma}) = \frac{K(AH_0)^{1-\gamma}}{1-\gamma} [1 - (\frac{H_f}{H_0})^{1-\gamma}]$$

این رابطه را می‌توان برحسب حجم به صورت زیر نوشت:

$$\frac{1}{2} M'v_0^2 = \frac{KA^{1-\gamma}}{1-\gamma} [1 - (\frac{V_f}{V_0})^{1-\gamma}] \quad (7)$$

برای اینکه حداقل کاهش حجم به اندازه ۵۰ درصد باشد، سرعت لازم برابر می‌شود با:

$$v_0 = \left[\frac{2D_0V_0}{(1-\gamma)M} (1-2\gamma^{-1}) \right] \quad (8)$$

که در آن D_0 دانسیته اولیه پودر است. رابطه (۷) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{V_f}{V_0} = \frac{D_0}{D_f} = \left[1 - \frac{Mv_0^2(1-\gamma)}{2P_0V_0} \right]^{\frac{1}{1-\gamma}} \quad (9)$$

که در آن V_0 حجم اولیه، V_f حجم نهایی، و D_f دانسیته نهایی پودر می‌باشد.

برای رسیدن به دانسیته^۶ تئوری خواهیم داشت:

$$\frac{D_f}{D_0} = \left[1 - \frac{Mv_0^2(1-\gamma)}{2P_0V_0} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} = \left[1 + \frac{M'v_0^2(\gamma-1)}{2P_0V_0} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (10)$$

تجهیزات مورد استفاده:
۱- دستگاه سقوط وزنه

این دستگاه شامل وزنه‌ای به وزن تقریبی ۳۰ kg می‌باشد، که می‌تواند از ارتفاعات مختلف تا حداکثر ۳ متر رها شود. این دستگاه مجهز به نگهدارنده وزنه و رهاکننده است، شکل (۲)

۲- قالب (۴)

۳- وسایل اندازه‌گیری ابعاد قطعه

۴- الک برای دانه‌بندی پودر

۵- کوره الکتریکی با کنترل دیجیتال و اتمسفر حافظ

۶- دستگاه خمش اینسترون

پودر مورد آزمایش

برنز تجارتي

| نوع نمونه (تراکم) | درجه حرارت سینتریگ °C | دانسیته $\frac{gr}{Cm^3}$ | بار حد گسیختگی N | سختی ویکرز |
|-------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|------------|
| استاتیکی | ۸۲۰ | ۷/۵ | ۴۹۴ | ۷۳ |
| دینامیکی | ۸۲۰ | ۷/۴ | ۵۰۰ | ۶۹ |

با مقایسه نتایج به دست آمده، جدول (۱)، مشاهده می‌گردد که خواص مکانیکی نمونه‌های برنزی در دو حالت تقریباً یکسان است.

۲- آزمایش سقوط وزنه برای انتخاب ارتفاع مناسب جهت افزایش دانسیته قطعه

با افزایش ارتفاع سقوط وزنه، انرژی تراکم پودر بیشتر شده و دانسیته بالاتری بدست خواهد آمد. بدین منظور آزمایش تراکم در چند ارتفاع انجام شده و بهترین ارتفاع برای رسیدن به دانسیته مطلوب انتخاب گردیده است. علاوه بر دانسیته، بار حد گسیختگی نمونه‌های خام نیز با استفاده از آزمایش خمش مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج در جدول (۲) آورده شده است. در ضمن تغییرات دانسیته نسبت به ارتفاع سقوط وزنه، و تغییرات بار حد گسیختگی نسبت به ارتفاع سقوط وزنه در شکلهای (۲) و (۳) نشان داده شده است.

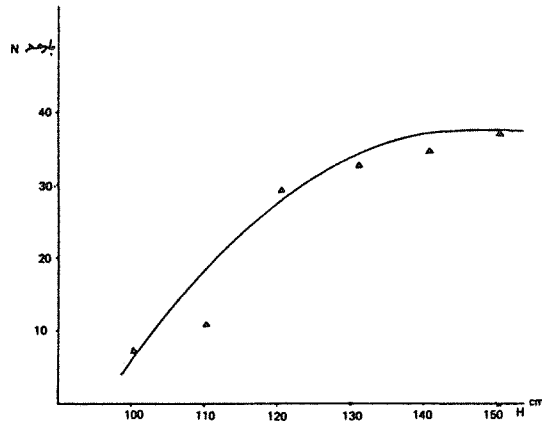
جدول ۲

| میزان جذب انرژی Kg - m | بار حد گسیختگی در حالت خام N | دانسیته نسبی % | دانسیته $\frac{gr}{Cm^3}$ | ارتفاع سقوط وزنه cm |
|------------------------|------------------------------|----------------|---------------------------|---------------------|
| ۳۰ | ۷/۹۵ | %۸۲ | ۷/۱۵ | ۱۰۰ |
| ۳۲ | ۹/۸۱ | %۸۵ | ۷/۳۳ | ۱۱۰ |
| ۳۶ | ۳۰/۶ | %۸۷ | ۷/۵۲ | ۱۲۰ |
| ۳۹ | ۳۳ | %۸۹ | ۷/۶۳ | ۱۳۰ |
| ۴۲ | ۳۶/۹ | %۹۰ | ۷/۷۸ | ۱۴۰ |
| ۴۵ | ۳۷ | %۹۰ | ۷/۷۸ | ۱۵۰ |

به طوری که از نتایج جدول (۲) و شکلهای (۲) و (۳) پیداست با تغییر ارتفاع سقوط وزنه، در ابتدا تغییرات دانسیته و بار حد گسیختگی زیاد است، و در ارتفاع حدود ۱۴۰ cm این دو به حد اپتیمم خود می‌رسند. طبیعی است که با ازدیاد ارتفاع (بیشتر از ۱۴۰ cm) مشخصات مکانیکی بالاتری می‌توان به دست آورد، ولی این تغییرات بسیار کم است. در ضمن در این ارتفاع، طول نمونه خام به دست آمده حدود ۳۰ cm می‌باشد. بدین ترتیب با توجه به نسبت:

$$\frac{\text{ارتفاع سقوط وزنه}}{\text{طول نهائی نمونه}} = \frac{۱۴۰}{۳۵} = ۴$$

می‌توان برای رسیدن به طول مشخصی از نمونه، ارتفاع تقریبی سقوط وزنه را تعیین نمود.



شکل ۳- منحنی تغییرات بار حد گسیختگی با افزایش ارتفاع سقوط وزنه

۳- انتخاب نسبت طول به قطر نمونه، برای رسیدن به توزیع دانسیته مطلوب

نتایج حاصل از سنتریگ نمونه‌های ساخته شده به روش سقوط وزنه نشان می‌دهد که دانسیته در وسط نمونه کمتر از دو انتهای آن است.

در نتیجه برای رسیدن به توزیع دانسیته تقریباً یکنواخت، نسبت طول به قطر نمونه نباید از مقدار معین بیشتر باشد. برای به دست آوردن نسبت طول به قطر مناسب، نمونه‌هایی با وزنهای مختلف را با پرتاب وزنه از ارتفاعات متفاوت ساخته و سنتیره می‌کنیم. نتایج بدست آمده در جدول (۳) آورده شده است.

با توجه به نتایج جدول (۳)، مشاهده می‌گردد که با کاهش نسبت طول نمونه به قطر آن امکان بالا رفتن دانسیته تا ۹۶% دانسیته تئوری وجود دارد، نمونه (۲) پس از سنتریگ نمونه‌ها، مشاهده گردید که، وقتی نسبت طول به قطر نمونه‌ها کمتر از ۳ است، توزیع دانسیته یکنواخت بوده و در نتیجه این نسبت می‌تواند معیاری برای ساخت قطعات برنزی باشد.

جدول ۳

| شماره نمونه | ارتفاع سقوط وزنه H cm | طول نمونه h cm | وزن نمونه gr | دانسیته $\frac{gr}{Cm^3}$ | نسبت طول به قطر |
|-------------|-----------------------|----------------|--------------|---------------------------|-----------------|
| ۱ | ۸۵ | ۰/۹۸ | ۴ | ۸/۱ | ۱/۲۲ |
| ۲ | ۱۰۰ | ۱/۴۴ | ۶ | ۸/۲۸ | ۱/۸ |
| ۳ | ۱۱۰ | ۱/۹۵ | ۸ | ۸/۱۶ | ۲/۴۷ |
| ۴ | ۱۲۰ | ۲/۴۶ | ۱۰ | ۸/۰۸ | ۳/۰۷ |
| ۵ | ۱۲۰ | ۳/۰۸ | ۱۲ | ۷/۷۵ | ۳/۸۵ |
| ۶ | ۱۴۰ | ۳/۹ | ۱۴ | ۷/۱۵ | ۴/۸۷ |

1. Rate of Compaction
2. Spalling
3. quasi – Static

منابع :

1. S.clyens and W.Johnson, "Dynamic Compaction of powdered material" Ap. 1977
2. E.W. Larocca and J.Person, Rev. Sci'.Instrum, 1958
3. O.V. Roman, T.K. Garkavaya, and S. Basu, 1st Int. conf
Compaction and consolidation of particular matter", powder
advisory center, London, 1972.

۴. شاکری - محمود، صادقی - محمدعلی، داغیانلی - حمیدرضا،
"بررسی اثر فشار تراکم و دانه بندی بر روی خواص مکانیکی
قطعات منالورژی پودرهای فلزی"، مجله امیرکبیر، شماره ۱۴

