

مقدمه‌ای بر آسیاب‌های مکانیکی

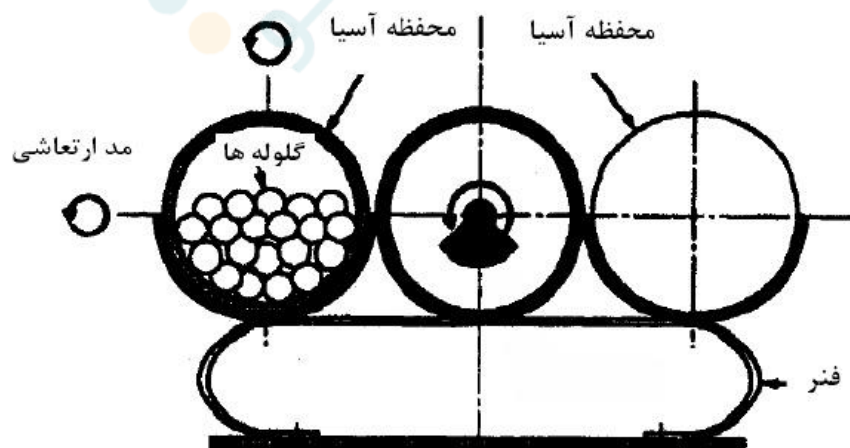
آسیابکاری از روش‌های قدیمی و متداول برای تهیه پودر است که قابلیت استفاده در عملیات آلیاژسازی مکانیکی را نیز دارد. ابزار مورد استفاده در این روش معمولاً آسیاب‌های گلوله‌ای هستند. به طور کلی انواع مختلفی از آسیاب‌ها وجود دارند، که از لحاظ ظرفیت، بازدهی و تجهیزات اضافی جهت جهت گرم و سرد کردن با یکدیگر تفاوت دارند. در فرایند تولید مواد با استفاده از این روش، خواص و کیفیت کار، ارتباط مستقیمی با تجهیزات و شرایط آسیابکاری دارد. بنابراین انتخاب نوع آسیاب و آگاهی از ویژگی‌های مربوط به آن از اولین مراحل یک فرآیند آسیابکاری محسوب می‌گردد. این موضوع بیانگر اهمیت مطالعه و شناسایی انواع آسیاب‌های موجود و قابلیت‌های آنها در فرآوری مواد می‌باشد. در این مقاله انواع آسیاب‌های مورد استفاده در مراکز تحقیقاتی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱- مقدمه

یکی از مهمترین روش‌های فرآوری مواد پودری روش آسیابکاری می‌باشد، که کاربردهای فراوانی نیز در صنایع مختلف پیدا کرده است. با استفاده از این دستگاه‌ها می‌توان علاوه بر آسیابکاری فرآیندهای دیگر نظیر آلیاژسازی مکانیکی را نیز انجام داد. در این مقاله روش‌های مختلف آسیابکاری و مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای آن‌ها بررسی خواهد شد.

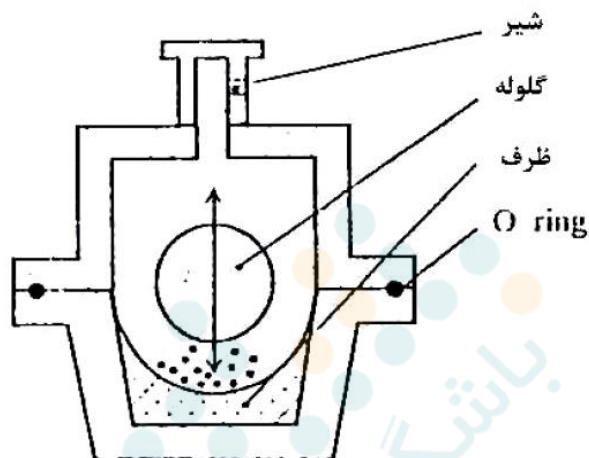
۲- آسیاب گلوله‌ای - ارتعاشی (Vibratory Ball Mill)

یکی از انواع آسیاب‌های پراورشی، آسیاب گلوله‌ای - ارتعاشی است. حجم محفظه در این نوع آسیاب بسیار کم (۱۰ میلی‌لیتر) بوده و محتویات آن (پودر و گلوله) در سه جهت عمود بر هم با سرعت بسیار بالا، حدود 1200 rpm، نوسان می‌کنند. شکل ۱ به صورت شماتیک نحوه کار این نوع آسیاب را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نحوه کار آسیاب گلوله‌ای - ارتعاشی و اجزای آن.

نوع دیگری از آسیاب‌های گلوله‌ای- ارتعاشی دارای یک محفظه از جنس فولاد زنگ‌نزن و یک گلوله فولادی سخت شده است. همچنین قسمت تحتانی این محفظه از جنس فولاد سخت شده است (شکل ۲). از این نوع آسیاب بیشتر برای آلیاژسازی مکانیکی فلزات فعال مانند عناصر خاکی کمیاب استفاده می‌شود. جهت جلوگیری از آلودگی ذرات پودر با اتمسفر هوا از خلاء 10^{-6} تور استفاده می‌گردد.



شکل ۲- شماتیک عملکرد آسیاب گلوله‌ای - ارتعاشی با یک گلوله.

آسیاب SPEX8000 معروف‌ترین آسیاب گلوله‌ای- ارتعاشی مورد استفاده در تحقیقات آزمایشگاهی است که به طور معمول ظرفیت تا ۲۰ گرم پودر در هر دوره آسیاب‌کاری را دارد. این نوع آسیاب معمولاً شامل یک محفظه حاوی نمونه و گلوله است که در یک گیره قرار گرفته و این مجموعه تقریباً ۱۰۰ بار در دقیقه به جلو و عقب حرکت می‌کند. همزمان با حرکت جلو و عقب این مجموعه، انتهای محفظه نیز دارای حرکت جانبی است. حرکت محفظه سبب برخورد ذرات پودر و گلوله‌ها شده و در نهایت آسیاب‌کاری و مخلوط شدن صورت می‌گیرد. به علت دامنه حرکتی در حدود ۵ سانتی‌متر و سرعت چرخشی ۱۲۰۰ دور در دقیقه، سرعت خطی گلوله‌ها بالا (در حدود ۵ متر بر ثانیه) و انرژی ناشی از برخورد گلوله‌ها بسیار زیاد است. بنابراین این نوع آسیاب در گروه آسیاب‌های پر انرژی قرار می‌گیرد.

در طراحی‌های جدید، به منظور افزایش ظرفیت این نوع آسیاب، به طور هم زمان از دو محفظه جهت آسیاب‌کاری پودر استفاده می‌شود. محفظه مورد استفاده در این آسیاب از جنس فولادهای سخت شده، اکسید آلومینیم، کاربید تنگستن، اکسید زیرکونیم، فولاد ضد زنگ، نیتريد سیلیکون، پلاستیک، عقیق (Agate) و متاکریلیت (Methacrylate) است. در شکل ۳ نمونه‌ای از آسیاب SPEX8000 و تجهیزات مربوط به آن نشان داده شده است.

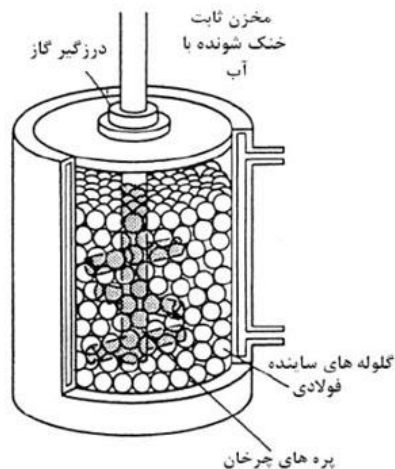


شکل ۳ -a- آسیاب نوع SPEX8000 و -b- محفظه کاربرد تنگستن به همراه گلوله و واشر جهت آب‌بندی آن.

نشان داده شده است که آسیاب‌کاری با آسیاب SPEX8000 به مدت ۲۰ دقیقه معادل با ۲۰ ساعت آسیاب‌کاری در یک آسیاب کم انرژی است. در نتیجه فرآیندی که در آسیاب SPEX8000 چند دقیقه به طول می‌انجامد در آسیاب ساینده چند ساعت و در آسیاب صنعتی افقی چندین روز به طول می‌انجامد.

۳- آسیاب‌های ساینده (Attritor Ball Mill)

آسیاب ساینده در سال ۱۹۲۲ به منظور دستیابی به توزیع همگن از گوگرد برای پخت لاستیک طراحی شد. این نوع آسیاب در شکل ۴ نشان داده شده است.



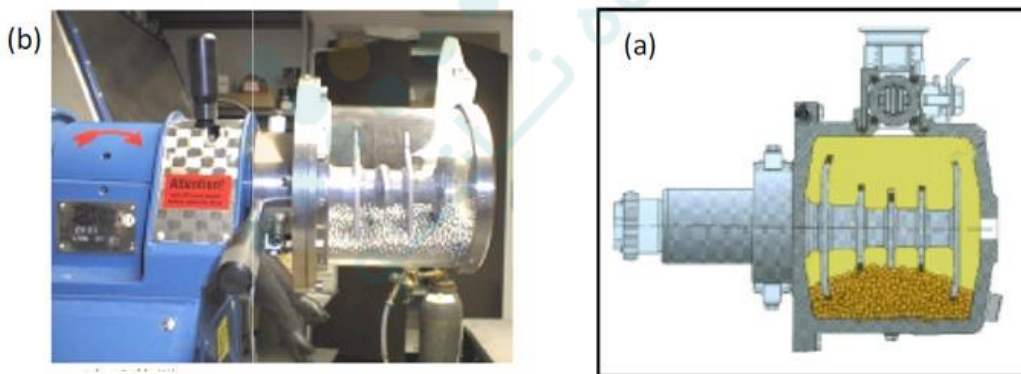
b

a

شکل ۴- آسیاب ساینده به همراه بخش‌های مختلف آن -a- شماتیک -b- نمونه واقعی.

همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، این آسیاب شامل یک محفظه و همزن است. همزن عمودی که تعدادی پره به آن متصل شده است، دارای حرکت دورانی است. حرکت پره‌ها انرژی لازم را به گلوله‌ها داده و کاهش اندازه ذرات پودر در اثر برخورد بین گلوله‌ها، گلوله و جداره محفظه، محور مرکزی و پره‌ها با گلوله‌ها رخ می‌دهد. سرعت دوران محور مرکزی این آسیاب حدود ۲۵۰ دور بر دقیقه (۴،۲ هرتز) است که در برخی موارد سرعت دوران به حدود ۵۰۰ دور در دقیقه نیز می‌رسد. ظرفیت این نوع آسیاب بین ۰،۵ تا ۴۰ کیلوگرم و برای فرآوری محدوده وسیعی از مواد از جمله ترکیبات بین‌فلزی، سرامیک‌ها، مواد غیر بلوری و کامپوزیت‌ها کاربرد دارد. جنس محفظه این نوع آسیاب معمولاً از فولاد زنگ‌نزن یا فولاد زنگ‌زنی است که با آلومینا، کاربید سیلیکون، نیتريد سیلیکون، زیرکونیا، لاستیک و پلی‌اورتان پوشش داده شده است. با استفاده از پمپ خلاء و یا وارد کردن جریان مداوم گاز آرگون مقدار آلودگی ناشی از اکسیژن در این نوع آسیاب‌ها کاهش می‌یابد. در ضمن با استفاده از محفظه‌های دو جداره و گردش آب در پوسته خارجی دمای محفظه نیز قابل کنترل است. حداکثر افزایش دما در این آسیاب‌ها در حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد است.

نوع دیگری از آسیاب‌های ساینده به صورت افقی طراحی شده‌اند. یک نمونه از این نوع آسیاب در شکل ۵ نشان داده شده است. از مزایای این نوع آسیاب می‌توان به حذف منطقه مرده به دلیل نیروی جاذبه، انرژی بالای برخورد و امکان کنترل محیط آسیاب اشاره نمود.



شکل ۵- a- شماتیکی از آسیاب ساینده افقی - b- شکل واقعی آسیاب ساینده افقی.

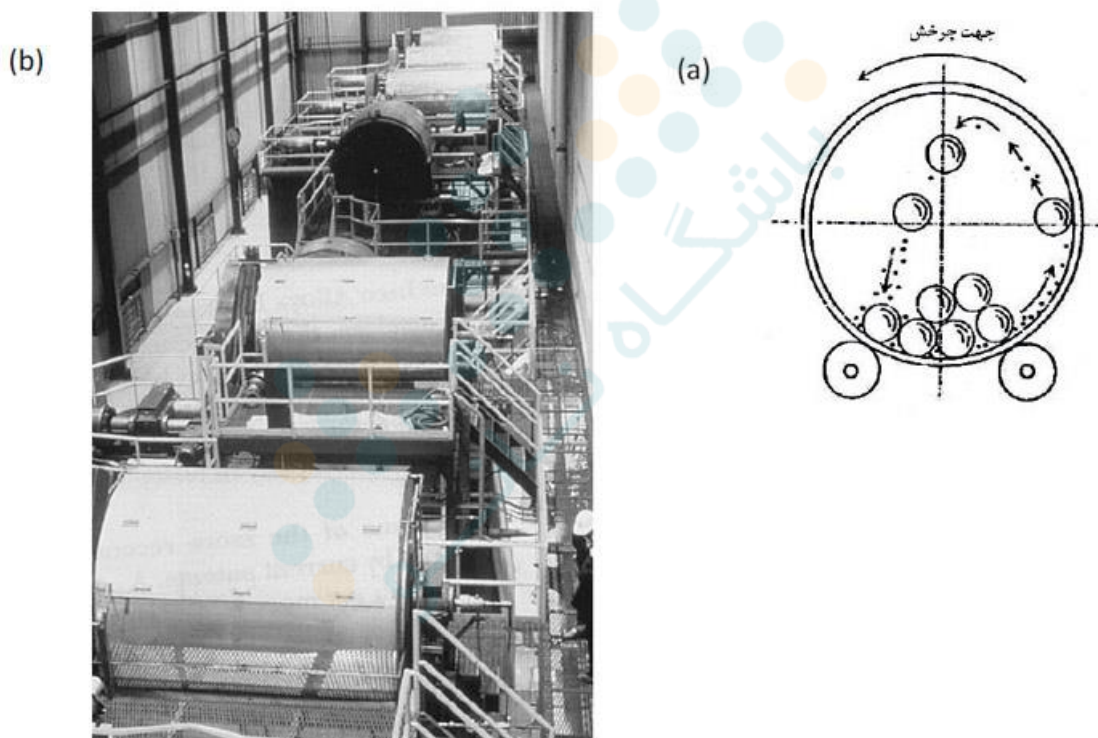
۴- آسیاب افقی غلتان (Tumbler Horizontal Mill)

۴-۱- آسیاب افقی گلوله‌ای غلتان (Tumbler Horizontal Ball Mill)

در این نوع آسیاب از گلوله‌های فولادی و یا کاربید تنگستن به عنوان اجزای ساینده استفاده می‌شود. ظرفیت این آسیاب‌ها به عوامل مختلفی نظیر نسبت طول به قطر آسیاب، سرعت چرخش آسیاب، اندازه گلوله‌ها و اندازه ذرات بستگی دارد. علی‌رغم اینکه استفاده از این نوع آسیاب‌های کم انرژی مدت زمان آسیاب‌کاری را طولانی می‌کند، اما پودر تهیه شده در این روش از همگنی و یکنواختی

بیشتری برخوردار است. علاوه بر این استفاده از این نوع آسیاب نیازمند هزینه کم‌تر، راه اندازی ساده‌تر و هزینه نگهداری کم‌تر می‌باشد.

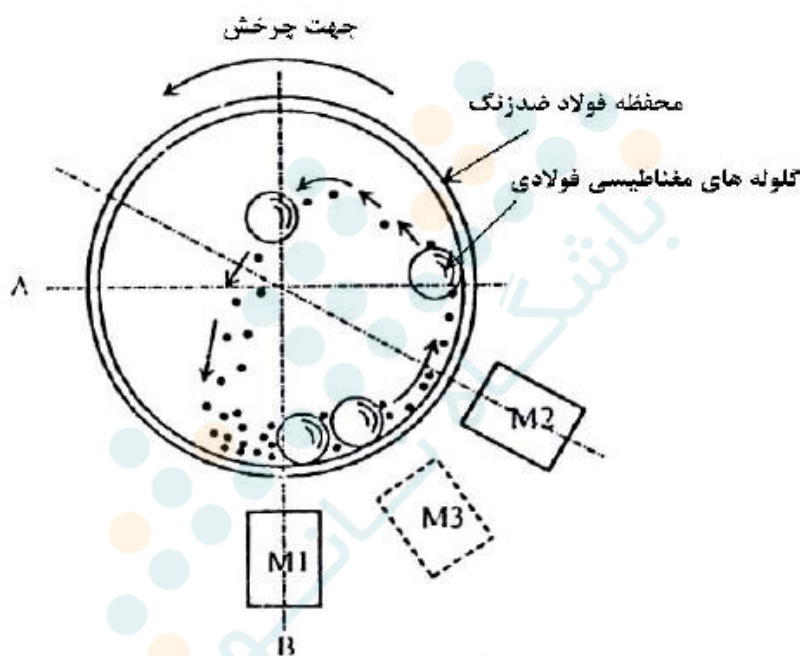
در این نوع آسیاب پس از قرارگیری پودر و گلوله در یک محفظه استوانه‌ای شکل، محفظه حول محور مرکزی خود دوران می‌کند. معمولاً قطر محفظه بیشتر از ۱ متر است. هم‌زمان با دوران محفظه، گلوله‌ها به ذرات پودر برخورد کرده و آنها را خرد می‌کنند. با افزایش سرعت دوران نرخ آسیاب‌کاری هم افزایش می‌یابد. اما در سرعت‌های بالا نیروی گریز از مرکز وارد بر گلوله‌ها بر نیروی وزن آنها غلبه کرده و لذا گلوله‌ها به جداره محفظه چسبیده و فرآیند آسیابکاری متوقف می‌شود. شماتیک عملکرد این آسیاب و نمونه صنعتی آن در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶ -a- شماتیک عملکرد آسیاب افقی گلوله‌ای غلتان -b- نمونه‌ای از این نوع آسیاب در ابعاد صنعتی.

این نوع آسیاب برای آلیاژسازی حجم زیادی از پودر به کار می‌رود. بنابراین برای آسیاب‌کاری در مقیاس آزمایشگاهی مناسب نیست. آسیاب‌های صنعتی مورد استفاده در آلیاژسازی مکانیکی از لحاظ اندازه بسیار بزرگ بوده و در هر نوبت کاری صدها کیلوگرم پودر را آسیاب می‌کنند) شکل ۶. (b- ظرفیت این نوع آسیاب بالا و در حدود ۱۲۵۰ کیلوگرم است.

از اصلاحات صورت گرفته روی این نوع آسیاب، استفاده از میدان‌های مغناطیسی جهت کنترل حرکت گلوله‌ها می‌باشد. این مورد در شکل ۷ به صورت شماتیک نشان داده شده است. بسته به فاصله آهن‌رباها و گلوله‌ها، انرژی ضربه ناشی از برخورد قابل کنترل بوده و برای هر نوع ماده یک انرژی مشخص انتخاب می‌شود. در این صورت با یک میدان مغناطیسی تنظیم شده جرم موثر گلوله‌ها، تا حدود ۸۰ برابر افزایش می‌یابد. بر اساس موقعیت آهن‌رباها، بزرگی میدان مغناطیسی و در نتیجه میزان انرژی منتقل شده به ذرات پودر تغییر می‌کند. مطابق شکل، انرژی اصطکاکی توسط تغییر شدت میدان آهن‌ربای M1 عوض می‌شود. در حالی که آهن‌ربای M2 جهت افزایش انرژی جنبشی گلوله‌ها به کار می‌رود. حالت پر انرژی برای آسیاب با انتخاب مکان مناسب این آهن‌رباها حاصل می‌شود. برای ایجاد حالت کم انرژی موقعیت M3 مناسب است.



شکل ۷- طراحی جدید اعمال شده روی آسیاب افقی و محل قرارگیری آهن‌رباها در آسیاب افقی.

به دلیل سرعت پایین این نوع آسیاب، گرمای ناچیزی حین آسیاب‌کاری تولید می‌شود. این مساله در آلیاژسازی مواد غیربلوری و واکنش‌های با گرمایی بالا دارای اهمیت است. علاوه بر این سرعت پایین اجزاء، امکان کنترل فشار) از خلاء تا فشار ۵۰۰ KPa و دما (از دمای محیط تا ۴۷۳ کلوین) را فراهم می‌کند.

۲-۴- آسیابی میله‌ای غلتان (Tumbler Rod Mill)

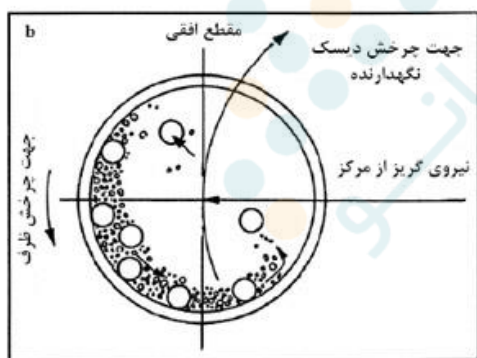
بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که معمولاً پودر تهیه شده با آلیاژسازی مکانیکی به وسیله آهن آلوده می‌شود. در سال ۱۹۹۰ الاسکندرانی (El-Eskandarany) و همکارانش از آسیابی شامل استوانه‌ای از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ و ۱۰ میله از همین جنس

برای آسیاب کاری استفاده کردند. به منظور جلوگیری از گیر کردن کردن میله‌ها به یکدیگر، در استوانه‌ای با طول ۲۵۰ میلی‌متر، از میله‌هایی به طول ۲۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۲۰ میلی‌متر استفاده شد.

۵- آسیاب سیاره‌ای (Planetary Mill)

یکی دیگر از آسیاب‌های مورد استفاده در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی، آسیاب سیاره‌ای است که در آن تنها چند صد گرم پودر در یک مرحله آسیاب می‌شود و برای تحقیقات آزمایشگاهی مناسب است. حجم محفظه این نوع آسیاب بین ۴۵ تا ۵۰۰ میلی‌لیتر است. در شکل ۸ a- نمونه‌ای از این نوع آسیاب نشان داده شده است. این آسیاب شامل یک صفحه دوار به همراه چهار، دو و یا یک محفظه است.

در این آسیاب صفحه دوار در یک جهت چرخیده و محفظه بر اساس مکانیزمی در جهت خلاف حرکت صفحه دوار، حرکت دورانی انجام می‌دهد. چرخش محفظه و صفحه دوار به دور یک محور، باعث ایجاد نیروی گریز از مرکز می‌شود که بزرگی این نیرو می‌تواند تا ۲۰ برابر شتاب جاذبه زمین برسد. شماتیک حرکت گلوله‌ها و ذرات پودر در اثر اعمال این نیروی گریز از مرکز در شکل ۸ b- نشان داده شده است. بر اساس این شکل گلوله و پودر به صورت متناوب روی دیواره داخلی غلتیده و ساییده می‌شوند. سپس با سرعت زیادی (حدود 250 rpm) از جداره محفظه جدا و مجدداً به جداره روبرویی برخورد می‌کنند. در این حالت ذرات پودر تحت انرژی ضربه بالا به صورت مداوم جوش خورده و می‌شکنند.



شکل ۸ a- یک نمونه از آسیاب سیاره‌ای مجهز به چهار محفظه b- شماتیک عملکرد و نحوه حرکت اجزای آسیاب.

مزیت این نوع آسیاب‌های گلوله‌ای تنها انرژی ضربه بالا نیست، بلکه فرکانس بالای ضربه است که می‌تواند زمان فرآیند آسیاب‌سازی مکانیکی را کاهش دهد. باید توجه داشت که ضربات با فرکانس بالا می‌تواند باعث افزایش دمای محفظه تا دمای ۳۹۳ درجه کلوین طی مدت زمان ۳۰ تا ۶۰ دقیقه شود. لازم به ذکر است که در بعضی موارد دمای بالا جهت انجام واکنش ضروری است. در آسیاب سیاره‌ای سرعت خطی گلوله‌ها بیشتر از آسیابهای SPEX8000 است، اما به علت بالاتر بودن فرکانس برخورد در آسیابی SPEX8000، آسیابی سیاره‌ای انرژی کم‌تری تولید می‌کند. همچنین انرژی ضربه گلوله‌های آسیاب با تغییر سرعت گردش صفحه دوار، تغییر می‌کند.

از مواد مختلفی برای تهیه محفظه آسیاب استفاده می‌شود که معمول‌ترین آنها فولاد کروم سخت شده، فولاد زنگ نزن، کاربید تنگستن و محفظه‌های سرامیکی از جنس کوراندوم، نیتريد سیلیسیم و اکسید زیرکونیوم هستند. در آسیاب‌سازی مکانیکی با انرژی بالا محفظه‌های فولادی مناسب هستند، زیرا محفظه‌های سرامیکی به علت تردی باعث آلودگی ناشی از ایجاد تراشه‌های ریز یا ذرات شکسته شده با گلوله‌ها می‌شوند. به طور کلی در آسیاب‌سازی مکانیکی محفظه و گلوله‌ها از یک جنس انتخاب می‌شوند. در جدول ۱ خواص سایشی، سختی و چگالی مواد انتخاب شده برای محفظه و گلوله به طور خلاصه آمده است.

جدول ۱- خلاصه‌ای از خواص مواد مورد استفاده در تهیه محفظه و گلوله در آسیاب سیاره‌ای.

ماده	رفتار سایشی	سختی	چگالی (gr/cm ³)
عقیق (99.9%SiO ₂)	مقاومت به سایش خوب	۶/۵-۷Mohs	۲/۶۵
*اکسید زیرکونیوم (94%ZrO ₂)	مقاومت به سایش بسیار خوب	۱۰۰۰HV	۵/۷
کوراندوم زینتر شده (Al ₂ O ₃)	مقاومت به سایش نسبتاً خوب	۱۵۰۰HV	۴/۰
نیتريد سیلیسیم (91%Si ₃ N ₄)	مقاومت به سایش عالی	۱۵۵۰HV	۳/۱
فولاد سخت شده	مقاومت به سایش خوب	۶۰HRC	۷/۹
فولادهای سخت شده با کروم	مقاومت به سایش خوب	۶۰HRC	۷/۹
فولاد زنگ‌نزن (Cr-Ni)	مقاومت به سایش نسبتاً خوب	۳۰HRC	۷/۹
کاربید تنگستن به همراه کبالت (94%WC+6%Co)	مقاومت بسیار خوب	۱۶۲۰HV30	۱۴/۷۵

* لازم به ذکر است محفظه و گلوله از جنس اکسید زیرکونیوم در برابر اسیدها به جز اسید هیدروفلئوریک مقاوم است.

به علت آنکه انتخاب بهینه تعداد گلوله‌های قابل استفاده بر اساس حجم محفظه صورت می‌گیرد، در جدول ۲ تعداد گلوله‌های پیشنهادی نسبت به حجم ظرف آورده شده است.

جدول ۲- تعداد گلوله‌های پیشنهادی به ازای حجم محفظه آسیاب.

حجم ظرف (میلی لیتر)	۸۰	۲۵۰	۵۰۰
ابعاد گلوله (میلی متر)			
۵	۲۵۰	۱۲۰۰	۲۰۰۰
۱۰	۳۰	۵۰	۱۰۰
۱۵	۱۰	۴۵	۷۰
۲۰	۵	۱۵	۲۵
۳۰	-	۶	۱۰
۴۰	-	-	۴

مقادیری که در جدول ۲ به آنها اشاره شده است در واقع حداقل مقادیر هستند و بسته به خواص ماده تحت آسیابکاری امکان افزایش این مقادیر وجود دارد.

معمولا جنس گلوله و محفظه به صورت یکسان انتخاب می‌شود. برای افزایش انرژی ضربه بدون افزایش سرعت چرخش و کاهش مدت زمان آسیابکاری، استفاده از گلوله‌های بزرگ‌تر و یا با چگالی بالاتر پیشنهاد شده است. در این بین مواد اکسیدی کم‌ترین چگالی و کاربرد تنگستن بیش‌ترین چگالی را دارند. از این رو، به ازای سرعت چرخش و اندازه گلوله یکسان، گلوله‌های اکسیدی کم‌ترین انرژی برخورد را تولید می‌کنند. به عنوان مثال می‌توان از گلوله کاربرد تنگستن در محفظه فولادی و یا گلوله اکسید زیرکونیم در محفظه نیتريد سیلیسیم استفاده نمود. علاوه بر این میزان پر کردن محفظه نیز از جمله عوامل موثر بر راندمان آسیابکاری است. مقادیر توصیه شده بر اساس ظرفیت محفظه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مقدار بهینه پر کردن محفظه آسیابکاری.

حجم محفظه (میلی لیتر)	حداقل ظرفیت (میلی لیتر)	حداکثر ظرفیت (میلی لیتر)
۵۰۰	۸۰	۲۲۵
۲۵۰	۳۰	۱۲۵
۸۰	۱	۳۰

۶- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر آسیاب‌های مورد استفاده در فرآیند آلیاژسازی مکانیکی و آسیابکاری پرداخته شد. این آسیاب‌ها شامل آسیاب گلوله‌ای- ارتعاشی، آسیاب ساینده، آسیاب افقی غلتان و آسیاب سیاره‌ای می‌باشند. با توجه به مطالب عنوان شده این نوع آلیاژها به دو دسته کلی آسیاب پرنرژی و کم انرژی تقسیم می‌شوند و بسته به نوع ماده، میزان ماده و حساسیت کار می‌توان از آنها استفاده نمود.

منابع و مراجع

- ۱- ابوالقاسم عطائی، سعید شیبانی، غلامرضا خیاطی، سعید اسدی کوهنجان، آلیاژسازی و فعال سازی مکانیکی، فناوری تهیه نانومواد، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد تهران.

