

روش منطقه مذاب یا ذوب منطقه‌ای در تخلیص فلزات

نوشته :

افسر سیار

استادیار گروه متالورژی دانشکده فنی

پیش‌گفتار :

ناخالصی‌های موجود در فلزات حتی اگر بمقدار کم هم باشند بر روی نقائص فلزی اثر کرده خواص آنها را پنهان می‌کند. قابلیت هدایت الکتریکی و خاصیت جذب نوترونی نیز نسبت بنا خالصی‌های بینهایت حساس است. بهمین جهت برای بررسی دقیق خواص واقعی فلزات بایستی فلز بینهایت خالصی در اختیار داشت.

روش الکترولیز مضاعف فلزی می‌دهد که خلوص آن برای بررسی‌های معمولی کافی است و از قدیم از آن استفاده شده است ولی در سال ۱۹۵۲ پفان (Pfann) برای خالص کردن نیمه فلز ژرمانیوم از روش جدیدی بنام روش «منطقه مذاب» استفاده کرد و فلزی را تهیه نمود که بینهایت خالص (Sb و As و P) آن حدود 10^{-8} و دارای خواص الکتریکی بسیار جالبی می‌باشد.

از بیست سال قبل تاکنون این روش را در مورد بسیاری از فلزات بکار برده‌اند و اغلب نیز نتایج آن ثمر بخش بوده است. مثلاً توانسته‌اند بر روی آلومینیوم حاصل از ذوب قسمتی بررسی‌های جالبی بمنظور شناختن نقائص شبکه بلوری بعمل آورند. همچنین آهن حاصل از ذوب منطقه‌ای را بمنظور شناختن نقطه تغییر شکل $\alpha \rightarrow \gamma$ ، خواص نایبجائی‌ها، خواص مغناطیسی و پیر شدن مورد بررسی قرار داده‌اند.

مسلماً اندازه‌گیری ناخالصی نهائی این روش که مقدار آن بسیار کم و در حدود قسمت در میلیون (p.p.m.) است احتیاج به روشهای تجزیه بسیار دقیق و حساس دارد و برای این منظور از تجزیه بروش آکتیو کردن و اندازه‌گیری مقاومت مخصوص الکتریکی در درجه حرارت پائین (ازت مسایع، هلیوم مسایع و غیره) استفاده می‌شود.

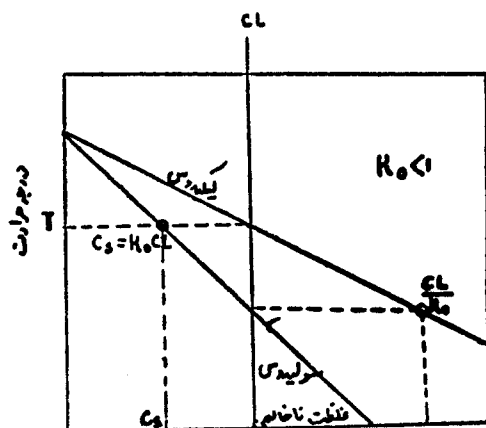
در این مبحث ابتدا اصول روش منطقه مذاب و سپس مثالهایی را در مورد فلزات مختلف خواهیم دید.

قسمت اول - اصول روش منطقه مذاب یا ذوب منطقه‌ای

اصول روش منطقه مذاب یا ذوب منطقه‌ای بر این خاصیت قرار دارد که اگر قسمتی از یک میله فلزی را در اثر حرارت بحالت مذاب در آورند و سپس با جابجا کردن آهسته میله فلزی و یا منبع گرما منطقه مذاب را در طول میله جابجا کنند ناخالصی‌هایی که در اثر اضافه شدن به فلز اصلی نقطه ذوب آنرا کمتر می‌کنند (مثلاً با تشکیل اوتکتیک) همراه منطقه مذاب باخر میله برده می‌شوند و بعکس ناخالصی‌هایی که اضافه شدن آنها به فلز نقطه ذوب آنرا بالا می‌برد در طول مسیر بجای میمانند و در نتیجه این دو دسته ناخالصی در دو انتهای مختلف میله جمع شده وسط میله خالص می‌گردد. برای اینکه ناخالصی‌ها کاملاً جدا گردند بایستی این عمل ذوب و جابجا کردن را چندین بار و همواره در یک جهت تکرار نمایند و گاهی این عمل را تا ۱۰ بار نیز تکرار می‌کنند. برای اینکه چگونگی جدا شدن ناخالصی‌ها از فلز روشن گردد دیاگرام تعادل فلز و ناخالصی را در دو حالت اصلی بررسی می‌کنیم:

۱- ناخالصی نقطه ذوب فلز اولیه را پائین می‌برد.

محلولی که دارای C_L از ناخالصی باشد در قسمت بالای لیکیدوس کاملاً مایع است. هنگام



شکل ۱- دیاگرام تعادل آلیاژ دوتائی (فلز و ناخالصی) در حالتی که ناخالصی نقطه ذوب فلز خالص را پائین می‌برد.

سرد شدن، زمانی که بدرجه حرارت T که بلافاصله زیر لیکیدوس است برسد، انجماد شروع می‌شود. اولین ذره جامدی که تشکیل می‌شود بلوری از فلز اولیه است که محتوی C_0 از ناخالصی می‌باشد. ضریب

تجمع یا K_0 نسبت $\frac{C_s}{C_L}$ است و چون در اینجا $K_0 < 1$ است بنابراین غلظت ناخالصی در جامدی که تشکیل می‌شود کمتر از مایع باقی مانده است و در نتیجه ناخالصی از جامد بدون مایعی که با آن در تماس است وارد شده و همراه منطقه مذاب به پیش می‌رود و بالاخره غلظت ناخالصی در مایعی که در آخرین مرحله انجماد وجود دارد $\frac{C_L}{K_0}$ است. در شکل ۲ که توزیع ناخالصی نقره را در میله‌ای از قلع بعد از ۹ بار تکرار عمل ذوب منطقه‌ای نشان می‌دهد می‌بینیم که ناخالصی عملاً با انتهای مسیر برده شده است.

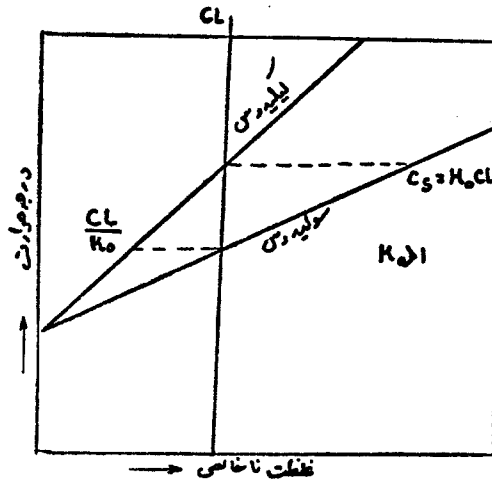


شکل ۲- تغییرات غلظت نقره در میله‌ای از قلع بر حسب فاصله از سر میله و بعد از ۹ بار تکرار عمل ذوب منطقه‌ای.

۲- ناخالصی درجه حرارت ذوب فلز را بالا می‌برد.

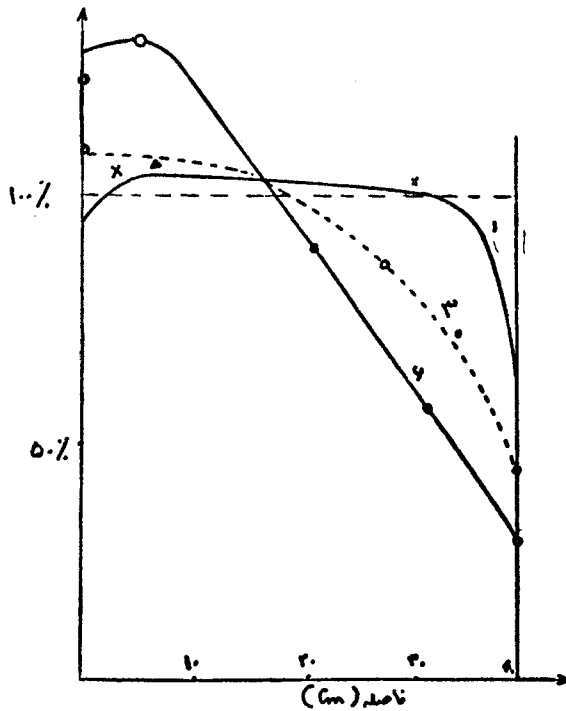
در این حالت که $K_0 > 1$ است غلظت ناخالصی در جامدی که در اولین لحظه انجماد تولید می‌شود $C_s = K_0 C_L$ و بیشتر از غلظت ناخالصی در فلز مذاب اولیه یا C_L می‌باشد. بعکس غلظت ناخالصی در مایعی که در مراحل آخر وجود دارد (یعنی $\frac{C_L}{K_0}$) کمتر از فلز اولیه است (شکل ۳). در این حالت ناخالصی در قسمت‌های اول میله (سر) بتدریج بجای می‌ماند و غلظت ناخالصی در قسمت مذاب بتدریج کمتر می‌شود. شکل ۴ منحنی توزیع ناخالصی آنتی‌مون را در طول میله‌ای از قلع بعد از چند بار تکرار عمل ذوب منطقه‌ای نشان می‌دهد و می‌بینیم که این ناخالصی بتدریج در سر میله بجای مانده است. ناخالصی‌های دسته اول را ناخالصی‌های «مستقیم» و ناخالصی‌های دسته دوم را ناخالصی‌های غیر مستقیم می‌نامند.

تبصره ۵- باید توجه داشت که حالت سومی نیز وجود دارد که در آن حالت افزایش ناخالصی درجه حرارت ذوب فلز را تغییر چندانی نمی‌دهد. در این حالت منحنی‌های سولیدوس و لیکیدوس محسوساً افقی



شکل ۳- دیاگرام آلیاژ دوتائی (فلز-ناخالصی) در حالتی که ناخالصی نقطه ذوب را بالا می برد.

هستند ($K_o=1$) و تخلیص بروش منطقه مذاب مؤثر نخواهد بود. چنین ناخالصی را بایستی قبلاً بروشهای دیگر حذف نمایند.



شکل ۴- توزیع ناخالصی آنتی موان در میله ای از قلع بعد از چند بار تکرار ذوب منطقه ای.

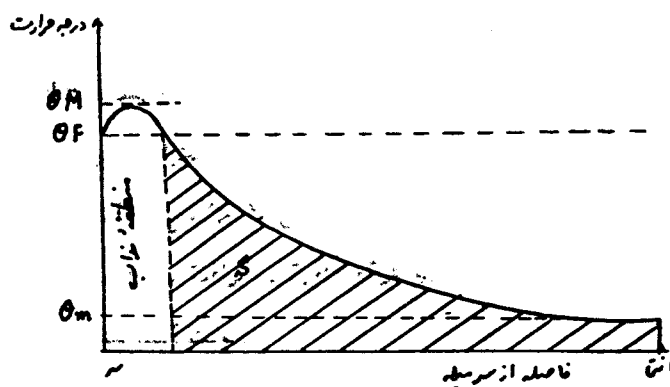
عوامل مؤثر در اجرای این روش - تأثیر این روش، برای یک ناخالصی معین، بستگی به ضریب تقسیم ناخالصی در فلز در حالت جامد و مایع، سرعت یکنواخت شدن در بطن منطقه مذاب، مقدار سرعت،

منظم بودن انتقال سطح مشترك انجماد و بالاخره ثابت بودن طول منطقه مذاب دارد. ضریب تقسیم ناخالصی در فلز ثابت است ولی عوامل دیگر تغییر پذیر می باشند.

- یکنواخت شدن اغلب فقط بکمک تحریک حرارتی که بستگی به درجه حرارت بطن منطقه مذاب دارد انجام می گیرد ولی اگر انتقال سریع باشد این تحریک حرارتی کافی نیست. در این حالت یا باید سرعت انتقال را کم کنند و یا اینکه با یک وسیله کمکی مثل تکان دهنده مکانیکی، میدان مغناطیسی و یا بالاخره ماوراء صوت (Ultra sons) بهم زدن منطقه مذاب را تسریع نمایند.

یکنواخت بودن سرعت انتقال فصل مشترك انجماد همچنین ثابت بودن طول منطقه مذاب از یک طرف به طرز کار وسیله مکانیکی که قسمت گرم کننده و یا میله را جابجا می کند و از طرف دیگر به جبران کامل تغییرات تشعشعی میله به هنگام جابجا شدن (توسط وسیله گرم کننده) بستگی دارد.

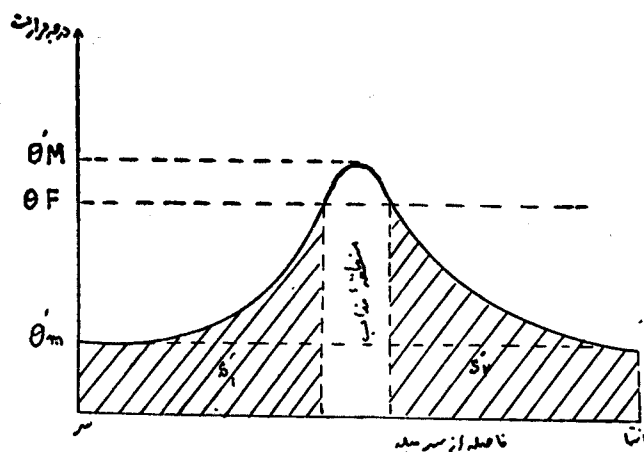
فرض می کنیم که منبع گرما در نقطه معینی در سر میله (سر قسمتی است که جابجا کردن منطقه مذاب از آنجا آغاز می شود) قرار داشته باشد و فلز مورد تخلیص نیز حرارت را بخوبی هدایت کند، در این صورت اگر قدرت حرارت زائی ثابت بماند طول منطقه مذابی که در شروع عمل حاصل می شود کاملاً مشخص و معین است ولی به محض اینکه منطقه مذاب بسمت وسط میله حرکت داده شود از طول اولیه آن کاسته می گردد و بالاخره از بین می رود. علت این امر اینست که مقدار حرارتی که منطقه مذاب در وسط میله از دست می دهد بیشتر از مقدار حرارتی است که در دو انتها از دست می دهد. بررسی منحنی های تغییرات درجه حرارت در طول میله هادی این موضوع را نشان می دهد و در اشکال ۵ و ۶ دو حالت مخصوص را که منبع گرما در سر میله و در وسط آن است می بینیم.



شکل ۵ - قسمت گرم کننده در سر میله است.

در اینجا θ_M و θ_m درجه حرارت حداکثر در بطن منطقه مذاب، θ_F درجه حرارت ذوب فلز و θ_m و θ'_m درجه حرارت دو انتهای میله می باشد و چون $S'_1 + S'_2 > S$ است بنابراین درجه حرارت متوسط

میله و در نتیجه از بین رفتن حرارت بوسیله تشعشع در هنگامی که عنصر گرم کننده در وسط میله است بیشتر از هنگامی است که عنصر گرم کننده در یکی از دو انتها قرار دارد.



شکل ۶- قسمت گرم کننده در وسط میله است.

از طرف دیگر در تخلیص هر فلز باید شرایط بخصوصی را در نظر گیرند. مثلاً آلومینیوم را می توان در درون ظرفی از آلومین در هم جوش شده و یا گرافیت خالص ذوب کرد ولی در برخی از فلزات مثلاً مس و یا زیر کونیوم ظرف مناسبی وجود ندارد و اجباراً بایستی ذوب را بدون استفاده از ظرف انجام دهند. در چنین حالت میله بطور عمودی جایجا می شود و آنرا در محور لوله ای از جنس سیلیس قرار داده خلاء ایجاد می کنند. این روش را منطقه مذاب مواج می نامند.

در مورد مس مشکل دیگری نیز افزوده می شود زیرا تانسیون سطحی مس نسبتاً ضعیف است و در لحظه ذوب بریده می شود و بایستی آنرا بوسیله اثر مغناطیسی نگاه داشت.

می توان گرم کردن را بوسیله بمباران الکترونی انجام داد و در این حالت حرارت در قسمت کوچکی متمرکز و عمل با سهولت بیشتری انجام می گیرد.

حسن دیگر این روش اینست که چون ذوب منطقه ای در فشار بسیار پائین انجام می گیرد علاوه بر تخلیصی که ذکر شد ناخالصی های فرار نیز تقطیر می شوند و در برخی موارد که دیاگرام تعادل جسم با ناخالصی مطابق میل نیست این تقطیر می تواند مفید باشد. ولی باید در نظر داشت که روش منطقه مذاب در فلزات خیلی فرار نمی تواند اجرا شود.

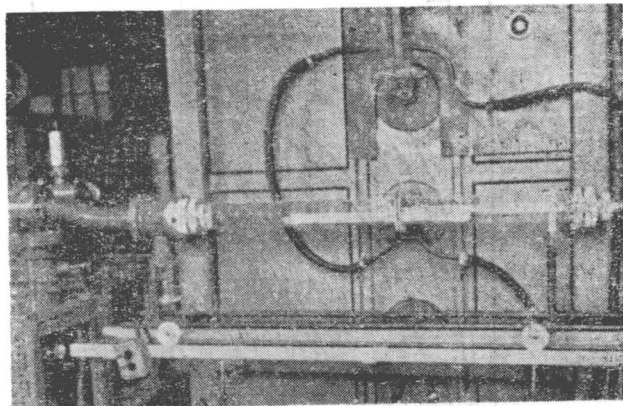
در آنچه تا بحال گفته شد فرض بر این بود که هر یک از ناخالصی ها مستقلاً حذف شود و در حقیقت اگر مقدار ناخالصی اولیه فلز خیلی کم باشد این امر صحیح است. حال اگر مقدار ناخالصی بیشتر باشد ناخالصی های مختلف بر روی هم اثر می گذارند و این اثر گاه در جهت بهبود شرایط حذف ناخالصی و گاه در جهت عکس آن می باشد. شاوب (Schaub) و دسره (Desré) متوجه گردیدند که افزایش عمده

یک همراه برنده (entraîneur) مناسب می تواند در خالص کردن برلیوم اثر خوب داشته باشد. همچنین بر حسب مطالعات ژوکوا (Jukova) و بل ژائو (Beljaev) وجود Ca حذف ناخالصی های Sn و Pb را در آلومینیوم ساده تر می کند. علت این امر تشکیل یک ترکیب بین فلزی (Intermétalique) می باشد.

قسمت دوم - مثالهای عملی در مورد ذوب منطقه ای

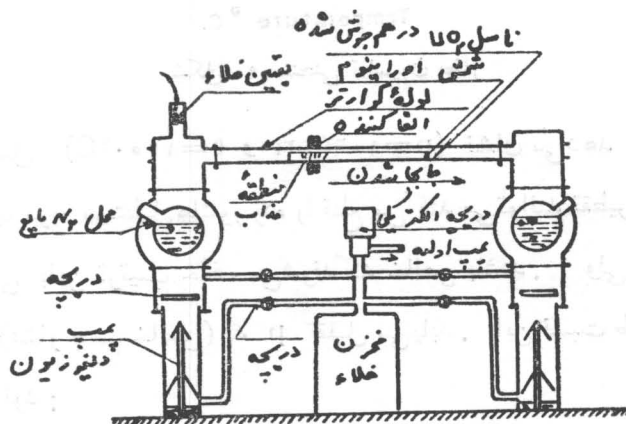
۱- تخلیص اورانیوم.

برای خالص کردن اورانیوم بررسی های زیادی انجام شده و باین نتیجه رسیده اند که روش منطقه مذاب افقی در خلاء بهتر از روش منطقه مذاب عمودی است زیرا در روش افقی حجم و طول میله محدود نیست و عملاً نیز می توان فلز را با خلوص زیاد تهیه کرد. تصویر این دستگاه در شکل ۷ و شمای آن در شکل ۸ دیده می شود و قسمتهای اصلی زیر در آن وجود دارد:



شمای ۷- دستگاه تخلیص اورانیوم بروش منطقه مذاب افقی

۱- مجموعه ای برای تولید خلاء که شامل چند قسمت مختلف است و بکمک آن می توان خلائی تا حدود 10^{-4} torr بدست آورد.

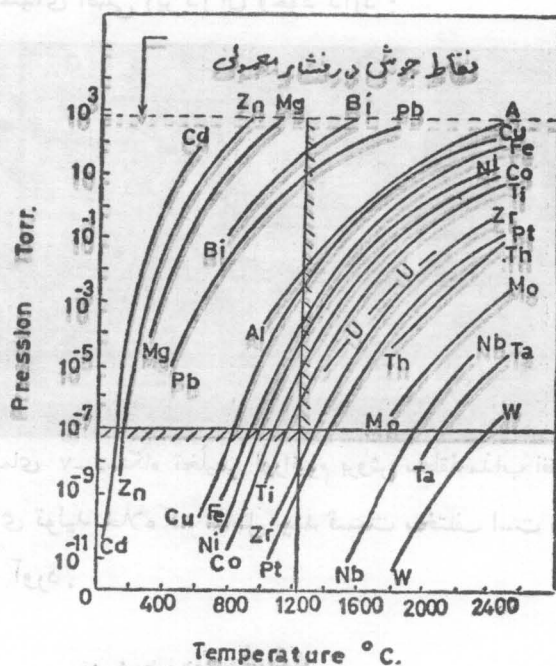


شمای ۸- دستگاه ذوب منطقه ای اورانیوم.

۲- سیستم گرم کننده که شامل یک مولد بافر کانس زیاد و یک القا کننده است و یکمک آن می توان منطقه مذابی بطول ۱۰ سانتی متر ایجاد کرد. این قسمت نسبت به میله کوارتزی محتوی نمونه با سرعت حدود ۵۰ میلی متر ساعت حرکت می کند.

۳- بالاخره ظرفی از جنس اکسید اورانیوم در هم جوش شده که درون محفظه ای از کوارتز قرار گرفته و مجموعه را درون لوله ای از کوارتز قرار می دهند. اورانیوم مورد تخلیص درون ناسل اکسید اورانیوم قرار می گیرد.

این دستگاه دارای مزایای زیر است:
الف- چون می توان در خلاء بالا کار کرد در نتیجه ناخالصی هائی که در شرایط عمل فرار هستند و همچنین تعدادی از گازها حذف می شوند. در منحنی شکل ۹ که تانسیون بخار فلزات مختلف و از جمله



شکل ۹- منحنی تانسیون بخار

اورانیوم را در شرایط عمل ($\theta = 1250^\circ\text{C}$ و $p = 10^{-7}\text{ torr}$) نشان می دهد بخوبی متوجه می شویم که تمام فلزاتی که منحنی آنها مربع مستطیل هاشور زده را قطع می کند می توانند تقطیر شوند. باید در نظر داشت که این فلزات در صورتی باین ترتیب حذف می شوند که خالص باشند. ولی اگر بصورت محلول باشند فشار بخار آنها از P_0 (فشار جسم خالص) به P تقلیل می یابد. این نسبت طبق رابطه زیر به اکتیویته ترمودینامیکی بستگی دارد:

$$\alpha = \frac{P}{P_0} = \gamma N$$

در این رابطه γ ضریب آکتیویته و N فراکسیون مولی می باشد.

ب - می توان مقدار نسبتاً زیادی از فلز یعنی در حدود ۹۰ گرم را مورد عمل قرار داد.

ج - چون گرم کردن بوسیلهٔ القاء در فرکانس بالا می باشد همین امر سبب مخلوط کردن منطقهٔ مذاب و در نتیجه یکنواختی آن می شود.

عیب این روش اینست که ممکن است فلز در اثر تماس با ناسل آلوده شود و همچنین ممکن است ناسل در اثر شوک حرارتی و یا بعلت تغییر شکل میلهٔ فلزی مورد تخلیص، ترک بردارد. عملاً هر ناسل را دو یا سه بار مورد استفاده قرار می دهند.

طرز عمل - نمونه ای را که بعنوان مادهٔ اولیه در تخلیص بروش منطقهٔ مذاب مورد استفاده قرار می گیرد بطریق زیر تهیه می کنند. اورانیوم الکترولیتیکی را که مجدداً در خلاء ذوب شده است بصورت قطعاتی درمی آورند و درون ناسلی از اکسید اورانیوم در هم جوش شده (که قبلاً در 1300°C و در خلاء گازهای آن خارج شده است) قرار داده در کوره ای تحت خلاء 10^{-6} torr ذوب می کنند و فلز را مدت ۴ ساعت بحالت مذاب نگاه می دارند تا کاملاً یکنواخت گردد. ازشمش اخیر قطعاتی بوزن حدود ۹۰ گرم و طول حدود ۳ میلی متر تهیه می کنند و همین میله های اخیر برای ذوب منطقه ای بکار می رود. میله را درون ناسل گذارده و ناسل را داخل دستگاه قرار می دهند. درجه حرارت عمل 1200°C و خلاء حدود 8×10^{-8} تا 2×10^{-7} torr می باشد و عمل را نه بار تکرار می کنند.

جابجا شدن منطقهٔ مذاب بکمک انتقال قسمت گرم کننده بر روی میله انجام می گیرد و سرعت حرکت آن هر $\frac{\text{میلی متر}}{\text{ساعت}}$ است.

نتیجه - جدول ۱ نتیجهٔ تجزیهٔ اورانیوم اولیه و اورانیوم را بعد از ذوب منطقه ای می دهد. و در آن می بینیم که مقدار $\text{Ag, Ta, Zr, As, Ca, Cl, S, Al}$ و Hg تغییری نکرده و مقدار برخی عناصر نیز مثل Mn و Mo افزوده شده است.

ضریب تخلیص برای P مساوی ۳، برای Se مساوی ۲۸، برای Ni و F مساوی ۲، برای Co مساوی ۱، برای Cu مساوی ۰ و بالاخره برای $\text{V, Ti, K, Si, B, Hf, Zn, Fe, Cr}$ مساوی ۳ است.

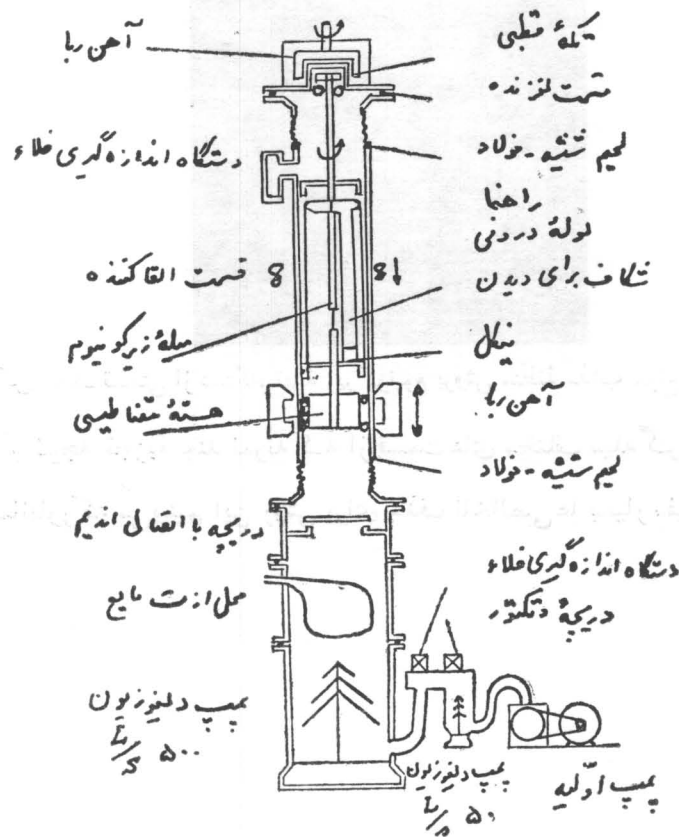
بطور کلی می توانیم بگوئیم که مقدار ناخالصی از ۲۰۰ p.p.m. (اورانیوم الکترولیتیکی) به ۱۰۰ p.p.m. تقلیل یافته است.

جدول ۱- نتیجه تجزیه اورانیوم

مقدار ناخالصی برحسب p.p.m		نام عنصر
اورانیوم منطقه مذاب	اورانیوم الکترولیتیکی	
۲	۲	تانتال
۰.۰۳	۰.۱	هافنیوم
۰.۰۱	۰.۰۱	نقره
۱.۰	۰.۱	مولیبدن
۲۰	۲۰	زیرکونیوم
۰.۷	۲	سلیسیم
۰.۳	۰.۳	ارسنیک
۰.۱	۰.۳	روی
۰.۲	۱	مس
۱	۲۰	نیکل
۰.۰۱	۰.۱	کبالت
۲۰	۵۰	آهن
۳	۱	منگنز
۳	۸	کروم
۰.۱	۰.۳	وانادیم
۲	۶	تیتان
۰.۳	۰.۳	کلسیم
۰.۱	۰.۳	پتاسیم
۱۰	۱۰	کلر
۱۰	۱۰	گوگرد
۷	۲۰	سیلیسیم
۱۵	۱۵	آلومینیوم
۱	۱	منیزیم
۱	۲۰	فلوار
۰.۰۳	۰.۱	بور

۲- تخلیص زیر کونیوم .

آزمایش‌های مختلف نشان داده است که روش «منطقه مذاب عمودی» یا «منطقه مذاب موج» تحت خلاء نتیجه خوب می‌دهد. درحقیقت چون تانسیون بخار زیر کونیوم در نقطه ذوب آن (1850°C) برابر 10^{-6} torr است تمام عناصر فلزی غیر از W، Re، Ta، Hf تقطیر می‌شوند. این تقطیر به خالص شدن فلز کمک می‌کند و در نتیجه می‌توان مثلاً مقدار آهن را از ۸۸۰ p.p.m. به ۰.۸ p.p.m. رسانید. شرح دستگاه - گرم کردن بوسیله فرکانس بالا انجام می‌گیرد و مارپیچ القاکننده در خارج محفظه محتوی زیر کونیوم قرار دارد. قطر میله زیر کونیوم حدود ۰.۹ میلی‌متر و طول آن حدود ۱.۸ سانتی‌متر است و دو انتهای آن بوسیله تیغه‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن نگاهداشته می‌شود. شمای دستگاه در شکل ۱۰ و تصویر قسمتی از دستگاه در شکل ۱۱ دیده می‌شود.

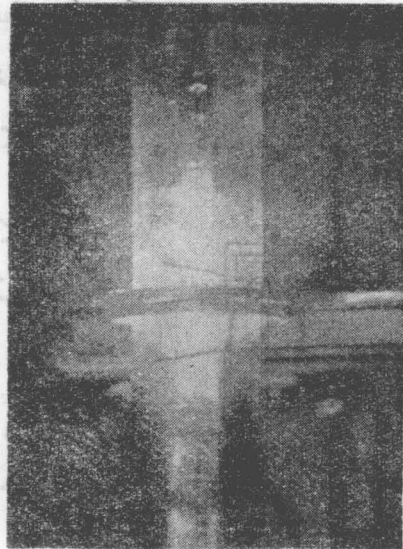


شکل ۱۰- شمای دستگاه منطقه مذاب عمودی برای زیر کونیوم

دستگاه بنحوی تنظیم شده که هنگام ذوب می‌توان دو حرکت زیر را به میله تحمیل کرد :
 - حرکت یک نیمه میله بدور محور عمودی بمنظور یکنواخت کردن قطره مذاب و مطمئن شدن از اینکه درون مایع قسمت جامدی باقی نمانده باشد.

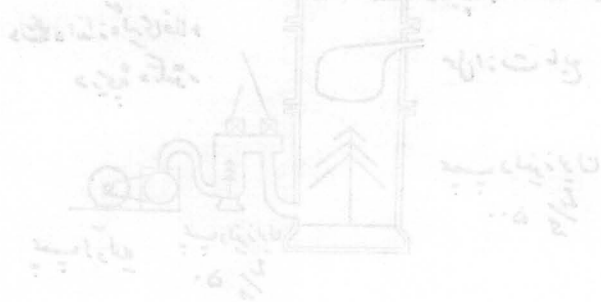
- انتقال عمودی یکی از دو انتها و در نتیجه کشیدن و یا فشردن قطره مذاب بمنظور ثابت نگاه داشتن مقطع میله . انتقال این دو حرکت بدرون محفظه بسته بکمک نیروی مغناطیسی انجام می گیرد و طرز کار آن در شکل ۱۰ دیده می شود .

خلأ درون محفظه بسیار بالا است و حتی تا حدود $10^{-7} \times 7 - 6$ torr می تواند برسد ولی هنگام عمل حدود $10^{-7} \times 7 - 5$ است . جهت انتقال میله از بالا پائین و سرعت انتقال حدود ۳ تا ۴ سانتی متر در ساعت است و عمل چهار بار تکرار شده است .



شکل ۱۱- قسمتی از دستگاه تهیه زیر کونیوم بروش منطقه مذاب موج .

در جدول ۲ نتیجه تجزیه چند نمونه که از قسمت های مختلف میله گرفته شده و همچنین نمونه اولیه داده شده و همانطور که می بینیم این روش برای حذف ناخالصی ها بسیار مفید بوده است .



و اینها به وسیله یک دریچه با یک منطقه خالص در دسترس است .

: در این مرحله کلیه گازها از این دستگاه خارج شده و در یک منطقه خالص در دسترس است .

در این مرحله با یک دریچه در دسترس است و در این مرحله کلیه گازها از این دستگاه خارج شده و در یک منطقه خالص در دسترس است .

بنابراین کلیه گازها از این دستگاه خارج شده و در یک منطقه خالص در دسترس است .

جدول ۲- آنالیز زیر کونیوم قبل و بعد از ذوب منطقه‌ای

	DEPART	J	M	P	T	Y	Z	COEF PARTAGE	TENSION VAPeur t/t zr
S	10.5	3.9		2.8			18		
N ₂	32	35	28	14	22	26	18	1.14	
P	0.05	0.02		≤ 0.01			0.03		
As	≤ 0.001	≤ 0.001		0.01			0.002		
Sb	≤ 0.004	≤ 0.003		0.004			0.007		> 10 ⁸
Zn	≤ 0.02	0.04					0.03		> 10 ⁸
Cd	≤ 0.06	0.06					0.5		> 10 ⁸
Hg	0.002	0.04					0.002	> 1	> 10 ⁸
Cu	0.41	0.1		0.04			0.02	0.19	10 ⁶
Ag	0.68	0.13					2.5	0.62	10 ⁷
Au	0.85	0.033		0.16			0.92		4.10 ⁵
Ni	0.35	≤ 0.3					2.9	0.11	10 ⁵
Co	≤ 0.3	≤ 0.4		0.77			0.35		6.10 ⁴
Fe	5.1	≤ 1		0.007			2.7	0.34	10 ⁵
Mn	0.03	0.007		0.12			0.01	0.28	3.10 ⁷
Cr	0.86	0.061					0.3	0.25	4.10 ⁵
Mo	0.06	0.1					0.26	0.71	< 10 ⁻⁶
W	0.01	0.015					0.002	0.45	< 10 ⁻³
V	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01	0.33	10 ²
Hf	66	65	65	34	53	57	60	> 1	
Al	4	0.24	1.78	0.16	0.8	0.4	0.94	0.82	2.10 ⁶
Sc	0.006	0.002					0.002		
Alcalins	0.06	0.04							> 10 ⁸
Total sauf S. N ₂ . Hf	12.8	≤ 2.6					11.5		
θ recrist.	280	170	170	170	170	180	300		

در جدول بالا ستون دوم سمت چپ آنالیز نمونه اولیه و ستون‌های بعدی J ، M ، P ، T ، Y ، Z بترتیب آنالیز نمونه‌هایی را که از ۱ ، ۴ ، ۷ ، ۱۱ ، ۱۵ ، ۱۵ و ۱۶ سانتی‌متری سر نمونه بریده شده است (طول مفید نمونه ۱۷ سانتی‌متر) نشان می‌دهد .

منابع

- 1 — Les mémoires scientifiques de la revue de métallurgie: N° 11-1965 (Etude des propriétés électriques et supraconductrices de métaux de différentes puretés (Chapitre I: élaboration des métaux purs et méthode de la Zone Fondue).
- 2 — La pureté des métaux et Certains progrès modernes de la métallurgie par: G. Chaudron 1959.
- 3 — Les mémoires scientifiques de la revue de métallurgie : N° 9-1964 (Purification du Zirconium par fusion de zone sous ultra vide) .
- 4 — Les mémoires Scientifiques de la revue de métallurgie : N° 9-1965 (Purification par la Zone Fondue horizontale et propriétés du métal purifié) .
- 5 — Les mémoires Scientifiques de la revue de métallurgie : N° 9-1970 (Traitement d' un métal par fusion de Zone : interdépendance des impuretés. Etude de l'interface solide - liquide) .
- 6 — Zone melting : by William G. Pfann .