فهرست مطالب

چکیده:

بخش اول: بازیابی طلا و نقره از لجن آندی مس

فصل اول:کلیات ۱

۱-۱ مقدمه: ۱

۱-۲ بررسی روش‌های استخراج طلا و نقره: ۲

۱-۳ محدودیت روش‌های سیانوراسیون، کلریناسیون و آمالگاماسیون برای لجن آندی مس ۲

۱-٤ لجن آندی : ۳

۱-۵ اجزای اصلی لجن آندی مس: ٤

۱-۵-۱ سرب: ٤

۱-۵-۲ آهن، روی و آلومینیوم : ٤

۱-۵-۳ نیکل و قلع : ۵

۱-۵-٤ سیلیسیم و کلسیم : ۵

۱-۵-۵ باریم : ۵

۱-۵-٦ آرسنیک، آنتیموان و بیسموت : ۵

۱-٦ کوپلاسیون: ٦

۱-۷ عملیات بر روی مخلوط‌های طلا :(در صورتیکه نقره آن کم است) ۷

۱-۸ طلا: ۷

۱-۸-۱ شبکه کریستالی طلا: ۷

۱-۸-۲ خواص فیزیکی طلا: ۸

۱-۸-۳ خواص شیمیایی طلا : ۹
۱-۸-٤ کاربردهای طلا ۱۰
۱-۸-٥ اثرات زیست محیطی طلا : ۱۱
۱-۸-٦ مواد جایگزین طلا : ۱۱
۱-۸-۷ خالص سازی طلا : ۱۱
۱-۸-۷-۱ فرآیندهای آمیزش (اختلاط): ۱۲
۱-۸-۷ -۲ فرآیند کلرینه کردن: ۱۲
۱-۸-۷-۳ فرآیند سیانید: ۱۲
۱-۸-۷-٤ تصفیه‌ی شیمیایی طلا به روش Miller: ۱٤
۱-۸-۷-٥ تصفیه شیمیایی طلا ۱٥
۱-۸-۷-٦ تصفیه الکتروشیمیایی طلا ۱٦
۱-۸-۸ روش‌های نوین حل سازی : ۱۷
۱-۸-۸-۱ تیواوره: ۱۷
۱-۸-۸-۲ مقایسه بین تیواوره و سیانور: ۱۸
۱-۸-۸-۳ تیوسولفات آمونیاکی: ۱۹
۱-۸-۸-٤ تیوسیانات : ۱۹
۱-۸-۸-٥ هالیدها: ۲۰
۱-۹ نقره: ۲۱
۱-۹-۱ مشخصات عمومی: ۲۱
۱-۹-۱-۱ خواص شیمیایی نقره: ۲۲
۱-۹-۱-۲ خواص فیزیکی و مکانیکی: ۲۲
۱-۹-۲ روش‌های فرآوری نقره : ۲۲
۱-۹-۲-۱ تاریخچه : ۲۲

۱-۹-۲-۲ فرآیند ملغمه: ۲۳
۱-۹-۲-۳ پاتینسن: ۲۳
۱-۹-۲-٤ فرآیند پارکز: ۲۳
فصل دوم: پیشینه تحقیق ۲٤
۲-۱ مقدمه: ۲٤
۲-۲ روش پیرومتالورژی(قالگذاری) ۲٤
۲-۲-۱ مرحله ایجاد فاز سربی: ۲۵
۲-۲-۲ روش ذوب و احیاء یا ذوب احیایی (روش متداول) : ۲۵
۲-۳ کلیات شیوه‌های عملیات نوین لجن : ۲٦
۲-٤ جدا سازی الکترولیز طلا و نقره: ۲۷
۲-۵ متد عملیاتی برای استخراج طلا و نقره ۳۰
۲-٦ فرآیندهای متداول هیدرومتالورژی برای استخراج طلا و نقره: ۳۲
فصل سوم: روش پژوهش و انجام آزمایش‌ها ۳٦
۳-۱ مواد شیمیایی مورد استفاده: ۳٦
۳-۲ تجهیزات مورد استفاده : ۳۷
۳-۳ آماده سازی نمونه: ۳۸
۳-٤ مراحل روش Fire assay: ۳۸
۳-۵ شناسایی نمونه ۳۸
۳-٦ بازیافت طلا و نقره از لجن آندی مس: ٤۱
۳-٦-۱ سولفاتاسیون: ٤۱
۳-٦-۲ تشویه: ٤۲
۳-٦-۳ مواد شارژ برای ذوب: ٤۲
۳-٦-۳-۱ لیتارژ یا اکسید سرب (PbO): ٤۲

۳-٦-۳ -۲ سدیم کربنات (Na_2CO_3):..... ٤۳
۳-٦-۳-۳ بوراکس ($Na_2B_4O_7$):..... ٤۳
۳-٦-۳-٤ سیلیکا (SiO_2):..... ٤٤
۳-٦-۳-۵ کک (C): ٤٤
۳-٦-٤ تشکیل سرباره: ٤۵
۳-٦-۵ اسکوریفیکاسیون: ٤۵
۳-٦ -٦ کوپلاسیون ٤٦
۳-٦-٦-۱ کوپل ٤٦
۳-٦-۷ پارتینگ..... ٤۷
۳-٦-۸ سمانتاسیون نقره : ٤۸
فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ٤۹
٤-۱ نتیجه‌گیری:..... ٤۹
٤-۲ پیشنهادات:..... ۵۲
بخش دوم: بازیابی طلا و نقره از ضایعات و پسماندهای الکترونیکی
فصل اول :کلیات..... ۵۳
۱-۱ مقدمه:..... ۵۳
۱-۲ ویژگی‌های عمومی فرآیندهای پیرومتالورژی: ۵۵
۱-۳ بازیابی فلزات از ضایعات الکترونیکی توسط بیومتالورژی..... ۵٦
۱-٤ ویژگی‌های عمومی فرآیندهای هیدرومتالورژی: ۵۷
۱-۵ مزایای روش هیدرومتالورژی:..... ۵۸
۱-٦ فلزات موجود در ضایعات الکترونیکی و بررسی اقتصادی بودن آنها: ٦۱
۱-۷ اهمیت و توجیه بازیافت پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی: ٦٤
۱-۸ مواد موجود در کامپیوترها:..... ٦۵

فصل دوم: مروری بر منابع علمی بازیافت فلزات گرانبها، از ضایعات الکترونیکی ۷۱
۲-۱ مقدمه: ۷۱
۲-۲ بررسی لیچینگ‌ها: ۷۲
۲-۲-۱ لیچینگ سیانیدی: ۷۲
۲-۲-۲ لیچینگ تیوسولفات: ۷٤
۲-۲-۳ لیچینگ تیواوره: ۷۵
۲-۲-٤ جداسازی محلول لیچینگ: ۷٦
۲-۲-۵ سایر تکنیک‌های لیچینگ غیرسیانیدی: ۷٦
فصل سوم: روش پژوهش و کارهای آزمایشگاهی ۷۸
۳-۱ روش پژوهش: ۷۸
۳-۲ مواد شیمیایی و تجهیزات: ۸۱
۳-۳ فراهم کردن نمونه: ۸۲
۳-٤ تفکیک: ۸۲
۳-۵ خردایش: ۸۲
۳-٦ شناسایی کردن نمونه: ۸۳
۳-۷ لیچینگ: ۹۰
۳-۸ واکنش‌های فلزات در مقابل اسیدها: ۹۰
۳-۹ انتخاب حلال: ۹۳
۳-۱۰ لیچینگ نقره: ۹۳
۳-۱۱ روند انحلال نقره در نیتریک اسید: ۹٤
۳-۱۲ تعیین شرایط بهینه برای لیچینگ نقره: ۹٤
۳-۱۳ بازیابی فلزات از محلول‌های باردار: ۱۰۱
۳-۱٤ بازیابی نقره: ۱۰۱

۳-۱۵ لیچینگ طلا: ۱۰۲
۳-۱٦ تعیین شرایط بهینه برای لیچینگ طلا: ۱۰۳
۳-۱۷ حذف نیتریک اسید اضافی: ۱۰۷
۳-۱۸ کاهش Au(III) به Au فلزی: ۱۰۸
۳-۱۹ شکل رسوب‌های طلای بدست آمده از احیا کننده‌های مختلف: ۱۱۰
فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۲
٤-۱ نتیجه‌گیری: ۱۱۲
٤-۲ پیشنهادات: ۱۱٤
فصل پنجم: ضمائم ۱۱۵
مراجع ۱۳۰

فهرست شکل‌ها

بخش اول:

شکل ۲-۱ : جداسازی الکترولیزی طلا و نقره..... ۲۹

شکل ۲-۲: وضع استخراج فلزات قیمتی از لجن حوضچه‌ی الکترولیز ۳۱

شکل ۲-۳ : بازیابی طلا و نقره توسط سانوشی و موچیدا..... ۳۲

شکل ۲-٤ : مدار استحصال عناصر با ارزش از لجن آندی مس سرچشمه ۳۵

شکل ۳-۱ پیک مربوط به XRD نمونه لجن آندی مس..... ۳۹

شکل ٤-۱ استحصال طلا و نقره از لجن آندی مس..... ۵۱

بخش دوم:

شکل ۱-۱: فرآیند هیدرومتالورژی..... ٦۰

شکل ۳-۱: استخراج فلزات گرانبها، از پسماندهای الکترونیکی. ۷۹

شکل ۳-۲: فرآیند لیچینگ و بازیابی فلزات طلا و نقره. ۸۰

شکل ۳-۳: نحوه آماده سازی خوراک برای لیچینگ..... ۸۱

شکل ۳-٤ :پیک مربوط به XRD نمونه..... ۸۵

شکل ۳-۵:تصاویر گرفته شده از نقاط مختلف فلزات پایه CPU، توسط SEM EDAX ۸۷

شکل ۳-٦ :پیک مربوط به پوشش طلا در پایه‌های CPU، توسط SEM EDAX ۸۸

شکل ۳-۷ :پیک مربوط به پوشش نیکل در پایه‌های CPU، توسط SEM EDAX ۸۸

شکل ۳-۸: پیک مربوط به پوشش مس در پایه‌های CPU، توسط SEM EDAX ۸۹

شکل ۳-۹: پیک‌های مربوط به سه فلز طلا، نیکل و مس، همراه با عکس نمونه. ۸۹

شکل ۳-۱۰ : تصویر لیچینگ نقره در دمای ^{0}C ۷۰، همزنی با مگنت. ۹٤

شکل ۳-۱۱: نمودار استخراج نقره، بر حسب زمان h ۱، h ۲، h ۳ و h ٤ در دمای ^{0}C ۵۰ ..... ۹۵

شکل ۳-۱۲: نمودار استخراج نقره، بر حسب زمان h ۱، h ۲، h ۳ و h ٤ در دمای ^{0}C ۷۰ ..... ۹٦

شکل ۳-۱۳: نمودار استخراج نقره، بر حسب زمان h ۱، h ۲، h ۳ و h ٤ در دمای ^{0}C ۸۰ ..... ۹۷

شکل ۳-۱٤: نمودار استخراج نقره، بر حسب زمان h ۱، h ۲، h ۳ و h ٤ در دمای ^{0}C ۹۰ ..... ۹۸

شکل ۳-۱۵ :استخراج نقره در مدت زمان یک ساعت، شرایط دمایی ^{0}C ۵۰، ^{0}C ۷۰، ^{0}C ۸۰ و ^{0}C ۹۰ ..... ۹۹

شکل ۳-۱٦ : استخراج نقره در مدت زمان دو ساعت، شرایط دمایی ^{0}C ۵۰، ^{0}C ۷۰، ^{0}C ۸۰ و ^{0}C ۹۰ ..... ۹۹

شکل ۳-۱۷ :استخراج نقره در مدت زمان سه ساعت، شرایط دمایی ^0C ۵۰، ^0C ۷۰، ^0C ۸۰ و ^0C ۹۰ ..... ۱۰۰
شکل ۳-۱۸ : استخراج نقره در مدت زمان چهار ساعت، شرایط دمایی ^0C ۵۰، ^0C ۷۰، ^0C ۸۰ و ^0C ۹۰ ..... ۱۰۰
شکل ۳-۱۹ : نمودار استخراج طلا، توسط تیزاب سلطانی در دمای ^0C ۵۰، تحت زمان‌های مختلف..... ۱۰٤
شکل ۳-۲۰ : نمودار استخراج طلا توسط تیزاب سلطانی در دمای ^0C ۷۰، تحت زمان‌های مختلف..... ۱۰۵
شکل ۳-۲۱ : نمودار استخراج طلا توسط تیزاب سلطانی در دمای ^0C ۸۰، تحت زمان‌های مختلف..... ۱۰٦
شکل ۳-۲۲ :نمودار استخراج طلا، توسط تیزاب سلطانی در دماهای مختلف در مدت زمان h ۱. ..... ۱۰۷
شکل ۳-۲۳ :رسوب طلا توسط اگزالیک اسید. ۱۱۰
شکل۳-۲٤ : طلای بدست آمده به صورت پوسته طلا..... ۱۱۰
شکل ۵-۱ پیک مربوط به نقره..... ۱۱٦
شکل ۵-۲ بزرگ نمایی شده پیک نقره ۱۱٦
شکل ۵-۳ پیک مربوط به آلومینیوم ۱۱۷
شکل ۵-٤ بزرگ نمایی شده پیک آلومینیوم..... ۱۱۷
شکل ۵-۵ پیک مربوط به طلا..... ۱۱۸
شکل ۵-٦ بزرگ نمایی شده پیک طلا..... ۱۱۸
شکل ۵-۷ پیک مربوط به باریم..... ۱۱۹
شکل ۵-۸ بزرگ نمایی شده پیک باریم..... ۱۱۹
شکل ۵-۹ پیک مربوط به کلسیم..... ۱۲۰
شکل ۵-۱۰ بزرگ نمایی شده پیک کلسیم..... ۱۲۰
شکل ۵-۱۱ پیک مربوط به مس ۱۲۱
شکل ۵-۱۲ بزرگ نمایی شده پیک مس..... ۱۲۱
شکل ۵-۱۳ پیک مربوط به آهن..... ۱۲۲
شکل ۵-۱٤ بزرگ نمایی شده پیک آهن..... ۱۲۲
شکل ۵-۱۵ پیک مربوط به نیکل..... ۱۲۳
شکل ۵-۱٦ بزرگ نمایی شده پیک نیکل..... ۱۲۳
شکل ۵-۱۷ پیک مربوط به سرب..... ۱۲٤
شکل ۵-۱۸ بزرگ نمایی شده پیک سرب..... ۱۲٤
شکل ۵-۱۹ پیک مربوط به پالادیم..... ۱۲۵

شکل ۵-۲۰ بزرگ نمایی شده پیک پالادیم..... ۱۲۵
شکل ۵-۲۱ پیک مربوط به سیلیسیم ۱۲۶
شکل ۵-۲۲ بزرگ نمایی شده پیک سیلیسیم..... ۱۲۶
شکل ۵-۲۳ پیک مربوط به قلع ۱۲۷
شکل ۵-۲٤ بزرگ نمایی شده پیک قلع ۱۲۷
شکل ۵-۲۵ پیک مربوط به تیتانیوم..... ۱۲۸
شکل ۵-۲٦ بزرگ نمایی شده پیک تیتانیوم ۱۲۸
شکل ۵-۲۷ پیک مربوط به روی ۱۲۹
شکل ۵-۲۸ بزرگ نمایی شده پیک روی..... ۱۲۹

فهرست جدول‌ها:

بخش اول:

جدول ۱-۱-نحوه توزیع عناصر در مرحله تصفیه الکتریکی نسبت به کل موجودی عنصر در سیستم ٤

جدول ۲-۱ مقایسه عملکرد سلول‌های Balbach-Thum و..Moebius ۲۸

جدول ۳-۱ –مواد اولیه استفاده شده، شرکت تولید کننده و درصد خلوص آنها..... ۳۷

جدول ۳-۲ - XRF مربوط به لجن آندی مس ٤۰

جدول ۳-۳-آنالیز لجن آندی مس توسط ICP..... ٤۱

بخش دوم:

جدول ۱-۱: نسبت وزنی فلزات برای نمونه‌های مختلف ضایعات الکترونیکی ٦۲

جدول ۱-۲ : مقدار محاسبه شده Vi برای نمونه‌های مختلف ضایعات الکترونیکی ٦۳

جدول ۱-۳ : میزان انرژی ذخیره شده به دلیل استفاده از مواد بازیافت شده به جای تولید آنها از منابع اولیه ... ٦٤

جدول ۱-٤ :آنالیز اجزای ماشین اصلی یک کامپیوتر..... ٦٦

جدول ۱-٥ : آنالیز اجزای موجود در مانیتور ١٤ اینچ رنگی Philips ٦۷

جدول ۱-٦ :آنالیز اجزای یک صفحه کلید ٦۸

جدول ۱-۷ : مواد موجود در یک برد IC متداول..... ٦۸

جدول ۱-۸ : اجزای مضر عمده در پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی ٦۹

جدول ۱-۹ : فلزات سنگین موجود در پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی ۷۰

جدول ۱-۱۰ : نیمه رساناهای موجود در پسماندهای اکتریکی و الکترونیکی. ۷۰

جدول ۱-۱۱ : اجزای ارگانیک موجود در پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی. ۷۰

جدول ۱-۱۲ : پلاستیک‌های موجودر پسماندهای الکتریکی و الکترونیکی ۷۰

جدول ۲-۱: نشان دهنده واکنش‌های مختلف در طی فرآیند استخراج ۷۳

جدول ۳-۱-آنالیز سرندی قطعات پودر شده. ۸۳

جدول ۳-۲ – شناسایی نمونه توسط XRF..... ۸٤

جدول ۳-۳ –نتایج فازهای تشکیل دهنده نمونه ۸٥

جدول ۳-٤ –آنالیز طلا و پالادیوم توسط ICP و Fire assay..... ۸٦

جدول۳-۵ :قابلیت انحلال فلزات در اسیدهای مختلف ۹۲
جدول ۳-٦: شریط لیچینگ نقره، تحت شرایط مختلف زمانی در دمای ^{0}C ۵۰ ..... ۹۵
جدول ۳-۷ : شریط لیچینگ نقره، تحت شرایط مختلف زمانی در دمای ^{0}C ۷۰ ..... ۹٦
جدول ۳-۸ : شریط لیچینگ نقره، تحت شرایط مختلف زمانی در دمای ^{0}C ۸۰ ..... ۹۷
جدول ۳-۹ : شریط لیچینگ نقره، تحت شرایط مختلف زمانی در دمای ^{0}C ۹۰ ..... ۹۸
جدول ۳-۱۰ : شریط لیچینگ طلا، تحت شرایط مختلف زمانی در دمای ^{0}C ۵۰ ..... ۱۰٤
جدول ۳-۱۱ : شریط لیچینگ طلا، تحت شرایط مختلف زمانی در دمای ^{0}C ۷۰ ..... ۱۰۵
جدول ۳-۱۲ : شریط لیچینگ طلا، تحت شرایط مختلف زمانی در دمای ^{0}C ۸۰ ..... ۱۰۶
جدول ۳-۱۳ : ترسیب طلا توسط احیاء کننده‌های مختلف ۱۱۰

چکیده:

در این تحقیق، هدف اصلی بازیابی فلزات گرانبهای طلا و نقره است بطوریکه بازیابی این فلزات از لجن آندی مس و پسماند های الکترونیک مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که بازیابی این فلزات از لجن آندی مس به روش پیرومتالورژی و از پسماندهای الکترونیکی به روش هیدرومتالورژی صورت گرفت که هر کدام از این روش‌ها، مزایای خاصی را دارا می‌باشند. اساساً فلزات طلا و نقره به خاطر نجیب بودنشان، روش‌های استخراج متعددی دارند بطوریکه رایج‌ترین روش برای استخراج آنها از کانی، روش سیانوراسیون می‌باشد ولی روش سیانوراسیون علاوه بر مشکلات زیست محیطی، برای بازیابی این فلزات از لجن آندی مس، مناسب نمی‌باشد. یکی از مشکلات اصلی این روش، وجود ذرات سیانورکش در لجن آندی می‌باشد بطوریکه این ذرات باعث مصرف زیاد سیانور شده و آن را از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌کنند. با استفاده از روش پیرومتالورژی، طلا ٪ ۹۵/۲٤ و نقره ٪۹۸ استخراج شدند. هر کدام از مراحل این روش برای رسیدن به خلوص بالا، مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین در این تحقیق، از روش هیدرومتالورژی برای بازیافت طلا و نقره موجود در پسماندهای الکترونیکی استفاده شد. ابتدا بردهای الکترونیکی، توسط دستگاه سنگ شکن خرد شده، سپس توسط دستگاه آسیاب دیسک حلقه‌ای پودر شدند. قطعات حاصل وارد مرحله لیچینگ شدند بطوریکه این کار با نیتریک اسید انجام شد و در این مرحله، نقره به صورت نیترات نقره محلول در می‌آید. سپس پساب حاصل، از فاز محلول جدا گشته و فاز محلول برای بازیابی نقره و فاز جامد برای بازیابی طلا مورد استفاده قرار گرفت (طلا با تیزاب سلطانی حل شد). بازیابی طلا در این روش ٪۹٦ و نقره ٪ ۸۲ می‌باشد. در حالت کلی، از روش‌های مکانیکی و هیدرومتالورژی برای بازیافت این عناصر بهره گرفته شد. کل مراحل بازیابی این فلزات شامل چهار مرحله می‌باشد:۱-تفکیک ۲-خردایش ۳-لیچینگ ٤-بازیابی فلزات از محلول‌های باردار حاصل از لیچینگ.

کلمات کلیدی:پیرومتالورژی- لجن آندی- پسماندهای الکترونیکی- بردهای مدار چاپی- بازیافت فلزات گرانبها- هیدرومتالورژی.

بخش اول:بازیابی طلا و نقره از لجن آندی مس

فصل اول:کلیات

۱-۱ مقدمه:

نیاز صنایع به مواد اولیه باعث شده تا بشر به دنبال کشف و استخراج بیشتر فلزات مورد نیاز خود باشد بطوریکه یکی از این فلزات مهم مس می‌باشد اما کانسار آن، حاوی عناصر با ارزش مثل طلا، نقره، سلنیوم، تلوریم و مولیبدن نیز می‌باشد [۱]. طلا، نقره و سلنیوم در لجن حاصل از الکترولیز، تجمع پیدا کرده و پر عیار می‌گردند به نحوی که می‌توان آنها را به صورت اقتصادی استحصال کرد. در کشور ما برای بازیابی عناصر با ارزش، روش پیرومتالورژی مورد استفاده قرار می‌گیرد.در روش پیرومتالورژی، فلزات قیمتی را از طریق تشویه و ذوب استخراج می‌کنند بدین طریق که ماده را با کمک ذوب و مواد اکسیدکننده و کاهنده ذوب می‌کنند بطوریکه از این عمل، مذابی حاصل می‌شود که شامل دو قسمت است: یکی سرباره، که مواد زاید را در خود دارد و دیگری سرب مذاب سنگین که فلزات قیمتی سنگین را در خود حل و جمع کرده است. در روش هیدرومتالورژی، عمل استخراج را به این ترتیب انجام

می‌دهند که نمونه را در واکنشگرها حل کرده و عناصر مورد نیاز را با عملیات شیمیایی جدا می‌کنند. در هر دو روش می‌توان با فلوتاسیون بعضی از مواد مزاحم و یا سولفید را جدا کرد. نمونه کار شده لجن آندی مس صنایع ذوب فلزات فجر است بطوریکه ظرفیت تولید مس صنایع ذوب فلزات فجر، در ماده هزار تن است که به ازای این مقدار ۷۰ تن لجن آندی در ماه تولید می‌شود. اگر چه مقدار فلزات با ارزش نظیر طلا در لجن کم است اما با توجه به ظرفیت بالای تولید لجن آندی، مقدار قابل توجهی از این فلزات حاصل می‌شود که ارزش بالایی دارد.

۱-۲ بررسی روش‌های استخراج طلا و نقره:

طلا و نقره از کانی می‌توانند توسط فرایندهای آمالگاسیون، فلوتاسیون، پیرومتالورژی، هیدرومتالورژی، بایومتالورژی استخراج شوند از سال ۱۸۸۰، بازیابی طلا و نقره از کانی‌ها و کنسانتره‌ها توسط روش هیدرومتالورژی مورد استفاده قرار می‌گرفت ولی مشکل اساسی در این روش، آلودگی بالای سیانید است [۲]. همچنین طلا و نقره در کانی‌های مقاوم سولفیدی مثل پیریت، آرسنوپیریت، بازده پایینی دارند و در این مواد قبل از روش سیانوراسیون باید از روش بایومتالورژی[۱] بهره گرفت تا ذرات طلای موجود در بین حفره‌های سولفیدی آزاد شده و در معرض تماس با سیانوراسیون قرار گیرند. مراحل کلی استخراج طلا و نقره به صورت مراحل زیر می‌باشد: [۳].

۱-جدایش ترکیبات و یا محلول‌های فلزی از غیر فلزی
(کانه آرایی + هیدرو یا پیرومتالورژی) متالورژی استخراجی.
۲-جدایش فلزات قیمتی از سایر فلزات- اسکوریفیکاسیون (متالورژی بازیابی).
۳-جدایش فلزات قیمتی از یکدیگر-پارتینگ (متالورژی تصفیه).
٤-جدایش ناخالصی‌ها از فلزات قیمتی – تخلیص (الکترومتالورژی.).

۱-۳ محدودیت روش‌های سیانوراسیون، کلریناسیون و آمالگاماسیون برای لجن آندی مس

کارایی روش سیانوراسیون برای استحصال طلا و نقره از لجن، مردود اعلام شده است و دلیل عمده آن وجود بیش از حد عناصر و ترکیبات متعدد سیانورکش در لجن می‌باشد بطوریکه در این روش استخراج، مصرف سیانور آن قدر زیاد می‌باشد که دیگر از لحاظ اقتصادی، این روش مقرون به صرفه

[۱] Biometallurgical

نخواهد بود. چون که هزینه‌های سیانور در حدود ۲۵ درصد از کل هزینه‌های استخراج را در بر می‌گیرند. همچنین روش کلریناسیون یکی از روش‌های استخراج طلا در یک دوره زمانی خیلی کوتاه بوده است و به علت سمی بودن گاز کلر، امکان وقوع هر حادثه در کارخانه، مشکلات در نقل و انتقال آن گاز، روش خوبی برای استخراج این عناصر محسوب نمی‌شود و در بعضی موارد در تصفیه نهایی طلا (متالورژی تخلیص طلا) به کار می‌رود [٤]. کلاً روش‌های کلریناسیون و سیانوراسیون برای تولید میزان خاصی از طلا و نقره، در مقایسه با روش قالگذاری مقرون به صرفه نیستند بطوریکه با روش قالگذاری راحت‌تر و با هزینه ی کم‌تر می‌توان به همان میزان طلا و نقره رسید. سه مرحله پایانی تولید طلا و نقره (متالورژی استحصال) در هر سه روش یکسان است بنابراین هزینه‌های مرحله استحصال در هر سه مورد تقریباً یکسان ولی هزینه‌های استخراج سیانوراسیون و کلریناسیون به شدت نسبت به هزینه‌های مربوط به روش پیرومتالورژی (قالگذاری) بیشتر می‌باشد. در مورد روش آمالگاسیون، ماکزیمم ضریب حذف طلا و نقره در شرایط معمولی کم‌تر است و افزایش ضریب حذف، مستلزم افزایش دما است که به دلیل مشکلات زیست محیطی، امکان افزایش دما مقدور نیست.پس مهم‌ترین محدودیت در این روش، عامل زیست محیطی می‌باشد.

۱-۴ لجن آندی :

مس، حاصل از کانی سولفید ناخالص است و ناخالصی‌های عمده آن، نقره، طلا، آهن، روی، سرب، آرسنیک، گوگرد، اکسید مس و تکه هایی از سیلیکات آهن است. از آنجا که حتی مقادیر کم این ناخالصی‌ها، رسانایی الکتریکی مس را به میزان قابل توجهی کم می‌کنند لازم است که مس تصفیه شود برای این منظور فلز مذاب را در جریان هوا حرارت می‌دهند آرسنیک و گوگرد به اکسیدهای گوگرد فرار تبدیل شده، از فلز مذاب خارج می‌شوند [٥]. ناخالصی‌های دیگر را از راه تصفیه الکتروشیمیایی جدا می‌سازند. تیغه های مس خالص به عنوان کاتد به کار برده می‌شوند و برای الکترولیت هم از مخلوط سولفوریک اسید رقیق، کلرید مس و سولفات مس استفاده می‌کنند (کاتد: ۹۹ /۹۹، آند:۹۹/٦). به وسیله تنظیم دقیق ولتاژ در تصفیه مس، در سلول الکترولیز فقط مس و ناخالصیهای فلزی با الکتروپوزیتیویته بیشتر (مثل آهن، روی و سرب) در آند به یون تبدیل می‌شوند و ناخالصی‌های فلزی (مثل طلا و نقره) که الکتروپوزیتوی آنها از مس کم‌تر است تغییر نکرده و با خورده‌شدن تدریجی آند به ته ظرف الکترولیز سقوط می کنند و لجن آندی را تشکیل می‌دهند. برای جداکردن فلزهای با ارزش، این لجن آندی بعداً مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۵ اجزای اصلی لجن آندی مس:

مواد سازنده لجن متعدد است و در بعضی از نمونه‌ها به ٤٠ عدد می‌رسد ترکیبات این سازندگان پیچیده است و به نوع سنگ معدن و چگونگی الکترولیز و عوامل دیگر مربوط می‌شود.

جدول ۱-۱-نحوه توزیع عناصر در مرحله تصفیه الکتریکی نسبت به کل موجودی عنصر در سیستم [٦].

ناخالصی‌های آند	حل شدن در الکترولیت (درصد)	راسب شدن در کاتد (درصد)	ته نشین شدن در لجن (درصد)
سرب	۰	۱ تا ۵	۹۵ تا ۹۹
آهن	۸۰ تا ۱۰۰	۰ تا ۲۰	ناچیز تا ۲۰
روی	۹۳ تا ۱۰۰	۰ تا ۳	۰ تا ٤
آلومینیوم	۷۵	۵	۲۰
نیکل	۷۵ تا ۹٤/۹	۱/٤ تا ۱۵	۳/۷ تا ۱۰
قلع	۲۰	۲۰ تا ۳۰	۵۰ تا ٦۰
گوگرد	۰	۳ تا ۵	۹۵ تا ۹۷
باریم-سیلیسیم-کلسیم	۰	۰	۱۰۰
آرسنیک	٦ تا ۷۳/۸	۱/۵ تا ۲۰	۲۰ تا ۲۵
آنتیموان	۲۰ تا ٤۰/٤	۲ تا ۳۰	۵۰ تا ٦۰
بیسموت	۲۱/۸ تا ۱۰۰	۰	۰ تا ۷۸/۲

۱-۵-۱ سرب:

در خلال عمل الکترولیز، سرب موجود در آند عمدتاً به صورت سولفات نامحلول در آمده و تقریباً به طور کامل وارد لجن الکترولیز می‌شود. ترکیبات سرب موجود در لجن به ترتیب میزان حضور $PbSO_4$ و $Pb_2Sb_2O_6$ می‌باشند.

۱-۵-۲ آهن، روی و آلومینیوم :

این عناصر عمدتاً در الکترولیت حل شده و به صورت سولفات محلول در می‌آیند.اما معمولاً اکسیدهای آنها یعنی Fe_2O_3، ZnO و Al_2O_3 در لجن حضور دارند [۷].

۱-۵-۳ نیکل و قلع :

قسمتی از این عناصر حل شده در آند، به صورت محلول وارد الکترولیت می‌شوند و قسمتی از آنها به صورت ترکیبات نامحلول در آمده و وارد لجن می‌گردند.قلع به صورت SnO_2 و کمی به صورت سولفات نامحلول $Sn(OH)_2SO_4$ و نیکل به صورت NiO وارد لجن می‌شوند.

۱-۵-۴ سیلیسیم و کلسیم :

سیلیسیم به صورت SiO_2 و کلسیم به صورت سیلیکات کلسیم، به مقدار بسیار اندک از معدن تا پالایشگاه در مدار مربوط به تولید مس باقیمانده و در آند به صورت مکانیکی محبوس می‌شوند، به خاطر اینکه ترکیبات فوق‌العاده پایداری هستند، مستقیماً به داخل لجن می‌روند و در محلول الکترولیت اصلاً حل نمی‌گردند.

۱-۵-۵ باریم :

در هنگام ریخته‌گری آند در کارخانه‌های ذوب مس، باید جهت راحت جدا شدن آند ریخته‌گری شده از قالب مربوطه، از سولفات باریم بهره گرفت بدین صورت که این ماده توسط دستگاه اسپری روی سطح قالب پاشیده می‌شود. با توجه به این که سولفات باریم اضافه شده خالص نیست، ترکیبات ناخالص دیگر، وارد لجن می‌شود. سولفات باریم در مراحل بازیابی فلزات قیمتی، باعث بروز مشکلات عدیده‌ای می‌شود و به این خاطر مهم‌ترین ترکیب، غیر از ترکیبات فلزات قیمتی، همین ماده می‌باشد [٦].

۱-۵-۶ آرسنیک، آنتیموان و بیسموت :

مقداری از آرسنیک به صورت آرسنیات یا سولفات، رسوب و وارد لجن الکترولیز می‌شود. وجود آرسنیک در الکترولیت باعث انجام واکنش‌های ثانویه می شود که حاصل آنها $As(OH)_3, As_2O_3$ و آرسنیات مس نامحلول AsO_3HCu می‌باشد. دوعنصر بیسموت و آنتیموان توسط آب اکسید می‌شوند و وجود مقدار کمی یون کلر، باعث می‌شود که یونهای اکسیدی این فلزات به صورت SbOCl و BiOCl درآمده و چون در الکترولیت نامحلول هستند لذا وارد لجن الکترولیزمی‌شوند.سایر ترکیباتی که به واسطه آنها، این عناصر در لجن حضور می‌یابند عبارتند از:Sb_2O_3، $BiAsO_4$، $SbAsO_4$ و Bi_2O_3

در روش متالورژی شناخت ترکیبات، بر روی انتخاب حلال و نحوه انحلال و سایر فاکتورها موثر است و ایجاد شرایط مناسب از طریق شناخت ترکیبات موجود در لجن، می‌تواند منجر به افزایش بازدهی عملیات شود.

۱-۶ کوپلاسیون[۲]:

پس از آنکه طلا و نقره توسط سرب جذب گردیدند باید از سرب تفکیک گردند که همانا اکسایش سایر فلزات همراه طلا و نقره و تشکیل سرباره فلزی[۳] می‌باشد. به آن اکسایش و یا کوپلاسیون[٤] می‌گویند [۸]. وجه تسمیه کوپلاسیون، بوته مخصوص آنالیز حرارتی طلا و نقره (Cupel) می‌باشد و عملیات اسکوریفیکاسیون در کوره کوپلاسیون صورت می‌گیرد. این روش در مقیاس آزمایشگاهی و برای تجزیه حرارتی طلا و نقره بکار می‌رود و در مقیاس صنعتی در متالورژی طلا و نقره (روش قالگذاری) و متالورژی جنبی طلا و نقره یعنی در کارخانجات تولید سرب (واحد تصفیه حرارتی) به کار می‌رود.هدف اصلی این مرحله از استحصال، اکسایش سرب آلیاژ مذاب سه‌تایی طلا- نقره- سرب و تبدیل آن به لیتارژ توسط دمش سریع هوا در محدوده حرارتی ۱۰۰۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و جدا نمودن آن از آلیاژ طلا و نقره در کوره کوپلاسیون می‌باشد سایر ناخالصی‌های باقیمانده همراه فلزات قیمتی نیز به طور جزء به جزء اکسید می‌شوند اکسید زرد رنگ لیتارژ (سر باره لیتارژی) وارد شده، روی مذاب جمع شده و بدین ترتیب حذف می‌شود. مس، بیسموت و آنتیموان پس از اکسیدشدن، بر روی لایه لیتارژ که در سطح تشکیل شده است، قرار می‌گیرند.این سرباره را کلاً از سیستم خارج می‌نمایند و نسبت به جداسازی طلا و نقره مذاب باقیمانده که از این فلزات غنی بوده (به Doremetal معروف است) در بخش پارتینگ، مبادرت می‌شود. بطوریکه برای آشنایی بیشتر با این کوره شرحی از ساختمان و چگونگی کار با آن داده خواهد شد. کوره کوپلاسیون عیناً مانند یک کوره کوچک شعله‌ای است جز اینکه کف آن متحرک و از خاکستر استخوان و سیمان پرتلاند ساخته می‌شود و برای هر دفعه باید آن را از نوع ساخت. قالب و اسکلت کف اصلی کوره، از چند حلقه بیضی شکل که روی شاسی یک واگنت قرار گرفته، تشکیل می‌شود و در خارج کوره مخلوطی از خاکستر استخوان و سیمان پرتلاند (مانند خمیر) درست کرده و داخل این حلقه‌ها می‌گذارند بطوریکه وسط کف آن گودال یا فرورفتگی به عمق ۹ سانتی‌متر شود پس از خشک کردن آن، با واگنت حرکت داده و به داخل

---

[۲] Cupellation

[۳] Dross

[٤] فرآیندی است که در آن طلا و نقره از سرب و سایر فلزات پایه آلیاژ شده، جداسازی می‌شوند.

کوره برده و با بالا آوردن چرخ‌های واگنت، کف کوره را هم به سطح ساختمان داخلی کوره می‌سازند پس ازآن که کف یا کوپل کوره، در کوره جای گرفته همبسته و ترکیبات نقره و سرب و عناصر دیگر که در آن وجود دارد را در وسط کوره گذاشته و به وسیله سوخت مایع و یا جامد گرما می‌دهند تا مواد ذوب شده به حالت مایع در آیند. در صورت وجود سرب، مس، آهن و روی، اکسید می‌شوند و به شکل کف روی سرب گداخته می‌ایستند که در نهایت به وسیله پارویی بیرون آورده می‌شوند. از دریچه مخصوصی، هوا را تحت فشار وارد کرده تا اینکه کاملاً سرب اکسید شود این عمل همچنان ادامه دارد تا اینکه تمام سرب تبخیر شده، از بین برود و هم بسته[۵] (آلیاژ طلا و نقره می‌باشد که تقریباً محصول نهایی در روش پیرومتالورژی محسوب می‌شود) طلا و نقره در کوپل باقی بماند که برای خالص کردن طلا از روش الکترولیز استفاده می‌شود و پس از خالص شدن به صورت شمش در می‌آید.

۱-۷ عملیات بر روی مخلوط‌های طلا :(در صورتیکه نقره آن کم است)

الف) حل کردن در سولفوریک اسید گرم: از سولفوریک اسید ۱۰ تا ۱۵ درصد استفاده می‌شود (دود حاصل از این روش سمی و خطرناک است).تمام اجسام به غیر از طلا و سیلیس در آن حل می‌شود.(اگر آرسنیک در رسوب باشد هنگام حل شدن تولید H_3As می‌کند که سمی و خطرناک است.) برای جداکردن سیلیس از طلا، مخلوط را با سدیم‌کربنات، پتاسیم نیترات و گاهی بوراکس حرارت می‌دهند تا سیلیس به صورت سرباره حذف شود و طلای خالص باقی بماند.

ب) روش laverner : ذوب با لیتارژ در کوره تشعشعی و کوپلاسیون سرب حاصل، (در کوره‌ای که تولید فلز یا آلیاژی از Au-Ag می‌کند) می‌باشد. در این روش لیتارژ هنگام ذوب احیا می‌شود و سرب مذاب فلزات قیمتی و خصوصاً طلا و نقره را در خود حل می‌کند. با کوپلاسیون آلیاژ Au-Ag-Pb ، سرب حذف می‌شود و Au-Ag باقی می‌ماند که این باقیمانده را به شکل آند ریخته و توسط الکترولیز خالص می‌کنند.

۱-۸ طلا:

۱-۸-۱ شبکه کریستالی طلا:

طلا در سیستم کوبیک، به صورت هگزا اکتاهدرال متبلور می‌شود و همچنین دارای شبکه کریستالی (FCC) نیز هست. بلورهای آن کمیاب و معمولاً سطوح بلورهای آن کشیدگی زیادی دارند و

[۵] Bullion

سطح بلورهای آن کدر و خم شده و سائیده می‌شود. رشد آن به صورت مویرگ‌ها، خزه ای، ورقه ای نازک و گاهی اوقات به صورت فندقی و همچنین ورقه‌های بسیار نازک مثل پوسته گندم و یا فلسی شکل می‌باشد. سطح شکست آن کنگره دار و قابل خمش و چکش‌خوار است.

۱-۸-۲ خواص فیزیکی طلا:

طلای خالص، بدون شک زیباترین فلز است. این فلز جلای فلزی و رنگ زرد (وقتی به صورت توده‌ای یافت شود، دارد.) سیاه، یاقوتی و زرشکی (وقتی به صورت عادی و پراکنده یافت شود) دارد. طلا چکش خوارترین فلز و رساناترین فلز بعد از نقره و مس می‌باشد که فلزی نرم و هادی بسیار خوب حرارت و الکتریسیته می‌باشد. علامت اتمی طلا Au می‌باشد. جرم اتمی طلا برابر با ۱۹۶/۹۶۶۵، عدد اتمی آن ۷۹ و شعاع اتمی آن ۱٤٤pm است. طلا به صورت یک فلز سنگین و نیز" نجیب "طبقه بندی شده و در تجارت، مهمترین فلز، در میان فلزات گرانبها تلقی می‌شود. فقط یک ایزوتوپ پایدار طلا وجود دارد و آن هم ایزوتوپ ۱۹۷ آن است. طلا دارای تقریباً ۱۸ ایزوتوپ رادیو اکتیو است. مهم‌ترین ایزوتوپ رادیواکتیو آن که در پزشکی استفاده می‌شود، ۱۹۵ است. بطوریکه اشعه های ε وγ منتشر کرده و نیمه عمر آن ۱۸۳ روز است. رنگ این فلز زرد سیر می‌باشد ولی وقتی از روشهای فراریت یا رسوبی بدست می‌آید به رنگ بنفش سیر، ارغوانی و یا قرمز سیر دیده می‌شود. نقطه ذوب طلا ۱۰٦٤/۱۸ درجه سانتیگراد و نقطه جوش آن ۲۸۰۸ درجه سانتیگراد و جرم حجمی آن g/cm^3 /۳۲ ۱۹می‌باشد. سختی این فلز بر حسب مقیاس موس برابر با ۳-۲/۵ و در مقایسه با دیگر فلزات از خاصیت مفتول شدن زیادتری برخوردار است. طلا را می‌توان به صورت ورقه‌ای با ضخامت mm ۰/۰۰۰۰۱و مفتولی به جرم ۰/۰۰۰۵ گرم در هر متر در آورد. آلیاژ آن با مس، قرمزتر، سخت تر و قابلیت گداخته شدن بیشتری تا طلای خالص را دارد. همانند دیگر فلزات گرانبها، طلا در ایران بر حسب "مثقال" که برابر ٤/٤ گرم است و در خارج با مقیاس تروی[٦] می‌سنجند که هر اونس تروی معادل با ۳۱/۱۰۳٤۳۱ گرم می‌باشد. از خواص منحصر به فرد طلا، قابلیت چکش‌خواری و رنگ زرد مایل به قرمز براق آن است. به وسیله الکترولیز، می‌توان صفحاتی به ضخامت ۰/۰۰۰۰۱ میلی‌متر، و با کشش می‌توان مفتولی به قطرmm ۰۰٦/ از طلا را بوجود آورد. ۱ گرم طلا تا طول ۳ کیلومتر قابل کشش است. مقدار ناچیزی از فلز سرب، بیسموت، تلور، سلنیم، آنتیموان، قلع و آلومینیوم، طلا را شکننده می‌کنند.

---

[٦] troy