

Плазмени технологии при преработване на руди и минерали

Георги Високов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. В обзора са разгледани теоретичните основи на плазмените и плазмохимичните технологии при преработването на руди и минерали до съответни елементи или концентрати. Формулират се основни определения и дефиниции на най-важните понятия на това ново направление в областта на високотемпературната термодинамика и равновесната и неравновесната химична кинетика.

Представени са някои теоретични пресмятания, априорни представи и собствени изследвания на автора (в неутрална, редукиционна, окислителна, азотна и редокси среди) относно плазмохимичното третиране и преработване на различни руди и минерали. Разгледано е моделирането на процесите на движение, нагряване, стапяне и изпарение на частички с микронни размери в условията на високоенталпийни плазмени струи. Анализирани са особеностите на квазиравновесните и неравновесни плазмохимични процеси за получаване на метали и техни съединения от руди и/или минерали в термодинамичен, кинетичен и технологичен аспект. Отделено е внимание и на структурните, фазовите и морфологичните особености на продуктите след плазмохимичното преработване.

PLASMA TECHNOLOGIES IN PROCESSING OF ORES AND MINERALS

ABSTRACT. This review presents the theoretical basis of plasma and plasmachemical technologies for processing of ores and minerals of elements and concentrates. Basic definitions for important concepts of this new direction in field of hightemperature thermodynamic and equilibrium or nonequilibrium chemical kinetic are formulated.

Some theoretical calculations, appriory considerations and author's investigations (in neutral, reduction, oxidation, nitrogen and redox media) concerning plasmachemical treatment and processing of different ores and minerals are presented. Modeling of processes of moving, heating, melting and vaporization of particles with micron sizes in a condition of high enthalpy plasma jets are considered. Peculiarities of quasiequilibrium and nonequilibrium plasmachemical processes for obtaining of metals and their compositions from ores and/or minerals in thermodynamic, kinetic and technological aspect are analyzed. Structural, phase and morphological peculiarities of products after plasmachemical treatment are discussed.

Въведение

Плазмените процеси (ПП) освен в химическата промишленост (неорганична и органична) са достатъчно разпространени и в металургията (Високов, Г.П. 1984, Високов, Г.П. 1987, Високов, Г.П. и П.С. Пиргов 1998, Дембовский, В. 1981, Моссэ, А.Л., И.С. Буров 1980, Оулет и др. 1983, Пархоменко, В.Д. и др. 1991, Цветков, Ю.В. и С.А. Панфилов. 1980, Polak, L.S. and Yu. A. Lebedev. 1998, Vissokov, G., M. Panayotova. 2003) – за получаване на метали от руди, минерали или оксиди чрез редуциране или термично разлагане; получаване на интерметални съединения и композиционни материали; синтезиране на финодисперси (вискодисперсни) и ултрадисперсни (нано-) прахове със специфични свойства; сфероидизиране на труднотопими вещества, нанасяне на топло- и корозионноустойчиви покрития, заваряване, рязане, разпрашаване, стапяне и претопяване; получаване на монокристали; модифициране на повърхности: азотиране, циментация, алитиране, бориране, титаниране и мн. др.

Плазмохимичните процеси (ПХП) са особено перспективни за промишлена реализация, когато (Високов, Г.П. 1984, Високов, Г.П. и П.С. Пиргов 1998): 1) равновесието е изтеглено в посока на високите температури; 2) скоростта рязко нараства с повишаване на температурата; 3) високи добиви се постигат при неравновесни условия; 4) използват се широкодостъпни, евтини, с непостоянен състав суровини, чието преработване по традиционните методи често пъти е икономически нецелесъобразно или дори невъзможно.

Термичната плазма (ТП) може да бъде използвана за провеждане на химични реакции като източник на топлинна енергия и като извънредно реактивоспособен агент.

ПХП имат следните предимства (Високов, Г.П. 1984, Високов, Г.П. и П.С. Пиргов 1998): 1) Те протичат в условията на големи специфични енталпии и високи температури с високи скорости (време на контактуване $\approx 10^{-3}$ – 10^{-5} s). С това е свързана високата степен на миниатюризация на ПХ техника. 2) Повечето ПХП, представляващи интерес за практиката, протичат едностайно. 3) ПХП са практически нечувствителни към примесите в изходните суровини (например при ПХ пиролиз на природен газ се допускат примеси към метана 20 - 25%, при получаване на чисти метали от минерали съставът на минералите не е от съществено значение и т. н.). 4) При ПХП се създава възможност за използване на труднопреработваема, но достатъчно широкодостъпна суровина (въздух - за получаване на азотен оксид, а от него - азотна киселина; природен газ - за получаване на ацетилен; труднотопими металсъдържащи минерали - за получаване на метали, соли и оксиди и т. н.). Отпадъците от редица химични и металургични производства могат да бъдат използвани като изходна суровина за някои ПХП. 5) ПХП добре се моделират, оптимизират и управляват. 6) За управляването на ПХП могат да се прилагат газо- и електродинамични методи, при което се намаляват изискванията за топлоустойчивост на конструкционните материали на ПХ агрегат. 7) ПХП имат големи перспективи при получаването на чисти и свръхчисти вещества, тъй като в безелектродна ВЧИ - и

СВЧ-плазма чистотата на продуктите се определя само от чистотата на изходната суровина и дори може да бъде повишена през време на процеса. 8) Важно предимство на ПХП е еднотипността на тяхното технологично организиране. Принципната схема на един ПХ агрегат за каквото и да е ПХП, е: генератор на плазмата (плазмотрон), смесител, плазмохимичен реактор (ПХР), закаляващо устройство и устройство за разделяне и събиране на крайните продукти.

Ако обаче броят на изучените реакции се съпостави с процесите, реализирани в промишлеността, не може да не се забележи съществена диспропорция между тези две групи. Плазмената техника недостатъчно бързо се внедрява в практиката независимо от големите ѝ потенциални възможности и предимства пред съществуващите технологии, които бяха изброени. От предимствата още веднъж ще изтъкнем замената на „процеса във вана“ с „процес в поток“, термичното обработване без големи капитални разходи, равномерността на обработването, бързото нагряване до високи температури и бързото закаляване на продуктите на реакцията, възможността да се извършват високотемпературни процеси в реактор със студени стени, прилагането на газодинамично и електромагнитно смесване на реагиращите вещества, намаляването на габаритите и корозията на ПХР и т. н.

Причините за недостатъчно високите темпове на реализиране на ПП в промишлеността са следните (Високов, Г.П. 1984, Високов, Г.П. и П.С. Пиргов 1998): 1) Възможността за прилагане на алтернативни, традиционни методи за получаване на желаната продукция. Много често предлаганият за реализиране ПП се основава на същите химични реакции, както и съществуващият метод, но се отличава от него само по начина на нагряване (зона на електричен разряд или плазмен топлоносител). При това броят на технологичните операции при получаване на нужното вещество често не се съкращават, не се намалява понякога и разходът на електроенергия за единица продукт, а миниатюризацията на ПХР се съпровожда с появата на обемисти, понякога не много сигурни електрически съоръжения, сложна система за пречистване на газовете от аерозоли, която лошо се съгласува със спецификата на плазмоструйния процес. В крайна сметка много често се създава положение, при което плазменият вариант на процеса се намира на едно и също икономическо ниво с традиционния вариант, когато понастоящем се води борба за всеки киловатчас електроенергия и всеки процент повишен добив. Необходимо е да се разработват такива ПП, при които се получават вещества с качествено нови, полезни за стопанството свойства, вещества, които по традиционните методи не са получавани и не могат да се получат, като например нанодисперсни прахове (НДП) на метали, оксиди, нитриди, карбиди, бориди, катализатори, пигменти, композиционни материали и др. Необходимо е да се разработват такива ПП, които не се припокриват с вече съществуващите технологични схеми за получаване на различни вещества, а да изменят технологичните принципи и да доведат до рязко намаляване на броя на технологичните операции, да доближават енергийните разходи на процеса до теоретичните стойности, да се миниатюризира не само реакторът, но и източникът на електрическо захранване при пълна автоматизация и компютризация на процеса. 2) Недостатъчно високо развитата техника за генериране на плазма, макар да има частични успехи в

разработването и създаването на електрически източници за захранване на плазмотрони - електродъгови и височестотни индукционни (ВЧИ). 3) Незадоволителните технически решения на процесите за смесване на веществата с плазмата, дозирането на кондензираната фаза, закаляването на продуктите на реакцията, пречистването на газовете от прах, утилизацията на топлината. 4) Недостатъчните данни за топлофизичните, електрофизичните и термодинамичните параметри на веществата в областта на плазмените температури, липсата или несигурността на кинетичните константи на елементарните реакции. Тези обстоятелства влияят върху резултатите от проектирането и изчисляването на плазмената апаратура и понякога стават причина процесът да се реализира в условия, далечни от оптималните. 5) Липсата на сигурни методи за диагностика на химически реагиращата високотемпературна среда, особено в случаите, когато в резултат на реакцията се отделя кондензирана фаза. 6) Незадоволителната връзка на изследователите в областта на химията и физиката на плазмата с технолозите и специалистите, работещи върху електротермичните съоръжения, липсата на координация при провеждането на фундаментални и приложни изследвания.

Термично разлагане на руди, минерали, оксиди и други съединения

Високите енергийни параметри на ТП са решаваща предпоставка за осъществяване на редица процеси на термично разлагане на някои природни суровини – руди и минерали. Продукти на термичната деструкция са най-вече оксиди или метали, чиято по-нататъшна преработка се осъществява по класическите традиционни методи.

Първите съобщения в патентната и периодичната литература за използване на плазменото нагряване за разделяне на руди, които съдържат илменит, берил, евксенит и циркон са от периода 1956 – 1963 г. (Високов 1987). Изходните материали се обработват на плазмена инсталация, съоръжена с електродъгов плазмотрон, чийто катод е изработен от графит, а анодът – от пресована шихта, състояща се от смес на преработвания материал и такова количество графит, което да осигури достатъчна електропроводност. При запалване на дъга с висока интензивност между графитовия катод и изразходвания се анод материалът на последния се изпарява. При охлаждане във въздушна атмосфера (свободно охлаждане без закаляване или при закаляване с въздух) се получават титанови, берилиеви, алуминиеви, силициеви, уранови и циркониеви оксиди като смес от нанодисперсни оксиди с размери на частиците 35 – 50 nm. Разделянето на крайните продукти се осъществява посредством фракционна кондензация или при вторично обработване на оксидите по хидрометалургичния метод. Интересно е да се отбележи, че обработените в плазмени условия оксиди притежават висока химична активност, поради което сравнително лесно се разтварят в студена солна киселина.

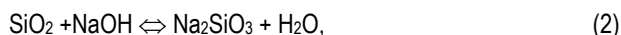
Аналогичен процес се реализира и във ВЧИ плазма. При разлагане на гореспоменатите руди във ВЧИ ПХР, при сравнително малък разход на обработвания материал и достатъчна мощност на плазмотрона се получават добри резултати за разделяне на смесени оксиди.

Получаване на циркониев диоксид чрез разлагане на циркон

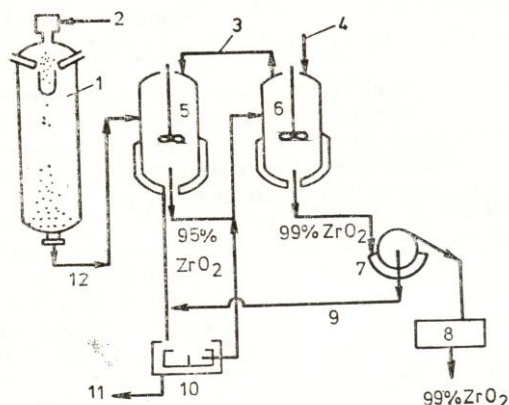
Американската фирма ТАФА (филиал на фирмата Йонарк Сметлърс) разработи промишлен процес за получаване на ZrO_2 , в основата на който стои плазменото обработване на минерала циркон (Високов 1987). При температури над 2050 К кристалната решетка на циркона се разрушава, като се образува механична смес от самостоятелни оксиди по уравнението:



По-нататък тази смес се обработва с $NaOH$, при което се получава разтворима сол:



а циркониевият диоксид остава в утайката. Принципната схема на процеса е показана на фиг. 1, а на фиг. 2 – схемата на ПХР.

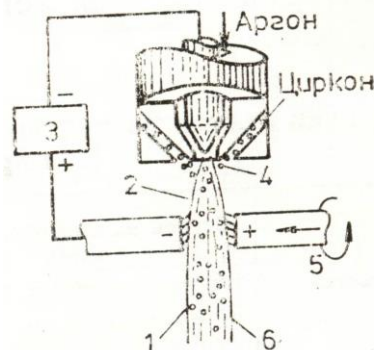


Фиг. 1. Принципна схема на процеса на получаване на ZrO_2 от минерала циркон

1 – ПХР; 2 – подаване на цирконовия пясък; 3 – използвана $NaOH$; 4 – свежа $NaOH$; 5 – първи стадий на излугване; 6 – втори стадий на излугване; 7 – промиване; 8 – сушене; 9 – филтрувални води; 10 – центрофуга; 11 – бистър разтвор на натриев силикат; 12 – термично разложен циркон

Същността на ПХП се състои в едностепенно дисоцииране на циркона по реакция (1), след което следва излугване и центрофугиране (фиг. 1). Плазмената струя се създава от електрическа дъга между въглеродни електроди. Цирконът, наситнен до размери на частичките 20 – 200 μm , се вкарва в плазмената струя, дисоциира се, охлажда се, в резултат на което се получават ZrO_2 и SiO_2 . Основните технологични задачи са да се предотврати отлагането на силиций в района на подаването на суровината в ПХР, отлагането на ZrO_2 върху студените стени на ПХР и да се осигури разделяне на силициевия от циркониевия диоксид. Изходният материал се подава в смесителната камера през отвори, разположени около вертикално поставен катод. След това суровината преминава край хоризонтални аноди, изработени като три симетрични двойки електроди (фиг. 2). По време на работа непрекъснато автоматично се подават навътре, за да се компенсира скъсяването им. Тази конструкция позволява около 30 – 50 % от изразходваната енергия да се използва за нагряване на частичките. Равномерното подаване на циркона позволява да се

поддържа постоянно налягане в плазмата и постоянна скорост на получаване на крайните продукти. Флуктуациите на налягането предизвикват периодично издухване на суровината от плазмата, като по такъв начин намаляват ефективността на процеса. За равномерно подаване на прахообразната суровина е монтирана специална винтова система, която транспортира праха на суровината върху въртящ се диск.



Фиг. 2. Схема на ПХР

1 – продукти на дисоциация на циркона, CO_2 , N_2 , O_2 ; 2 – катодна струя; 3 – източник на захранване; 4 – подаване на суровината; 5 – въртящи се графитови аноди; 6 – плазмена струя

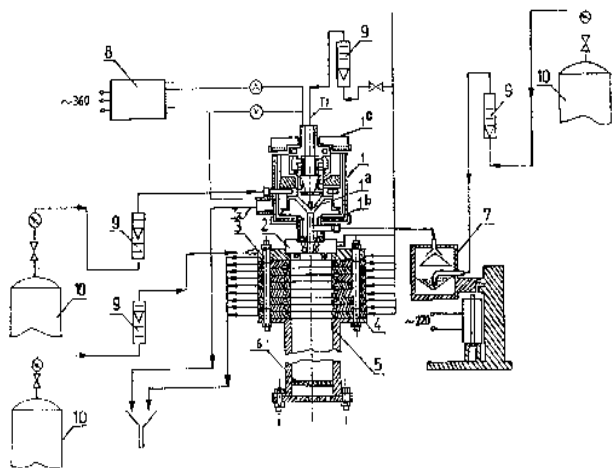
Силициевият диоксид се отделя посредством разтваряне на продукта в $NaOH$ по реакция (2) и след това се центрофугира.

Получаване на молибден от молибденови съединения и концентрати

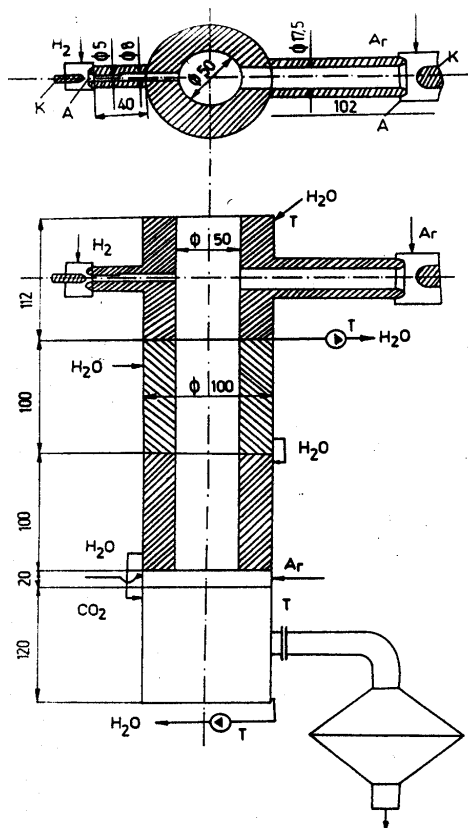
Разработен е 3D модел за аксиално-симетричен ПХР за движение, нагряване, стапяне и изпарение на частички (Mo , MoO_2 , MoO_3 , MoS_2) с микронни размери в ПХР със "студени" ($T_{ст} \approx 500$ К) или "горещи" ($T_{ст} \approx 1500$ К) стени (Високов, Г.П. и П.С. Пиргов 1998). Определени са температурния профил на плазматрона и ПХР. Показано и че частички със среден диаметър под 20 μm от използвания молибденитов концентрат се изпаряват напълно в ПХР с дължина 10 см на лабораторна (Фиг. 3) и полупромишлена (Фиг. 4) плазмохимична инсталация (Vissokov, G., M. Pananayotova. 2003).

Електронномикроскопските снимки показват, че нанодисперсните молибденови частички са сфероидизирани, като диаметърът им не надвишава 50 nm (Фиг. 5).

Разработеният от нас метод за получаване на нанодисперсен молибден (Vissokov, G., M. Pananayotova. 2003) представлява интерес за праховата металургия при изработването на различни видове контактори на база Mo , ако се използва като изходна суровина концентрат с подходящ химичен състав, осигурява се максимално висока степен на редукция и се вземат мерки за предотвратяване на изключително високата пирофорност на продукта. Редуцирането на молибденитови концентрати с C_4H_{10} , NH_3 или H_2 в плазмени условия дава възможност да се достигне степен на редукция до 93 % и получаване на НДП със специфична повърхност от 18 до 380 m^2/g (надвишаваща многократно тази на подобните продукти, получавани по класическите методи), при размери на нанодисперсните частички под 50 nm, регулируеми в зависимост от параметрите на плазмохимичния процес.

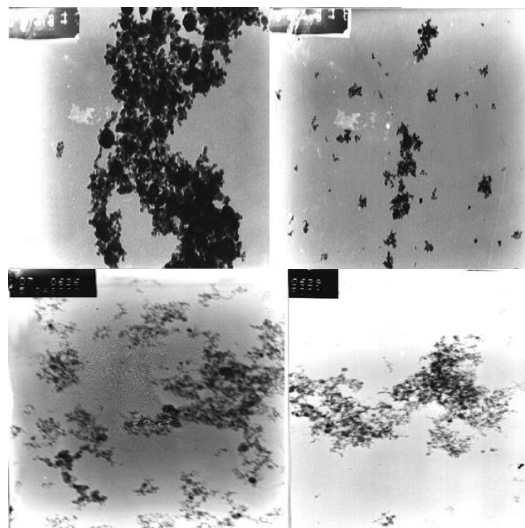


Фиг. 3. Схема на лабораторна плазмохимична инсталация 1 – електродъгов постояннотоков плазмотрон; 1^а – катод от ториран волфрам; 1^б – меден водоохлаждаем анод; 1^с – пластмасова регулираща шайба; 2 – ПХР; 3 – закаляващо устройство; 4 – водоохлаждани медни секции на закаляващото устройство; 5 – прахоуловителна камера; 6 – филтър; 7 – вибрационно прахоподаващо устройство (при нужда се използва и прахоподаващо устройство вибрационен бутален тип; 8 – токоизправител; 9 – разходомери за плазмобразуващ, прахосенещ и закаляващ газ и вода; 10 – бутилки с газ – плазмобразуващ, прахосенещ и за закаляване; Т₁ – температура на входящата вода; Т₂ – температура на изходящата вода

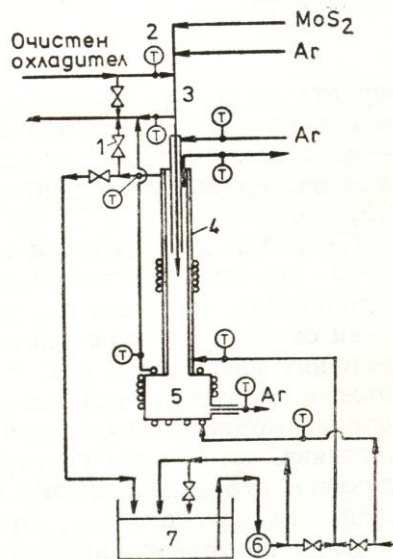


Фиг. 4. Схема на полупромишления плазмохимичен агрегат за редуциране на молибденов концентрат

Освен чрез редуциране са провеждани и изследвания за термично разлагане на MoS_2 в условията на ВЧИ термична плазма (Фиг. 6) (Високов, Г.П. 1987).



Фиг. 5. Електронномикроскопски снимки на редуциран с амониак (а – увеличение 98 000 пъти, 1 mm = 10.5 nm; б – увеличение 38 000 пъти, 1 mm = 28 nm) и с водород (в – увеличение 98 000 пъти, 1 mm = 10.5 nm; г – увеличение 38 000 пъти, 1 mm = 28 nm) молибденитов



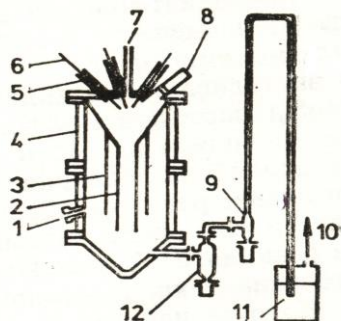
Фиг. 6. Схема на ВЧИ инсталация за термично разлагане на MoS_2

Технологичните параметри на плазмохимичната инсталация са следните: разход на плазмобразуващ газ аргон – $1.06 \text{ m}^3/\text{h}$ напрежение – 6.8 kV , ток – 1.25 A , мощност – 8.5 kW , честота – 4 MHz . Степента на превръщане на MoS_2 се намира в правопрпорционална зависимост от енергията, внесена в плазмата и достига до 70 % при разход на молибденит 0.5 g/h и мощност на плазмената струя 5.15 kW . Що се отнася до икономическата целесъобразност на този процес, необходимо е да се работи още за повишаване на мощността на инсталацията.

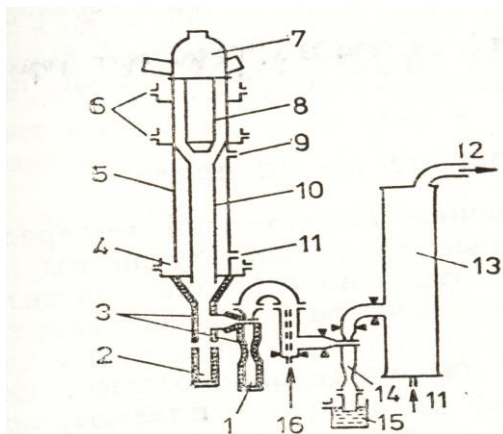
Използване са и по-мощни електродъгови инсталации за термично деструктуриране на молибденит (фиг. 7 и 8). Електродъговият плазмотрон с мощност 100 kW се състои от 3 подвижни електрода, разположени около централната ос (фиг. 7). По такъв начин се генерира плазма с по-голям обем, а к.п.д. достига до 95 %. Инсталация с преминаваща постояннотокова дъга е разработена в Националната физическа лаборатория на Великобритания (фиг. 8). Консумираната мощност е около 65 kW , а 70 % от нея се

поема от електрическата дъга. Степента на превръщане обаче е сравнително ниска – 48 – 58 % при специфични енергийни разходи 36 – 43.2. MJ/kg Mo.

Канадската фирма Норанда, която произвежда около 30 % от световното производство на молибдена, също разработи плазмохимичен процес за пряко дисоцииране на молибденит.



Фиг. 7. Схема на трифазна триелектродна електродъгова инсталация 1 – наблюдателно прозрачно; 2, 3 – топлинни екрани с диаметър 100 и 200 mm; 4 – ПХР с диаметър 400 mm; 5 – щуцер за електрода; 6 – електрод; 7 – щуцер за подаване на суровината; 8 – малък постояннотоков плазмотрон за запалване на разряда; 9 – втори циклон с диаметър 35 mm; 10 – изсмукване на газовете; 11 – вода; 12 – първи циклон с диаметър 70 mm



Фиг. 8. Плазмохимичен агрегат с постояннотокова дъга, която гори между неутрален катод и три анодни плазмени струи 1 – сборник на циклона; 2 – сборник преди циклона; 3 – топлинна изолация; 4 – азбест; 5 – външна тръба от неръждаема стомана; 6 – изход на охлаждащия въздух; 7 – електродъгов нагревател на частичките; 8 – цилиндричен молибденов екран с вътрешен диаметър 230 mm и дължина 530 mm; 11 – изход на аргона; 12 – отработени газове; 13 – резервоар за аргон; 14 – мокър циклон; 15 – изпускане на вода; 16 – охлаждане (оросяване с вода)

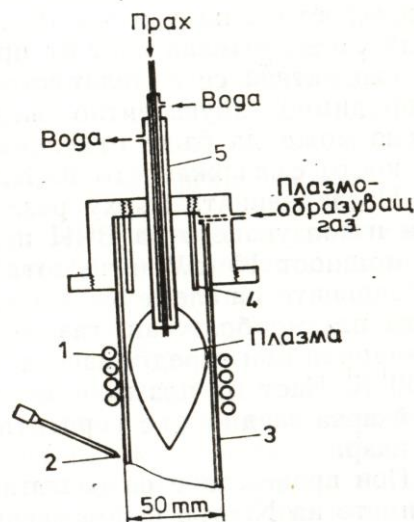
Плазмохимично разлагане на руди и минерали

Голям брой от процесите за термично разлагане на минерали и руди в плазмени условия се основават на използването на дъги с висока интензивност (Високов, Г.П. 1987). При плазмохимичното разлагане рудата се смесва с определено количество въглерод за осигуряване на електропроводност. От тази смес се изработва изразходващ се анод на плазмотрона или като анод се използва графитов тигел със свободно насипана шихта. В плазмената струя се съдържат пари на елементите, които изграждат суровината и въглерод. При кондензиране във въздушна атмос-

фера се образува смес от оксиди. Разделянето на оксидите се осъществява чрез фракционна кондензация или при вторично обработване на смес от оксидите. Процесът е разработен върху минерали като берил, каолин, родонит, циркон и др (Високов, Г.П. 198).

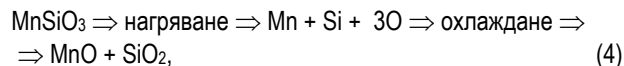
Получаване на манганов оксид от родонит

Манганов оксид се получава чрез разлагане на манганов силикат (родонит) – $MnSiO_3$, по реакцията, която е подобна на реакция (1). Родонидът е стабилно труднотопимо съединение със съдържание на Mn около 42 mass%. На фиг. 9 е показана принципна схема на опитна плазмохимична инсталация за разлагане на родонит (фиг. 9).



Фиг. 9. Принципна схема на ВЧИ инсталация за разлагане на родонит 1 – индуктор на високочестотния генератор; 2 – бобина на Тесла; 3 – кварцов кожух; 4 – месингова тръба; 5 – водоохлаждана тръба

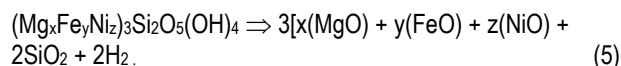
Мощността на плазмотрона е 30 kW, а честотата 4.4 – 5 MHz при к.п.д. 55 %. Родонидът се дисоциира при 1564 K на SiO_2 и обогатена на MnO маса, която при 1973 K напълно се стапя. Може да се предложи следният механизъм на термично разлагане на родонидата:



според който в зоната на разряда се осъществява атомизиране на изходния материал, а в охлажданата зона на изход от ПХР – рекомбинация и кондензация.

Получаване на никел от серпентин и други суровини

Серпентинът е сравнително беден на никел минерал ($\approx 0.25 \% Ni$), чиято обща формула е $(Mg_xFe_yNi_z)_3Si_2O_5(OH)_4$. Световните запаси от серпентин са големи. Например само в Североизточен Квебек (Канада) е открито местонахождение с капацитет няколко билиона тона. Според нас вероятният механизъм на термичното разлагане на този минерал се описва от уравнението:



Ако това е така, то Ni може да се отдели от продуктите на разлагането с получаване на никелов карбонил $\text{Ni}(\text{CO})_4$. Обаче в действителност значителна част от продуктите на термичното разлагане на серпентина се отделят като шпинел $[\text{MO}(\text{Fe}_2\text{O}_3)]$, където М е предимно двувалентно желязо. Тази фаза е феромагнитна и лесно може да бъде отделена от другите продукти, в резултат на което съдържанието на Ni може да се повиши десетина пъти. Изследванията са проведени на ВЧИ плазмохимична инсталация, подобна на тази показана на фиг. 9.

Като изходна суровина се използват и кекове, получени при процеса на излугване под налягане на никел-кобалтови концентрати.

Фирмата "Бука Минералс" (Австралия) съвместно с американската фирма "Тафа Дивижън" преработва сулфидни никелови руди, получени от местонаходища в Австралия. Според разработената технология сулфидната желязо-никелова руда се обработва в плазмени условия с цел пряко разделяне на фероникела и елементната сяра. Използват се плазмени инсталации и оборудване на фирмата "Йонарк Сметлърс" (САЩ).

Получаване на труднотопими цветни и редки метали

Английската фирма "Тетроникс рисъч енд дивелопмънт корпорейшън" разработи процеси в плазмени условия за разлагане на редица минерали като илменит, кианит, азбест, оливин, сподумен еувксенит, мулит, доломит, берил, фелдшпат, молибденит, циркон, никелови латерити и някои видове медни руди. Процесите са изпробвани в промишлени условия и фирмата продава лиценз.

Американската фирма "Йонарк Сметлърс" разработи метод и инсталация за плазмохимично преработване на материали, съдържащи злато и платина.

Разработен е метод за получаване на труднотопими метали (W, Mo, Nb, Ti, Zr, Ta) чрез разлагане на хлориди в условията на тлеещ разряд, който се възбужда непосредствено в парите на хлорида, или в смес на парите на хлорида с водород.

Провеждат се и изследвания за термично деструктиране на такива стабилни оксиди като Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 и MgO в плазмени условия с оглед получаване на съответните химични елементи.

Заклучение

Плазмохимичният метод при преработване на руди и минерали до оксиди или до съответните химични елементи намира все по широко приложение в промишлената практика. Отчитайки неоспоримите предимства на термичната плазма за високоенергийно преработване на различни руди или минерали, особено на бедни руди на труднотопими минерали, може да се очаква все по-широкото ѝ приложение в преработвателната промишленост.

Литература

- Високов, Г.П. 1984. *Приложна плазмохимия, ч. I. Приложение на нискотемпературната плазма в неорганичната химична технология*. С., Техника, 295 стр.
- Високов, Г.П. 1987. *Приложна плазмохимия, ч. II. Приложение на нискотемпературната плазма в органичната химична технология и металургията*. С., Техника, 295 стр.
- Високов, Г.П., П.С. Пиргов, 1998. *Ултрадисперсни прахове (плазмохимично получаване и свойства)*. С., Полипринт, 396 стр.
- Дембовский, В. 1981. *Плазменная металлургия*. М., Металлургия, 280 стр.
- Моссэ, А.Л., И.С. Буров 1980 *Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах*. Минск, Наука и техника, 208 стр.
- Оулет, Р., М. Баръбе, П. Черемисинофф. 1983.. *Технологическое применение низкотемпературной плазмы*. М. Энергоатомиздат, 205 стр.
- Пархоменко, В.Д., П.Н. Цыбулев, Ю.И. Краснокутский. 1991. *Технология плазмохимических производств*. Киев, Вища школа, 225 стр.
- Цветков, Ю.В., С.А. Панфилов. 1980. *Низкотемпературная плазма в процессах восстановления*. М., Наука, 360 стр.
- Polak, L.S., Yu. A. Lebedev. 1998. *Plasma Chemistry*, Cambridge, Cambridge Int. Sci. Publishing, 359 p.
- Vissokov, G., M. Pananayotova. 2003. *Plasma-chemical processing of minerals and industrial waste*, Annual of Univ. of Mining and Geology "St. Iv. Rilski", Part II, Mining and Mineral Processing, Vol. 46, p. 131-135.