

УДК 662.216.5:546.26

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАВЛЕНИЯ БАЗАЛЬТА И СМЕСИ БАЗАЛЬТО-ШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ НА ПЛАЗМЕННОМ РЕАКТОРЕ

С.Х. Акназаров, В.Е. Мессерле, В.Г. Лукьященко, Н.Ю. Головченко,
К.А. Умбеткалиев, О.Ю. Головченко

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан.

²Институт проблем горения, г. Алматы, Казахстан.

Аннотация

Представлены лабораторные испытания пилотной установки, проведены экспериментальные исследования и получены образцы готовой продукции. Экспериментальные исследования плавки базальта Актюбинского месторождения с целью получения образцов готовой продукции в виде базальтового волокна из струи расплава и смеси базальто-шлаковых отходов с монохроматным шламом позволили перевести токсичный шестивалентный хром в трёхвалентный безопасный. Произведено сравнение полученных экспериментальных и расчётных данных, что позволило скорректировать расчётные модели и технологические параметры процесса переработки минеральных веществ. Получены готовые образцы базальтового волокна.

Ключевые слова: электромагнитный реактор, базальт, смеси, шлак, термодинамический анализ, технологические параметры.

Введение

На лабораторном электро-магнитном реакторе (ЭМР) проведены экспериментальные исследования по плавлению базальта Актюбинского месторождения и шихты с добавлением к базальту оксида кальция (CaO) и базальто-шлаковых отходов металлургического комбината г. Тимиртау с получением струи расплава, вытекающей из лётки. Плавки проводились с использованием двух источников питания (ИП): ИП1 - переменного трёхфазного регулируемого тока, включенного через электромагнитные катушки в цепь силовых электродов и ИП2 - дополнительного выпрямленного регулируемого тока, включенного в цепь: центральный электрод – расплав – лётка. Мощность, выделяемая в ЭМР от ИП1, составляла порядка 80-86 кВт, а мощность от ИП2 - варьировалась от 0 до 12 кВт. Подготовка к экспериментальным плавкам на ЭМР осуществлялась следующим образом: центральный электрод опускался до лётки выпуска расплава и затворял её; силовые электроды поднимались на 100÷200 мм над уровнем дна плавильной камеры; до их концов производилась засыпка шихты; и на её поверхности между концами электродов прокладывались графитовые дорожки, которые служат проводниками для первоначального протекания токов

при подаче напряжения на ЭМР; далее подсыпалась шихта до уровня верхней плоскости электромагнита реактора; разогрев ЭМР и набор ванны расплава осуществляется ИП1 с периодической подсыпкой шихты; затем поднимали центральный электрод, освобождали лётку, отключали ИП1, прогревали нижнюю область ванны расплава с помощью ИП2 и выводили расплав в виде струи; в некоторых случаях догревали расплав в ЭМР с помощью ИП1, отключив при этом ИП2.

Эксперимент

В таблице 1 приведен технологический регламент плавки базальта с его подшировкой базальто-шлаковыми отходами металлургического комбината г. Тимиртау в количестве 15 %. Из технологического регламента видно, что основным параметром, измеряемым в ходе проведения экспериментов, служит температура струи расплава.

Экспериментальные исследования базальта показали, что температура струи должна соответствовать 1300 °С. Погрешность измерения температуры зависит от интервала температур, в котором производится измерение. Так при измерении температуры до 1500 °С погрешность составляет до ±0,5 % от измеряемой величины, в интервале 1500-2000 °С - ±1 %, при измерении свыше 2000 °С погрешность возрастает до ±2 % от измеряемой величины температуры. Разрешение по температуре не хуже 1 °С.

Таблица 1 - Технический регламент плавления базальта Актюбинского месторождения с подшихтовкой базальто-шлаковыми отходами металлургического комбината г. Темиртау в количестве 15%

Время, мин	J[A]	U[B]	t лётки, °C	t шамот, °C	Примечания
0		~310	17	18	
10	210/200/200	300	18	18	Режим стабилизировался, нет больших колебаний тока
20	205/205/200	240	27	19	
30	200/205/195	210	48	21	Дали воду на секции
42	205/200/200	205	79	49	
1:00	210/200/200	200	92	70	
1:30	210/205/210	190	185	89	
2:00	210/200/205	≤190	377	150	Подъём Эц на 40 мм
2:15	=150	=140	389	159	Переход на «нижний» ИП
2:30	↑200	170	495	480	Лётка малиновая; t°505(пирометр)
2:35	205/200/210	~220	770	490	Переход на ИП~ с поднятием эл-дов на 100 мм
2:45	=200	=160	778	494	Переход к ИП= («нижний»)
2:50			807	505	Струя ~1110÷1050
3:00	↓=100	=140			t струи =1420°C
3:10	↓=50	100			t струи =1350°C
3:20	↑120	170			t струи =1450°C
3:30	↑150	210		810	t струи =1553°C
3:40	↓50	98		855	t струи =1410°C
	↑100	145			Слив расплава

Экспериментальные исследования смеси базальто-шлаковых отходов показали, что температура струи значительно ниже и соответствует 1110 °C. Погрешность измерения температуры такая же, как в эксперименте с базальтом и соответствует $\pm 0,5 \pm 1$ %.

Таким образом, для оптимизации технологических параметров реактора были выполнены экспериментальные исследования по плавлению базальта и смеси базальто-шлаковых отходов. По приведённым экспериментальным результатам плавок показана эффективность применения дополнительного ИП2, с помощью которого возможно регулировать температуру истекающей струи в необходимом диапазоне для эффективного раздува расплава в минеральное волокно. Так же подтверждены расчётные показатели по уменьшению температуры плавления базальта с его подшихтовкой. Так начальная температура струи чистого базальта превысила 1300 °C, а с подшихтовкой 15 % металлургическим базальто-шлаковым отходами она составила 1050 – 1110 °C. Температура поверхности расплава в реакторе и температура истекающей струи за-

мерялась с помощью оптического пирометра марки ULTIMAX (infrared thermometer) фирмы IRCON (США).

На основе результатов многочисленных наладочных экспериментов по плавке минеральных веществ, включая базальт и хромовый шлам, на универсальном трёхфазном электромагнитном реакторе были определены пути улучшения его технологических параметров.

С этой целью были разработаны и доведены до рабочих чертежей и изделий модернизированная крышка реактора с одним центральным электродом и тремя рабочими электродами, расположенными под углом 12,5° относительно оси плавильной камеры, что позволило сократить время выхода реактора с холодного до рабочего, и водоохлаждаемый блок сборки лётки выпуска расплава со вставкой из силицированного графита, диаметром 8 мм, с увеличением срока её службы в 2-3 раза. Также были определены технологические характеристики реактора:

- Напряжение питания, В - 380, трехфазное;
- Род тока – переменный;

- Сила тока в режиме разогрева, А - 50-120;
в рабочем режиме, А - 300-350;
- Номинальная электрическая мощность, кВт – 150;
- Максимальная электрическая мощность, кВт – 200;
- Мощность дополнительного источника, кВт – 20;
- Диаметр фракции используемой шихты, мм - до 7;
- Производительность по расплаву, кг/ч - 150-200;
- Охлаждение водяное, принудительное с замкнутой циркуляцией воды, с расходом при давлении 2,5-3 атм.;
- Суммарный износ силовых электродов, кг/ч - около 0,6;
- Диаметр силовых электродов, мм - 75-100;
- Удельные энергозатраты кВт/ч на 1 кг расплава - 0,8-1,0.

Изготовлена пилотная установка, включающая электромагнитный реактор (ЭМР), эстакаду и питатель минерального сырья. Электромагнитный реактор (рисунок 11) содержит плавильную камеру, состоящую из двенадцати продольных нержавеющей изолированных и водоохлаждаемых секций, крышку реактора с механизмами подачи и токоподвода их электродов, дно реактора с устройством выпуска расплава и трёхфазный электромагнит поперечного переменного магнитного поля.

Изготовлены силовой щит электропитания и управления реактора, трёхфазный регулируемый тиристорный источник питания ЭМР на токи до 500А, подключенный соответственно через электромагнитные катушки к силовым электродам и дополнительный регулируемый тиристорный выпрямитель, подключенный к центральному электроду и летке.

Монтаж электропитания электромагнитного реактора выполнен от трех электрических систем: двух тиристорных систем управления питающих силовые цепи реактора и блока питания управления подачи электродов и вспомогательными цепями. Тиристорный регулятор запитан от разделительного трансформатора мощностью 250 кВА, с изолированной нейтралью для повышения электробезопасности при эксплуатации пилотной установки.

На рисунке 1 представлена пилотная установка с электромагнитным реактором, установленная на эстакаде в рабочем помещении.

Выполнен монтаж пилотной установки с дополнительным источником, который также запитан от разделительного трансформатора и подключен между центральным электродом реактора “искусственная средняя точка” и леткой выпуска расплава, что создает цепь протекания тока через узел выпуска расплава, изменяя электрическую мощность, прилегающую к вытекающему объему расплава, что дает возможность менять и стабилизировать температуру вытекающей струи.

Для завершения монтажа пилотной установки от входного силового щита проложен силовой кабель к разделительному трансформатору 250 кВА с изолированной нейтралью, от которого, через силовой щит электропитания, запитаны основной трёх-фазный и дополнительный постоянного тока источники питания, от которых подаётся напряжение на ЭМР. Питание двигателей вспомогательных устройств (вентиляция, водяные насосы, механизмы подачи электродов, вентиляция радиатора градильни, прибор измерения температуры термопарами и т.д.) подключены к сети 220/380В от трансформатора с заземлённой нейтралью.

В целях экономии воды охлаждение всех узлов реактора и тиристорного источника питания осуществляется от оборотного водоснабжения. Система оборотного водоснабжения представляет собой две ёмкости объёмом 2 м³ с циркуляцией воды от двух водяных насосов и коллекторов с запорными элементами подачи и очистного сооружения в виде слива воды. В линию подачи воды, с целью её охлаждения, врезан радиатор с дутьевым вентилятором.

Установка плазменной технологии получения теплоизоляционных и других строительных материалов из минерального и техногенного сырья на базе управляемого трёхфазного электромагнитного реактора оснащена контрольно-измерительными приборами (КИП) (амперметры, вольтметры, ротаметры расхода воды и воздуха, приборы измерения температуры термопарами). Основным параметром, измеряемым в ходе проведения экспериментов, служит температура струи расплава. Для проведения высокотемпературных измерений в электромагнитном реакторе используется пирометрический термометр Igcon

Ultrimax Plus UX10P для измерения температуры от 600 до 3000 °С. Погрешность измерения температуры зависит от интервала температур, в котором производится измерение. Так при измерении температуры до 1500 °С погрешность составляет до $\pm 0,5$ % от измеряемой

величины, в интервале 1500-2000 °С - ± 1 %, при измерении свыше 2000 °С погрешность возрастает до ± 2 % от измеряемой величины температуры. Разрешение по температуре не хуже 1 °С.



Рис. 1 – Общий вид пилотной установки с электромагнитным реактором, установленного на эстакаде

Выполнен монтаж пилотной установки, включая сборочный чертеж трёхфазного электромагнита поперечного магнитного поля, систем электроснабжения, вентиляции, водоснабжения и системы контрольно-измерительных приборов (КИП). Проведены экспериментальные исследования плавки базальта Актюбинского месторождения с целью получения образцов готовой продукции в виде базальтового волокна из струи расплава и смеси

базальта с монохроматным шламом с целью перевода токсичного шестивалентного хрома в трёхвалентный. При производстве хромовых соединений образуются токсичные отходы в виде монохроматного шлама. Особое беспокойство вызывает загрязнение промзоны г. Актюбинска и трансграничной реки Илек шестивалентным хромом, содержащихся в монохроматных шламах, состав которых приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав монохроматного шлама, масс. %

Cr_2O_3	CrO_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	H_2O
7,0	2,5	7,0	4,0	6,5	23,5	24,0	25,5

Выполнены экспериментальные работы по переводу токсичного шестивалентного хрома в безопасный трехвалентный хром и разработана технология плавления монохроматных шламов в плазменном реакторе с электромагнитным управлением, созданном для плавления природных базальтов. В ходе экспериментальных исследований выполнены работы по определению оптимальных параметров этой технологии и сделаны термодинамические расчеты процесса нагрева и плавления

монохроматного шлама с добавлением Актюбинского базальта (рисунок 2, таблица 3). Для термодинамического анализа высокотемпературных процессов плавления базальта и шихты была использована универсальная программа расчета многокомпонентных гетерогенных систем TERRA. Анализ результатов расчетов нагрева и плавления монохроматного шлама показал, что в исследованном диапазоне температур токсичный шестивалентный хром (Cr) в соединении CrO_3 полностью пере-

ходит в безопасное соединение трехвалентного хрома Cr_2O_3 с суммарной концентрацией около 9 мас.%. Газовая фаза представлена в основ-

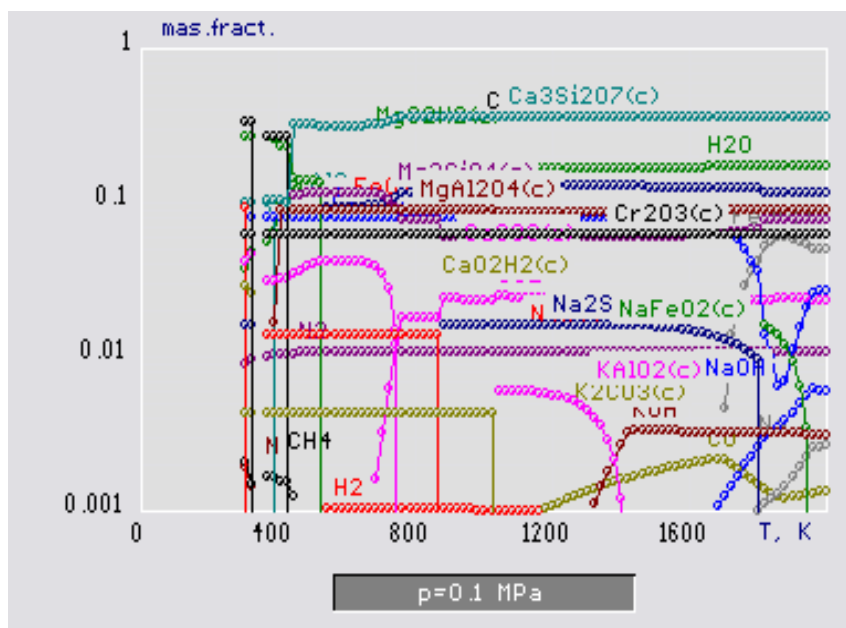
ном водяным паром, водородом, углекислым газом и азотом и практически не содержит вредных компонентов (рисунок 3).



Рис. 2 – Струя расплава шихты, состоящей из смеси базальта и хромового шлама

Таблица 3 – Химический состав базальта Актюбинского месторождения, масс. %

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
47,29	12,93	13,56	1,25	7,91	13,98	2,95	0,13



1

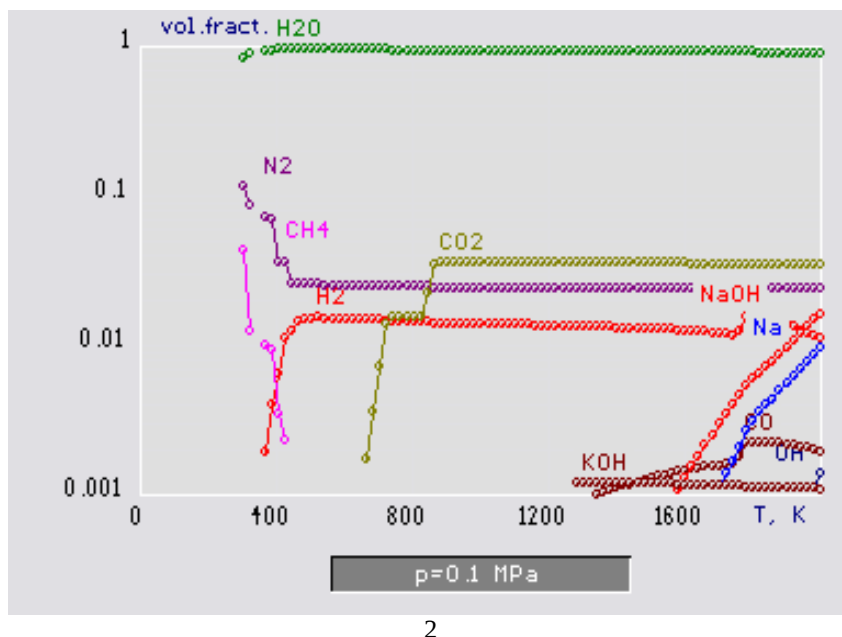


Рис. 3 – Состав расплава смеси монохроматного шлама с базальтом (1) и газовой фазы над расплавом (2) в процессе его нагрева

На рисунке 4 представлены результаты расчетных данных по удельным энергозатратам на нагрев и плавление актюбинского базальта (1), монохроматного шлама (2) и сме-

си монохроматного шлама с актюбинским базальтом (3). Из рисунка видно, что удельные энергозатраты на плавление материала возрастают с увеличением температуры.

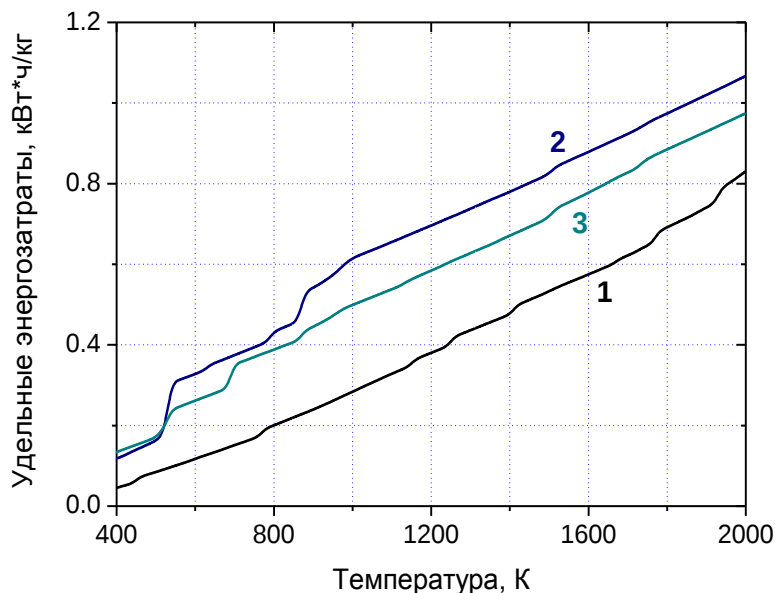


Рис. 4 – Расчетные данные температурной зависимости удельных энергозатрат на нагрев и плавление актюбинского базальта (1), монохроматного шлама (2) и смеси монохроматного шлама с актюбинским базальтом (3)

При этом на нагрев и плавление актюбинского базальта удельные энергозатраты минимальны, а на нагрев и плавление монохроматного шлама – максимальны во всем диапазоне температур (400-2000 К). В рабочем

диапазоне температур (1750-1850 К) удельные энергозатраты составляют на получение расплава составляют 0,69, 0,97 и 0,89 кВт ч/кг для актюбинского базальта, монохроматного шлама и их смеси соответственно.

Сравнение результатов экспериментальных и расчетных данных плавки показали, что чистый хромовый шлак и шихта, где процент шлака превышает 50 %, приводит к вспучиванию расплава, что может привести к аварийным ситуациям. Поэтому для переработки хромового шлака использовалась шихта состоящая из базальта и шлака в пропорции 50-50%

Проведены сравнение полученных экспериментальных и расчётных данных и после корректировки расчётных моделей и технологических параметров процесса переработки минеральных веществ, включая получение базальтового волокна, были получены образцы продуктов плавления, которые приведены на рисунке 5.

Из рисунка 5 а видно, что в случае с плавленным базальтом мы имеем стекловидную

массу с характерным блеском и повышенной твёрдостью, а в случае с плавленной шихтой разлом образца представляет собой серую мелкозернистую структуру, схожую с ситтами пригодными для жаропрочных строительных изделий.

Качественный рентгенофазовый анализ с использованием дифрактометра ДРОН-3М проведён для образцов исходного шлака и одного из образцов, отобранных после плавки смеси шлака с базальтом. Рентгенограммы показали, что основной фазой расплава, содержащей хром, является фаза Cr_2O_3 . При этом фаза шестивалентного хрома CrO_3 на рентгенограмме не зафиксирована, что полностью подтверждает результаты термодинамического анализа.



а



б



в



г

а – образец плавки чистого базальта;
б, в – образцы расплава шихты базальт + хромовый шлак;
г – образец базальтовой ваты

Рис. 5 – Образцы готовой продукции, полученных в результате плавки минерального сырья, включая получение базальтового волокна (ваты)

На рисунке 6 представлена дифрактограмма образца проплавленной шихты шлам/базальт в соотношении 1/1.

Экспериментальные результаты и расчетные данные показали, что удельные энергозатраты на плавление базальта не превышают 1 кВт/час. Также показано, что при плавлении токсичных шламов хромового производства в смеси с базальтом приводит к их обезвреживанию.

Определены технологические параметры процесса переработки минеральных пород на ЭМР.

На основе экспериментальных исследований по плавке минеральных веществ определено преимущество работы реактора с дополнительным центральным электродом и тремя рабочими электродами, расположенными относительно оси под углом 12,5°.

Предлагаемая к производству минеральная вата из горных базальтовых пород имеет следующие характеристики:

- Влажность, % - 0,29
- Содержание органических веществ, % - 0,00

- Водостойкость, pH - 2,22
- Плотность под удельной нагрузкой ($98 \pm 1,5$) Па, кг/м³, не более - 35;
- Средний диаметр волокна, мкм, не более - 8мм
- Содержание неволоконистых включений размером свыше 0,25 мм, % не более - 10
- Коэффициент теплопроводности, при 25 °С, Вт/мК, на уровне - 0,038
- Предельная температура применения, °С - 700
- Коэффициент звукопоглощения при частотах 160 – 1800 Гц - 0,19-0,66.

В результате экспериментальных плавок в электромагнитном реакторе с объемам плавильной зоне 0,2 м³ получены следующие обобщенные результаты:

Мощность – 170 – 200 кВт;

Производительность по расплаву – 180 – 200 кг/ч;

Температура истекающей струи расплава – 1450 – 1500 °С.

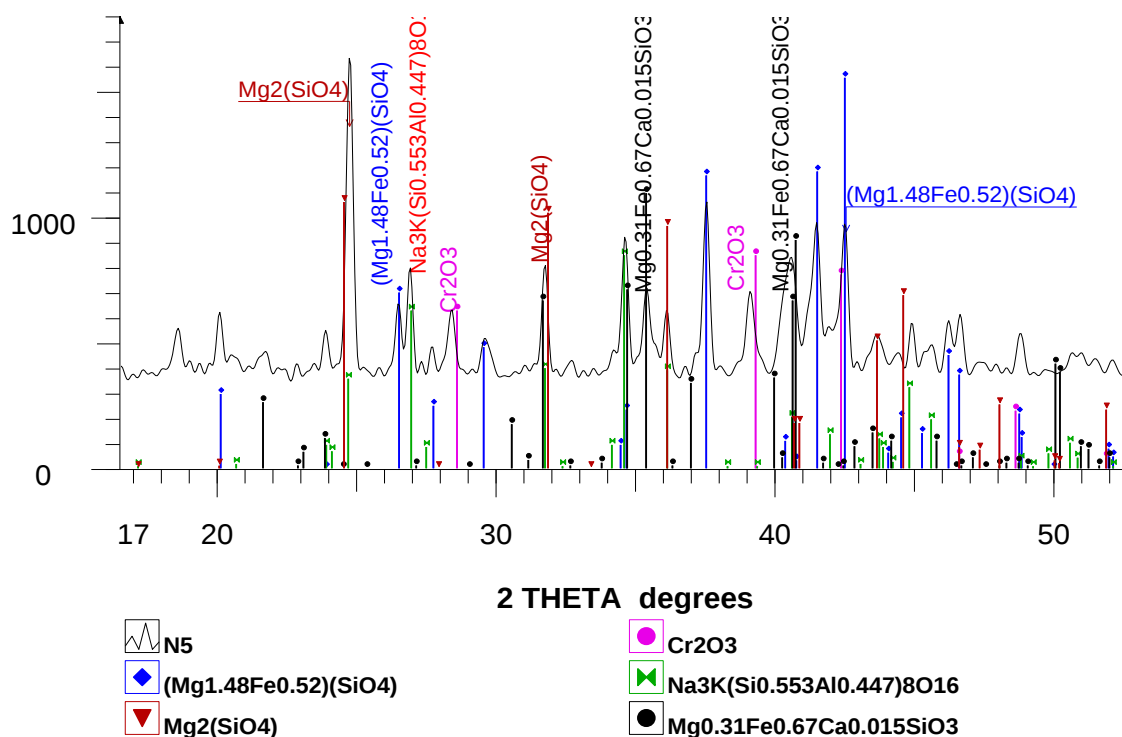


Рис. 6 – Дифрактограмма образца проплавленной шихты шлам/базальт в соотношении 1/1

Сравнение полученных экспериментальных результатов и расчётных данных показало

их совместимость. Получены образцы базальтового волокна.

Выводы

Таким образом, пуско-наладочные работы на установке позволили провести лабораторные испытания пилотной установки, провести экспериментальные исследования и получить образцы готовой продукции. Экспериментальные исследования плавки базальта Актюбинского месторождения с целью получения образцов готовой продукции в виде базальтового волокна из струи расплава и смеси базальто-шлаковых отходов с монохроматным шламом позволили перевести токсичный шестивалентный хром в трёхвалентный безопасный.

Произведено сравнение полученных экспериментальных и расчётных данных, что позволило скорректировать расчётные модели и технологические параметры процесса переработки минеральных веществ. Получены готовые образцы базальтового волокна.

Литература

- 1 Аблесимов Н.Е. Горные породы: исторический аспект // Научно-технический отраслевой журнал «Базальтовые технологии». – Пермь, 2013. – С.25-28.
- 2 Земцов А.Н. Базальтовая вата как объект минералогического исследования // Сборник материалов “Базальтовая вата: история и современность”. – Пермь, 2003. – 23 с.
- 3 Ladue S.E. Progress Report on electric melting // The glass industry, June. – 1979. – p.12-16.
- 4 Карпенко Е.Н., Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазменный электромагнитный реактор и технологическая установка для переработки энергетических шлаков и получения минерального волокна // Энергетик. – №3. – С.41-44.
- 5 ГОСТ 4640-93. Вата минеральная. – Введ. 1995-01-01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2004. – 8 с.
- 6 Chin. J. Обезвреживающая обработка хромового шлама в промышленных отходах путем твердофазного восстановления // Nonferrous Metals. – 2006. – Т.16, № 5. – С. 919-923.
- 7 Солошенко А.А., Кравченко Г.А. Переработка шлама хроматного производства на шлакоситаллы // Тезисы докл. II Межд. конгресса по управлению отходами ВэйстТэк. – М., 2001. – 193 с.
- 8 Солошенко А.А., Кравченко Г.А. Переработка шлама хроматного производства на шлакоситаллы // Тезисы докл. II Межд. конгресса по управлению отходами ВэйстТэк. – М., 2001. – 195 с.
- 9 Пат. 27146 РК. Способ переработки шлама хроматного производства / Акназаров С.Х., Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Умбеткалиев К.А., Устименко А.Б., Шевченко В.Н., Головченко О.Ю.; опубл. 15.07.13, Бюл. №7. – 2 с: ил.
- 10 Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // III Межд. Симпозиум «Горение и плазмохимия». – Алматы, 2005. – С.52-58.
- 11 Messerle V.E., Karpenko E.I., Trusov B.G. A Comparative Analysis of Plasma and Fire Technologies of Pulverized Coal Ignition, Combustion and Gasification Using a Mathematical Model of Chemically Nonequilibrium System // Thermophysics and Aeromechanics. – 1995. – Vol. 2, № 3. – P.245-250.
- 12 Пат 2225685 РФ. Электромагнитный технологический реактор и способ его пуска / Карпенко Е.И., Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Иванов А.А., Малых А.В.; опубл. 10.03.04, Бюл. № 7. – 2 с: ил.
- 13 Пат 18229 РК. Электромагнитный технологический реактор (варианты) и стержневой электрод, используемый в реакторе. / Лукьященко В.Г., Мессерле В.Е., Нестеренков А.Г., Шевченко В.Н., Устименко А.Б., Осадчий С.Ф., Голыш В.И., Нестеренков В.А.; опубл. 15.01.07, Бюл. № 1. – 2 с: ил.

ПЛАЗМАЛЫҚ РЕАКТОРДА БАЗАЛЫТ ЖӘНЕ БАЗАЛЫТ-ШЛАКТЫ ҚОСПА ҚАЛДЫҚТАРЫНЫҢ БАЛҚУЫН ЗЕРТТЕУ

С.Қ. Акназаров, В.Е. Мессерле, В.Г. Лукьященко, Н.Ю. Головченко,
Қ.А. Умбеткалиев, О.Ю. Головченко

¹Өл-фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

²Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан

Аңнотация

Пилотты қондырғыны зертханалық сынау көрсетілген, тәжірибелік зерттеулер жүргізілген және дайын өнім үлгілері алынды. Ақтөбе кен орнының базальтының балкуын тәжірибелік зерттеу мақсаты балқыма ағынынан базальтты талшық түріндегі дайын өнім үлгілерін алу және базальт-шлакты қалдықтарының қоспасындағы монохроматты шлам арқылы улы алты валентті хромнан қауіпсіз үш валенттігі ауысуына мүмкіндік бері болып табылады. Минералды заттарды қайта өңдеу процесінің технологиялық параметрлерін және есептеу модельдерін түзетуге мүмкіндік беретін алынған есептік және тәжірибелік мәндерін салыстырулар жүргізілді. Базальт талшықтарының дайын үлгілері алынды.

Түйінді сөздер: электромагниттік реакторы, базальт, қоспасы қож, талшық, термодинамикалық талдау, технологиялық параметрлері

INVESTIGATION OF THE MELTING BASALT AND MIXTURE OF BASALT-SLAG WASTE IN THE PLASMA REACTOR

**S.Kh. Aknazarov, V.E. Messerle, V.G. Lukyachshenko, N.Yu. Golovchenko,
K.A. Umbetkaliev, O.Yu. Golovchenko**

¹ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

² Institute of combustion problems, Almaty, Kazakhstan

Abstract

Presents the laboratory tests pilot plant, experimental studies and samples of the finished product obtained. Experimental investigations melting of basalt Aktobe deposits in order to obtain samples of the finished product in the form of basalt fiber from the melt stream and the mixture basalt-slag wastes monohromatnym sludge allowed to transfer toxic hexavalent chromium to trivalent safe.

Comparison of the obtained experimental and calculated data, allowing to adjust the calculated model and the technological parameters of processing of mineral substances. Obtained the ready samples of basalt fiber.

Keywords: solenoid reactor, basalt, mixtures, slag, thermodynamic analysis, technological parameters.