

Технология переработки золошлаковых отходов ТЭС способом спекания

¹*БАКИРОВ Алтынсары Газизович, докторант, старший преподаватель, altynsary@mail.ru,

²ЖУНУСОВ Аблай Каиртасович, к.т.н., профессор, zhunusov_ab@mail.ru,

³АБДУЛИНА Сауле Амангельдыевна, PhD, ассоциированный профессор, abdulina.saule@mail.ru,

³БУЛЕНБАЕВ Максат Жумабаевич, PhD, зав. лабораторией, mbulenbaev@mail.ru,

¹НАО «Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева», Казахстан, Усть-Каменогорск, ул. А.К. Протозанова, 69,

²НАО «Торайгыров университет», Казахстан, Павлодар, ул. Ломова, 64,

³НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», Казахстан, Алматы, ул. Сатпаева, 22а,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Целью исследования является подобрать оптимальный состав шихты спекания для максимального извлечения глинозема. Проведенные эксперименты показали, что спекание с использованием двухкомпонентных шихт позволяет извлекать глинозем из полученных спеков не более чем на 60%. Наиболее высокие показатели спекания были получены с использованием трехкомпонентных шихт. Так, при использовании золошлаковых отходов Алматинской ТЭЦ-2 извлечение глинозема составило 83,68% на шихте состава $\text{CaO}:\text{SiO}_2=2$; $\text{Na}_2\text{O}:(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)=1$ при спекании в интервале 60 мин при температуре 1200°C, в таких же условиях для золошлаковых отходов Евроазиатской энергетической корпорации было получено извлечение – 87,07%, для золошлаковых отходов после химической активации извлечение составило – 90,2%. Проведенные эксперименты показали, что получение саморассыпающихся спеков, пригодных для дальнейшей переработки из опробированных проб золошлаковых отходов, возможно при использовании трехкомпонентных шихт.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, саморассыпающиеся спеки, активация, спекание, глинозем, двухкальцевый силикат, алюминат натрия, известняк, сода, сплав.

Введение

Высокоглиноземистая летучая зола (золошлаковые отходы) является побочным продуктом высокотемпературного сжигания угля на тепловых электростанциях. Ежегодный выброс золошлаковых отходов составляет примерно 30 миллионов тонн [1]. Большая часть золошлаковых отходов хранится в отвалах и приводит к серьезному загрязнению воды, атмосферы, почвы [2, 3]. С другой стороны, высокое содержание глинозема (приблизительно 30-50%) в летучей золе делает ее ценным ресурсом для переработки.

В традиционных способах переработки золошлаковых отходов преимущественно применяют кислотные и щелочные методы, а также сульфатизирующий обжиг золы с последующим кислотным выщелачиванием. Однако эти методы не обеспечивают достаточного вскрытия исходного материала, а получаемые продукты требуют в последующем проведения отдельных сложных технологических операций.

На сегодняшний день известно различные способы переработки золошлаковых отходов ТЭС

способом спекания.

Для выделения оксида алюминия из золы было разработано множество методов экстракции, таких как предварительное щелочное спекание натриевой извести [6], спекание известняком [7], кислотное выщелачивание [8, 9], спекание сульфатом аммония [10]. Только процесс спекания содовой извести был осуществлен в промышленных масштабах (200 тыс. тонн в год) китайской корпорацией Datang в провинции Внутренняя Монголия [11].

В работе авторов [12] проводились эксперименты по термической потере веса золы в зависимости от температуры, чтобы определить подходящую температуру спекания золы, в смеси с H_2SO_4 (98%). Затем смесь подвергали спеканию при 220°C, растворению в воде при 85°C, регулированию уровня щелочи в растворе с помощью CaCO_3 , удалению железа с помощью KMnO_4 и MnSO_4 , осаждению $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ частиц и подвергали термообработке при 850°C для получения порошков Al_2O_3 . Извлечение Al_2O_3 достигло 70-90% при относительной более низкой темпе-

ратуре обработки и меньшем количестве твердых остатков.

В других работах [13] проводились исследования по влиянию количества бисульфата калия, температуры прокаливания и времени прокаливания на эффективность извлечения оксида алюминия (Al_2O_3) из золошлаковых отходов. Эффективность извлечения глинозема достигала максимума 92,8%, температура прокаливания составила 230°C и время прокаливания 3 ч.

Однако недостаток данных способов спекания являются серьезные проблемы, связанные с кристаллизацией и прокаливанием сульфата алюминия, а также при выщелачивании происходит совместное растворение других металлов, таких как железо, магний, титан, натрий и калий, что требует необходимость удаления этих примесей перед извлечением глинозема.

В лаборатории Центра опережающих развития «Veritas» НАО ВКТУ им. Д. Серикбаева были проведены экспериментальные работы по извлечению глинозема из золошлаковых отходов тепловых электростанций. Объектами исследования были взяты образцы следующих тепловых электростанций: золошлаковый материал Евроазиатской энергетической корпорации (Павлодарская область, г. Аксу), золошлаковый материал Алматинской ТЭЦ-2 (г. Алматы), а также золошлаковые отходы полученные в результате химической активации [14] (проба № 40, 42, 44, 46), характеристика которых приведена в таблице 1.

Целью данной работы является подобрать оптимальный состав шихты спекания золошлаковых отходов ТЭС с получением саморассыпающихся спеков для извлечения глинозема.

Методы и методика исследования

В физико-химических исследованиях исходного сырья и продуктов переработки применяли рентгенофазовый, растровый и химический анализы.

Полуколичественный рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре X'Pert PRO производства PANalitical (Нидерланды).

Растровую электронную микроскопию с системой микроанализа INCA Energy проводили на микроскопе (JEOL-6390, Япония).

Сущность проведенных экспериментов заклю-

чалось в следующем: Предварительно готовили шихтовые смеси, взвешивали и тщательно перемешивали вручную в фарфоровой ступке. Шихту помещали в графитовые тигли, затем в холодную печь, где шихту нагревали до заданного температурного интервала спекания и выдерживали в течение определенного времени. Полученный спек медленно охлаждали до 400-500°C в течении 20-30 мин.

С целью установления оптимального режима процесса спекания для каждого образца золошлаковых отходов были опробированы несколько шихт с исходной массы золы 50 грамм. Шихту рассчитывали с целью получения в спеках $Al_2O_3 \cdot Na_2O$ и Ca_2SiO_4 из соотношений: $Na_2O : (Al_2O_3 + Fe_2O_3) = 1$, $CaO : SiO_2 = 2$ [15]. Шихту спекали в температурных интервалах (1150-1300°C) и продолжительностью (30-120 мин) [15]. Состав шихты во всех экспериментах был разный, отличался дозировкой Na_2CO_3 и $CaCO_3$, с целью для связывания Fe_2O_3 и TiO_2 в $Na_2O \cdot Fe_2O_3$ и $Na_2O \cdot TiO_2$ [4, 5].

Результаты и их обсуждения

На основе выполненных экспериментальных работ следует, что для получения саморассыпающихся спеков (на рисунке 1 показано), заданного химического состава пригодных для дальнейшей переработки из опробированных проб золошлаковых отходов, возможно при использовании трехкомпонентных шихтовых систем. Оптимальной температурой спекания золошлаковых отходов составило 1200°C и продолжительностью 60 мин для золошлаковых отходов после химической активации. Извлечение глинозема из золошлаковых отходов Алматинской ТЭЦ-2 составило 83,68% на шихтовой системе $CaO : SiO_2 = 2$; $Na_2O : (Al_2O_3 + Fe_2O_3) = 1$ при спекании с продолжительностью 60 мин и температуры 1200°C, в таких же условиях для золошлаковых отходов Евроазиатской энергетической корпорации было получено извлечение – 87,07%, для золошлаковых отходов после химической активации извлечение составило – 90,2%. Для данных шихтовых систем были получены высокие показатели спекания.

При температуре выше 1200°C физико-химические свойства спека изменяются. Состав шихты и продолжительность спекания оказывают значительное влияние на плотность спека. При непра-

Таблица 1 – Химический состав золошлаковых отходов, масс. %

Наименование	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	Na_2O	P_2O_5
Проба № 40	20,438	42,600	0,293	2,122	1,210	5,697	0,263	0,357
Проба № 42	19,296	46,355	0,396	2,471	1,191	6,470	0,458	0,292
Проба № 44	18,910	47,425	0,381	2,426	1,105	4,795	0,326	0,392
Проба № 46	20,436	43,693	0,131	2,869	1,200	15,477	0,341	0,481
Алматинская ТЭЦ-2	25,3	54,1	0,40	1,14	1,48	7,47	0,2	0,455
Евроазиатская Энергетическая Корпорация	22,04	55	-	1,36	0,71	2,30	0,7	0,382

вильном выборе оптимальных режимов спекания, уменьшается пористость и образуется усадка спека [4,5].

С повышением температуры спекания от 1150 до 1300°C степень разложения алюминийсодержащих фаз возрастает, что свидетельствует результат фазового состава, представленный Ca_2SiO_4 и $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Na}_2\text{O}$. С увеличением содержания Ca_2SiO_4 (двухкальциевый силикат) извлечение глинозема из спеков уменьшается. Как показывают данные

проведенных исследований, с увеличением содержания $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (феррита натрия) снижается температура плавления спеков, что отрицательно влияет на технологический режим. При повышении температуры спекания выше 1250-1300°C происходит оплавление шихты [15], что приводит к ухудшению саморассыпания спека и уменьшения степени извлечения глинозема (на рисунке 2 показано). В таблице 2 приведены температурные режимы спекания составленных из шихт, зола,

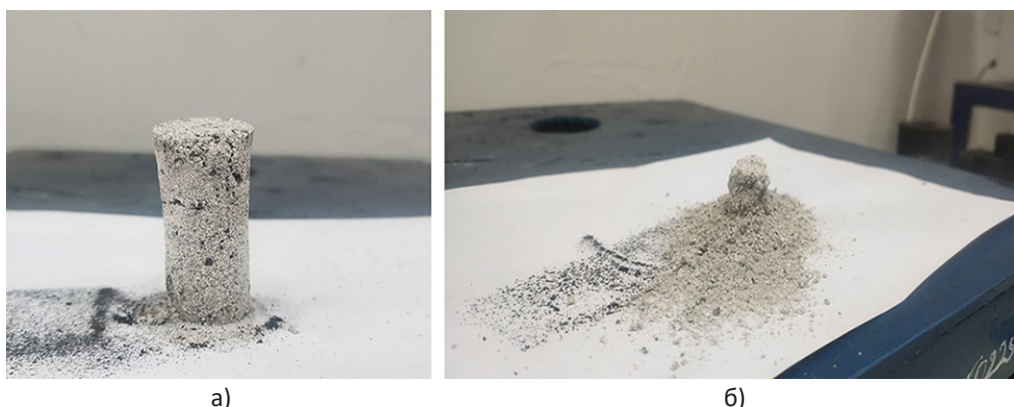


Рисунок 1 – Саморассыпающийся спек: а) до распада, б) после распада

Таблица 2 – Влияние температурного режима спекания на извлечение Al_2O_3 и Na_2O

Молярное соотношение шихт	Спекание		Охлаждение		Извлечение Al_2O_3 , %	Извлечение Na_2O , %
	t, °C	время, мин.	t, °C	время, мин.		
$\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 2$; $\text{Na}_2\text{O} : (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) = 1$	1150	60	500	20	77,8	85,5
$\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 2$; $\text{Na}_2\text{O} : (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) = 1$	1200	60	500	20	91,3	92,3
$\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 2$; $\text{Na}_2\text{O} : (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) = 1$	1250	60	500	20	88,46	91,4
$\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 2$; $\text{Na}_2\text{O} : (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) = 1$	1300	60	500	20	81	90,1
$\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 2$; $\text{Na}_2\text{O} : (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) = 1$	1150	90	400	30	77,5	88,3
$\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 2$; $\text{Na}_2\text{O} : (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) = 1$	1200	90	400	30	90,3	95,2
$\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 2$; $\text{Na}_2\text{O} : (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) = 1$	1250	90	400	30	90,8	94,4
$\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 2$; $\text{Na}_2\text{O} : (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) = 1$	1300	90	400	30	78,2	86,4



Рисунок 2 – Сплав (оплавленная шихта)

$\text{CaO}:\text{SiO}_2=2$; $\text{Na}_2\text{O}:(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)=1$.

По результатам спекания золошлаковых отходов был исследован рентгенофазовый анализ полученного спека. На рисунке 3 показан рентгенофазовый анализ спека.

По данным рентгенофазового анализа выявлены следующие фазы: SiO_2 (кварц), Fe_2O_3 (гематит), Ca_2SiO_4 (двухкальциевый силикат), $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Na}_2\text{O}$ (алюминат натрия), CaO (оксид кальция), $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ (алюминат кальция), $\text{Al}(\text{OH})_3$ (гидро-

оксид алюминия).

Для подтверждения достоверности рентгенофазового анализа были исследованы спекы растровой электронной микроскопией с системой микроанализа INCA Energy, проводили на микроскопе (JEOL-6390, Япония).

Усредненный элементный состав спека по данным EDS-анализа приведен на рисунке 4 и в таблице 3.

Анализ с помощью энергодисперсионного

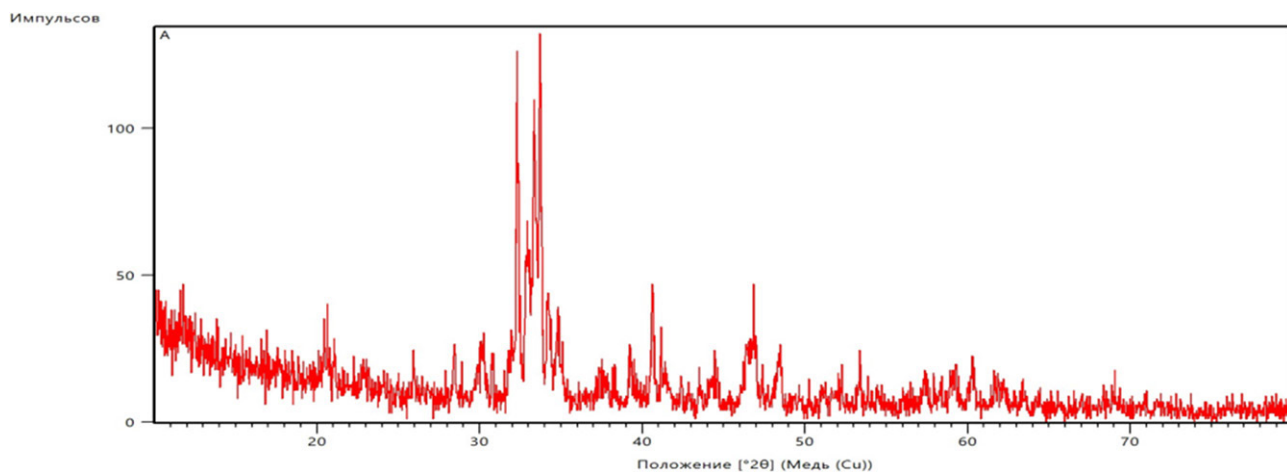


Рисунок 3 – Рентгенофазовый анализ спека

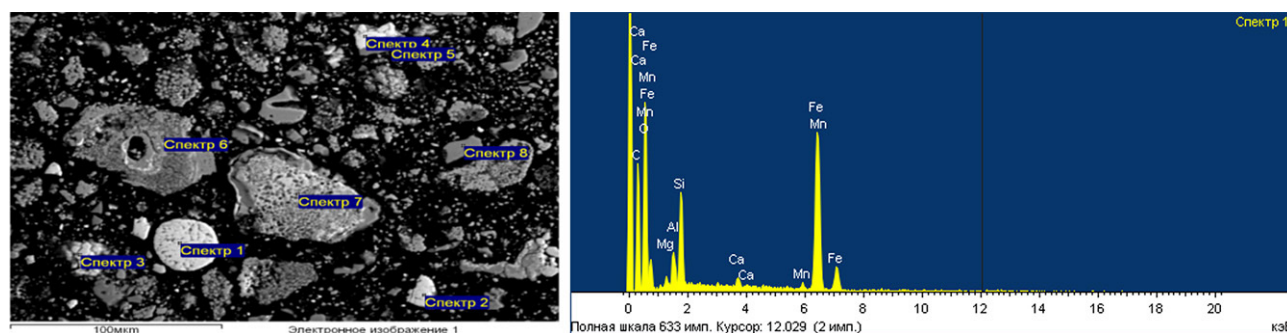


Рисунок 4 – EDS-спектры спека

Таблица 3 – EDS-спектры спека

Элемент % масс	Спектры									Макс	Мин
	1	2	3	4	5	6	7	8			
O	46,02	47,55	45,80	40,47	47,39	47,66	44,69	46,75	47,66	40,47	
Na	4,07	5,51	4,55	2,64	11,88	4,72	3,79	11,46	11,88	2,64	
Mg	-	-	-	0,49	-	-	3,81	-	3,81	0,49	
Al	12,36	12,46	12,55	1,00	10,87	25,20	22,08	1,35	25,20	1,00	
Si	5,80	5,99	5,51	2,98	11,38	8,61	5,14	11,11	11,38	2,98	
Ca	25,79	24,89	26,00	25,57	25,78	28,00	24,87	26,63	28,00	24,87	
Ti	-	-	-	0,35	0,37	-	-	-	0,37	0,35	
Mn	-	-	-	0,90	-	-	-	-	0,90	0,90	
Fe	15,96	13,59	15,59	25,59	2,33	8,81	15,63	2,70	25,59	2,33	
Итого	100	100	100	100	100	100	100	100	-	-	

спектра проб (EDS-анализ точечный) с поверхности спека показал, что основные элементы на поверхности образца в пробах являются: O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe. Можно заметить появление элемента Ca (хороший пик на элемент Ca есть), что свидетельствует двухкальциевому силикату. Также можно заметить хороший пик элемента Fe, что свидетельствует минералу гематит. Представленные выборочные элементы в таблице 3 демонстрируют наиболее характерные различия формы и морфологических признаков отдельных частиц. Здесь можно заметить, что проба отличается своей микроструктурой.

Выводы

Повышение эффективности спекания важно не только для получения большего количества

кремниевых ресурсов, но и для более экономичного и эффективного извлечения глинозема.

На основании проведенных экспериментов следует отметить, что оптимальный состав шихты спекания золошлаковых отходов с получением саморассыпающихся спеков возможно с использованием трехкомпонентных шихт. При использовании золошлаковых отходов Алма-тинской ТЭЦ-2 на шихте состава $\text{CaO}:\text{SiO}_2=2$; $\text{Na}_2\text{O}:(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)=1$; при спекании в интервале 60 мин и температуры 1200°C извлечение глинозема составило 83,68%, для золошлаковых отходов Евроазиатской энергетической корпорации было получено извлечение 87,07%, для золошлаковых отходов полученных после химической активации извлечение составило 90,2%.

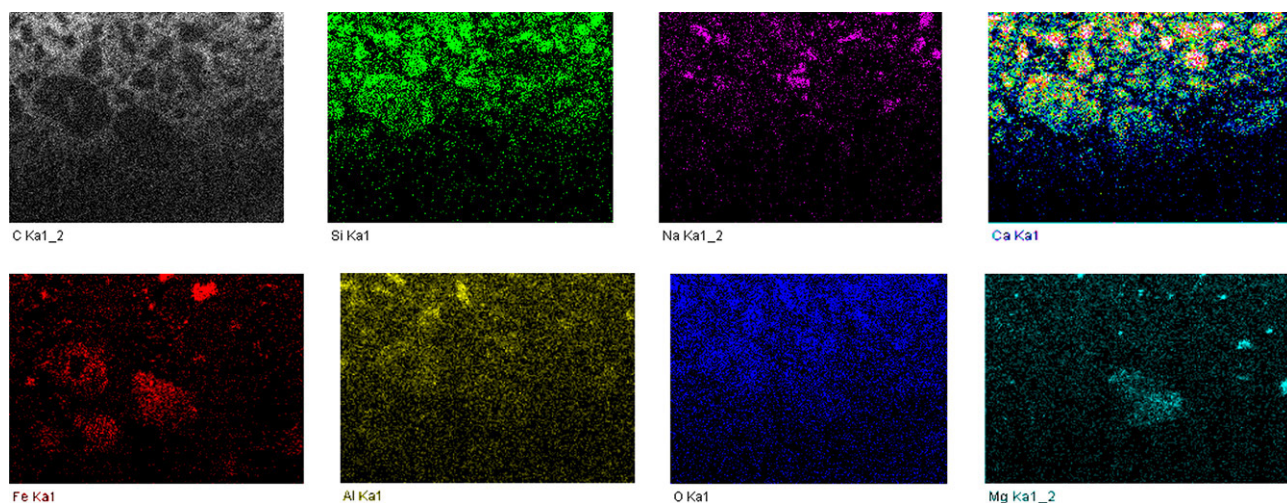


Рисунок 5 – Анализ общего картирования пробы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun, J.; Chen, P. Resourcing utilization of high alumina fly ash. *Adv. Mater.* 2013, 652-654, 2570-2575.
2. Blissett, R.S.; Rowson, N.A. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel* 2012, 97, 1-23.
3. Jing, L.; Dong, Y.; Dong, X.; Hampshire, S.; Li, Z.; Zhu, Z.; Li, L. Feasible recycling of industrial waste coal fly ash for preparation of anorthite-cordierite based porous ceramic membrane supports with addition of dolomite. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2016, 36, 1059-1071.
4. Фомина Е.Ю., Артемова О.С. Исследование возможности переработки золошлаковых отходов ТЭС металлургическими методами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. pp. 273-277.
5. https://giab-online.ru/files/Data/2011/8/Fomina_08_2011.pdf
6. Bai, G.; Teng, W.; Wang, X.; Qin, J.; Xu, P. Alkali desilicated coal fly ash as substitute of bauxite in lime-soda sintering process for aluminum production. *Trans. Nonferr. Met. Soc.* 2010, 20, pp. 169-175.
7. Xiao, H.W.; Bao, D.W.; Yong, F.X.; Xiao, T.L.; Qi, S. The optimization of sintering process for alumina extraction from fly ash. *Adv. Mater.* 2014, 878, 264-270.
8. Cheng-You, W.U.; Hong-Fa, Y.U.; Zhang, H.F. Extraction of aluminum by pressure acid-leaching method from coal fly ash. *Trans. Nonferr. Met. Soc.* 2012, 22, 2282-2288.
9. Shemi, A.; Ndlovu, S.; Sibanda, V.; Dyk, L.D.V. Extraction of alumina from coal fly ash using an acid leach-sinter-acid leach technique. *Hydrometallurgy* 2015, 157, 348-355.
10. Wang, R.C.; Zhai, Y.C.; Xiao-Wei, W.U.; Ning, Z.Q.; Pei-Hua, M.A. Extraction of alumina from fly ash by ammonium hydrogen sulfate roasting technology. *Trans. Nonferr. Met. Soc.* 2014, 24, 1596-1603.
11. Gong, B.; Chong, T.; Zhuo, X.; Zhao, Y.; Zhang, J. Mineral changes and trace element releases during extraction of alumina from high aluminum fly ash in Inner Mongolia, China. *Int. J. Coal. Geol.* 2016, 166, 96-107.
12. Liu, K.; Xue, J.L.; Zhu, J. Extracting alumina from coal fly ash using acid sintering-leaching process. *Light Met.* 2012, 201-206.
13. Chunbin Guo, Jingjing Zou, Shuhua Ma, Jianlin Yang, Kehan Wang. Alumina Extraction from Coal Fly Ash via Low-Temperature Potassium Bisulfate Calcination // *Minerals* 2019, 9, 585; doi: 10.3390/min9100585.

14. Bakirov Altynsary, Abdulina Saule, Zhunusov Ablay, Oleinikova Natalya. Preliminary chemical activation of ash waste with release of carbon concentrate // CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS. – Brno, Czech Republic: 2021. – VOL. 88, 2021. – pp. 973-978.
15. Балмаева Л.М., Сотченко Р.К., Рахимов А.Р., Лайнер Ю.А., Кабиева С.К., Власова Л.М. Дилатометрическое исследование процесса спекания с целью комплексной переработки техногенных зол // Труды Университета КарТУ. 2012. № 3. С. 38-40.

ЖЭС күл-қож қалдықтарын жентектеу тәсілімен қайта өңдеу технологиясы

¹*БАКИРОВ Алтынсары Газизович, докторант, аға оқытушы, altynsary@mail.ru,

²ЖУНУСОВ Аблай Каиртасович, т.ғ.к., профессор, zhunusov_ab@mail.ru,

¹АБДУЛИНА Сауле Амангельдыевна, PhD, қауымдастырылған профессор, abdulina.saule@mail.ru,

³БУЛЕНБАЕВ Максат Жумабаевич, PhD, зертхана меңгерушісі, mbulenbaev@mail.ru,

¹«Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Өскемен, А.К. Протозанов көшесі, 69,

²«Торайғыров университеті» КеАҚ, Қазақстан, Павлодар, Ломов көшесі, 64,

³«Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» КеАҚ, Қазақстан, Алматы, Сәтбаев көшесі, 22а,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты – глиноземді максималды алу үшін агломерациялық зарядтың оңтайлы құрамын таңдау. Жүргізілген тәжірибелер көрсеткендей, екі компонентті шихталарды қолдану арқылы синтездеу алынған спектерден глиноземді 60%-дан аспайтын мөлшерде алуға мүмкіндік береді. Ең жоғары агломерация үш компонентті зарядтардың көмегімен алынды. Мысалы, Алматы 2-ЖЭО күл-қож қалдықтарын пайдалану кезінде сазбалшықты алу $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 2$; $\text{Na}_2\text{O} : (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) = 1$ құрам шихтасында 83,68%-ды құрады; 1200°C температурада 60 мин аралықта жентектеу кезінде, осындай жағдайларда Еуразиялық энергетикалық корпорацияның күл-қож қалдықтары үшін – 87,07%, күл-қож қалдықтары үшін химиялық активтендіруден кейін алу – 90,2% алынды. Жүргізілген эксперименттер күл-шлак қалдықтарының сынамаланған сынамаларынан одан әрі өңдеуге жарамды өздігінен шашылатын спектерді алу үш компонентті шихталарды пайдалану кезінде мүмкін болатындығын көрсетті.

Кілт сөздер: күл-шлак қалдықтары, өздігінен шашылатын спеки, активация, жентектеу, глинозем, екікальций силикаты, натрий алюминаты, әктас, сода, қорытпа.

Technology of Processing of Ash and Slag Waste of Thermal Power Plants by Sintering

¹*BAKIROV Altynsary, doctoral student, Senior Lecturer, altynsary@mail.ru,

²ZHUNUSOV Ablai, Cand. of Tech. Sci., Professor, zhunusov_ab@mail.ru,

¹ABDULINA Saule, PhD, Associate Professor, abdulina.saule@mail.ru,

³BULENBAEV Maksat, PhD, Head of Laboratory, mbulenbaev@mail.ru,

¹NCJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University», Kazakhstan, Oskemen, A.K. Protozanov Street, 69,

²NCJSC «Toraighyrov University», Kazakhstan, Pavlodar, Lomov Street, 64,

³NCJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev», Kazakhstan, Almaty, Satpayev Street, 22a,

*corresponding author.

Abstract. The aim of the study is to select the optimal composition of the sintering charge for maximum extraction of alumina. The experiments have shown that sintering using two-component charges allows to extract alumina from the obtained sinters by no more than 60%. The highest sintering rates were obtained using three-component charges. Thus, when using ash and slag waste from Almaty CHPP-2, the extraction of alumina amounted to 83.68% on the charge of the composition $\text{CaO} : \text{SiO}_2 = 2$; $\text{Na}_2\text{O} : (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) = 1$ during sintering in the interval of 60 minutes at a temperature of 1200°C, under the same conditions, 87.07% recovery was obtained for ash and slag waste of the Eurasian Energy Corporation, for ash and slag waste after chemical activation, recovery was – 90.2%. The experiments have shown that the production of self-disintegrating sinters suitable for further processing from the tested samples of ash and slag waste is possible with the use of three-component charges.

Keywords: ash and slag waste, self-scattering sinters, activation, sintering, alumina, bicalcium silicate, sodium aluminate, limestone, soda, alloy.

REFERENCES

1. Sun, J.; Chen, P. Resourcing utilization of high alumina fly ash. *Adv. Mater.* 2013, 652-654, 2570-2575.
2. Blissett, R.S.; Rowson, N.A. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel* 2012, 97, 1-23.
3. Jing, L.; Dong, Y.; Dong, X.; Hampshire, S.; Li, Z.; Zhu, Z.; Li, L. Feasible recycling of industrial waste coal fly ash for preparation of anorthite-cordierite based porous ceramic membrane supports with addition of dolomite. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2016, 36, 1059-1071.
4. Fomina E.YU., Artemova O.S. Issledovanie vozmozhnosti pererabotki zoloshlakovyh othodov TES metallurgicheskimi metodami // *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2011. pp. 273-277.
5. https://giab-online.ru/files/Data/2011/8/Fomina_08_2011.pdf
6. Bai, G.; Teng, W.; Wang, X.; Qin, J.; Xu, P. Alkali desilicated coal fly ash as substitute of bauxite in lime-soda sintering process for aluminum production. *Trans. Nonferr. Met. Soc.* 2010, 20, pp. 169-175.
7. Xiao, H.W.; Bao, D.W.; Yong, F.X.; Xiao, T.L.; Qi, S. The optimization of sintering process for alumina extraction from fly ash. *Adv. Mater.* 2014, 878, 264-270.
8. Cheng-You, W.U.; Hong-Fa, Y.U.; Zhang, H.F. Extraction of aluminum by pressure acid-leaching method from coal fly ash. *Trans. Nonferr. Met. Soc.* 2012, 22, 2282-2288.
9. Shemi, A.; Ndlovu, S.; Sibanda, V.; Dyk, L.D.V. Extraction of alumina from coal fly ash using an acid leach-sinter-acid leach technique. *Hydrometallurgy* 2015, 157, 348-355.
10. Wang, R.C.; Zhai, Y.C.; Xiao-Wei, W.U.; Ning, Z.Q.; Pei-Hua, M.A. Extraction of alumina from fly ash by ammonium hydrogen sulfate roasting technology. *Trans. Nonferr. Met. Soc.* 2014, 24, 1596-1603.
11. Gong, B.; Chong, T.; Zhuo, X.; Zhao, Y.; Zhang, J. Mineral changes and trace element releases during extraction of alumina from high aluminum fly ash in Inner Mongolia, China. *Int. J. Coal. Geol.* 2016, 166, 96-107.
12. Liu, K.; Xue, J.L.; Zhu, J. Extracting alumina from coal fly ash using acid sintering-leaching process. *Light Met.* 2012, 201-206.
13. Chunbin Guo, Jingjing Zou, Shuhua Ma, Jianlin Yang, Kehan Wang. Alumina Extraction from Coal Fly Ash via Low-Temperature Potassium Bisulfate Calcination // *Minerals* 2019, 9, 585; doi: 10.3390/min9100585.
14. Bakirov Altynsary, Abdulina Saule, Zhunusov Ablay, Oleinikova Natalya. Preliminary chemical activation of ash waste with release of carbon concentrate // *CHEMICAL ENGINEERINGTRANSACTIONS*. – Brno, Czech Republic: 2021. – VOL. 88, 2021. – pp. 973-978.
15. Balmaeva L.M., Sotchenko R.K., Rahimov A.R., Lajner YU.A., Kabieva S.K., Vlasova L.M. Dilatometricheskoe issledovanie processa spekaniya s cel'yu kompleksnoj pererabotki tekhnogennyh zol // *Trudy Universiteta KarTU*. 2012. No. 3. pp. 38-40.