

*Шешуков О. Ю., Михеенков М. А., Лобанов Д. А.,  
Егузарьян Д. К., Некрасов И. В., Овчинникова Л. А.*

## **СОВМЕСТНАЯ ПЕРЕРАБОТКА КОВШЕВОГО И ЭЛЕКТРОПЕЧНОГО ШЛАКА: ОСНОВЫ БЕЗОТХОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

*Аннотация:* в работе описывается новый подход в комплексной безотходной одновременной утилизации ковшевого и электропечного шлаков, совместная переработка которых позволяет получать качественные товарные продукты

*Ключевые слова:* ковшевой шлак, электропечной шлак, клинкер, чугун, химический состав, фазовый состав, техногенные образования

*Abstract:* the work describes a new approach in complex wasteless co-utilization of LD and EAF slag. The approach allows obtaining of high-quality industrial products

*Keywords:* ladle furnace slag, electric-arc furnace slag, clicker, cast iron, chemical composition, phase composition, technogenic formations

### **Введение**

В настоящее время в черной металлургии выходит на передний план проблема комплексного и исчерпывающего использования имеющегося сырья. Таким сырьём могут выступать источники минерального сырья, а могут текущие и имеющиеся техногенные отходы. Ввиду того, что эксплуатируемые источники сырья с каждым годом всё больше истощаются, одним из решений такой проблемы является повторное использование техногенных отходов [1].

Основными техногенными образованиями, составляющими наибольший процент от количества твердых отходов в черной металлургии являются залежи конвертерного или электропечного шлака (далее шлак ДСП), а также залежи ковшевого шлака или шлака агрегата «печь-ковш» (далее шлак АКП). Представленные места хранения шлаков занимают достаточно обширные земные площади, что негативно сказывается на экологической обстановке, так и на экономике металлургических предприятий, вынуждая их вести дополнительные расходы. Переработка данных отходов положительно скажется как на экологической обстановке, так и на экономике предприятий. В свою очередь, комплексная и безотходная переработка, позволяющая из шлаков получить ценные товарные продукты также является и эффективным способом утилизации, и способом получить продукты, необходимые либо в металлургии, либо в других отраслях промышленности.

Известно [2-5], что электропечной шлак содержит в себе значительную часть оксидов железа, невысокое содержание оксида кальция, кремния и

незначительное оксида алюминия (табл. 1). Наибольшая часть работ по переработке такого шлака направлена на извлечение оксидов железа с их преобразованием в чугун или сталь. Неметаллическая или силикатная часть остаётся во многом не переработанной и направляется на складирование. Иные работы, связанные с утилизацией электропечного шлака, направлены на переработку силикатной части, игнорируя его металлическую часть, которая в дальнейшем также направляется на складирование [6-8]. Таким образом, при любом из имеющихся способов переработки шлака ДСП, остаются непереботанными его компоненты, которые могут быть также превращены в товарный продукт.

Таблица 1 – Усредненный химический состав электропечного шлака

Тип шлака	Химический состав компонента, %								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S
Шлак	<u>15,95</u>	<u>8,85</u>	<u>3,43</u>	<u>3,50</u>	<u>4,47</u>	<u>12,45</u>	<u>1,90</u>	<u>0,26</u>	<u>0,09</u>
ДСП	40,73	19,19	12,60	10,84	8,4	42,61	16,34	0,53	0,19

Также известно [9-11], что ковшевой шлак, напротив, содержит минимальные значения оксидов железа, но при этом значительные содержания оксида кальция и алюминия, невысокое значение оксида кремния (табл. 2).

Таблица 2 – Усредненный химический состав ковшевого шлака

Тип шлака	Содержание в шлаке, масс. %									M <sub>o</sub> *	K <sub>акт</sub> **
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>n</sub> O <sub>m</sub>	MnO	MgO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S		
Шлак	<u>38,7</u>	<u>8,7</u>	<u>16,6</u>	<u>0,3</u>	<u>0,08</u>	<u>4,7</u>	<u>0,03</u>	<u>0,05</u>	<u>0,24</u>	<u>1,8</u>	<u>1,2</u>
АКП	59,6	20,3	38,8	2,2	5,3	12,1	0,34	0,15	2,6	2,2	2,7

\*M<sub>o</sub> = CaO+MgO/SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
 \*\* K<sub>акт</sub> = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>

В работах, направленных на утилизацию ковшевого шлака, основное воздействие идёт на силикатную часть, металлическая часть – игнорируется. В этом случае основной упор при переработке данного шлака направлен на его стабилизацию, т.к. после охлаждения он быстро превращается в мелкозернистый порошок, который относится к экотоксичным материалам и не может быть переработан в щебневую продукцию [12], как это происходит в одном из вариантов переработки шлака ДСП. Таким образом, наиболее частым вариантом переработки ковшевого шлака является его превращение в стабильные куски, которые в последствии могут использоваться в строительной промышленности, в частности в производстве портландцемента. Однако и при переработке

силикатной части, зачастую, кроме металлической, остаются непереработанными и иные силикатные компоненты, требующие своей переработки. Данное положение также говорит о том, что ценный остаток от утилизации данного шлака может быть направлен не в отвал, а повторно использован.

Работ, изучающих совместную утилизацию шлака АКП и ДСП на данный момент, не имеется. Значительный пробел в исследованиях по совместной комплексной переработке данных шлаков, а также данные о том, что при различной переработке каждого из шлаков остаются непереработанными те компоненты, которые могут быть трансформированы в качественный продукт, привели к постановке цели данной работы: исследовать и разработать технологию совместной переработки конвертерного/электropечного и ковшевого шлаков. После переработки должно получиться два товарных продукта – металлургический чугун и портландцементный клинкер. При этом получаемые продукты должны быть товарного качества, соответствующие нормативным документам.

### **Образцы и методика эксперимента**

Для того, чтобы получить и чугун и портландцементный клинкер из имеющихся шлаков, на начальном этапе было решено обозначить первичную область проведения эксперимента, из которой получается клинкер. Такое решение было принято ввиду того, что для восстановления оксидов железа до металлических фаз и преобразования них в чугун, нужно соблюсти восстановительные условия, в то время, как для образования стабильного клинкера из силикатной части, нужно, чтобы в финальных продуктах содержался алит ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  или  $\text{C}_3\text{S}$ ) в количестве от 50 до 70 масс. %, белит ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  или  $\text{C}_2\text{S}$ ) в количестве от 15 до 30 масс. %, 5-10 масс. % целита ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  или  $\text{C}_3\text{A}$ ), и столько же браунмиллерита ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  или  $\text{C}_4\text{AF}$ ) [13, 14]. Таким образом, путем использования тройных фазовых диаграмм была определена первая область экспериментов А-В-С (рис. 1), соответствующая составам портландцементного клинкера и жидкоподвижным шлакам.

Область А-В-С, разбита симплекс-решетчатый планированием на 14 точек с шагом в 4,75 масс. % по содержанию  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при постоянном содержании  $\text{MgO}$  в 5 масс. %. С помощью полимерной модели строения шлаков было выявлено, что все точки составов в области А-В-С не только охватывают составы ковшевого и электropечного шлаков, но и пригодны для получения портландцементного клинкера со значениями жидкоподвижности (от 0,1 до 0,6 Па·с), указывающими на оптимальность протекания технологического процесса. При превышении 10 масс. % содержания твёрдых частиц в шлаке, шлак оказывае

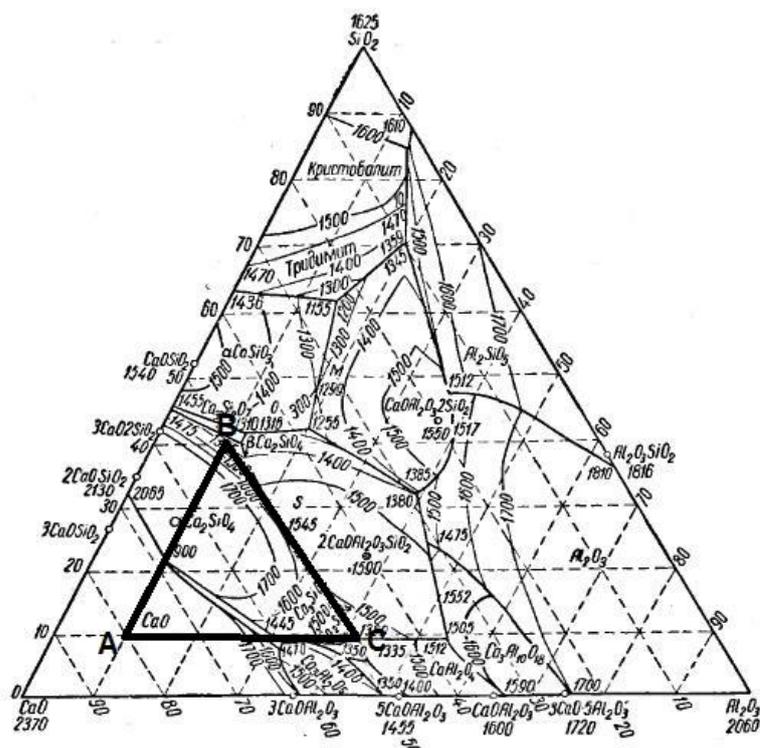


Рисунок 1 – Область диаграммы состояния тройной системы CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, соответствующая составам рафинировочного и электропечного шлака

сопротивление находящемуся в нём телу – частицам свободной извести, что также негативно сказывается на протекании процесса. Однако, полученные расчётные минимальные (менее 10 масс. %) или отсутствующие значения по количеству свободных частиц свободной извести, лишь дополнительно указывают на оптимальность протекания технологического процесса.

Расчётными значениями и моделированием был получен вывод о том, что данная область удовлетворяет как получению цементного клинкера, так и жидкоподвижного шлака, который способствует протеканию технологического процесса. На этом этапе было решено провести лабораторные опыты, позволяющие выявить, насколько расчётные данные будут отличаться от фактических.

Методика проведения эксперимента заключалась в том, что в соответствии с 14 рассчитанными симплекс-решетчатым методом точками подбирались шихта из чистых реагентов. Компоненты для смесей подбирались так, чтобы моделировали реальные шлаки АКП и ДСП, в случае необходимости добавлялась обожженная известь. Реагенты смешивались до однородной смеси, брикетировались и после загружались в периклазографитовый тигель. Тигли со шлаком по одному помещали в высокотемпературную печь сопротивления. Образец нагревали до полного расплавления шлака при 1500-1600 °С. Далее проводили ступенчатое охлаждение с замером вязкости, шаг охлаждения 30-50

град., скорость охлаждения 5 град./мин, интервал выдержки каждой ступени 10 мин. Вязкость исследуемых шлаков измеряли вибрационным вискозиметром конструкции Штенгельмейера С.В [15].

После проведения измерений тигли вынимали из печи и помещали в теплоизоляционный блок для медленного охлаждения. Результаты измерения вязкости описывались полиномом третьей степени. У охлажденных шлаков методами качественного рентгенофазового анализа (РФА) определяли тип фаз, содержащихся в шлаке, методами количественного РФА – количество данных фаз в шлаке. Результаты измерения вязкости при помощи полученных уравнений регрессии визуализировались в виде тернарных графиков: в качестве функций отклика приняты динамическая вязкость, Па·с, шлака при 1550 °С и содержание фаз в каждой точке факторного плана. Таким образом по результатам определения количественного содержания фаз на тернарный график изолиний равной вязкости наносили приблизительные границы областей существования обнаруженных в шлаках фаз.

В ходе исследования, на основе полученных экспериментальных данных, область А-В-С сужалась с каждой новой итерацией, чтобы выявить конкретные области химических составов, из которых образуется портландцементный клинкер. Всего было проведено три итерации. Для каждой новой велись расчёты по полимерной модели строения шлаков и использовались симплекс-решетчатое планирование. Каждая новая область сужалась вокруг успешно полученных составов, соответствующих клинкеру, все остальные данные, как успешные, так и нет, фиксировались отдельно друг от друга, чтобы выявлять на них новые заключения. Таким образом, была получена финальная область экспериментов (рис. 2).

Точки на этой области были построены таким образом, чтобы охватить максимальную область существования алита (№ 2, 5, 8, 11, 14) учетом возможного отклонения в сторону большего содержания чистого СаО (№ 1, 4, 7, 10, 13) или в сторону содержания С<sub>2</sub>S (№ 3, 6, 9, 12, 15). Кроме того, при подготовке смесей для эксперимента на этом этапе добавлялось боратное стекло, содержащее в себе 8,88% В<sub>2</sub>О<sub>3</sub> от общей массы, чтобы скорректировать стабилизацию шлака в нужном для исследования направлении. Стекло вводилось в смеси в количестве от 0,02 до 2,4 % от общей массы составов.

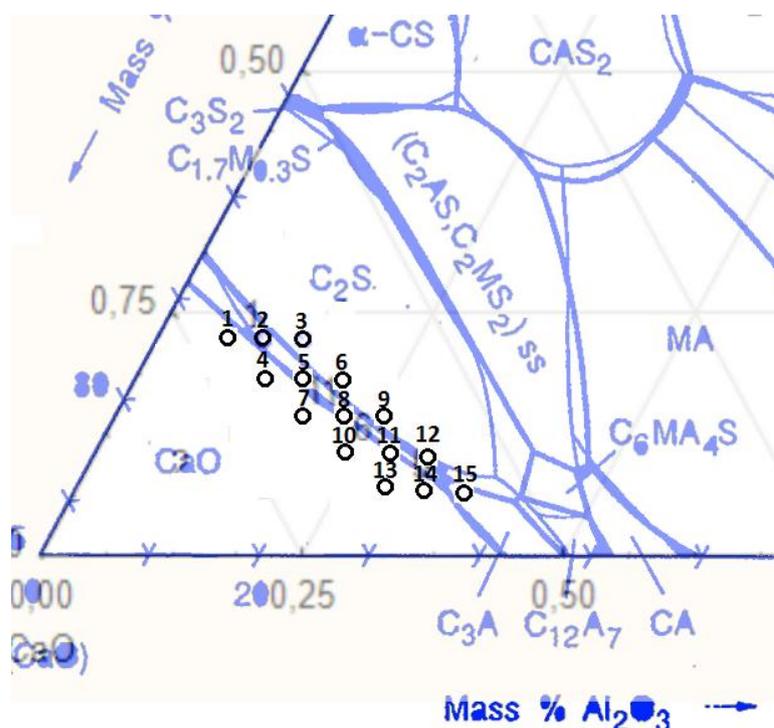


Рисунок 2 – Финальная область проведения эксперимента, нанесённая на диаграмму CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> при 5 % содержания MgO

### Результаты и обсуждение

В ходе первых двух итераций был получен вывод о том, что образцы обладают оптимальной жидкоподвижностью от 0,1 до 0,6 Па·с при температурах 1540-1560 °С с выдержкой в 10 мин. При снижении температуры вязкость шлаков возрастала, что негативно сказывалось на жидкоподвижности и протекании процесса в целом. Кроме того, был получен один образец кускового стабильного шлака, соответствующего по фазовому составу требованиям к портландцементному клинкеру. Его химический состав: 66,5 масс. % CaO; 9,5 масс. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 19 масс. % SiO<sub>2</sub>; 5 масс. % MgO.

По результатам проведения лабораторных опытов по финальной области эксперимента (рис. 2) были получены следующие результаты (табл. 3, табл. 4):

В ходе эксперимента было установлено, что шлаки №№ 3, 5, 6, 8, 10, 14 имеют белый цвет. Данное заключение говорит о том, что их фазовый состав приближается к составу белого портландцементного клинкера, который является более ценным по качеству по сравнению с обычным клинкером. Образцы № 12 и 15 получились полностью стабильными, однако по фазовому составу они не соответствуют требованиям ГОСТ 31108 «Цементы общестроительные. Технические условия», где указано, что сумма β-C<sub>2</sub>S фазы и фазы C<sub>3</sub>S должна составлять более 67 %. Однако, с учётом в сумме C<sub>3</sub>A фазы, становится возможным объяснение их кусковости и стабильности, что может быть учтено,

Таблица 3 – Результаты по вязкости и фазам в финальной итерации опытов

№ смеси	Состав смеси, масс. %					Вязкость,		Сумма C <sub>3</sub> S, β-C <sub>2</sub> S и C <sub>3</sub> A, %
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Боратное стекло	Расчетная	Измеренная	
1	67,01	5,25	19,29	5,00	3,69	0,088	0,105	70,23
2	63,69	9,10	19,96	5,00	2,40	0,115	1,703	62,21
3	60,28	12,90	20,45	5,00	1,46	0,139	0,101	74,97
4	65,64	11,01	16,59	5,00	1,89	0,138	0,117	64,31
5*	62,19	14,78	17,00	5,00	1,11	0,170	0,216	88,33
6*	58,68	18,51	17,27	5,00	0,59	0,198	0,265	74,39
7	64,08	16,65	13,50	5,00	0,82	0,218	0,189	55,25
8*	60,54	20,36	13,72	5,00	0,41	0,254	0,110	85,23
9	56,96	24,04	13,84	5,00	0,17	0,287	0,827	70,23
10	60,60	24,04	10,20	5,00	0,17	0,368	0,135	65,22
11	56,98	27,70	10,26	5,00	0,06	0,406	0,122	64,80
12	53,35	31,35	10,28	5,00	0,02	0,440	0,403	75,93
13	60,63	27,70	6,62	5,00	0,06	0,567	0,248	66,28
14*	56,99	31,35	6,64	5,00	0,02	0,603	0,469	83,34
15	53,35	34,99	6,64	5,00	0,02	0,634	0,862	77,22

\* – составы, соответствующие портландцементному клинкеру

Таблица 4 – Результаты по стабильности в финальной итерации опытов

№ шлака	Распад, %	Стабильность, %
1	100	0%
2	100	0
3	85	15
4	100	0
5*	0	100
6*	0	100
7	100	0
8*	0	100
9	85	15
10	85	15
11	85	15
12	0	100
13	100	0
14*	0	100
15	0	100

\* – составы, соответствующие портландцементному клинкеру

как частичное соответствие требованиям. Стоит отметить образец № 3, который удовлетворяет требованиям по сумме представленных фаз, однако, данный образец распался, и лишь 15 % от его общей массы являются стабильными. При анализе фазового состава этого образца, было выявлено, что он имеет значительное количество фазы  $\gamma$ - $C_2S$  (около 14 %), которая и стала основным фактором распада данного шлака. Также выявлено, что образцы № 1 и 9 при учёте фазы  $C_3A$  могут соответствовать требованиям к портландцементному клинкеру. Но ввиду того, что оба шлака содержат значительное количество фазы  $\gamma$ - $C_2S$  (более 10 % в обоих случаях), это привело к их распаду.

Все остальные образцы были объявлены не удовлетворяющими требованиям по получению портландцементного клинкера. Таким образом был получен вывод, что образцы № 5, 6, 8, 14 соответствуют составу белого цементного клинкера и могут быть использованы в дальнейшем. Отсюда получено заключение о том, что в условиях лабораторных экспериментов действительно возможна полная утилизация шлаков с образованием портландцементного клинкера.

Последующим шагом стала проверка возможности получения чугуна и клинкера, соответствующих требованиям ГОСТ из реальных шлаков. Для этого был отобран состав имеющихся АКП и ДСП шлаков с ПАО «Северский трубный завод». Проведение лабораторных экспериментов проводилось по методике, описанной выше, с совместным помолом представленных шлаков, извести и боратного стекла в соответствии с выявленными составами шихты для клинкера, соблюдением температурного режима и последующим медленным охлаждением. Опытные плавки проводились для состава, полученного в первой итерации, для составов, соответствующих белому цементу, а также для образцов № 12 и 15 (рис. 2, табл. 3) для повторной проверки возможности образования клинкера и чугуна.

Кроме того, чтобы получить чугун из обозначенных шлаков, нужно восстанавливать его углеродистым восстановителем, которым в промышленных условиях является кокс. Ввиду того, что в используемом шлаке находится исключительно оксид  $FeO$ , восстановление железа было рассчитано с помощью программы HSC Chemistry по реакции:



Расчётным путем определено, что на 1 %  $FeO$  приходится 0,167 % углеродистого восстановителя. Данное положение учитывалось при расчете

необходимого кокса сверх 100% в смесях из шлака АКП и ДСП для восстановления железа.

В результатах экспериментов оптимальный шлак образовался со значительным количеством шлака ДСП относительно шлака АКП. При противоположной картине не образуются необходимые фазы шлакового состава. Это связано с тем, что через фазы шлака ДСП при высокотемпературном превращении проходит следующая цепочкой фазовых переходов, позволяющая получить конечные фазы клинкера ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ):



Для получения клинкера, полностью соответствующего требованиям ГОСТ, был проведен экспериментальный синтез портландцементного клинкера и чугуна. Синтез проводился по той же лабораторной схеме опытов путём добавки пыли ДСП во время завершающих этапов опытов, для того, чтобы сформировать фазы клинкера, содержащие оксиды железа. Однако на этом этапе был получен иной результат: оксиды железа, введенные в шлак вместе с пылью ДСП, успели восстановиться, и в итоге полученный клинкер удовлетворял требованиям ГОСТ.

По итогам плавки во всех опытах был получен чугун, соответствующий требованиям ГОСТ 805 к передельному чугуну марки ПЛ1. В таблице 5 приведен химический состав полученного чугуна для состава самой первой итерации.

Таблица 5 – Химический состав полученного чугуна

Продукт	Содержание в чугуне, масс. %				
	C	Mn	Si	P	S
Чугун	3,13	1,26	0,109	0,036	0,021

Однако, не смотря на получение во всех плавках чугуна, образцы смесей из шлаков АКП и ДСП, повторяющие составы № 12 и 15, в конечном итоге получились не соответствующими требованиям к клинкеру.

Таким образом, на данном этапе были подтверждены составы смесей, из которых получается и портландцементный клинкер и передельный чугун (рис. 3, табл. 6). Оба полученных продукта в опытах соответствуют требованиям нормативных документов, что говорит об успешной совместной утилизации всех компонентов, вовлеченных в этот процесс.

Таблица 6 – Конечные составы шлаков для получения клинкера и чугуна

№ смеси	Состав смеси, масс. %				
	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	Боратное стекло
1	66,50	9,50	19,00	5,00	0,00
2	62,19	14,78	17,00	5,00	1,11
3	58,68	18,51	17,27	5,00	0,59
4	60,54	20,36	13,72	5,00	0,41
5	56,99	31,35	6,64	5,00	0,02

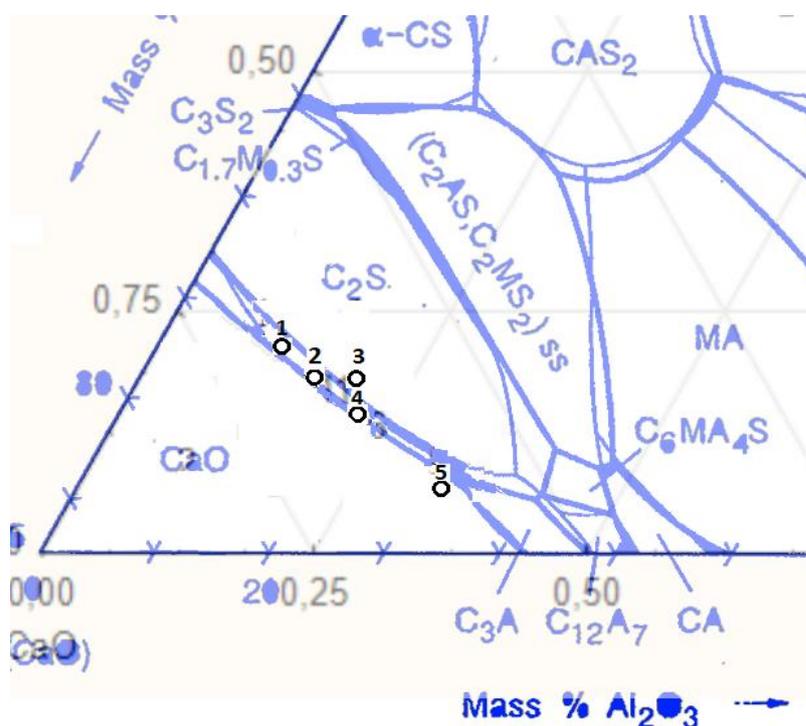


Рисунок 3 – Визуальное отображение конечных составов шлака для получения клинкера и чугуна

Таким образом, в ходе была достигнута цель исследования и разработана технология совместной переработки ковшевого и конвертерного/электропечного шлака, заключающаяся в следующей последовательности:

- 1) Совместный помол шлаковых компонентов вместе с добавкой извести, кокса и боратного стекла в расчётном химическом количестве, полученном в ходе данного исследования.
- 2) Плавление полученного состава до температур 1540-1560 °С, с последующей выдержкой в 10 минут.

3) Добавление пыли ДСП на финальном этапе для формирования металлического остатка.

В результате реализуемой технологии не образуется отходов, что обеспечивает полную утилизацию шлаков из шлаковых отвалов.

### **Заключение.**

В итогам проведенного исследования сделано заключение о возможности одновременного получения чугуна и шлакового клинкера как на основе модельных шлаков, так и на основе реального ковшевого и электропечного шлаков, извести и незначительной добавки боратного стекла в различных соотношениях.

Обозначены конкретные химические шлаковые составы, из которых получается цементный клинкер и чугун, соответствующие требованиям нормативных документов. Разработана, проверена и предоставлена технология совместной переработки электропечного и ковшевого шлаков, в ходе которой образуются товарные продукты и не остается непереработанного остатка. Предложенная разработанная технология позволяет реализовать полную утилизацию представленных видов шлаков, решая тем самым вопрос антропогенной нагрузки на окружающую среду.

### ***Библиографический список***

1. Панфилов М. И. *Металлургический завод без шлаковых отвалов* / М. И. Панфилов. – Москва : Metallurgia, 1978. – 248 с.
2. Анализ рафинировочных свойств и вязкости шлаков внепечной обработки стали / Д. К. Егiazарьян, А. Н. Шаманов, О. Ю. Шешуков [и др.] // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования : сб. тр. 72 междунар. науч.-техн. конф.* – Магнитогорск : МагнГТУ, 2014. – Т. 1 – С. 180–185.
3. Уфимцев В. М. Шлаки в составе бетона: новые возможности / В. М. Уфимцев, Л. А. Коробейников // *Технологии бетонов.* – 2014. – № 6. – С. 50–53
4. Передовые технологии эксплуатации футеровки электросталеплавильной печи на примере ДСП-135 ОАО «Северский трубный завод» / А. А. Клачков, В. О. Красильников, М. В. Зуев [и др.] // *Новые огнеупоры.* – 2012. – № 3. – С. 99–104.
5. Аксенова В. В. Исследование равновесия системы «шлак-металл» перед выпуском из ДСП-160 / В. В. Аксенова, В. М. Сафонов // *Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство : материалы Тринадцатой Всерос. науч.-практ. конф., с междунар. участием (Старый Оскол, 23–25 нояб. 2016 г.).* – Старый Оскол : Старооск. технол. ин-т, 2016. – Т. 2. – С. 15–18.

6. Song Q. Effect of blast furnace slag and steel slag on cement strength, pore structure and autoclave expansion / Q. Song, B. Shen, Z. Zhou // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 168/170. – P. 17–20.
7. The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars / V. Ortega-López, José A. Fuente-Alonso, A. Santamaría [et al.] // *Construction and building materials*. – 2016. – Vol. 106. – P. 364–373.
8. Manso J. M. Electric arc furnace slag in concrete / J. M. Manso, J. J. Gonzalez, J. A. Polanco // *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2004. – Vol. 16, Is. 4. – P. 639–645.
9. Chemical Stabilization Features Of Ladle Furnace Slag In Ferrous Metallurgy / O. Yu. Sheshukov, M. A. Mikheenkov, D. K. Egiazaryan [et al.]. – DOI 10.18502/kms.v2i2.947 // *KnE Materials Science. Technogen-2017*. – 2017. – P. 59–64. – URL: <https://docviewer.yandex.ru/view/35973395/?page> (accessed: 13.04.2020).
10. Михеенков М. А. Шлаковые техногенные образования как материал для получения силикатных товарных продуктов и чугуна / М. А. Михеенков, О. Ю. Шешуков, Д. А. Лобанов // *Машиностроение : сетевой электрон. науч. журн.* – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 46–51.
11. Особенности формирования шлаков черной металлургии и возможные пути улучшения технологии металлургического передела и комплексной переработки шлаков / Д. А. Лобанов, М. А. Михеенков, О. Ю. Шешуков [и др.] // *XV Международный конгресс сталеплавильщиков : сб. тр., к 100-летию Нац. исслед. технол. ун-та «МИСиС» и 380-летию российской металлургии*. – Тула : РПК ПринтАП, 2018. – С. 462–467.
12. Сычев М. М. Алит и белит в портландцементном клинкере и процессы легирования / М. М. Сычев, В. И. Корнеев, Н. Ф. Федоров ; под ред. Н. А. Торопова. – Ленинград : Москва : Стройиздат, 1965. – 152 с.
13. Бутт Ю. М. Технология цемента и других вяжущих материалов : учебник / Ю. М. Бутт. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1976. – 407 с.
14. Бутт Ю. М. Портландцемент (минералогический и гранулометрический составы, процессы модифицирования и гидратации) / Ю. М. Бутт, В. В. Тимашев. – Москва : Стройиздат, 1974. – 328 с.
15. Штенгельмейер С. В. Электромагнитный вибрационный вискозиметр / С. В. Штенгельмейер // *Заводская лаборатория*. – 1964. – № 2. – С. 238–239.