

УДК 666.368:669

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЫЛИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА В ЦЕЛЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ЕЕ ПЕРЕРАБОТКИ

Канд. техн. наук Е. О. БОГДАН (e-mail: bohdan_ekaterina@mail.ru), канд. техн. наук Ю. Г. ПАВЛЮКЕВИЧ, П. С. ЛАРИОНОВ, Н. Н. ГУНДИЛОВИЧ, канд. хим. наук А. А. ЧЕРНИК

Белорусский государственный технологический университет (Беларусь, г. Минск)

Изучены химический, фазовый состав и свойства пыли металлургического производства, определена ее структура и гранулометрический состав. Исследованы физико-химические процессы, протекающие при термообработке пыли в интервале температур 20 – 1200 °С. На основании проведенных исследований предложены основные направления переработки исследуемой пыли в целях получения полезных продуктов

Ключевые слова: пыль металлургического производства, химический состав, фазовый состав, структура, керамические материалы, гидromеталлургическое извлечение цинка, цинковый порошок, пигменты, микроудобрения

COMPREHENSIVE STUDY OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF DUST OF METALLURGICAL PRODUCTION IN ORDER TO DETERMINE THE MAIN DIRECTIONS OF ITS PROCESSING

E. O. Bogdan, Yu. G. Pauliukevich, P. S. Laryionau, M. M. Hundzilovich, A. A. Chernik (Belarusian State Technological University, Belarus, Minsk)

The chemical, phase composition of the dust properties of metallurgical production was studied, its structure and particle size distribution were determined. The physicochemical processes occurring during heat treatment of dust in the temperature range of 20 – 1200 °C were studied. Based on the studies, the main directions of processing the investigated dust are proposed in order to obtain useful products

Keywords: dust of metallurgical production, chemical composition, phase composition, structure, ceramic materials, hydrometallurgical zinc extraction, zinc powder, pigments, micronutrients

Переработка отходов производства позволяет не только рационально использовать природное сырье, повышая эффективность производства, но и способствует улучшению экологической обстановки на предприятии и территории региона. В сталеплавильном производстве техногенные отвалыные продукты достигают 30 % от объема выпуска стали, включая около 80 % шлаков и примерно 20 % пыли и шламов газоочистки. Мировой суммарный прирост последних оценивается в 10 – 15 млн т в год.

Из литературных данных известно, что в сталеплавильном процессе 1 – 2 % сырьевых материалов, вводимых в плавильный агрегат, превращаются

в пыль, для отдельных технологий этот показатель может достигать 10 % [1 – 4]. Складированные электросталеплавильные отходы формируют зону интенсивного загрязнения преимущественно щелочного типа, негативно влияют на атмосферу, гидросферу и почвенный покров окружающей местности, а через них – на состояние флоры, фауны и здоровье людей. Не менее важной проблемой для предприятий является повторное использование уловленной после металлургических печей пыли.

В связи с этим разработка и применение эффективных технологий по переработке накопленных на территориях предприятий отходов относятся

к важнейшим задачам металлургии, а научные исследования, направленные на разработку технологий по переработке и утилизации отходов сталеплавильного производства, весьма актуальны.

Одним из отходов, образующимся в процессе выплавки стали на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» (Республика Беларусь, г. Жлобин), является пыль, улавливаемая фильтрами в процессе очистки газов, отходящих от дуговых сталеплавильных печей.

Из литературных данных известно, что возврат газоочистных пылей, содержащих до 40 % Zn и 50 % Fe, на доменный передел без предварительного обесцинкования приводит к нежелательному увеличению содержания цинка в чугуне и образованию настывлей в плавильных печах [1 – 4].

Известны научные работы, в которых осуществляется извлечение цинка из отходов сталеплавильного производства преимущественно пирометаллургическими методами. Однако эта технология имеет ряд недостатков: высокий расход восстановителя, получение низкокачественных товарных продуктов и дополнительное загрязнение окружающей среды [1 – 4].

Целью настоящей работы явилось комплексное исследование химического, фазового состава, степени дисперсности и других физико-химических свойств пыли, а также процессов, протекающих при ее термообработке, для установления основных направлений утилизации и переработки пыли, образующейся при очистке газов, отходящих от сталеплавильных печей на ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК».

Для проведения исследований предприятием были предоставлены образцы пыли, образующейся в результате очистки на пылегазоулавливающих установках (ПГУ), отходящих дымовых газов от трех дуговых сталеплавильных печей (№ 1, 2, 3). Далее по тексту изучаемые образцы пыли обозначены как ПГУ-1,2 и ПГУ-3.

Исследуемые образцы пыли представляют собой высокодисперсный полифракционный порошок с насыпной плотностью 734,6 и 597,6 кг/м³ соответственно для пыли ПГУ-1,2 и ПГУ-3. Цвет образцов пыли зеленовато-коричневый¹.

Химический состав образцов пыли определяли на волновом рентгенофлуоресцентном спектрометре Asios (PANalytical, Нидерланды) и с помощью рентгеноспектрального микрозондового анализа на установке JEOL (Япония). В табл. 1 представлен химический состав исследуемой пыли. Преобладающими являются соединения железа, цинка, кальция. Их массовое содержание² в пересчете на оксиды составляет (%): 33,0 – 36,5 Fe₂O₃; 27,1 – 30,1 ZnO; 6,16 – 10,20 CaO.

По данным микрозондового анализа (табл. 2), на локальных участках частиц пыли массовое содержание оксида цинка может достигать 42,24 – 46,68 % при содержании оксида железа 32,42 – 34,46 %.

Для изучения фазового состава пыли ПГУ использовали рентгеновский дифрактометр D8 Advance фирмы Bruker (Германия). Для идентификации кристаллических фаз пользовались международной картотекой Joint Comitee on Powder Diffraction Standarts и программное обеспечение DIFFRAC PLUS фирмы Bruker.

Таблица 1. Химический состав исследуемой пыли ПГУ (в пересчете на оксиды), определенный на волновом рентгенофлуоресцентном спектрометре Asios (PANalytical, Нидерланды)

Проба пыли	Массовое содержание оксидов, %										
	Fe ₂ O ₃	CaO	ZnO	MnO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃
ПГУ-1,2	33,01	6,16	30,13	2,21	4,55	0,94	1,06	3,54	5,04	0,22	0,43
ПГУ-3	36,49	10,26	27,11	1,92	3,59	0,58	0,91	3,54	4,33	0,13	0,32
Проба пыли	PbO	CuO	TiO ₂	SrO	NiO	Cl	CdO	SnO ₂	Sb ₂ O ₃	BaO	SO ₃
ПГУ-1,2	2,01	0,26	0,10	0,02	0,03	4,12	2,69	0,06	0,02	0,08	3,32
ПГУ-3	1,05	0,21	0,05	0,02	0,02	3,98	2,46	0,05	–	0,07	2,91

¹ Здесь и далее цвет образцов пыли и изделий определялся визуально по шкале 1000-цветного атласа ВНИИ им. Д. И. Менделеева.

² Здесь и далее массовое содержание, %.

Таблица 2. Химический состав исследуемой пыли ПГУ (в пересчете на оксиды), определенный методом рентгеноспектрального микронзондового анализа на установке JEOL (Япония)

Проба пыли	Массовое содержание оксидов, %											
	ZnO	FeO + Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	MnO	CuO	SO ₃	Cl
ПГУ-1,2	46,68	34,46	1,28	3,82	3,99	2,14	–	0,66	2,91	–	1,70	2,36
ПГУ-3	42,24	32,42	1,03	4,85	3,12	2,40	5,23	0,29	–	1,92	1,23	2,63

Как видно из дифрактограмм, приведенных на рис. 1, фазовый состав исследуемых образцов пыли ПГУ-1,2 и ПГУ-3 представлен преимущественно кристаллическими фазами: магнетита FeO·Fe₂O₃, феррита α-Fe, франклинита ZnO·Fe₂O₃, мелантерита FeSO₄·7H₂O, вюститита FeO, сидерита FeCO₃, вульфингита Zn(OH)₂, лавренсита FeCl₂, кальцита CaCO₃, магнезита MgCO₃ и смитсонита ZnCO₃.

Изучение структуры пылей с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV (Япония) позволило установить, что микроструктура исследуемых образцов ПГУ-1,2 и ПГУ-3 схожа. Она представлена отдельными частицами и их агломератами, текстура однородная, форма частиц преимущественно изометрическая (рис. 2). Морфологически в материалах кристаллические фазы практически не идентифицировались.

Исследование гранулометрического состава образцов пыли проводили на лазерном анализаторе размеров частиц HORIBA LA-950. На основании анализа кривых интегрального и дифференциального распределения частиц по размерам установлено, что исследуемые образцы пыли являются полидисперсными материалами. Как видно из рис. 3, размер частиц пыли ПГУ-1,2 составляет 0,34 – 262,38 мкм. Пыль ПГУ-3 характеризуется размером частиц от 0,29 до 77,34 мкм. Причем

содержание фракции 1 – 10 мкм в обоих образцах приблизительно одинаково и составляет около 64 %.

Поскольку пыль ПГУ планируется использовать в качестве компонента керамической массы для получения материалов строительного назначения, особый интерес представляют физико-

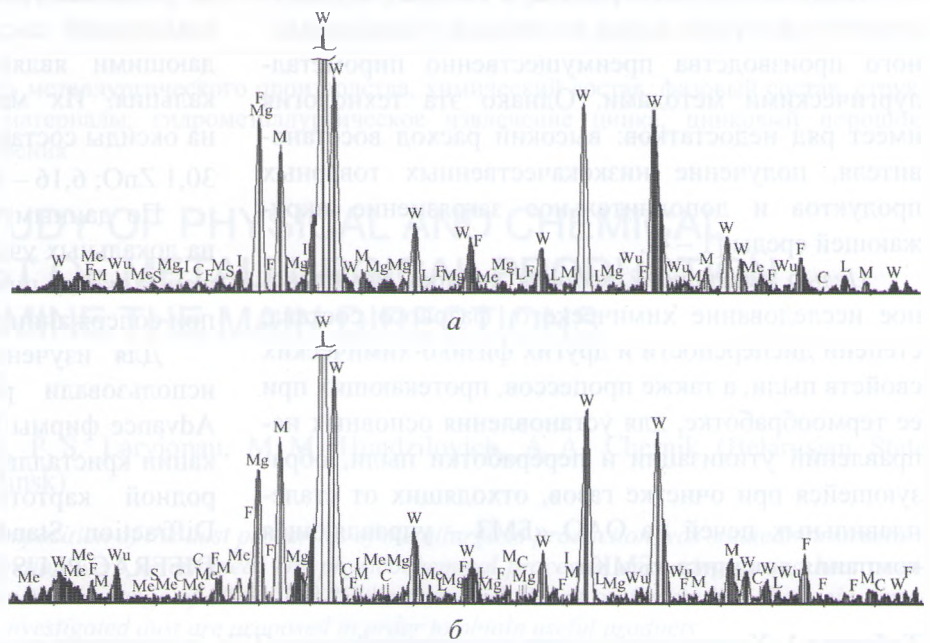


Рис. 1. Дифрактограмма образцов пыли ПГУ-1,2 (а) и ПГУ-3 (б)
 М – магнетит; Mg – магнезит; I – железо; F – франклинит; Me – мелантерит; W – вюстит; S – сидерит; C – кальцит; Wu – вульфингит; L – лавренсит

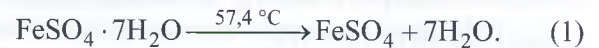


Рис. 2. Электронно-микроскопические снимки с поверхности частиц пыли ПГУ-1,2

химические процессы, которые протекают при ее термической обработке. Исследования проводили на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 404 F3 Pegasus (NETZSCH, Германия), а также на дериватографе OD-102 фирмы MOM (Венгрия). Дополнительно выполняли многопозиционную термообработку исследуемых образцов пыли в диапазоне температур 500 – 1300 °С с последующим изучением формирующихся кристаллических фаз на рентгеновском дериватографе.

На кривых ДСК пыли ПГУ-1,2 и ПГУ-3, приведенных на рис. 4, наблюдается эндотермический

эффект с минимумом при 57,4 °С, обусловленный дегидратацией мелантерита $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ [5]:



Эндотермические эффекты с минимумами при температурах 170,0 и 186,4 °С связаны с разложением смитсонита ZnCO_3 и вульфингита $\text{Zn}(\text{OH})_2$ [5]:

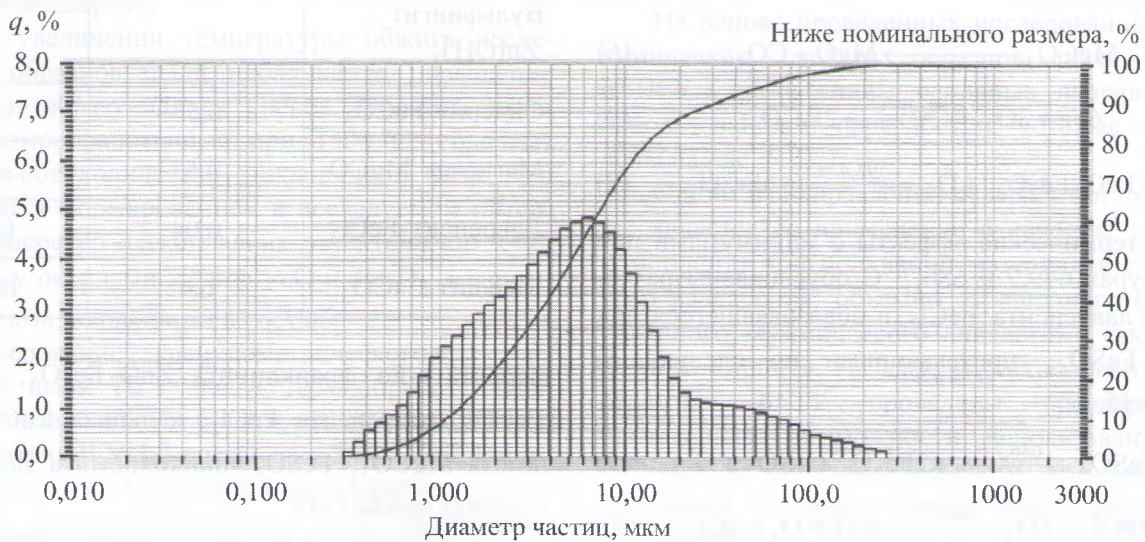
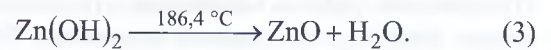


Рис. 3. Интегральная и дифференциальная кривые распределения частиц пыли ПГУ-1,2 по размерам

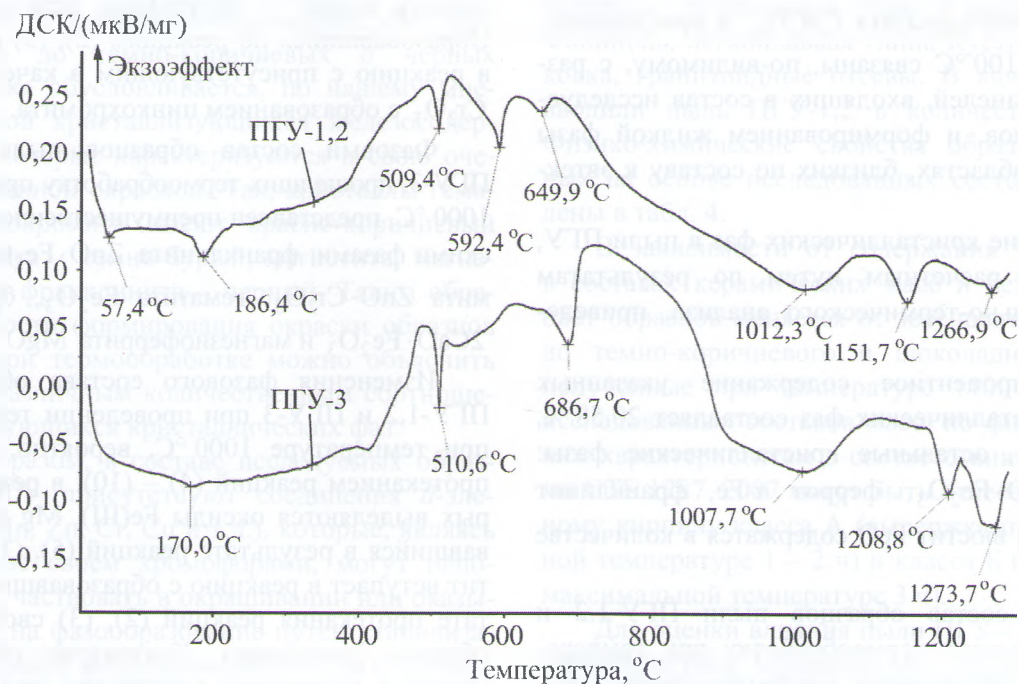
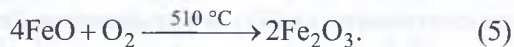
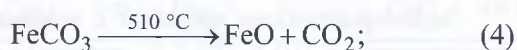


Рис. 4. Кривые ДСК исследуемой пыли ПГУ

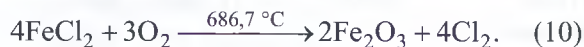
Эндотермические эффекты с минимумами при температурах 509,4 и 510,6 °С обусловлены с разложением сидерита FeCO_3 и последующим окислением вюстита FeO [6]:



При температуре 592,4 °С наблюдается эндотермический эффект, связанный с разложением магнезита MgCO_3 , окислением магнетита $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и феррита $\alpha\text{-Fe}$ [6]:



Эндотермические эффекты с минимумами при температурах 649,9 и 686,7 °С обусловлены разложениями лавренсита FeCl_2 и образовавшегося при 57,4 °С FeSO_4 , протекающими по следующим реакциям [5, 6]:



Эндотермические эффекты с минимумами при температурах 1007,7 и 1012,3 °С обусловлены декарбонизацией кальцита CaCO_3 , а при температурах выше 1100 °С связаны, по-видимому, с разложением шпинелей, входящих в состав исследуемых материалов, и формированием жидкой фазы в локальных областях, близких по составу к эвтектическим.

Содержание кристаллических фаз в пыли ПГУ, определенное расчетным путем по результатам дифференциально-термического анализа, приведено в табл. 3.

Общее процентное содержание указанных в табл. 3 кристаллических фаз составляет 20,58 %, следовательно, остальные кристаллические фазы: магнетит $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, феррит $\alpha\text{-Fe}$, франклинит $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и вюстит FeO содержатся в количестве 79,42 %.

Фазовый состав образцов пыли ПГУ-1,2 и ПГУ-3, прошедших термообработку при температуре 500 °С, представлен преимущественно кристаллическими фазами: магнетита $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$,

Таблица 3. Содержание кристаллических фаз в пыли ПГУ

Кристаллическая фаза	Потери массы в связи с разложением соединения, %	Массовое содержание кристаллической фазы, %
Мелантерит $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,48	1,06
Смитсонит ZnCO_3	0,81	2,30
Вульфингит $\text{Zn}(\text{OH})_2$		
Сидерит FeCO_3	0,53	1,40
Магнезит MgCO_3	0,63	1,20
Лавренсит FeCl_2	0,04	0,07
Кальцит CaCO_3	6,4	14,55

феррита $\alpha\text{-Fe}$, франклинита $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, сидерита FeCO_3 , лавренсита FeCl_2 , кальцита CaCO_3 , магнезита MgCO_3 , FeSO_4 , цинкохромита $\text{ZnO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ и оксида цинка ZnO .

При сравнении фазовых составов образцов пыли ПГУ-1,2 и ПГУ-3, не прошедших термообработку и обожженных при температуре 500 °С, можно сделать вывод о протекании реакций (1) – (3). Образовавшийся по реакциям (2), (3) ZnO вступает в реакцию с присутствующим в качестве примеси Cr_2O_3 с образованием цинкохромита.

Фазовый состав образцов пыли ПГУ-1,2 и ПГУ-3, прошедших термообработку при температуре 1000 °С, представлен преимущественно кристаллическими фазами: франклинита $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, цинкохромита $\text{ZnO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$, гематита Fe_2O_3 , браунмилерита $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и магнезиоферрита $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Изменения фазового состава образцов пыли ПГУ-1,2 и ПГУ-3 при проведении термообработки при температуре 1000 °С, вероятно, обусловлены протеканием реакций (4) – (10), в результате которых выделяются оксиды $\text{Fe}(\text{III})$, Mg и Ca . Образовавшийся в результате реакций (5), (7) – (10) гематит вступает в реакцию с образовавшимся в результате протекания реакций (2), (3) свободным ZnO , образуя франклинит. Количество образующегося гематита превышает количество свободного ZnO , в связи с чем избыток гематита связывается с окси-

дами Mg и Ca с образованием магнезиоферрита и браунмилерита.

Фазовый состав образцов пыли ПГУ-1,2 и ПГУ-3, прошедших термообработку при температурах 1100 и 1200 °С, представлен преимущественно кристаллическими фазами: франклинита $ZnO \cdot Fe_2O_3$, цинкохромита $ZnO \cdot Cr_2O_3$, браунмилерита $2CaO \cdot Fe_2O_3$ и магнезиоферрита $MgO \cdot Fe_2O_3$.

Изменения в фазовом составе при повышении температуры от 1000 до 1100 °С обусловлены, вероятно, завершением реакций декарбонизации и образованием из присутствующих оксидов Fe(III) и Ca браунмилерита.

При увеличении температуры обжига исследуемых образцов пыли наблюдается повышение плотности образующихся спеков. Образцы пыли ПГУ, термообработанные при 1300 °С, содержат значительное количество стекловидной фазы, что объясняется формированием в исследуемом интервале температур легкоплавких эвтектических смесей между оксидами железа FeO и Fe_2O_3 и другими оксидами, входящими в состав.

Исследование гранулометрического состава образцов пыли ПГУ после термообработки при 1000 °С позволило установить следующее. Размер частиц пыли ПГУ-1,2 составляет 2,27 – 262,4 мкм, пыли ПГУ-3 – от 1,0 до 262,4 мкм. Причем в обоих образцах термообработанной пыли преобладает фракция 10 – 100 мкм, количество которой составляет около 67 и 48 % соответственно.

В процессе термообработки образцы пыли меняют окраску от зеленовато-коричневых (без термообработки) до темно-коричневых и черных тонов. Окраска обуславливается, по нашему мнению, природой кристаллизующихся железосодержащих фаз, которые характеризуются в свою очередь определенной окраской. Так, кристаллы гематита и цинкохромита имеют красно-коричневый цвет, маггемита – темно-бурый, магнетита, магнезиоферрита и франклинита – черный. Таким образом, особенности формирования окраски образцов пыли ПГУ при термообработке можно объяснить наличием и различным количественным соотношением формирующихся кристаллических фаз.

Таким образом, в составе исследуемых образцов пыли ПГУ присутствуют соединения *d*-элементов (Fe, Mn, Zn, Cr, Cu и т.д.), которые, являясь в большинстве своем хромофорами, могут непосредственно участвовать в окрашивании или оказывать влияние на фазообразование путем стабилизации определенных железосодержащих фаз. Присутствие оксидов щелочных и щелочноземельных металлов, а также соединений железа будет оказывать

флюсующее воздействие при спекании керамических масс, что положительно скажется на физико-химических свойствах готовых изделий. Исходя из химического состава образцов пыли ПГУ-1,2 и ПГУ-3 возможно ее использование в качестве сырьевого компонента для получения лицевого и клинкерного кирпича, бетонных тротуарных плит, а также в качестве наполнителя лакокрасочных материалов, который дополнительно будет выполнять роль пигмента. Кроме того, учитывая высокое содержание цинка, можно обоснованно рассматривать пыль ПГУ как перспективное техногенное сырье для получения цинка.

На основе проведенных исследований физико-химических свойств образцов пыли ПГУ-1,2 и ПГУ-3 разработаны основные направления ее использования и переработки, которые представлены на рис. 5.

Одним из направлений переработки пыли ПГУ-1,2 является ее применение в качестве сырьевого компонента при получении материалов строительного назначения: объемно окрашенного и ангобированного керамического лицевого, а также клинкерного кирпича. На кафедре технологии стекла и керамики БГТУ проведены предварительные исследования возможности использования пыли ПГУ-1,2 в качестве сырьевого компонента для получения указанных материалов строительного назначения.

Образцы клинкерного кирпича получали на основе местных сырьевых материалов Республики Беларусь: тугоплавкая глина Городное, суглинки Фаниполь, легкоплавкая глина Кустиха или Гайдукровка, гранитоидные отсеивы. В качестве добавки вводили пыль ПГУ-1,2 в количестве 5 – 15 %. Физико-химические свойства образцов, полученных на основе исследованных составов, представлены в табл. 4.

В зависимости от содержания пыли ПГУ-1,2 в составах керамических масс и режимов обжига цвет образцов меняется от зеленовато-коричневого до темно-коричневого и шоколадного. Изделия, полученные при температуре 1100 °С на основе исследованных составов масс, по физико-химическим характеристикам в соответствии с требованиями СТБ 1787–2007 могут быть отнесены к клинкерному кирпичу класса А (выдержка при максимальной температуре 1 – 2 ч) и класса Б (выдержка при максимальной температуре 3 ч).

Для оценки влияния пыли ПГУ-1,2 на цветовые характеристики керамического кирпича были составлены модельные керамические массы, содержащие пыль ПГУ-1,2 в количестве от 20 до 80 %.

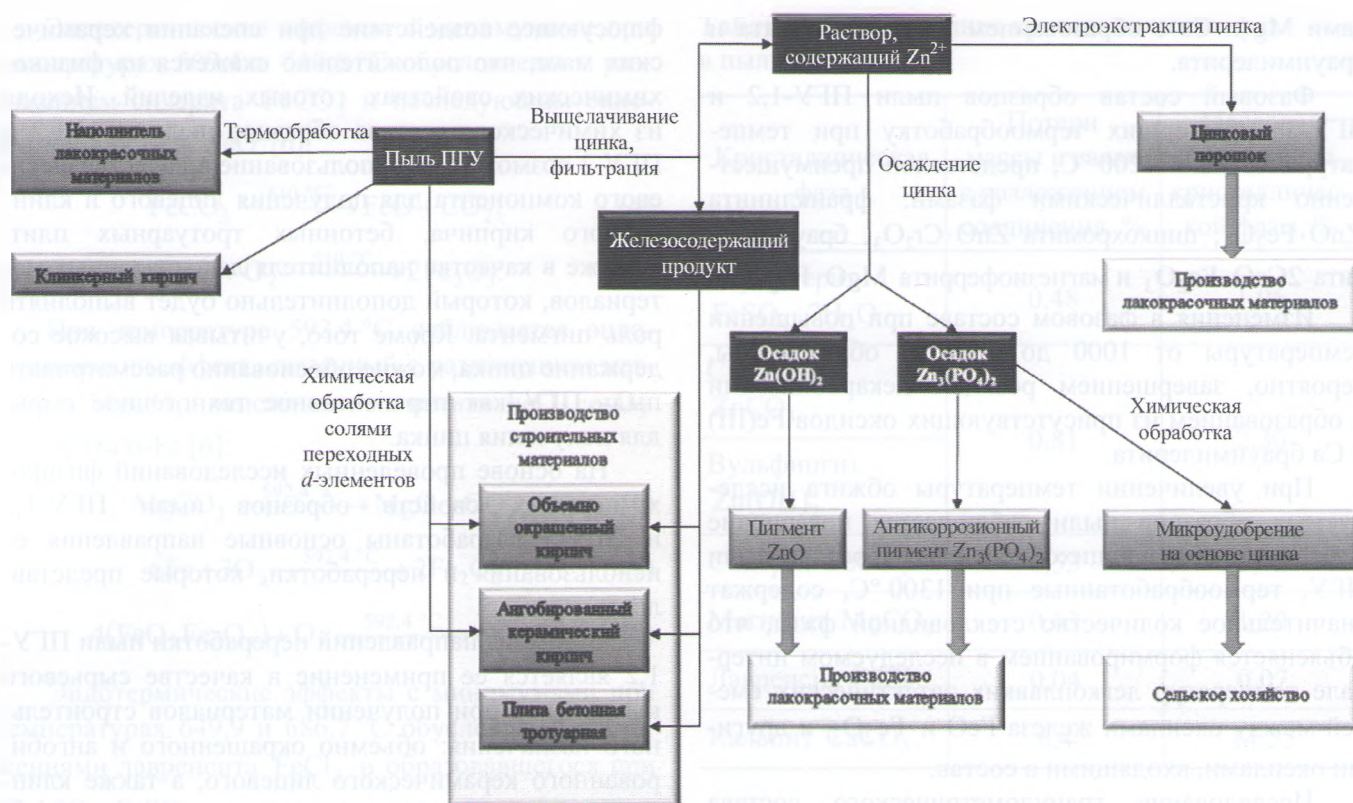


Рис. 5. Основные направления переработки пыли ПГУ

Таблица 4. Показатели свойств исследованных образцов клинкерного кирпича в сопоставлении с требованиями СТБ 1787–2007

Физико-химические свойства кирпича	Показатели свойств	Требования СТБ 1787–2007	
		Класс А	Класс Б
Водопоглощение, %	3,95 – 5,30	Не более 4	Не более 6
Открытая пористость, %	9,35 – 12,50	–	–
Кажущаяся плотность, кг/м ³	2336 – 2450	Не менее 2000	Не менее 1950
Прочность при изгибе, МПа	12 – 21	Не менее 3,4	Не менее 2,5
Общая усадка, %	6,79 – 7,97	–	–
Морозостойкость, циклов	150	Не менее 150	Не менее 100

Модельные массы в виде ангоба наносились на отформованный керамический кирпич и обжигались в электрической печи при температуре 1000 °С в течение 1 ч.

Полученные образцы характеризовались пепельным цветом с зеленым оттенком, что свидетельствует об их невысоких декоративных характеристиках. По-видимому, цвет образцов обусловлен формированием при обжиге в интервале температур 900 – 1000 °С кристаллических фаз пироксенов.

Следует отметить, что современные предприятия заинтересованы в выпуске керамического кирпича насыщенных цветов от красно-коричневых до шоколадных тонов, так как он пользуется наибольшим спросом у потребителя. В связи с этим требуются более детальные исследования процессов фазообразования в керамических массах, включающих пыль ПГУ, а также поиск способов, позволяющих интенсифицировать формирование требуемой окраски кирпича. Например, одним из таких

способов является предварительная химическая обработка пыли ПГУ-1,2 солями переходных *d*-элементов (например, растворимыми солями железа). В данном случае ионы железа проявляют свои хромофорные свойства и обеспечивают окраску насыщенных красно-коричневых тонов. На рис. 6 приведены оптические снимки образцов ангобированного керамического кирпича.

Учитывая высокое содержание соединений цинка в составе пыли, что в пересчете на оксиды составляет около 27,1 – 30,1 %, перспективным методом представляется гидрометаллургическое извлечение цинка (см. рис. 5). Гидрометаллургические методы основаны на растворении соединений цинка в растворах кислот, щелочей с последующим его извлечением электрохимическим способом. При обработке растворов выщелачивания щелочами и H_3PO_4 возможно получение оксида цинка ZnO (после термообработки образовавшегося $Zn(OH)_2$) или фосфата цинка $Zn_3(PO_4)_2$, которые могут применяться в качестве пигментов, в том числе и антикоррозионных. При дальнейшей химической обработке осадка $Zn_3(PO_4)_2$ возможно получение гидро- и дигидрофосфатов цинка, которые широко используются в сельском хозяйстве в качестве микроудобрений.

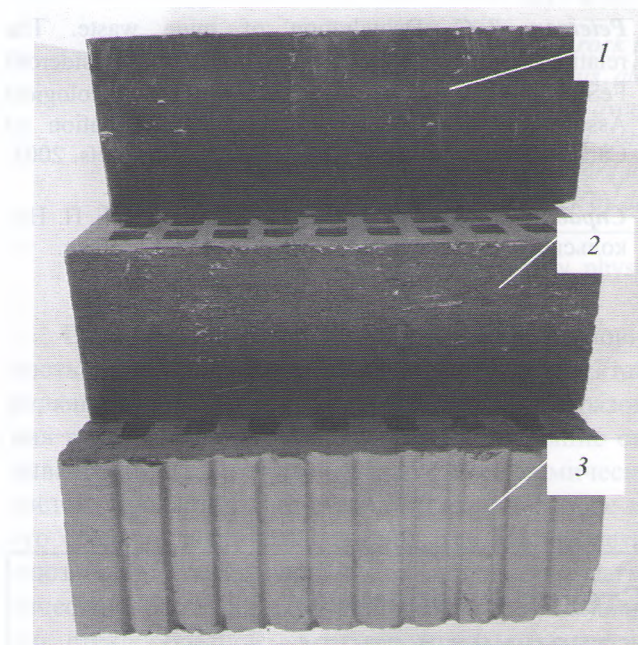


Рис. 6. Керамический кирпич, ангобированный массами, содержащими пыль ПГУ в количестве 10 % 1, 2 – пыль ПГУ обработана хромофором; 3 – без обработки хромофором

Предварительные исследования, проведенные на кафедре химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники БГТУ, показали принципиальную возможность применения электроэкстракции для извлечения цинка из пыли ПГУ-1,2 в виде металла.

Образцы пыли ПГУ-1,2 подвергали выщелачиванию в растворах серной кислоты и гидроксида натрия. При применении серной кислоты в раствор переходит 43,5 % исходной навески пыли ПГУ, последующая нейтрализация раствором NaOH приводит к выпадению осадка гидроксида железа (III).

Выщелачивание в растворе NaOH вызывает потерю массы в 4,6 %. В данном случае растворяются только соединения цинка, в то время как с H_2SO_4 взаимодействуют соединения железа, а также карбонаты кальция, магния и др.

Растворы выщелачивания подвергали электролизу с нерастворимыми анодами – графитами и нержавеющей сталью для кислого и щелочного электролита соответственно. В качестве материала катода использовали медь, нержавеющую сталь, а также катоды с высокой удельной поверхностью из пеноникеля.

Для электроэкстракции устанавливали плотность тока $0,5 \text{ A/дм}^2$. По мере извлечения цинка в электролизерной ячейке периодического действия выход по току при использовании гладких стальных катодов постепенно уменьшался с 40 и 25 % при электролизе 100 мин до 5 и 10 % при электролизе 170 мин для кислого и щелочного электролита соответственно.

Учитывая невысокую концентрацию цинка в растворах выщелачивания для обеспечения увеличения скорости извлечения и высокого выхода по току были исследованы различные виды катодных материалов. Результаты данных экспериментов представлены в табл. 5.

Таблица 5. Сводные результаты эффективности извлечения цинка из щелочных растворов выщелачивания

Катод/анод	Выход по току, %	Напряжение на ячейке U , В
Ni-пеноникель/сталь	47,4	2,57
Ti-сетка/сталь	29,6	3,1
Сталь/сталь	18	3,2

Установлено, что при извлечении цинка из электролита щелочного выщелачивания цинка в качестве катодного материала целесообразнее использовать никелевый пенометалл. На нем цинк восстанавливается с высокой скоростью и высоким выходом по току, низким напряжением на ячейке. Минимальная достигнутая концентрация цинка в конечном растворе составляла 0,5 г/л. Электролит с таким составом может быть направлен на повторное выщелачивание после корректировки по щелочи.

Полученные данные по удельному расходу электрической энергии 6200 – 10 300 кВт·ч/т показывают, что этот показатель сопоставим с таковым для процесса электроэкстракции цинка из руды. Учитывая высокие объемы образования пыли ПГУ, а также достаточно высокую и постоянно растущую стоимость цинка на мировом рынке (2813 дол./т), электроэкстракция цинка может быть рассмотрена как перспективный способ переработки исследуемого отхода.

После выщелачивания цинка из пыли ПГУ образуется железосодержащий продукт, содержащий преимущественно соединения железа, а также другие химические соединения в качестве примесей, присутствовавшие изначально в составе перерабатываемой пыли. Железосодержащий продукт может в дальнейшем применяться при получении объемно окрашенного и ангобированного керамического кирпича, а также бетонных тротуарных плит.

Еще одним из направлений переработки пыли ПГУ является ее использование в качестве наполнителя при получении лакокрасочных материалов (ЛКМ) (см. рис. 5). Наполнителями лакокрасочных материалов являются высокодисперсные неорганические вещества, которые, как и пигменты, практически не растворяются в дисперсионных средах (воде, органических растворителях, олифах, лаках).

Большинство наполнителей – это природные минералы: кальцит, мел, доломит, каолин, тальк, слюда, диатомитовая земля, барит, кварц и др. Наполнители оказывают положительное влияние на распределение частиц пигментов, структуру и реологические свойства красок, увеличивают твердость, атмосферостойкость покрытий. Кроме того, основной их задачей является удешевление стоимости ЛКМ. Наполнители вводят в краски и грунтовки в количестве 25 – 100 % массы пигментов.

Проведенные исследования позволили установить, что предварительно термообработанная при 1000 °С пыль ПГУ может использоваться в качестве пигмента или активного наполнителя при получении лакокрасочных материалов. Например, алкидная грунтовка, полученная на основе пыли ПГУ-1,2, характеризуется повышенными значениями твердости, прочности при ударе и адгезии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лотош В. Е.* Переработка отходов природопользования. Екатеринбург: Полиграфист, 2007. 503 с.
2. *Баталин Б. С.* Вред и польза шлаковых отвалов // Природа. 2003. № 10. С. 27 – 32.
3. *Доронин И. Е., Свяжигин А. Г.* Промышленные способы переработки сталеплавильной пыли // Металлург. 2010. № 10. С. 48 – 53.
4. *Попов А. А.* К вопросу проблемы утилизации цинксодержащей пыли сталеплавильных производств // Наукоедение: интернет-журнал. 2015. Т. 7. № 2. С. 1 – 10.
5. *Peterson R. C.* Dehydration of mine waste. The relationship among melanterite $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, siderotil $\text{FeSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ and rozenite $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ // Geological Association of Canada-Mineralogical Association of Canada-Society of Economic Geologists Abstracts. 2003. V. 28. P. 134 – 135.
6. *Справочник химика:* в 7 т. Т. 3 / под ред. Б. П. Никольского. 3-е изд., испр. Л.: Химия, 1971. 1168 с.



Подписка на журнал “Стекло и керамика”
принимается во всех отделениях связи
Индекс 70881

Телефон отдела реализации: (495) 514-26-34