



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 11, № 1, 2020

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.1.10

УДК 666.96: 658.567.1

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ БЕСЦЕМЕНТНОГО МАТРИЧНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Е.В. Корнеева¹, Г.И. Бердов², С.А. Созинов³

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

²Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Новосибирск, Россия

³Кемеровский научный центр СО РАН, Кемерово, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 20 ноября 2019
Принята: 20 января 2020
Опубликована: 27 марта 2020

Ключевые слова:

техногенное сырье, механоактивация, бесцементное вяжущее, матричная структура, композиционный материал.

АННОТАЦИЯ

Создание композиционных материалов с использованием механоактивированного техногенного сырья на сегодняшний день актуально в составе масштабной задачи строительной-технологической утилизации техногенных образований. Изменение кристаллической структуры с помощью механохимии повышает активность техногенных продуктов: увеличивается число коагуляционных контактов разнородных частиц, ускоряется образование продуктов гидратации, повышается пластическая прочность твердеющей смеси.

Статья посвящена исследованию механизма структурно-реологических превращений бесцементной системы твердения на основе сталеплавленного активированного сырья.

В качестве сырья использовались сталеплавленные шлаки – энергонасыщенные крупнотоннажные отходы Западно-Сибирского металлургического комбината (г. Новокузнецк). В качестве активаторов – отходы угольной промышленности шахты «Абашевская» (г. Новокузнецк): горелые породы с терриконика и шламы, полученные нейтрализацией известью электролитов отработанных кислотных аккумуляторов, аккумуляторных батарей промышленного транспорта. На основе используемого механоактивированного техногенного сырья получен вяжущий композиционный материал матричной структуры.

Для оценки структурных и вещественных изменений твердеющей системы были проведены комплексные физико-химические исследования: ИК-спектроскопия,

© Корнеева Елена Викторовна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: korneyev_va@list.ru.

Бердов Геннадий Ильич – доктор технических наук, профессор.

Созинов Сергей Анатольевич – кандидат физико-математических наук, руководитель центра, e-mail: kemsc@kemsc.sbras.ru; prezidium@kemnet.ru.

Elena V. Korneyeva – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: korneyev_va@list.ru.

Gennady I. Berdov – Doctor of Technical Sciences, Professor.

Sergey A. Sozinov – Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Supervisor Center, e-mail: kemsc@kemsc.sbras.ru; prezidium@kemnet.ru.

термогравиметрический и рентгенофазовый анализ. Методом электронной микроскопии исследована структура камня.

Было установлено, что матричная структура композиционного материала представляет собой дисперсионную среду: матрицу из плотных мелкозернистых масс гидрата сульфата кальция, дисперсную фазу из пластинчатых кристаллов кварца и оксида магния и трубчатых кристаллов ортосиликата кальция и переходный межфазный слой из структурированных зерен гидросульфатоалюмината кальция.

В процессе формирования структуры взаимозависимость фаз сопровождалась последовательным переходом одних видов структур в другие: коагуляционная → кристаллизационно-конденсационная → кристаллизационная.

В статье представлены результаты самоорганизации структуры, рассмотрено взаимодействие оксидных систем в процессе гидратации, установлены основные минеральные новообразования, обладающие вяжущими свойствами и обеспечивающие прочные связи между структурообразующими компонентами.

© ПНИПУ

FEATURES OF THE FORMATION OF THE STRUCTURE OF A CEMENTLESS MATRIX COMPOSITE BASED ON MECHANICALLY ACTIVATED TECHNOGENIC RAW MATERIALS

E.V. Korneyeva¹, G.I. Berdov², S.A. Sozinov³

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation

²Novosibirsk State Architectural and Construction University, Novosibirsk, Russian Federation

³Kemerovo Scientific Center Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 November 2019

Accepted: 20 January 2020

Published: 27 March 2020

Keywords:

technogenic raw materials, mechanical activation, cementless binder, matrix structure, composite material.

ABSTRACT

The creation of composite materials using mechanically activated technogenic raw materials is relevant today as part of a large-scale task of construction and technological utilization of technogenic formations. The change in the crystal structure using mechanochemistry increases the activity of technogenic products: the number of coagulation contacts of dissimilar particles increases, increases the plastic strength of the hardening mixture, formation of hydration products is accelerated.

The article is devoted to the study of the mechanism of structural and rheological transformations of a cementless hardening system based on activated steelmaking.

Steel melting slags were used as raw materials – energy-saturated large-capacity waste of the West-Siberian Metallurgical Combine (Novokuznetsk). As components - activators - waste from the coal industry of the «Abashevskaya» mine (Novokuznetsk) - burnt rocks with heaps and slimes, obtained by neutralization of spent acid battery electrolytes with lime batteries for industrial vehicles. Based on used mechanically activated technogenic raw materials the binder composite material of the matrix structure is obtained.

To assess structural and material changes in the hardening system comprehensive physical and chemical studies were carried out: IR – spectroscopy, thermogravimetric and x-ray phase analysis. Electron microscopy investigated the structure of the stone.

It was found that the matrix structure of the composite material is a dispersion medium – matrix of dense fine-grained masses calcium sulfate hydrate; dispersed phase from lamellar crystals of quartz and magnesium oxide, and tubular crystals of calcium orthosilicate; and transitional interfacial layer from structured grains of calcium hydrosulfoaluminate.

In the process of forming the structure interdependence of phases from each other was accompanied by a sequential transition of some types of structures to others: coagulation → crystallization- condensation → crystallization.

The article presents the results of the self-organization of the structure, the interaction of oxide systems in the process of hydration is considered, major mineral neoplasms are established, possessing astringent properties and providing strong bonds between structure-forming components.

© PNRPU

Введение

При разработке технологических процессов производства различных строительных композитов особую роль играет информация о физико-механических свойствах конечного продукта и определение критериев его эффективности. Для установления оптимальных технологических параметров производства бесцементной строительной продукции необходимо исследование механизма структурно-реологических превращений бесцементной системы твердения [1–5].

1. Основная часть

На основании комплексного исследования состава, структуры и свойств механоактивированного техногенного сырья [6] был определен оптимальный состав бесцементного шлакового вяжущего: выпускаемый электросталеплавильный шлак ОАО «ЗСМК» ($S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$) 77–78 мас. %, горелая порода шахтных отвалов ($S_{уд} = 320 \text{ м}^2/\text{кг}$) 13–14 мас. % и шлам (нейтрализованный известью отработанный электролит кислотных аккумуляторов аккумуляторных батарей промышленного транспорта) 7–8 мас. %. Предел прочности: при сжатии – 10,64 МПа, при изгибе – 5,62 МПа [7]. Химический анализ шлакового вяжущего в табл. 1.

Таблица 1

Химический анализ вяжущего, %

Table 1

Chemical binder analysis, %

Наименование оксидов	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	TiO ₂	Na ₂ O + K ₂ O	п.п.п.
Массовая доля, %	23,69	5,69	1,43	0,74	37,80	6,31	0,36	0,76	14,65

По данным рентгеновской дифрактометрии (рис. 1) установлены основные минеральные новообразования вяжущего композита: двухводный гипс (гидрат сульфата кальция – CaSO₄×2H₂O) – (50–60 %); этtringит (гидросульфалоюминат кальция) – Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂××26H₂O (~15 %); ортосиликат кальция – Ca₂SiO₄ (10–15 %).

Также на микроуровне сформировались конгломераты из отдельных зерен различной формы: минералов кварца (SiO₂) – 3–5 % и оксида магния (MgO) – ~3 %.

Результаты дериватографического исследования показали, что фазы гидрата сульфата кальция и этtringита содержат значительное количество кристаллизационной H₂O – 20,91 и 45,91 % соответственно. Поскольку кристаллизационная H₂O удаляется при строго определенных температурах, для измерения содержания гидрата сульфата кальция и этtringита в исследуемых образцах использована термография (потеря веса). Данные термогравиметрического анализа представлены на рис. 2.

Расчетные значения по данным ДТА составляют: гипс – 44,1 %; этtringит – 9,2 %. Пересчет химического анализа на минеральный состав по потерям массы при прокаливании (п.п.п.) дает следующие значения: гипс – 52,6 %; этtringит – 8,0 %.

Исходный вес пробы – 50,83 мг.

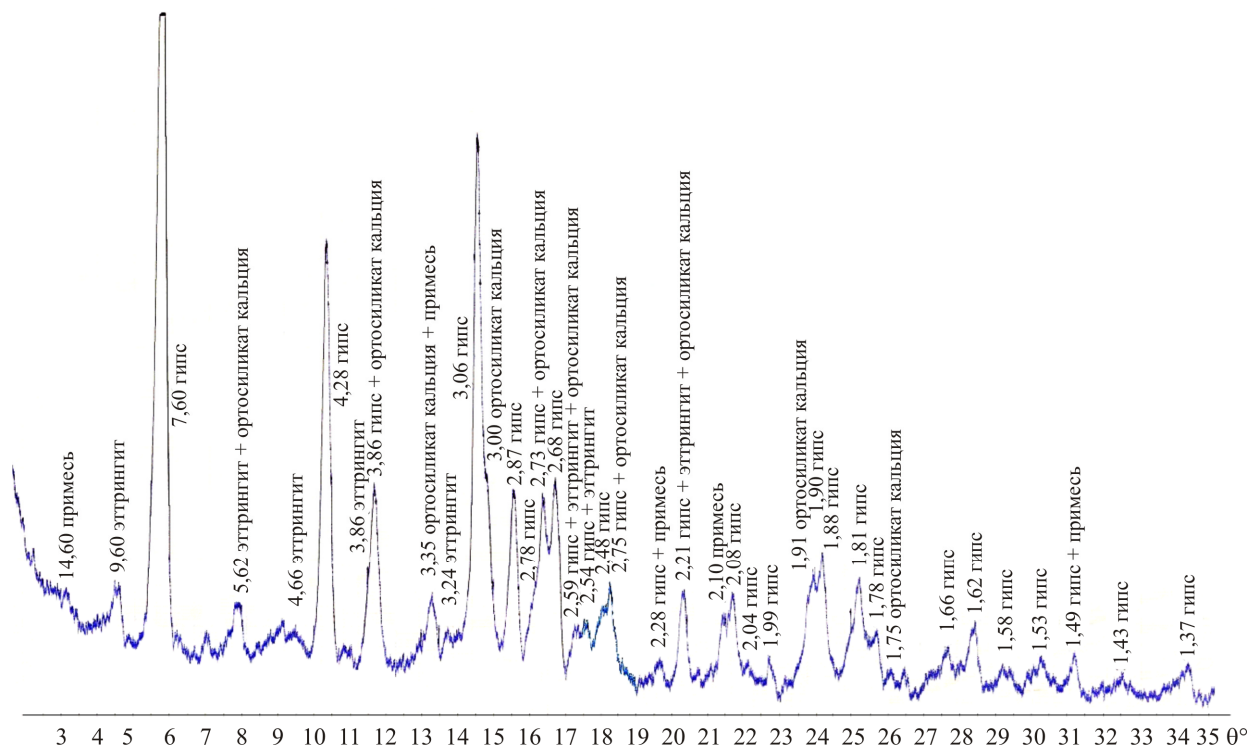


Рис. 1. Дифрактограмма вяжущего
 Fig. 1. Binder diffractogram

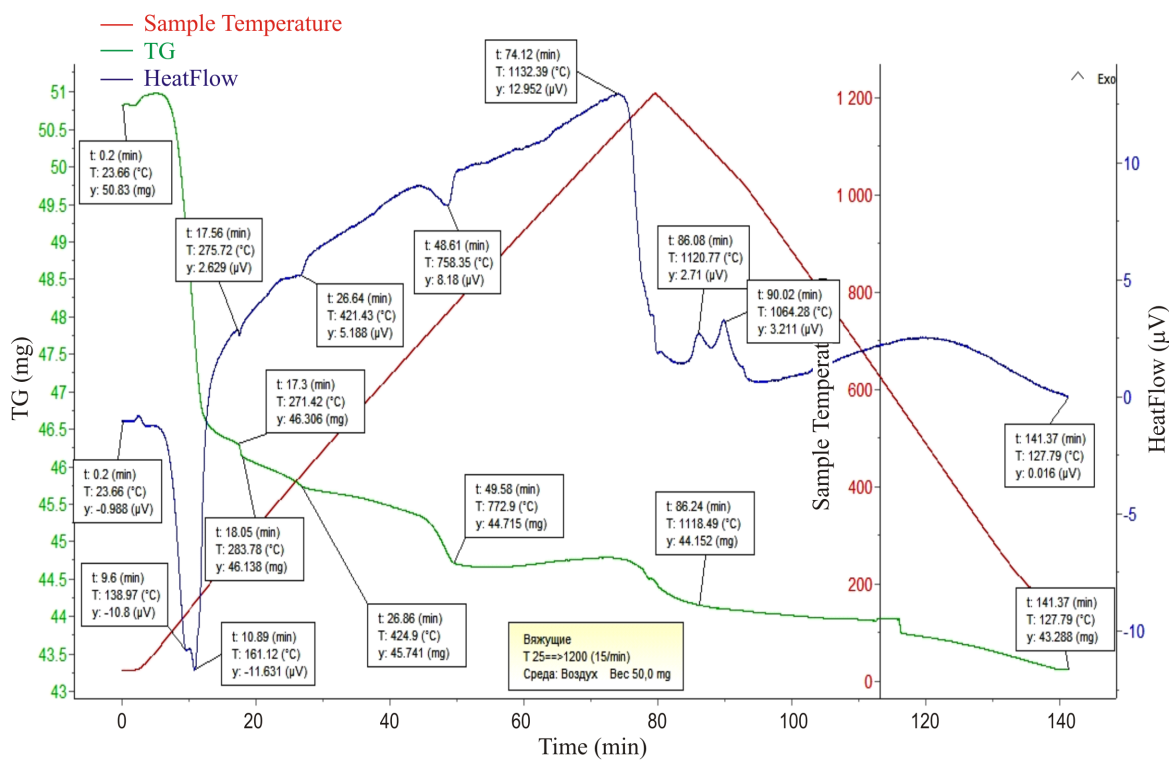


Рис. 2. Дериватограмма вяжущего
 Fig. 2. Binder diffractogram

Ступенчатая дегидратация гидрата сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) до полугидрата ($\text{CaSO}_4 \times 0,5\text{H}_2\text{O}$) отмечена эндоэффектом при 138,97–161,12 °С, дегидратация полугидрата ($\text{CaSO}_4 \times 0,5\text{H}_2\text{O}$) до ангидрита (CaSO_4) – при 275,72 °С. Общая потеря кристаллизационной воды гипсом:

$$\Delta Y = 59,830 - 46,138 = 4,693 \text{ мг} \quad \frac{4,692}{50,830} \cdot 100 = 9,23 \%$$

$$100 \% - 20,91 \%$$

$$X \% - 9,23 \%$$

$$X (\text{гипс в пробе}) = 44,10 \%$$

В интервале 421,43–758,35 °С наблюдается дегидратация этtringита до десульфатизации при 1132,39 °С.

Общая потеря кристаллизационной воды в этtringите:

$$\Delta Y = 46,138 - 44,175 = 1,423 \text{ мг} \quad \frac{1,423}{50,830} \cdot 100 = 2,79 \%$$

$$100 \% - 45,91 \%$$

$$X \% - 2,79 \%$$

$$X (\text{этtringит в пробе}) = 6,10 \% (\text{по } \text{H}_2\text{O}).$$

Общая потеря SO_3 в этtringите пробы:

$$\Delta Y = 44,715 - 44,152 = 0,563 \text{ мг} \quad \frac{0,563}{50,830} \cdot 100 = 1,11 \%$$

$$100 \% - 19,15 \%$$

$$X \% - 1,11 \%$$

$$X (\text{этtringит в пробе}) = 5,80 \% (\text{по } \text{SO}_3).$$

Если предположить, что полная десульфатизация произошла при полном охлаждении пробы, расчеты показывают:

$$\Delta Y = 44,715 - 43,288 = 1,427 \text{ мг} \quad \frac{1,427}{50,830} \cdot 100 = 2,81 \%$$

$$100 \% - 19,15 \%$$

$$X \% - 2,81 \%$$

$$X_{\text{max}} (\text{этtringит в пробе}) = 14,70 \% (\text{не более}).$$

$$\Delta Y_{\text{общ}} = 50,830 - 44,152 = 6,678 \text{ мг, или } 13,14 \%$$

С помощью микрорентгеноспектрального анализатора (сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6390 LV с энергодисперсионной приставкой JED 2300) определялось количественное содержание основных оксидов. По спектрам производился расчет их содержания в процентном соотношении. Химико-минералогический анализ позволил установить влияние минералов в процессе гидратации на структурообразование.

Условия проведения измерений: регистрация спектра характеристического рентгеновского излучения пробы проводилась с участка площадью 9 мм² при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 1 нА. Разрешающая способность энергодисперсионного детектора 133 эВ. Расчет процентного содержания каждого элемента в анализируемом веществе выполняли по полученным спектрам с помощью программного обеспечения Analysis Station версии 3.62.07 компании JEOL Engineering с использованием нестандартного метода ZAF. Картирование химических элементов проводили при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе зонда 1 нА (литер справа от наименования элемента – линия спектра характеристического излучения, от которого регистрировался сигнал). Цветовая шкала слева отражает интенсивность сигнала характеристического излучения (рис. 3).

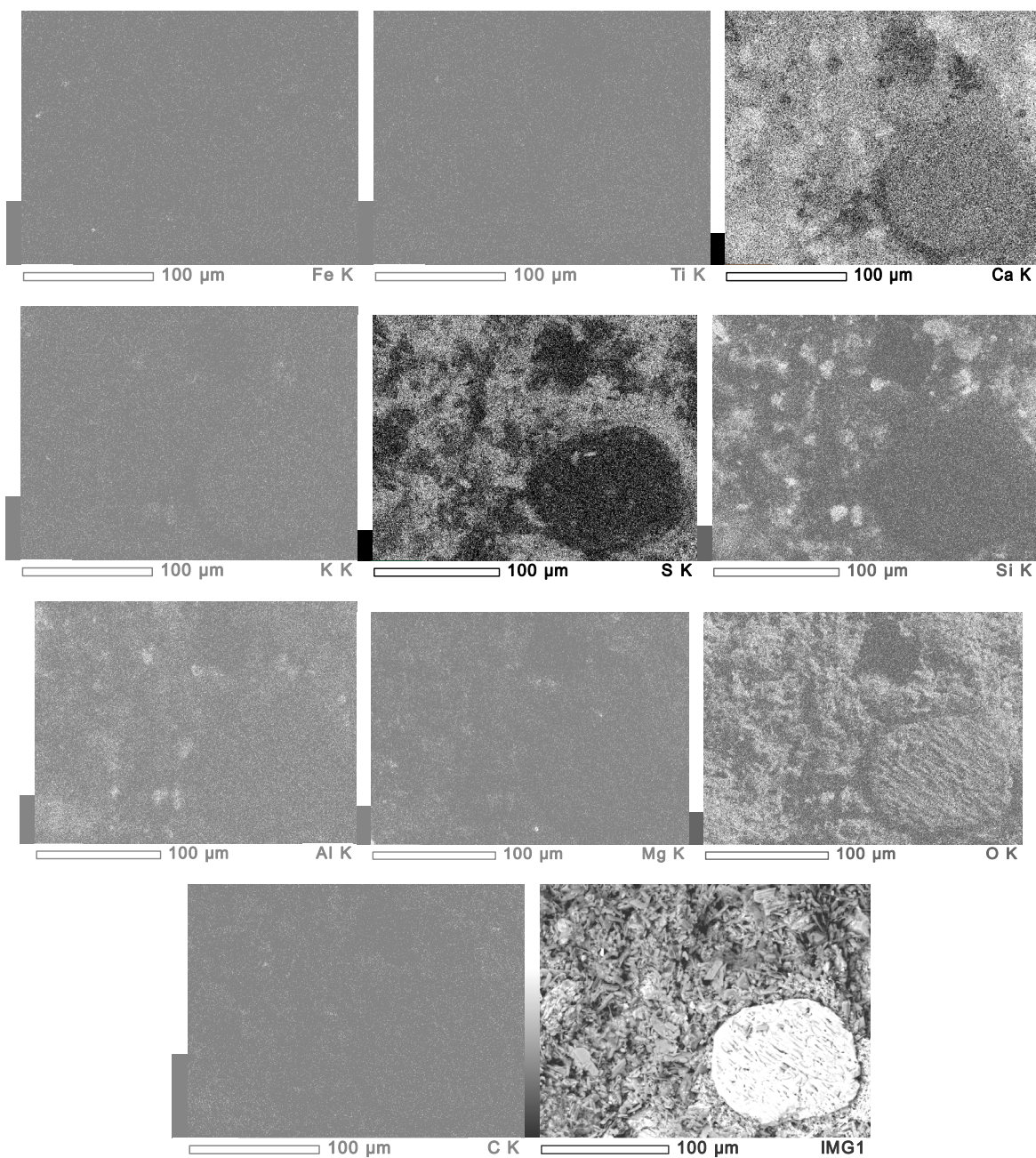


Рис. 3. Карты распределения химических элементов и изображение поверхности образца в отраженных электронах (IMG1)

Fig. 3. Maps of the distribution of chemical elements and the image of the surface of the sample in reflected electrons (IMG1)

Прибор автоматически пересчитал атомное содержание элементов и массовое содержание оксидов. Результаты определения массовых долей составляющих оксидов представлены в табл. 2 (в последней колонке таблицы – перевод в оксидную форму, соответствующую формуле минерала).

Более полная информация получена при изучении пространственного положения минеральных фаз на участке поверхности скола (рис. 4). Более светлые включения – частицы, состоящие из более тяжелых атомов.

Таблица 2

Содержание химических элементов на поверхности образца (см. рис. 3)

Table 2

The content of chemical elements on the surface of the sample (Fig. 3)

Элемент	(keV)	Мас. %	Погрешность, %	Мол. %	Соединение	Мас. %
C	0,277	8,2	0,21	33,14	C	8,2
O	–	36,13	–	–	–	–
Na	1,041	0,74	0,26	0,78	Na ₂ O	1
Mg	1,253	0,96	0,23	1,92	MgO	1,59
Al	1,486	3,13	0,22	2,82	Al ₂ O ₃	5,92
Si	1,739	4,76	0,24	8,22	SiO ₂	10,18
S	2,307	9,37	0,21	14,19	SO ₃	23,4
K	3,312	0,32	0,14	0,2	K ₂ O	0,38
Ca	3,69	25,28	0,19	30,62	CaO	35,38
Ti	4,508	0,09	0,31	0,09	TiO ₂	0,15
Fe	6,398	0,5	0,45	0,22	Fe ₂ O ₃	0,72
Zn	8,63	10,51	1,02	7,8	ZnO	13,08

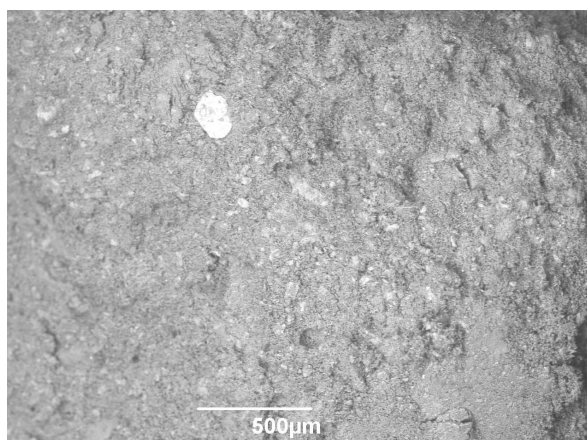


Рис. 4. Изображение участка поверхности скола в отраженных электронах на длинах волн 500 μm

Fig. 4. Image of the cleaved surface in reflected electrons at wavelengths of 500 μm

Наиболее полная информация о структуре образца получена при сравнении отдельных участков его поверхности на разных длинах волн (50 μm, 30 μm, 10 μm, 1,0 μm): распределение внутри них химических элементов, соотношение слагающих их минеральных баз (рис. 4–7; табл. 3, 4).

Наложение изображений, полученных в характеристическом излучении, и микрофотографии участка поверхности скола, полученные в режиме регистрации отраженных электронов, представлены на рис. 6.

Таблица 3

Содержание химических элементов на участке рис. 4

Table 3

The content of chemical elements on the site fig. 4

Элемент	(keV)	Мас. %	Погрешность, %	Мол. %	Соединение	Мас. %
C K	0,277	9,74	0,2	36,74	C	9,74
O	–	38,61	–	–	–	–
Na K	1,041	0,19	0,23	0,19	Na ₂ O	0,25
Mg K	1,253	1,5	0,19	2,8	MgO	2,49
Al K	1,486	3,65	0,19	3,06	Al ₂ O ₃	6,89
Si K	1,739	6,03	0,21	9,72	SiO ₂	12,89
S K	2,307	10,42	0,19	14,73	SO ₃	26,01
K K	3,312	0,29	0,14	0,17	K ₂ O	0,35
Ca K	3,69	28,15	0,19	31,83	CaO	39,39
Ti K	4,508	0,11	0,31	0,1	TiO ₂	0,18
Fe K	6,398	0,89	0,45	0,36	Fe ₂ O ₃	1,27
Zn K	8,63	0,42	1,01	0,29	ZnO	0,53

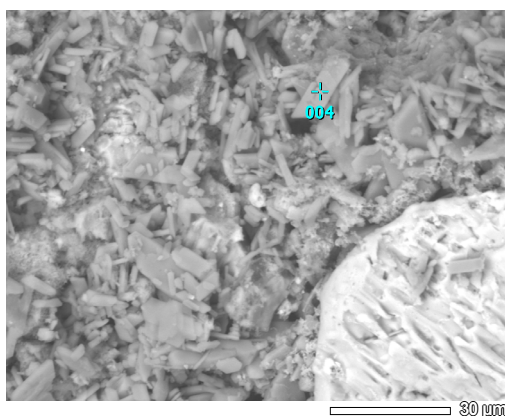


Рис. 4. Изображение участка поверхности скола в отраженных электронах на длинах волн 30 μm

Fig. 4. Image of the cleaved surface in reflected electrons, at wavelengths of 30 μm

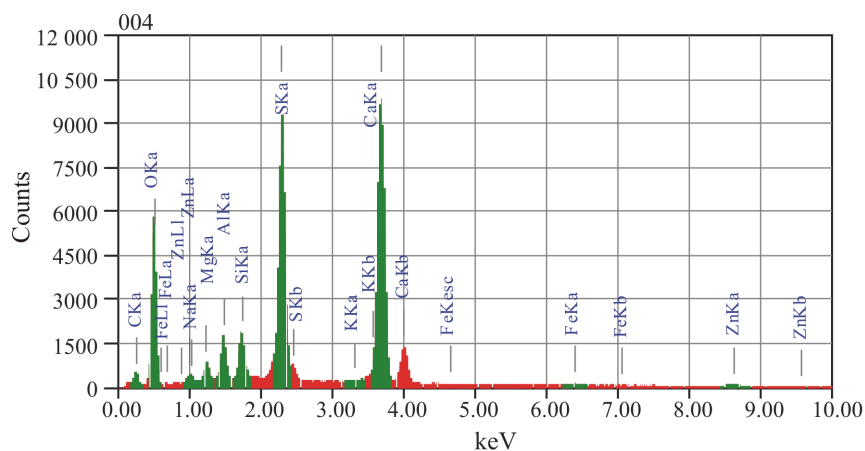


Рис. 5. Спектр характеристического рентгеновского излучения, зарегистрированного в точке 004

Fig. 5. Spectrum of characteristic x-ray radiation detected at point 004

Содержание химических элементов в точке 004

Table 4

The content of chemical elements at point 004

Элемент	(keV)	Мас. %	Погрешность, %	Атом. %
C K	0,277	5,8	0,15	9,97
O K	0,525	49,53	0,22	63,96
Na K	1,041	0,13	0,13	0,12
Mg K	1,253	1,26	0,08	1,07
Al K	1,486	2,46	0,08	1,89
Si K	1,739	2,41	0,07	1,77
S K	2,307	13,58	0,05	8,75
K K	3,312	0,18	0,08	0,09
Ca K	3,69	22,9	0,1	11,8
Fe K	6,398	0,41	0,22	0,15
Zn K	8,63	1,34	0,58	0,42

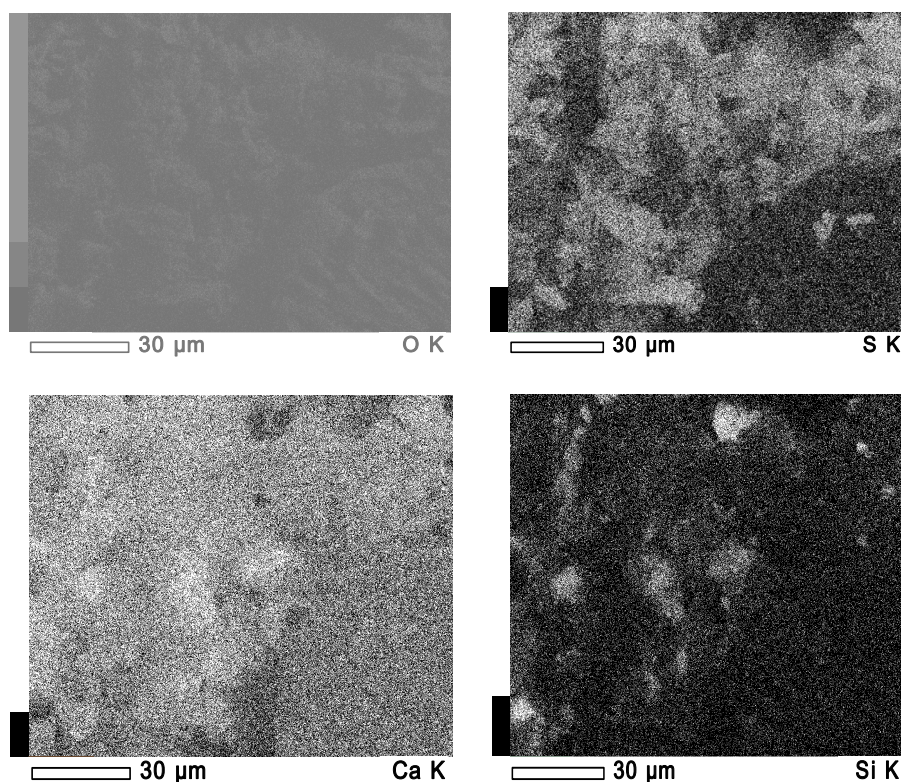


Рис. 6. Карты распределения химических элементов участка поверхности
 Fig. 6. Maps of the distribution of chemical elements of the surface area

Рентгеноспектральным анализом выявлены существенные отличия в значениях концентраций элементов для различных участков образца, что свидетельствует о микронеоднородности материала (табл. 5).

Исследованиями установлено, что в результате механоактивации многофазной системы на основе техногенного сырья [8–12] получен вязущий композиционный материал матричной структуры, в процессе формирования которой взаимозависимость фаз сопро-

вождалась последовательным переходом одних видов структур в другие: коагуляционная → кристаллизационно-конденсационная → кристаллизационная. Особенность их состава изучалась по результатам рентгеноструктурного анализа.

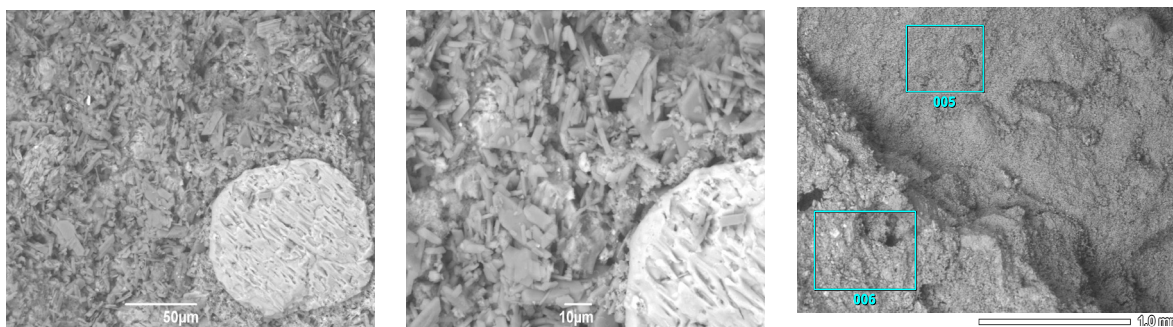


Рис. 7. Изображение участка поверхности скола в отраженных электронах на длинах волн 50 μm, 10 μm, 1,0 μm

Fig. 7. Image of the cleaved surface in reflected electrons at wavelengths of 50 μm, 10 μm, 1.0 μm

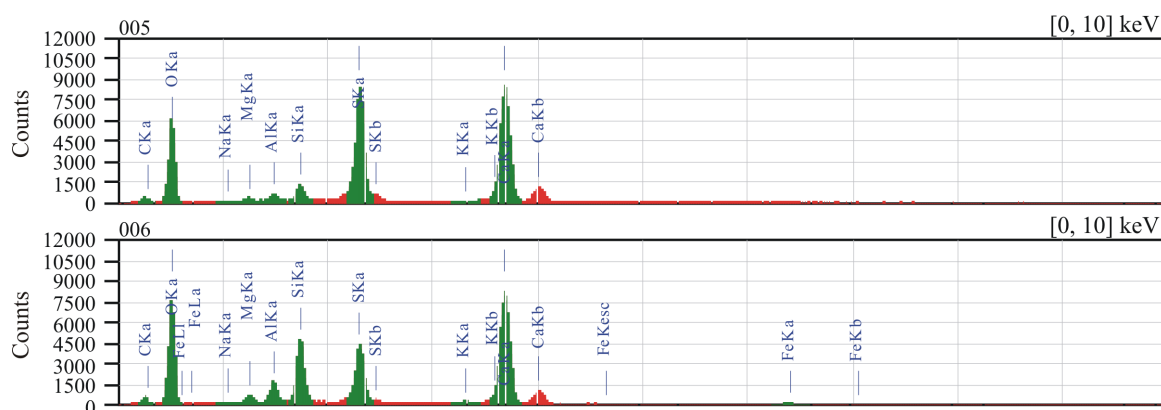


Рис. 8. Спектры характеристического рентгеновского излучения, зарегистрированного в локальных точках 005 (дисперсионная среда) и 006 (дисперсная фаза)

Fig. 8. Spectra of characteristic x-ray radiation recorded at local points 005 (dispersion medium) and (dispersed phase)

Таблица 5

Содержание химических элементов в точках 005,006

Table 5

The content of chemical elements in points 005,006

Номер спектра	Содержание химических элементов, атом. %										
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Σ
Дисперсионная среда (матрица) образца											
005	5,42	55,54	0,10	0,49	0,80	1,81	13,44	0,13	22,26	–	100,0
Дисперсная фаза образца											
006	6,40	55,88	0,28	1,05	2,39	7,06	6,65	0,37	19,17	0,74	100,0

С помощью рентгенографических методов было установлено, что образовавшиеся реальные кристаллы, составляющие структуру, разориентированы, не обладают правильными кристаллографическими гранями. Вследствие диспергирования в них появились откло-

нения от идеальной формы: возникли точечные дефекты, нарушился порядок упаковки атомных слоев. Дефекты привели к изменению физических свойств кристаллов.

Формирование коагуляционной структуры сопровождается образованием плотной суспензии дисперсионной среды – матрицы из мелкозернистых масс двуводного гипса, играющей роль связующего.

Кристаллизационно-конденсационную структуру образуют частицы разной природы, вследствие чего она неустойчива и характеризуется рядом фазовых переходов к формированию устойчивой кристаллизационной структуры. Наблюдается консолидация частиц твердой дисперсной фазы (тонких пластинчатых кристаллов кварца и оксида магния длиной до 15 мкм и трубчатых кристаллов ортосиликата кальция) и частиц межфазного слоя между дисперсионной средой и дисперсной фазой (мелких структурированных зерен этtringита), первоначально в виде геля, обволакивающего кристаллы твердой дисперсной фазы (рис. 9).

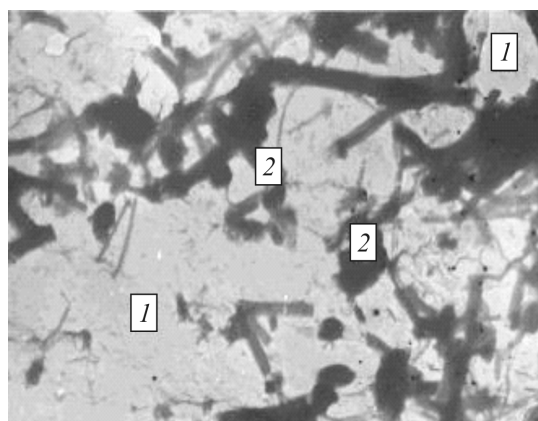


Рис. 9. Микрография матричной структуры вяжущего композита в возрасте 28 сут (увеличение $\times 3000$): 1 – матрица (дисперсионная среда); 2 – наполнитель (дисперсная фаза)

Fig. 9. Micrography of the matrix structure of the binder composite at the age of 28 days (3000x magnification): 1 – matrix (dispersion medium); 2 – aggregate (dispersed phase)

Образование кристаллизационной структуры сопровождается последовательным переплетением пластинчатых и трубчатых кристаллов твердой дисперсной фазы и срастанием их в сетчатый пространственный каркас, с уплотнением структурной сетки – армирующего компонента композита. Механоактивированные частицы армирующих волокон анизодиаметричны, имеют углы и ребра, что облегчает их слипание.

В результате синерезиса, обусловленного возрастанием во времени числа контактов между зернами этtringита и образованием между ними кристаллизационных перемычек, происходит упрочнение межфазного слоя. Гелеобразная система превращается в сплошное кристаллическое тело и переходит в термодинамически устойчивое состояние.

Заключение

Задача получения знаний о физических и химических процессах, происходящих при механохимической подготовке шлакового сырья [13], разработка состава и технологии бесцементной строительной продукции на его основе актуальны для промышленных регионов Сибири, развитие которых является стратегической задачей России [14].

Изучение особенностей формирования структуры композита с целью прогнозирования его свойств и разработка эффективных строительных материалов оптимальных составов является наименее разработанным направлением строительного материаловедения [15].

Библиографический список

1. Ткач Е.В., Есенбаева А.А., Чердабаев Б.А. Фазовый состав и нанопористая структура шлакового камня // Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан-2030»: материалы Междунар. научн. конф. (Сагиновские чтения № 2). – Караганда, 2010. – С. 366–368.
2. Щербак С.А. Научные основы управления структурой строительных материалов на основе металлургических шлаков: дис. ... д-ра техн. наук. – Днепропетровск, 2001. – 345 с.
3. Воронин К.М. Стабилизация структуры и свойств мартеновского шлака для повышения эффективности его использования в строительстве: дис. ... канд. техн. наук. – Магнитогорск, 1997. – 130 с.
4. Корнеева Е.В., Бердов Г.И. Формирование бесцементных систем твердения на основе оксидсодержащих техногенных продуктов // Глобальный научный потенциал. – 2016. – № 9 (66). – С. 118–123.
5. Гончарова М.А. Структурообразование и технология композитов общестроительного и специального назначения на основе малоиспользуемых отходов металлургии: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Воронеж, 2012. – 39 с.
6. Корнеева Е.В., Бердов Г.И. Использование электросталеплавильного шлака в производстве бесклинкерного вяжущего // Вестник ЮУрГУ. – 2018. – Т. 1, № 3. – С. 35–39.
7. Бесцементное вяжущее: пат. Рос. Федерация / Корнеева Е.В. – № 2542074; заявл. 19.02.14, опубл. 20.02.15, Бюл. № 5.
8. Теоретические основы и технологические аспекты создания нового нанодисперсного силикатного вяжущего из вторичных минеральных ресурсов с использованием механохимии / С.И. Павленко, М.В. Луханин, Е.Г. Аввакумов, Е.В. Корнеева. – Новосибирск: СО РАН, 2013. – 106 с.
9. Болдырев В.В. Экспериментальные методы в механохимии твердых неорганических веществ. – Новосибирск: Наука, 1983. – 64 с.
10. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 304 с.
11. Механохимия создания материалов с заданными свойствами / О.В. Андриюшкова, В.А. Полубояров, И.А. Паули, З.А. Коротаева. – Новосибирск: НГТУ, 2010. – 352 с.
12. Молчанов В.И., Селезнева О.Г., Жирнов Е.Н. Активация минералов при измельчении. – М.: Недра, 1988. – 208 с.
13. Сычев М.М. Некоторые вопросы химии активации шлаков // Шлакощелочные цементы, бетоны и конструкции. – Киев, 1979. – С. 45.
14. Румянцева Е.Л., Казарян Д.Б. Техногенные отходы – сырье для химической переработки // Экология России и сопредельных территорий: материалы XIII Междунар. эколог. студ. конф., Новосибирск, 24–25 октября 2008 г. – Новосибирск, 2008. – С. 100–101.
15. Баженов Ю.М., Воробьев В.А., Илюхин А.В. Задачи компьютерного материаловедения строительных композитов // Изв. вузов. Серия: Строительство. – 2000. – № 12. – С. 25–30.

References

1. Tkach E.V., Esenbaeva A.A., Cherdabaev B.A. Fazovyy sostav i nanoporistaya struktura shlakovogo kamnya [Phase composition and nanoporous structure slag stone]. *Science and education – leading factor in strategy «Kazakhstan - 2030»: materials international scientific conference (Saginov readings no.2)*, Karaganda, 2010, pp. 366-368.

2. Scherbak S.A. Nauchnye osnovy upravleniya strukturuj stroitel'nyh materialov na osnove metallurgicheskikh shlakov [Scientific fundamentals of building materials structure management based on metallurgical slag]. Doctor's degree dissertation. Dnepropetrovsk, 2001, 345 p.

3. Voronin K.M. Stabilizaciya struktury i svojstv martenovskogo shlaka dlya povysheniya effektivnosti ego ispol'zovaniya v stroitel'stve [Stabilization of the structure and properties of open-hearth slag to increase efficiency its use in construction]. Ph. D. thesis. Magnitogorsk, 1997, 130 p.

4. Korneyeva E.V., Berdov G.I. Formirovanie bescementnyh sistem tverdeniya na osnove oksidoderzhashchih tekhnogennyh produktov [The formation of cementless hardening systems based on oxide-containing man-made products]. *Global scientific potential*, 2016, no. 9 [66], pp. 118-123.

5. Goncharova M.A. Strukturnoobrazovanie i tekhnologiya kompozitov obshchestroitel'nogo i special'nogo naznacheniya na osnove maloispol'zuemyh othodov metallurgii [Structuring and technology of composites general construction and special purposes general construction and special purposes]. Abstract of Doctor's degree dissertation. Voronezh, 2012, 39 p.

6. Korneyeva E.V., Berdov G.I. Ispol'zovanie elektrostaleplavil'nogo shlaka v proizvodstve besklinkernogo vyazhushchego [Use of electric steelmaking slag in the production of clinker-free binder]. *Bulletin of the South Ural State University*, 2018, vol. 1, no. 3, pp. 35-39.

7: Korneyeva E.V. Bescementnoe vyazhushchee [An uncemented astringent]. Patent Rossiiskaia Federatiia no. 2542074 (2015).

8. Pavlenko S.I., Lukhanin M.V., Avvakumov E.G., Korneyeva E.V. Teoreticheskie osnovy i tekhnologicheskie aspekty sozdaniya novogo nanodispersnogo silikatnogo vyazhushchego iz vtorichnyh mineral'nyh resursov s ispol'zovaniem mekhanohimii [Theoretical basis and technological aspects creating a new nanosized silicate binder from secondary mineral resources using mechanochemistry]. Novosibirsk, Siberian branch Russian Academy of Sciences, 2013, 106 p.

9. Boldyrev V.V. Eksperimental'nye metody v mekhanohimii tverdyh neorganicheskikh veshchestv [Experimental methods in mechanochemistry solid inorganic substances]. Novosibirsk, Nauka, 1983, 64 p.

10. Avvakumov E.G. Mekhanicheskie metody aktivacii himicheskikh processov [Mechanical methods for the activation of chemical processes]. Novosibirsk, Nauka, 1986, 304 p.

11. Andryushkova O.V., Poluboyarov V.A., Pauli I.A., Korotaeva Z.A. Mekhanohimiya sozdaniya materialov s zadannymi svojstvami [Mechanochemistry creating materials with specified properties]. *Novosibirsk State Technical University*, 2010, 352 p.

12. Molchanov B.I., Selezneva O.G., Zhirnov E.N. Aktivaciya mineralov pri izmel'chenii [Activation of minerals during grinding]. Moscow, Nedra, 1988, 208 p.

13. Sychev M.M. Nekotorye voprosy himii aktivacii shlakov [Some issues of slag activation chemistry]. *Slag-alkali cements, concrete and construction*, Kiev, 1979, pp. 45.

14. Rumyantseva E.L., Ghazaryan D.B. Tekhnogennye othody – syr'e dlya himicheskoy pererabotki [Technogenic waste – raw materials for chemical processing]. *Ecology of Russia and adjacent territories: materials XIII International Environmental Student Conference*, Novosibirsk, 24 – 25 October 2008, pp. 100–101.

15 Bazhenov Yu.M., Vorobyov V.A., Ilyukhin A.V. Tekhnogennye othody – syr'e dlya himicheskoy pererabotki [Tasks of computer materials science of building composites]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, 2000, no. 12, pp. 25-30.