

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

*О. Г. Волокитин**, *В. В. Шеховцов*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск,

*e-mail: volokitin_oleg@mail.ru

Поступила в редакцию 05.02.2018 г.

Рассмотрена возможность переработки техногенных силикатосодержащих отходов с использованием энергии термической плазмы с целью их дальнейшей утилизации в промышленности в качестве строительных материалов. Разработана технология, позволяющая получать из этих отходов минеральное волокно с высокими эксплуатационными характеристиками и повышенной устойчивостью к воздействию высоких температур. Предложена и апробирована конструкция плазменного реактора, позволяющего получать расплав из отходов энергетических производств и других тугоплавких неметаллических материалов, имеющих температуру плавления более 1600°C.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, утилизация, низкотемпературная плазма, силикатный расплав, плазмохимический реактор, минеральные волокна.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальным является создание таких производств, которые были бы способны решать проблемы повышения эффективности технологических процессов путем использования энергосберегающего оборудования и одновременно решали бы экологические проблемы за счет создания установок, способных утилизировать отходы энергетических производств и далее использовать переработанное сырье в промышленности, например, в строительной отрасли. Известно, что в отвалах энергетических производств скапливается огромное количество золошлаковых отходов, что тем самым нарушает экологическую обстановку в местах их размещения. Эти отходы могли бы быть переработаны с получением силикатных расплавов, применение которых вызывает большой интерес. Сдерживающим фактором утилизации этих отходов, имеющих в своем составе до 45–55% SiO₂, является высокая температура их плавления. Таким образом, важным направлением исследований и разработок является использование в качестве сырья для производства высокотемпературных силикатных расплавов, отходов энергетических производств, таких как золошлаковые отходы, отходы горючих сланцев, отходы обогащения молибденовых руд и т. п. [1, 2].

Силикатные расплавы – это расплавы, которые получают из кремнезема SiO_2 и соединений на его основе – силикатов. Из силикатных расплавов в зависимости от типа исходного сырья, определяющего химический состав расплава, и режима охлаждения можно получить различные по структуре и свойствам материалы и изделия: стекло и стеклянные изделия, стеклокристаллические материалы и частично закристаллизованные материалы и изделия из горных пород и шлаков (каменное литье). Наиболее часто в строительстве используются стекло и стеклянные изделия. Характерная особенность силикатных расплавов состоит в том, что они обладают способностью при достаточно быстром охлаждении переходить в стеклообразное состояние [3-5].

Существующие теории стеклообразного состояния исходят из того, что жидкости и стекла нельзя рассматривать как хаотическое скопление молекул или ионов, так как в них существуют микроучастки с упорядоченной структурой. В жидкости в силу большой свободы составляющих ее элементов идет непрерывное образование и разрушение этих участков, а в стекле они остаются зафиксированными, в результате чего в стекле наблюдается упорядоченность лишь малой протяженности (ближний порядок) и отсутствует упорядоченность на больших расстояниях (дальний порядок), свойственная кристаллическому состоянию. Отсутствие дальнего порядка подтверждается, в частности, изотропностью стекла. Вещество в стеклообразном состоянии обладает повышенной внутренней энергией – скрытой энергией кристаллизации, т. е. оно термодинамически неустойчиво. В то же время при введении в расплав специальных добавок и катализаторов и выборе соответствующего режима термической обработки можно получить стеклокристаллические материалы, обладающие положительными свойствами стекла и лишенные большинства его недостатков (хрупкости, низкой термостойкости и др.).

Анализ существующих способов получения силикатных расплавов и материалов на их основе позволил сформировать обобщенные данные по номенклатуре материалов, получаемых из силикатных расплавов, температуре их выработки и содержанию в сырье оксида кремния (табл. 1).

Таблица 1. Материалы, получаемые через силикатный расплав

Материал	Содержание SiO_2 , %	Температура выработки, °С
Стекловолокно	65–75	1450–1500
Минеральное волокно	43–65	1500–1700
Стеклокристаллический материал	43–65	1500–1700
Литые каменные изделия	43–65	1450–1500
Кварцевое стекло	98–99	1700–1750

Одним из путей утилизации золошлаковых отходов является переработка их в минеральные волокна [6]. Как видно из таблицы, температура выработки таких материалов достигает 1500-1700°С, в связи с этим получить расплав для производства минеральных волокон с использованием традиционных

технологий не представляется возможным ввиду низких температур, реализуемых существующими плавильными агрегатами. Поэтому возникает необходимость в использовании энергии низкотемпературной плазмы, которая обладает высокой концентрацией энергии и температурой 3000–5000°С. При этом резко снижается время получения расплава [7-14]. Необходимо отметить, что высокоэнергетические технологии позволяют сократить время получения высокотемпературных расплавов, однородных по химическому составу и обладающих требуемой температурой и вязкостью, эти технологии легко управляемы и их можно автоматизировать. Таким образом, использование высокоэнергетических технологий при получении силикатных расплавов позволит сделать эти производства более экономичными и решить проблемы экологии.

В рамках заключенного договора о сотрудничестве в области инновационных технологий в сфере образования и науки между Карагандинским государственным техническим университетом (КарГТУ, Республика Казахстан) и Томским государственным архитектурно-строительным университетом поставлена задача: разработать технологию получения высокотемпературных силикатных расплавов из золошлаковых отходов республики Казахстан и установить возможность формирования минеральных волокон с использованием устройств низкотемпературной плазмы. Результаты исследований по разработке данной технологии представлены в настоящей статье.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве исходных материалов для получения минеральных волокон использовались золы Карагандинской ГРЭС-2 г. Темиртау и золы районной котельной (РК) г. Кокшетау. Проведенный химический анализ золошлаковых отходов, используемых при проведении экспериментов (табл. 2), показал, что исследуемые материалы характеризуются высоким содержанием SiO_2 , который является основным стеклообразователем, это говорит о том, что золошлаковые отходы пригодны для получения силикатных расплавов и могут быть использованы в производстве минеральных волокон.

В лаборатории «Плазменные технологии» Томского государственного архитектурно-строительного университета накоплен опыт по изготовлению электроплазменных установок для различных отраслей производства [15-17]. С учетом проведенного обзора научно-технической литературы была разработана рациональная конструкция плазменного реактора для плавления тугоплавких неметаллических материалов с целью получения силикатного расплава и минеральных волокон на его основе.

Таблица 2. Средний химический состав и кислотность исследуемых материалов

Наименование оксида	Содержание оксида, масс. %	
	Зола Карагандинская ГРЭС-2 г. Темиртау	Зола РК г. Кокшетау
SiO ₂	46,76	52,30
Al ₂ O ₃	26,23	25,70
Fe ₂ O ₃	7,30	5,30
CaO	7,70	1,50
MgO	3,10	0,4
Прочие	16,61	14,8
Модуль кислотности		
M_k	4,87	11,47

На рисунке 1 представлена схема электроплазменной установки для получения минеральных волокон. В качестве плазмообразующего газа в экспериментах использовался воздух.

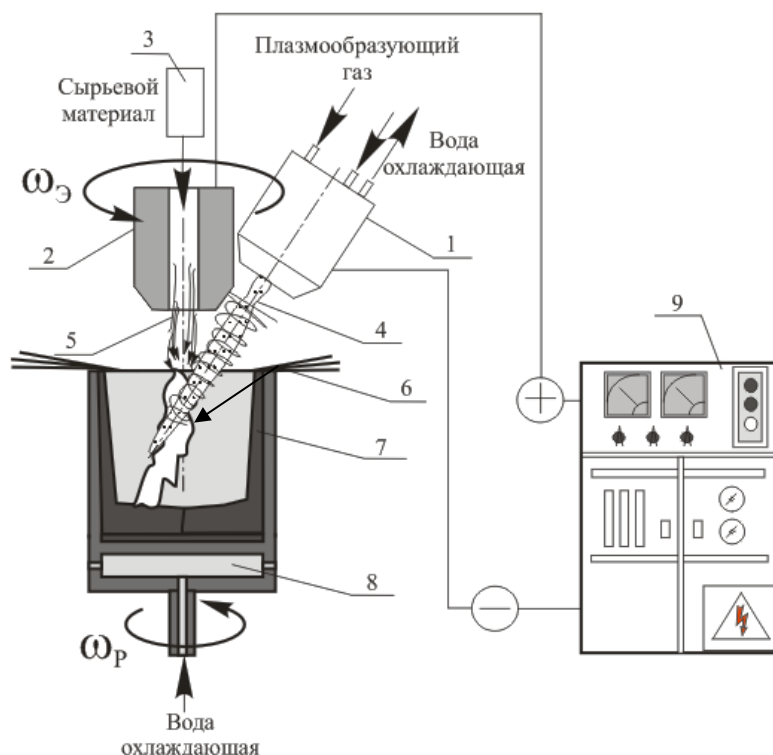


Рис. 1. Схема электроплазменной установки для получения минеральных волокон: 1 – плазмотрон; 2 – графитовый анод; 3 – дозирующее устройство; 4 – плазменная дуга; 5 – сырьевой материал; 6 – минеральные волокна; 7 – гарнисажный слой; 8 – вращающийся реактор; 9 – источник постоянного тока.

В состав электроплазменной установки входит: плазмохимический реактор объемом 25 литров, генератор низкотемпературной плазмы марки ВПР-410, источник питания АПР-402, шнековый дозатор со скоростью подачи 0,5 кг/мин. Принцип работы установки основан на взаимодействии высококонцентрированных потоков плазмы 4 с порошкообразным тугоплавким силикатсодержащим материалом 5 (золы ГРЭС и РК), в результате которого осуществляется расплав дисперсных частиц с последующим образованием минеральных волокон 6. Образующийся расплав поступает во вращающийся реактор 8, где под действием центробежных сил, поднимаясь по стенкам реактора, срываясь с его кромок, вытягивается в волокна, которые поступают в камеру осаждения. В процессе работы плазмотрона, расплавленные частицы осаждаются на стенке вращающегося реактора 8 образуя гарнисажный слой 7, который, обладая низкой теплопроводностью, защищает стенки реактора от разрушения. Время выработки расплава в экспериментальной работе составляло от 7 до 10 минут.

Температура расплава в струе измерялась при помощи оптического пирометра с исчезающей нитью ОППИР-017Э и составляла от 1300 до 1720°С, при этом рабочие электрические характеристики лежали в интервалах: $I = 30 \dots 70$ А; $U = 130 \dots 160$ В. В таблице 3 приведены результаты изменения температуры в зависимости от электрической мощности, вкладываемой в струю силикатсодержащего расплава.

Таблица 3. Зависимость температуры в струе реактора от вкладываемой электрической мощности

№	I, А	U, В	Температура расплава в струе, °С
0	-	-	1320*
1	30	160	1430
2	40	145	1550
3	50	140	1610
4	70	127	1720

*Температура расплава при выходе из летки плавильной печи

В результате проведенного эксперимента была определена производительность электроплазменной установки по волокну, она составила 10,8 кг/ч. Таким образом, можно сделать вывод о том, что мощности генератора низкотемпературной плазмы достаточно для получения 100% расплава исходного сырья за небольшой промежуток времени и выработки из него минеральных волокон (рис. 2).

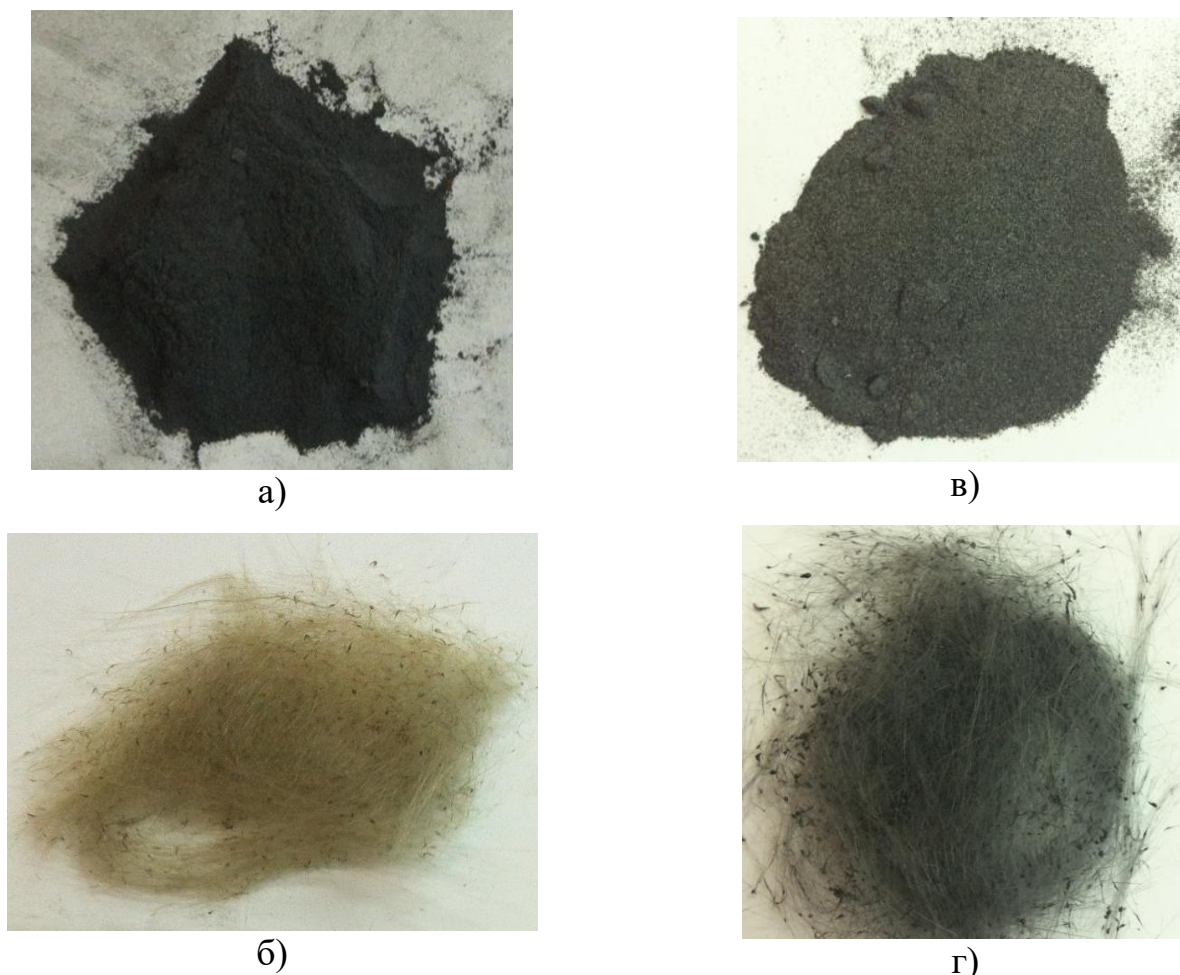


Рис. 2. Микрофотографии: а) зола Карагандинской ГРЭС-2; б) минеральное волокно на основе золы ГРЭС-2; в) зола РК г. Кокшетау; г) минеральное волокно на основе золы РК г. Кокшетау. (Кратность увеличения X 300).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований было установлено, что золы ГРЭС-2 и РК-2 республики Казахстан могут быть использованы для получения минерального волокна с использованием низкотемпературной плазмы. При этом полученное минеральное волокно характеризуется высокими эксплуатационными характеристиками, а также повышенной устойчивостью к воздействию высоких температур и может быть использовано далее как строительный материал. Предложена и апробирована конструкция плазменного реактора. Применение энергии плазмы позволяет получать расплав из отходов энергетических производств и других силикатных материалов, имеющих температуру плавления более 1600°C.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства образования и науки РФ (номер проекта 11.8207.2017/8.9), гранта Президента РФ (МД-553.2018.8) и стипендии Президента РФ (СП-313.2018.1). Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 17-38-50002 мол_нр и №17-38-50017 мол_нр.

Список литературы:

1. *Шихова В.А., Яценко Е.А.* // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2013. № 4 (173). С. 63.
2. *Сультимова В.Д.* К вопросу о возможности получения минеральных волокон из золошлаковых отходов с помощью низкотемпературной плазмы // Технические науки: теоретические и прикладные аспекты: материалы международной заочной научно-практической конференции. Новосибирск: Априори, 2012. С. 79.
3. *Hofmeister A.M., Whittington A.G., Pertermann M.* // Contrib. Mineral. Petrol. 2009. V. 158. P. 381.
4. *Malashenko M.S., Maslov E.A., Borisov B.V.* Modeling of continuous melting of quartzfeldspar raw materials of subsequent flow from the plasma heating // MATEC Web of Conferences. 2015. V. 23. P. 01048.
5. *Gao Y., Qiu J., Zhou D.* // J. Amer. Ceramic Soc. 2017. V. 100(7). P. 2901.
6. Строительные материалы. Библиотека научно-технического портала «Технарь». <http://tehlib.com/stroitel-ny-e-materialy/stroitel-ny-e-materialy> (дата обращения 05.02.2018).
7. *Nell J.T., Havenga J.L., Swanepoel J., Bosman H.* // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2010. V. 10. P. 231.
8. *Khmyrov R.S., Protasov C.E., Grigoriev S.N., Gusarov A.V.* // Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2016. V. 85. P. 1461.
9. *Shigeta M., Murphy A.B.* Thermal plasmas for nanofabrication // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 174025.
10. *Gomez et al.* // J. Hazard. Mater. 2009. V. 161 (2-3). P. 614.
11. *Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Абзаев Ю.А., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В.* // Вестник Томского гос. архитектурно-строительного университета. 2013. № 4 (41). С. 197.
12. *Maddrell E., Thornber S., Hyatt N.C.* // J. Nuclear Mater. 2015. V. 456. P. 461.
13. *Sirotyuk V.V., Pogrebinskii G.M.* // Refractories and Industrial Ceramics. 2000. V. 41(1-2). P. 24.
14. *Valinciute V., Kerzelis R., Valincius V., Valatkevicius P., Mecius V.* // Heat Transfer Research. 2008. V. 39(7). P. 609.
15. *Волокитин О.Г., Верецагин В.И., Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Шеховцов В.В.* // Техника и технология силикатов. 2016. Т. 23. № 3. С. 2.
16. *Волокитин Г.Г., Скрипникова Н.К., Волокитин О.Г., Шеховцов В.В., Хайсундинов А.И.* // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 3-3. С. 109.
17. *Волокитин О.Г., Шеремет М.А., Шеховцов В.В., Бондарева Н.С., Кузьмин В.И.* // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 5. С. 789.

UTILIZATION OF INDUSTRIAL WASTE USING THERMAL PLASMA ENERGY

O. G. Volokitin and V. V. Shekhovtsov*

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia,
*e-mail: volokitin_oleg@mail.ru

Received February 5, 2018

Abstract – A possibility is considered for thermal plasma energy-assisted processing industrial silicate-containing waste for the purpose of its further utilization in industry, i.e. in the form of construction materials. A technology has been developed that makes it possible to obtain a mineral fiber with high performance characteristics and improved resistance to high temperatures basing the above waste. Plasma chemical reactor has been designed and validated for obtaining a melt starting from various kinds of waste produced by power generating plants as well as from other refractory nonmetallic materials having melting point values exceeding 1600°C.

Keywords: ash wastes, utilization, low-temperature plasma, silicate melt, plasma chemical reactor, mineral fibres.