УДК 62–63
doi 10.18101/978–5–9793–0803–6–123–131

ТЕХНОГЕННЫЕ ОТХОДЫ, ОБРАБОТАННЫЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАЗМОЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАСПЛАВА И ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

© ***Буянтуев Сергей Лубсанович***, доктор технических наук, профессор
Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления
Россия, г. Улан-Удэ
E-mail: buyantuevsl@mail.ru

© ***Ма Тун Цай***, доктор технических наук, профессор
Даляньского политехнического университета
КНР, г. Далянь

© ***Нин Гунлин***, доктор химических наук, профессор
Даляньского политехнического университета
КНР, г. Далянь

© ***Кондратенко Анатолий Сергеевич***, кандидат технических наук
Бурятского государственного университета
Россия, г. Улан-Удэ

© ***Базарсадаев Элбэг Цыденжапович***, аспирант
Бурятского государственного университета
Россия, г. Улан-Удэ

© ***Хмелев Андрей Борисович***, аспирант Восточно-Сибирского
государственного университета технологий и управления
Россия, г. Улан-Удэ
E-mail: hmelev2103@mail.ru

В статье даны результаты исследования процессов плавления тугоплавких техногенных отходов в электродуговой плазме с целью получения расплавов и волокнистых материалов. Представлены данные по экспериментальному получению минерального волокна из отхода с применением в качестве плавильного аппарата электромагнитного реактора с отработкой режимов выплавки. Конструктивные особенности реактора позволили получать чистый расплав, свободный от восстановленных металлов, дающий возможность производства более качественной продукции. При этом удалось организовать режим выплавки в один этап, состоящий из комбинированного нагрева сырья. Исследования производились методами спектрального, рентгеновского, энергодисперсионного анализа, а также электронной микроскопии. Показана принципиальная возможность плавления данных отходов с подшихтовкой стеклобоем для получения расплава и исследования его вещественного состава и выработкой из него тонкого минерального волокна как одного из компонентов композици-

онных материалов, для получения теплоизоляционных материалов волокнистой структуры.
Ключевые слова: электродуговая плазма, плазменный реактор, техногенные отходы, стеклобой, спектральный рентгеновский анализ, микроскопия поверхности, каменный расплав, минеральное волокно.

TECHNOGENIC WASTE TREATED BY PLASMA ARC
TO PRODUCE MELT AND FIBER MATERIALS

Sergey L. Buyantuev, Doctor of Engineering Sciences, Professor,
East Siberia State University of Technology and Management
Ulan-Ude, Russia

Ma Tong Cai, Doctor of Engineering, Professor,
Dalian Polytechnical University
Dalian, People's Republic of China

Ning Gongling, Doctor of Chemistry, Professor,
Dalian Polytechnical University
Dalian, People's Republic of China

Anatoly S. Kondratenko, Candidate of Engineering Sciences,
Buryat State University
Ulan-Ude, Russia

Elbeg Ts. Bazarsadaev, Postgraduate Student,
Buryat State University
Ulan-Ude, Russia.

Andrei B. Khmelev, Postgraduate Student,
East Siberia State University of Technology and Management
Ulan-Ude, Russia

The article presents the results of studies of melting refractory technogenic waste in an electric plasma in order to obtain melts and fibrous materials. The data on the experimental production of mineral fibers from waste using as the melter electromagnetic reactor with working regimes of smelting. Design features of the reactor allowed getting clean melt-free reduced metals, enabling the production of higher quality products. Thus it was possible to arrange in one mode of smelting step consisting of heating the combined feedstock. Research has been performed by methods of X-ray energy dispersive spectral analysis and electron microscopy. The fundamental possibility of melting the wastes with additional charging by the cullet for getting the melt and studying its material composition, as well as the elaboration of a thin mineral fiber as a component of composite materials, as well as for thermal insulation materials fibrillation.
Keywords: arc plasma, plasma reactor, technological waste, glass, x-ray spectral analysis, microscopy surface melt stone, mineral fiber.

Введение. Потребность различных отраслей промышленности в минеральных волокнистых материалах постоянно возрастает. Для производства

минеральных волокон крайне уместно использовать техногенные отходы, возникающие как побочный (конечный) продукт разного рода технологических процессов, в связи с тем, что их образование имеет тенденцию значительного роста в будущем, что способствует их неуклонному накоплению [1; 2]. Переработка твердых техногенных отходов в волокнистые материалы является важной научно-технической задачей, так как данные виды отходов имеют повышенную температуру плавления, поэтому не могут быть использованы для производства минеральной ваты с помощью известных теплоагрегатов (вагранок, ванных печей и т. д.) [3].

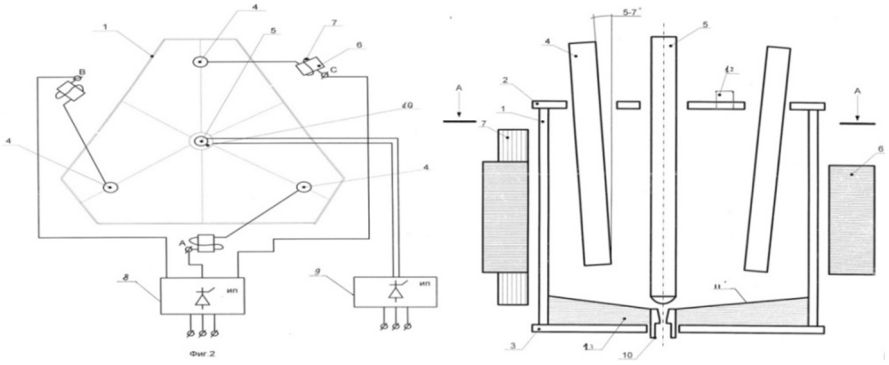
Во всем мире ведутся работы по получению минеральных волокнистых материалов с высокими физико-химическими и механическими свойствами. Однако едва ли не главной проблемой, наряду с соблюдением требований ГОСТ к качеству волокнистых материалов, всегда была и остается проблема снижения энергозатрат и себестоимости производства данных материалов. Решение этих сложных, порой противоречивых проблем требует проведения предварительных экспериментальных и теоретических исследований сырья с целью выработки практических рекомендаций для производства волокнистых материалов с использованием современных достижений науки и новых технических решений [4].

Одним из перспективных направлений в этой области является применение электродуговой плазмы для плавления исходного сырья с целью получения теплоизоляционных волокнистых материалов. При использовании в качестве источника тепловой энергии электрической дуги, за счет высокой температуры резко снижается время получения расплава из-за исключения индукционного периода плавления [5].

Экспериментальная установка и методика исследований

Проведенные предварительные эксперименты по плавке техногенного отхода без подшихтовки показали его высокую тугоплавкость и газообильность в процессе обработки, поэтому для уменьшения температуры плавления и снижения энергозатрат было принято решение совместно использовать отходы стеклобоя для получения однородных по составу расплавов с целью последующей выработки минеральных волокнистых материалов и каменного литья. Целью поставленной задачи являлось решение о максимальном использовании полученного отхода бора. Поэтому начальной задачей была возможность получения расплавов с интервалом содержания отхода в пределах 5–20 %, показавшая принципиальную возможность плавления данных композиций. В дальнейшем, руководствуясь поставленными задачами и полученными предварительными данными, решили плавить отходы, начиная с массовых концентраций 50 % (по отходу) с доведением в последующем до 90 %.

В работе представлены данные по экспериментальному получению минерального волокна из отхода с применением в качестве плавильного аппарата электромагнитного реактора с отработкой режимов выплавки (рис. 1) [6].



А Б

Рис. 1. Продольный (А) и поперечный (Б) разрез
электромагнитного технологического реактора
1 — реакционная камера; 2 — водоохлаждаемая крышка; 3 — водоохлаждаемое дно; 4 — стержневые электроды (3 шт.); 5 — стержневой запирающий электрод; 6 — полюсный наконечник; 7 — сериесная обмотка; 8 — источник питания; 9 — дополнительный источник питания для подогрева струи; 10 — устройство для вывода расплава (летка); 11 — футерованное днище камеры; 12 — патрубок в реакционную камеру для подачи сырья; 13 — футеровка

Конструктивные особенности реактора позволили получать чистый расплав, свободный от восстановленных металлов, дающий возможность производства более качественной продукции. При этом удалось организовать режим выплавки в один этап, состоящий из комбинированного нагрева сырья:

– при пуске происходит электродуговой плазменный нагрев и расплавление сырьевого материала, а в дальнейшем по мере проплавления и образования токопроводной чаши расплава происходит подсыпка сырья и протекание тока через расплавленную алюмосиликатную массу с одновременным электромагнитным ее перемешиванием и гомогенизацией при помощи последовательно включенных сериесных электромагнитов, что значительно сокращает время выхода на рабочий режим и снижает энергоемкость производства. Определяемая на практике затрачиваемая мощность, необходимая для получения расплава объемной массой до 10 кг, составляет 1,5–2,0 кВт/кг (к сравнению затрачиваемая мощность работающих индукционных печей — 6 кВт/кг) [7].

Результаты исследований и их обсуждение

В работе проводилось изучение вещественного состава расплава и минерального волокна, полученного его раскруткой и раздувом из техногенных отходов с помощью электродуговой плазмы в электромагнитном реакторе.

Для переработки с целью преобразования были использованы техногенные отходы, представляющие собой порошкообразное вещество (рис. 2) следующего элементного состава (табл. 1).

Таблица 1

Элементный состав отхода бора

Спектр	B	C	O	Na	Mg	Al	Si	Итог
Спектр 1	3,44	12,26	52,89	0,91	23,22	0,94	6,34	100,00

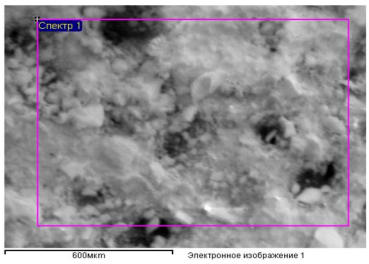


Рис. 2. Порошкообразный отход производства

Изучение плавления и практическая выработка волокнистых материалов проводились в несколько этапов:

1. На рисунке 3 показан расплав с массовыми концентрациями компонентов 50:50 (отход бора/стекло). На рисунке 4 и в таблице 2 показаны спектральные линии элементов и их массовое содержание. Плавление проходило с малым газовыделением, ориентировочное время для получения расплава составило 15 мин при мощности реактора 15 кВт. При сливании расплава было проведено вытягивание волокон, получались тонкие длинные волокна, характеристики которых приведены на рисунке 5 и в таблице 3.

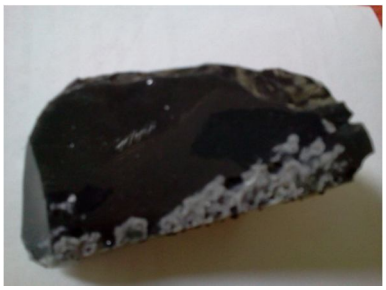
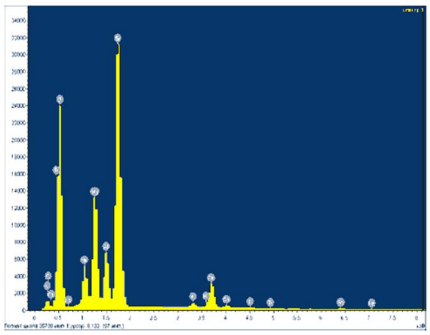
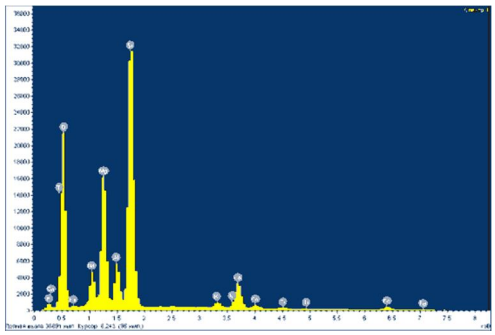


Рис. 3. Внешний вид расплава отхода производства и стеклобоя с массовым содержанием компонентов 50:50 (отход/стеклобой)





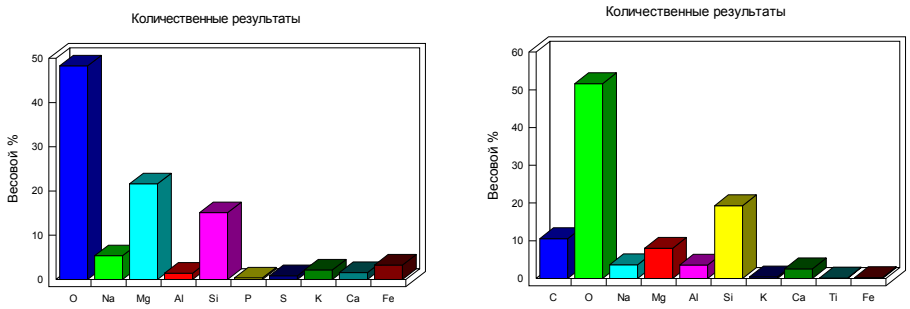


Рис. 4. Спектральные линии распределения элементов и их массовые концентрации

Таблица 2

Элементный состав расплава с массовыми концентрациями 50:50

C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Итог
10,55	51,63	3,63	8,01	3,54	19,30	0,44	2,56	0,12	0,22	100.00

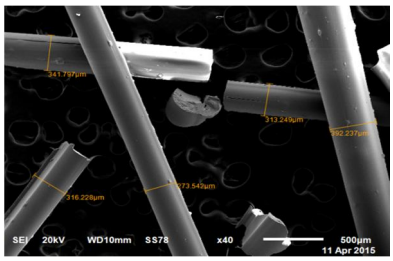


Рис. 5. Микрофотография волокон с концентрацией 50:50 (отход/стекло)

Таблица 3

Элементный состав волокон с массовыми концентрациями 50:50

O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Cr	Fe	Cu	Zn	Итог
43,79	4,69	4,91	1,77	35,28	0,73	7,11	0,28	0,74	0,35	0,34	100,00

2. В дальнейшем концентрация отхода была увеличена на 10 %. На рисунке 6 показан расплав с массовыми концентрациями компонентов 60:40 (отход/стекло). На рисунке 7 и в таблице 4 показаны спектральные линии элементов и их массовое содержание. Плавление также проходило с малым газовыделением, ориентировочное время для получения расплава также составило 15 мин при мощности реактора 15 кВт. При сливании расплава было проведено вытягивание волокон, однако полученные волокна отличались неод-

нородностью толщины (диаметра). Их характеристики приведены на рисунке 8 и в таблице 5.

Рис. 6. Внешний вид расплава техногенного отхода и стеклобоя с массовым содержанием компонентов 60:40 (отход : стеклобой)

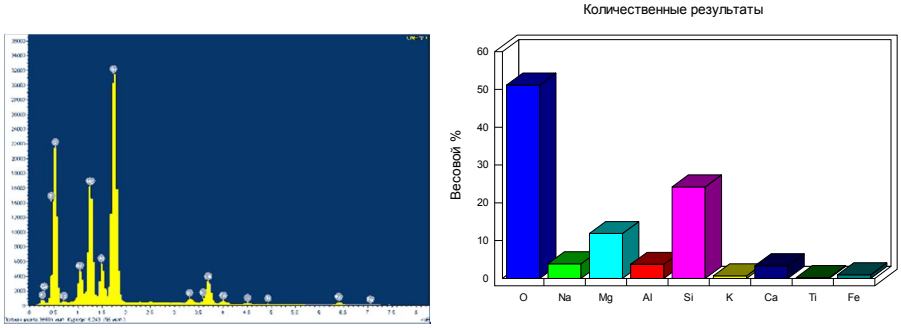


Рис. 7. Спектральные линии распределения элементов и их массовые концентрации

Таблица 4

Элементный состав расплава с массовыми концентрациями 60:40

O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Итог
51.14	3.87	11.88	3.73	24.22	0.67	3.33	0.20	0.97	100.00

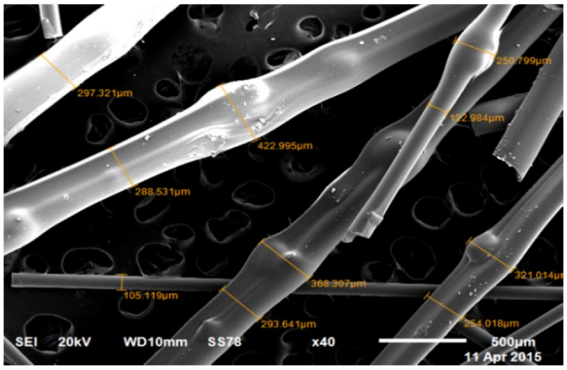


Рис. 8. Микрофотография волокон с концентрацией 60:40 (отход/стекло)

Таблица 5

Элементный состав волокон с массовыми концентрациями 60:40

O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Cu	Итог
47,68	3,78	11,84	3,83	26,29	0,79	3,86	0,20	1,43	0,29	100,00

3. В последующем концентрация отхода была увеличена еще на 10 % и составила 70 %. На рисунке 9 показан расплав с массовыми концентрациями компонентов 70:30 (отход бора — стекло). На рисунке 10 и в таблице 6 даны спектральные линии элементов и их массовое содержание. Плавление представленного состава проходило с заметно большим газовыделением, ориентировочное время для получения расплава составило уже 25 мин при мощности реактора 20 кВт. При сливании расплава также проводился опыт по вытягиванию волокон, однако получить их не удалось, дало о себе знать повышенное содержание магния в отходе (табл. 6).

Рис. 9. Внешний вид расплава техногенного отхода и стеклобоя с массовым содержанием компонентов 70:30 (отход: стеклобой)

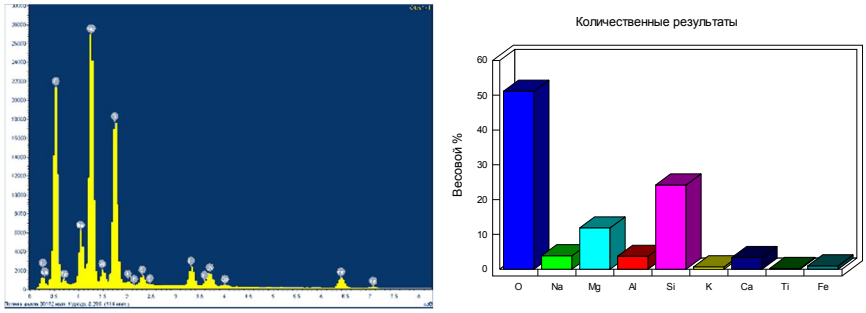


Рис. 10. Спектральные линии распределения элементов и их массовые концентрации

Таблица 6

Элементный состав расплава с массовыми концентрациями 70:30

O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Fe	Итог
48.29	5.37	21.64	1.41	15.11	0.36	0.86	2.15	1.55	3.25	100.00

Заключение

Представленный электромагнитный плавильный реактор, являющийся разновидностью плазменных реакторов, позволил плавно регулировать температуру расплава и поддерживать ее на выходе струи из летки, что дало возможность снизить вязкость и увеличить текучесть расплава.

Можно рекомендовать данный отход перерабатывать электродуговым плазменным способом в расплав с массовым содержанием компонентов отход/стеклобой 50:50 или 60:40 для получения камневидного литья и тонкого минерального волокна как одного из компонентов композиционных материалов, а также для получения теплоизоляционных материалов волокнистой структуры.

Литература

1. Мясников А. А., Асланова М. С. Выбор составов горных базальтовых пород для получения волокон различного назначения // Стекло и керамика, 1965. № 3. С. 12–15.

2. Буянтуев С. Л., Сультимова В. Д. Получение теплоизоляционных материалов из золошлаковых отходов ТЭС при помощи низкотемпературной плазмы // Строительные материалы. 2004. № 10. С. 51–53.

3. Буянтуев С. Л., Сультимова В. Д. Применение низкотемпературной плазмы для получения волокнистых теплоизоляционных материалов из золошлаковых отходов тепловых электрических станций. Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2010. 132 с.

4. Буянтуев С. Л., Кондратенко А. С. Исследование физико-химических свойств минеральных волокон, полученных с помощью электромагнитного технологического реактора // Вестник ВСГУТУ. 2013. № 5(44). С. 123–129.

5. Буянтуев С. Л., Кондратенко А. С. Теплоизоляционные материалы волокнистой структуры из расплавов горных пород и золошлаковых техногенных отходов: моногр. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2014. 180 с.

6. Электромагнитный технологический реактор / С. Л. Буянтуев [и др.] // Патент РФ. № 2432719; опубл. 27.10.2011. Бюл. № 21.

7. Производство теплоизоляционных строительных материалов с использованием электроплазменной обработки / С. Л. Буянтуев [и др.] // Строительный комплекс России: наука, образование, практика: материалы междунар. науч.-практ. конф. Улан-Удэ, 2006. С. 90–93