УДК 666.189.3

Я.И. ВАЙСМАН, д-р мед. наук; А.А. КЕТОВ, д-р техн. наук (alexander_ketov@mail.ru);
П.А. КЕТОВ, инженер-эколог

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29)

Вторичное использование пеностекла при производстве пеностеклокристаллических плит

В течение срока эксплуатации подавляющее большинство строительных материалов теряет свои потребительские свойства, и завершение жизненного цикла предполагает их размещение на полигонах твердых коммунальных отходов. Однако с точки зрения концепции устойчивого развития производство новых материалов для строительства должно быть основано исключительно на возобновляемом сырье. Рассмотрены вопросы вторичного использования пеностеклянных и пеностеклокристаллических плит для производства новых плитных стеклокристаллических материалов ячеистого строения. Показано, что после завершения жизненного цикла плитное пеностекло может быть переработано в пеностеклянный щебень, который в свою очередь может быть заполнителем при производстве новых плитных пеностеклокристаллических материалов. Установлено, что полученные плитные изделия по структуре не отличаются от пеностеклокристаллических плит, произведенных из первичных материалов.

Ключевые слова: пеностеклокристаллические плиты, пеностеклянный щебень, концепция устойчивого развития, энергоэффективность, вторичное использование материалов.

Для цитирования: Вайсман Я.И., Кетов А.А., Кетов П.А. Вторичное использование пеностекла при производстве пеностеклокристаллических плит // *Строительные материалы.* 2017. № 5. С. 56–59.

Ya.I. VAYSMAN, Doctor of Sciences (Medicine), A.A. KETOV, Doctor of Sciences (Engineering) (alexander_ketov@mail.ru); P.A. KETOV, Engineer-Ecologist
Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614990, Russian Federation)

Secondary Application of Foam Glass when Producing Foam-Glass-Crystal Slabs

During the operation, overwhelming majority of building materials loses their consumer properties and the completion of the life cycle assumes their location at the polygons of solid communal waste. However, from the point of view of the sustainable development concept, the production of new materials for construction must be based on the renewable raw materials exclusively. Issues of the secondary use of foam glass and foam-glass-crystal slabs for producing new slab glass-crystal materials of cellular structure are considered. It is shown that after the completion of the life cycle, slab foam glass can be processed in foam-glass crushed stone which, in its turn, can be used as a filler when producing new slab foam-glass-crystal materials. It is established that obtained slab products are not structurally differ from foam-glass-crystal slabs produced from the primary materials.

Keywords: foam-glass-crystal slabs, foam glass crushed stone, sustainable development concept, energy efficiency, secondary use of materials.

For citation: Vaysman Ya.I., Ketov A.A., Ketov P.A. Secondary Application of Foam Glass when Producing Foam-Glass-Crystal Slabs. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 5, pp. 56–59. (In Russian).

Рассмотрение объектов промышленного и гражданского строительства с точки зрения концепции устойчивого развития и «зеленых» технологий предполагает необходимость не только экологически безопасного производства и эксплуатации строительных материалов, но и их утилизацию по окончании жизненного цикла [1, 2]. В течение срока эксплуатации подавляющее большинство строительных материалов теряет свои потребительские свойства и завершение жизненного цикла предполагает их размещение на полигонах твердых коммунальных отходов. Однако в перспективе производство новых материалов для строительства должно быть основано исключительно на возобновляемом сырье [3], поэтому использование отходов, в частности получение энергоэффективного ячеистого силикатного материала из отходов стекла, может стать выходом из ситуации, отвечающей требованиям устойчивого развития общества [4].

Трудности вторичного использования особенно характерны для теплоизоляционных материалов, что может быть объяснено их высокой удельной поверхностью и, как следствие, особенно высокими скоростями взаимодействия с компонентами атмосферы, прежде всего кислородом и влагой воздуха. Одним из немногих исключений в ряду теплоизоляционных материалов является пеностекло или ячеистая стеклокерамика. Действительно, даже теоретически материал не может взаимодействовать ни с кислородом, ни с парами воды, поэтому срок его эксплуатации фактически неограничен и определяется сроком эксплуатации зданий и сооружений, где он применяется. Структура материала не претерпевает изменений со временем, и потребительские свойства остаются неизменными. Это означает, что наиболее экономически и экологически эффективным методом утилизации пеностекла является его вторичное использование для производства новых строительных изделий.

Ранее было установлено, что большинство современных производителей пеностеклянных плит выпускают фактически окристаллизованный материал, т. е. пеностеклокерамику [5], традиционно называя материал пеностеклом. Эта особенность не имеет существенного значения с точки зрения эксплуатации, но является критичной при вторичной переработке материала, так как наличие кристаллической фазы подавляет термопластичные свойства материала.

На практике извлечь пеностеклянные или пеностеклокристаллические плиты из строительных конструкций в неизменном виде не представляется возможным без механических повреждений. Кроме того, еще на стадии строительства плиты разрезают в соответствии с требованиями проекта, что обусловливает невозможность получения при утилизации строительных конструкций товарных штучных изделий требуемых размеров. Однако всегда можно раздробить извлеченный ячеистый материал в щебень, который по свойствам неотличим от специально произведенного пеностеклянного или пеностеклокристаллического щебня. Поэтому задача вторичного использования пеностеклянных или пеностеклокристаллических плит на прак-

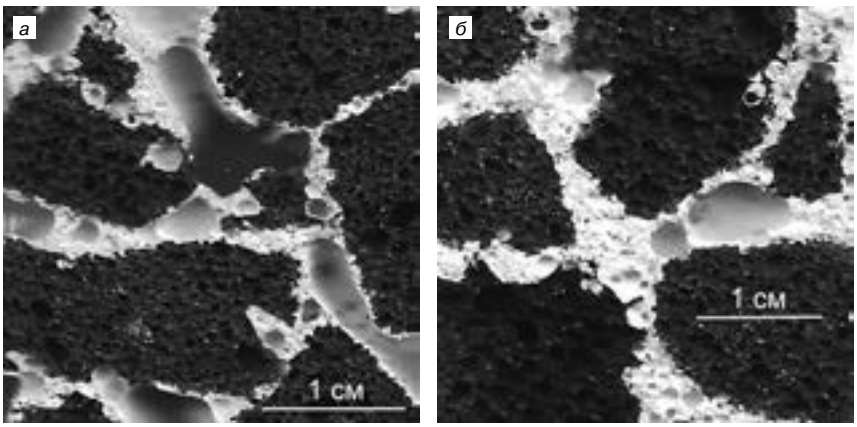

Рис. 1. Фотографии срезов композиционного материала из черного пеностеклянного щебня и белого портландцементного вяжущего при недостатке связующего (*а*) и при заполнении связующим всего межзернового пространства (*б*)

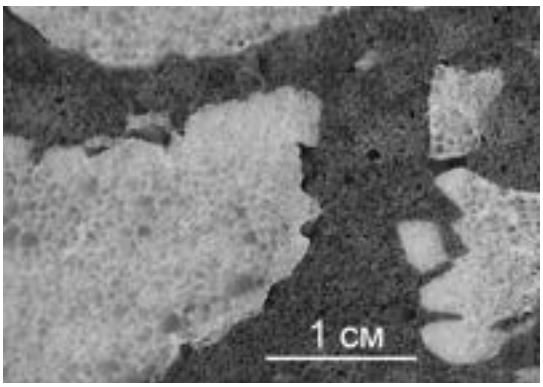

Рис. 2. Фотография среза композиционного материала из белого (окисленного) пеностеклокристаллического щебня на связке из черного (восстановленного) пеностеклокристаллического материала

тике может быть сведена к задаче изготовления новых ячеистых плит из пеностеклянного или пеностеклокристалического щебня.

Наиболее очевидным решением этой задачи может быть измельчение полученного ячеистого щебня до фракций менее 80–100 мкм и применение такого порошка в технологии ячеистых плит как сырья. Однако такое решение не приводит к желаемому результату прежде всего потому, что измельченная в порошок стеклокерамика не может быть применена в качестве сырья в технологии пеностеклянных плит вследствие отсутствия у стеклокерамики необходимой термопластичности, т. е. заготовка, полученная из такого порошка, не вспенивается при нагреве. Сортировка вторичного ячеистого материала в соответствии с фазовым составом на аморфный и стеклокристаллический весьма затруднительна как с технической, так и с экономической точек зрения.

Как было указано выше, аналогичную задачу по использованию пеностеклянного щебня в строительстве решают и производители. Если оставить в стороне традиционное использование пеностеклянного щебня в строительстве дорог и засыпной теплоизоляции, то продолжаются попытки получить плитные изделия на основе пеностеклянного щебня при скреплении частиц щебня тем или иным видом связующего. Получение аналогичных композиционных плит на основе заполнителя в виде пеностеклянного гравия позволяет получить композиционные плиты плотностью от 350 кг/м^3 [6]. В отличие от пеностеклянного гравия (гранулята) пеностеклянный щебень имеет принципиально иную структуру поверхности. Фактически поверхность каждой частицы щебня представляет собой скол твердой пены с открытыми ячейками. Это приводит к закономерному обязательному заполнению открытых ячеек каждой частицы связующей композицией еще до того момента, когда оно сможет скрепить куски щебня между собой. Фотографии срезов такого композиционного материала представлены на рис. 1.

Обращает на себя внимание тот факт, что даже при незначительном количестве связующего компонента в композиции происходит обязательное заполнение им поверхности кусков ячеистого материала и только после полного заполнения всех открытых ячеек на поверхности кусков материала возможен процесс скрепления кусков, покрытых оболочкой связующего, между собой. При среднем диаметре ячеек материала 0,8–1,2 мм на поверхности каждого куска потребуется для их скрепления в единый блок корка из связующего материала толщиной не менее указанного диаметра ячеек. Нетрудно рассчитать, что в этом случае плотность готовой композиционной плиты из ячеистого щебня на связке из портландцемента получится выше 600 кг/м^3 и при уменьшении среднего размера кусков щебня плотность плиты будет только возрастать. Поэтому говорить о таких блоках, как теплоизоляционных, не представляется возможным. Для получения теплоизоляционных блоков из пеностеклянного или пеностеклокристаллического щебня необходимо изменить вид связки между кусками щебня.

В связи с изложенным задачу получения штучных пеностеклянных или пеностеклокристаллических изделий невысокой плотности из насыпных ячеистых материалов можно рассматривать шире. По мнению авторов, с точки зрения эксплуатационных характеристик материала не имеет принципиального значения фазовое состояние изделия – материал может быть аморфным или кристаллическим, но важно, чтобы готовое изделие имело точные размеры и обладало низкой плотностью и теплопроводностью. Точно так же является несущественным фазовое состояние и форма насыпного ячеистого материала, применяемого в качестве легкого заполнителя для получения готового изделия. Это может быть как щебень, так и сферический гранулят. Критичным является структура связки такого заполнителя в готовом изделии, необходимо, чтобы связка имела ячеистую структуру.

Проведенные эксперименты показали возможность применения синтезируемого ячеистого стеклокристаллического материала в качестве связки для пеностеклянного или пеностеклокристаллического щебня или гравия. Действительно, ранее было установлено, что при получении пеностеклокристаллического материала по гидратной технологии на первом этапе сырцовая смесь обладает высокими вяжущими свойствами [7]. Это обстоятельство может быть использовано для связки ячеистого щебня в монолитную композицию на стадии подготовки материала для вспенивания. В качестве сырья был выбран пеностеклянный щебень фракции 5–20 мм с насыпной плотностью 105 кг/м^3. Характеристики строительных материалов определяли по ГОСТ 17177–94 «Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний».

Полисиликатная связка получена из диатомита Потанинского месторождения и гидроксида натрия по методике, описанной в [7]. В процессе термообработки полученный композиционный материал, состоящий из ячеистого щебня и полисиликатной связки, не изменяет своих геометрических размеров, а полисиликатная связка образует ячеистый стеклокристаллический материал, связывающий ячеистый щебень в единое изделие (рис. 2).

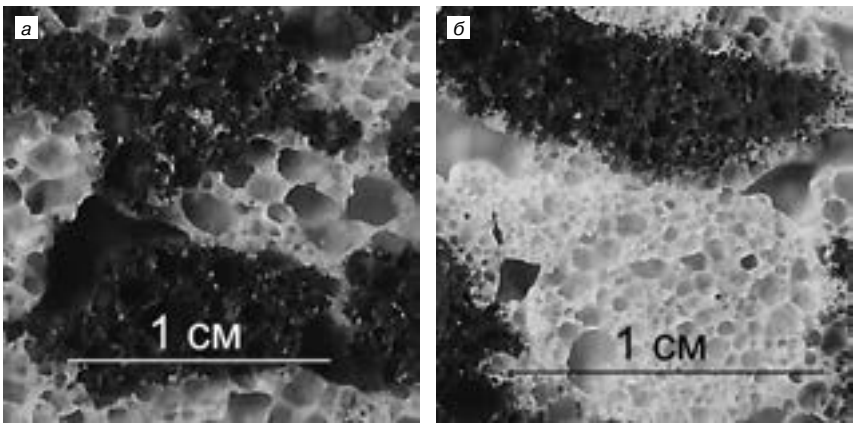

Рис. 3. Фотографии срезов композиционного материала из черного пеностеклянного щебня и белого пеностеклокристаллического вяжущего при заполнении вяжущим межзернового пространства (*а*) и при избытке вяжущего (*б*)

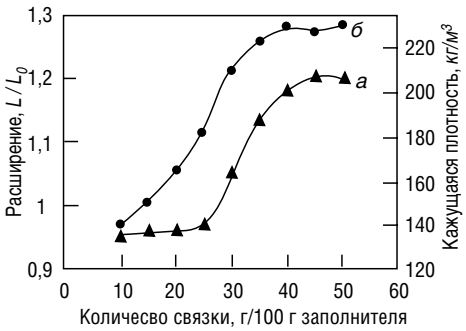

Рис. 4. Зависимость относительного расширения образца (L/L_0) – кривая *а* и кажущейся плотности – кривая *б* от количества связки в исходной композиции (г/100 г пеностеклянного щебня) черного (восстановленного) пеностеклокристаллического материала

Образующийся материал имеет непрерывную однородную ячеистую структуру и по характеристикам неотличим от пеностеклокристаллического материала, полученного по стандартной технологии из первичного сырья. Ячеистый щебень аморфной или стеклокристаллической структуры выполняет роль заполнителя, поэтому наличие или отсутствие у него свойства термопластичности не играет роли в процессе обжига. Интересной особенностью спекания формирующихся из композиционных заготовок материалов является однородность получаемой структуры пены. Это обстоятельство можно использовать для получения ячеистых блоков из сферических заготовок [8]. Поэтому наличие полисиликатной связки между частицами щебня, образующей ячеистый материал при нагревании, приводит к получению пеностеклокристаллического материала в пространстве между частицами щебня. В результате структура пеностеклянного щебня остается неизменной, а пространство между кусками ячеистого щебня заполняется новым пеностеклокристаллическим материалом. Для визуализации этого факта были изготовлены образцы из пеностеклокристаллического щебня, полученного по восстановительному варианту (черного цвета), на связке из пеностеклокристаллического материала окисленного типа (белого цвета) по описанной ранее методике [9]. Очевидно, что ячеистый щебень органично входит в структуру готового материала (рис. 3). Полученный ячеистый материал обладает стеклокристаллической структурой, что было показано ранее [10].

Кажущаяся плотность и прочность на сжатие исследованных образцов ячеистых материалов

Вид материала	Кажущаяся плотность, кг/м^3	Прочность при сжатии, МПа
Образец производства Pittsburgh Corning	140	0,7
Образец производства «СТЭС-Владимир»	160	1,1
Образец производства НПП «Технология»	135	0,7
Образец, полученный по описанной методике из гранулированного пеностекла производства Baugran	260	2,1
Образец материала, полученный по описанной методике из пеностеклокристалличесого щебня	290	2,3

Отдельной задачей в рамках создания технологии плитного пеностеклокристаллического материала на основе ячеистого щебня является определение количества связки, обеспечивающей заполнение всего свободного пространства между кусками щебня силикатной пеной в процессе термообработки. При свободном расширении в процессе пенообразования заготовки из прессованного порошка [11] или из химически связанного монолитного блока [10] происходит увеличение размеров заготовки и образование ячеистого изделия. В случае расположения полисиликатной связки между частицами щебня предполагается, что увеличение количества силикатной связки в исходной композиции приводит при термообработке к заполнению свободного пространства и только после этого начнут расти линейные размеры образца.

На рис. 4 показаны зависимости относительного расширения образца и кажущейся плотности от количества силикатной связки. Можно предположить, что при количестве силикатной связки менее 26–45 г на 100 г ячеистого щебня происходит заполнение новой силикатной пеной межзернового пространства между кусками пеностеклокристаллического щебня. Одновременно кажущаяся плотность образцов растет, что объясняется замещением воздуха межзернового пространства на образовавшуюся силикатную пену. После того как количество силикатной связки станет достаточным для заполнения всего межзернового пространства, дальнейшее увеличение ее количества приводит к росту блока и удалению кусков заполнителя друг от друга внутри расширяющейся пены. Кажущаяся плотность материала при этом остается неизменной, характеризуя кажущуюся плотность однородной пены.

Сравнение кажущейся плотности и прочности при сжатии полученных изделий с промышленно изготовленными (см. таблицу) позволяет заключить, что получаемый ячеистый стеклокристаллический материал незначительно уступает по теплоизоляционным свойствам известным изделиям, что может быть связано с увеличенной кажущейся плотностью материала. Однако такое увеличение плотности приводит к существенному увеличению прочности, что допускает применение материала не только как теплоизоляционного, но и как самонесущего, а при определенных условиях и как теплоизоляционно-облицовочного, что значительно расширяет область применения [5].

Ранее было показано [10], что в процессе термообработки полисиликата и получения ячеистого материала по гидратной технологии преобладающей кристаллической фазой в полученном материале является α-кварц с незначительной примесью кристобалита. В предложенном методе получения композиционного материала рентгенофазовый анализ подтвердил наличие этих фаз в готовом продукте.

Таким образом, применение полисиликатной связки, лежащей в основе композиции для синтеза пеностеклокристаллического материала по гидратной технологии, позволяет получать на основе пеностеклянного и пеностеклокристаллического щебня и гравия плиты заданных размеров с ячеистой однородной структурой. Полученный материал по своей структуре и потребительским характеристикам близок к пеностеклокристаллическим плитам, полученным по традиционным технологиям, а по некоторым показателям превосходит их, что расширяет области применения материала в строительстве. В результате открывается возможность возвращения пеностеклянных и пеностеклокристаллических плит в повторный жизненный цикл, что в полной мере соответствует стандартам зеленых технологий и устойчивого развития.

Список литературы

1. Теличенко В.И. От принципов устойчивого развития к «зеленым» технологиям // *Вестник МГСУ*. 2016. № 11. С. 5–6.
2. Бенуж А.А., Колчигин М.А. Анализ концепции зеленого строительства как механизма по обеспечению экологической безопасности строительной деятельности // *Вестник МГСУ*. 2012. № 12. С. 161–165.
3. Sieffert Y., Huygen J.M., Daudon D. Sustainable construction with repurposed materials in the context of a civil engineering–architecture collaboration // *Journal of Cleaner Production*. 2014. № 67. Pp. 125–138. Doi: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.018.
4. Raut S.P., Ralegaonkar R.V., Mandavgane S.A. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks // *Construction and Building Materials*. 2011. № 25. Pp. 4037–4042. Doi: http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.038.
5. Кетов А.А. Перспективы пеностекла в жилищном строительстве // Строительные материалы. 2016. № 3. С. 79–81.
6. Пузанов С.И. Особенности использования материалов на основе стеклобоя как заполнителей портландцементного бетона // *Строительные материалы*. 2007. № 7. С. 12–15.
7. Вайсман Я.И., Кетов А.А., Кетов П.А. Научные и технологические аспекты производства пеностекла // *Физика и химия стекла*. 2015. Т. 41. № 2. С. 214–221.
8. Qu Y.-N., Xu J., Su Z.-G., Ma N., Zhang X.-Y., Xi X.-Q., Yang J.-L. Lightweight and high-strength glass foams prepared by a novel green spheres hollowing technique // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. Issue 2. Pp. 2370–2377.
9. Вайсман Я.И., Кетов А.А., Кетов Ю.А., Молочко Р.А. Эффект окисления углерода парами воды при гидратном механизме газообразования при получении ячеистого стекла // *Журнал прикладной химии*. 2015. Т. 88. Вып. 3. С. 375–378.
10. Vaisman I., Ketov A., Ketov I. Cellular glass obtained from non-powder preforms by foaming with steam // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42, pp. 15261–15268. Doi: 10.1016/j.ceramint.2016.06.165.
11. Attila Y., Güden M., Taşdemirci A. Foam glass processing using a polishing glass powder residue // *Ceramics International*. 2013. № 39. Pp. 5869–5877. Doi: 10.1016/j.ceramint.2012.12.104.

References

1. Telichenko V.I. From the Principles of Sustainable Development to “Green” Technologies. *Vestnik MGSU*. 2016. No. 3, pp. 5–6. (In Russian).
2. Benuzh A.A., Kolchigin M.A. Analysis of the Concept of “Green” Construction as a Vehicle to Ensure the Environmental Safety of Construction Activities. *Vestnik MGSU*. 2012. No. 12, pp. 161–165. (In Russian).
3. Sieffert Y., Huygen J.M., Daudon D. Sustainable construction with repurposed materials in the context of a civil engineering–architecture collaboration. *Journal of Cleaner Production*. 2014. No. 67, pp. 125–138. Doi: http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.018.
4. Raut S.P., Ralegaonkar R.V., Mandavgane S.A. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks. *Construction and Building Materials*. 2011. No. 25, pp. 4037–4042. Doi: http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.038.
5. Ketov A.A. Prospects of Foam Glass in Housing Construction. Stroitel’nye Materialy [Construction Materials]. 2016. No. 3, pp.79–81. (In Russian).
6. Puzanov S.I. Features of Materials Using on the Basis of Glass Cullet as Aggregates in Portland Cement Concrete. *Stroitel’nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 7, pp. 12–15. (In Russian).
7. Vaisman Ya.I., Ketov A.A., Ketov P.A. The Scientific and Technological Aspects of Foam Glass Production. *Glass Physics and Chemistry*. 2015. Vol. 41. No. 2, pp. 157–162.
8. Qu Y.-N., Xu J., Su Z.-G., Ma N., Zhang X.-Y., Xi X.-Q., Yang J.-L. Lightweight and high-strength glass foams prepared by a novel green spheres hollowing technique. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. Issue 2, pp. 2370–2377.
9. Vaisman Ya.I., Ketov A.A., Ketov Yu.A., Molochko R.A. Oxidation of Water Vapor in Hydrate Gas-Formation Mechanism in Manufacture of Cellular Glass. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015. Vol. 88. No. 3, pp. 382–385. (In Russian).
10. Vaisman I., Ketov A., Ketov I. Cellular glass obtained from non-powder preforms by foaming with steam. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42, pp. 15261–15268. Doi: 10.1016/j.ceramint.2016.06.165.
11. Attila Y., Güden M., Taşdemirci A. Foam glass processing using a polishing glass powder residue. *Ceramics International*. 2013. Vol. 39, pp. 5869–5877. Doi: 10.1016/j.ceramint.2012.12.104.

Вышла в свет книга А. Кетова

Бой стекла: трудный путь к ячеистому стеклу от бесполезных отходов

На английском языке.

В книге рассмотрены вопросы накопления и вторичного использования отходов стекла. Показано, что сложности с переработкой стекла связаны с инертностью материала и его невысокой стоимостью. Особое внимание уделено химическим и термическим свойствам стекла как основы для технологии его переработки в востребованные продукты. На основе детального описания ионообменных и термохимических свойств дисперсного стекла предложены методы промышленного использования стеклобоя как сырья.

Подробно описаны технологии производства вяжущих композиций и ячеистых материалов из стеклобоя. Изложены результаты исследований газообразования в термопластичных силикатных композициях. Показано преимущество гидратного механизма газообразования по сравнению с традиционным сульфатным, приводящее к возможности переработки несортового стекла, и технологии обжига заготовок в печи без металлических форм.

Особое внимание уделено потребительским свойствам полученных материалов и рыночным особенностям их применения. Представлены примеры использования полученных ячеистых материалов в различных объектах и обсуждаются возможные новые области применения.

Книга предназначена для широкого круга специалистов в области вторичной переработки отходов стекла и строительных материалов, а также будет полезна студентам природоохранных, материаловедческих и химических специальностей.

Книгу можно приобрести в интернет-магазине

www.morebooks.de