

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 2. С. 165–172.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (2): 165–172.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691:539

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-165-172

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ АМОРФНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПЕНИСТЫХ ПРИРОДОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ НЕРАЗРУШАЮЩИМИ МЕТОДАМИ

Борис Семенович Семухин

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. В данной статье в качестве объекта исследования выбран пеностекольный материал. Такие материалы известны давно, но современные методы позволяют изучить и научно обосновать отнесение их к природоподобным.

Для этого были использованы *два метода*: рентгеновский и акустический, как наиболее удобные для работы с природоподобными материалами. Измерены скорость рэлеевских поверхностных волн и интегральная интенсивность рентгеновского рефлекса-гало. Предложена нормировка данных для сравнения измеренных величин скорости и интенсивности.

Экспериментально установлено, что плотность пеностекольных материалов отражает факт равномерного распределения электронной плотности. Делается вывод о равномерной плотности аморфных материалов и их подобии природным.

Ключевые слова: скорость звука, аморфный материал, природоподобный, пористый материал

Для цитирования: Семухин Б.С. Определение плотности аморфной составляющей пенистых природоподобных материалов неразрушающими методами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 2. С. 165–172. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-165-172.

ORIGINAL ARTICLE

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF AMORPHOUS COMPONENT DENSITY IN FOAM NATURE-LIKE MATERIALS**Boris S. Semukhin***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. Glass foam material is investigated in this paper. Glass foam materials are known long ago, but modern methods make it possible to study and scientifically substantiate their classification as nature-like. X-ray and acoustic methods are used as the most appropriate for nature-like materials. The velocity of Rayleigh surface waves and the integral intensity of the X-ray halo reflection are measured. The data normalization is proposed for comparison of measured values of speed and intensity. It is shown that the density of glass foam materials determines the uniform distribution of the electron density. A conclusion is made about the uniform density of amorphous materials and their similarity to natural.

Keywords: acoustic velocity, amorphous material, nature-like, porous material

For citation: Semukhin B.S. Non-destructive testing of amorphous component density in foam nature-like materials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (2): 165–172. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-2-165-172.

Введение

Природоподобные материалы широко используются в качестве основных и композиционных строительных материалов [1, 2, 3]. Их основные отличия от искусственных строительных материалов в величине плотности аморфной составляющей (аморф). Типичными представителями таких материалов являются пеностекольные композиции. Наличие аморфа в них ведет к улучшению технологических показателей конструкций, увеличению механических свойств, к применению в звукопоглощающих системах. Помимо высоких механических характеристик пеностекольные материалы обладают такими защитными свойствами, как пожаро- и морозоустойчивость, что расширяет сферу их применения. Необычайные свойства пеностекольных материалов позволяют использовать их в биологических антивирусных целях, т. к. установлено, что они практически не подвержены заражению микроорганизмами.

Материалы и методы

Чтобы понять, почему пеностекольный материал имеет такие необычные характеристики, много внимания было уделено его структуре. Структура пеностекольного материала имеет необычный пористый вид на разных структурных уровнях: микро-, мезо-, макро-. Все поры имеют, как правило, либо гексагональную, либо пентагональную форму [4].

Исходя из этого, было предложено считать пеностекольный материал фуллереноподобным [5]. А это, как показано во многих работах, и является признаком живого [6]. Следовательно, можно предположить, что аморф пеностекольного материала должен иметь очень плотную структуру на всех уров-

нях. Поэтому знание и расчет плотности аморфа необходимы как для доказательства природоподобности, так и для практического производства природоподобных материалов, в том числе и строительных.

Такое фуллереноподобное состояние материала должно сохраняться долго, на всем протяжении жизненного цикла конструкции, построенной из пеностекляного материала. Поэтому правильное и высокоточное определение величины плотности аморфа пеностекляного материала является физической научной задачей, необходимой и актуальной для строительного материаловедения.

Плотность пеностекляного материала обычно определяют стандартным методом взвешивания, но при использовании этого метода для определения плотности аморфа такой точности недостаточно. Кроме того, чтобы использовать пеностеклянный материал в виде больших пространственных структур, необходимо измерять плотность в нем неразрушающими методами контроля. Поэтому в настоящей работе предложено использовать современные методы неразрушающего контроля. Для определения плотности необходимо определить размеры аморфа в исследуемых образцах. На сегодняшний день считается, что прочность такого материала обеспечивается свойствами поверхности [4, 5]. Для определения величины плотности в приповерхностных слоях материала лучше всего подойдут акустические методы контроля. Такие методы применяются довольно широко в строительстве, но для исследования свойств пеностекляного материала не использовались: не позволяло отсутствие удобной, простой и точной методики измерения основных характеристик аморфа пеностекляного материала. Например, для определения скорости звука не было методики определения поверхностных значений размера аморфа.

Поэтому для точного измерения был предложен метод автоциркуляции рэлеевских поверхностных волн, уже хорошо зарекомендовавший себя при проведении анализа кристаллических тел [7, 8]. Основной целью работы является отработка измерения скорости ультразвука в пеностекляном материале с разным содержанием аморфной составляющей. В нем измерения сводят к определению частоты следования импульсов. Частота зависит от времени пробега импульсов расстояния между преобразователями, т. е. от скорости распространения ультразвука в образце. Точность измерения в данном методе не менее 0,1 %.

Для исследования был выбран пеностеклянный материал, полученный по низкотемпературной технологии (до 900 °С) на основе кремнеземистого сырья. Пеностеклянный материал получен из фритты, которая синтезирована при температурах, не превышающих 900 °С, и состоит на 93 % из аморфной и на 7 % из кристаллической фазы.

Определения частоты колебаний ультразвука в зависимости от аморфной составляющей проводили на стандартных образцах размером 1×2×3 см. В качестве акустической жидкости использовали гель SiO₂. Значения частот пересчитывали в значения скорости ультразвука. Данные заносились и обсчитывались с использованием программы Origin .

На рис. 1 представлена зависимость скорости ультразвука от объемной доли аморфной составляющей. Кривая имеет простой вид, может быть описа-

на с помощью стандартных математических уравнений. В нашем случае хорошо подходит простая экспонента. Для повышения точности измерения на каждой точке проводили измерения 10–15 раз, для каждой измеряемой точки проводили анализ. Наиболее подходящими оказались распределения Максвелла. Из графика следует, что чем больше в образце аморфной составляющей, тем больше скорость ультразвука, что свидетельствует о плотности материала в зависимости от объемной доли аморфной составляющей. Видно, что небольшое изменение количества аморфной составляющей может привести к существенному изменению свойств материала.

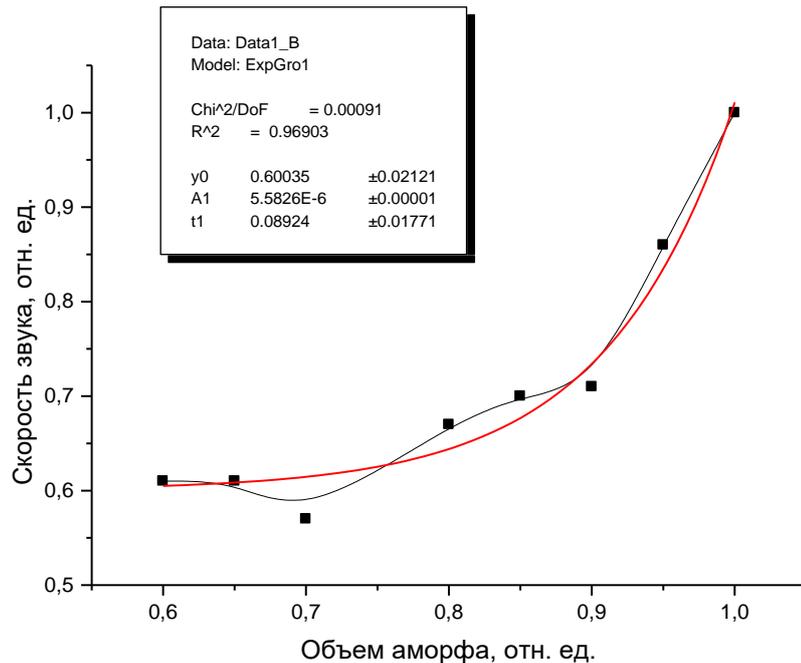


Рис. 1. Зависимость скорости звука от объема аморфа

Fig. 1. Dependence of sound speed on amorph volume

На рис. 2 представлено аморфное гало с разной интегральной интенсивностью в зависимости от объемной доли аморфа. По рентгеновской интенсивности определяли ее величину и строили график связи объемной доли аморфной составляющей и интенсивности гало (рис. 3). На рис. 4 для построения двух зависимостей на одном графике предлагается методом нормировки получить два независимых графика. Такой метод нормировки уже давно используют, пересчитывая все в процентах [9, 10]. В нашем же случае все измеряемые величины были пересчитаны в безразмерные (в доли). И это позволило получить график с двумя подобными зависимостями (рис. 4). Здесь можно констатировать хорошее согласие. Это прямое доказательство того, что объем аморфной составляющей очень тонко реагирует на изменение электронной плотности, которая дает отклик в виде изменения скорости звука и интегральной интенсивности рентгеновского гало. Такое неслучайное совпадение сви-

детельствует о том, что изменение скорости звука и интенсивности дифракционного гало практически подтверждает возможность определения доли аморфной составляющей таким способом.

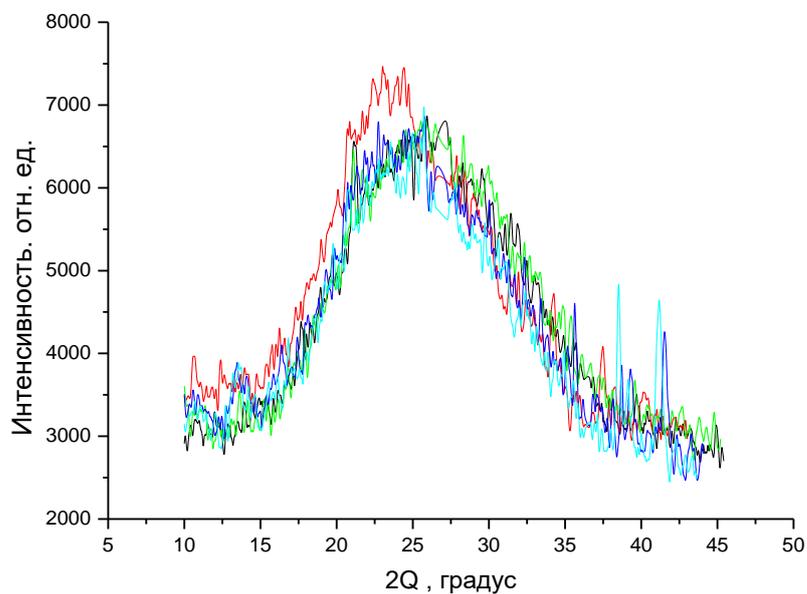


Рис. 2. Дифракционное гало
Fig. 2. Diffraction halo

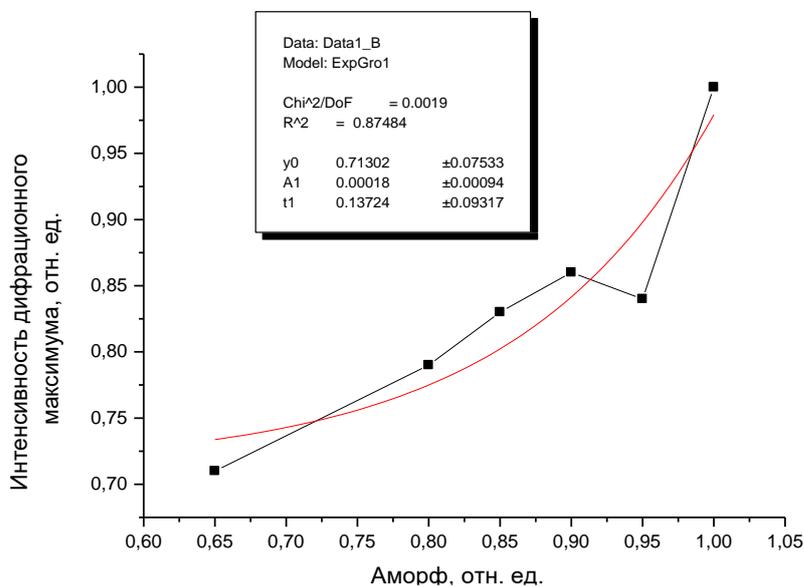


Рис. 3. Зависимость интенсивности дифракционного гало от аморфа
Fig. 3. Dependence of diffraction halo intensity on amorph

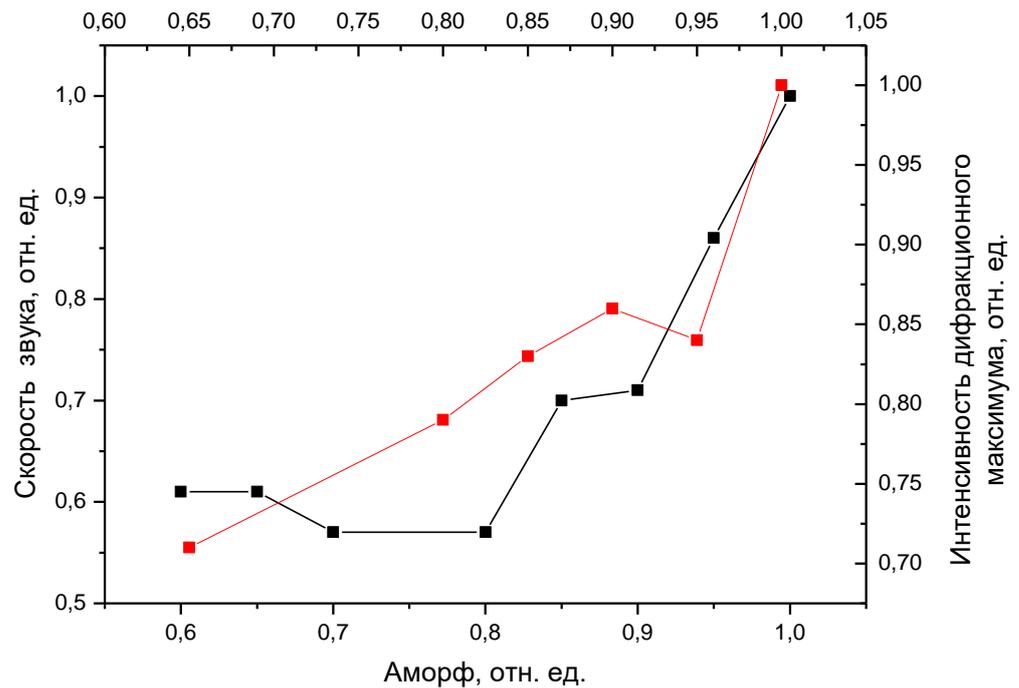


Рис. 4. Нормированные зависимости скорости ультразвука и интенсивности дифракционного максимума

Fig. 4. Normalized dependences of ultrasound velocity and diffraction peak intensity

В результате настоящей работы предлагается способ высокоточного определения как размеров, так и формы аморфной составляющей природоподобных материалов. На примере исследования пеностекольного материала выводятся рекуррентные графики (рис. 1, 3) измерений, которые можно представить следующей схемой:

- 1) измерение частоты автоколебаний;
- 2) построение графика зависимости скорости от объема аморфной составляющей;
- 3) определение по величине аморфной составляющей величины плотности;
- 4) измерение интегральной интенсивности аморфного гало;
- 5) построение графика зависимости интегральной интенсивности рентгеновских лучей от объема аморфной составляющей;
- 6) определение по величине аморфной составляющей величины плотности.

При исследовании свойств пеностекольного материала было также установлено, что звук и рентгеновская интенсивность взаимосвязанно отображают общность основной характеристики – плотности. Это можно представить в виде 3-мерной поверхности плотности аморфной составляющей пеностекольного материала (рис. 5). Полученная фигура представляет собой объемную равномерно распределенную поверхность, позволяющую определить локальные минимумы и максимумы, характеризующие состояние материала в зависимости от размеров и формы аморфной составляющей.

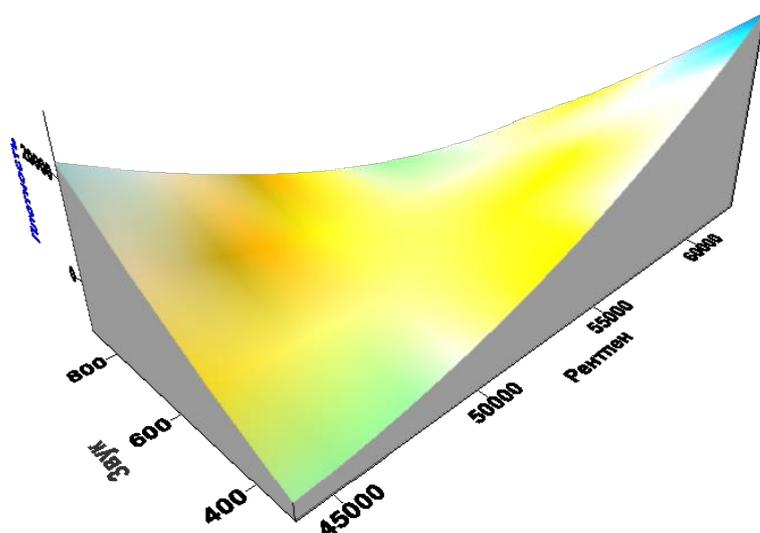


Рис. 5. 3D-поверхность плотности аморфной составляющей пенящегося материала
Fig. 5. 3D surface density of amorphous component of glass foam material

Выводы

Экспериментально установлено, что плотность пенящегося материала отражает факт равномерного распределения электронной плотности, наличие минимумов и максимумов электронной плотности подтверждается визуально на 3-мерной поверхности.

Делается вывод о равномерной плотности аморфных материалов и их подобии природным.

Разработка материалов согласно принципам, по которым функционирует живая природа, приближает нас к способам синтеза материалов на качественно новом уровне.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика) как трансдисциплинарное направление исследований // Высшее образование в России. 2014. № 3. С. 77–83.
2. Лесовик В.С., Фомина Е.В. Новая парадигма проектирования строительных композитов для защиты среды обитания человека // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 10. С. 1241–1257.
3. Ковальчук М.В., Нарайкин О.С. Природоподобные технологии – новые возможности и новые угрозы // Индекс безопасности. 2016. Т. 22. № 3–4 (118–119). С. 103–108.
4. Панин В.Е. Физическая мезомеханика материалов. Масштабные уровни предела усталости металлов // Физическая мезомеханика. 2019. Т. 22. № 1. С. 97–98.
5. Семухин Б.С., Воинов А.В., Казьмина О.В. Свойства пенящегося стекла с фуллереноподобной мезоструктурой // Известия вузов. Физика. 2020. № 4. С. 161–163.
6. Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J.W. Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry // Phys. Rev. Lett. 53, 1951 – Published 12 November. 1984. DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.53.1951>.
7. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск : Наука, 1996. 184 с.
8. Секоян С.С., Шлегель В.Р., Бацанов С.С., Гаврилкин С.М., Поярко К.Б., Гурков А.А., Дуров А.А. Влияние пористости и дисперсности материалов на скорость распространения

- дисперсности звуковых волн // Прикладная механика и техническая физика. 2009. Т. 50. № 4. С. 121–129.
9. Казьмина О.В., Верещагин В.И., Семухин Б.С., Абияка А.Н. Низкотемпературный синтез стеклогранулята из шихт на основе кремнеземсодержащих компонентов для получения пеноматериалов // Стекло и керамика. 2009. № 10. С. 5–8.
 10. Семухин Б.С., Казьмин В.П., Казьмина О.В., Вотинов А.В. Свойства пеностеклового материала, модифицированного наноразмерным диоксидом циркония // Стекло и керамика. 2016. № 2. С. 3–6.

REFERENCES

1. Lesovik V.S. Geonics (geomimetics) as a transdisciplinary research area. *Vysshee obrazovanie v Rossii*. 2014; (3): 77–83. (In Russian)
2. Lesovik V.S., Fomina E.V. New design paradigm for building composites to protect the human environment. *Vestnik MGSU*. 2019; 14 (10): 1241–1257. (In Russian)
3. Koval'chuk M.V., Narajkin O.S. Nature-based technologies – new opportunities and new threats. *Indeks bezopasnosti*. 2016; 22 (3–4): 103–108. (In Russian)
4. Panin V.E. Physical Mesomechanics of Materials. Scale levels of the fatigue limit of metals. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2019; 22 (1): 97–98. (In Russian)
5. Semuhin B.S., Votinov A.V., Kaz'mina O.V. Glass foam properties with fullerene-like mesostructure. *Izv. vuzov. Fizika*. 2020; (4) 161–163. (In Russian)
6. Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J.W. Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry. *Physical Review Letters*. 1984; (53): 1951. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.53.1951>.
7. Murav'ev V.V., Zuev L.B., Komarov K.L. Sound speed and structure of steels and alloys. Novosibirsk: Nauka, 1996. 184 p. (In Russian)
8. Sekoyan S.S., Shlegel' V.R., Bacanov S.S., Gavrilkin S.M., Poyarkov Yu., Gurkov A.A., Durov A.A. Influence of material porosity and dispersion on propagation velocity of dispersed sound waves. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2009; 50 (4): 121–129. (In Russian)
9. Kaz'mina O.V., Vereshchagin V.I., Semuhin B.S., Abiyaka A.N. Low-temperature synthesis of glass granulates from charge materials based on silica-containing components for foam production. *Steklo i keramika*. 2009; (10): 5–8. (In Russian)
10. Semuhin B.S., Kaz'min V.P., Kaz'mina O.V., Votinov A.V. Properties of foam glass material modified with nanoscale zirconium dioxide. *Steklo i keramika*. 2016; (2): 3–6. (In Russian)

Сведения об авторе

Семухин Борис Семенович, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, bsemukhin@mail.ru

Authors Details

Boris S. Semukhin, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, bsemukhin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12.03.2023
 Одобрена после рецензирования 17.03.2023
 Принята к публикации 20.03.2023

Submitted for publication 12.03.2023
 Approved after review 17.03.2023
 Accepted for publication 20.03.2023