

Research Article

Received: March 5, 2024

Accepted: April 19, 2024

Published: May 7, 2024

ISSN 2658-5553

Microstructure and physicomechanical properties of glass-basalt fiber reinforced polymer pipes: 3D fractal modeling

Borovkov, Aleksey Ivanovich¹  
Vafaeva, Khristina Maksudovna^{1*}  
Vatin, Nikolai Ivanovich¹  

¹Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; vicerector.ap@spbstu.ru (B.A.I.); vafaeva.khm@gmail.com (V.Kh.M.); vatin@mail.ru (V.N.I)
Correspondence:* email vafaeva.khm@gmail.com

Keywords:

Fractal Modeling; Microstructure; Physicomechanical Properties; Materials development; Glass-Basalt Fiber; Polymer Pipes; Forecast; Interphase boundaries

Abstract:

The object of research is the microstructure of glass-basalt plastic composite pipes and the relationship between its fractal dimensionality and the physical-mechanical properties. **Method.** The study involves conducting physical experiments to measure and analyze the properties of glass-fiber-reinforced and glass-basalt-fiber-reinforced composite pipes. The experiments include testing for strength, modulus of elasticity, fracture, bending, and other mechanical characteristics. **Results.** The paper explores the potential for modeling the microstructure of glass-basalt plastic composite pipes using 3D fractal analysis. The material composition of the pipes by mass was 70% roving and 30% binder. An evaluation of the fractal dimensionality of the microstructure was carried out at a scale representation of 300 μm , focusing on the boundary interfaces between the structural elements (fiber matrix and epoxy component of the pipes). A one-to-one correspondence was established between the fractal dimensionality of glass-basalt fibers in 3D space, the interfacial boundaries in 2D space, and the tensile strength, compressive strength, and Young's modulus. An increase in the physical-mechanical properties of the pipes was observed with the rise in the fractal dimensionality of the glass-basalt fibers from 2.055 to 2.245 and the interfacial boundaries from 1.228 to 1.415. The increase in the length and fractal dimensionality of the interfacial boundaries indicates higher energy expenditure during pipe fracture, thus leading to improved strength properties. The calculated mathematical models allow for the prediction of the physical-mechanical properties of glass-basalt plastic composite pipes with satisfactory practical accuracy based on the fractal analysis of the microstructure.

1 Introduction

Для анализа структур материалов и сложных процессов используется системный подход, позволяющий решать комплексные инженерные задачи [1]. Сложности идентификации технологических процессов во многом обусловлены их высокой многопараметричностью [2] и многокритериальностью [3]. К таким технологиям можно отнести технологии производства углеродных нанотрубок [4], [5], стеклобазальтопластиковых материалов [6] и других композитов [7] и полимерных материалов [8].

Трубы, армированные базальтовым волокном наряду с трубами, армированными стекловолокном, отличаются достаточной прочностью и высокой термоустойчивостью. В процессе эксплуатации при воздействии высоких температур они сохраняют свою форму и механические свойства, предотвращая деформацию и снижение несущей способности [9]. На

производительность композитного материала оказывают влияние такие факторы, как количество слоев и дисперсия волокон [10], а также особенности армирования базальтовым волокном [11].

Активно используются наряду с традиционными методами количественной оценки структуры (площадь, линейные размеры, балловая шкала) фрактальный подход [12], на дробности пространства [13] и самоподобии [14]. Использование фрактальных оценок в виде спектра фрактальных (дробных) размерностей в материаловедении обуславливает получение новых результатов о связи структуры со свойствами труб различного назначения. Фрактальный подход базируется на промежуточной асимптотике и связан напрямую со способом задания метрики измерений.

Подход, основанный на фрактальном моделировании, как свидетельствуют многие работы, например [15], [16], обуславливает повышение точности прогноза ряда служебных характеристик материалов. Теория фракталов нашла широкое применение для решения ряда прикладных задач: идентификации сложных технологий [17], [18]; оценке области компромисса строительных сталей [19]; прогнозе критериев качества металлических труб, защитных корпусов для атомных станций [20]; конструкционных материалов [21] и бетонов [22]; оценке неметаллических включений [23]; пор [24]; механических свойств [25]; анализе поверхности разрушений материалов с углеродными трубками [26] и при характеристике механизма проводимости композитов с примесью однослойных углеродных нанотрубок [27]; моделировании структуры и свойств микрокремнезема [28]; неоднородных структур [29]; различного рода флуктуаций [30]; оценки макроскопических характеристик цементных композитов [31]. Исходя из выше приведенного, количественная оценка структуры труб, армированных базальтовым волокном, с применением 3D фрактального анализа представляет научный интерес.

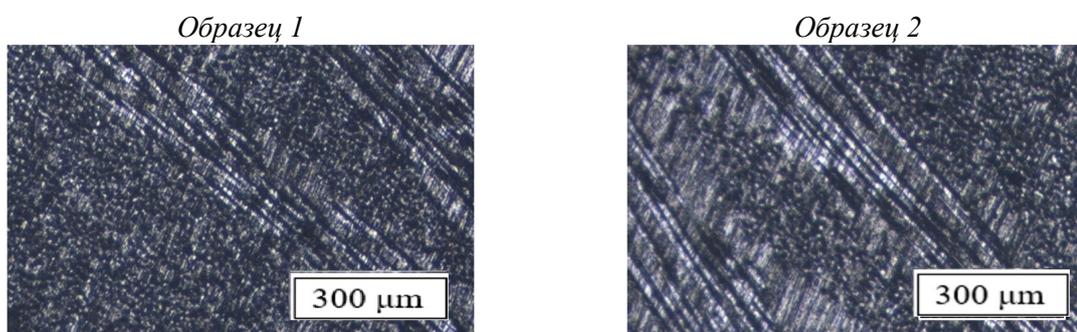
Несмотря на активное применение фрактального анализа в материаловедении, в литературе отсутствуют детальные исследования, посвященные количественной оценке структуры труб, армированных базальтовым волокном, с применением 3D-фрактального анализа. В частности, не исследована взаимосвязь фрактальной размерности микроструктуры стеклобазальтопластиковых композитных труб и межфазных границ с их физико-механическими свойствами.

Целью исследования является количественная оценка структуры труб, армированных базальтовым волокном, с применением 3D-фрактального анализа и установление взаимосвязи между фрактальной размерностью их микроструктуры и спектром физико-механических свойств.

Задачи исследования: разработка метода 3D-фрактального анализа структуры композитных труб, определение фрактальных размерностей микроструктуры стеклобазальтопластиковых труб, установить взаимосвязь фрактальных параметров с физико-механическими характеристиками исследуемых материалов.

2 Materials and Methods

Для изучения структуры стеклобазальтопластиковых композитных труб был использован метод оптической микроскопии, позволяющий визуализировать микроструктуру материалов и оценить качество их компонентов. Типичный вид микроструктуры исследуемых образцов приведен на Рисунке 1.



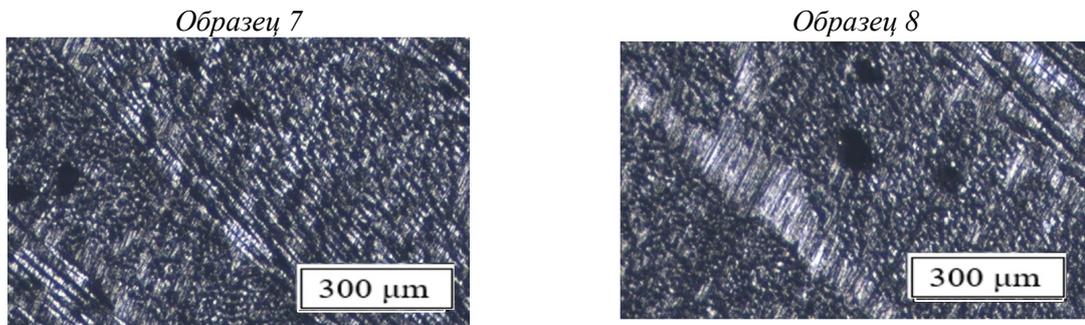


Рис. 1 – Типичная структура образцов исследуемых композитных труб
Fig. 1 – Typical structure of the samples of the studied composite pipes

Рисунок 2 демонстрирует внешний вид труб после механических испытаний на прочностные показатели.

Для проведения механических испытаний в центральной части труб спиливали начальный наружный диаметр с толщины стенки трубы 164 мм до толщины 161 мм (из толщины стенки трубы 7 мм спиливали толщину 1.5 мм силового слоя, что в итоге составляло всего 5.5 мм толщины трубы). Ширина проточки трубы составляла примерно 30 мм. Это представляло собой внешний силовой слой исследуемой композитной трубы с кольцевой намоткой, которая в свою очередь обеспечивает прочность трубы в тангенциальном направлении, включая влияние сминающего давления. Стенки трубы с толщиной 5.5 мм, которая оказалась ослабленной в кольцевом направлении, вышло недостаточно.

В итоге в процессе механических испытаний труб три из восьми образцов разрушились при внешнем давлении в пределах 41 бар, при необходимом давлении в 150 бар.

Для достижения положительных результатов испытаний предложено увеличить диаметр и усилить толщину стенки трубы при кольцевой намотке от 12 до 15 мм.



Рис. 2 - Внешний вид гибридных стеклобазальтопластиковых труб после процесса разрушения
Fig. 2 - Appearance of hybrid glass-basalt-plastic pipes after the destruction process

В изготовлении труб были использованы:

- стеклоровинг (волокно) с маркировкой 1200 текс,
- эпоксидная смола марки KER 828,
- отвердитель типа ИЗОМТГФА,
- ускоритель процессов отвердевания Алкофен.

В итоге соотношение материалов для изготовления труб по массе составило: 70% ровинг, 30% связующее, % состав Алкофена очень маленький.

В связующем компоненте % соотношение смолы к изомтгфу по массе составило 100/80.

3 Results and Discussion

Стеклобазальтопластик является вариантом, демонстрирующим высокую прочность, низкую теплопроводность, отличную влаго- и химическую стойкость и конкурентоспособную экономическую эффективность. Последующее экономическое сравнение подчеркивает, что, хотя первоначальная стоимость материалов из стеклобазальтопластика может быть умеренной или высокой, их низкие затраты на техническое обслуживание и энергоэффективность способствуют их общей экономической жизнеспособности. Эти результаты представляют собой ценную информацию для специалистов, занимающихся развитием арктической инфраструктуры.

Фрактальная размерность микроструктуры гибридных стеклобазальтопластиковых труб оценивалась для фотоснимков. Фотоснимки исследовались в 256 цветном формате с оттенками серого цвета. Определялись значения фрактальной размерности стеклобазальтовых волокон с применением 3D фрактального анализа по классическому методу Ф. Хаусдорфа [32]. Для этого оцифрованное изображение строения труб покрывалось квадратными клетками N с линейным размером клеток l от 1 до 9 пикс, и затем строилась билогарифмическая зависимость показателей N от показателей l (1):

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(l)}{\ln l} \quad (1)$$

Разработанная методика по определению фрактальной размерности 3D изображения, основана на расчёте клеточной размерности изображения. В этом методе вместо покрытия изображения сеткой используется сканирование строк изображения, отстоящих друг от друга на расстоянии, равном заданному шагу измерения.

После выполнения заданного количества сканирований с различным шагом, программа осуществляет обработку численных значений результатов сканирований, хранящихся в памяти компьютера. Для этого определяют область цвета, занимаемую элементом, фрактальную размерность которого мы хотим вычислить. Отметим, что цветовая гамма 0 соответствует черному цвету, цветовая гамма 255 - белому цвету. Остальные цвета составляют переход от черного к белому с оттенками серого цвета. Область цвета темных элементов структуры труб (в данном случае это будет эпоксидная вяжущая) и светлых волокон определяются программой автоматически, статистическим учетом оттенков серого (Рис.3 а) Программой также предусмотрено задание границ диапазона цвета вручную. При задании граничных размеров клеток происходит автоматический расчет фрактальной размерности.

Пример результатов вычисления дробной размерности поверхности в результате фрактального 3D анализа структуры труб показан на Рисунке 3.

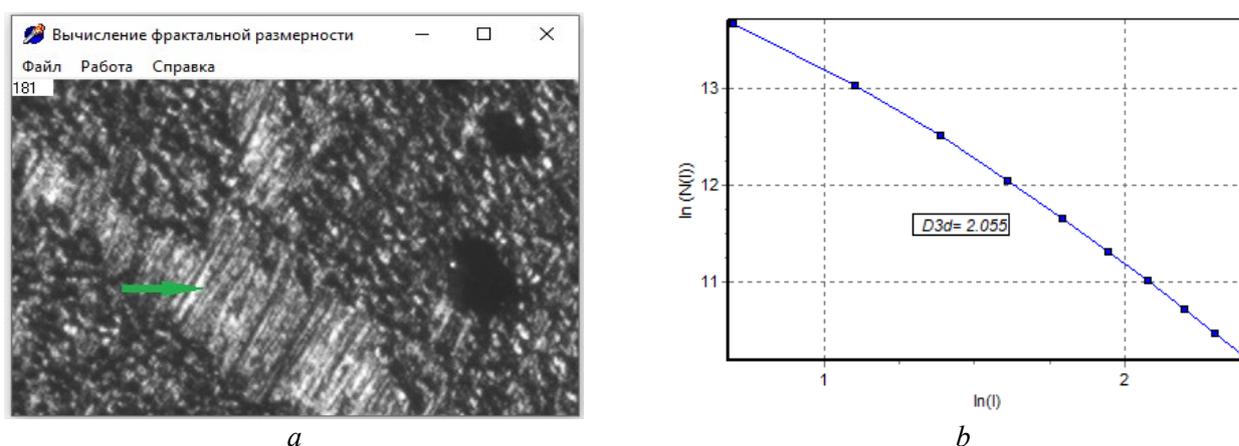


Рис. 3 – Оценка цветовой гаммы поверхности образца 8 (а) и результаты определения фрактальной размерности стеклобазальтовых волокон по билогарифмической зависимости $N(l)$ (b)

Fig. 3 – Evaluation of the color range of the surface of sample 8 (a) and the results of determining the fractal dimension of glass basalt fibers using the bilogarithmic dependence $N(l)$ (b)



Цветовая гамма элементов структуры изменялась в пределах от 0 до 255. На Figure 3(a) диапазон значений цвета стеклобазальтовых волокон для конкретной исследуемой области составил 181 в 256 цветном формате, а для всех волокон в пределах структуры цвет изменялся от 148 до 222. Результаты фрактального анализа стеклобазальтовых волокон представлены в Таблице 1.

Кроме фрактальной 3D размерности стеклобазальтовых волокон в работе вычислялась фрактальная размерность межфазных границ 2D в двумерном пространстве между стеклобазальтовыми волокнами и эпоксидной составляющей. Межфазные границы материалов, как показано в [22, 23], в значительной мере влияют на ряд их физико-механических свойств.

Таблица 1. Результаты фрактального анализа микроструктуры
Table 1. Results of fractal microstructure analysis

№ образца труб	Диапазон цвета фотоснимка	Фрактальная размерность стеклобазальтовых волокон, 3D	Фрактальная размерность межфазных границ, 2D
1	169...247	2.245	1.415
2	155...244	2.229	1.400
3	139...232	2.231	1.403
4	176...251	2.230	1.397
5	162...218	2.168	1.382
6	154...229	2.123	1.347
7	159...245	2.069	1.335
8	148...222	2.055	1.228

Изначально, должна быть показана чувствительность фрактальной размерности материала к тем его характеристикам, на идентификацию которых они направлены. Последнее объясняется тем, что фрактальная размерность присущая исследуемому материалу, может изменяться в очень узком диапазоне и в этой связи может быть нечувствительной (мало чувствительной) к изменению тех характеристик материала идентификация которых производится.

Для решения этой задачи использовался критерий K_i , отражающий чувствительность фрактальной размерности изучаемого объекта идентификации к изменениям его исследуемых характеристик. Чувствительность между определяющим параметром и выбранными переменными для построения математической модели фрактального типа определялась из соотношения (2):

$$K = \frac{|Y_i - Y_{i+1}|}{|X_i - X_{i+1}|} \quad (2)$$

где X_i и X_{i+1} – два числа характеризующих заданное свойство материала в произвольно выбранных точках $i, i+1$; Y_i и Y_{i+1} – численные значения фрактальных размерностей элементов структуры материала, полученных в этих же точках.

Результаты расчета показателей чувствительности K между фрактальными размерностями эпоксидной составляющей, волокнами и физико-механическими свойствами приведены на Рис. 4 и Рис. 5.

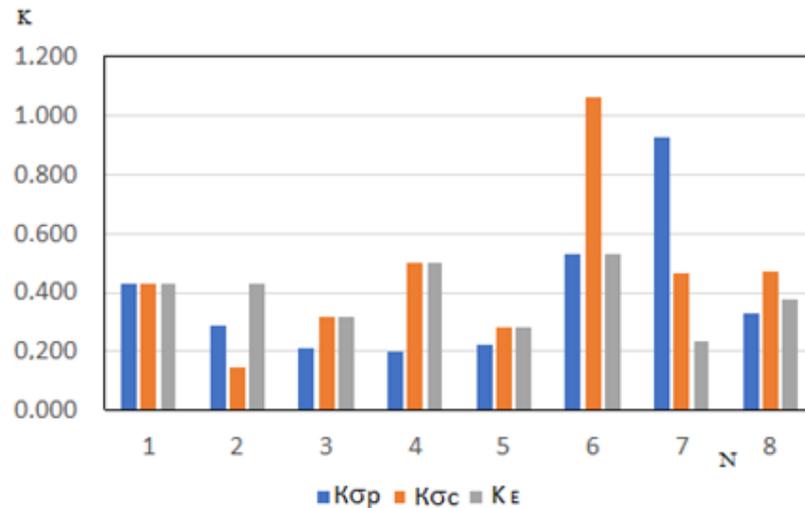


Рис. 4 – Чувствительность предела прочности на растяжение K_{sp} , сжатие K_{sc} , модуля упругости K_{ϵ} к фрактальной размерности эпоксидной составляющей D_t

Fig. 4 – Sensitivity of tensile strength K_{sp} , compression K_{sc} , elastic modulus K_{ϵ} to the fractal dimension of the epoxy component D_t

Коэффициенты чувствительности между фрактальной размерности эпоксидной составляющей гибридных стеклобазальтопластиковых труб и их физико-механическими свойствами изменялись в диапазоне от 0.143 до 1.065 (прочность на сжатие). Чувствительность для фрактальной размерности светлых волокон и свойств изменялась от 0.083 (прочность на сжатие) до 1.700 (прочность на растяжение). Такой подход позволил получить формализованное описание соотношений между наиболее чувствительными друг к другу механическими физико-механическими свойствами труб и фрактальными размерностями элемента микроструктуры.

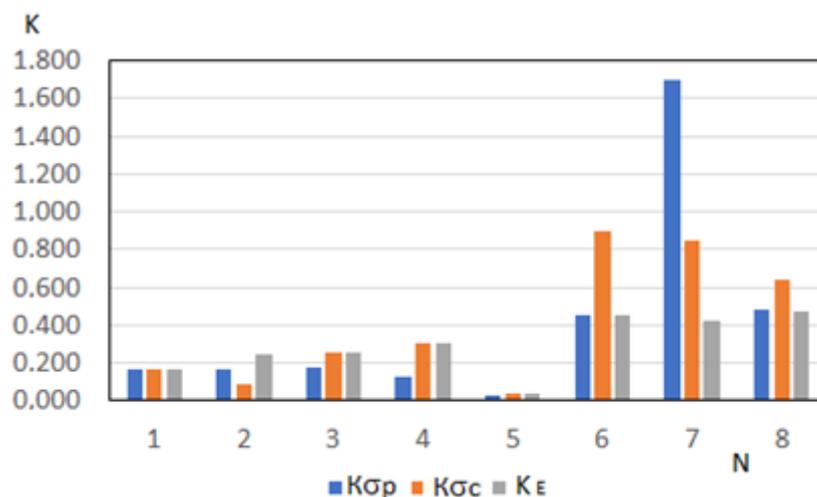


Рис. 5 – Чувствительность предела прочности на растяжение K_{sp} , сжатие K_{sc} , модуля упругости K_{ϵ} к фрактальной размерности стеклобазальтовых волокон D_f

Fig. 5 – Sensitivity of tensile strength K_{sp} , compression K_{sc} , elastic modulus K_{ϵ} to the fractal dimension of glass basalt fibers D_f

При сопоставлении значений прочности на растяжение, сжатие, модуля упругости Юнга и фрактальных размерностей стеклобазальтовых волокон получены математические модели на Figure 6 a, b, c, которые описываются уравнениями регрессии.

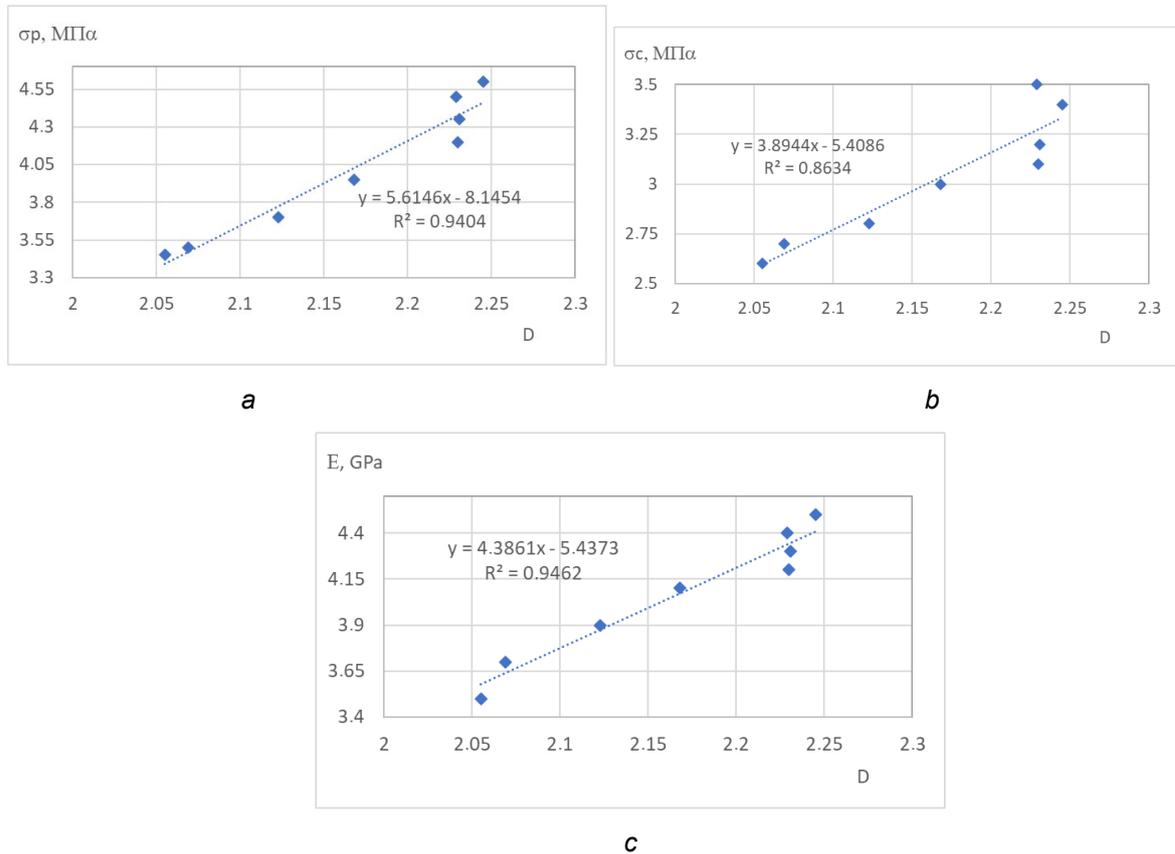
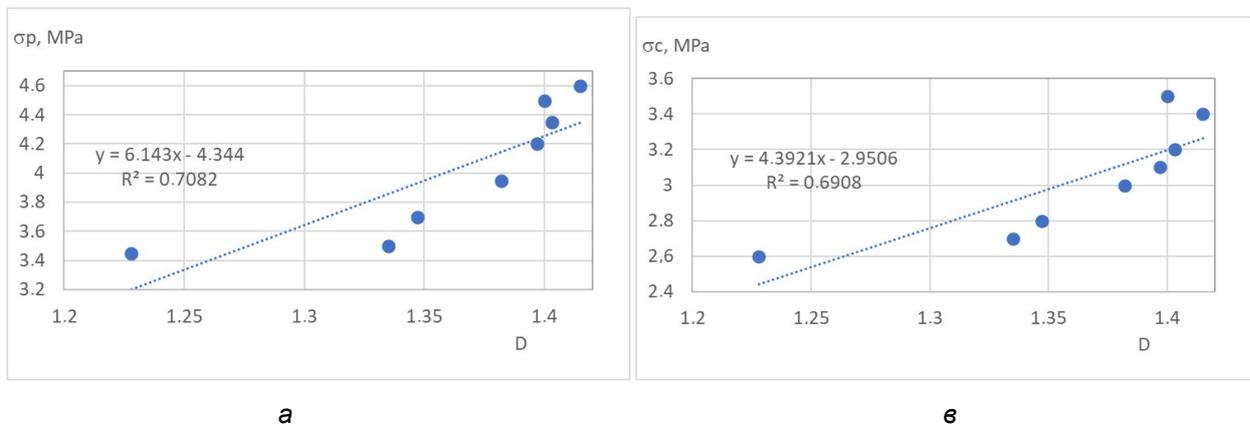


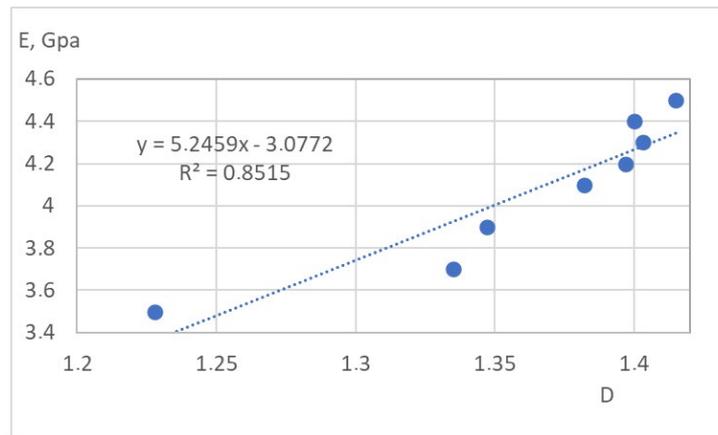
Рис. 6 – Зависимость прочности на растяжение (а), прочности на сжатие (б), модуля Юнга (с) и фрактальной стеклобазальтовых волокон

Fig. 6 – Dependence of tensile strength (a), compressive strength (b), Young's modulus (c) and fractal of glass basalt fibers

Возрастание фрактальной размерности стеклобазальтовых волокон в 3D пространстве свидетельствует о том, что поверхность становится более гладкой и ее элементы более компактно начинают заполняют 3D пространство. При этом показатели прочности труб возрастают, и показатели модуля упругости тоже.

На рис. 7 приведены соотношения показателей фрактальной размерности межфазных границ между стеклобазальтовыми волокнами, эпоксидной составляющей и физико-механическими свойствами позволяют установить тренд влияния размерностного фактора на свойства труб.





с

Рис. 7 – Зависимость физико-механических свойств труб от фрактальной размерности межфазных границ

Fig. 7 – Dependence of the physical and mechanical properties of pipes on the fractal dimension of interphase boundaries

Увеличение протяженности межфазных границ и их фрактальной размерности указывает на увеличение затрат энергии, идущей на работу разрушения труб, и тем самым, обуславливает повышение показателей прочности. Во всех рассматриваемых случаях на Figure 5 увеличение фрактальной размерности межфазных границ, вызванное возрастанием их длины, приводит к повышению физико-механических свойств.

Численные значения коэффициентов парной корреляции математических моделей на рис. 4 и рис. 5 свидетельствуют, что физико-механические свойства кроме размерностных факторов влияют еще состав труб и условия их получения, но их применение позволяет в кратчайшие сроки определять степень влияния фрактальной размерности стеклобазальтовых волокон и межфазных границ на ряд их физико-механических свойств.

4 Conclusions

Рассмотрен подход оценки стеклобазальтовых волокон и межфазных границ на микроструктурном уровне с применением фрактального анализа. Сложность геометрической конфигурации межфазных границ реализована на основе статистического анализа фрактальных размерностей, полученных с помощью клеточного метода Хаусдорфа с учетом длины межфазных границ. Расчёт фрактальных размерностей изображений микрошлифов труб проводится с помощью разработанной программы. Адекватность результатов расчёта размерности была протестирована на нескольких образцах, вырезанных из различных участков стеклобазальтопластиковых труб.

1. Для модели прогноза физико-механических свойств на основании 3D анализа коэффициенты парной корреляции R^2 изменялись в пределах от 0.8634 до 0.9462, а для межфазных границ они составили 0.6908...0.8515.

2. Полученные модели свидетельствуют об эффективности оценки физико-механических свойств на основании фрактальных оценок рассматриваемых структурных элементов и их межфазных границ, что подтверждает влияние размерностного фактора на свойства исследуемых труб.

5 Fundings

The research is partially funded by the St. Petersburg Science Foundation on financing scientific and scientific-technical projects of educational and scientific organizations located on the territory of St. Petersburg, carried out jointly with organizations of the Republic of Belarus (contract No. 23-РБ-09-27 dated 15.12.2023).

References

Borovkov, A.; Vafaeva, Kh.; Vatin, N. Microstructure and physicomechanical properties of glass-basalt fiber reinforced polymer pipes: 3D fractal modeling; 2024; AlfaBuild; **32** Article No 3203. doi: 10.57728/ALF.32.3



- 1 Tereshkov, A.G., Malysheva, G. V., Soloviev, A.I. and Dzhafarova, S.I. (2024) Study of Drapability Indicators of Technical Fabrics and Thermoplastic Polymer Composite Materials on Their Basis. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, Ivanovo State Polytechnic University, 69–75. https://doi.org/10.47367/0021-3497_2024_2_69.
- 2 Borodulin, A.S., Maltsev, V. V., Bertaeva, A.A., Fedorov, S.Y., Tereshkov, A.G., Nelyub, V.A. and Malysheva, G. V. (2022) A Method for Assessing the Adhesion Strength of an Elementary Fiber–Epoxy Matrix System. *Polymer Science - Series D*, Pleiades Publishing, 15, 517–522. <https://doi.org/10.1134/S1995421222040049>.
- 3 Borodulin, A., Kalinnikov, A., Tereshkov, A. and Kharaev, A. (2019) New Polymeric Binders for the Production of Composites. *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 11, 139–143. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2018.12.121>.
- 4 Vafaeva, K.M., Chhetri, A., Sudan, P., Mishra, M., Pakkiraiah, B. and Mohan, C. (2024) Polymer Matrix Nanocomposites for Sustainable Packaging: A Green Approach. *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 511, 01008. <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202451101008>.
- 5 Vafaeva, K.M. and Zegait, R. (2024) Carbon Nanotubes: Revolutionizing Construction Materials for a Sustainable Future: A Review. *Research on Engineering Structures and Materials*, MIM RESEARCH GROUP, 10, 559–621. <https://doi.org/10.17515/RESM2023.42MA0818RV>.
- 6 Vafaeva, K.M., Duklan, N., Mohan, C., Kumar, Y. and Ledalla, S. (2024) Comparative Analysis of Glass-Basalt-Plastic Materials for Construction in Arctic Conditions. Prabhakar, P.K., Ed., *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, 86, 01112. <https://doi.org/10.1051/BIOCONF/20248601112>.
- 7 Vafaeva, K.M., Dhyan, M., Acharya, P., Parik, K. and Ledalla, S. (2024) Glass-Basalt-Plastic Materials for Construction in Temperate and Arctic Climatic Regions. Prabhakar, P.K., Ed., *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, 86, 01111. <https://doi.org/10.1051/BIOCONF/20248601111>.
- 8 Reddivari, B.R., Vadapalli, S., Sanduru, B., Buddi, T., Vafaeva, K.M. and Joshi, A. (2024) Fabrication and Mechanical Properties of Hybrid Fibre-Reinforced Polymer Hybrid Composite with Graphene Nanoplatelets and Multiwalled Carbon Nanotubes. *Cogent Engineering*, Cogent OA, 11. <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2343586>.
- 9 Xiao, P., Zhang, S., Gong, Y., Liu, Y., Li, Z. and Li, D. (2023) Fractal Structure Change of Pitch-Based Carbon Fiber during High-Temperature Heat Treatment. *Chemical Physics Letters*, North-Holland, 811, 140239. <https://doi.org/10.1016/J.CPLETT.2022.140239>.
- 10 Shekhan, S.M., Mohammed, S.J. and Hamad, H.M. (2022) Influence of Varied Layer Counts and Fiber Dispersion on Composite Laminate Performance. *International Journal of Mechanical Engineering*, 7. https://www.researchgate.net/publication/373954179_Influence_of_Varied_Layer_Counts_and_Fiber_Dispersion_on_Composite_Laminate_Performance.
- 11 Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K.Y., Park, S.J. and Hui, D. (2015) A Short Review on Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, 73, 166–180. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2014.12.011>.
- 12 Mahamud, M., López, Ó., Pis, J.J. and Pajares, J.A. (2003) Textural Characterization of Coals Using Fractal Analysis. *Fuel Processing Technology*, Elsevier, 81, 127–142. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(03\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(03)00004-3).
- 13 Duan, Q., An, J., Mao, H., Liang, D., Li, H., Wang, S. and Huang, C. (2021) Review about the Application of Fractal Theory in the Research of Packaging Materials. *Materials (Basel, Switzerland)*, Materials (Basel), 14, 1–18. <https://doi.org/10.3390/MA14040860>.
- 14 Zeng, Q., Luo, M., Pang, X., Li, L. and Li, K. (2013) Surface Fractal Dimension: An Indicator to Characterize the Microstructure of Cement-Based Porous Materials. *Applied Surface Science*, North-Holland, 282, 302–307. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2013.05.123>.
- 15 Volchuk, V.M. and Kotov, M.A. (2021) Fractal Express Methods Evaluation of a Breaking Stress of Concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, 1926. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012023>.
- 16 Kroviakov, S., Volchuk, V. and Zavoloka, M. (2020) Fractal Model of the Influence of Expanded Clay Concrete Macrostructure on Its Strength. *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 864, 43–52. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.864.43>.
- 17 Liu, Y., Sun, T., Wu, K., Zhang, H., Zhang, J., Jiang, X., Lin, Q. and Feng, M. (2024) Fractal-Based Pattern Quantification of Mineral Grains: A Case Study of Yichun Rare-Metal Granite. *Fractal and*



- Fractional* 2024, Vol. 8, Page 49, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 8, 49. <https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT8010049>.
- 18 Wang, L. and Tang, S. (2023) Investigation and Application of Fractals in Civil Engineering Materials. *Fractal and Fractional* 2023, Vol. 7, Page 369, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 7, 369. <https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT7050369>.
- 19 Volchuk, V., Ivantsov, S., Tiutieriev, I. and Fortyhin, A. (2020) Search for the Evaluation of 'Strength-Plasticity' Relation in Constructional Steel. *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 864, 211–216. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/KEM.864.211>.
- 20 Vakhrusheva, V.S., Volchuk, V.M., Hruzin, N. V. and Tiutieriev, I.A. (2021) Fractal Model of Estimating Quality of Cold Worked Fuel Cladding Tubes. *Problems of Atomic Science and Technology*, National Science Center, Kharkov Institute of Physics and Technology, 135, 57–63. <https://doi.org/10.46813/2021-135-057>.
- 21 Chiel, H.J., Thomas -, P.J., Antonio Escalona-Villalpando, R., Reid, R.C., Milton, R., -, al, Andreas Hoeh, M., Arlt, T., Kardjilov, N., Khamidulina, D.D. and Nekrasova, S.A. (2018) Fractals in Construction Material Science. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 451, 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012026>.
- 22 Fang, Q., Li, B., Yin, J. and Yuan, X. (2017) Microstructural and Microanalytical Study on Concrete Exposed to the Sulfate Environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 269, 012070. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/269/1/012070>.
- 23 Volchuk, V.M., Uzlov, O. V., Puchikov, O. V. and Ivantsov, S. V. (2021) Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Non Metallic Inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 1021, 012053. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1021/1/012053>.
- 24 Fu, J. and Yu, Y. (2019) Experimental Study on Pore Characteristics and Fractal Dimension Calculation of Pore Structure of Aerated Concrete Block. *Advances in Civil Engineering*, Hindawi Limited, 8. <https://doi.org/10.1155/2019/8043248>.
- 25 Kepir, Y. and Kara, M. (2024) Influence of Hydrothermal Conditions on the Mechanical Properties of Hybrid Composite Pipes. *Journal of Composite Materials*, SAGE Publications Ltd, 58, 119–131. <https://doi.org/10.1177/00219983231220986>.
- 26 Xia, W., Xu, J. and Nie, L. (2021) Research on the Mechanical Performance of Carbon Nanofiber Reinforced Concrete under Impact Load Based on Fractal Theory. *Crystals* 2021, Vol. 11, Page 387, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11, 387. <https://doi.org/10.3390/CRYST11040387>.
- 27 Ilgaz, A. and Bayırlı, M. (2023) Fractal Characterization for Conductivity Mechanism of Single-Walled Carbon Nanotube Doped Composites. *Indian Journal of Physics*, Springer, 98, 1335–1341. <https://doi.org/10.1007/S12648-023-02916-4>.
- 28 Lü, Q., Qiu, Q., Zheng, J., Wang, J. and Zeng, Q. (2019) Fractal Dimension of Concrete Incorporating Silica Fume and Its Correlations to Pore Structure, Strength and Permeability. *Construction and Building Materials*, Elsevier, 228, 116986. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.116986>.
- 29 Anitas, E.M., Marcelli, G., Szakacs, Z., Todoran, R. and Todoran, D. (2019) Structural Properties of Vicsek-like Deterministic Multifractals. *Symmetry* 2019, Vol. 11, Page 806, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 11, 806. <https://doi.org/10.3390/SYM11060806>.
- 30 Nian, D. and Fu, Z. (2019) Extended Self-Similarity Based Multi-Fractal Detrended Fluctuation Analysis: A Novel Multi-Fractal Quantifying Method. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Elsevier, 67, 568–576. <https://doi.org/10.1016/J.CNSNS.2018.07.034>.
- 31 Zhang, P., Ding, J., Guo, J. and Wang, F. (2024) Fractal Analysis of Cement-Based Composite Microstructure and Its Application in Evaluation of Macroscopic Performance of Cement-Based Composites: A Review. *Fractal and Fractional* 2024, Vol. 8, Page 304, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 8, 304. <https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT8060304>.
- 32 Hausdorff, F. (1918) Dimension Und Äußeres Maß. *Mathematische Annalen*, Springer-Verlag, 79, 157–179. <https://doi.org/10.1007/BF01457179>.