

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.62.3>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В КЕРАМЗИТОБЕТОНЕ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

Научная статья

Колесников Г.Н.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-9694-0264;<sup>1</sup> Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (kolesnikovgn[at]ya.ru)

**Аннотация**

В статье на уровне математической модели рассмотрено трещинообразование в образцах керамзитобетона. Предложено уравнение для сравнительной оценки трещиностойкости керамзитобетона в зависимости от коэффициента Пуассона и прочности на растяжение и сжатие. Рассмотрены примеры применения уравнения. Приведен анализ результатов моделирования и отраженных в литературе экспериментальных данных, который подтвердил целесообразность повышения прочности керамзитобетона на растяжение для уменьшения трещинообразования. Повышение прочности на растяжение достигается использованием технологии армирования с использованием базальтового волокна. По сравнению с другими способами армирования (стальная фибра, стекловолокно и полимерное волокно), базальтовое волокно превосходит аналоги по критериям прочности, долговечности и термостойкости.

**Ключевые слова:** хрупкие материалы, одноосное сжатие, трещины растяжения, армирование.

## MODELLING OF CRACK FORMATION IN KERAMZIT CONCRETE UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

Research article

Kolesnikov G.<sup>1,\*</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-9694-0264;<sup>1</sup> Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, Russian Federation

\* Corresponding author (kolesnikovgn[at]ya.ru)

**Abstract**

The article examines crack formation in keramzit concrete samples at the level of mathematical model. The equation for comparative estimation of crack resistance of keramzit concrete depending on Poisson's ratio and tensile and compressive strength is suggested. Examples of application of the equation are discussed. The analysis of modelling results and experimental data reflected in the literature is given, which confirmed the expediency of increasing the tensile strength of keramzit concrete to reduce crack formation. Increase in tensile strength is achieved by using basalt fibre reinforcement technology. Compared to other reinforcement methods (steel fibre, glass fibre and polymer fibre), basalt fibre is superior to its counterparts in terms of strength, durability and heat resistance.

**Keywords:** brittle materials, uniaxial compression, tensile cracks, reinforcement.

**Введение**

В данной статье рассматривается моделирование условий появления трещин в цилиндрических образцах керамзитобетона с целью получения сравнительных оценок его трещиностойкости в зависимости от коэффициента Пуассона и прочности при растяжении. В качестве исходных данных для моделирования использованы известные по литературе результаты испытаний керамзитобетона.

Керамзит (керамзитовый гравий) с разными характеристиками, зависящими от технологии его получения и свойств сырья [1], применяется для получения бетонов, относящихся к классу легких бетонов с пористыми заполнителями [2], [3]. Из бетона такого класса выполнены, например, опорные и пролетные конструкции мостов, что обеспечивает существенно более высокие показатели долговечности конструкционного лёгкого бетона, такие как морозостойкость, водонепроницаемость и, соответственно, сопротивление проницаемости ионов хлора и магnezияльных солей морской среды в поровую структуру бетона [1].

Один из ключевых вопросов, появляющихся при анализе долговечности и надежности конструкционного лёгкого бетона, связан с получением сравнительных оценок его трещиностойкости. Один из возможных подходов к решению этого вопроса на основе учета микротрещин растяжения рассмотрен в статье [4]. Другой подход, базирующийся на применении численных методов, представлен в статье [5]. В данной работе принимается во внимание, что бетон можно рассматривать как искусственный аналог горной породы [6] и на этом основании адаптировать методы геотехнического анализа к моделированию трещинообразования в бетоне. Соответственно, в дальнейшем изложении используется подход, который был предложен для анализа условий появления трещин в поверхностном слое цилиндрических образцов горных пород при их разрушении по типу «песочные часы» [7]. Целью работы является моделирование условий появления трещин в цилиндрических образцах керамзитобетона и сравнительный анализ оценок его трещиностойкости в зависимости от прочности при растяжении и сжатии.

**Методы и принципы исследования**

Испытания показали, что при одноосном сжатии цилиндрических образцов горной породы в поверхностном слое априори неизвестной толщины ( $t$ ) появляются окружные растягивающие напряжения ( $\sigma_t$ ) и, соответственно, трещины растяжения, если растягивающие напряжения достигают максимума для исследуемого материала. Математическое описание [7] этого явления привело к теоретической модели в виде системы двух нижеследующих уравнений для оценки относительной толщины поверхностного слоя с трещинами ( $t/R$ ) (т.е. относительной глубины трещины) в зависимости от прочности при растяжении ( $\sigma_{t,peak}$ ), коэффициента Пуассона ( $\nu$ ) и осевого сжимающего напряжения ( $\sigma_c$ ) в поперечном сечении на уровне середины высоты цилиндрического образца радиуса  $R$ :

$$t/R = n\sigma_c / (\sigma_{t,peak} + n\sigma_c), \quad (1)$$

$$n = \nu / (1 - \nu). \quad (2)$$

В данной статье рассматривается только математическое моделирование трещинообразования в керамзитобетоне как искусственном аналоге горной породы. Физико-механические аспекты, включая причины появления трещин растяжения при сжатии образцов цилиндрической формы, анализ экспериментальных данных и соответствующие иллюстрации детально рассмотрены, например, в статье [6].

Важно отметить, что прочность бетона и горных пород при растяжении ниже, чем при сдвиге, поэтому трещины растяжения появляются раньше сдвиговых. С появлением трещины растяжения в окрестности какой-либо точки рост растягивающих напряжений в устье трещины прекращается, но в материале образца, особенно в потенциально опасных сечениях продолжается рост напряжений сдвига до появления трещин сдвига [6]. Характер разрушения может варьироваться в зависимости от свойств конкретного материала и характера нагрузки. В данной работе, как отмечено выше, рассматривается разрушение по типу «песочные часы», для которого применимо уравнение (1). Такой тип разрушения характерен для образцов бетона и горных пород в испытаниях на одноосное сжатие.

Вывод о локализации окружных растягивающих напряжений в поверхностном слое формально следует из уравнения (1), которое показывает, что при прочих равных условиях эти напряжения пропорциональны радиусу поперечного сечения. Поэтому уменьшение радиуса вызывает уменьшение окружных растягивающих напряжений и рост напряжений сдвига с увеличением осевой нагрузки. Таким образом, при одноосном сжатии картина разрушения рассматриваемого типа представляет собой сдвиг одной части образца относительно другой, что более детально рассмотрено и проиллюстрировано в [7] на примере гранатового амфиболита, структура которого напоминает керамзит.

### Основные результаты

Следует отметить, что уравнение (1) определяет только относительную толщину поверхностного слоя с трещинами. Однако этого достаточно для сравнительной оценки трещиностойкости различных видов керамзитобетона.

В рамках данной работы важно обратить внимание на результаты исследования керамзитобетона [3], согласно которым при нагрузке, не превышающей 50% от прочности при сжатии керамзитовый гравий в бетоне деформируется упруго без нарушений структуры. Это наблюдение согласуется с результатами многочисленных исследований горных пород [6], в соответствии с которыми инициирование трещин, как правило, начинается при осевой нагрузке, равной, в зависимости от породы, 40%–60% от прочности при одноосном сжатии ( $\sigma_{c,peak}$ ). Таким образом, имеет место закономерная аналогия не только структуры бетона и горной породы (в данном случае отмеченного выше амфиболита), но также аналогия механических свойств.

Базируясь на результатах исследований [3], [6], в которых установлено, что при одноосном сжатии инициирование трещин начинается с определенной задержкой, т.е. если нагрузка превышает пороговое значение ( $\sigma_{c,d}$ ), равное примерно 50% от пикового значения, перепишем уравнение (1) в виде:

$$t/R = n(\sigma_c - \sigma_{c,d}) / (n(\sigma_c - \sigma_{c,d}) + \sigma_{t,peak}). \quad (3)$$

Рассмотрим пример моделирования. В Таблице 1 приведены исходные данные из статей [3], [7], [8] и результаты вычислений с использованием уравнений (2) и (3). Значения коэффициента Пуассона керамзитобетона могут находиться в интервале от 0,18 до 0,28 [3], в связи с чем представляет практический интерес анализ его влияния на трещинообразование. В строках 4–11 Таблицы 1 приведены ориентировочные значения коэффициента Пуассона из указанного интервала.

Таблица 1 - Относительная толщина поверхностного слоя с трещинами

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.62.3.1>

Номер образца	Источник данных	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_{c,peak}$ , МПа	$\sigma_{t,peak}$ , МПа	$\nu$	$(t/R)_{max}$
1	[3]	1845	25,0	1,95	0,18	0,585
2	[3]	1810	25,3	2,19	0,27	0,681
3	[3]	1740	24,6	2,15	0,28	0,690
4	[8]	1526	24,8	3,06	0,25	0,574
5	[8]	1578	28,2	3,21	0,25	0,594
6	[8]	1362	21,1	2,16	0,18	0,517

Номер образца	Источник данных	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_{c,peak}$ , МПа	$\sigma_{t,peak}$ , МПа	$\nu$	$(t/R)_{max}$
7	[8]	1362	21,1	2,16	0,28	0,655
8	[9]	778	8,4	0,69	0,18	0,572
9	[9]	778	8,4	0,69	0,28	0,703
10	[9]	1316	24,3	1,63	0,18	0,621
11	[9]	1316	24,3	1,63	0,28	0,744
12	-	1316	24,3	2,92	0,28	0,618

### Обсуждение

Относительная толщина поверхностного слоя с трещинами  $(t/R)_{max}$  в Таблице 1 соответствует моменту разрушения образцов, т.е. при  $\sigma_c = \sigma_{c,peak}$ . В реальных образцах эта толщина будет меньше, т.к. в финишной стадии, как отмечено выше, разрушение происходит вследствие сдвига.

Строки 6 и 7 показывают, что коэффициент Пуассона положительно коррелирует с относительной толщиной поверхностного слоя с трещинами. Аналогичную тенденцию показывают данные в строках 8–11. Это означает, что материал с низким коэффициентом Пуассона разрушается при меньшей толщине трещиноватого слоя, что является признаком повышенной хрупкости. Это наблюдение согласуется известными по литературе экспериментальными исследованиями, которые показали, что горные породы (а значит и бетон) с низким коэффициентом Пуассона более склонны к хрупкому разрушению по плоскостям сдвига, поскольку модуль сдвига в таких условиях высок, что соответствует меньшему смещению при той же прочности на сдвиг [10].

Строки 11 и 12 показывают, что с ростом прочности керамзитобетона на растяжение, естественно, уменьшается глубина трещины. При этом количественные оценки могут быть получены с использованием уравнения (3).

Повысить прочность керамзитобетона на растяжение, а значит и его трещиностойкость, можно армированием с использованием, например, базальтового волокна. Базальтовое волокно — это материал, получаемый из расплава вулканической горной породы (базальта). Оно обладает рядом уникальных характеристик: высокая прочность — превосходит стальную арматуру по удельной прочности; термостойкость — выдерживает температуру до +700°C без разрушения; химическая стойкость — не подвержено коррозии, устойчиво к щелочам и кислотам; экологичность — не выделяет вредных веществ, полностью натуральный материал.

Базальтовое волокно может применяться в керамзитобетоне в таких формах, как дисперсное армирование (короткие волокна, добавляемые в смесь на стадии изготовления) — повышает трещиностойкость и ударную прочность; сетки и композитная арматура — заменяют металлическое армирование в блоках и монолитных конструкциях.

По сравнению с другими способами армирования (стальная фибра, стекловолокно и полимерное волокно) базальтовое волокно превосходит аналоги по критериям прочности, долговечности и термостойкости [11].

### Заключение

На уровне математической модели рассмотрено трещинообразование в цилиндрических образцах керамзитобетона. Предложено уравнение (3) для сравнительной оценки трещиностойкости керамзитобетона в зависимости от его прочности на растяжение и коэффициента Пуассона (Таблица 1 и комментарии к ней).

Анализ результатов моделирования и отраженных в литературе исследований подтверждает целесообразность повышения трещиностойкости керамзитобетона на растяжение путем армирования с использованием базальтового волокна.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Данилов А.М. Разработка строительных материалов как сложных систем / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Региональная архитектура и строительство. — 2016. — № 2. — С. 50–54. — EDN: ZYOFRI.
2. Каприелов С.С. Влияние вида заполнителя на физико-технические характеристики высокопрочных самоуплотняющихся цементных систем / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Н.И. Карпенко [и др.]. // Бетон и железобетон. — 2025. — № 2. — С. 27–42. — DOI: 10.37538/0005-9889-2025-2(627)-27-42. — EDN: TSNYUO.
3. Макридин Н.И. Структура и свойства керамзитового гравия для бетонов повышенной прочности / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, М.В. Симаков // Региональная архитектура и строительство. — 2012. — № 3 (14). — С. 52–56. — DOI: 10.54734/20722958\_2025\_1\_56. — EDN: NRUGYG.
4. Debuisne M. On the need of compressive regularization in damage models for concrete: demonstration on a modified Mazars model / M. Debuisne, L. Davenne, L. Jason // Applied Mechanics. — 2024. — Vol. 5. — № 3. — P. 490–512.

5. Xia X. Interfacial debonding constitutive model and XFEM simulation for mesoscale concrete / X. Xia, F. Chen, X. Gu [et al.] // *Computers and Structures*. — 2021. — Vol. 242. — P. 106373.
6. Hoek E. Fracture initiation and propagation in intact rock — a review / E. Hoek, C.D. Martin // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. — 2014. — Vol. 6. — №. 4. — P. 287–300. — DOI: 10.1016/j.jrmge.2014.06.001.
7. Shekov V. Modeling the Conditions of Occurrence and State of Radial Cracks in Rock Specimens Under Axial Compression with Lateral Pressure / V. Shekov, G. Kolesnikov // *Applied Sciences*. — 2024. — Vol. 14. — № 24. — P. 11552. — DOI: 10.3390/app142411552. — EDN: QLLPTO.
8. Ahmad M.R. Experimental research on the performance of lightweight concrete containing foam and expanded clay aggregate / M.R. Ahmad, B. Chen // *Composites Part B: Engineering*. — 2019. — Vol. 171. — P. 46–60. — DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.04.025.
9. Ahmad M.R. Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete / M.R. Ahmad, B. Chen, S.F. Shah // *Construction and Building Materials*. — 2019. — Vol. 220. — P. 253–266. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.171.
10. Zhang D. The brittleness indices used in rock mechanics and their application in shale hydraulic fracturing: A review / D. Zhang, P.G. Ranjith, M.S. Perera // *Journal of petroleum science and Engineering*. — 2016. — Vol. 143. — P. 158–170. — DOI: 10.1016/j.petrol.2016.02.011.
11. Maleki P. An Experimental Investigation of the Effects of Adding Polymer and Basalt Fibers on the Mechanical Properties and Durability of Lightweight Concrete / P. Maleki, M. Shadabfar, H. Kordestani // *Buildings*. — 2025. — Vol. 15. — № 6. — P. 911. — DOI: 10.3390/buildings15060911.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Danilov A.M. Razrabotka stroitel'nyh materialov kak slozhnyh sistem [Development of building materials as complex systems] / A.M. Danilov, I.A. Gar'kina // *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction]. — 2016. — № 2. — P. 50–54. — EDN: ZYOFRI. [in Russian]
2. Kaprielov S.S. Vliyanie vida zapolnitelya na fiziko-tehnicheskie karakteristiki vysokoprochnykh samouplotnyayushchihsya cementnyh sistem [Influence of the type of filler on the physical and technical characteristics of high-strength self-compacting cement systems] / S.S. Kaprielov, A.V. Shejfel'd, N.I. Karpenko [et al.]. // *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. — 2025. — № 2. — P. 27–42. — DOI: 10.37538/0005-9889-2025-2(627)-27-42. — EDN: TSNYUO. [in Russian]
3. Makridin N.I. Struktura i svojstva keramzitovogo graviya dlya betonov povyshennoj prochnosti [Structure and properties of expanded clay gravel for high-strength concrete] / N.I. Makridin, I.N. Maksimova, M.V. Simakov // *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction]. — 2012. — № 3 (14). — P. 52–56. [in Russian]
4. Debusne M. On the need of compressive regularization in damage models for concrete: demonstration on a modified Mazars model / M. Debusne, L. Davenne, L. Jason // *Applied Mechanics*. — 2024. — Vol. 5. — № 3. — P. 490–512.
5. Xia X. Interfacial debonding constitutive model and XFEM simulation for mesoscale concrete / X. Xia, F. Chen, X. Gu [et al.] // *Computers and Structures*. — 2021. — Vol. 242. — P. 106373.
6. Hoek E. Fracture initiation and propagation in intact rock — a review / E. Hoek, C.D. Martin // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. — 2014. — Vol. 6. — №. 4. — P. 287–300. — DOI: 10.1016/j.jrmge.2014.06.001.
7. Shekov V. Modeling the Conditions of Occurrence and State of Radial Cracks in Rock Specimens Under Axial Compression with Lateral Pressure / V. Shekov, G. Kolesnikov // *Applied Sciences*. — 2024. — Vol. 14. — № 24. — P. 11552. — DOI: 10.3390/app142411552. — EDN: QLLPTO.
8. Ahmad M.R. Experimental research on the performance of lightweight concrete containing foam and expanded clay aggregate / M.R. Ahmad, B. Chen // *Composites Part B: Engineering*. — 2019. — Vol. 171. — P. 46–60. — DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.04.025.
9. Ahmad M.R. Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete / M.R. Ahmad, B. Chen, S.F. Shah // *Construction and Building Materials*. — 2019. — Vol. 220. — P. 253–266. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.171.
10. Zhang D. The brittleness indices used in rock mechanics and their application in shale hydraulic fracturing: A review / D. Zhang, P.G. Ranjith, M.S. Perera // *Journal of petroleum science and Engineering*. — 2016. — Vol. 143. — P. 158–170. — DOI: 10.1016/j.petrol.2016.02.011.
11. Maleki P. An Experimental Investigation of the Effects of Adding Polymer and Basalt Fibers on the Mechanical Properties and Durability of Lightweight Concrete / P. Maleki, M. Shadabfar, H. Kordestani // *Buildings*. — 2025. — Vol. 15. — № 6. — P. 911. — DOI: 10.3390/buildings15060911.