

Научная статья

УДК 691.32

doi: 10.17223/19988621/81/9

Поведение мелкозернистых фибробетонов при разных режимах механического нагружения

Дмитрий Александрович Ламзин¹, Михаил Евгеньевич Гонов²,
Анатолий Михайлович Брагов³, Андрей Кириллович Ломунов⁴

^{1, 2, 3, 4} *Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского,*

Нижегород, Россия

¹ lamzin.dmitry@yandex.ru

² gonov_mikhail@mech.unn.ru

³ bragov@mech.unn.ru

⁴ lomunov@mech.unn.ru

Аннотация. Представлены экспериментальные результаты, описывающие процессы деформирования и энергопоглощения фибробетонов при сжатии. Образцы для статических и динамических испытаний изготавливались из бетонной смеси с добавлением стальных или полипропиленовых волокон волнистой формы, объемная доля которых составляла 1,5%. Проведена обработка данных испытаний и выполнен последующий статистический анализ результатов для реализованных режимов нагружения. Показано влияние скорости деформации на механическое поведение исследуемых материалов.

Ключевые слова: динамика, метод Кольского, фибробетон, скорость деформации, удельная энергия

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00151, <https://rscf.ru/project/21-79-00151/>

Для цитирования: Ламзин Д.А., Гонов М.Е., Брагов А.М., Ломунов А.К. Поведение мелкозернистых фибробетонов при разных режимах механического нагружения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 81. С. 97–109. doi: 10.17223/19988621/81/9

Original article

Response of fine-grained fiber-reinforced concrete under different mechanical loading conditions

Dmitriy A. Lamzin¹, Mikhail E. Gonov²,
Anatoliy M. Bragov³, Andrey K. Lomunov⁴

^{1, 2, 3, 4} *National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,*

Nizhny Novgorod, Russian Federation

¹ lamzin.dmitry@yandex.ru

² gonov_mikhail@mech.unn.ru³ bragov@mech.unn.ru⁴ lomunov@mech.unn.ru

Abstract. This paper presents an experimental study of the deformation and energy absorption of fiber-reinforced concretes under compression at different strain rates. Static load tests are carried out using the Zwick-Roell Z100 universal testing machine at a strain rate of $30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Dynamic load tests are carried out in the range of strain rates $200\text{--}800 \text{ s}^{-1}$ using the Kolsky method, which implies loading of the studied sample in a split Hopkinson pressure bar system. Specimens are made from a concrete mixture with the addition of wavy steel or polypropylene fibers with a volume fraction of 1.5 %. As a result of experiments and processing of the recorded strain pulses of measuring bars, the deformation diagrams and the corresponding diagrams of the specific energy absorption for the fiber-reinforced concretes under study are constructed. For all concretes being studied, the diagrams of deformation and energy absorption have similar trends and show an increase in the strength and energy before fracture initiation with an increase in the strain rate.

Keywords: dynamics, Kolsky method, fiber-reinforced concrete, strain rate, specific energy

Acknowledgments: This study was funded by the Russian Science Foundation (project No. 21-79-00151, <https://rscf.ru/project/21-79-00151/>).

For citation: Lamzin, D.A., Gonov, M.E., Bragov, A.M., Lomunov, A.K. (2023) Response of fine-grained fiber-reinforced concrete under different mechanical loading conditions. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 81. pp. 97–109. doi: 10.17223/19988621/81/9

Введение

Противодействие техногенным угрозам и терроризму, а также природным опасностям, создающим риски для жизни, здоровья людей и экономики государства, является одной из приоритетных задач, на решение которой должны быть направлены усилия ученых согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. В процессе таких явлений возникают динамические воздействия на конструкции зданий или сооружений – удары и взрывы, характеризующиеся непрерывным изменением параметров и вызывающие высокие скорости деформации конструктивных материалов. Поэтому изучение фундаментальных закономерностей поведения строительных материалов при динамических режимах нагружения является актуальным направлением исследований в современной механике, которое позволит спрогнозировать последствия чрезвычайных ситуаций и уменьшить негативный эффект от них. Механические свойства материалов необходимы для идентификации математических моделей, а также разработки и проверки гипотез прочности, которые используются при численном расчете напряженно-деформированного состояния конструкций сооружений различного назначения на быстро изменяющиеся во времени воздействия.

Одним из перспективных строительных материалов является фибробетон [1]. Фибробетон – это бетон, армированный равномерно распределенными в его объеме волокнами (фиброй), имеющими сцепление с бетоном по своей поверхности. Фибробетон обладает повышенной трещиностойкостью, ударной прочностью, вязкостью разрушения, износостойкостью, морозостойкостью, сопротивлением

кавитации, а также пониженной усадкой и ползучестью. Эти преимущества позволяют рекомендовать дисперсно-армированный бетон к применению в конструкциях, которые могут быть подвержены высокоскоростным воздействиям. Опубликованы некоторые результаты изучения механического поведения фибробетона при высоких скоростях деформации [2–7]. В данной работе было выполнено экспериментальное исследование, цель которого заключалась в анализе процессов деформирования и энергопоглощения при сжатии разных мелкозернистых фибробетонов, отличающихся друг от друга видом добавляемой фибры. Образцы для испытаний изготавливались из бетонной смеси с добавлением волокон волнистой формы из стальной проволоки или полипропилена, объемная доля которых составляла 1,5%.

Методы исследования

При ударах и взрывах скорости деформации конструкционных материалов могут составлять 10^1 – 10^4 1/с. Для определения свойств разных материалов в этом диапазоне скоростей деформации применяется методика Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) [8], которая к настоящему времени дополнена многочисленными модификациями, позволяющими исследовать динамическое поведение хрупких сред при различных типах нагружения [9–11]. Имеются публикации, которые посвящены анализу явлений, происходящих в системе РСГ [12–15]. Суть указанного метода состоит в следующем. В одном из стержней ударом бойка возбуждается одномерная упругая волна сжатия, которая распространяется по стержням со скоростью звука. При достижении образца эта волна ввиду разницы акустических жесткостей материалов стержня и образца, а также площадей их поперечных сечений расщепляется: часть ее отражается обратно волной растяжения, а часть проходит через образец во второй стержень волной сжатия. Образец при этом повреждается или полностью разрушается, в то время как стержни деформируются упруго. В ходе эксперимента производится регистрация импульсов деформации в поперечных сечениях мерных стержней, на основании которых строится диаграмма деформирования исследуемого материала. Деформация образца определяется по перемещениям торцов стержней, примыкающих к образцу, а напряжение – по усилиям, соответствующим этим перемещениям. После численного интегрирования зависимости напряжения от деформации определяется энергия, затраченная на деформирование единицы объема образца исследуемого материала. Варьируя амплитуду и длительность нагружающего импульса путем изменения скорости и длины ударника, можно получить разные режимы нагружения испытываемых образцов, которые будут соответствовать определенной степени повреждения и скорости деформации материала.

Используемая для динамических испытаний установка состояла из газовой пушки с системой управления, позволяющей разгонять ударники диаметром 20 мм, сменного комплекта мерных стержней диаметром 20 мм и измерительной аппаратуры. В экспериментах регистрировалась скорость ударника перед его воздействием на нагружающий стержень, а также импульсы деформации мерных стержней с помощью цифрового осциллографа. Построение диаграмм деформирования на основе полученных осциллограмм осуществлялось с использованием оригинальных программ обработки экспериментальных данных. Образцы материалов

для динамических испытаний имели цилиндрическую форму с диаметром основания 20 мм и высотой 10 мм. Динамические эксперименты проводились в совокупности со статическими испытаниями при скорости деформации 30×10^{-6} 1/с на универсальной испытательной машине Z100 Zwick-Roell [16, 17], чтобы оценить изменение механического поведения исследуемых фибробетонов при переходе от статического нагружения к динамическому. Образцы для статических испытаний также имели цилиндрическую форму с диаметром основания 20 мм, но их высота составляла 20 мм. Управление статическими экспериментами осуществлялось с использованием программного обеспечения testXpert II.

Результаты исследования

Используемые методы испытаний позволили проследить процессы деформирования и энергопоглощения исследуемых фибробетонов, а также оценить изменение механических характеристик с ростом скорости деформации. После проведения экспериментов, обработки зарегистрированных усилий и перемещений в условиях статики, а также импульсов деформации мерных стержней в условиях динамики были построены диаграммы деформирования и соответствующие им диаграммы удельного энергопоглощения испытанных образцов. При каждом режиме нагружения проводилось от трех до шести испытаний. Далее осуществлялось усреднение полученных данных для определенных режимов нагружения и выполнялась их статистическая обработка, а также определялись значения удельной энергии, затраченной до начала разрушения изучаемых фибробетонов.

Статические зависимости напряжения и удельной энергии от деформации бетона с добавлением полипропиленовой фибры приведены на рисю 1, а сталефибробетона – на рисю 2. Доверительные интервалы на графиках соответствуют 90%-ному уровню надежности. Динамические режимы нагружения были выбраны таким образом, чтобы увеличение скорости ударника позволило плавно подойти к разрушению образца. В результате максимальные величины скорости деформации, которые были получены в экспериментах, находились в интервале 200–800 1/с.

Зависимости изменения напряжения в процессе деформирования и удельной энергии до начала разрушения от деформации для бетона с добавлением полипропиленовой фибры при трех достигнутых скоростях деформации приведены на рис. 3, а для сталефибробетона при двух достигнутых скоростях деформации – на рис. 4. Доверительные интервалы на графиках, полученных в условиях динамического нагружения, соответствуют 90%-ному уровню надежности, так же как и на статических диаграммах. При самой маленькой скорости деформации диаграмма деформирования имеет ветвь разгрузки, характеризующуюся уменьшением деформации и напряжения после достижения максимума на графике. При больших скоростях деформации диаграммы деформирования имеют протяженный участок роста деформаций при уменьшении напряжений, соответствующий процессу разрушения материала. Диаграммы деформирования и энергопоглощения всех исследованных бетонов имеют схожий вид, а также показывают увеличение прочности и энергоемкости с ростом скорости деформации. Наибольшее увеличение прочности и энергоемкости происходит при добавлении в бетонную смесь стальной фибры.

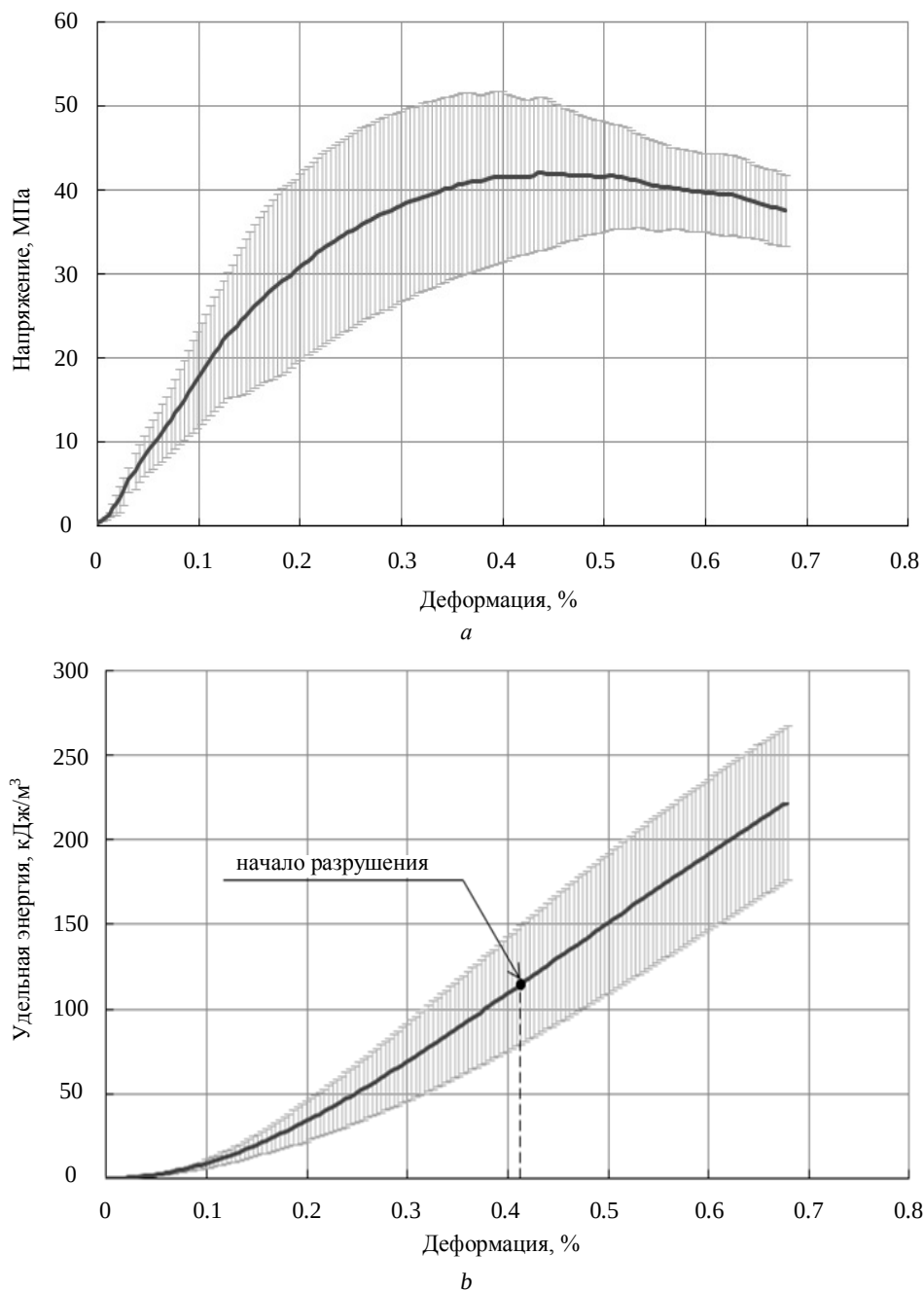


Рис. 1. Результаты статических испытаний бетона с добавлением полипропиленовой фибры: *a* – диаграмма деформирования, *b* – диаграмма энергопоглощения

Fig. 1. Static load test results for concrete with the addition of polypropylene fiber: (a) deformation and (b) energy absorption diagrams

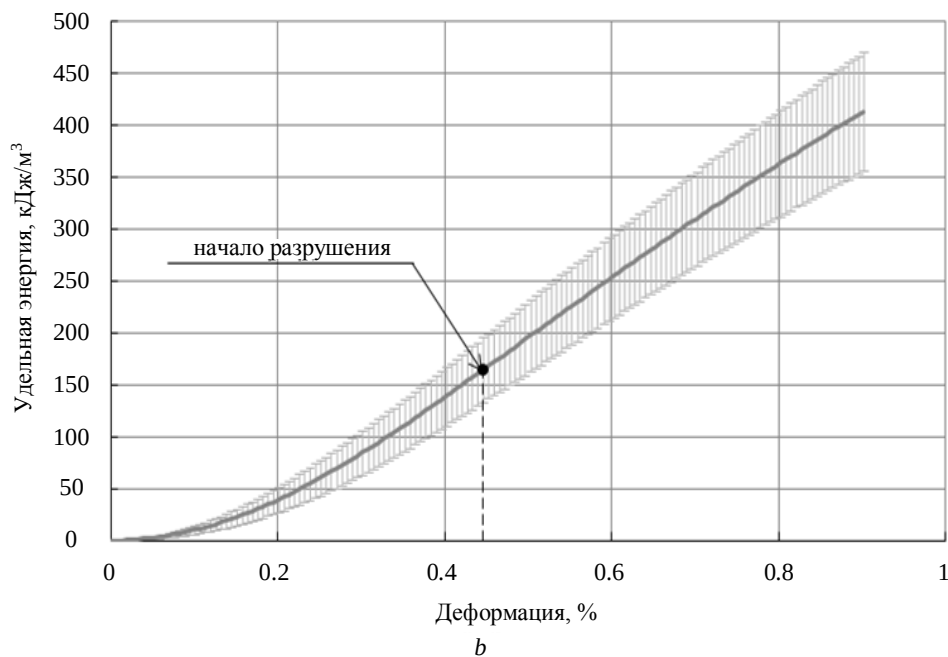
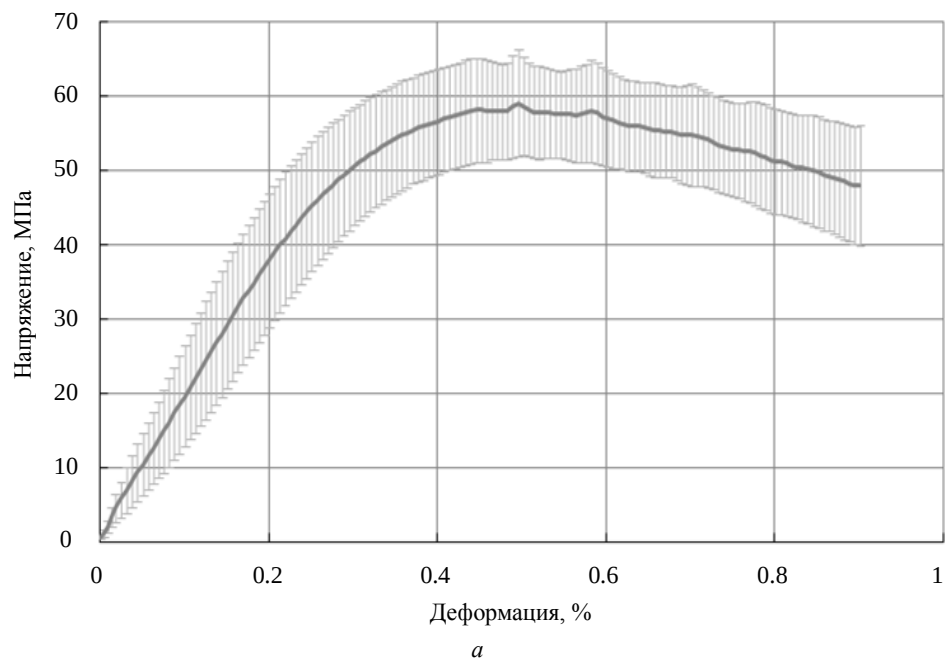


Рис. 2. Результаты статических испытаний сталефибробетона:
a – диаграмма деформирования, *b* – диаграмма энергопоглощения

Fig. 2. Static load test results for steel fiber reinforced concrete:
(*a*) deformation and (*b*) energy absorption diagrams

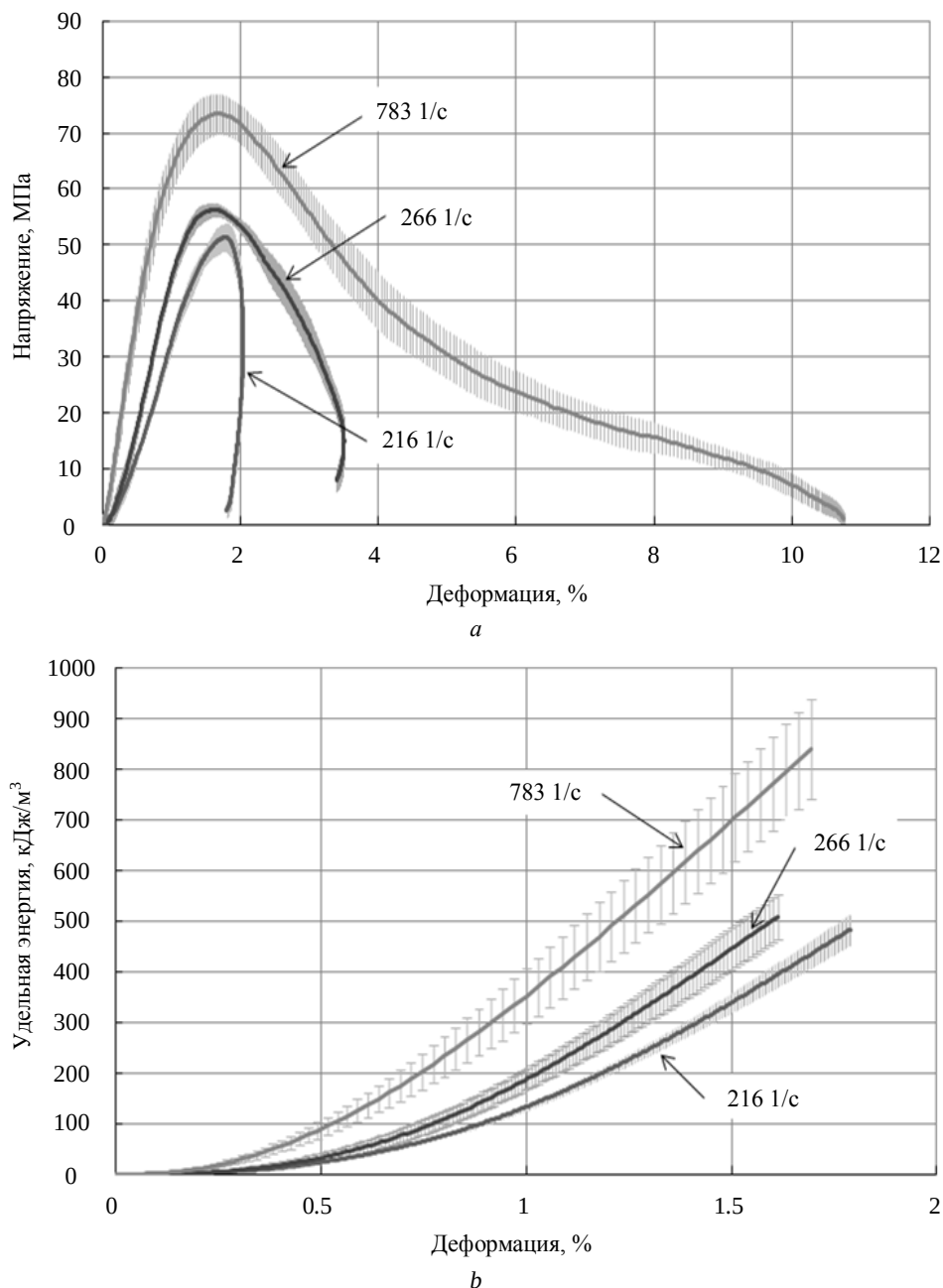


Рис. 3. Результаты динамических испытаний бетона с добавлением полипропиленовой фибры при трех скоростях деформации: *a* – диаграммы деформирования, *b* – диаграммы энергопоглощения

Fig. 3. Dynamic load test results for concrete with the addition of polypropylene fiber at three different strain rates: (a) deformation and (b) energy absorption diagrams

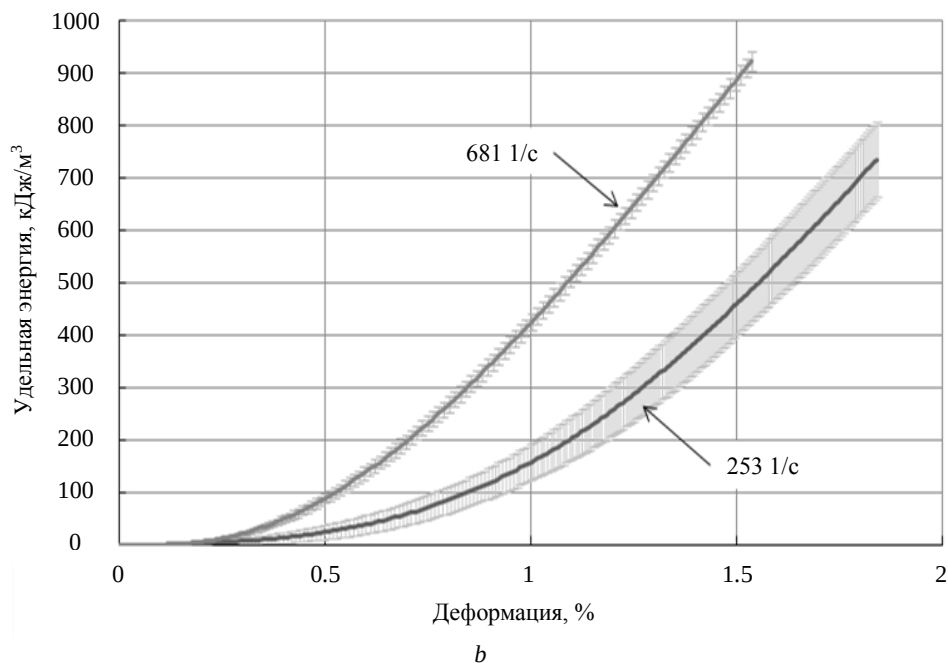
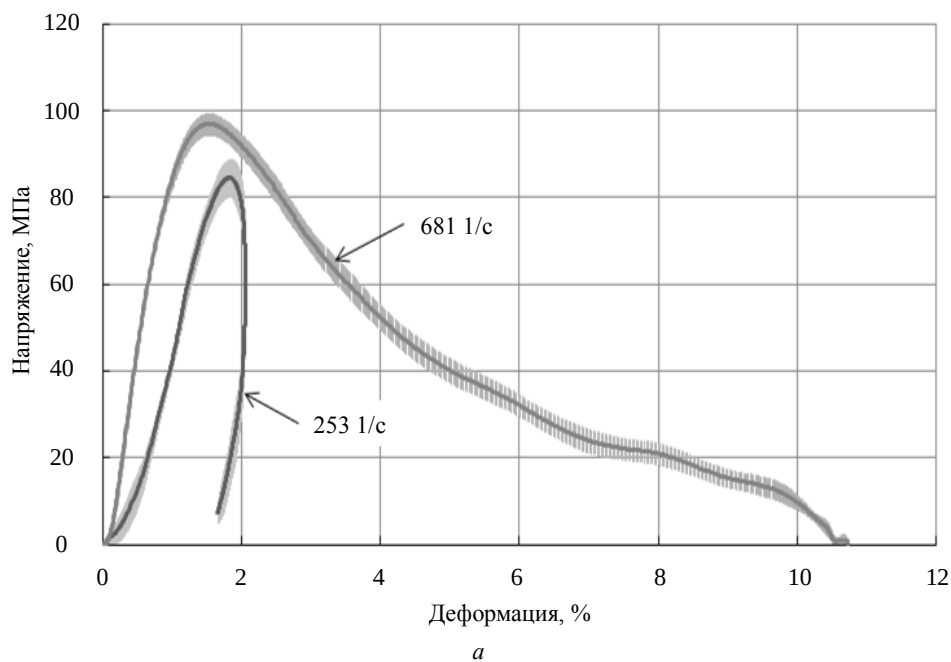


Рис. 4. Результаты динамических испытаний сталефибробетона при двух скоростях деформации: *a* – диаграммы деформирования, *b* – диаграммы энергопоглощения
Fig. 4. Dynamic load test results for steel fiber reinforced concrete at two different strain rates: (a) deformation and (b) energy absorption diagrams

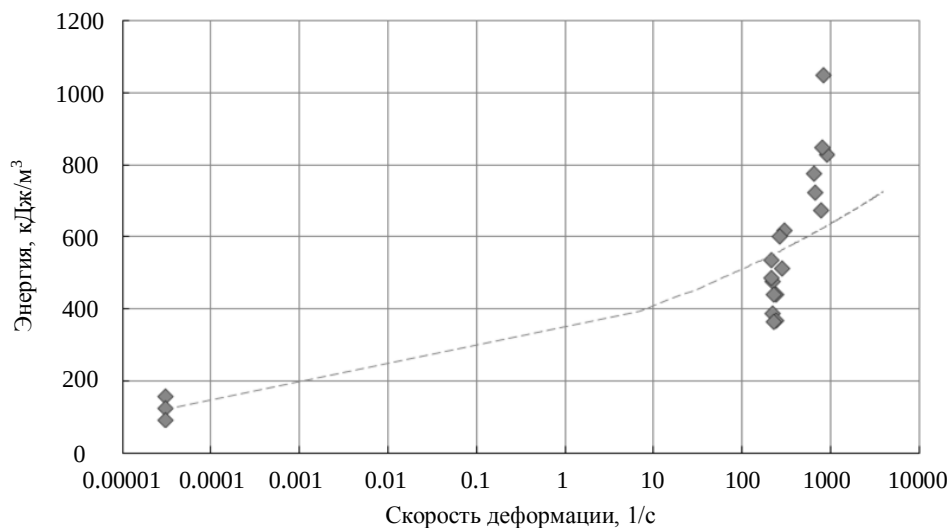


Рис. 5. Влияние скорости деформации на величину энергии, затраченной до начала разрушения бетона с добавлением полипропиленовой фибры

Fig. 5. Effect of the strain rate on the energy expended before the fracture initiation in concrete with the addition of polypropylene fiber

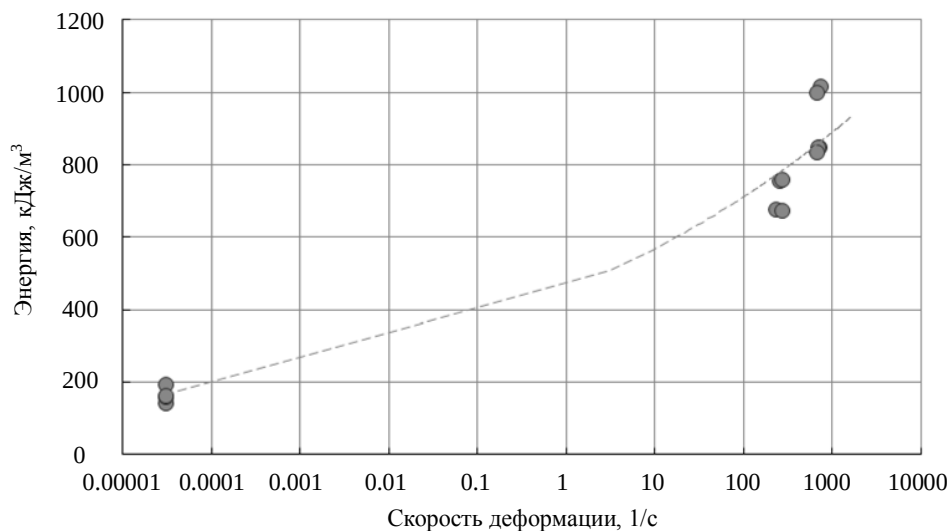


Рис. 6. Влияние скорости деформации на величину энергии, затраченной до начала разрушения сталефибробетона

Fig. 6. Effect of the strain rate on the energy expended before the fracture initiation in steel fiber reinforced concrete

Зависимость величины удельной энергии до начала разрушения от скорости деформации, полученная при испытаниях образцов бетона с добавлением полипропиленовой фибры, представлена на рис. 5, а полученная при испытаниях об-

разцов сталефибробетона – на рис. 6. Видно, что энергия, необходимая для старта разрушения, растет с увеличением скорости деформации для обоих исследуемых фибробетонов. Это увеличение достигает восьми раз для бетона с добавлением полипропиленовой фибры и шести раз для бетона с добавлением стальной фибры.

Заключение

Проведены статические и динамические испытания бетонов с добавлением стальной и полипропиленовой фибры. Выполнена обработка полученных экспериментальных данных, в результате которой построены диаграммы деформирования и энергопоглощения с доверительными интервалами при разных скоростях деформации. Отмечен схожий вид графиков деформирования и энергопоглощения исследованных бетонов. Показано влияние скорости деформации на прочность и энергоемкость материалов, характеризующееся их ростом. При достигнутых скоростях деформации в диапазоне 200–800 1/с значение энергии до начала разрушения увеличивалось в разы по сравнению со статической величиной при скорости деформации 30×10^{-6} 1/с.

Список источников

1. Окольников Г.Э., Царева А.Ю., Зуев С.С. Опыт применения дисперсно-армированных бетонов в строительной индустрии России // Системные технологии. 2020. № 34. С. 48–52.
2. Морозов В.И., Пухаренко Ю.В. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 189–196.
3. Плевков В.С., Колупаева С.Н., Кудяков К.Л. Расчетные диаграммы нелинейного деформирования базальтофибробетона при статических и кратковременных динамических воздействиях // Вестник ТГАСУ. 2016. № 3. С. 95–110.
4. Thomas R.J., Sorensen A.D. Review of strain rate effects for UHPC in tension // Construction and Building Materials. 2017. V. 153. P. 846–856. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.168
5. Bragov A.M., Lomunov A.K., Lamzin D.A., Konstantinov A.Yu. Change of strength of brittle building materials under high strain and stress rates // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2019. V. 40 (3). P. 284–291. doi: 10.1134/S1995080219030077
6. dell'Isola F., Bragov A.M., Igumnov L.A., Abali B.E., Lomunov A.K., Lamzin D.A., Konstantinov A.Y. Mechanical response change in fine grain concrete under high strain and stress rates // Advanced Structured Materials. 2019. V. 108. P. 71–80. doi: 10.1007/978-3-030-13307-8_5
7. Bragov A.M., Gonov M.E., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Modin I.A. Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression // Materials Physics and Mechanics. 2021. V. 47. P. 962–967. doi: 10.18149/MPM.4762021_14
8. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading // Proceedings of the Physical Society of London. Section B. 1949. V. 62. P. 676–704. doi: 10.1088/0370-1301/62/11/302
9. Zhang Q.B., Zhao J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2014. V. 47. P. 1411–1478. doi: 10.1007/s00603-013-0463-y
10. Xia K., Yao W. Dynamic rock tests using split Hopkinson (Kolsky) bar system - a review // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2015. V. 7. P. 27–59. doi: 10.1016/j.jrmge.2014.07.008
11. Bragov A., Igumnov L., Lomunov A., Konstantinov A., Lamzin D., Kruska L. Use of the Kolsky method for dynamic tests of brittle media // MATEC Web of Conferences. 2018. V. 174. Art. 02022. doi: 10.1051/matecconf/201817402022

12. Lu Y.B., Li Q.M. About the dynamic uniaxial tensile strength of concrete-like materials // International Journal of Impact Engineering. 2011. V. 38. P. 171–180. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.028
13. Chen W., Song B. Split Hopkinson (Kolsky) Bar. Design, Testing and Applications. Boston, MA : Springer, 2011. doi: 10.1007/978-1-4419-7982-7
14. Bragov A.M., Lomunov A.K., Lamzin D.A., Konstantinov A.Yu. Dispersion correction in split-Hopkinson pressure bar: theoretical and experimental analysis // Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2019. doi: 10.1007/s00161-019-00776-0
15. Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Y., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Kruszka L. Methodological aspects of testing brittle materials using the split Hopkinson bar technique // Strain. 2021. V. 57. e12389. doi: 10.1111/str.12389
16. Igumnov L.A., Kazakov D.A., Shishulin D.N., Modin I.A., Zhegalov D.V. Experimental studies of high-temperature creep of titanium alloy VT6 under conditions of a complex stress state under the influence of an aggressive medium // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. fiziko-matematicheskiye nauki [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.]. 2021. V. 25, № 2. P. 286–302. doi: 10.14498/vsgtu1850
17. Kochetkov A.V., Leontev N.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Study of the stress-strain and strength properties of the metal woven grids // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 2018. № 52. P. 53–62. doi: 10.17223/19988621/52/6

References

1. Okolnikova G.E., Tsareva A.Yu., Zuev S.S. (2020) Opyt primeneniya dispersno-armirovannykh betonov v stroitel'noy industrii Rossii [Experience in using dispersed-reinforced concrete in the construction industry in Russia]. *Sistemnye tekhnologii – System Technologies*. 34. pp. 48–52.
2. Morozov V.I., Pukhareno Yu.V. (2014) Effektivnost' primeneniya fibrobetona v konstruktsiyakh pri dinamicheskikh vozdeystviyakh [Efficiency of fiber reinforced concrete application in structures subjected to dynamic effects]. *Vestnik MGSU – Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 3. pp. 189–196.
3. Plevkov V.S., Kolupaeva S.N., Kudyakov K.L. (2016) Raschetnye diagrammy nelineynogo deformirovaniya bazalt'ofibrobetona pri staticheskikh i kratkovremennykh dinamicheskikh vozdeystviyakh [Calculating diagrams of nonlinear deformation of basalt fiber concrete under static and dynamic loads]. *Vestnik TGASU – Journal of Construction and Architecture*. 3. pp. 95–110.
4. Thomas R.J., Sorensen A.D. (2017) Review of strain rate effects for UHPC in tension. *Construction and Building Materials*. 153. pp. 846–856. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.168
5. Bragov A.M., Lomunov A.K., Lamzin D.A., Konstantinov A.Yu. (2019) Change of strength of brittle building materials under high strain and stress rates. *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 3(40). pp. 284–291. doi: 10.1134/S1995080219030077
6. dell'Isola F., Bragov A.M., Igumnov L.A., Abali B.E., Lomunov A.K., Lamzin D.A., Konstantinov A.Y. (2019) Mechanical response change in fine grain concrete under high strain and stress rates. *Advanced Structured Materials*. 108. pp. 71–80. doi: 10.1007/978-3-030-13307-8_5
7. Bragov A.M., Gonov M.E., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Modin I.A. (2021) Response of fine-grained fiber-reinforced concretes under dynamic compression. *Materials Physics and Mechanics*. 47. pp. 962–967. doi: 10.18149/MPM.4762021_14
8. Kolsky H. (1949) An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society of London*. 62. pp. 676–704. doi: 10.1088/0370-1301/62/11/302

9. Zhang Q.B., Zhao J. (2014) A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 47. pp. 1411–1478. doi: 10.1007/s00603-013-0463-y
10. Xia K., Yao W. (2015) Dynamic rock tests using split Hopkinson (Kolsky) bar system – A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 7. pp. 27–59. doi: 10.1016/j.jrmge.2014.07.008
11. Bragov A., Igumnov L., Lomunov A., Konstantinov A., Lamzin D., Kruszka L. (2018) Use of the Kolsky method for dynamic tests of brittle media. *MATEC Web of Conferences*. 174. Article 02022. doi: 10.1051/mateconf/201817402022
12. Lu Y.B., Li Q.M. (2011) About the dynamic uniaxial tensile strength of concrete-like materials. *International Journal of Impact Engineering*. 38. pp. 171–180. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.028
13. Chen W., Song B. (2011) *Split Hopkinson (Kolsky) Bar. Design, Testing and Applications*. Boston: Springer. doi: 10.1007/978-1-4419-7982-7
14. Bragov A.M., Lomunov A.K., Lamzin D.A., Konstantinov A.Yu. (2019) Dispersion correction in split-Hopkinson pressure bar: theoretical and experimental analysis. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. doi: 10.1007/s00161-019-00776-0
15. Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Y., Lamzin D.A., Lomunov A.K., Kruszka L. (2021) Methodological aspects of testing brittle materials using the split Hopkinson bar technique. *Strain*. 57(5). doi: 10.1111/str.12389
16. Igumnov L.A., Kazakov D.A., Shishulin D.N., Modin I.A., Zhegalov D.V. (2021) Eksperimental'nye issledovaniya vysokotemperaturnoy polzuchesti titanovogo splava VT6 v usloviyakh slozhnogo napryazhennogo sostoyaniya pod vozdeystviem agressivnoy sredy [Experimental studies of high-temperature creep of titanium alloy VT6 under conditions of a complex stress state under the influence of an aggressive medium]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya fiziko-matematicheskie nauki – Journal of Samara State Technical University, Physical and Mathematical Sciences*. 2(25). pp. 286–302. doi: 10.14498/vsgtu1850
17. Kochetkov A.V., Leont'ev N.V., Modin I.A., Savikhin A.O. (2018) Issledovanie deformatsionnykh i prochnostnykh svoystv metallicheskih pletenykh setok [Study of the stress-strain and strength properties of the metal woven grids]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 52. pp. 53–62. doi: 10.17223/19988621/52/6

Сведения об авторах:

Ламзин Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: lamzin.dmitry@yandex.ru

Гонов Михаил Евгеньевич – младший научный сотрудник Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: gonov_mikhail@mech.unn.ru

Брагов Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: bragov@mech.unn.ru

Ломунов Андрей Кириллович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия. E-mail: lomunov@mech.unn.ru

Information about the authors:

Lamzin Dmitry A. (Candidate of Technical Sciences, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation). E-mail: lamzin.dmitry@yandex.ru

Gonov Mikhail E. (Junior Researcher, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation). E-mail: gonov_mikhail@mech.unn.ru

Bragov Anatoliy M. (Doctor of Technical Sciences, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation). E-mail: bragov@mech.unn.ru

Lomunov Andrey K. (Doctor of Physics and Mathematics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation). E-mail: lomunov@mech.unn.ru

Статья поступила в редакцию 15.03.2022; принята к публикации 03.02.2023

The article was submitted 15.03.2022; accepted for publication 03.02.2023