

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2021, №5, Том 13 / 2021, No 5, Vol 13 <https://esj.today/issue-5-2021.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/41SAVN521.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Чернильник, А. А. Анализ прочностных и деформативных характеристик облегчённых и тяжелых бетонов, армированных базальтовой фиброй / А. А. Чернильник, Д. М. Ельшаева, Н. А. Доценко, М. С. Самофалова, Ю. В. Жеребцов, В. Ю. Смачный // Вестник евразийской науки. — 2021. — Т. 13. — № 5. — URL: <https://esj.today/PDF/41SAVN521.pdf>

For citation:

Chernil'nik A.A., El'shaeva D.M., Dotsenko N.A., Samofalova M.S., Zherebtsov Yu.V., Smachnyi V.Yu. Analysis of strength and deformation characteristics of lightweight and heavy concrete reinforced with basalt fiber. *The Eurasian Scientific Journal*, 13(5): 41SAVN521. Available at: <https://esj.today/PDF/41SAVN521.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

Чернильник Андрей Александрович

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», Ростов-на-Дону, Россия
Аспирант
E-mail: chernila_a@mail.ru

Ельшаева Диана Михайловна

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Магистрант
E-mail: diana.elshaeva@yandex.ru

Доценко Наталья Александровна

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Магистрант
E-mail: natalya_1998_dotsenko@mail.ru

Самофалова Мария Сергеевна

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Магистрант
E-mail: mary.ss17@yandex.ru

Жеребцов Юрий Владимирович

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Магистрант
E-mail: yuri.zherebtsov@gmail.com

Смачный Владислав Юрьевич

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
Магистрант
E-mail: smachney87@mail.ru

**Анализ прочностных и деформативных
характеристик облегчённых и тяжелых бетонов,
армированных базальтовой фиброй**

Аннотация. На сегодняшний день вследствие усложнения условий эксплуатации зданий и сооружений возникает необходимость в повышении требований к строительным материалам, в том числе и к бетонам. Целью данной работы является исследование процесса напряженно-деформированного состояния тяжелых и облегченных бетонов, построение

диаграмм напряжений — деформаций и их анализ. Для проведения исследований всего было изготовлено и испытано четыре серии образцов с размерами 150x150x600 мм: первая серия — тяжелый бетон; вторая серия — тяжелый бетон с содержанием базальтовой фибры 3 %; третья серия — облегченный бетон; четвертая серия — облегченный бетон с содержанием базальтовой фибры 3 %. По результатам экспериментальных исследований было установлено, что применение дисперсного базальтового волокна как в тяжелых, так и в облегченных бетонах приводит к повышению предельной сжимаемости и растяжимости бетонов. Так прирост призмочной прочности у тяжелых фибробетонов составил 5 %, а прирост прочности на осевое растяжение — 7 %. Что касается продольных деформаций, то они увеличились на 43 %, а поперечные выросли в 4 раза. У облегченных фибробетонов прирост призмочной прочности составил 3 % и 6 % — для прочности на осевое растяжение. Продольные деформации выросли на 32 %, а поперечные увеличились в 4,1 раза. Таким образом, дисперсно-армирующее волокно является очень эффективным способом армирования. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и строительстве зданий и сооружений с применением фибробетонных конструкций.

Ключевые слова: облегченный бетон; тяжелый бетон; фибробетон; прочность; предельные деформации; модуль упругости; базальтовая фибра

Введение

На сегодняшний день вследствие усложнения условий эксплуатации зданий и сооружений возникает необходимость в повышении требований к строительным материалам, в том числе и к бетонам. С точки зрения эксплуатационной надежности помимо повышения прочности бетона на сжатие также очень важными являются более высокие значения трещиностокости и ударной вязкости. Для обеспечения этих свойств со второй половины 20 века бетоны армируют различными видами волокон [1–5].

Фибробетон представляет собой композиционный материал, основой которого являются бетонная матрица с определенной концентрацией дисперсного волокна как одного, так и нескольких видов. В сравнении с обычным тяжелым бетоном фибробетон является более пластичным материалом, имеет повышенную упругость и вязкость, за счет чего данный вид бетона имеет весьма широкую область применения в различных отраслях строительства (транспортное, гидротехническое и промышленное).

Что касается разрушения фибробетона, то его характер зависит от соотношения долей участия фибр и бетона в восприятии нагрузки. Так, например, если сцепление фибр с бетоном хорошее, то при наступлении предельного состояния значение разрушающей нагрузки определяется только активной составляющей фибр ($N_{a.ф}$), а условие прочности можно записать в виде:

$$N_{разр} \leq N_{a.ф}$$

При слабом сцеплении и небольшом содержании фибр резкий выход бетона из работы приводит к увеличению напряжения в фибрах и их выдергиванию из бетона. Условие прочности записывается в виде:

$$N_{разр} \leq N_b + N_{a.ф}$$

В работе [6] проверялось влияние рубленого базальтового волокна в керамзитобетоне на улучшение его прочности. Были получены экспериментальные зависимости поведения бетона под нагрузкой с помощью испытаний на сжатие и изгиб. Дисперсное рубленое базальтовое волокно использовалось в качестве армирования образцов размерами 100x100x100 мм и 100x100x400 мм. Разработаны математические модели для определения прочности на сжатие и

изгиб керамзитобетона в зависимости от доли базальтовой фибры и периода твердения. Анализ методом конечных элементов был выполнен с использованием программного обеспечения ANSYS, модель была разработана для проверки различных результатов экспериментов, которые показали, что высокий процент базальтовой фибры в керамзитобетоне увеличивает его прочность. Фактически, влияние непосредственно на характер разрушения наблюдалось на керамзитобетоне без базальтовой фибры и затем считывалось по значению прочности и предельной деформации образцов [7–13].

Численное моделирование является эффективным инструментом в исследованиях фибробетонов со сложными свойствами. В статье [14] авторы использовали метод численного моделирования ANSYS для моделирования расчетных параметров балок, которые могут быть изменены в зависимости от несущей способности, таких как: содержание стальной фибры в бетоне, расстояние между стальными хомутами на концах балки, количество растягиваемой стали, стержней, диаметра растянутых стальных стержней с учетом нелинейных свойств материалов. В [15] рассмотрена прочность гибридной трубы, заполненной бетоном из армированного волокном полимера (FRP). Моделирование в среде ANSYS показало максимальную ошибку 17 %. Результаты моделирования показывают, что изменение этих расчетных параметров повлияло на несущую способность, напряженно-деформированное состояние, образование и развитие трещин в балках, причем при увеличении содержания стальной фибры в бетоне, количества растягивающихся стальных стержней и диаметра растяжимой стали и т. д., уменьшается образование и развитие трещин в балках, увеличивается их несущая способность.

Проведенный анализ научно-технической литературы выявил дефицит в исследованиях прочностных и деформативных характеристик тяжелых и облегченных бетонов, армированных дисперсным волокном.

Таким образом, целью нашей работы будет исследование процесса напряженно-деформированного состояния тяжелых и облегченных бетонов, построение диаграмм напряжений и деформаций и их анализ.

Материалы и методы

При проведении экспериментальных исследований применялся портландцемент марки ПЦ 500 Д0, его физико-механические характеристики представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики портландцемента ПЦ 500 Д0 и его химический состав

Наименование показателя	Фактические значения
Физико-механические показатели	
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, МПа	54,8
Сроки схватывания, мин.:	
- начало	155
- конец	220
Тонкость помола, проход через сито № 008, %	96,7
Удельная поверхность, см ² /г	2930
Нормальная плотность цементного теста, %	23,5

Составлено авторами

В качестве крупного плотного заполнителя применялся щебень гранитный со следующими физико-механическими характеристиками: размер фракций — 5–20 мм; насыпная плотность — 1503 кг/м³; истинная плотность — 2620 кг/м³; дробимость — 11,4 % по массе;

содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм — 8,1 % по массе; пустотность — 43 %.

В качестве крупного легкого заполнителя применялась шлаковая пемза: размер фракций — 5–20 мм; насыпная плотность — 612 кг/м³; истинная плотность — 1310 кг/м³; прочность по ГОСТ 32496 — 0,8 МПа; пустотность — 53 %.

В качестве мелкого заполнителя применялся песок кварцевый со следующими физическими характеристиками: модуль крупности — 1,66; содержание пылевидных и глинистых частиц — 1,2 %; насыпная плотность — 1438 кг/м³; истинная плотность — 2650 кг/м³.

В качестве дисперсной арматуры применялась базальтовая фибра. В таблице 2 представлены физико-механические характеристики применяемой фибры.

Таблица 2

Физико-механические показатели фибры

Фибра	Прочность на растяжение, МПа	Диаметр волокна, м	Длина волокна, мм	Модуль упругости, ГПа	Плотность, кг/м ³	Коэффициент удлинения, %
базальтовая	3200	16·10 ⁻⁶	12	80	2600	3,2

Составлено авторами

Для регулирования подвижности бетонных смесей использовался суперпластификатор Muraplast FK 48.

Всего было изготовлено и испытано 4 серии образцов с размерами 150x150x600 мм:

- первая серия — тяжелый бетон;
- вторая серия — тяжелый бетон с содержанием базальтовой фибры 3 %;
- третья серия — облегченный бетон;
- четвертая серия — облегченный бетон с содержанием базальтовой фибры 3 %.

Также для исследований было применено: испытательное оборудование (пресс гидравлический ИП-1000 (ООО НПК «ТЕХМАШ», г. Нефтекамск, Республика Башкортостан, Россия)), средства измерения (линейка измерительная металлическая, весы лабораторные, прибор для измерения отклонений от плоскости НПЛ-1, прибор для измерения отклонений от перпендикулярности НПП-1).

Применялась стандартная методика испытаний по ГОСТ 24452-80 «Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона». Нагружение образцов производилось ступенями, равными 10 % от ожидаемой разрушающей нагрузки, со скоростью (0,6±0,2) МПа/с.

Испытания на осевое растяжение проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Измерения деформаций бетона опытных призм производились цепочкой тензодатчиков с длиной стороны 50 мм и индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм [16].

Параметры состава бетонной смеси для изготовления опытных образцов из тяжелого бетона приведены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры состава бетонной смеси

Наименование параметра	В/Ц	Ц, кг/м ³	В, л/м ³	Щ, кг/м ³	П, кг/м ³	$\rho_{бс}$, кг/м ³
Значение параметра	0,57	373	205	1139	720	2337

Составлено авторами

При изготовлении облегченных бетонов производилась замена части объема плотного заполнителя таким же объемом пористого в количестве 30 %. Расход цемента и соотношение П/Щ оставались неизменными. Расход воды корректировался до получения требуемой подвижности бетонной смеси.

Результаты и их обсуждение

Результаты, полученные по итогам испытаний опытных образцов облегченных бетонов, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты определения модуля упругости
опытных образцов тяжелых и облегченных бетонов

Характеристики бетона	Содержание базальтового волокна, %			
	тяжелые бетоны		облегченные бетоны	
	0	3	0	3
Призменная прочность на сжатие, МПа	44,8	46,9	37,1	38,2
Предельные деформации при осевом сжатии, мм/м·10 ⁻³	1,98	2,83	2,85	3,76
Прочность на осевое растяжение, МПа	4,4	4,7	3,6	3,8
Предельные деформации при осевом растяжении, мм/м·10 ⁻⁴	1,21	4,98	1,45	5,91
Модуль упругости, ГПа	34,8	36,2	29,8	33,3

Составлено авторами

По результатам испытаний были построены диаграммы сжатия « ϵ_b - σ_b » и растяжения « ϵ_{bt} - σ_{bt} ». Графические зависимости «напряжения — деформации», представлены на рисунках 1 и 2.

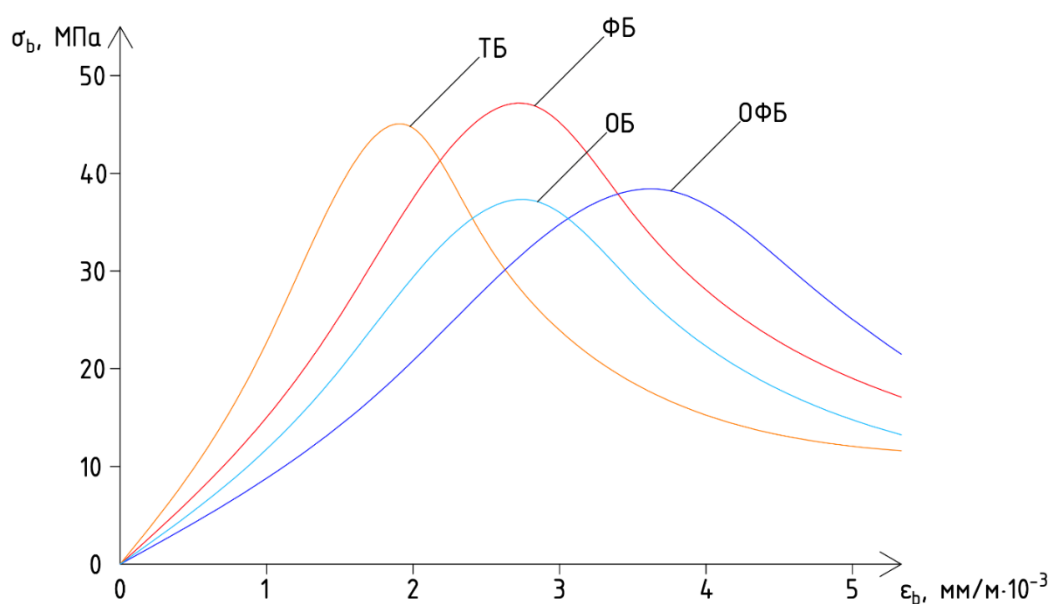


Рисунок 1. Криволинейная диаграмма состояния сжатого бетона (ТБ — тяжелый бетон; ТФБ — тяжелый фибробетон; ОБ — облегченный бетон; ОФБ — облегченный фибробетон) (составлено авторами)

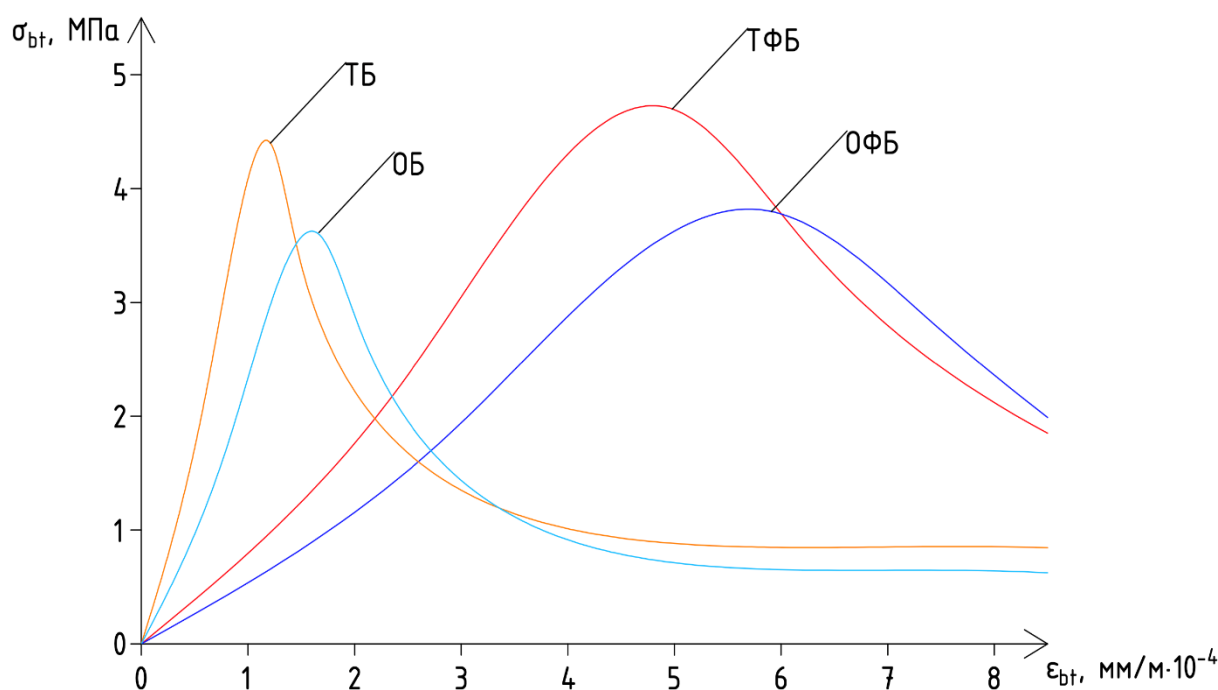


Рисунок 2. Криволинейная диаграмма состояния растянутого бетона (ТБ — тяжелый бетон; ТФБ — тяжелый фибробетон; ОБ — облегченный бетон; ОФБ — облегченный фибробетон) (составлено авторами)

В результате анализа рисунков 1 и 2 было установлено следующее: исходя из полученных диаграмм деформирования, пик диаграммы со смещением вверх и влево присутствует у диаграмм деформирования тяжелых и облегченных фибробетонов. Остальные же диаграммы контрольных составов бетона имеют более низкий пик со смещением вправо.

Таким образом применение дисперсного базальтового волокна как в тяжелых, так и в облегченных бетонах повышает предельную сжимаемость и растяжимость бетонов. Так прирост призмочной прочности у тяжелых фибробетонов составил 5 %, модуля упругости — 4 %, а прирост прочности на осевое растяжение — 7 %. Что касается продольных деформаций, то они увеличились на 43 %, а поперечные выросли в 4 раза. У облегченных фибробетонов прирост призмочной прочности составил 3 %, 12 % — для модуля упругости и 6 % — для прочности на осевое растяжение. Продольные деформации выросли на 32 %, а поперечные увеличились в 4,1 раза.

Следует отметить также, что в процессе испытаний разрушение бетонов контрольных составов происходило сразу же после достижения максимальной нагрузки, тогда как у фибробетонов процесс деформирования продолжался вплоть до выдергивания фибр из образовавшейся трещины.

Выводы

В результате проведенных исследований сделаны следующие выводы. Наименьшей деформативностью обладает неармированный тяжелый бетон, выступавший в качестве контрольного состава, а наибольшей — облегченный фибробетон. Это обусловлено тем, что такой бетон способен испытывать наибольшие деформации при нагрузке ввиду того, что при помощи рецептурных и технологических факторов меняются его свойства и как следствие характер разрушения — становится более вязким. Работа фибрового волокна с бетоном в части сцепления происходит более слаженно, меньшие по массе и при этом шероховатые зерна заполнителя — шлаковой пемзы — удерживаются при разрушении образца фибровыми

волокнами. Таким образом, работа дисперсно-армирующего волокна происходит более эффективно и для такого бетона армирование будет наиболее целесообразным.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и строительстве зданий и сооружений с применением фибробетонных конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович Ф.Н. Дисперсно-армированные бетоны. М.: Стройиздат, 1989. 176 с.
2. Zeyad A.M. Effect of fibers types on fresh properties and flexural toughness of self-compacting concrete. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020(9): 4147–4158 URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.042>.
3. Begich Y.E., Klyuev S.V., Jos V.A., Cherkashin A.V. Fine-grained concrete with various types of fibers. *Magazine of Civil Engineering*. 2020: 97(5): 20–27. URL: <https://doi.org/10.18720/MCE.97.2>.
4. Ahmed W., Lim C. Production of sustainable and structural fiber reinforced recycled aggregate concrete with improved fracture properties: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2021 (279): 123382 URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123832>.
5. Shcherban E.M., Prokopov A.Yu., Stelmakh S.A., Shuyskiy A.I. Effect of Disperse Reinforcement on the Structural Quality Factor of Vibrated and Centrifuged Concretes on the Combined Aggregate. *Materials Science Forum*. 2020 (974): 283–287 URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.974.283>.
6. Galishnikova V.V., Kharun M., Koroteev D.D., Chiadighikaobi P.C. Basalt fiber reinforced expanded clay concrete for building structures. *Magazine of Civil Engineering*. 2021: 101(1): 10107 URL: <https://doi.org/10.34910/MCE.101.7>.
7. Савенков А.И., Савенков В.А. Облегченные вариатропные железобетонные перекрытия // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 288–293.
8. Абдыкалыков Т.А., Джамаева А.М. Облегченные мелкозернистые бетоны на основе композиционных вяжущих веществ // *Материаловедение*. 2017. № 2(22). С. 20–23.
9. Гаврилов А.В., Алоян К.Д., Доброхотов В.Б., Придатко Ю.М. Совершенствование технологии получения облегченных бетонов // Шестдесят восьмая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сборник материалов конференции, Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2015. С. 765–767.
10. Рылова Т.С., Лахтарина С.В., Егорова Е.В. Легкий конструкционный бетон с повышенным коэффициентом конструктивного качества // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2018. № 4–2(132). С. 221–226.
11. Явруян Х.С., Холодняк М.Г., Шуйский А.И., Стельмах С.А., Щербань Е.М. Влияние некоторых рецептурно-технологических факторов на свойства неавтоклавного газобетона // *Инженерный вестник Дона*. 2015. № 4 URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3431>.

12. Mailyan L.R., Beskopylny A.N., Meskhi B., Stel'makh S.A., Shcherban E.M., Ananova O. Optimization of Composition and Technological Factors for the Lightweight Fiber-Reinforced Concrete Production on a Combined Aggregate with an Increased Coefficient of Structural Quality. *Applied Sciences*. 2021 (11): 7284 URL: <https://doi.org/10.3390/app11167284>.
13. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Beskopylny A.N., Mailyan L.R., Meskhi B., Butko D., Smolyanichenko A.S. Influence of Composition and Technological Factors on Variatropic Efficiency and Constructive Quality Coefficients of Lightweight Vibro-Centrifuged Concrete with Alkalized Mixing Water. *Applied Sciences*. 2021 (11): 9293 URL: <https://doi.org/10.3390/app11199293>.
14. Do T.M.D., Lam T.Q.K. Design parameters of steel fiber concrete beams. *Magazine of Civil Engineering*. 2021: 102(2): 299–321. URL: <https://doi.org/10.34910/MCE.102.7>.
15. Kang I.-K., Kim S.-H. Compressive Strength Testing of Hybrid Concrete-Filled Fiber-Reinforced Plastic Tubes Confined by Filament Winding. *Applied Sciences*. 2021 (11): 2900 URL: <https://doi.org/10.3390/app11072900>.
16. Черных Д.С., Строев Д.А., Чернильник А.А., Ельшаева Д.М., Жеребцов Ю.В., Доценко Н.А. Зависимость коэффициентов прочностной и деформативной вариатропной эффективности центрифугированного бетона от зернового состава крупного заполнителя // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 3. С. 470–479.

Chernil'nik Andrei Aleksandrovich

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: chernila_a@mail.ru

El'shaeva Diana Mikhailovna

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: diana.elshaeva@yandex.ru

Dotsenko Natal'ya Aleksandrovna

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: natalya_1998_dotsenko@mail.ru

Samofalova Mariya Sergeevna

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: mary.ss17@yandex.ru

Zherebtsov Yurii Vladimirovich

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: yuri.zherebtsov@gmail.com

Smachnyi Vladislav Yur'evich

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
E-mail: smachney87@mail.ru

Analysis of strength and deformation characteristics of lightweight and heavy concrete reinforced with basalt fiber

Abstract. Today, due to the complication of the operating conditions of buildings and structures, there is a need to increase the requirements for building materials, including concrete. The aim of this work is to study the process of the stress-strain state of heavy and lightweight concrete, build stress-strain diagrams and analyze them. For research, four series of samples with dimensions of 150x150x600 mm were made and tested in total: the first series — heavy concrete; the second series — heavy concrete with a basalt fiber content of 3 %; third series — lightweight concrete; the fourth series — lightweight concrete with a basalt fiber content of 3 %. According to the results of experimental studies, it was found that the use of dispersed basalt fiber in both heavy and lightweight concretes leads to an increase in the ultimate compressibility and extensibility of concrete. So the increase in prismatic strength in heavy fiber-reinforced concrete was 5 %, and the increase in axial tensile strength was 7 %. As for the longitudinal deformations, they increased by 43 %, and the transverse ones increased by 4 times. In lightweight fiber-reinforced concrete, the increase in prism strength was 3 % and 6 % for axial tensile strength. Longitudinal strains increased by 32 %, and transverse strains increased 4.1 times. Thus, dispersed reinforcing fiber is a very effective reinforcement method. The results obtained can be used in the design and construction of buildings and structures using fiber-reinforced concrete structures.

Keywords: lightweight concrete; heavy concrete; fiber concrete; strength; ultimate deformation; elastic modulus; basalt fiber