

Научная статья

УДК 677.017.452, 539.382.2, 691.175.746

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-3/3-14>

Деформационные характеристики наномодифицированного мелкозернистого бетона

Ольга Владимировна Дудко¹, Наталья Валентиновна Макарова^{2,✉},
Александр Анатольевич Манцыбора², Вадим Владимирович Потапов³,
Дмитрий Анатольевич Ширяев¹

¹ Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

² Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Российская Федерация

³ Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

✉ maknat@bk.ru

Аннотация. Использование нанотехнологий позволяет придавать традиционным конструкционным материалам новые уникальные свойства. Экспериментальное исследование прочностных и деформационных характеристик цементных композитов достаточно сложно в связи с выраженными анизотропными свойствами материала. В данной статье рассмотрен эффект влияния наночастиц диоксида кремния (nano-SiO_2) на деформационные характеристики мелкозернистого бетона с применением метода электротензометрии. На основании проведённого исследования было установлено, что nano-SiO_2 улучшает прочностные свойства бетона, а также влияет на модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Полученные результаты позволяют уточнить данные при расчёте конструкций с использованием наномодифицированных бетонов.

Ключевые слова: модуль деформации, электротензометрия, цементный композит, нанотехнологии, нанокремнезём

Финансирование: Работа выполнена в Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН в рамках госбюджетной темы научных исследований «Исследование проблем механики сплошных сред», номер госрегистрации: АААА-А21-121012290014-3.

Для цитирования: Дудко О.В., Макарова Н.В., Манцыбора А.А., Потапов В.В., Ширяев Д.А. Деформационные характеристики наномодифицированного мелкозернистого бетона // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 3(64). С. 3–14.

MECHANICS OF DEFORMABLE SOLIDS

Original article

Deformative characteristics of nanomodified fine-grained concrete

Olga V. Dudko¹, Natalia V. Makarova^{2,✉}, Alexander A. Mantcybora², Vadim V. Potapov³,
Dmitry A. Shiryaev¹

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² Institute for Automation and Control Processes, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

³ Russian Academy of Sciences Research Geotechnological Center, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

✉ maknat@bk.ru

Abstract. The use of nanotechnology makes it possible to impart new unique properties to traditional construction materials. Experimental studies of the strength and deformation characteristics of cement composites are

rather challenging due to the material's pronounced anisotropic properties. This article examines the effect of silicon dioxide nanoparticles (nano-SiO₂) on the deformation characteristics of fine-grained concrete using the electrical strain gauge method. The study found that nano-SiO₂ enhances the strength properties of concrete and also affects Young's modulus and Poisson's ratio. The results obtained will help refine data for structural calculations involving nanomodified concrete.

Keywords: deformation modulus, electrical strain gauge method, cement composite, nanotechnology, nanosilica

Funding: The work was carried out at the Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences as part of the state budget research topic "Investigation of the problems of the mechanics of solid media", state registration number: AAAAA-A21-121012290014-3.

For citation: Dudko O.V., Makarova N.V., Mantcybora A.A., Potapov V.V., Shiryayev D.A. Deformative characteristics of nanomodified fine-grained concrete. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 3(64), pp. 3–14. (In Russ.).

Введение

В последние десятилетия наблюдается значительный рост интереса к улучшению свойств строительных материалов, особенно бетона, который является одним из наиболее широко используемых материалов в строительстве. Бетон, несмотря на свою популярность и универсальность, имеет ряд недостатков, таких как низкая прочность на растяжение, высокая хрупкость и подверженность различным деформациям под воздействием внешних нагрузок и климатических условий. Эти проблемы становятся особенно актуальными в условиях современного строительства, где требования к долговечности и надёжности конструкций постоянно возрастают. В связи с этим исследование новых добавок и модификаторов, способных улучшить деформационные характеристики бетона, представляет собой важную и актуальную задачу.

Одним из перспективных направлений в области улучшения свойств бетона является использование наноматериалов, таких как наночастицы диоксида кремния (nano-SiO₂). Эти материалы обладают уникальными физико-химическими свойствами, которые могут значительно повлиять на механические характеристики бетона. В частности, nano-SiO₂ способен улучшать прочность, долговечность, водонепроницаемость, стойкость бетона к коррозионному воздействию, что делает его привлекательным для применения в строительной отрасли [1–9].

В работе [1] отмечается, что введение наночастиц SiO₂ в состав бетона оказывает существенное влияние на процессы гидратации цемента, а также на микроструктуру получаемого материала, что в итоге положительно отражается на прочности и деформационных характеристиках бетон. Улучшаются прочностные показатели, такие как прочность на сжатие и изгиб, причём наибольшее влияние наблюдается при добавлении в диапазоне 5–10% по массе цемента.

Экспериментальные исследования показали, что максимальное увеличение прочности на сжатие происходит при добавлении 10% nano-SiO₂, достигая значения до 116,7% через 1 день после затвердевания. При этом к 28-дневному возрасту образцы могут демонстрировать прочность до 110 МПа, что является свидетельством высокой активности nano-SiO₂ в процессе гидратации и формирования структурных свойств бетона [2].

Исследование [9] показало, что добавление даже минимального количества nano-SiO₂, равного 0,25% по массе цемента, даёт положительный эффект, приводя к увеличению прочности бетона на 10%, а прочности на изгиб – на 25%. Здесь отмечается, что с увеличением дозы nano-SiO₂ до 5% и более наблюдается заметное повышение прочности бетона, в то время как более низкие дозировки (1 и 3%) могут негативно сказаться на прочности, что указывает на необходимость оптимизации содержания nano-SiO₂ для достижения максимального эффекта.

Данные, полученные при помощи электронной микроскопии [3] показали, что структуры бетона становятся более целостными при добавлении nano-SiO₂, что выражается в уменьшении общей площади пор. Эта информация предоставляет почву для вывода о долговечности конструкций из бетона с добавками наноразмерных материалов. Это также соотносится с экспериментами, где было установлено, что добавление nano-SiO₂ позволяет значительно сократить образование трещин при усадке [1].

В ряде статей отмечается, что напо-SiO_2 влияет не только на прочностные характеристики, но и на деформационные свойства бетона. Исследования показали, что использование напо-SiO_2 ведёт к улучшению стабильности формы бетона под нагрузкой, а также к уменьшению его деформаций [4]. В условиях повышенной влажности эта добавка способствует уменьшению усадки бетона, что особенно важно для конструкций, подверженных усадочным напряжениям. Бетоны с каркасной структурой, содержащей напо-SiO_2 , демонстрируют, как отмечается в работе [3], значительно меньшие относительные деформации по сравнению с традиционными составами. Здесь предполагается, что результат улучшенной адгезии частиц данного модификатора с компонентами цементного теста приводит к повышению прочностных качеств и снижению коэффициента ползучести. Экспериментальные исследования показали [10], что введение напо-SiO_2 позволяет повысить предел пластичности и структурную прочность, снизить относительные пластические деформации цементной смеси на стадии изготовления. Это обуславливается, как отмечается авторами, в первую очередь формированием плотной структуры гидратных новообразований цементирующего вещества.

Анализ результатов [11, 12] многочисленных экспериментальных исследований с 2001 года показал, что ещё до сих пор не сформировалось единого мнения о влиянии нанокремнезёма на прочностные и деформационные свойства цементных композитов. Это связано, во-первых, со свойствами самой добавки, способами её получения. Так, на рынке сейчас предлагается как кристаллическая, так и аморфная нанопудра с различными дисперсными составами и посторонними примесями. А во-вторых, даже в лабораторных условиях в состав бетонной смеси вводятся дополнительные добавки различного химического и минерального состава – пластификаторы, фибра, метакраин и пр., что затрудняет оценить влияние именно нанокремнезёма.

Развитие методов расчёта строительных конструкций зданий, сооружений на основе вычислительных комплексов, применения BIM-технологий требует уточнения прочностных и деформационных характеристик новых материалов. Принято, что прочность бетона определяется испытанием на одноосное сжатие, определяется класс бетона, а все остальные расчётные параметры принимаются по соответствующим таблицам в нормах проектирования. Развитие нанотехнологий в применении к строительной отрасли требует более тщательного исследования всего спектра характеристик новых материалов, что подчёркивает необходимость проведения дополнительных экспериментов и анализа.

Ключевыми параметрами, характеризующими деформационные свойства бетона, являются предельные относительные деформации, модуль Юнга, коэффициент Пуассона. Для цементных композитов с ярко выраженной анизотропией экспериментальные исследования представляются достаточно сложными и требуют специального оборудования. Существуют стандарты, регламентирующие методы испытаний и допустимые значения модуля упругости: ГОСТ 10180 (Стандарт РФ); EN 206 (Европейский стандарт); ASTM C469/C469M-22 (Американский стандарт); BS 8500 (Британский стандарт) и пр. Современный парк испытательных машин для реализации рекомендуемых норм использует навесные, прижимные либо лазерные экстензометры [13–15]. Для гетерогенного материала получаемые данные не всегда отражают истинные свойства материала, а чаще являются результатом взаимодействия «образец – испытательное оборудование». ГОСТ 10180 допускает применение метода электротензометрии для получения деформационных характеристик с наклеиванием электротензорезистора непосредственно на образец. Тензометрические методы исследования деформаций в настоящее время широко используются для решения задач, связанных с испытанием элементов инженерных конструкций на стадии опытно-конструкторских работ и в процессе эксплуатации инженерных конструкций [16, 17]. В работе [18] рассматриваются преимущества метода электротензометрии для хрупких материалов, в том числе и бетона, в процессе исследования деформационных характеристик на малоразмерных образцах в лабораторных условиях. С появлением на рынке испытательного оборудования современных аналого-цифровых устройств (АЦП) и программных средств по обработке больших данных этот метод даёт уникальные возможности для исследования физических свойств конструкционных материалов.

Таким образом, использование нанокремнезёма в цементных композитах представляет собой перспективное направление для получения высокоэффективных строительных материалов. В то же время, несмотря на значительное количество данных о прочностных характеристиках наномодифицированных бетонов, деформационные характеристики мало исследованы, результаты носят противоречивый характер в силу сложности испытаний и необходимости специального оборудования.

Цель данной работы заключается в исследовании влияния нанокремнезёма на деформационные характеристики мелкозернистого цементного композита с использованием метода электротензометрии.

Материалы и методы

Для изготовления образцов из мелкозернистого бетона в качестве вяжущего вещества использовался портландцемент ЦЕМ II/A-П 32.5 Б (Спасскцемент, РФ), который имеет следующий минеральный состав: C_3S – 67%, C_2S – 9%, C_3A – 5%, C_4AF – 13%. В качестве мелкого заполнителя применялся песок Раздольненского месторождения (РФ) с модулем крупности 2,5.

В качестве наномодификатора применялся гидротермальный нанокремнезём, полученный методом криохимической вакуум-сублимационной сушки из растворов Мутновского месторождения (Камчатка, Дальний Восток, РФ) [1].

Изготовлено две серии образцов. Расход цемента в обеих сериях – 350 кг/м³. Принято решение не применять в эксперименте какой-либо пластификатор для чистоты эксперимента, поэтому использовалось высокое водоцементное отношение 0,5. Серия 1 не содержит нанокремнезём. В серии 2, на основе ранее выполненных исследований [9], расход нанопорошка составил 1% мас. цем., который перед введением в бетонную смесь был предварительно гомогенизирован с частью воды затворения.

В каждой серии было изготовлено по 6 призматических образцов для испытания на сжатие и растяжение размерами 40×40×160 мм и по три кубических образца размерами 70,7×70,7×70,7 для определения кубиковой прочности. Для испытания на растяжение к призматическим образцам после их твердения были приклеены дополнительные металлические устройства. Общий вид образцов представлен на рис. 1а.



Рис. 1. Призматические образцы мелкозернистого бетона:

а – образцы с подготовленной для наклеивания электротензисторов поверхностью граней;
б – образцы с наклеенными электротензисторами

Fig. 1. Prismatic samples of fine-grained concrete:

a – samples with a surface prepared for gluing strain gauges; b – samples with glued strain gauges

Для измерения деформаций на каждый призматический образец на противоположных гранях было наклеено по два электротензистора вдоль оси образца и по два – поперек (рис. 1б). В качестве датчиков были использованы электротензорезисторы проволоочного типа с базой измерений 10 мм производства JUXING, КНР (рис. 2). Датчики наклеивались на образцы из

мелкозернистого бетона таким образом, чтобы получить данные вдоль действия усилия и перпендикулярно к последнему. Метод электротензометрии опирается на использование датчиков, которые позволяют точно фиксировать деформации бетона под воздействием внешних сил. Это даёт возможность оценивать не только величину деформаций, но и динамику их изменения. В качестве регистрирующего оборудования применено устройство измерительно-управляющее УИУ 2002 производства ООО «НПП Парк-Центр». Устройство УИУ 2002 предоставляет возможность получать данные измерений 10^5 в минуту.

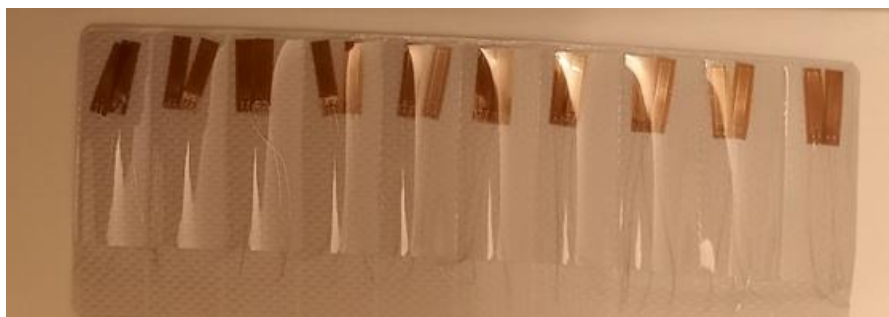


Рис. 2. Электротензорезисторы с базой измерения 10 мм

Fig. 2. Electrical strain gauges with a measurement base of 10 mm

Испытание образцов на растяжение и сжатие выполнялось с использованием универсальной испытательной машины SHIMADZU AGS-10kN. Скорость нагружения образцов устанавливалась по скорости перемещения подвижной траверсы 0,1 мм/с; при этом время испытаний каждого образца составляло 2–3 мин. Общий вид оборудования в процессе испытания представлен на рис. 3. Испытание кубических образцов на одноосное сжатие выполнялось по ГОСТ 10180.

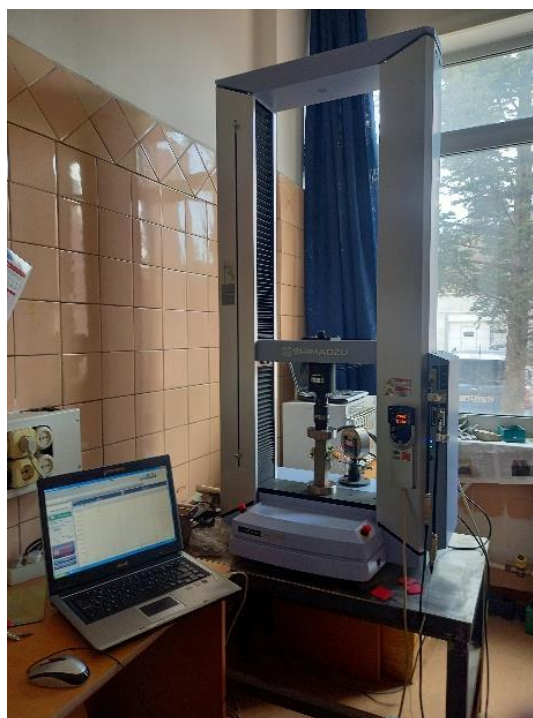


Рис. 3. Общий вид оборудования в процессе испытания

Fig. 3. General view of the testing equipment

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний на одноосное сжатие двух серий образцов мелкозернистого бетона, подготовленных для этого исследования, приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Результаты испытания кубических образцов бетона на одноосное сжатие
Results of cube uniaxial compression tests

Серия	Образец	Геометрические размеры образца, мм			Вес P, кг	Средняя плотность D, кг/м³	Разрушающее усилие F, N	Предельное напряжение R, МПа	Коэффициент вариации K _в , %
		a	b	h					
Серия 1	11	74	72	72	0,897	2339	89540	16,81	6,59
	12	72	69	71	0,816	2312	87230	17,56	
	13	70	69	73	0,805	2284	74400	15,40	
	Среднее значение					2312		16,59	
Серия 2	21	71	69	74	0,836	2306	94400	19,27	6,40
	22	71	69	73	0,819	2289	97500	19,90	
	23	70	67	73	0,810	2365	109200	23,28	
	Среднее значение					2320		20,82	

Среднее значение прочности образцов серии 1 составило $R = 16,59$ МПа при коэффициенте вариации $K_v = 6,59\%$, что, согласно ГОСТ 26633, соответствует классу бетона по прочности на осевое сжатие В12,5. Среднее значение прочности образцов серии 2 составило $R = 20,82$ МПа при коэффициенте вариации $K_v = 6,40\%$, что, согласно ГОСТ 26633, соответствует классу бетона по прочности на осевое сжатие В15.

Результаты испытаний на одноосное растяжение и сжатие двух серий призматических образцов мелкозернистого бетона, подготовленных для этого исследования, приведены в табл. 2. Примеры полученных при испытании на одноосное растяжение диаграмм с использованием испытательной машины AG-X приведены на рис. 4.

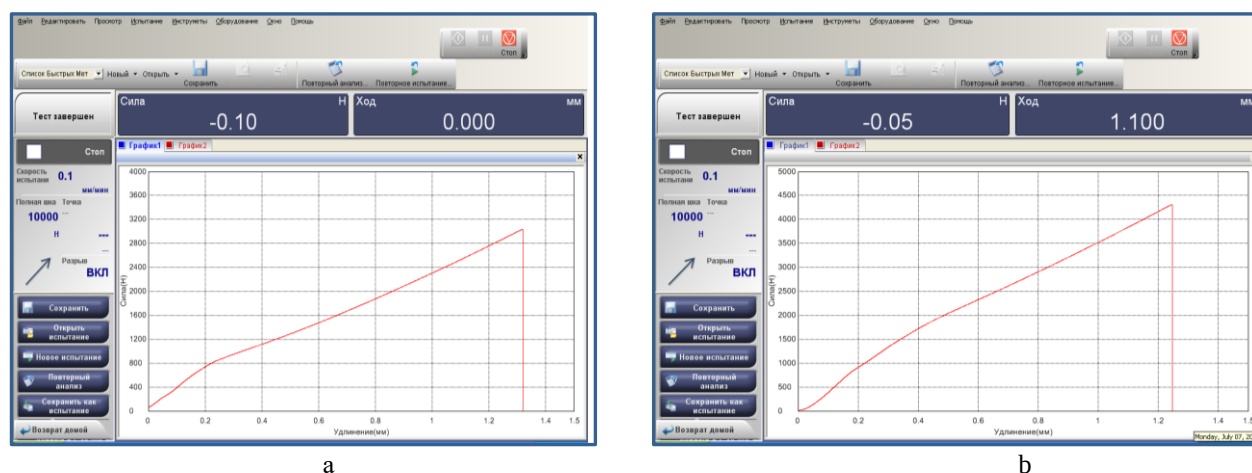


Рис. 4. Диаграммы деформирования при испытании на одноосное растяжение:
а) образец 1-5; б) образец 2-6

Fig. 4. Stress-strain curves for uniaxial tensile test:
a) sample 1-5; b) sample 2-6

Примеры полученных при испытании на одноосное сжатие диаграмм с использованием испытательной машины AG-X приведены на рис. 5

Среднее значение прочности на растяжение призматических образцов серии 1 составило $\sigma_t = 1,56$ МПа, серии 2 – $\sigma_t = 2,64$ МПа. По результатам данного испытания можно сделать вывод, что прочность на одноосное сжатие при введении в бетонную смесь папо-SiO₂ увеличивается более чем на 40%.

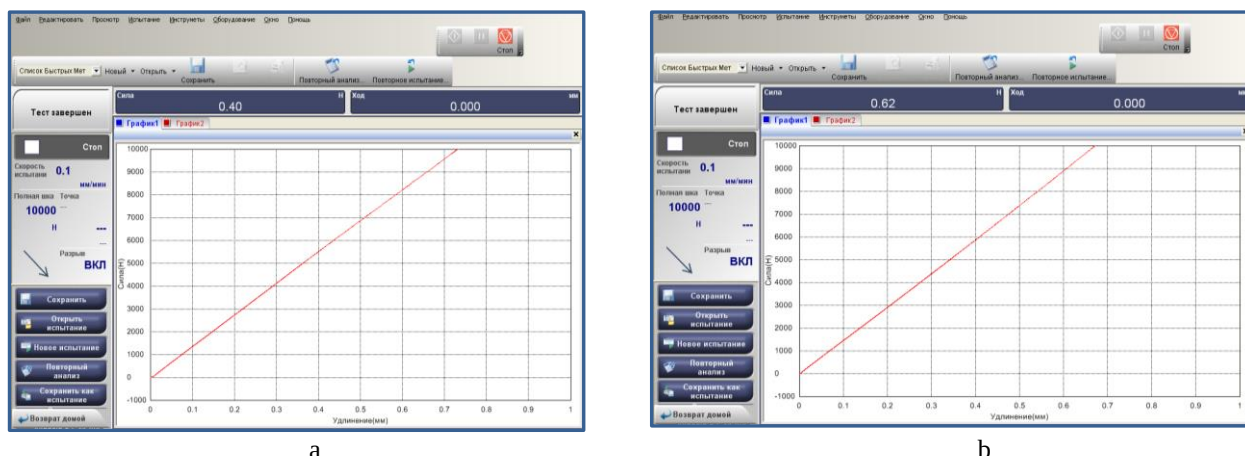


Рис. 5. Диаграммы деформирования при испытании на одноосное сжатие:
а) образец 1-4; б) образец 2-7

Fig. 5. Strain diagrams for uniaxial compression test:
 а) sample 1-4; б) sample 2-7

Таблица 2 / Table 2

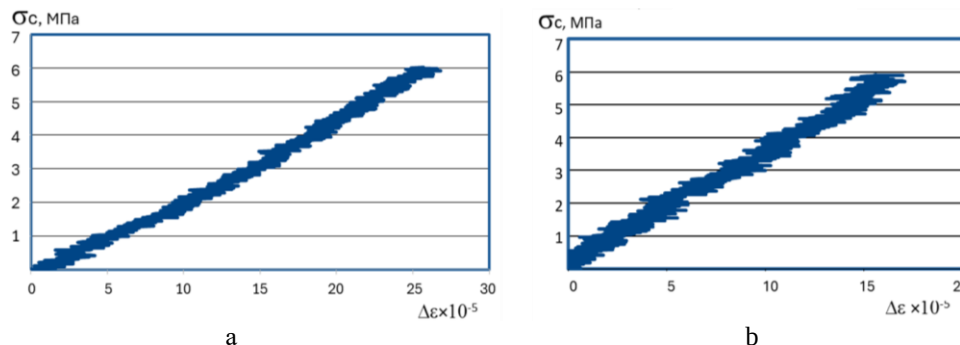
Экспериментальные данные испытания призматических образцов
 Results of prismatic uniaxial tests

Серия	НДС	Образец	Геометрические размеры поперечного сечения, мм		Площадь сечения, см ²	Максимальная нагрузка F, N	Максимальные напряжения σ , МПа
			a	b			
Серия 1	Растяжение	1-1	40,42	41,28	16,69	2323	1,39
		1-3	40,36	40,22	16,23	2795	1,72
		1-5	40,22	41,04	16,51	2600	1,58
		Среднее значение					1,56
	Сжатие	1-2	40,5	41,2	16,69	10000	5,99
		1-4	40,22	41,26	16,59	10000	6,03
		1-6	40,22	41,04	16,51	10000	6,06
		Среднее значение					6,03
Серия 2	Растяжение	2-3	40,04	41,62	16,66	5563	3,34
		2-5	40,94	41,14	16,84	3309	1,96
		2-6	40,14	40,82	16,39	4308	2,63
		Среднее значение					2,64
	Сжатие	2-1	40,06	40,02	16,032	10000	6,24
		2-2	40,48	40,48	16,386	10000	6,13
		2-7	40,66	41,52	16,882	10000	5,92
		Среднее значение					6,09

Призматические образцы при одноосном сжатии испытывались до одинаковой нагрузки 10 кН, т.е. для исследования деформационных характеристик в упругой стадии работы материала. В табл. 2 проведены геометрические размеры образцов и полученные предельные деформации сжатия, практически одинаковые для обеих серий. На рис. 5 показаны диаграммы деформирования образцов 1-4 и 2-7. При практически одинаковых значениях сжимающих напряжений перемещение подвижной траверсы у образца 1-4 составляет 0,73 мм, а у образца

2-7 – 0,67 мм, что свидетельствует о повышении жёсткости материала. Аналогичные результаты получены и при сравнении результатов испытания остальных образцов.

Величина перемещения подвижной траверсы испытательной машины в полной мере не отражает деформационные свойства материала, поэтому в данной работе с этой целью использовалось тензометрическое оборудование. Характерные графики «напряжение σ – относительная деформация $\Delta\epsilon$ » при сжатии образцов представлены на рис. 6.



**Рис. 6. Графики « σ – $\Delta\epsilon$ » при испытании на одноосное сжатие:
а) образец 1-4; б) образец 2-7**

**Fig. 6. Stress-strain curves for uniaxial compression test:
a) sample 1-4; b) sample 2-7**

Результаты определения деформационных характеристик мелкозернистого бетона серий 1 и 2 при испытании призматических образцов на осевое растяжение и сжатие приведены в табл. 3. Полученные в результате статистической обработки результатов эксперимента данные использовались для расчёта начального модуля упругости E и коэффициента Пуассона ν , их значения также приведены в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Результаты экспериментального определения деформационных характеристик бетонных образцов
Experimental results of deformability parameters of concrete samples

Серия	НДС	Образец	$\Delta\epsilon_c \times 10^{-5}$			$\Delta\epsilon_l \times 10^{-5}$			ν	$E \times 10^5$, МПа
			T2	T4	T2=T4	T1	T3	T1=T3		
Серия 1	Растяжение	1-1	-2,54	-2,90	-2,72	9,46	8,46	8,96	0,30	18,06
		1-3	-2,18	-2,57	-2,38	9,53	12,19	10,86	0,22	28,99
		1-5	-2,44	-3,23	-2,83	12,88	9,43	11,16	0,25	21,94
		Среднее значение			-2,64			10,35	0,29	29,96
	Сжатие	1-2	2,22	3,51	2,86	-19,21	-32,05	-25,63	-	31,05
		1-4	1,66	2,74	2,20	-26,24	-46,65	-36,45	-	20,65
		1-6	3,22	2,32	2,77	-17,67	-31,83	-24,75	-	22,93
		Среднее значение			2,61			-28,94		24,88
Серия 2	Растяжение	2-3	-1,21	-2,08	-1,64	15,15	5,27	10,21	0,16	30,12
		2-5	-1,84	-1,75	-1,79	7,54	6,49	7,02	0,26	33,65
		2-6	-1,88	-2,53	-2,02	11,37	9,33	10,35	0,21	30,53
		Среднее значение			-1,88			9,19	0,21	31,43
	Сжатие	2-1	1,82	2,45	2,13	-36,7	-3,71	-20,21	-	37,25
		2-2	2,12	1,51	1,81	-32,22	-37,9	-35,06	-	22,75
		2-7	2,39	2,56	2,47	-13,27	-29,0	-21,14	-	35,02
		Среднее значение			2,14			-25,47		31,67

Сравнительный анализ значений деформаций образцов 1 и 2 серий показал, что продольные относительные деформации при сжатии $\Delta\epsilon_l$ уменьшились на 12%, а при растяжении – на 11%. Поперечные относительные деформации $\Delta\epsilon_c$ при сжатии уменьшились на 18%, а при растяжении – на 29%. Модуль продольной деформации E при сжатии увеличился на 21% и составил $E = 31,67$ МПа. Коэффициент поперечной деформации ν при растяжении уменьшился на 28% и составил $\nu = 0,21$.

Заключение

В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования прочностных и деформационных характеристик наномодифицированного мелкозернистого бетона, проведённого на кубических и призматических образцах. В качестве наномодификатора использовался порошок аморфного нанокремнезёма. Относительные деформации в процессе нагружения фиксировались с использованием метода электротензометрии.

Сравнительный анализ экспериментальных данных наномодифицированного бетона (Серия 2) и контрольного бетона (Серия 1) позволил сделать следующие выводы:

- прочность на сжатие и растяжение увеличилась, что подтверждает гипотезу о дополнительном внутреннем микроармировании [9] за счёт дополнительного структурообразования, инициатором которого являются наночастицы SiO_2 ;
- снижение относительных деформаций и повышение величины деформационных модулей при сжатии и растяжении свидетельствует о получении материала с повышенными жёсткостными характеристиками;
- предложенная методика комплексного исследования механических свойств цементных композитов позволяет с высокой точностью определять как прочностные, так и деформационные характеристики, используемые при расчёте строительных конструкций, такие как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предельные растяжимость и сжимаемость.

В работе исследовались составы бетонных смесей с добавкой только нанокремнезёма, что предполагает значительный расход воды затворения и, соответственно, невысокую прочность (Класс бетона повысился с В12,5 до В15). Для получения высокотехнологичных материалов необходимо разрабатывать более сложные составы с применением, в первую очередь, пластификаторов. Результаты, полученные в данном исследовании, позволят учитывать непосредственное влияние порошка аморфного нанокремнезёма, полученного из термальных источников, на конечные прочностные и деформационные свойства материала, а на его основе создавать новые конструкционные материалы с заданными эксплуатационными свойствами.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

О.В. Дудко – разработка концепции и развитие методологии исследования; обработка и анализ результатов исследования; составление итоговых выводов; Н.В. Макарова – разработка концепции и развитие методологии исследования; теоретический обзор; руководство экспериментальной частью, анализ результатов исследования; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов; А.А. Манцыбора – изготовление образцов, подготовка образцов к исследованию, проведение эксперимента, статистическая обработка результатов эксперимента, составление итоговых выводов; В.В. Потапов – научное консультирование; анализ результатов исследования; составление итоговых выводов; Д.А. Ширяев – изготовление образцов, подготовка образцов к исследованию, проведение эксперимента. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

O.V. Dudko – development of the concept and development of the research methodology; processing and analysis of the research results; drawing final conclusions; N.V. Makarova – development of the concept and development of the research methodology; theoretical review; supervision of the experimental part, analysis of the research results; writing the original text of the article; drawing final conclusions; A.A. Mantsybora – preparation of samples, preparation of samples for the study, conducting the experiment, statistical processing of the experimental results, drawing final conclusions; V.V. Potapov – scientific consulting; analysis of the research results; drawing final conclusions; D.A. Shiryayev – preparation of samples, preparation of samples for the study, conducting the experiment. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Флорес-Вивиан И., Прадото Р., Кожухова М.И., Потапов В.В., Соболев К.Г. Влияние SiO_2 -наночастиц на свойства цементных материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 11. С. 6–16. DOI: https://doi.org/10.12737/article_5bf7e352d68e96.02791207
2. Горев Д.С., Потапов В.В., Горева Т.С., Портнягин Н.Н. Повышение характеристик бетонов вводом наночастиц SiO_2 // Современные наукоёмкие технологии. 2018. № 7. С. 26–30. DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.37073>
3. Potapov V., Efimenko Y., Fediuk R., Gorev D. Effect of hydrothermal nanosilica on the performances of cement concrete // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 269. P. 121307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121307>
4. Соболев К. Современные достижения нанотехнологии в области цемента и бетона // Цемент и его применение. 2016. № 4. С. 96–102.
5. Янкович К., Станкович С.Й., Стоянович М., Бойович Д., Антич Л. Влияние нанокремнезёма и типа заполнителя на свойства высокопрочного бетона // Цемент и его применение. 2017. № 4. С. 118–120.
6. AlTawaiha H., Alhomaidat F., Eljufout T. A review of the effect of nano-silica on the mechanical and durability properties of cementitious composites // Infrastructures. 2023. Vol. 8, № 9. P. 132. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8090132>
7. Carneiro L., Houmard M., Rocha V., Ludvig P. The effect of nanosilica incorporation on the properties of cement-based materials with and without other supplementary admixtures. A literature review // Open Const Build Tech J. 2022. Vol. 16. P. e187483682207290. DOI: <http://dx.doi.org/10.2174/18748368-v16-e2207290>
8. Hamada H. et al. Use of nano-silica in cement-based materials—a comprehensive review // Journal of Sustainable Cement-Based Materials. 2023. Vol. 12, № 10. P. 1286–1306. DOI: <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2214146>
9. Makarova N.V. et al. Influence of hydrothermal nanosilica on mechanical properties of plain concrete // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 744. P. 126–130. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.744.126>
10. Шведова М.А., Артамонова О.В., Славчева Г.С. Исследование влияния многокомпонентной добавки на структурообразование и твердение цементных композитов // Конденсированные среды и межфазные границы. 2022. Т. 24, № 1. С. 116–128. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9062>
11. Mohammad Tabish et al. Effect of nano-silica on mechanical, microstructural and durability properties of cement-based materials: A review // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 65. P. 105676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105676>
12. Sajjad Shokouh et al. Investigating the fatigue performance of Nano-Silica-modified concrete with various admixtures: An experimental study // Results in Engineering. 2025. Vol. 25. P. 103887.
13. Yi Lu et al. Experimental study on multiaxial tensile behaviors of concrete // Construction and Building Materials. 2025. Vol. 487. P. 141975.
14. Балек А.Е. и др. Исследование темпа набора прочностных и деформационных свойств бетона в шахтных и лабораторных условиях // Проблемы недропользования. 2024. № 4(43). С. 64–76. DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2024.04.064>
15. Мордовский С.С. Начальный модуль упругости бетона и способы его определения // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии. 2022. С. 37–45. EDN: GCUMDD
16. Калафатов Д.А. и др. Применение тензометрического метода определения НДС в диафрагмах при обследовании зданий и сооружений // Строительство и техногенная безопасность. 2022. № 26(78). С. 35–40. EDN: KXMHPG
17. Трекин Н.Н. и др. Экспериментально-теоретическое исследование прочности плит на продавливание // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16, вып. 8. С. 1006–1014. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.8.1006-1014>

18. Smirnov I.V. et al. A unified experimental-theoretical approach to predict critical stress characteristics of failure and yielding under quasi-static and dynamic loading // *Engineering Fracture Mechanics*. 2020. Vol. 225. P. 106197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.10.023>

REFERENCES

1. Flores-Vivian I., Pradoto R., Kozhuhova M.I., Potapov V.V., Sobolev K.G. The effect of SiO₂ nanoparticles on performance of cement-based materials. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2018, no. 11, pp. 6–16. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5bf7e352d68e96.02791207
2. Gorev D.S., Potapov V.V., Goreva T.S., Portnyagin N.N. Increase the characteristics of concrete by the introduction of SiO₂ nanoparticles. *Modern High Technologies*, 2018, no. 7, pp. 26–30. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.37073>
3. Potapov V., Efimenko Y., Fediuk R., Gorev D. Effect of hydrothermal nanosilica on the performance of cement concrete. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 269, p. 121307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121307>
4. Sobolev K. Modern developments in nanotechnology and nanoengineering of cement and concrete. *Journal Cement and Its Applications*, 2019, no. 3, pp. 96–102. (In Russ.).
5. Jankovic K., Stankovic S.J., Stojanovic M., Bojovic D., Antic L. Effect of nanosilica and filler type on the properties of high-strength concrete. *Journal Cement and Its Applications*, 2017, no. 4, pp. 118–120. (In Russ.).
6. AlTawaiha H., Alhomaidat F., Eljufout T. A review of the effect of nano-silica on the mechanical and durability properties of cementitious composites. *Infrastructures*, 2023, vol. 8, no. 9, p. 132. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures8090132>
7. Carneiro L., Houmard M., Rocha V., Ludvig P. The effect of nanosilica incorporation on the properties of cement-based materials with and without other additive admixtures. A literature review. *Open Const Build Tech J*, 2022, vol. 16, p. e187483682207290. DOI: <http://dx.doi.org/10.2174/18748368-v16-e2207290>
8. Hamada H. et al. Use of nano-silica in cement-based materials – a comprehensive review. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2023, vol. 12, no. 10, pp. 1286–1306. DOI: <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2214146>
9. Makarova N.V. et al. Influence of hydrothermal nanosilica on mechanical properties of plain concrete. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 744, pp. 126–130. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.744.126>
10. Shvedova M.A., Artamonova O.V., Slavcheva G.S. Investigation of the effect of a multicomponent additive on the structure formation and hardening of cement composites. *Condensed Matter and Interphases*, 2022, vol. 24, no. 1, pp. 116–128. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9062>
11. Mohammad Tabish et al. Effect of nano-silica on mechanical, microstructural, and durability properties of cement-based materials: A review. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 65, p. 105676. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2022.105676>
12. Sajjad Shokouh et al. Investigating the fatigue performance of nano-silica-modified concrete with various admixtures: An experimental study. *Results in Engineering*, 2025, vol. 25, p. 103887.
13. Yi Lu et al. Experimental study on multiaxial tensile behaviors of concrete. *Construction and Building Materials*, 2025, vol. 487, p. 141975.
14. Balek A.E. et al. Study of the rate of concrete strength and deformation properties set in mine and laboratory conditions. *Problems of Subsoil Use*, 2024, no. 4(43), pp. 64–76. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25635/2313-1586.2024.04.064>
15. Mordovskiy S.S. Initial modulus of elasticity of concrete and ways to determine it. *Traditions and innovations in construction and architecture. Construction and construction technologies*, 2022, pp. 37–45. (In Russ.).
16. Kalafatov D.A. et al. Tensometric method for determining SSS in diaphragm. *Construction and Technological Safety*, 2022, no. 26(78), pp. 35–40. (In Russ.).
17. Trekin N.N. et al. Experimental and theoretical study of the strength of plates for pressure. *Vestnik MGSU*, 2021, vol. 16, iss. 8, pp. 1006–1014. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.8.1006-1014>

18. Smirnov I.V. et al. A unified experimental-theoretical approach to predict critical stress characteristics of failure and yielding under quasi-static and dynamic loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, vol. 225, p. 106197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.10.023>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Дудко Ольга Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент департамента программной инженерии и искусственного интеллекта, Институт математики и компьютерных технологий, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ dudko.ov@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7493-6360>

Olga V. Dudko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Software Engineering and Artificial Intelligence, Institute of Mathematics and Computer Technologies, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Макарова Наталья Валентиновна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Лаборатории механики необратимого деформирования, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Владивосток, Российская Федерация),

✉ maknat@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2581-8066>

Natalia V. Makarova, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Irreversible Deformation, Institute for Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russian Federation).

Манцыбора Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, научный сотрудник Лаборатории механики необратимого деформирования, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (Владивосток, Российская Федерация),

✉ manzubor@iacp.dvo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5060-5436>

Alexander A. Mantcybora, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Irreversible Deformation, Institute for Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russian Federation).

Потапов Вадим Владимирович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук (Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация),

✉ vadim_p@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0008-6616-1460>

Vadim V. Potapov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Principal Researcher at the Russian Academy of Sciences Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation).

Ширяев Дмитрий Анатольевич – магистрант, Политехнический институт, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ shiryayev.dan@dvfu.ru

Dmitry A. Shiryayev, Master's Student at the Polytechnic Institute, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 10.06.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 17.09.2025.

Принята к публикации / Accepted: 24.09.2025.