

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.3

Вязкость разрушения мелкозернистых бетонов, модифицированных минеральными добавками на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород

Т.А. Низина¹, В.В. Володин¹, Н.И. Макридин², О.В. Тараканов²

Татьяна Анатольевна Низина, Владимир Владимирович Володин

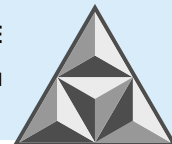
¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
Саранск, Российская Федерация

nizinata@yandex.ru, volodinvv1994@gmail.com

Николай Иванович Макридин, Олег Вячеславович Тараканов

²Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Российская Федерация

makridin1934@mail.ru, tarov60@mail.ru

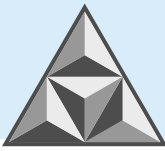


Доступным способом повышения технологических и физико-механических свойств цементных бетонов является применение модифицирующих добавок. Однако высокая стоимость и территориальная ограниченность производства наиболее эффективных модификаторов (микрокремнезем, метакаолин) не позволяет в полном объеме удовлетворять возрастающий спрос на них. Разработка минеральных добавок на основе сырья из близкорасположенных доступных источников помогает решить проблему дефицита модифицирующих добавок и снизить объемы потребления портландцемента. Представлены результаты определения вязкости разрушения (трещиностойкости) мелкозернистых бетонов из самоуплотняющихся смесей, модифицированных термоактивированной глиной (Никитское месторождение, г. Саранск, Республика Мордовия) и термоактивированной смесью глины и известняка (с. Атемар, Республика Мордовия). Трещиностойкость мелкозернистых бетонов оценивали при равновесных испытаниях на изгиб образцов I типа. Установлено повышение на 9-38% энергетических характеристик вязкости разрушения модифицированных мелкозернистых бетонов при увеличении расхода вяжущего за счет введения в состав исследуемых минеральных добавок.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, самоуплотняющиеся смеси, трещиностойкость, минеральные добавки, термоактивированная глина, известняк, поликарбоксилатный пластификатор

Для цитирования:

Низина Т.А., Володин В.В., Макридин Н.И., Тараканов О.В. Вязкость разрушения мелкозернистых бетонов, модифицированных минеральными добавками на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 2. С. 43-54. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n2_2023



SCIENTIFIC ARTICLE

Fracture toughness of fine-grained concretes modified with mineral additives based on thermally activated clay and carbonate rocks

T.A. Nizina¹, V.V. Volodin¹, N.I. Makridin², O.V. Tarakanov²

Tatyana A. Nizina, Vladimir V. Volodin

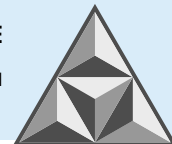
¹National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

nizinata@yandex.ru, volodinvv1994@gmail.com

Nikolay I. Makridin, Oleg V. Tarakanov

²Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

makridin1934@mail.ru, tarov60@mail.ru

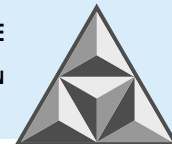


The use of modifying additives in cement concrete compositions is the most affordable way to improve their technological, physical, and mechanical properties. However, the high cost and territorial limitation of the most effective modifiers (microsilica, metakaolin) production do not meet the growing customer's demand. The development of mineral additives based on local raw materials will bridge deficit the most common additives, as well as reduce the consumption of Portland cement. The paper presents the results of determining the fracture toughness (crack growth resistance) of fine-grained concretes obtained from self-compacting concrete mixtures modified with thermally activated clay (Nikitskoye deposit, Saransk, Republic of Mordovia) and thermally activated mixture of clay and limestone (Atemar village, Republic of Mordovia). The paper contains the assessment of crack resistance of fine-grained concretes conducted in accordance with GOST 29167-2021 during equilibrium bending tests of type I samples. The paper found a 9-38% increase in fracture toughness of modified fine-grained concretes with increasing binder consumption due to the introduction of mineral additives in the composition under study.

Keywords: crack resistance, fine-grained concrete, self-compacting mixtures, mineral additives, thermoactivated clay, limestone, polycarboxylate plasticizer, fine sands

For citation:

Nizina, T.A, Volodin, V.V., Makridin, N.I. & Tarakanov, O.V. (2023) Fracture toughness of fine-grained concretes modified with mineral additives based on thermally activated clay and carbonate rocks, *Smart Composite in Construction*, 4(2), pp. 43-54 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n2_2023



ВВЕДЕНИЕ

Необходимость обеспечения высоких технологических и эксплуатационных характеристик современных цементных бетонов предопределяет актуальность исследований по разработке и совершенствованию их рецептуры и технологии получения [1-4]. Особое внимание в последние годы посвящено разработке составов модифицированных мелкозернистых бетонов, что весьма актуально для регионов, где отсутствует качественный крупный заполнитель. При этом важной задачей является разработка самоуплотняющихся цементных композиций, обладающих повышенными прочностными и эксплуатационными характеристиками, удобоукладываемостью. Необходимые технологические характеристики самоуплотняющихся бетонных смесей достигаются за счет введения в них суперпластификаторов и активных минеральных добавок [5-8]. Однако объемы производства минеральных добавок не способны удовлетворить возрастающие потребности бетонной промышленности, что связано с территориальной ограниченностью, непостоянством состава и высокой стоимостью наиболее востребованных и эффективных модификаторов (микрокремнезем, метакаолин, золы, доменные гранулированные шлаки).

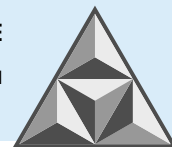
В связи с этим актуальным направлением исследований является разработка модифицирующих добавок на основе широко распространенных глинистых пород [9-11]. При этом доказано [12-14], что такие породы после обжига обладают активностью, не уступающей широко распространенным минеральным добавкам – микрокремнезему и метакаолину. Для средней полосы России перспективными минеральными добавками могут стать термоактивированные полиминеральные глины, применяемые самостоятельно и в комплексах с карбонатными породами [15-18].

Вязкость разрушения (трещиностойкость) является важным критерием, используемым при исследовании рядовых бетонов и бетонов нового поколения – дисперсно-армированных, порошково-активированных и т.д. [19, 20]. Этот показатель характеризует способность материала тормозить развитие дефектов структуры, противостоять хрупкому и постепенному разрушению в течение заданного времени [1, 21-25]. Основные достижения при изучении механического поведения твердых тел связаны с использованием концепции Гриффитса – Орована – Ирвина [22]. Впервые выразить энергию разрушения материала через работу, необходимую для образования трещины, предложил А.А. Гриффитс [26]. Предложенный энергетический критерий использован при оценке хрупкого разрушения однородных материалов, в частности стекла. Позже Дж. Ирвин и Е. Орован рекомендовали использовать теорию А.А. Гриффитса для изучения квазихрупкого разрушения металлов, заменив константу поверхностной энергии материала на удельную работу пластической деформации [27, 28]. Также Дж. Ирвин показал, что поля деформаций и напряжений на фронте трещины можно описать с помощью коэффициента интенсивности напряжений [27].

Цель данной работы – исследование влияния минеральных добавок на основе глинистых и карбонатных пород на вязкость разрушения модифицированных мелкозернистых бетонов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования использовали мелкозернистые цементные бетоны в возрасте 28 сут. со следующими физико-механическими показателями: предел прочности на растяжение при изгибе – 8.2-9.5 МПа; предел прочности при сжатии – 59.2-72.1 МПа; плотность – 2248-2327 кг·м⁻³ (табл. 1). Мелкозернистые бетоны изготавливали из



портландцемента ЦЕМ I 42,5Б производства АО «Мордовцемент», песка с модулем крупности $M_{кр} = 1.8$ и ряда минеральных добавок: ТГН – Никитская глина, прошедшая термическую обработку и измельчение, до удельной поверхности $7800 \text{ см}^2 \cdot \text{г}^{-1}$ (длительность помола 1 ч); ТС (ГН+ИА) – смесь 2:1 по массе Никитской глины и Атемарского известняка после термической обработки. Обжиг добавок ТГН и ТС (ГН+ИА) производили при температуре $700 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 2 ч. В качестве пластифицирующей добавки применяли поликарбоксилатный суперпластификатор Melflux 5581 F.

Таблица 1. Состав и физико-механические свойства мелкозернистых бетонов

Table 1. Composition and physical and mechanical properties of fine-grained concrete

Номер состава	Номер группы	Рецептурно-технологические показатели				Физико-механические характеристики		
		П/(Ц+МД), отн. ед.	В/(Ц+МД), отн. ед.	МД/(Ц+МД), %		Плотность, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	Предел прочности в проектном возрасте (28 сут.), МПа	
				ТГН	ТС (ГН+ИА)		при сжатии	при изгибе
1 (К1)	1	2.05	0.29	–	–	2299	62.8	8.2
2		2.04	0.29	10	–	2298	66.7	8.7
3		2.04	0.29	–	10	2293	64.4	8.4
4 (К2)	2	1.86	0.29	–	–	2321	69.3	10.6
5		1.84	0.29	15	–	2282	72.1	8.2
6		1.84	0.29	–	15	2271	68.2	8.5
7(К3)	3	1.66	0.27	–	–	2327	74.3	11.4
8		1.63	0.27	20	–	2280	65.6	8.9
9		1.64	0.27	–	20	2264	59.2	9.5
10 (К4)	–	2.37	0.32	–	–	2248	50.9	7.5

Трещиностойкость мелкозернистых бетонов, модифицированных исследуемыми минеральными добавками, исследовали согласно ГОСТ 29167-2021 при равновесных испытаниях на изгиб образцов первого типа (рис. 1) с размерами $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}$.

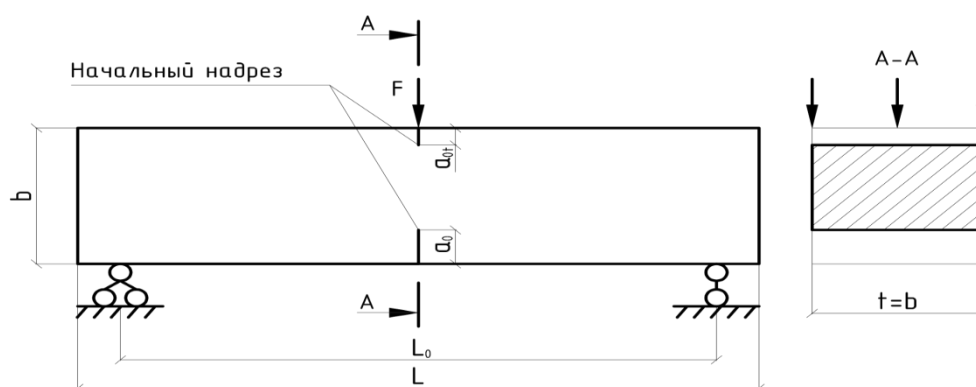


Рис. 1. Схема опытного образца (тип 1, ГОСТ 29167-2021) для определения характеристик трещиностойкости бетонов при статическом нагружении

Fig. 1. Scheme of a prototype (type 1, GOST 29167-2021) for determining the characteristics of crack resistance of concrete under static loading

Первоначальные надрезы наносили для нижней (a_0) и верхней (a_{0t}) граней на глубину 10 и 5 мм. Скорость нагружения составляла $0.02 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$. В ходе испытаний образцы нагружали непрерывно, до разделения их на части. Полученные диаграммы трансформировали в расчетную схему (рис. 2).

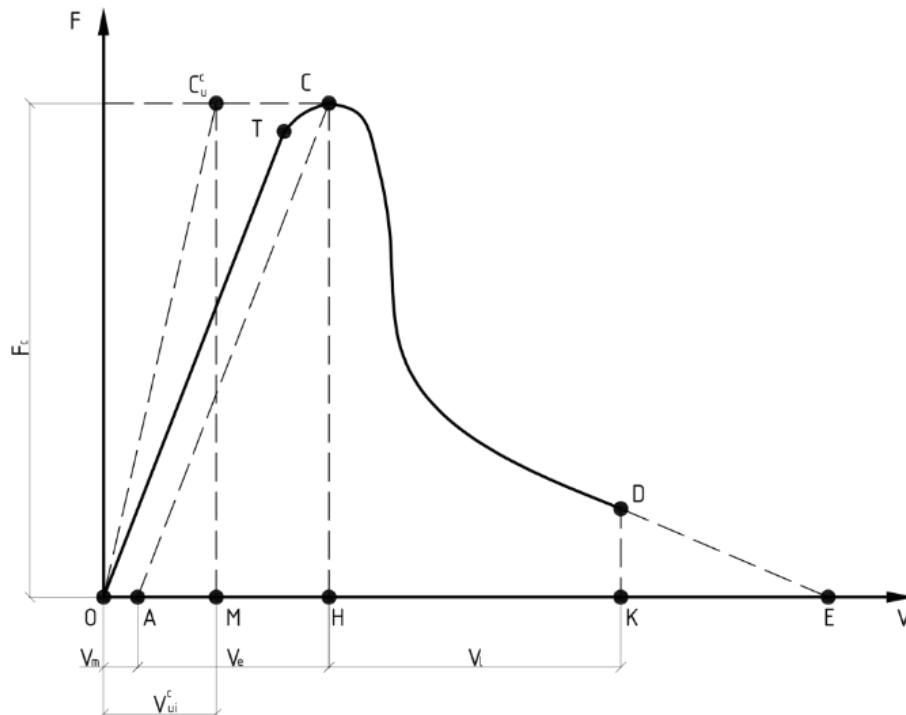
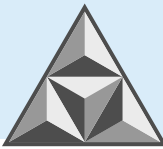


Рис. 2. Диаграмма состояния материала « $F - V$ »

Fig. 2. Material state diagram « $F - V$ »

Энергозатраты на деформирование бетонных образцов, а также силовые и энергетические характеристики трещиностойкости оценивали с помощью оболочки, представленной в программе Microsoft Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчетная равновесная диаграмма деформирования мелкозернистого цементного бетона состава № 1 приведена на рис. 3, а результаты исследования трещиностойкости мелкозернистых бетонов, в свою очередь, отражены в табл. 2.

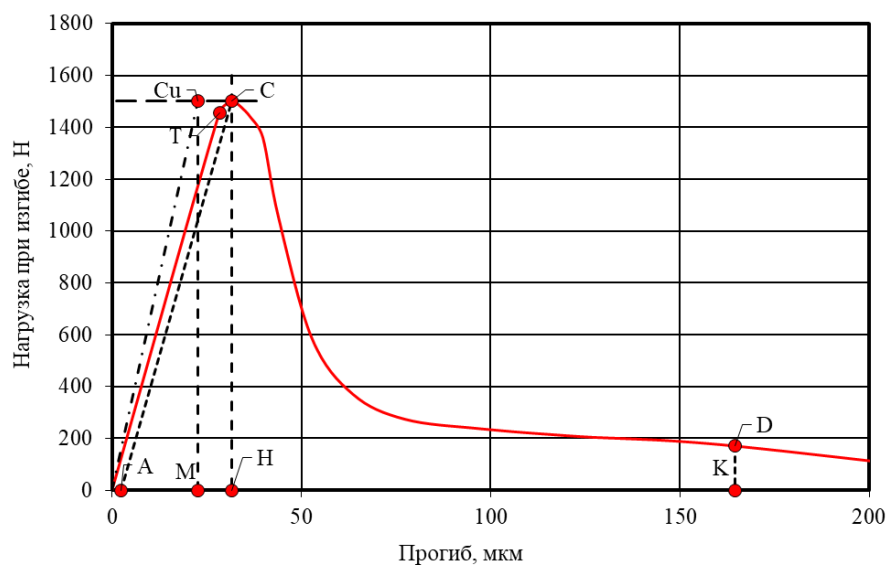


Рис. 3. Расчетная равновесная диаграмма деформирования мелкозернистого цементного бетона состава № 1

Fig. 3. Calculated equilibrium diagram of deformation of fine-grained cement concrete composition No 1

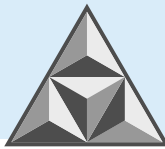


Таблица 2. Параметры трещиностойкости мелкозернистых бетонов

Table 2. Parameters of crack resistance of fine-grained concrete

Номер состава	Энергетические характеристики трещиностойкости мелкозернистых бетонов								
	W_m , Дж	W_e , Дж	W_i , Дж	W_{ii}^c , Дж	G_i , МДж·м ⁻²	J_i , МДж·м ⁻²	K_i , МПа·м ^{0,5}	E_b , МПа	G_f , МДж·м ⁻²
1 (К1)	0.0049	0.0219	0.0524	0.0170	26.80	9.83	0.958	34251	74.36
2	0.0045	0.0267	0.0598	0.0206	31.13	10.53	0.993	31655	86.43
3	0.0045	0.0249	0.0531	0.0193	29.41	10.16	0.965	31639	78.01
4 (К2)	0.0063	0.0319	0.0566	0.0247	38.18	13.51	1.232	39778	88.55
5	0.0045	0.0251	0.0646	0.0194	29.65	10.23	0.951	30517	89.73
6	0.0060	0.0267	0.0529	0.0206	32.69	12.06	0.965	28477	79.54
7 (К3)	0.0056	0.0376	0.0570	0.0290	43.14	14.10	1.282	38097	94.55
8	0.0043	0.0262	0.0570	0.0203	30.51	10.23	1.020	34074	83.25
9	0.0054	0.0285	0.0485	0.0220	33.89	11.89	1.094	35341	77.00
10 (К4)	0.0048	0.0198	0.0468	0.0153	24.52	9.25	0.872	31047	66.60

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что увеличение расхода вяжущего за счет введения минеральных добавок ТГН и ТС (ГН+ИА) позволяет повысить энергетические характеристики трещиностойкости мелкозернистых бетонов.

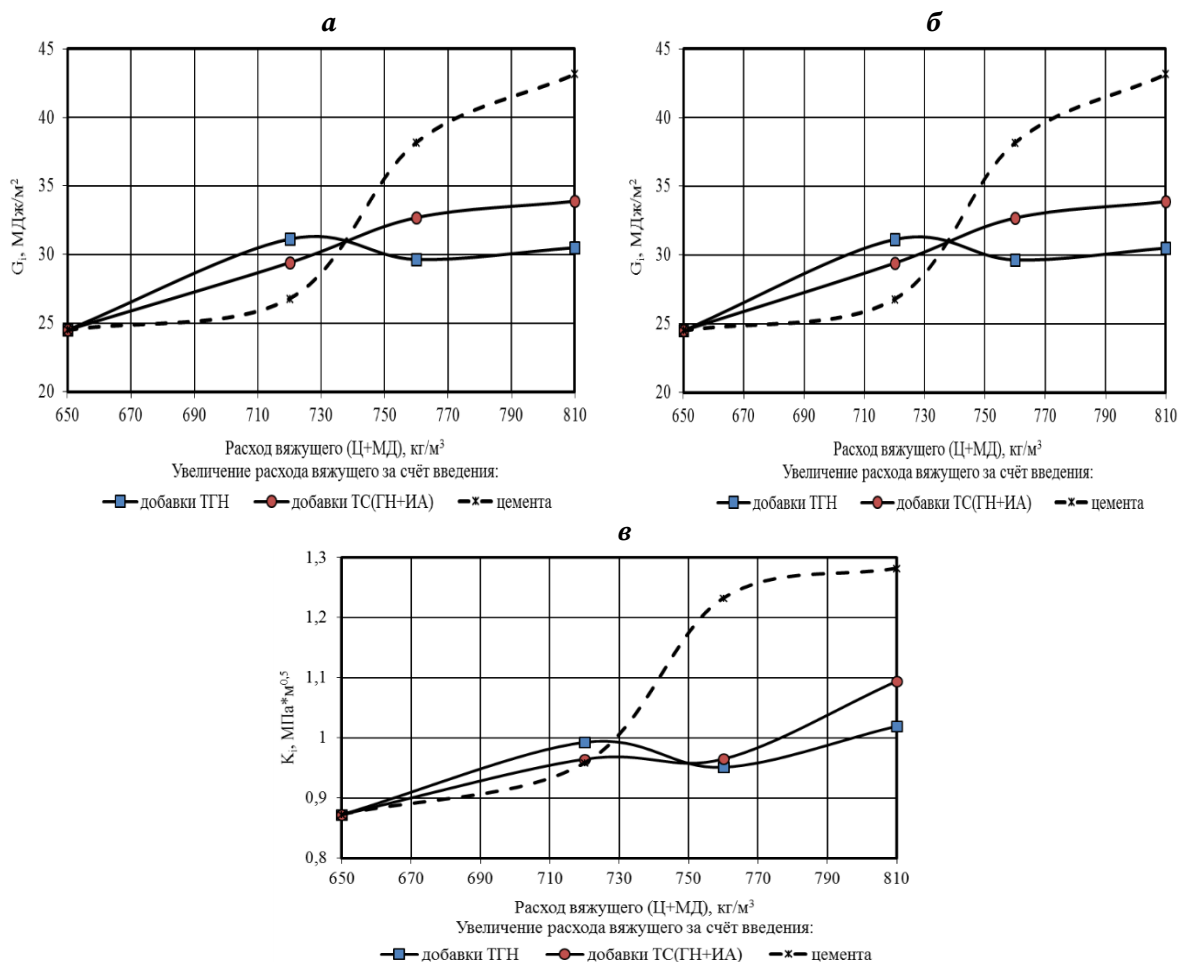
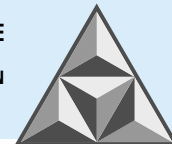


Рис. 4. Влияние расхода смешанного вяжущего в составе мелкозернистых бетонов на изменение: а – удельных энергозатрат на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины (G_i); б – характеристик полей напряжений и деформаций вблизи вершины магистральной трещины при начале её движения (J_i); в – статического критического коэффициента интенсивности напряжений (K_i)

Fig. 4. The influence of the consumption of mixed binder in the composition of fine-grained concretes on the change: a – specific energy consumption for static fracture until the main crack begins to move (G_i); b – characteristics of stress and strain fields near the top of the main crack at the beginning of its movement (J_i); c – static critical stress intensity factor (K_i)



При этом, соответственно, изменяются следующие показатели:

- на 21-27% и 20-38% – удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины (G_i);
- на 11-14% и 10-30% – характеристики полей напряжений и деформаций вблизи вершины магистральной трещины при начале ее движения (J_i);
- на 9-17% и 11-25% – статический критический коэффициент интенсивности напряжений (K_i);
- на 25-35% и 16-9% – удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение (G_f).

Согласно [22, 25], способность бетона сопротивляться образованию трещин характеризуется критериями G_i, J_i, K_i . Графические зависимости изменения этих критериев от расхода смешанного вяжущего представлены на рис. 4.

Дополнительное введение 10% минеральных добавок (к массе вяжущего) приводит к повышению значений G_i, J_i, K_i по сравнению с контрольным немодифицированным составом 1 (К1) с расходом портландцемента 720 кг·м³. Дальнейшее повышение концентрации вводимых добавок ТГН и ТС (ГН+ИА) до 15-20% от массы вяжущего не позволяет достичь энергетических показателей трещиностойкости мелкозернистых бетонов на уровне контрольных составов 4 (К2) и 7 (К3). При этом увеличение вяжущего за счет портландцемента сопровождается практически монотонным повышением силовых и энергетических характеристик трещиностойкости мелкозернистых бетонов.

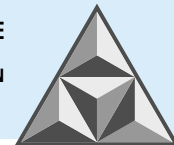
ВЫВОДЫ

Определены показатели трещиностойкости разработанных мелкозернистых бетонов, модифицированных минеральными добавками на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород.

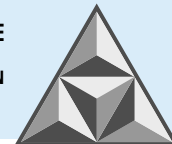
При увеличении расхода вяжущего за счет введения в состав минеральных модифицирующих добавок ТГН и ТС (ГН+ИА) установлено повышение на 20-38%, 10-30% и 9-25% энергетических характеристик трещиностойкости – соответственно, удельных энергозатрат на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, статического джей-интеграла и статического критического коэффициента интенсивности напряжений модифицированных мелкозернистых бетонов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н.** Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // *Строительные материалы*. 2014. № 3. С. 6-14.
2. **Каприелов С.С., Батраков В.Г., Шейнфельд А.В.** Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива // *Бетон и железобетон*. 1999. № 6. С. 6-10.
3. **Давидюк А.Н.** Бетон в строительстве – Новые вызовы и перспективы // *Вестник НИЦ. Строительство*. 2017. № 12. С. 5-13.
4. **Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kusnetsov Y.S., Volodin V.M., Belyakova E.A.** Next generation concrete on the basis of fine-grained dry powder mixes // *Magazine of Civil Engineering*. 2012. № 8(34). P. 47-53.
5. **Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Yurova V.S.** On the issue of expanding the base of mineral and complex additives for cement concrete // *E3S Web of Conferences: Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019*. 2019. Vol. 135. P. 01018.
6. **Tarakanov O.V., Belyakova E.A., Yurova V.S.** Complex organomineral additives with hardening accelerator // *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284. P. 929-935.



7. **Nizina T.A., Balykov A.S., Korovkin D.I., Volodin V.V.** Physical and mechanical properties of modified fine-grained fibre-reinforced concretes containing carbon nanostructures // *International Journal of Nanotechnology*. 2019. Vol. 16, № 6-10. P. 496-509.
8. **Nizina T.A., Balykov A.S., Volodin V.V., Korovkin D.I.** Fiber fine-grained concretes with polyfunctional modifying additives // *Magazine of Civil Engineering*. 2017. № 4(72). P. 73-83.
9. **Schulze S.E., Pierkes R., Rickert J.** Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials // *Proceedings of a XIV International Congress on the Chemistry of cement. Beijing, China, 2015*. 693 p.
10. **Castello L.R., Hernandes H.J.F., Scrivener K.L., Antonic M.** Evolution of calcined clays soils as supplementary cementitious materials // *Proceedings of a XII International Congress of the chemistry of cement. Instituto de Ciencias de la Construcción «Eduardo torroja»*. Madrid. 2011. P. 117.
11. **Fernandez R., Martizena F., Scrivener K.L.** The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite // *Cement and Concrete Research*. 2011. № 41. P. 113-122.
12. **Rakhimov R.Z., Kamalova Z.A., Yermilova E.Y.** Blended Portland Cement Based on Thermally Activated Clays and Carbonate Additives // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Vol. 9, № 4. P. 578-583.
13. **Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р., Гайфуллин А.Р.** Влияние добавок в портландцемент прокаленной и молотой глины с содержанием 40% каолинита на прочность цементного камня // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 2. С. 131-133.
14. **Гайфуллин А.Р., Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р.** Влияние добавок глинистых в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 7(59). С. 66-73.
15. **Balykov A.S., Nizina T.A., Volodin V.V., Kyashkin V.M.** Effects of calcination temperature and time on the physical-chemical efficiency of thermally activated clays in cement systems // *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1017. P. 61-70.
16. **Nizina T.A., Balykov A.S., Volodin V.V., Kyashkin V.M.** Structure and properties of cement systems with additives of calcined clay and carbonate rocks // *Magazine of Civil Engineering*. 2022. 8(116). P. 11602.
17. **Низина Т.А., Володин В.В., Бальков А.С., Коровкин Д.И.** Оценка кинетики твердения цементного камня, модифицированного добавками термоактивированной глины и карбонатных пород // *Региональная архитектура и строительство*. 2021. № 1(46). С. 86-94.
18. **Володин В.В., Низина Т.А.** Самоуплотняющиеся мелкозернистые бетоны с минеральными добавками на основе глинистых и карбонатных пород // *Эксперт: теория и практика*. 2023. № 1(20). С. 63-68.
19. **Травуш В.И., Карпенко Н.И., Ерофеев В.Т., Ерофеева И.В., Тараканов О.В., Кондращенко В.И., Кесарийский А.Г.** Исследование трещиностойкости бетонов нового поколения // *Строительные материалы*. 2019. № 10. С. 3-11.
20. **Коротких Д.Н.** Трещиностойкость современных цементных бетонов (проблемы материаловедения и технологии): монография. Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2014. 141 с.
21. **Макридин Н.И., Максимова И.Н.** Структура и механические свойства цементных дисперсных систем: монография. Пенза: ПГУАС, 2013. 340 с.
22. **Макимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Скачков Ю.П.** Прочность и параметры разрушения цементных композитов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. 360 с.
23. **Макридин Н.И., Королев Е.В., Максимова И.Н.** Структурообразование и конструкционная прочность цементных композитов. М.: Изд-во МИСИ-МГСУ, 2017. 153 с. URL: <https://prior.studentlibrary.ru/book/ISBN9785726416847.html> (дата обращения: 05.05.2023)
24. **Коротких Д.Н.** Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования. Ч. 1 // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2012. 26(45). С. 56-67.
25. **Леонovich С.Н., Литвиновский Д.А., Чернякевич О.Ю.** Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях. Минск: БНТУ, 2016. 393 с.
26. **Griffith A.A.** *The phenomena of rupture and flow in solids* // *Phil. Trans. Roy. Soc. of London*. A221. 1921. P. 163-197.



27. **Irwin G.R.** *Fracture: Handbuch der Physik* // Berlin: Springer verlag. 1958. 551 p.

28. **Orawan E.** *Energy criteria of fracture* // Wel. Res. Suppl. 1955. P. 157-172.

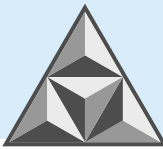
Поступила в редакцию 27.04.2023

Одобрена после рецензирования 16.06.2023

Принята к опубликованию 19.06.2023

REFERENCES

1. **Bazhenov, Y.M., Chernyshov, E.M. & Korotkikh, D.N.** (2014) Structural design of modern concrete: defining principles and technological platforms, *Stroitel'nye materialy*, (3), pp. 6-14 (in Russian).
2. **Kaprielov, S.S., Batrakov, V.G. & Sheinfeld, A.V.** (1999) Modified concrete of a new generation: reality and perspective // *Beton i zhelezobeton*, (6), pp. 6-10 (in Russian).
3. **Davidyuk, A.N.** (2017) Concrete in construction - new challenges and prospects, *Vestnik NIC. Stroitel'stvo*, (12), pp. 5-13 (in Russian).
4. **Kalashnikov, V.I., Tarakanov, O.V., Kusnetsov, Y.S, Volodin, V.M. & Belyakova, E.A.** (2012) Next generation concrete on the basis of fine-grained dry powder mixes, *Magazine of Civil Engineering*, 8(34), pp. 47-53.
5. **Tarakanov, O.V., Belyakova, E.A. & Yurova, V.S.** (2019) On the issue of expanding the base of mineral and complex additives for cement concrete, *E3S Web of Conferences: Innovative Technologies in Environmental Science and Education, ITESE 2019*, (135), pp. 01018.
6. **Tarakanov, O.V., Belyakova, E.A. & Yurova, V.S.** (2018) Complex organomineral additives with hardening accelerator, *Solid State Phenomena*, (284), pp. 929-935.
7. **Nizina, T.A., Balykov, A.S., Korovkin, D.I. & Volodin, V.V.** (2019) Physical and mechanical properties of modified fine-grained fibre-reinforced concretes containing carbon nanostructures, *International Journal of Nanotechnology*, 16(6-10), pp. 496-509.
8. **Nizina, T.A., Balykov, A.S., Volodin, V.V. & Korovkin D.I.** (2017) Fiber fine-grained concretes with polyfunctional modifying additives, *Magazine of Civil Engineering*, 4(72), pp. 73-83.
9. **Schulze, S.E., Pierkes, R. & Rickert, J.** (2015) Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials, *Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement*. Beijing, China.
10. **Castello, L.R., Hernandez, H.J.F., Scrivener, K.L. & Antonic, M.** (2011) Evolution of calcined clays soils as supplementary cementitious materials, *Proceedings of a XII International Congress of the chemistry of cement. Instituto de Ciencias de la Construction «Eduardo torroja»*. Madrid, pp. 117.
11. **Fernandez, R., Martizena, F. & Scrivener, K.L.** (2011) The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite, *Cement and Concrete Research*, (41), pp. 113-122 (in Russian).
12. **Rakhimov, R.Z., Kamalova, Z.A. & Yermilova, E.Y.** (2018) Blended Portland Cement Based on Thermally Activated Clays and Carbonate Additives, *Inorganic Materials: Applied Research*, 9(4), pp. 578-583.
13. **Rakhimov, R.Z., Rakhimova, N.R. & Gaifullin, A.R.** (2015) Influence of additives in Portland cement of calcined and ground clay containing 40% kaolinite on the strength of cement stone, *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*, (2), pp. 131-133 (in Russian).
14. **Gaifulin, A.R., Rakhimov, R.Z. & Rakhimova, N.R.** (2015) Influence of clay additives in Portland cement on the compressive strength of cement stone, *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*, 7(59), pp. 66-73 (in Russian).
15. **Balykov, A.S., Nizina, T.A., Volodin, V.V. & Kyashkin, V.M.** (2021) Effects of calcination temperature and time on the physical-chemical efficiency of thermally activated clays in cement systems, *Materials Science Forum*, (1017), pp. 61-70.
16. **Nizina, T.A., Balykov, A.S., Volodin, V.V. & Kyashkin, V.M.** (2022) Structure and properties of cement systems with additives of calcined clay and carbonate rocks, *Magazine of Civil Engineering*, 8(116), pp. 11602.
17. **Nizina, T.A., Volodin, V.V., Balykov, A.S. & Korovkin, D.I.** (2021) Evaluation of the kinetics of hardening of cement stone modified with additives of thermally activated clay and carbonate rocks, *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo*, 1(46), pp. 86-94 (in Russian).



18. **Volodin, V.V. & Nizina, T.A.** (2023) Self-compacting fine-grained concretes with mineral additives based on clay and carbonate rocks, *Ekspert: teoriya i praktika*, 1(20), pp. 63-68 (in Russian).
19. **Travush, V.I., Karpenko, N.I., Erofeev, V.T., Erofeeva, I.V., Tarakanov, O.V., Kondrashchenko, V.I. & Kesariyskiy, A.G.** (2019) Investigation of the crack resistance of new generation concrete, *Stroitel'nye materialy*, (10), pp. 3-11 (in Russian).
20. **Korotkikh, D.N.** (2014) *Crack resistance of modern cement concretes (problems of materials science and technology)*. Voronezh: Voronezh GASU (in Russian).
21. **Makridin, N.I. & Maksimova, I.N.** (2013) *Structure and mechanical properties of cement dispersed systems*. Penza: PGUAS (in Russian).
22. **Maksimova, I.N., Makridin, N.I., Erofeev, V.T. & Skachkov, Yu.P.** (2015) *Strength and fracture parameters of cement composites*. Saransk: Izd-vo. Mordov. un-ta (in Russian).
23. **Makridin, N.I., Korolev, E.V. & Maksimova, I.N.** (2017) *Structure formation and structural strength of cement composites*. M.: Izd-vo MISI-MGSU. URL: <https://prior.studentlibrary.ru/book/ISBN9785726416847.html> (in Russian).
24. **Korotkikh, D.N.** (2012) Patterns of destruction of the structure of high-strength cement concretes based on the analysis of complete equilibrium diagrams of their deformation, *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*, 26(45), pp. 56-67 (in Russian).
25. **Leonovich, S.N., Litvinovsky, D.A. & Chernyakevich, O.Y.** (2016) *Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosion effects*. Minsk: BNTU (in Russian).
26. **Griffith, A.A.** (1921) The phenomena of rupture and flow in solids, *Phil. Trans. Roy. Soc. of London*, A221, pp. 163-197.
27. **Irwin, G.R.** (1958) *Fracture: Handbuch der Physik*, Berlin: Springer verlag, pp. 551.
28. **Orawan, E.** (1955) *Energy criteria of fracture*, Wel. Res. Suppl, pp. 157-172.

Received 27.04.2023

Approved after reviewing 16.06.2023

Accepted 19.06.2023