

Е.А. САДОВСКАЯ¹, магистр (elena_koleda@bk.ru);
С.Н. ЛЕОПОВИЧ^{1,2}, д-р техн. наук, профессор, иностранный академик РААСН
(sleonovich@yandex.ru, CEF@bntu.by)

¹ Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65)

² Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

Сравнительный анализ расчета коэффициента интенсивности напряжений по результатам равновесных и неравновесных испытаний

Исследовано практическое использование методов определения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при нормальном отрыве: внецентренное сжатие кубов с надрезами и четырехточечный изгиб балки с надрезом. При неравновесных испытаниях значение КИН рассчитывалось по величине разрушающей нагрузки. При равновесных испытаниях величина КИН определялась из полной равновесной диаграммы деформирования с учетом энергетических показателей разрушения. В испытании использовался нанофибробетон, в котором на уровне цементирующего вещества в качестве ингибиторов распространения трещин используются углеродные нанотрубки, а на уровне мелкозернистого бетона – различные фибровые волокна макроразмера. В результате испытаний установлено, что методы определения КИН по кубам с надрезом и по диаграммам деформирования показали хорошую степень сходимости. Фибровое армирование оказывает влияние на вязкость разрушения наноцементного композита, причем высокомодульная фибра оказывает большее влияние по показателю вязкости разрушения, чем низко модульная. Коэффициент интенсивности напряжений является хорошим показателем для сравнения разных типов фибрового армирования по их влиянию на вязкость разрушения.

Ключевые слова: нанофибробетон, трещиностойкость, вязкость разрушения, коэффициент интенсивности напряжений, нанотрубки, дисперсное армирование, диаграмма деформирования, энергозатраты.

Для цитирования: Садовская Е.А., Леопович С.Н. Сравнительный анализ расчета коэффициента интенсивности напряжений по результатам равновесных и неравновесных испытаний // *Бетон и железобетон*. 2022. № 4–5 (612–613). С. 46–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-46-51>

Е.А. SADOVSKAYA¹, Master (elena_koleda@bk.ru);

S.N. LEONOVICH^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Foreign Academician of RAACS

¹ Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus)

² Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao)

Comparative Analysis of Calculation of the Stress Intensity Factor Based on the Results of Equilibrium and Non-Equilibrium Tests

The practical use of methods for determining the stress intensity factor (SIF) at normal separation was studied: eccentric compression of notched cubes and four-point bending of a notched beam. During non-equilibrium tests, the SIF value was calculated from the value of the breaking load. During equilibrium tests, the SIF value was determined from the complete equilibrium deformation diagram, taking into account the energy indicators of destruction. The test used nano-fiberconcrete, in which carbon nanotubes are used as crack propagation inhibitors at the level of the cementing agent, and various macro-sized fibers are used at the level of fine-grained concrete. As a result of the tests, it was found that the methods for determining the SIF from cubes with a notch and from deformation diagrams showed a good degree of convergence. Fiber reinforcement has an effect on the fracture toughness of a nano-cement composite, and a high-modulus fiber has a greater effect on the fracture toughness index than a low-modulus one. The stress intensity factor is a good indicator for comparing different types of fiber reinforcement in terms of their effect on fracture toughness.

Keywords: nanofiber-reinforced concrete, crack resistance, fracture toughness, stress intensity factor, nanotubes, dispersed reinforcement, deformation diagram, energy consumption.

For citation: Sadovskaya E.A., Leonovich S.N. Comparative analysis of calculation of the stress intensity factor based on the results of equilibrium and non-equilibrium tests. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 4–5 (612–613), pp. 46–51. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-612-613-4-5-46-51>

Нанофибробетон, с точки зрения многоуровневой системы [1], представляет собой бетонный композит с ингибиторами распространения трещин на уровне цементирующего вещества и мелкозернистого бетона. В качестве ингибиторов рассматриваются угле-

родные нанотрубки [2–4] и различные фибровые волокна макроразмера (рис.1) [5, 6].

Одной из отличительных особенностей дисперсно-армированных бетонов является повышенный показатель трещиностойкости [7]. Трещиностойкость

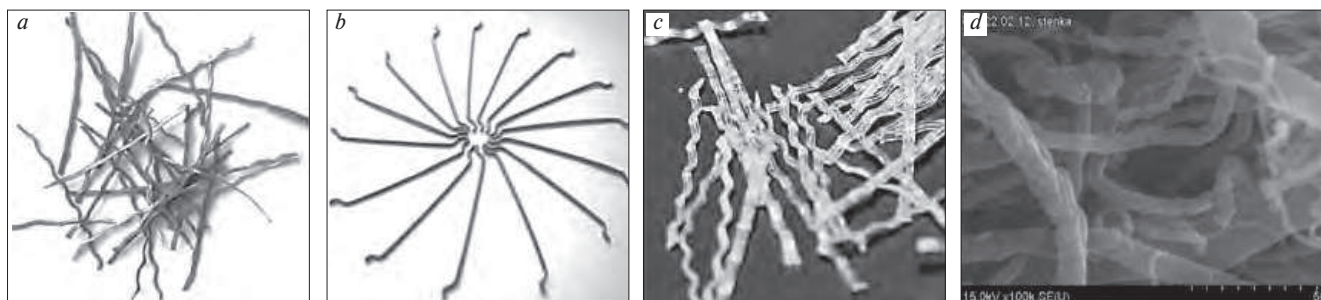


Рис. 1. Фибра: а – из листовой стали волнового профиля (ФЛВ–0,9–50); б – из стальной проволоки с анкерами (ФПА–1,0); в – полимерная волнистая (ФПВ–0,6–40); д – углеродные нанотрубки [6]

Fig. 1. Fiber: a – from sheet steel of a wave profile (FLV–0.9–50); b – made of steel wire with anchors (FPA–1.0); c – polymeric wavy (FPV–0.6–40); d – carbon nanotubes [6]

(вязкость разрушения) характеризуется величиной коэффициента интенсивности напряжений (КИН). Существование множества расчетных и практических способов определения КИН [8–11], а также регулярное появление новых, свидетельствует о трудностях в реализации и наличии неточностей при их использовании.

Целью исследования является разработка надежной методики расчета коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве конструкционного нанофибробетона на основе результатов равновесных и неравновесных испытаний.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования использовались следующие виды материалов: портландцемент 500Д20 ОАО «Красносельскстройматериалы»; песок строительный I кл.; щебень гранитный III гр.; сульфатно-алюминатная добавка РСАМ, микрокремнезем конденсированный уплотненный (МКУ–85); химическая добавка Реламикс ПК; наномодифицированная химическая добавка АРТ-Конкрет Р (водная суспензия наноструктурированного углерода (0,01–20 мкм) и пластификатора).

Образцы изготавливались из составов нанобетонных смесей А, Б, В, Г (табл. 1) с добавлением различного типа и количества дисперсных волокон: Ф1 – фибра стальная волновая из листа (80 кг); Ф2 – фибра стальная проволоочная анкерная (80 кг); Ф3 – фибра полимерная волнистая (4 кг).

Нормальный отрыв по кубам с надрезом. Для испытаний использовались образцы-кубы 100×100×100 мм с надрезами в виде симметричных надрезов глубиной $h/4$ (где h – высота куба) выполненных с помощью режущих инструментов с алмазным напылением. Испытания проводятся при внецентренном сжатии (рис. 2). Нагружение осуществляется до момента разделения образца на две части или образования трещины и регистрируется значение разрушения F_{IC} .

Значение критического коэффициента интенсивности напряжения на нормальный отрыв рассчитывается по формуле:

$$K_c^* = \frac{F_{IC}}{b \cdot h^{1/2}} \left[18,3 \left(\frac{a}{h} \right)^{1/2} - 430 \left(\frac{a}{h} \right)^{3/2} + 3445 \left(\frac{a}{h} \right)^{5/2} - 11076 \left(\frac{a}{h} \right)^{7/2} + 12967 \left(\frac{a}{h} \right)^{9/2} \right], \quad (1)$$

где F_{IC} – нагрузка, при которой происходит разрушение, в МН; b – ширина образца, м; h – высота образца, м; a – глубина надреза, м, $a = h/4$.

Нормальный отрыв при изгибе балок. Образцы-призмы 100×100×400 с надрезом в средней трети испытывались на растяжение при изгибе ($f_{ct,fl}$) по четырехточечной схеме нагружения с фиксированием полной равновесной диаграммы разрушения [12] (рис. 3).

Статический критический коэффициент интенсивности напряжений (ГОСТ 29167–91 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении»):

$$K_I = \sqrt{G_I E_b} \quad (2)$$

Таблица 1
Table 1

Рецептуры исследуемых составов
The formulations of the studied compositions

Состав	Цемент	РСАМ / МКУ–85	Щебень фр. 5–20 мм	Щебень фр. 5–10 мм	Песок	Химическая добавка «АРТ-Конкрет Р» (% от массы вяжущего)
А	400	–	1020	–	820	3,2 (0,8)
Б	445	–	1035	–	820	2,22 (0,5)
В	460	–	–	880	950	3,22 (0,7)
Г	485	40/45	–	825	800	4,65 (0,7)

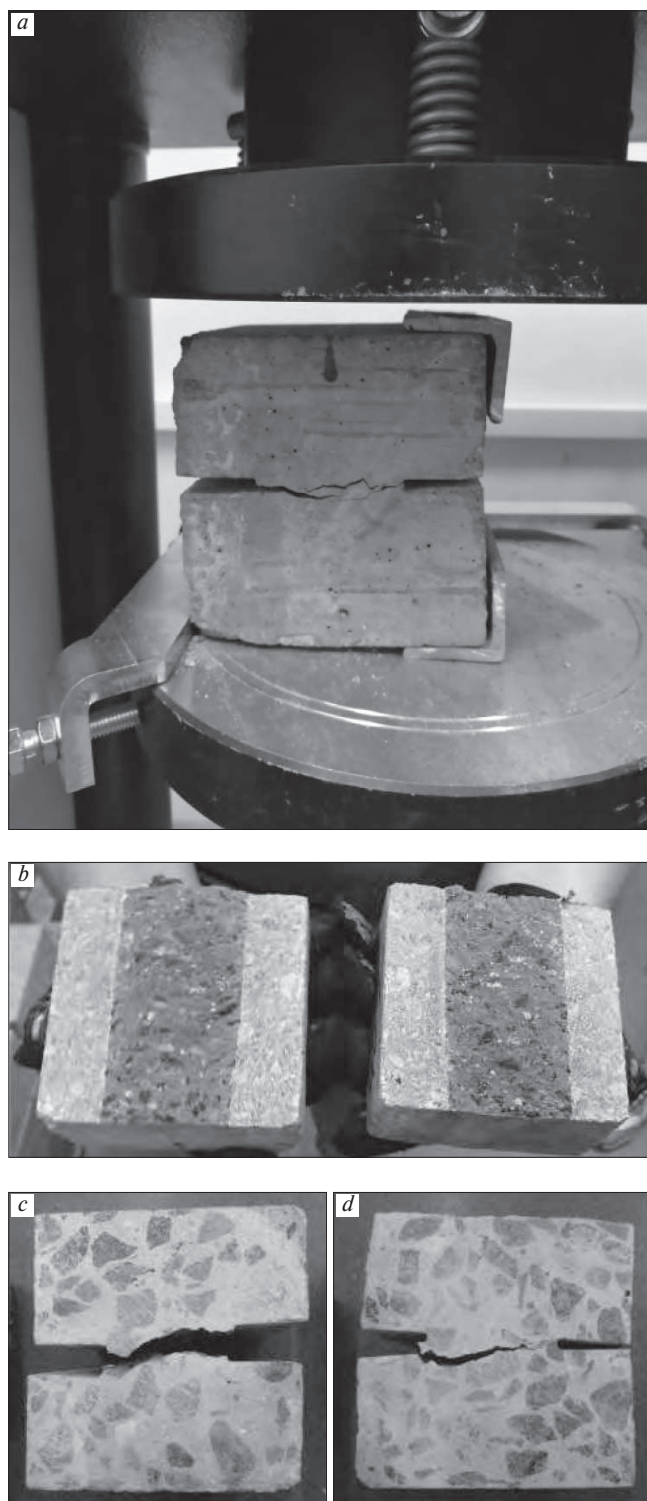


Рис. 2. Испытание на нормальный отрыв по кубам с надрезом: а – внешний вид испытания; б – половинки образца после испытаний; в – испытанный бетонный образец; д – испытанный нанофибробетонный образец

Fig. 2. Test for normal separation on cubes with a notch: а – the appearance of the test; б – sample halves after testing; в – tested concrete sample; д – tested nanofiber concrete sample

где G_i – удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины Дж/м²; E_{fb} – начальный модуль упругости

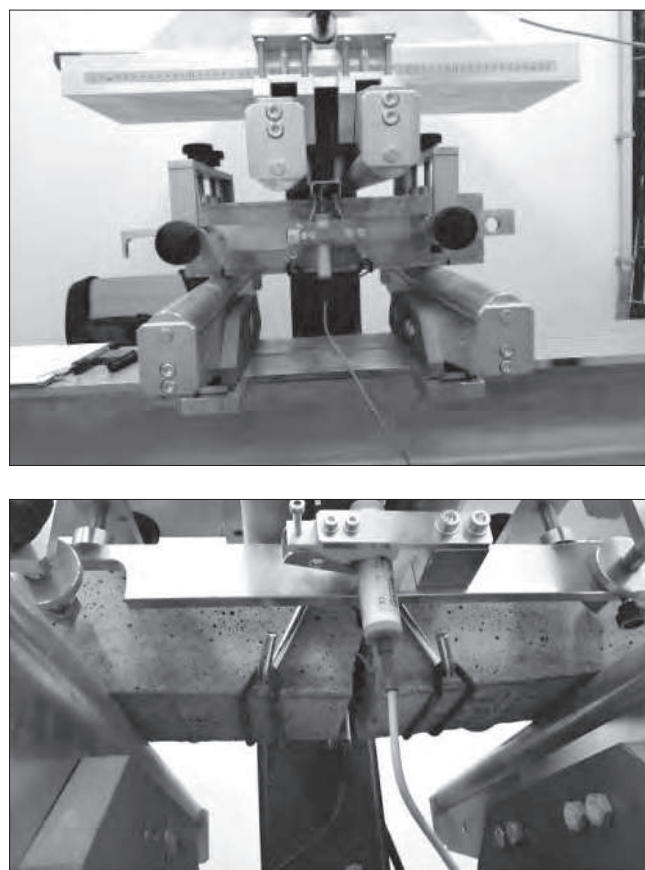


Рис. 3. Испытание образцов-балок на растяжение при изгибе
Fig. 3. Tensile testing of beam specimens in bending

нанофибробетона (ГПа), определяется по формуле (СП 52–104–2006):

$$E_{fb} = E_b(1 - \mu_f) + \mu_f E_f \quad (4)$$

где E_b – модуль упругости бетона, здесь принят нормативный; E_f – модуль упругости фибры; μ_f – коэффициент фибрового армирования по объему.

В нанофибробетонном материале наблюдается выраженный пластический характер работы на растяжение после начала трещинообразования. При этом может быть достигнуто проявление так называемого деформационного квазиупрочнения, которое характерно тем, что после начала трещинообразования следует стадия пластической работы материала на растяжение. В этом случае воспринимаемые напряжения могут превышать напряжения, вызывающие образование трещин.

При наличии на диаграмме зоны квазиупрочнения после появления первой трещины деформации не концентрируются в одной этой трещине [12]. Материал сохраняет способность распределять трещины по длине растянутой зоны образца, при этом трещины сохраняют очень малое раскрытие. Это обеспечивается благодаря тому, что распределенная по всему объему фибра при достаточном модуле упругости ее материала, прочности и заделке в матрицу полно-

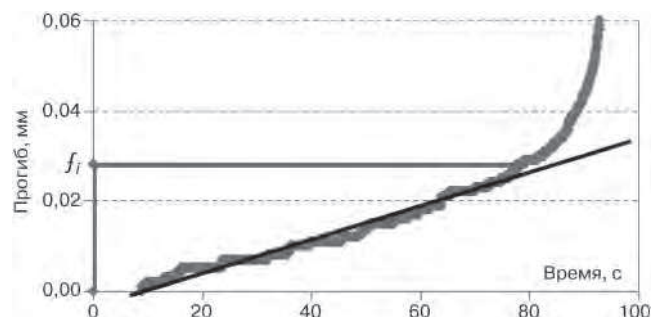


Рис. 4. Графики деформирования
Fig. 4. Graphs of deformation

стью воспринимает растяжение с бетона-матрицы в полости зародившейся трещины, не позволяя ей резко увеличиться. Отсутствие проявлений хрупкости в работе на растяжение позволяет принимать в прочностных расчетах достаточно большие значения сопротивлений материала растяжению. При проектировании это делает баланс расчетных проверок прочности и трещиностойкости сходным с тем, который характерен для железобетона, т.е. при обычном стержневом армировании.

По полученным данным строится график Прогиб-Время и Нагрузка-Прогиб. Поскольку энергия на страгивание магистральной трещины (сумма упругой энергии и энергии микротрещинообразования), являясь площадью под кривой может возрастать в десятки раз в зависимости от точки перелома. Старт магистральной трещины при испытании неармированного бетона, как правило, совпадает с моментом разрушения образца. Для определения момента старта магистральной трещины при испытании наноприбобетонных балок необходима экспертная оценка исследователя (рис. 4).

Анализируя полученные диаграммы деформирования можно получить некоторые важные пара-

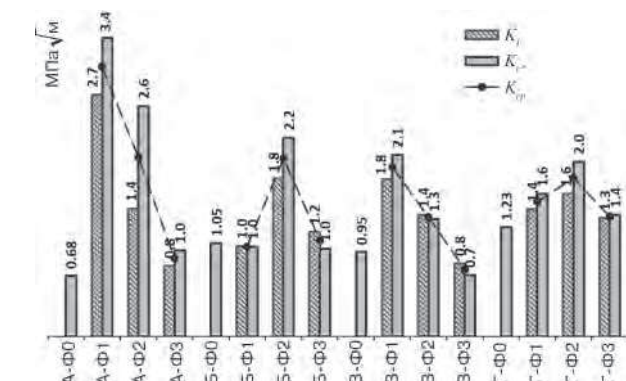
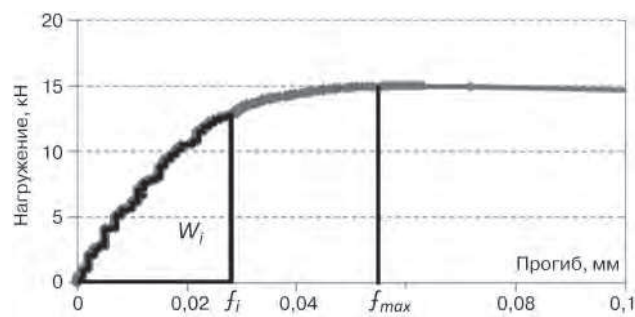


Рис. 5. Коэффициент интенсивности напряжений для наноприбобетона
Fig. 5. Stress intensity factor for nanofibre-reinforced concrete

метры, характеризующие качество исследуемого материала: прочность на растяжение при изгибе, прогиб при максимальной нагрузке (z_{max}), удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины (G_i) (табл. 2).

Полученные значения коэффициента интенсивности напряжений при испытании методом нормального отрыва по кубам с надрезом (K_c^*), при испытании

Таблица 2
Table 2

Параметры наноприбобетона из равновесных диаграмм деформирования
Parameters of nanofiber-reinforced concrete from equilibrium strain diagrams

Состав	Максимальное напряжение, кН F	Приведенная прочность, МПа $f^* = \frac{F \cdot l}{b(h-a)^2}$	Прогиб при максимальном нагрузении, мм f_{max}	Удельные энергозатраты, Дж/м ² $G_i = W_i/A_c$	Критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа√м		Относительное отклонение от среднего значения, %
					K_i	K_c^*	
А-Ф1	14,404	6,82	0,501	144,34	2,7	3,37	11
Б-Ф1	14,97	6,91	0,2	26,56	1,0	1,01	0
В-Ф1	16,011	7,58	0,671	91,75	1,8	2,05	7
Г-Ф1	18,211	8,01	0,051	39,86	1,4	1,61	6
А-Ф2	23,627	11,19	0,731	53,76	1,4	2,6	29
Б-Ф2	16,207	7,67	0,671	82,28	1,8	2,24	11
В-Ф2	16,313	7,72	0,2	55,12	1,4	1,32	2
Г-Ф2	25,293	11,98	0,325	68,85	1,6	1,97	10
А-Ф3	15,613	7,39	0,671	17,19	0,8	0,97	10
Б-Ф3	15,111	7,15	0,055	37,59	1,17	0,99	8
В-Ф3	11,121	5,27	0,051	21,04	0,8	0,69	9
Г-Ф3	15,951	7,55	0,055	33,44	1,3	1,37	1

на четырехточечный изгиб балок с надрезом (K_f) и усредненный показатель (K_{cp}) отображены на рис. 5.

Анализ результатов

Наблюдается хорошая сходимость результатов испытаний используемыми методами испытаний. Тенденция изменения показателя вязкости разрушения, полученная разными методами испытаний имеет одинаковый характер.

В составах А и В высокомодульная стальная фибра (Ф1 и Ф2) в большей степени влияет на показатель вязкости разрушения, чем низкоимодульная (Ф3).

В составах Б и Г стальная проволочная фибра (Ф2) оказала наибольший эффект на показатель вязкости разрушения.

Во всех составах влияние полимерной фибры на значение КИН меньше всего и в ряде случаев величина близка к неармированным составам. Фибро-

вое армирование стальной листовой фиброй (Ф1) дает менее устойчивые показатели по вязкости разрушения, чем при армировании стальной проволочной (Ф2).

Выводы

1. Методы определения КИН по кубам с надрезом и по диаграммам деформирования показали хорошую степень сходимости.

2. Коэффициент интенсивности напряжений является хорошим показателем для сравнения разных типов фибрового армирования по их влиянию на вязкость разрушения.

3. Высокомодульная фибра оказывает большее влияние по показателю вязкости разрушения, чем низкоимодульная.

4. Фибровое армирование оказывает влияние на вязкость разрушения наноцементного композита.

Список литературы

1. Садовская Е.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н. Многоуровневая структура бетона: анализ и классификация уровней организации структуры конгломератных строительных композитов. *Проблемы современного строительства: материалы Международной научно-технической конференции*. Минск. 28 мая 2019 г. С. 285–297.
2. Жданок С.А., Полонина Е.Н., Садовская Е.А., Леонович С.Н. Вязкость разрушения цементных материалов, модифицированных углеродными нанотрубками. *Вестник БрГТУ*. 2021. С. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53>
3. Жданок С.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Хрусталев Б.М., Коледа Е.А. Физико-механические характеристики бетона, модифицированного пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода // *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92. № 1. С. 14–20.
4. Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Коледа Е.А. Физико-механические характеристики нанобетона // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2018. № 4 (37). С. 100–111.
5. Садовская Е.А., Леонович С.Н., Жданок С.А., Полонина Е.Н. Прочность нанофибробетона на растяжение // *Инженерно-физический журнал*. 2020. Т. 93. № 4. С. 1051–1055.
6. Жданок С.А. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы // *Вестник Белорусского национального технического университета*. 2009. № 3. С. 5–22.
7. Коледа Е.А., Леонович С.Н. Характеристики трещиностойкости фибробетона как определяющий

References

1. Sadovskaya E.A., Polonina E.N., Leonovich S.N. Multilevel structure of concrete: analysis and classification of levels of organization of the structure of conglomerate building composites. *Problems of Modern Construction: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. Minsk. May 28, 2019. pp. 285–297. (In Russian).
2. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Sadovskaya E.A., Leonovich S.N. Fracture toughness of cement materials modified with carbon nanotubes. *Vestnik of BrGTU*. 2021, pp. 48–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53>
3. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khustalev B.M., Koleda E.A. Physico-mechanical characteristics of concrete modified with a plasticizing additive based on nanostructured carbon. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2019. Vol. 92. No. 1, pp. 14–20. (In Russian).
4. Polonina E.N., Leonovich S.N., Koleda E.A. Physical and mechanical characteristics of nanoconcrete. *Vestnik of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2018. No. 4 (37), pp. 100–111. (In Russian).
5. Sadovskaya E.A., Leonovich S.N., Zhdanok S.A., Polonina E.N. Tensile strength of nanofiber-reinforced concrete. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 2020. Vol. 93. No. 4, pp. 1051–1055. (In Russian).
6. Zhdanok S.A. Nanotechnologies in building materials science: reality and prospects. *Vestnik of the Belarusian National Technical University*. 2009. No. 3, pp. 5–22. (In Russian).
7. Koleda E.A., Leonovich S.N. Characteristics of crack resistance of fiber-reinforced concrete as a determin-

фактор качества // *Технология строительства и реконструкции: TCR-2015: сборник докладов Международной научно-технической конференции* Минск: БНТУ, 2017. С. 282–287.

8. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Методы определения характеристик трещиностойкости фибробетона // *Сборник научных трудов РААСН*. 2019. Т. 2. С. 448–457.
9. Садовская Е.А., Леонович С.Н., Полонина Е.Н., Будревич Н.А. Способ контроля качества сталефибробетона по коэффициенту интенсивности напряжений при нормальном отрыве // *Современное промышленное и гражданское строительство*. 2021. Т. 17. № 2. С. 85–92.
10. Садовская Е.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Жданок С.А., Потапов В.В. Критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве для нанофибробетона // *Строительные материалы*. 2021. № 9. С. 41–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46>
11. Zhang P., Yang Y., Wang J., Jiao M., Ling Y. Fracture models and effect of fibers on fracture properties of cementitious composites—a review // *Materials*. 2020. 13:5495. DOI: 10.3390/ma13235495
12. Hamadd A.J., Sldozian R.J.A. Flexural and flexural toughness of fiber reinforced concrete-american standard specifications review. *GRDJE*. Vol. 4. Iss. 3. 002

ing factor of quality. *Technology of Construction and Reconstruction: TCR-2015: collection of reports of the International Scientific and Technical Conference*. Minsk: BNTU. 2017, pp. 282–287. (In Russian).

8. Puharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Methods for determining the characteristics of crack resistance of fiber-reinforced concrete. *Collection of scientific papers of the RAACS*. 2019. Vol. 2, pp. 448–457. (In Russian).
9. Sadovskaya E.A., Leonovich S.N., Polonina E.N., Budrevich N.A. A method for quality control of steel fiber reinforced concrete by the stress intensity factor at normal separation. *Sovremennoye promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2021. Vol. 17. No. 2, pp. 85–92. (In Russian).
10. Sadovskaya E.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Zhdanok S.A., Potapov V.V. Critical stress intensity coefficient at transverse shear for nanofibrobeton. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 9, pp. 41–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46>
11. Zhang P., Yang Y., Wang J., Jiao M., Ling Y. Fracture models and effect of fibers on fracture properties of cementitious composites—a review. *Materials*. 2020. 13:5495. DOI: 10.3390/ma13235495
12. Hamadd A.J., Sldozian R.J.A. Flexural and flexural toughness of fiber reinforced concrete-american standard specifications review. *GRDJE*. Vol. 4. Iss. 3. 002

5-7 апреля 2023 г.

МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

СПТОКРАНЫ

СПЕЦТЕХНИКА И ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

**ЦВК ЭКСПОЦЕНТР
павильон № 8**

ЭКСПО ДИЗАЙН
ВЫСТАВОЧНАЯ КОМПАНИЯ



WWW.CRANE-EXPO.RU