

УДК 691.32:69.04:693.554-486:691.327

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-27-31

**РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ
ПРИ НОРМАЛЬНОМ ОТРЫВЕ ПО ПРОЧНОСТИ НА РАСТЯЖЕНИЕ ПРИ ИЗГИБЕ**

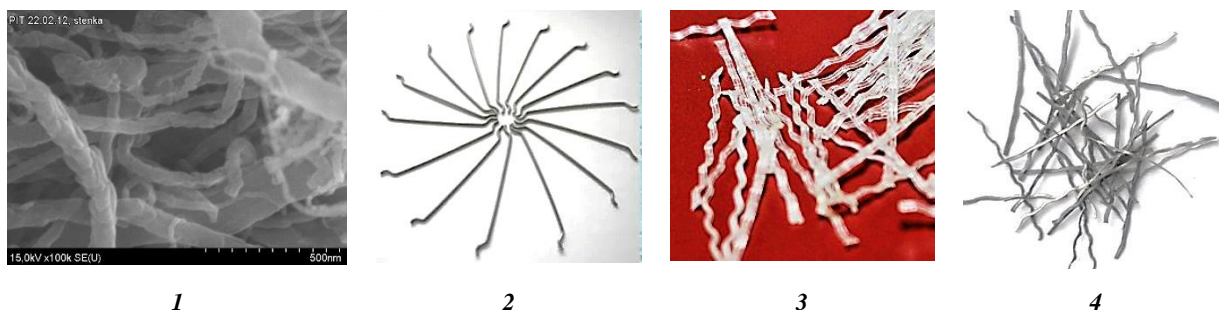
Е.А. САДОВСКАЯ¹, д-р техн. наук, проф. С.Н. ЛЕОНОВИЧ^{1,2}
(¹Белорусский национальный технический университет, Минск,
²Институт Циндао, Китай)

В данной статье исследовано практическое использование модели Леонова-Панасюка для расчета коэффициента интенсивности напряжений для нанофибробетона с использованием значения прочности на растяжение при изгибе образца-балки $100 \times 100 \times 400$ мм. Исследование проводилось на разных нанобетонных матрицах с тремя типами фибровых волокон. Сравнение полученных значений показало высокую степень сходимости со значениями коэффициента интенсивности напряжений, полученными по прочности на нормальный отрыв по кубам с надрезом, по энергозатратам при изгибе балки с надрезом. Результаты подтверждают, что критический коэффициент интенсивности напряжений можно отнести к устойчивым показателям трещиностойкости нанофибробетона.

Ключевые слова: нанофибробетон, трещиностойкость, вязкость разрушения, коэффициент интенсивности напряжений, нанотрубки, дисперсное армирование, прочность на растяжение.

Введение. Бетон представляет собой сложную многоуровневую структуру, в которой каждый уровень оказывает влияние на последующий и на характеристики материала в целом, превращая его в многопараметричную управляемую систему. Введение дисперсного армирования на структурных уровнях позволяет управлять такими уязвимыми параметрами бетона, как прочность на растяжение и трещиностойкость [1].

В данной работе предлагается исследовать бетонный конгломерат (нанофибробетон) с дисперсным армированием на уровне цементирующего вещества и мелкозернистого бетона. В качестве дисперсных волокон предложено использование углеродных нанотрубок [2–6] и различных фибровых волокон макроразмера (рисунок 1) [7; 8].



1 – углеродные нанотрубки [6]; 2 – из стальной проволоки с анкерами (ФПА-1,0);
3 – полимерная волнистая (ФПВ-0,6-40); 4 – из листовой стали волнового профиля (ФЛВ-0,9-50)

Рисунок 1. – Фибровые волокна

В данной статье мы рассмотрим практическое использование модели Леонова-Панасюка [9; 10] для оценки трещиностойкости нанофибробетонов через значение прочности на растяжение при изгибе. Модель Леонова-Панасюка предназначена для описания процесса образования и развития трещины. Полученные значения коэффициентов интенсивности трещин сравним с результатами наших предыдущих равновесных и неравновесных испытаний [11–13].

Модель Леонова-Панасюка является наиболее известным усложнением теории Гриффитса-Ирвина [14]. В ней предполагается, что трещина начнет развиваться, если раскрытие в ее вершине достигнет критического значения. Она используется при анализе процессов разрушения конструкций, изготовленных из многих материалов, однако опыт ее применения для бетонов [9] и фибробетонов невелик. Исследования ученых [10] показывают, что модель качественно правильно описывает многие эффекты, наблюдаемые при квазихрупком разрушении бетона.

Целью исследования является проверка методики расчета коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве конструкционного нанофибробетона через прочность на растяжение при изгибе [15; 16].

Материалы и методы исследования. Для проведения исследования использовались следующие виды материалов: портландцемент 500Д20 ОАО «Красносельскстройматериалы»; песок строительный I кл.; щебень гра-

нитный III гр.; сульфоалюминатная добавка РСАМ; микрокремнезем конденсированный уплотненный (МКУ-85); химическая добавка Реламикс ПК; наномодифицированная химическая добавка АРТ-Конкрит Р (водная суспензия наноструктурированного углерода (0,01–20 мкм) и пластификатора).

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

Таблица 1. – Рецептуры исследуемых составов

Состав матрицы	Цемент	РСАМ / МКУ-85	Щебень Фр.5–20 мм	Щебень Фр.5–10 мм	Песок	Химическая добавка «АРТ-КОНКРИТ 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)

Нормальный отрыв при изгибе балок без надреза. Испытания на растяжение при изгибе проводились на образцах-призмах 100×100×400 мм (без надреза) по четырехточечной схеме нагружения. Из модифицированной формулы Леонова-Панасюка [14] величину коэффициента интенсивности напряжений можно получить по формуле

$$K_C(f_{fl}) = \frac{0,55 \cdot f_{fl} \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot m_0}}{\sqrt{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (1)$$

где f_{fl} – прочность на растяжение при изгибе, МПа;
 ν – коэффициент Пуассона;

$$m_0 = k \cdot d_{max}, \quad (2)$$

где d_{max} – максимальная крупность заполнителя, м;
 k – коэффициент, принимаемый равным 1.3 для $d_{max}=20$ мм, 3 для $d_{max}=10$ мм [14].

Нормальный отрыв по кубам с надрезом. Для испытаний использовались образцы-кубы 100×100×100 мм с симметричными надрезами глубиной $h/4$ (где h – высота куба), выполненных с помощью режущих инструментов с алмазным напылением. Испытания проводятся при внецентренном сжатии (рисунок 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 [11]:

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

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

Нормальный отрыв при изгибе балок с надрезом. Образцы-призмы 100×100×400 мм с надрезом в средней трети испытывались на растяжение при изгибе ($f_{ct,l}$) по четырехточечной схеме нагружения с фиксированием полной равновесной диаграммы разрушения [12] (см. рисунок 2).

Статический критический коэффициент интенсивности напряжений (рисунок 3) (ГОСТ 29167):

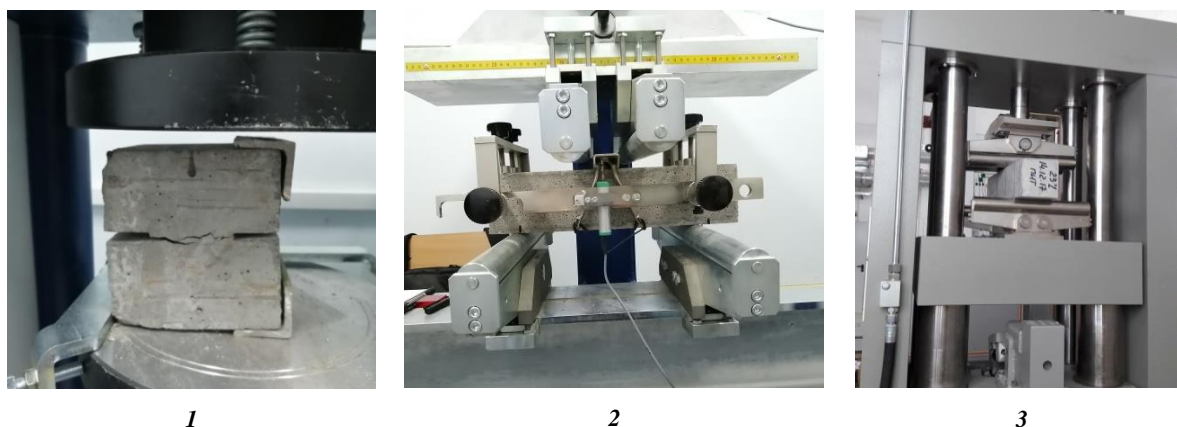
$$K_i = \sqrt{G_i E_b}, \quad (4)$$

где G_i – удельные энергзатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины Дж/м²;

E_{fb} – начальный модуль упругости нанофибробетона (ГПа), определяется по формуле (СП 52-104-2006):

$$E_{fb} = E_b (1 - \mu_{fv}) + \mu_f E_f, \quad (5)$$

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



1 – нормальный отрыв по кубам 100×100×100 мм с надрезами; 2 – растяжение при изгибе балок 100×100×400 мм с надрезом; 3 – растяжение при изгибе балок 100×100×400 мм по четырехточечной схеме нагружения

Рисунок 2. – Испытание нановолокнистых образцов

Таблица 2. – Результаты испытаний

Состав	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа√м			Коэффициент вариации CV
		f_{fl}	K_i	K_c	
А-Ф0	2,65	–	0,68	0,69	1%
Б-Ф0	3,93	–	1,05	1,03	1%
В-Ф0	3,04	–	0,95	0,56	7%
Г-Ф0	6,82	–	1,23	1,26	31%
А-Ф1	5,50	2,7	3,37	1,44	39%
Б-Ф1	5,51	1,0	1,01	1,44	22%
В-Ф1	6,50	1,8	2,05	1,20	8%
Г-Ф1	5,63	1,4	1,61	1,04	6%
А-Ф2	4,86	1,4	2,60	1,12	41%
Б-Ф2	6,58	1,8	2,24	1,51	15%
В-Ф2	4,70	1,4	1,32	1,32	2%
Г-Ф2	6,90	1,6	1,97	1,94	11%
А-Ф3	4,95	0,8	0,97	1,14	25%
Б-Ф3	4,41	1,17	0,99	1,01	9%
В-Ф3	2,68	0,8	0,69	0,75	11%
Г-Ф3	5,65	1,3	1,37	1,59	10%

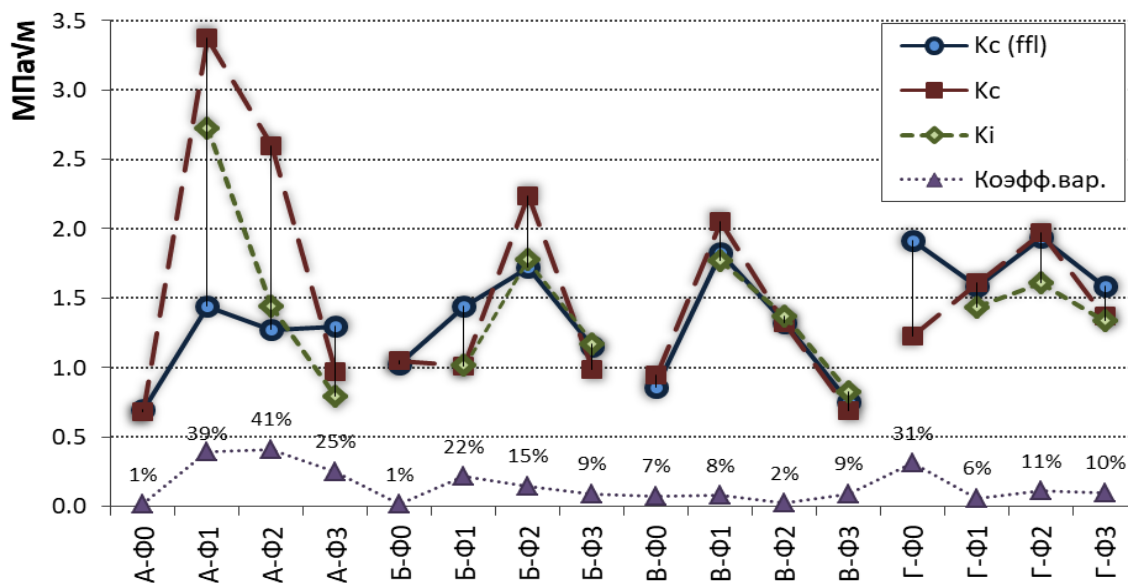


Рисунок 3. – Коэффициент интенсивности напряжений для нановолокнистого бетона

Анализ результатов. Для составов без фибрового армирования значение $K_c(f_{fl})$ полностью совпало с результатами неравновесных испытаний, за исключением состава Г. В составе А с фиброй наблюдается наибольшее расхождение показателей трещиностойкости $CV=25..41\%$. Почти во всех составах тенденция изменения $K_c(f_{fl})$ совпадает коэффициентами интенсивности напряжений равновесных и неравновесных испытаний.

Причины, по которым в составах А-Ф1, А-Ф2, А-Ф3, Б-Ф1, Г-Ф0 значение коэффициента вариации достаточно велико, стоит искать в характеристиках данных составов по дополнительным испытаниям.

Заключение. В результате исследования можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент интенсивности напряжений для нанофибробетона зависит от прочности на растяжение при изгибе и может быть получен расчетным путем.
2. Значения коэффициента интенсивности напряжений, полученные по невязаным испытаниям (прочность на нормальный отрыв по кубам с надрезом, энергозатраты при изгибе балки с надрезом, прочность на растяжение при изгибе балки без надреза), показали высокую степень сходимости, что свидетельствует о том, что такой параметр, как критический коэффициент интенсивности напряжений, можно отнести к устойчивым показателям трещиностойкости нанофибробетона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коледа, Е.А. Характеристики трещиностойкости фибробетона как определяющий фактор качества / Е.А. Коледа, С.Н. Леонович // *Технология строительства и реконструкции : сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т ; Нац. акад. наук Беларуси ; под ред. Б.М. Хрусталева, С.Н. Леоновича. – Минск : Белорус. нац. техн. ун-т, 2017. – С. 282–287.*
2. Fracture toughness of carbon nanotubes modified cement based materials / S.A. Zhdanok [et al.] // *Vestnik of Brest State Technical University. – 2021. – № 3. – P. 48–53. DOI: 10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53.*
3. Физико-механические свойства бетона средней прочности модифицированного углеродной наноструктурированной добавкой / Е.А. Коледа [и др.] // *Вестн. Поволжского гос. технол. ун-та. Сер. Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 24–34.*
4. Полонина, Е.Н. Физико-механические характеристики нанобетона / Е.Н. Полонина, С.Н. Леонович, Е.А. Коледа // *Вестн. Инженерной шк. Дальневосточного федерального ун-та. – 2018. – № 4 (37). – С. 100–111. DOI: 10.5281/zenodo.2008672.*
5. Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives / E.N. Polonina [et al.] // *Science and Technique. – 2021. – Vol. 20, № 3. – P. 189–194. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194.*
6. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы / С.А. Жданок [и др.] // *Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2009. – № 3. – С. 5–23.*
7. Прочность нанофибробетона на растяжение / Е.А. Садовская [и др.] // *Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 93, № 4. – С. 1051–1055.*
8. Коледа, Е.А. Результаты испытаний нанофибробетона на растяжение с комплексным фибровым армированием / Е.А. Коледа, С.Н. Леонович, С.А. Жданок // *Вестн. Поволжского гос. технол. ун-та. Сер. Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 16–23.*
9. Панасюк, В.В. Оценка трещиностойкости цементного бетона по вязкости разрушения / В.В. Панасюк, Л.Т. Бердницкий, В.М. Чубриков // *Бетон и железобетон. – 1981. – № 2. – С. 19–20.*
10. Ягуст, В.И. Оценка сопротивления развитию трещин в бетонных конструкциях с помощью модели М.Я. Леонова-В.В. Панасюка-Д. Дагдейла. Экспрессинформация / В.И. Ягуст. – М. : ЦИТИ по гражданскому стр-ву и архитектуре, 1981. – 28 с.
11. Садовская, Е.А. Многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона для строительной площадки / Е.А. Садовская, С.Н. Леонович, Н.А. Будревич // *Бетон и железобетон. – 2021. – № 4 (606). – С. 20–28.*
12. Tensile Strength of Nanofibrous Concrete / E.A. Sadvovskaya [et al.] // *J. of Engineering Physics and Thermophysics. – 2020. – Vol. 93, № 4. – P. 1015–1019. DOI: 10.1007/s10891-020-02202-8.*
13. Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге для нанофибробетона / Е.А. Садовская [и др.] // *Строительные материалы. – 2021. – № 9. – С. 41–47. – DOI: 10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46.*
14. Трапезников, Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений / Л.П. Трапезников. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
15. Fracture Models and Effect of Fibers on Fracture Properties of Cementitious Composites – A Review / P. Zhang [et al.] // *Materials. – 2020. – № 13. DOI: 10.3390/ma13235495.*
16. Hamad, A.J. Flexural and flexural toughness of fiber reinforced concrete – American standard specifications review / A.J. Hamad, R.J.A. Sldozian // *GRD J. for Engineering. – 2019. – Vol. 4, iss. 3. – P. 5–13.*

REFERENCES

1. Koleda, E.A. & Leonovich, S.N. (2017). Kharakteristiki treshchinostoikosti fibrobetona kak opredelyayushchii faktor kachestva. In B.M. Khrustalev (Eds.) & S.N. Leonovich (Eds.) *Tekhnologiya stroitel'stva i rekonstruktsii: sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* (282–287). Minsk: Belorus. nats. tekhn. un-t. (In Russ.).
2. Zhdanok, S.A., Polonina, E.N., Sadvovskaya, E.A. & Leonovich, S.N. (2021). Fracture toughness of carbon nanotubes modified cement based materials. *Vestnik of Brest State Technical University*, (3), 48–53. DOI: 10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53.
3. Koleda, E.A., Leonovich, S.N., Zhdanok, S.A., Polonina, E.N. & Budrevich, N.A. (2018). Fiziko-mekhanicheskie svoystva betona srednei prochnosti modifitsirovannogo ugleodnoi nanostrukturirovannoi dobavkoi [Physical and mechanical properties of medium-strength concrete modified with a carbon nanostructured additive]. *Vestn. Povolzhskogo gos. tekhnol. un-ta. Ser. Materialy. Konstruktiv. Tekhnologii [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Materials. Constructions. Technologies]*, (2), 24–34. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Polonina, E.N., Leonovich, S.N. & Koleda, E.A. (2018). Fiziko-mekhanicheskie kharakteristiki nanobetona [Physical and mechanical properties of nano concrete]. *Vestn. Inzhenernoi shk. Dal'nevostochnogo federal'nogo un-ta [FEFU: School of Engineering Bulletin]*, (4), 100–111. (In Russ.). DOI: 10.5281/zenodo.2008672.

5. Polonina, E.N., Leonovich, S.N., Khroustalev, B.M., Sadovskaya, E.A. & Budrevich, N.A. (2021). Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives. *Science and Technique*, 20 (3), 189–194. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194.
6. Zhdanok, S.A., Khroustalev, B.M., Batyanovskii, E.I. & Leonovich, S.N. (2009). Nanotekhnologii v stroitel'nom materialovedenii: real'nost' i perspektivy. *Vestn. Belorus. nats. tekhn. un-ta*, (3), 5–23. (In Russ.).
7. Sadovskaya, E.A., Leonovich, S.N., Zhdanok, S.A. & Polonina, E.N. (2020). Prochnost' nanofibrobetona na rastyazhenie. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal [J. of Engineering Physics and Thermophysics]*, 93 (4), 1051–1055. (In Russ.).
8. Koleda, E.A., Leonovich, S.N. & Zhdanok, S.A. (2018). Rezul'taty ispytaniy nanofibrobetona na rastyazhenie s kompleksnym fibrovym armirovaniem [Results of tension testing of nanofiber concrete with integrated fiber reinforcement]. *Vestn. Povolzhskogo gos. tekhnol. un-ta. Ser. Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Materials. Constructions. Technologies]*, (2), 16–23. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Panasyuk, V.V., Berednitskii, L.T. & Chubrikov, V.M. (1981). Otsenka treshchinostoikosti tsementnogo betona po vyzkosti razrusheniya. *Beton i zhelezobeton*, (2), 19–20. (In Russ.).
10. Yagust, V.I. (1981). *Otsenka soprotivleniya razvitiyu treshchin v betonnykh konstruktsiyakh s pomoshch'yu modeli M.Ya. Leonova-V.V. Panasyuka-D. Dagdeila. Ekspresinformatsiya*. Moscow: TsITI po grazhdanskomu str-vu i arkhitekture. (In Russ.).
11. Sadovskaya, E.A., Leonovich, S.N. & Budrevich, N.A. (2021). Mnogoparametrichnaya metodika otsenki pokazatelei kachestva nanofibrobetona dlya stroitel'noi ploshchadki [A multi-parametric method for evaluating the quality indicators of nano-fiber concrete for a construction site]. *Beton i zhelezobeton*, (4), 20–28. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Sadovskaya, E.A., Polonina, E.N., Leonovich, S.N. & Zhdanok, S.A. (2020). Tensile Strength of Nanofibrous Concrete. *J. of Engineering Physics and Thermophysics*, 93 (4), 1015–1019. DOI: 10.1007/s10891-020-02202-8.
13. Sadovskaya, E.A., Polonina, E.N., Leonovich, S.N., Zhdanok, S.A. & Potapov, V.V. (2021). Kriticheskiy koeffitsient intensivnosti napryazhenii pri poperechnom sdvige dlya nanofibrobetona [Critical stress intensity coefficient at transverse shear for nanofibrobeton]. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, (9), 41–47. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Trapeznikov, L.P. (1986). *Temperaturnaya treshchinostoikost' massivnykh betonnykh sooruzhenii*. Moscow: Energoatomizdat. (In Russ.).
15. Zhang, P., Yang, Y., Wang, J., Jiao, M. & Ling, Y. (2020). Fracture Models and Effect of Fibers on Fracture Properties of Cementitious Composites – A Review. *Materials*, (13). DOI: 10.3390/ma13235495.
16. Hamad, A.J. & Sldozian, R.J.A. (2019). Flexural and flexural toughness of fiber reinforced concrete – American standard specifications review. *GRD J. for Engineering*, 4 (3), 5–13.

Поступила 05.04.2022

RELATIONSHIP OF THE STRESS-INTENSITY COEFFICIENT AT NORMAL SEPARATION AND THE STRENGTH IN TENSION

E. SADOVSKAYA, S. LEONOVICH

This article explores the practical use of the Leonov-Panasyuk model for calculating the stress intensity factor for nanofibre-reinforced concrete using the value of tensile strength in bending of a sample beam of 100×100×400 mm. The study was carried out on different nanoconcrete matrices with three types of fiber fibers. Comparison of the obtained values showed a high degree of convergence with the values of the stress intensity factor obtained from the strength for normal separation in cubes with a notch, from the energy consumption during bending of a beam with a notch. The results confirm that the critical stress intensity factor can be attributed to stable indicators of the crack resistance of nanofiber-reinforced concrete.

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