

## КРИТИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ОТРЫВЕ ДЛЯ НАНОФИБРОБЕТОНА

*Е. А. Садовская<sup>1</sup>, С. Н. Леонович<sup>2</sup>, Н. А. Будревич<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *заведующий кафедрой инженерной графики строительного профиля, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail : sadovskaya@bntu.by, elena\_koleda@bk.ru*

<sup>2</sup> *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов и технологии строительства, 1) Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь 2) Qingdao University of Technology (266033, China, 11 Fushun Rd, Qingdao), e-mail : snleonovich@yandex.ru*

<sup>3</sup> *аспирант кафедры строительных материалов и технологии строительства Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail : nellibudrevich@yandex.by*

### Реферат

Разрушение конструкций начинается с образования и распространения трещин в материале. Рост трещин, закономерности их зарождения и способы предотвращения изучается в разделе механики разрушения твердого тела. В результате исследования, представленном в данной статье, получены параметры трещиностойкости нанофибробетона методом внецентренного сжатия на образцах кубах с надрезами. Испытания проводились на разных нанобетонных матрицах и с разным дисперсным армированием: углеродные нанотрубки, базальтовая фибра, полимерная, стальная (3-х видов) и их комбинация. Установлено, что наибольший прирост значения коэффициента интенсивности напряжений наблюдается со стальной фиброй до 400%. Наименьшее влияние на трещиностойкость оказала полимерная фибра до 40%. Влияние дисперсного армирования на коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве зависит от типа бетонной матрицы, от материала фибровых волокон и их количества.

**Ключевые слова:** фибробетон, нанофибробетон, фибра, трещиностойкость, вязкость разрушения, нормальный отрыв, критический коэффициент интенсивности напряжений.

## CRITICAL VOLTAGE INTENSITY COEFFICIENT AT NORMAL SEPARATION FOR NANOFIBRE CONCRETE

*E.A. Sadovskaya, S.N. Leonovich, N.A. Budrevich*

### Abstract

The destruction of structures begins with the formation and propagation of cracks in the material. The growth of cracks, the laws of their initiation and methods of prevention are studied in the section of solid fracture mechanics. As a result of the research presented in this article, the parameters of the crack resistance of nanofibre

concrete by the method of eccentric compression were obtained on samples of cubes with notches. The tests were carried out on different nano-concrete matrices and with different dispersed reinforcement: carbon nanotubes, basalt fiber, polymer, steel (3 types) and their combination. It was found that the greatest increase in the value of the stress intensity factor is observed with steel fiber up to 400%. Polymer fiber had the least effect on crack resistance up to 40%. The effect of dispersed reinforcement on the stress intensity factor at normal separation depends on the type of concrete matrix, on the material of the fiber fibers and their quantity.

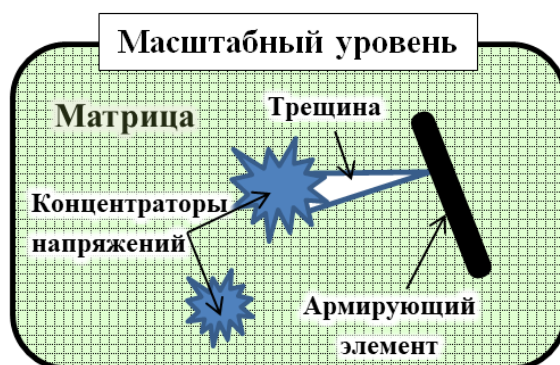
**Keywords:** fiber concrete, nanofibre concrete, fiber, crack resistance, fracture toughness, normal separation, critical stress intensity factor.

### Введение

Бетон, как самый распространенный строительный материал, существенно влияет на устойчивость и долговечность зданий и сооружений. Чтобы произвести бетон желаемого качества и использовать его по назначению, все его свойства должны быть известны. Разрушение наступает в тот момент, когда материал больше не может выдерживать приложенные нагрузки. На момент разрушения оказывают влияние тип используемого материала, приложенная нагрузка, температура и скорость деформации. Механика разрушения исследует влияние дефектов, таких как выемки, трещины и пустоты в структуре материала, на несущую способность [1-3].

Повреждения в зданиях вызваны разрушением материала, из которого оно построено. Чтобы запроектировать здание максимально устойчивое к последствиям воздействий непредсказуемых разрушающих факторов, необходимо уметь анализировать поведение трещин в конструкции и знать способы их предотвращения. Современные технологии позволяют строить более прочные здания из-за уменьшения технологических дефектов в материале (каверны, пустоты, пористость, сколы, которые развиваются в трещины), благодаря исследованиям направленным на изучение поведения структурных дефектов под действием нагрузки [4-5].

Структуру бетонов можно представить в виде нескольких масштабных уровней [6-7]. Каждому из уровней соответствует свой структурный элемент (включение), выступающий в роли концентратора напряжений [8] (рисунок 1).



*Рисунок 1 – Модель масштабного уровня структуры нановолокнистого бетона  
Figure 1 - Model of the scale level of the structure of nanofibre concrete*

На основе структурной модели бетонов [6-7] на каждом структурном уровне предлагается модель композитного материала с многоуровневым армированием, который будет эффективно сопротивляться трещинообразованию под действием внешних нагрузок – нанофибробетон [8-9]. В качестве армирующего элемента на субмикромасштабном уровне (уровень цементирующего вещества) предлагается использовать углеродные нанотрубки  $l=(5 \cdot 10^3)$  нм,  $d=(50..200)$  нм [10-11]. Они будут сдерживать развитие субмикротрещин ( $10^2..10^3$  нм). На микромасштабном уровне (уровень цементного микробетона) развитию трещин (0,39..0,12 мм) будут препятствовать фибровые волокна размеры которых составляют  $l=(1..5)$  мм,  $d=(10..50)$  мкм. На мезомасштабном уровне (уровень мелкозернистого бетона) обеспечивать трещиностойкость (трещины 0,5..0,9 мм) будут фибровые волокна с размерами  $l=(1..5)$  см,  $d=(0,1..0,8)$  мкм (рисунок 2).



Рисунок 2 – «Масштабные уровни структуры композитов: структурные элементы (включения), как концентраторы напряжений, схема многоуровневого дисперсного армирования» [6] и армирующие элементы

Figure 2 - "Scale levels of the structure of composites: structural elements (inclusions) as stress concentrators, a scheme of multilevel dispersed reinforcement" [6] and reinforcing elements

Целью исследования является определение показателя трещиностойкости нанофибробетона при нормальном отрыве.

### Условия и описание методики проведения исследования

В качестве армирующих волокон использовались: углеродные нанотрубки (в составе химической добавки [12-13]); фибра из листовой стали волнового профиля ФЛВ - 0,9 – 50; фибра стальная анкерная ФСА Н-0П 1,0; фибра полимерная волнистая ФПВ-0,6-40; фибра базальтовая, микрофибра прямая из проволоки ФС-М-0,20/12 (рисунок 3).

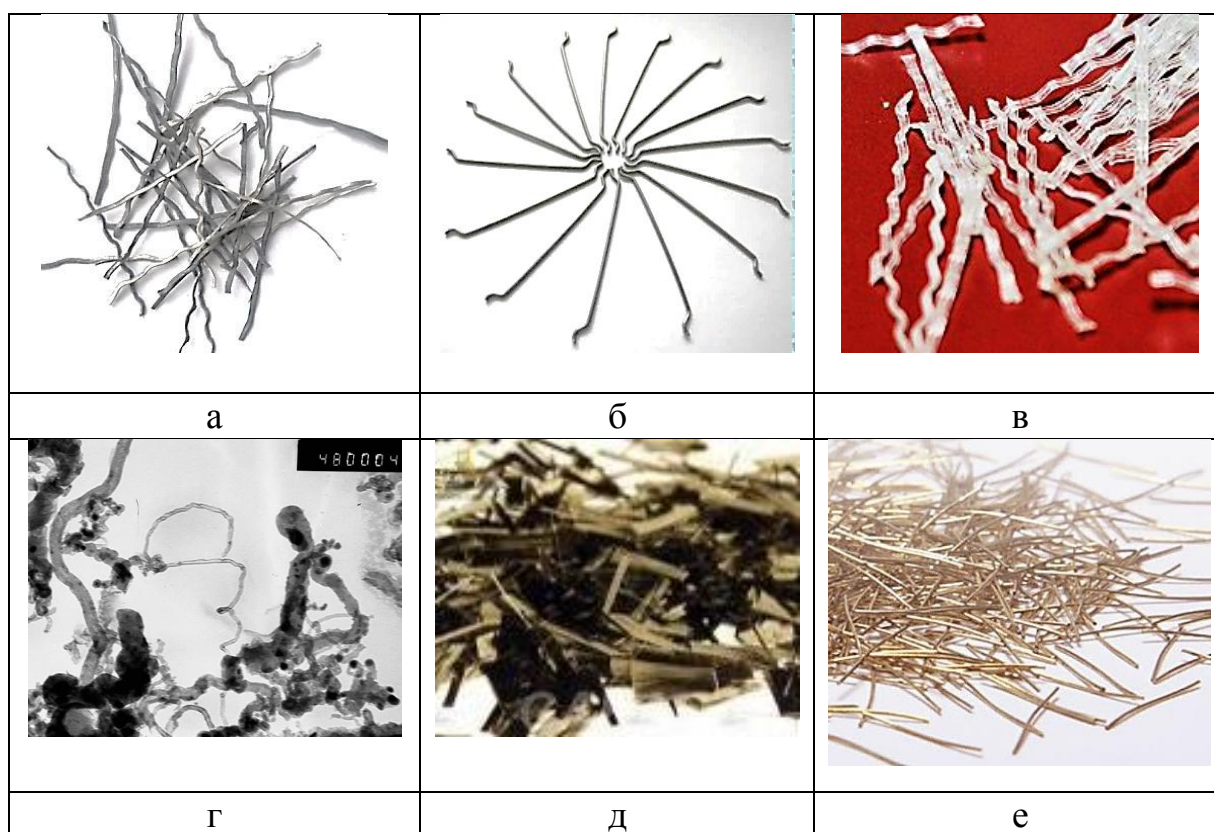
Для более корректного и понятного отображения полученных результатов введены следующие условные обозначения типов фибрового армирования:

Ф1: углеродные нанотрубки и фибра из листовой стали волнового профиля ( $\mu_v=1\%$ );

Ф2: углеродные нанотрубки и фибра стальная анкерная ( $\mu_v=1\%$ );

Ф3: углеродные нанотрубки и фибра полимерная волнистая ( $\mu_v=0.44\%$ );

Ф4: углеродные нанотрубки, фибра базальтовая ( $\mu_v=0.07\%$ ), микрофибра прямая из проволоки ( $\mu_v=0.26\%$ ) и фибра стальная анкерная ( $\mu_v=0.26\%$ ).



а) фибра из листовой стали волнового профиля; б) фибра стальная анкерная;  
в) фибра полимерная волнистая; г) углеродные нанотрубки; д) фибра базальтовая;  
е) микрофибра прямая из проволоки

**Рисунок 3 – Фибровые волокна**

a) fiber from sheet steel of a wave profile; b) steel anchor fiber; c) polymeric wavy fiber;  
d) carbon nanotubes; e) basalt fiber; f) microfiber straight from wire

**Figure 3 - Fiber fibers**

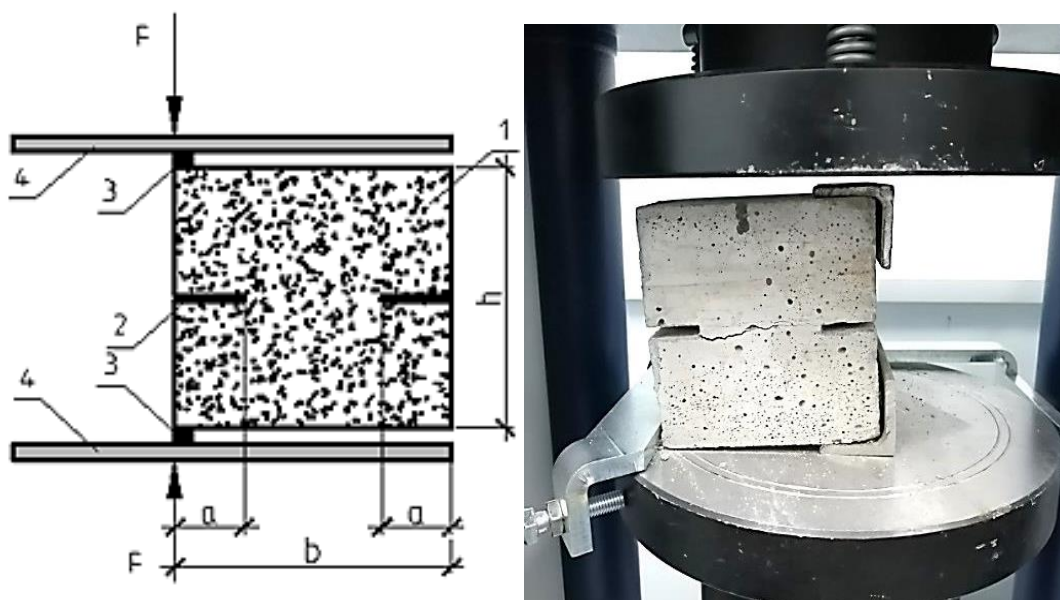
В качестве матрицы использовались несколько видов нанобетонных смесей (таблица 1).

Таблица 1 – Рецептуры нанобетонных матриц  
Table 1 - Formulations of nano-concrete matrices

Номер состава	Расход компонентов, %							Марка по удобоукладываемости
	% -соотношение компонентов бетонной матрицы				% от массы цемента		% от массы вяжущего	
	Цемент	Щебень Фр. 5-10 мм	Щебень Фр. 5-20 мм	Песок	Сульфатно-алюминатная добавка	Микрокремнезем конденсированный уплотненный	Добавка модифицированная наномодифицированной углеродом	
А	18	-	45	37	-	-	0,8	П5
Б	19	-	45	36	-	-	0,5	П5
В	20	38	-	42	-	-	0,7	Р4
Г	23	39	-	38	8	9	0,7	Р6
Д	18	-	46	36	-	-	0,4	П5
Ж	19	-	46	35	-	-	0,9	П5
И	22		39	39	11	-	0,8	Р4

Для проведения эксперимента были испытаны образцы-кубы 100x100x100 мм, для испытаний на осевое сжатие и на нормальный отрыв в Научно-исследовательской лаборатории «Промышленное и гражданское строительство» БНТУ в 2020 году.

Определение коэффициента интенсивности напряжений на поперечный сдвиг производилось согласно разработанной авторской методике [3,14] (рисунок 2).



1 – образец; 2 – надрезы; 3 – металлические пластины; 4 – плиты пресса;  $h$  – высота образца;  $b$  – ширина образца;  $a$  – глубина надреза;  $F$  – нагрузка, действующая на образец в процессе испытания.

**Рисунок 4 – Схема нагружения образца для расчета  $K_{Ic}$  [3]**

1 - product; 2 - incisions; 3 - metal plates; 4 - press plates;  $h$  is the height of the sample;  $b$  is the width of the sample;  $a$  - notch depth;  $F$  is the load acting on the sample during the test.

**Figure 4 - Sample loading scheme for calculating  $K_{Ic}$  [3]**

Значение критического коэффициента интенсивности напряжения (на нормальный отрыв  $K_{Ic}$ , МПа $\sqrt{м}$ ) рассчитывается по формуле, подставляя данные геометрических размеров кубов и значения разрушения образца:

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

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

Результаты испытаний представлены на рисунке 5.

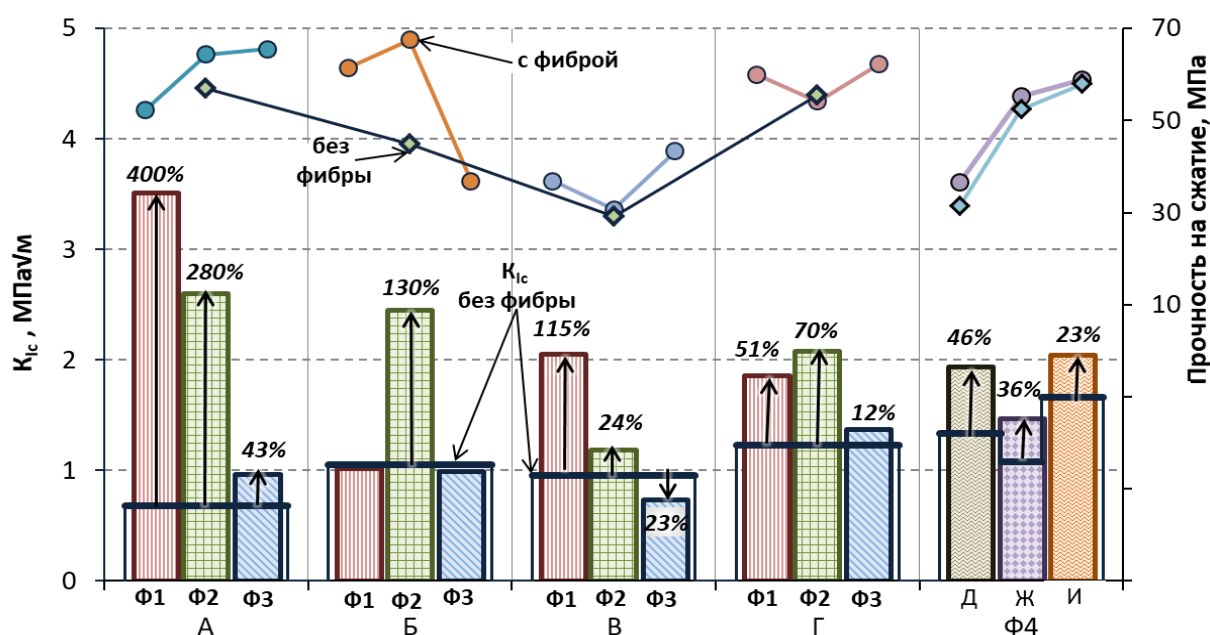


Рисунок 5 – Результаты испытаний для определения коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве  
 Figure 5 - Test results for determining the stress intensity factor at normal pull-off

### Обсуждение результатов

Во всех составах полимерное фибровое армирование показало наименьший прирост показателя трещиностойкости относительно состава без фибры. Во всех составах армирование стальной фиброй способствует увеличению значения коэффициента интенсивности напряжений.

Прирост показателя трещиностойкости в составе А составил 43% с полимерной фиброй, 280% со стальной анкерной и 400% со стальной волнистой из листа относительно неармированного состава. В составе Б прирост наблюдается только со стальной анкерной фиброй – 130%. В составе В значение  $K_{Ic}$  увеличилось со стальной фиброй на 24% и 115%. Аналогично и в составе Г: 51% с Ф1, 70% с Ф2, 12% с Ф3.

Полиармированные составы показали стабильный прирост значения трещиностойкости в сравнении с неармированными: 46%, 36%, 23%.

## Заключение

Увеличение показателя вязкости разрушения  $K_{Ic}$  наночибробетонс с мно-гоуровневым дисперсным армированием дает преподсылки утверждать, что та-кой материал может рассматриваться для использования в конструкциях с по-вышенными требованиями по трещиностойкости.

## Список цитированных источников

1. Tugrul Tunc E . Determination of fracture toughness parameters of concrete us- ing compact pressure test. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*. 2017; 7(2): 85-92.

2. Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге для наночибробетона / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович [и др.] // *Строительные материалы*. – 2021. – № 9. – С. 41-47. – DOI 10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46. – EDN RJYFEE.

3. Tensile Strength of Nanofibrous Concrete / Е. А. Sadovskaya, Е. N. Polonina, S. N. Leonovich, S. A. Zhdanok // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2020. – Vol. 93. – No 4. – P. 1015-1019. – DOI 10.1007/s10891-020-02202-8. – EDN NSCYBZ.

4. Коледа, Е. А. Характеристики трещиностойкости фибробетона как опре- деляющий фактор качества / Е. А. Коледа, С. Н. Леонович // *Технология строи- тельства и реконструкции ТCR-2015 : Сборник докладов Международной науч- но-технической конференции, Минск, 24–27 ноября 2015 года*. – Минск: Бело- русский национальный технический университет, 2017. – С. 282-287. – EDN ZKKXHY

5. Садовская, Е. А. Многопараметричная методика оценки показателей ка- чества наночибробетона для строительной площадки / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // *Бетон и железобетон*. – 2021. – № 4(606). – С. 20-28. – EDN WCAURF.

6. Чернышов Е. М. Уровни организации и иерархия структуры строитель- ных композитов в строительных конструкциях / сборник статей по материалам 7-й международной научной конференции «*Механика разрушения бетона, же- лезобетона и других строительных материалов*» том 2: Воронеж, 2013 – с.129-164

7. Садовская, Е. А. Многоуровневая структура бетона: анализ и классифика- ция уровней организации структуры конгломератных строительных компози- тов / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // *Проблемы современно- го строительства : Материалы Международной научно-технической конферен- ции, Минск, 28 мая 2019 года*. – Минск: Белорусский национальный техниче- ский университет, 2019. – С. 285-297. – EDN HPFISF.

8. Коледа, Е. А. Результаты испытаний наночибробетона на растяжение с комплексным фибровым армированием / Е. А. Коледа, С. Н. Леонович, С. А. Жданок // *Вестник Поволжского государственного технологического уни- верситета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. – 2018. – № 2. – С. 16-23. – EDN VOMEVC.

9. Коледа, Е. А. Влияние дисперсного армирования на плотность и пори- стость фибробетона / Е. А. Коледа, А. И. Бондарович, С. Н. Леонович // *Инно-*

вационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (Еврокодов) : Материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 30 мая 2017 года / Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, Строительный факультет. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2017. – С. 97-102. – EDN KIXQVR.

10. Хрусталеv Б.М., Леонович С.Н., Эберхардштайнер Й., Яковлев Г.И., Первушин Г.Н. Влияние многослойных нанотрубок на разрывную прочность // *Наука и техника* : международный научно-технический журнал. – 2012. – № 4. – С. 52–57.

11. Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Хрусталеv Б.М., Садовская Е.А., Будревич Н.А. Материалы на основе цемента, модифицированные наноразмерными добавками. *НАУКА и ТЕХНИКА*. 2021;20(3):189-194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194>

12. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khroustalev B.M., Koleda E.A. Influence of the Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture in a Self-Compacting Concrete Mix on Its Technological Properties // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, Vol. 92, No. 2, April, 2019 P. 12-18

13. Жданок С.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Хрусталеv Б.М., Коледа Е.А. Влияние пластифицирующей добавки, содержащей углеродный наноматериал на свойства самоуплотняющегося бетона // *Вестник гражданских инженеров* – 2016. – № 6 (71). – С. 76-85.

14. Способ контроля качества сталефибробетона по коэффициенту интенсивности напряжений при нормальном отрыве / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина, Н. А. Будревич // *Современное промышленное и гражданское строительство*. – 2021. – Т. 17. – № 2. – С. 85-92. – EDN LXUUSM.

## References

1. Tugrul Tunc E . Determination of fracture toughness parameters of concrete using compact pressure test. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*. 2017; 7(2): 85-92.

2. Kriticheskiy koeffitsient intensivnosti napryazhenij pri poperechnom sdvige dlya nano-fibrobetona / E. A. Sadovskaya, E. N. Polonina, S. N. Leonovich [i dr.] // *Stroitel'nye materialy*. – 2021. – № 9. – S. 41-47. – DOI 10.31659/0585-430X-2021-795-9-41-46. – EDN RJYFEE.

3. Tensile Strength of Nanofibrous Concrete / E. A. Sadovskaya, E. N. Polonina, S. N. Leonovich, S. A. Zhdanok // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2020. – Vol. 93. – No 4. – P. 1015-1019. – DOI 10.1007/s10891-020-02202-8. – EDN NSCYBZ.

4. Koleda, E. A. Harakteristiki treshchinostojkosti fibrobetona kak opredelyayushchij faktor kachestva / E. A. Koleda, S. N. Leonovich // *Tekhnologiya stroitel'stva i rekonstrukcii TCR-2015* : Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Minsk, 24–27 noyabrya 2015 goda. – Minsk: Belorusskiy nacional'nyj tekhnicheskij universitet, 2017. – S. 282-287. – EDN ZKKXHY

5. Sadovskaya, E. A. Mnogoparametrichnaya metodika ocenki pokazatelej kachestva nanofib-robetona dlya stroitel'noj ploshchadki / E. A. Sadovskaya,



S. N. Leonovich, N. A. Budrevich // Beton i zhelezobeton. – 2021. – № 4(606). – S. 20-28. – EDN WCAURF.

6. CHernyshov E. M. Urovni organizacii i ierarhiya struktury stroitel'nyh kompozitov v stroitel'nyh konstrukciyah / sbornik statej po materialam 7-j mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Mekhanika razrusheniya betona, zhelezobetona i drugih stroitel'nyh ma-terialov» tom 2: Voronezh, 2013 – s.129-164

7. Sadovskaya, E. A. Mnogourovnevaya struktura betona: analiz i klassifikaciya urovnej or-ganizacii struktury konglomeratnyh stroitel'nyh kompozitov / E. A. Sadovskaya, E. N. Polonina, S. N. Leonovich // Problemy sovremennogo stroitel'stva : Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, 28 maya 2019 goda. – Minsk: Belorus-skij nacional'nyj tehnikeskij universitet, 2019. – S. 285-297. – EDN HPFISF.

8. Koleda, E. A. Rezul'taty ispytaniy nanofibrobetona na rastyazhenie s kompleksnym fibrovym armirovaniem / E. A. Koleda, S. N. Leonovich, S. A. ZHDanok // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstrukcii. Tekhnologii. – 2018. – № 2. – S. 16-23. – EDN VOMEVC.

9. Koleda, E. A. Vliyanie dispersnogo armirovaniya na plotnost' i poristost' fibrobetona / E. A. Koleda, A. I. Bondarovich, S. N. Leonovich // Innovacionnaya podgotovka inzhenernyh kadrov na osnove evropejskih standartov (Evrokodov) : Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Minsk, 30 maya 2017 goda / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Belorusskij nacional'nyj tehnikeskij universitet, Stroitel'nyj fakul'tet. – Minsk: Belorusskij nacional'nyj tehnikeskij universitet, 2017. – S. 97-102. – EDN KIXQVR.

10. Hrustalev B.M., Leonovich S.N., Eberhardshtajner J., YAKovlev G.I., Per-vushin G.N. Vliyanie mnogoslojnyh nanotrubok na razryvnuyu prochnost' // Nauka i tekhnika : mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal. – 2012. – № 4. – S. 52–57.

11. Polonina E.N., Leonovich S.N., Hrustalev B.M., Sadovskaya E.A., Budrevich N.A. Materialy na osnove cementa, modifitsirovannye nanorazmernymi dobavkami. NAUKA i TEKHNIKA. 2021;20(3):189-194. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-3-189-194>

12. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khroustalev B.M., Koleda E.A. Influence of the Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture in a Self-Compacting Concrete Mix on Its Technological Properties // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 92, No. 2, April, 2019 P. 12-18

13. ZHDanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Hrustalev B.M., Koleda E.A. Vliyanie pla-stificiruyushchej dobavki, soderzhashchej uglerodnyj nanomaterial na svoystva samouplot-nyayushchegosya betona // Vestnik grazhdanskih inzhenerov – 2016. – № 6 (71). – S. 76-85.

14. Sposob kontrolya kachestva stalefibrobetona po koefficientu intensivnosti napryazhe-nij pri normal'nom otryve / E. A. Sadovskaya, S. N. Leonovich, E. N. Polonina, N. A. Budrevich // Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2021. – T. 17. – № 2. – S. 85-92. – EDN LXUUSM.