

УДК 666.98

Е.А. САДОВСКАЯ¹, инженер (elena_koleda@bk.ru); С.Н. ЛЕОНОВИЧ^{1,2}, д-р техн. наук, иностранный академик РААСН (snleonovich@yandex.ru, CEF@bntu.by); Н.А. БУДРЕВИЧ¹, инженер

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

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

Многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона для строительной площадки

Нанофибробетон – это строительный материал, отличающимся высоким показателем трещиностойкости. Определение коэффициента интенсивности напряжений нанофибробетона позволяет правильно оценить стойкость материала при образовании и развитии трещин. В представленной работе изложена многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона. Предлагаемая методика позволяет оценить качество нанофибробетонной конструкции в лабораторных условиях и при проведении строительных работ. Для контроля на строительной площадке используются современные и уже давно известные методы неразрушающего контроля, такие как ультразвуковое прозвучивание, ультразвуковая томография, упругий отскок, отрыв со скалыванием. Для лабораторных исследований методикой предусмотрено изготовление образцов-призм. Образцы для испытаний могут быть заформованы либо вырезаны из тела конструкции. Данная методика позволяет в лабораторных условиях изучить такие параметры материала, как прочность на растяжение при изгибе, прочность на растяжение при раскалывании, критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве, критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге, энергозатраты на отдельные этапы деформирования и разрушения образца. Причем предусмотрено получение всех параметров на одном образце из серии, что исключает погрешности и неточности показателей качества материала, связанные с разными условиями твердения, формования, неточностями в дублировании состава.

Ключевые слова: трещиностойкость, нанофибробетон, ультразвуковая томография, методика оценки качества, прочность на растяжение, критический коэффициент интенсивности напряжений.

Для цитирования: Садовская Е.А., Леонович С.Н., Будревич Н.А. Многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона для строительной площадки // Бетон и железобетон. 2021. № 4 (606). С. 20–28.

E.A. SADOVSKAYA¹, Engineer (elena_koleda@bk.ru); S.N. LEONOVICH^{1,2}, Doctor of Sciences (Engineering), Foreign Academic of RAACS (snleonovich@yandex.ru, CEF@bntu.by); N.A. BUDREVICH¹, Engineer

¹ Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Avenue, Minsk, 220013, Belarus)

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

A Multi-Parametric Method for Evaluating the Quality Indicators of Nano-Fiber Concrete for a Construction Site

Nano-fiber concrete is a building material for which a distinctive feature is an increase in the crack resistance characteristic. Determination of the stress intensity coefficient of nano-fiber concrete makes it possible to correctly assess the resistance of the material during the formation and development of cracks. The paper presents a multi-parametric method for evaluating the quality indicators of nano-fiber concrete. The proposed method makes it possible to evaluate the quality of the nano-fiber concrete structure in the laboratory and during construction work. Modern and well-known methods of non-destructive testing, such as ultrasonic sounding, ultrasound tomography, elastic rebound, separation with chipping, are used to carry out control at the construction site. For laboratory studies, the method provides for the production of samples-prisms. Test samples can be molded or cut out of the body of the structure. This technique makes it possible to study in laboratory conditions such parameters of the material as the tensile strength during bending, tensile strength at splitting, the critical coefficient of stress intensity at normal pull-off, the critical coefficient of stress intensity during transverse shear, energy consumption for individual stages of deformation and destruction of the sample. Moreover, it is provided to obtain all the parameters on one sample from the series, which eliminates errors and inaccuracies in the quality indicators of the material associated with different conditions of hardening, molding, inaccuracies in the duplication of the composition.

Keywords: crack resistance, nano-fiber concrete, ultrasound tomography, quality assessment technique, tensile strength, critical stress intensity coefficient.

For citation: Sadovskaya E.A., Leonovich S.N., Budrevich N.A. A multi-parametric method for evaluating the quality indicators of nano-fiber concrete for a construction site. *Beton i Zhelozobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2021. No. 4 (606), pp. 20–28. (In Russian).

Коэффициент интенсивности напряжений является одним из наиболее важных показателей трещиностойкости такого материала, как нанофибробетон [1–3], так как способность нанофибробетона к препятствию развития трещин является основным

преимуществом перед обычным бетоном [4–7]. По этой причине способы и методы определения данного показателя должны наиболее полно раскрывать все особенности работы под нагрузкой и качество нанофибробетона [8–10].

Наноприобетон представляет собой композиционный материал с дисперсным армированием на разных структурных уровнях. Начиная с уровня наномасштабного размера (углеродные нанотрубки) и до макроуровня (традиционное армирование), предполагается эффективное сопротивление трещинообразованию под действием внешних нагрузок [1–3].

Особый интерес в строительстве вызывает контроль качества изготовления конструкции в условиях строительства. Так как основу фибробетона составляет бетон-матрица, методы контроля, используемые для монолитных бетонных конструкций, будут также применимы и для наноприобетона. В связи с тем, что дисперсное армирование не оказывает существенного влияния на изменение прочности при сжатии, а это является одним из основных показателей качества для обычного бетона, методика контроля качества наноприобетона должна предусматривать получение параметров, которые характеризуют свойства материала, зависящие от введения фибровых волокон (трещиностойкость, вязкость разрушения и др.).

В данной статье авторами предлагается методика, позволяющая оценить качество наноприобетонной конструкции и наноприобетона как материала (рис. 1).

На первом этапе производится сплошной контроль комбинированным (комплексным) методом. В результате измерений ультразвуковым методом и методом упругого отскока получают значение прочности бетонной матрицы. Участки (конструкции) с отличающимися (низкими) показателями испытываются дополнительно на последующих этапах в обязательном порядке.

На втором этапе производится ультразвуковая томография конструкции. Данный метод позволяет определить толщину конструкции и прилегающего к ней основания при одностороннем доступе, обнаружить пустоты и «ежи» из фибровых волокон. Контроль может выполняться точечный и сплошной. Точечный контроль выполняется в обязательном порядке на всех конструкциях. Сплошной контроль может выполняться для конструкций с сомнительными показателями прочности, дефектности (по результатам точечного контроля).

На третьем этапе используется метод прямого отрыва со скалыванием для определения критического коэффициента интенсивности напряжений и прочности наноприобетона в конструкции. Данный метод обязательно проводится на участках (конструкциях), где на предыдущих этапах испытаний были выявлены дефекты, снижение прочности и др.

Четвертый этап включает в себя отбор образцов материала для последующих испытаний в лабораторных условиях. Образцы для испытаний могут быть зафор-



Рис. 1. Блок-схема методики контроля качества наноприобетона в конструкции

Fig. 1. Block diagram of the quality control methodology for nanofiber concrete in a structure

мованы либо вырезаны из тела конструкции. В лабораторных условиях один образец из серии подвергается поэтапным испытаниям: растяжение при изгибе, растяжение при раскалывании, нормальный отрыв и поперечный сдвиг, неразрушающие методы испытаний.

Комбинированный метод

Цель данного метода состоит в определении прочности бетонной матрицы в составе фибробетонного материала. Комплексный метод оценки прочности наноприобетона базируется на коррекции данных метода упругого отскока по СТБ 2264–2012 «Испытание бетона. Неразрушающий контроль прочности» и ГОСТ 22690–2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля» поправкой, являющейся функцией разницы оценок прочности наноприобетона ультразвуковым импульсным методом по ГОСТ 17624–2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности» и метода упругого отскока (рис. 2, 3). Ультразвуковой импульсный метод использован в качестве калибровочного. С его помощью производится коррекция данных метода динамического индентирования [11, 12].

В одной и той же зоне контроля производятся испытания методом индентирования и ультразвуковым методом; значения косвенных параметров этих методов – I_1 и V_1 . Прочность наноприобетона f_c участка контроля определяют в зависимости от разницы динамических

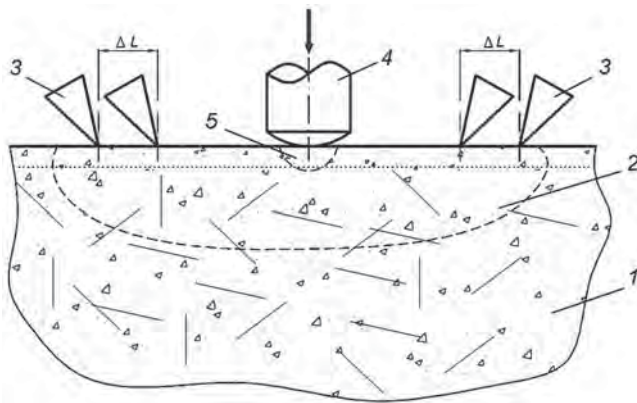


Рис. 2. Схема измерений комбинированным методом «индентирование – ультразвуковой импульсный метод» [11–14]: 1 – контролируемое изделие; 2 – область бетона, участвующая в передаче ультразвукового импульса от излучателя к приемнику; 3 – излучающий и приемный ультразвуковые преобразователи; 4 – индентор; 5 – область индентирования бетона

Fig. 2. Scheme of measurements by the combined method «indentation – ultrasonic impulse method» [11–14]: 1 – test item; 2 – area of concrete involved in the transmission of an ultrasonic pulse from the emitter to the receiver; 3 – emitting and receiving ultrasonic transducers; 4 – indenter; 5 – concrete indentation area

модулей упругости поверхностного слоя нанотекстурбетона $E_{д}^*$ и внутренней области нанотекстурбетона участка контроля $E_{д,в}$ из системы уравнений [13]:

$$f_c = \frac{1}{1 + \theta} (\theta \cdot e^{0,091(E_V - E)} f_{c,I} + f_{c,V});$$

$$\theta = 0,0026 \cdot f_c^2 - 0,115 \cdot f_c + 2,79, \quad (1)$$

где f_c – прочность нанотекстурбетона контролируемого участка конструкции, МПа; $f_{c,I}$ и $f_{c,V}$ – соответственно оценки прочности нанотекстурбетона методом индентирования и ультразвуковым импульсным методом, МПа; θ – безразмерный коэффициент.

При испытаниях методом упругого отскока расстояние от мест проведения испытаний до арматуры должно быть не менее 50 мм. При осуществлении выборочного контроля монолитных фиброармированных или нанотекстурбетонных конструкций необходимо проводить испытания не менее чем 60% конструкций захватки, этажа, здания [14].

Количество и расположение контролируемых участков при испытаниях конструкций может указываться в рабочих чертежах на монолитные конструкции и (или) технологических картах контроля. Испытания проводят на участке конструкции площадью от 100 до 600 см². Количество испытаний на участке не менее пяти. Толщина конструкции на участке испытаний должна составлять не менее 100 мм.

Контроль нанотекстурбетона в конструкции методом ультразвуковой томографии

Принцип действия приборов ультразвуковой томографии основан на испускании низкочастотных звуковых колебаний. Ультразвук проникает в изучаемый объект, отражается. Все фиксируется прибором, который при помощи специальных устройств преоб-

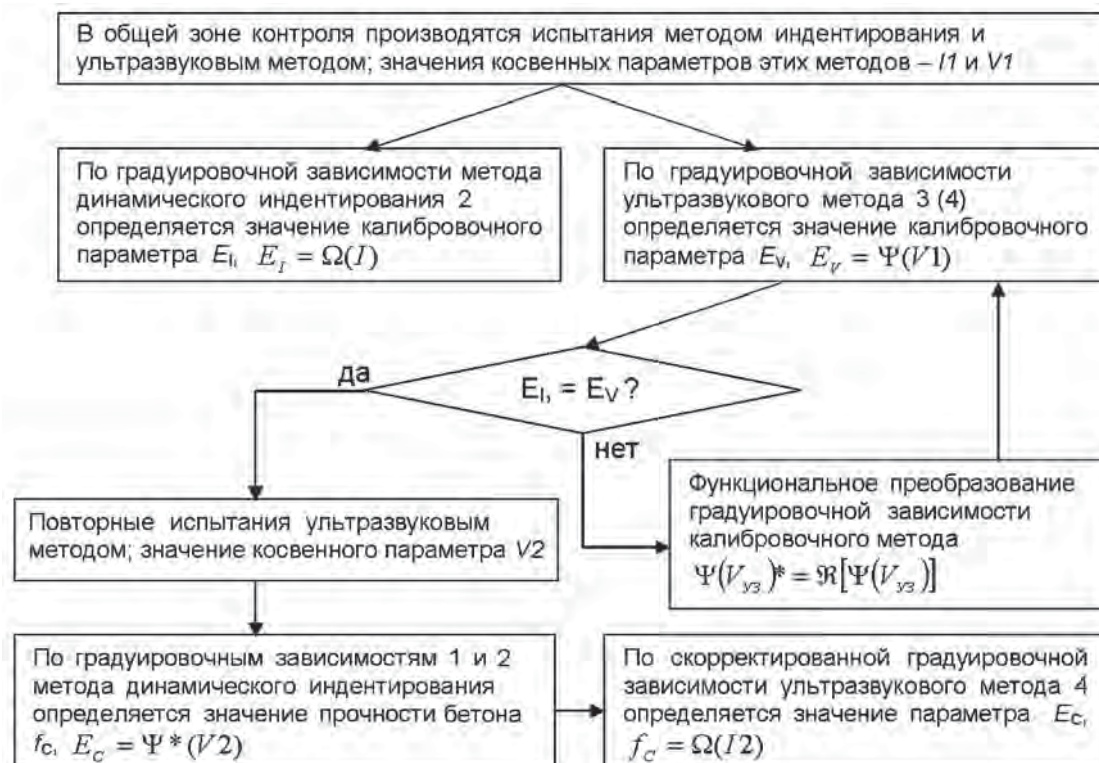


Рис. 3. Алгоритм объединения показателей неразрушающих методов контроля [11–14]

Fig. 3. Algorithm for combining indicators of non-destructive testing methods [11–14]

разует простые данные в сложное графическое отображение, что позволяет быстро считывать информацию [15, 16].

Для реализации метода ультразвуковой томографии может использоваться томограф ультразвуковой низкочастотный А1040 МІРА (рис. 4). Данный прибор предназначен для обследования монолитных бетонных (фибробетонных) и железобетонных строительных конструкций с целью поиска пустот, каналов, силовой арматуры, инородных включений, расслоений, трещин и прочих полостей, как пустых, так и заполненных жидкостью или твердым материалом, отличающимся от окружающего бетона физико-механическими свойствами [15, 16].

В приборе используется метод синтезированной фокусируемой апертуры с комбинационным зондированием, при котором происходит фокусировка ультразвука в каждую точку полупространства. Массив данных формируется путем сбора информации со всех измерительных пар антенного устройства томографа. Принимаемые антенной решеткой сигналы

обрабатываются на встроенном компьютере непосредственно в процессе работы.

Общая площадь участков, подлежащих контролю, должна быть не менее 10% от общей площади контролируемой поверхности. Число и расположение контролируемых участков должно указываться проектной организацией в рабочих чертежах конструкций в зависимости от геометрических размеров, назначения и технологии их изготовления. Область для проведения замера должна быть не более: для линейных конструкций – одного участка на 4 м длины; для плоских конструкций – одного участка на 4 м² площади; для монолитных конструкций сплошных стен – одного участка на 8 м² площади.

Определение прочности и критического коэффициента интенсивности напряжений наноприобетона способом прямого отрыва

Задачей данного метода является определение критического коэффициента интенсивности напря-

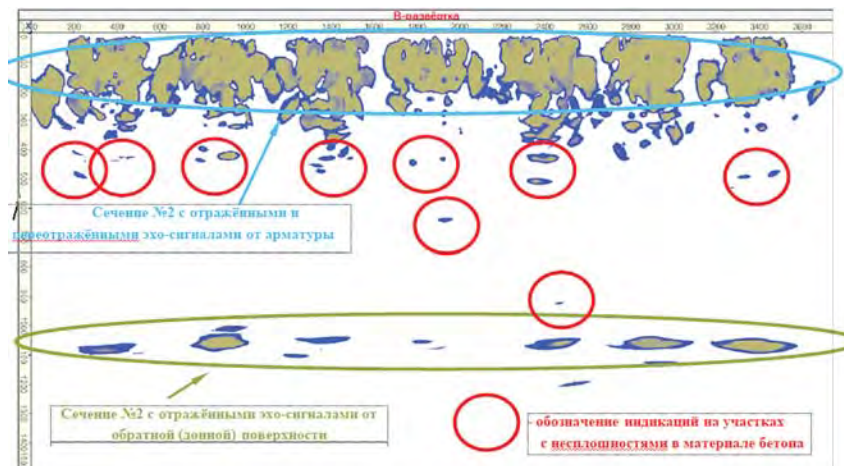
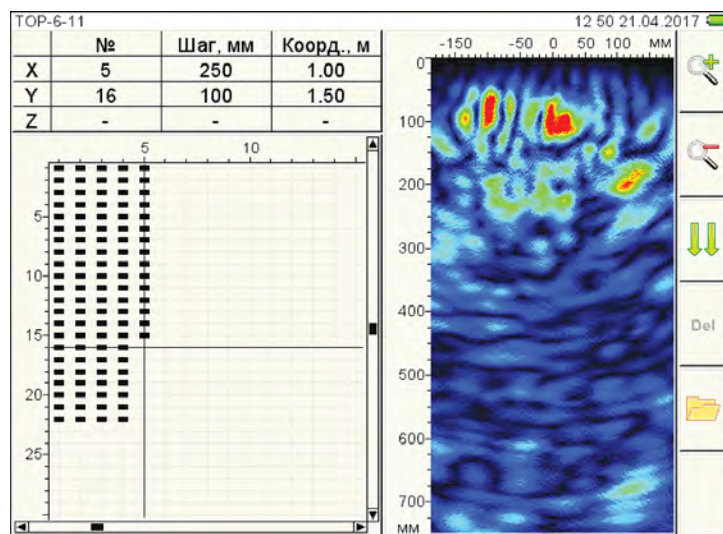


Рис. 4. Ультразвуковая томография прибором А1040 МІРА в режиме сплошного сканирования

Fig. 4. Ultrasound tomography using the A1040 MIRA device in continuous scanning mode

жений наноприобетона эксплуатируемой конструкции при нормальном отрыве. Данный метод основывается на методе отрыва со скалыванием по СТБ 2264 и ГОСТ 22690 (рис. 5).

В зависимости от коэффициента интенсивности напряжений непосредственно в конструкции можно спрогнозировать такие параметры наноприобетона, как трещиностойкость, морозостойкость и долговечность материала.

Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжений наноприобетона реализуют следующим образом [18]. В выбуренный в наноприобетонном массиве шпур радиусом r_0 устанавливается специальное анкерное устройство и часть наноприобетона выдерживается пресс-насосом типа ГПНС (гидравлический пресс-насос самоцентрирующийся), в виде усеченного конуса с максимальным радиусом разрушения r_{max} и длиной шпура h . Разрушение происходит по поверхности конуса, образующая которого совпадает с площадкой главных напряжений.

В процессе вырыва микрообъема непосредственно из конструкции на заданном участке, помимо величины усилия, определяют размеры усеченного конуса разрушения – радиус r_0 , длина h шпура, длина образующей l конуса разрушения и рассчитывают критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} наноприобетона по формуле [17]:

$$K_{IC} = \frac{3P[\cos^2(90-\alpha) - \sin^2(90-\alpha)]}{2\pi h^2(1 + \frac{r_0}{r_0 + h \cdot \tan \alpha})} \cdot \sqrt{2\pi l} \left[\frac{0,8}{(\frac{R}{l})^3 - 1} + 0,7 \right], \quad (2)$$

где P – усилие вырыва, МН; α – угол между образующей конуса разрушения и стороной шпура;

$$\alpha = \arctg\left(\frac{R}{h}\right). \quad (3)$$

При испытании после образования трещин происходит нарушение сцепления фибры с бетоном, сопровождающееся перемещением вырываемого микро-

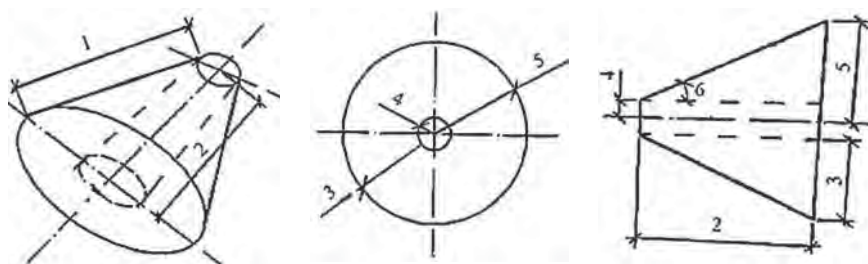


Рис. 5. Усеченный конус разрушения после отрыва со скалыванием: 1 – длина образующей конуса разрушения l ; 2 – длина шпура h ; 3 – разница между максимальным радиусом конуса разрушения и радиусом шпура R ; 4 – радиус шпура r_0 ; 5 – максимальный радиус конуса разрушения r_{max} ; 6 – угол между образующей конуса разрушения и стороной шпура α [17]

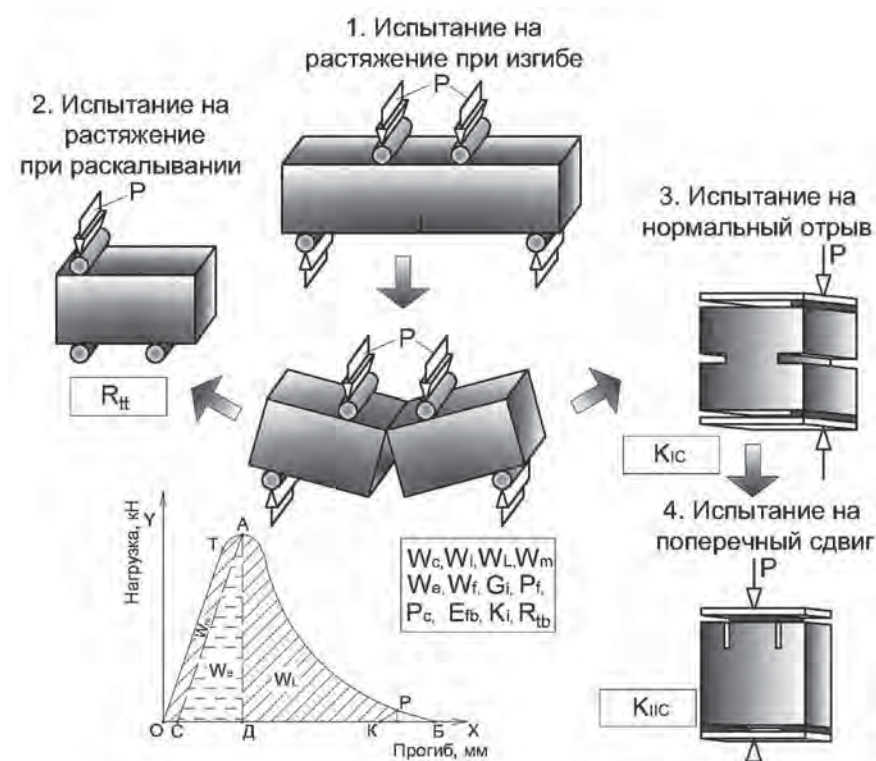


Рис. 6. Модель многопараметричной методики испытания наноприобетона в лабораторных условиях

Fig. 6. Model of a multi-parameter test procedure for nanofibre concrete in laboratory conditions

объема относительно тела конструкции. Прочность наноприобетона, являющуюся параметром качества, определяют по величине усилия, а расчет критического коэффициента интенсивности напряжений производится с учетом геометрических параметров шпура и усеченного конуса разрушения.

При испытаниях методом отрыва со скалыванием участки следует располагать в зоне наименьших напряжений, вызываемых эксплуатационной нагрузкой или усилием обжатия предварительно напряженной арматуры. Центры мест испытаний должны быть удалены друг от друга не менее чем на 200 мм, от края конструкции – не менее чем на 150 мм.

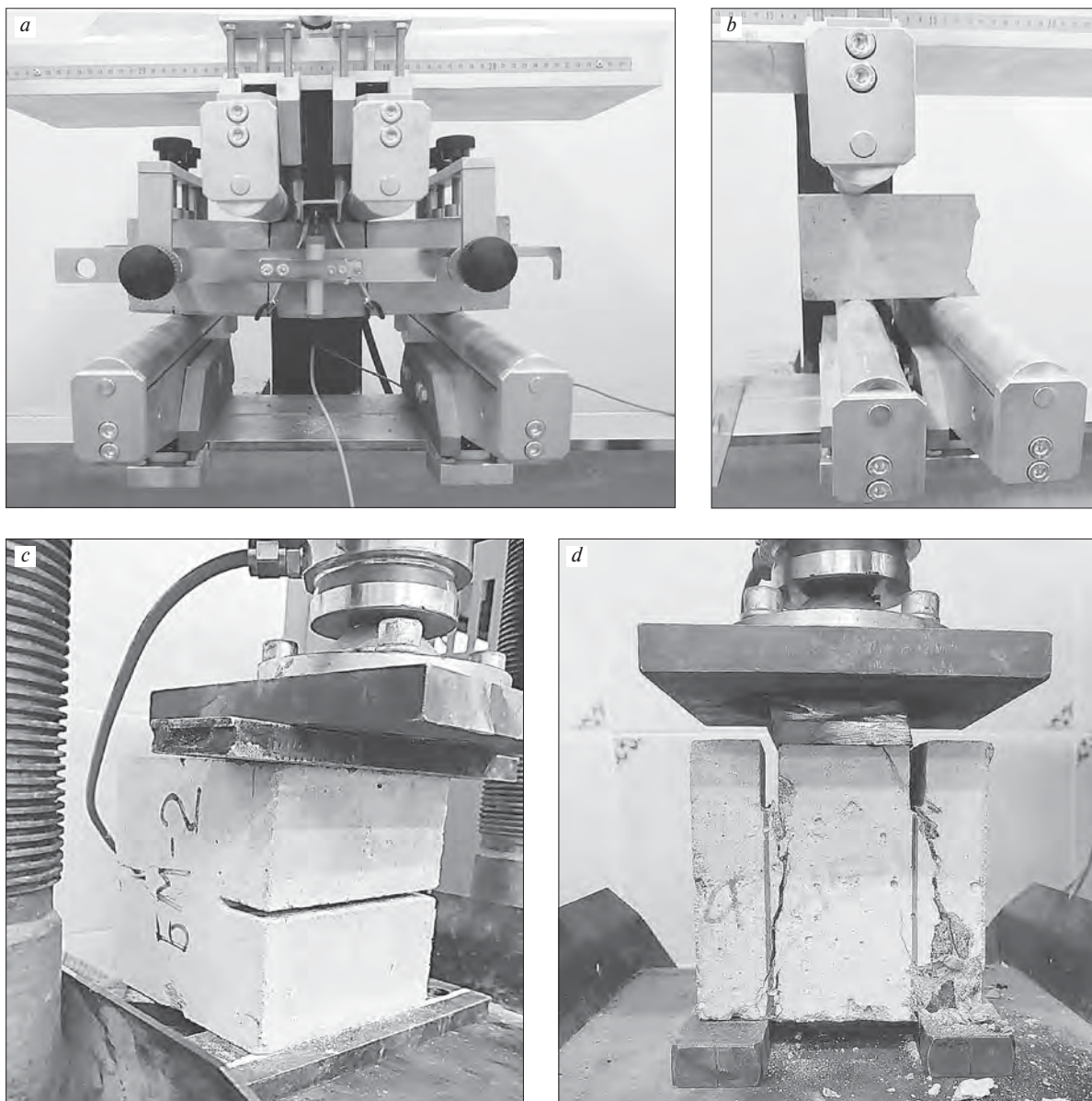


Рис. 7. Испытания нанофибробетона в лабораторных условиях: а – растяжение при изгибе с регистрацией диаграммы разрушения; б – растяжение при раскалывании; в – нормальный отрыв при внецентренном сжатии; д – поперечный сдвиг

Fig. 7. Tests of nano-fibro concrete in laboratory conditions: a – stretching during bending with the registration of the fracture diagram; b – stretching during splitting; c – normal pull-off during off-center compression; d-transverse shear

Результаты испытаний нанофибробетонных образцов
Test results of nanofibre concrete samples

Параметры	Количество фибры (% по объему смеси)	Нанобетонная матрица				
		Без фибры	Фибра стальная волнистая (1%)	Фибра стальная анкерная (1%)	Фибра полимерная волнистая (1%)	0,07% базальтовая + 0,26% микрофибра стальная прямая + 0,26% стальная анкерная
Растяжение при изгибе R_{fb} , МПа		2,8	5,9	9,4	6,2	4,2
Удельные энергосатраты G_f , Дж/м ²		208,9	800,58	1329,08	312,72	760,22
Растяжение при раскалывании R_{fb} , МПа		1,7	3,1	3,2	2,8	2,3
Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} , МН/м ^{3/2}		0,7	3,5	2,6	0,97	1,9
Критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IIC} , МН/м ^{3/2}		3,9	3,7	7,2	4,5	5,8

Лабораторные испытания

Многopараметричная методика испытания нанoфибробетона в лабораторных условиях позволяет определить силовые и энергетические характеристики трещиностойкости при статическом кратковременном нагружении (рис. 6). Характеристики трещиностойкости определяют при неравновесных механических испытаниях [18].

Суть данной методики заключается в получении всех заявленных показателей качества нанoфибробетона в результате испытания одного образца из серии. Образец-призма с надрезом (инициатором напряжений) первоначально испытывается на растяжение при изгибе по четырехточечной схеме нагружения (рис. 7, а). В результате испытания определяется значение прочности на растяжение и фиксируется полная диаграмма деформирования. По полученной диаграмме деформирования рассчитываются энергетические показатели и показатель вязкости разрушения – квазистатический коэффициент интенсивности напряжений (K_I) [19].

После испытания на изгиб образуются две половинки образца-призмы, пригодные для дальнейших испытаний. Одну половинку испытывают на растяжение при раскалывании (рис. 7, б). Методика испытания на прочность при раскалывании соответствует изложенной в ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» методике испытаний на растяжение при раскалывании по образцам-кубам. Из второй половинки с помощью режущих инструментов с алмазным напылением формируют образец-куб с инициаторами трещин в виде симметричных надрезов. Полученный образец испытывают на нормальный отрыв (рис. 7, в). Испытания проводятся при внецентренном сжатии. В результате испытания определяется значение критического коэффициента интенсивности напряжения (на нормальный отрыв K_{IC} МН/м^{3/2}) [20].

После испытания на нормальный отрыв образуются два фрагмента (пластины). На полученных пластинах с помощью режущих инструментов с алмазным напылением выполняют зону концентрации напряжения в виде симметричных надрезов на одной грани изделия [19]. Испытания образцов-пластин проводятся при центральном сжатии (рис. 7, д). В результате испытания определяется значение критического коэффициента интенсивности напряжения (на поперечный сдвиг K_{IIc} Н/м^{3/2}) [21].

Для проведения испытаний изготавливаются образцы-призмы согласно требованиям ГОСТ 10180.

Список литературы

1. Полонина Е.Н., Леонович С.Н., Коледа Е.А. Физико-механические характеристики нанобетона

Отношение высоты к ширине (диаметру) образца принимается равным 4. Рекомендуемые размеры призмы – 100×100×400 мм; 150×150×600 мм. Представленная методика позволяет получить оценку вязкости разрушения нанoфибробетона на одном образце из серии, что исключает погрешности и неточности показателей качества материала, связанные с разными условиями твердения, формования, неточностями в дублировании состава.

В таблице приведены результаты испытаний по предложенной лабораторной методике нанoфибробетонных образцов-призм в строительной лаборатории «Атомстройэкспорт» (Российская Федерация) на строительной площадке Белорусской АЭС в Республике Беларусь. За основу были взяты составы бетонных смесей, используемых при строительстве Белорусской атомной станции.

Заключение

Представленная методика позволяет оценить качество нанoфибробетона в построечных условиях. Согласно изложенной методике, используются методы, основанные на ультразвуковом прозвучивании, ударном импульсе и методе прямого отрыва. Комбинация этих методов позволяет получить дополняющие друг друга показатели. Так, прямой показатель качества – прочность нанoфибробетона в конструкции определяется комплексным методом и методом, основанным на способе отрыва. Косвенный показатель – скорость распространения ультразвука (что характеризует однородность материала) определяется комплексным методом и методом ультразвуковой томографии. В лабораторных испытаниях используется комбинация известных широкоиспользуемых стандартизированных методов испытаний. Определяемые по предлагаемой методике характеристики трещиностойкости (наряду с другими характеристиками механических свойств) могут быть использованы для:

- сравнения различных вариантов состава, технологических процессов изготовления и контроля качества нанoфибробетонов;
- сопоставления нанoфибробетонов при обосновании их выбора для конструкций;
- расчетов конструкций с учетом их дефектности и условий эксплуатации;
- анализа причин разрушений конструкций.

References

1. Polonina E.N., Leonovich S.N., Koleda E.A. Physical and mechanical characteristics of nanobeton. *Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2018. No. 4 (37), pp. 100–111. (In Russian).

1. // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 4 (37). С. 100–111.
2. Sadovskaya E.A., Leonovich S.N., Zhdanok S.A., Polonina E.N. Tensile Strength of Nanofibrous Concrete // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020. Vol. 93. No. 4, pp. 1051–1055.
3. Коледа Е.А., Леонович С.Н., Жданок С.А. Результаты испытаний нанофибробетона на растяжение с комплексным фибровым армированием // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2018. № 2. С. 16–23.
4. Коледа Е.А., Леонович С.Н. Неразрушающий контроль качества фибробетонных конструкций как компонент системы мониторинга рисков при эксплуатации производственного объекта // *Системные технологии*. 2016. № 2 (19). С. 85–95.
5. Коледа Е.А., Леонович С.Н. Характеристики трещиностойкости фибробетона как определяющий фактор качества. *Технология строительства и реконструкции: TCR-2015: Сборник докладов Международной научно-технической конференции*. Минск: БНТУ, 2017. С. 282–287.
6. Abou El-Mal Hesham, Sherbini A.s., Sallam Hossam. Mode II fracture toughness of hybrid FRCs // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015. No. 9. 10.1007/s40069-015-0117-4
7. Xuesen Li, Jie Dai, Mingke Deng. Shear behavior of high ductile fiber reinforced concrete beams // *Alexandria Engineering Journal*. 2021. Vol. 60. Iss. 1, pp. 1665–1675. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.11.017>
8. Пухаренко Ю.В., Голубев В.Ю. О вязкости разрушения фибробетона // *Вестник гражданских инженеров*. 2008. № 3 (16). С. 80–83.
9. 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
10. Marcello Congro, Eleazar Cristian Mejía Sanchez, Deane Roehl, Ederli Marangon. Fracture modeling of fiber reinforced concrete in a multiscale approach // *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 174. 106958. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106958>
11. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Основы мониторинга возводимых и эксплуатируемых железобетонных конструкций неразрушающими методами: Монография. Минск: БНТУ, 2016. 330 с.
12. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khroustalev B.M., Koleda E.A. Physicomechanical
2. Sadovskaya E.A., Leonovich S.N., Zhdanok S.A., Polonina E.N. Tensile strength of nanofibrous concrete. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2020. Vol. 93. No. 4, pp. 1051–1055.
3. Koleda E.A., Leonovich S.N., Zhdanok S.A. Results of tensile tests of nanofibre concrete with complex fiber reinforcement. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2018. No. 2, pp. 16–23. (In Russian).
4. Koleda E.A., Leonovich S.N. Non-destructive quality control of fiber-reinforced concrete structures as a component of the risk monitoring system during the operation of a production facility. *Sistemnye tekhnologii*. 2016. No. 2 (19), pp. 85–95. (In Russian).
5. Koleda E.A. Fibroconcrete crack resistance characteristics as a determining factor of quality. *Crack resistance characteristics of fiber-reinforced concrete as a determining factor of quality. Construction and reconstruction technology: TCR-2015: collection of reports of the International Scientific and Technical Conference*. Minsk: BNTU. 2017, pp. 282–287. (In Russian).
6. Abou El-Mal Hesham, Sherbini A.s., Sallam Hossam. Mode II fracture toughness of hybrid FRCs. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2015. No. 9. 10.1007/s40069-015-0117-4
7. Xuesen Li, Jie Dai, Mingke Deng. Shear behavior of high ductile fiber reinforced concrete beams. *Alexandria Engineering Journal*. 2021. Vol. 60. Iss. 1, pp. 1665–1675. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.11.017>
8. Pukharenko Yu.V., Golubev V.Yu. On the fracture toughness of fiber-reinforced concrete. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2008. No. 3 (16), pp. 80–83. (In Russian).
9. Bazhenov Yu.M., Chernyshov E.M., Korotkikh D.N. Construction of modern concrete structures: defining principles and technological platforms. *Stroitelnye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 3, pp. 6–14. (In Russian).
10. Marcello Congro, Eleazar Cristian Mejía Sanchez, Deane Roehl, Ederli Marangon. Fracture modeling of fiber reinforced concrete in a multiscale approach. *Composites Part B: Engineering*. 2019. Vol. 174. 106958. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106958>
11. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Osnovy monitoringa vozvodimykh i ekspluatiruemykh zhelezobetonnykh konstruktсий nerazrushayushchimi metodami [Fundamentals of non-destructive monitoring of erected and operated reinforced concrete structures]. Monograph. Minsk: BNTU. 2016. 330 p.
12. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Leonovich S.N., Khroustalev B.M., Koleda E.A. Physicomechanical

- characteristics of concrete modified by a nanostructured-carbon-based plasticizing admixture // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. No. 1, pp. 12–18.
13. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Мультиволновой ультразвуковой контроль бетона // *Наука и техника*. 2017. Т. 16. № 4. С. 289–297.
14. Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Повышение достоверности контроля прочности бетона неразрушающими методами на основе их комбинирования // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 1. С. 25–32.
15. Шевалдыкин В.Г., Самокрутов А.А., Козлов В.Н. Ультразвуковые низкочастотные пьезопреобразователи с сухим точечным контактом и их применение для неразрушающего контроля. // *Контроль. Диагностика*. 2003. № 2. С. 30–39.
16. Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Ультразвуковая дефектоскопия бетона эхо-методом: состояние и перспективы // *В мире неразрушающего контроля*. 2002. № 2 (16). С. 6–10.
17. 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*. 2019. Vol. 92. No. 2, pp. 375–382.
18. Леонович С.Н. Способ контроля качества сталефибробетона по коэффициенту интенсивности напряжений при нормальном отрыве // *Поведение бетонов и железобетонных конструкций при наличии нагрузок и тепловлажностных воздействий различной длительности: Электронный сборник научных трудов международной научно-технической конференции*. Макеевка: ДОННАСА, 2020. С. 47–52.
19. Леонович С.Н., Зверев В.Ф., Литвиновский Д.А. Критерии хрупкого разрушения высокопрочного бетона. *Механика разрушения строительных материалов и конструкций: Материалы VIII Академических чтений РААСН*. Казань, 2014. С. 169–173.
20. Патент РБ 16194. *Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона* / Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Заявитель Белорусский национальный технический университет. Опубл. 30.08.2012.
21. Патент. RU 2621618. *Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжения высокопрочного бетона* / Леонович С.Н., Литвиновский Д.А., Ким Л.В. Опубл. 06.06.2017.
- characteristics of concrete modified by a nanostructured-carbon-based plasticizing admixture. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. No. 1, pp. 12–18.
13. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Multiwave ultrasonic testing of concrete. *Nauka i tekhnika*. 2017. Vol. 16. No. 4, pp. 289–297. (In Russian).
14. Snezhkov D.Yu., Leonovich S.N. Improving the reliability of the control of concrete strength by non-destructive methods based on their combination. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018. No. 1, pp. 25–32. (In Russian).
15. Shevaldykin V.G., Samokrutov A.A., Kozlov V.N. Ultrasonic low-frequency piezoelectric transducers with dry point contact and their application for non-destructive testing. *Kontrol'. Diagnostika*. 2003. No. 2, pp. 30–39. (In Russian).
16. Kozlov V.N., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. Ultrasonic flaw detection of concrete by the echo method: state and prospects. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*. 2002. No. 2 (16), pp. 6–10. (In Russian).
17. 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*. 2019. Vol. 92. No. 2, pp. 375–382.
18. Leonovich S.N. Method of quality control of steel fiber reinforced concrete by stress intensity factor at normal separation. *Behavior of concrete and reinforced concrete structures in the presence of loads and heat and humidity effects of various duration: Electronic collection of scientific papers of the international scientific and technical conference*. Makeevka: DONNASA, 2020, pp. 47–52. (In Russian).
19. Leonovich S.N., Zverev V.F., Litvinovsky D.A. Brittle fracture criteria for high-strength concrete. *Fracture Mechanics of Building Materials and Structures: Materials of the VIII Academic Readings of the RAASN*. Kazan. 2014, pp. 169–173. (In Russian).
20. Patent RB 16194. *Sposob opredeleniya kriticheskogo koeffitsienta intensivnosti napryazheniya vysokoprochnogo betona* [Method for determining the critical stress intensity factor of high-strength concrete]. Leonovich S.N., Litvinovskii D.A. Applicant Belarusian National Technical University; Publ. 30.08.2012. (In Russian).
21. Patent. RU 2621618. *Sposob opredeleniya kriticheskogo koeffitsienta intensivnosti napryazheniya vysokoprochnogo betona* [Method for determining the critical stress intensity factor of high-strength concrete]. Leonovich S.N., Litvinovskii D.A., Kim L.V. Publ. 06.06.2017. (In Russian).