

УДК 691.32

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.35

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN NQELWC

DOI 10.62980/2076-0655-2025-91-100

ВЛИЯНИЕ СТЕКЛОКОМПОЗИТНОЙ ФИБРЫ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА

Соловьев В.Г.¹, Сизяков И.Д.²

^{1,2} Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный университет

АННОТАЦИЯ

Получение бетонов с заданными свойствами позволяет решать большинство конструкторских задач. Применение стеклокомпозитной фибры в качестве дисперсного армирования тяжёлых бетонов позволит не только получить материалы с повышенными эксплуатационными характеристиками и вязким разрушением, но и материалы со специальными свойствами такими как радиопрозрачность, повышенные диэлектрические свойства. В исследования определялись физико-механические и энергетические характеристики фибробетонов со стеклокомпозитной фиброй. С помощью ортогонального центрально-композиционного планирования получены 4 зависимости от рецептурных параметров дисперсно-армированного бетона. По результатам анализа полученных функций выделены оптимальные параметры концентраций стеклокомпозитной фибры и её геометрических параметров. С точки зрения прочности на растяжение-сжатие оптимальным составом фибробетона является прямолинейная фибра с шагом навивки 4 мм и объемным содержанием 2%. С точки зрения энергетических характеристик оптимум будет находиться с прямолинейной фиброй с шагом навивки 5,5 мм и объемным содержанием (1,8-2,0) %. В этом случае энергия на разрушение образца увеличивается более чем в 2 раза в сравнении минимальными значениями функции отклика в области варьирования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фибра, стеклокомпозитная фибра, стеклопластиковая фибра, математическое планирование, вязкость разрушения, трещиностойкость, остаточная прочность, дисперсное армирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Соловьев В.Г., Сизяков И.Д. Влияние стеклокомпозитной фибры на физико-механические свойства тяжелого бетона // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 1. – С. 91-100, DOI 10.62980/2076-0655-2025-91-100, EDN NQELWC

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN NQELWC

DOI 10.62980/2076-0655-2025-91-100

IMPACT OF GLASS COMPOSITE FIBER ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF HEAVY CONCRETE

Solovev V.G.¹, Sizyakov I.D.²

^{1,2} National Research Moscow State University of Civil Engineering

ABSTRACT

The development of concrete with predefined properties makes it possible to solve most structural design challenges. The use of glass composite fiber as dispersed reinforcement in heavy concrete allows the production of materials not only with enhanced performance characteristics and increased fracture toughness, but also with special properties such as radio transparency and elevated dielectric strength. In this study, the physical, mechanical, and energy-related properties of fiber-reinforced concrete containing glass composite fiber were evaluated. Using an orthogonal central composite design (CCD), four response functions were obtained based on formulation parameters of dispersed-reinforced concrete. Analysis of these functions revealed optimal values for both the concentration and geometric parameters of the glass composite fiber. From the standpoint of tensile-compressive strength, the optimal composition includes straight fibers with a helix pitch of 4 mm and a volumetric content of 2%. In terms of energy characteristics, the optimum is achieved with straight fibers having a helix pitch of 5.5 mm and a fiber content of 1.8–2.0%. In this case, the energy required for specimen fracture increases by more than twofold compared to the minimum values of the response function within the experimental range.

KEY WORDS: fiber, glass composite macrofiber, fiber-reinforced concrete, residual tensile strength, design of experiments

FOR CITATION: Solovev V.G., Sizyakov I.D., Impact of glass composite fiber on the physico-mechanical properties of heavy concrete // Technique and technology of silicates. – 2025. Vol.32, No1. – Pp. 91 – 100, DOI 10.62980/2076-0655-2025-91-100, EDN NQELWC

ВВЕДЕНИЕ

Развитие строительной отрасли требует внедрения современных строительных материалов, которые способны снизить материалоемкость конструкций и повысить эффективность строительного процесса, а также увеличить долговечность и надежность конструкций. Бетон является основным строительным материалом позволяющим возводить здания и сооружения в промышленных масштабах, значительно ускоряя процесс строительства. Его основными недостатками являются низкая прочность на растяжение и хрупкое разрушение.

Использование фибробетонов повышает трещиностойкость конструкций и вязкость при их разрушении [1,2]. Появление нового вида армирующего элемента – стеклокомпозитной фибры требует её детального изучения.

Моделирование свойств материала позволяет объяснить процессы, протекающие в материале обуславливающие поведение материала при его эксплуатации. Наличие математических моделей материала, помогает в разработке оптимальных составов с заданными свойствами, нормативно-технической документации, ограничивающей область применения таким материалов.

В работе получена математические модели фибробетона на основе стеклокомпозитной фибры сложной геометрической формы. Новый материал практически не имеет аналогов. С одной стороны дисперсно-армированный бетон со стеклокомпозитной фиброй похож на сталефибробетон, но характер взаимодействия матрицы и фибры принципиально отличается для композита и стали, с другой стороны взаимодействие волокна с бетоном должно быть схоже со стеклокомпозитной арматурой [3–5].

Особенно актуальным является исследование влияния геометрических размеров и концентрации стеклокомпозитной фибры на свойства тяжелых бетонов различных классов. Наиболее эффективно данные зависимости можно установить с помощью математических моделей, которые будут использованы для проектирования бетонов со стеклокомпозитной фиброй с заданными свойствами [6].

Цель или задачи исследования:

Получение математических моделей, определяющих влияния геометрических размеров и концентрации стеклокомпозитной фибры на физико-механические свойства тяжелых бетонов различных классов

Материалы и методы исследования

В работе применялось 5 видов прямолинейной фибры с навивкой, характеристики которых приведены в таблице 1. На основании предварительных испытаний [7–9] прямолинейная фибра с навивкой оказалось наиболее эффективной, поэтому шаг навивки принят как варьируемый фактор. В работе исследовалось влияние шага навивки как значимого фактора влияющего на прочность сцепления и как следствие связанного с величиной прочности фибробетона на осевое растяжение и остаточную прочность на растяжение при изгибе. Диаметр и длина всех видов фибры имеют фиксированное значение поэтому геометрический фактор (соотношение длины фибры к диаметру) является постоянным

Стеклокомпозитное волокно изготовлено методом пул-трузии, где стеклянный ровинг пропитывается эпоксидной

INTRODUCTION

The advancement of the construction industry requires the integration of modern construction materials capable of reducing the material consumption of structures, improving construction efficiency, and enhancing both the durability and reliability of buildings. Concrete remains the primary construction material used for industrial-scale building, significantly accelerating construction processes. However, its main disadvantages include low tensile strength and brittle failure.

The use of fiber-reinforced concrete (FRC) improves the crack resistance of structures and increases their fracture toughness [1,2]. The emergence of a new type of reinforcing element—glass composite fiber—requires detailed investigation.

Mathematical modeling of material properties allows us to explain the internal processes that govern the material's behavior during its service life. The availability of reliable mathematical models aids in the development of optimized concrete compositions with predefined properties, as well as in the formulation of technical standards that define the scope of application for such materials.

This study presents mathematical models of fiber-reinforced concrete based on glass composite fibers with complex geometries. This new material has virtually no analogs. On one hand, dispersed-reinforced concrete with glass composite fiber resembles steel fiber-reinforced concrete, but the interaction between the fiber and the matrix fundamentally differs between composites and steel. On the other hand, the interaction between the fiber and the concrete matrix is expected to resemble that of glass composite rebar [3–5].

Of particular relevance is the investigation into how the geometric dimensions and concentration of glass composite fiber affect the properties of heavyweight concrete of various strength classes. The most effective way to determine these relationships is through mathematical models, which can then be used for designing concrete with glass composite fibers tailored to specific performance requirements [6].

The purpose or objectives of the study:

Development of mathematical models describing the influence of the geometric parameters and concentration of glass composite fiber on the physical and mechanical properties of heavyweight concrete of various strength classes.

Materials and methods of research

Five types of straight fiber with helical winding were used in the study, with their characteristics listed in Table 1. Based on preliminary testing [7–9], straight fiber with helical winding proved to be the most effective; therefore, the winding pitch was selected as a variable factor.

The study examined the influence of winding pitch as a significant factor affecting bond strength, which in turn is related to both the axial tensile strength of fiber-reinforced concrete and its residual tensile strength in bending.

The diameter and length of all fiber types were kept constant, meaning that the geometric factor—defined as the fiber length-to-diameter ratio—remained unchanged across all configurations.

смолой, потом сплетаются между собой и протягиваются через фильеру. Дополнительно на основной стержень наматывается обмоточная нить меньшего диаметра примерно 1/10 от основного диаметра с определенным шагом. В последствии стержни протягиваются через тепловые агрегаты и полимеризуются, а после нарезаются на волокна необходимой длины.

Для приготовления фибробетона использовались материалы указанные в таблице 2, а составы тяжелого бетона представлены в таблице 3.

The glass composite fiber was manufactured using the pultrusion process, in which glass roving is impregnated with epoxy resin, then braided together and drawn through a die. Additionally, a helical wrapping thread with a diameter approximately one-tenth of the main rod is wound around the core at a specified pitch. Subsequently, the rods are passed through thermal units for polymerization and then cut into fibers of the required length.

For the preparation of fiber-reinforced concrete, the materials indicated in Table 3 were used, and the compositions of heavy concrete are presented in Table 3.

ТАБЛИЦА 1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКЛОКОМПОЗИТНОГО ВОЛОКНА
Table 1 Main characteristics of glass composite fibres

№	Тип фибры Type of fiber	Внешний вид Appearance	Длина, мм Length, mm	Диаметр, мм Diameter, mm	Диаметр нити, мм Filament diameter, mm	Шаг нити, мм Filament pitch, mm	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³
1	Ф – 1		52,5	0,98	0,12	3	2,41
2	Ф – 2		52,5	0,98	0,12	4	2,41
3	Ф – 3		50,0	0,98	0,17	7	2,49
4	Ф – 4		50,0	1,04	0,15	10	2,24
5	Ф – 5		50,0	1,04	0,15	11	2,24

ТАБЛИЦА 2 МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ
Table 2 Materials used for concrete mix preparation

Материал Material	Цемент	Песок	Щебень	Пластификатор
Маркировка Notation	Аккерман ЦЕМ II 42,5Н	М _к = 2,53	Гранитный Карелия d _{зерен} =3...10	На поликарбонатной VS 5600-SP

Составы подбирались в границах рационального применения стеклокомпозитной фибры с бетоном, поэтому по прочности использовался бетон В30-В45. Бетоны низкого водоцементного соотношения имеют класс по прочности В40-В45, среднего - В35-В40 и высокого В30-В35.

Маркировка составов означает объемное содержание стеклокомпозитной фибры на объем бетонной смеси – тип фибры совпадающей с маркировкой таблицы 1 (Ф-х) – водоцементное соотношение (В/Ц). Таким образом ФБ-2.0-Ф-4-0.63 расшифровывается как бетон со стеклокомпозитной фиброй с концентрацией фибры 2%, шаг навивки фибры 10 мм и водоцементное соотношение равно 0,63.

Остаточная прочность на растяжение определялась по схеме испытания приведена на рисунке 1. За основу взята методика определения остаточной прочности на растяжение, описанная в СП 297.1325800.2017 Приложение Б. Прочность фибробетона на сжатие определялась в соответствии с ГОСТ 10180–2012.

Согласно ГОСТ 29167–2021 определялись энергетические характеристики бетонов, такие как удельные энергозатраты на разрушение бетона до момента начала движения магистральной трещины и удельные энергозатраты необходимые на разрушение бетона до момента раскрытия магистральной трещины до 4 мм.

The compositions were selected within the range of rational application of glass composite fiber in concrete. Therefore, concretes with strength classes from В30 to В45 were used. Concretes with a low water–cement ratio correspond to strength classes В40–В45, medium ratios to В35–В40, and high ratios to В30–В35.

The composition labeling includes the volumetric content of glass composite fiber relative to the concrete mix volume, the fiber type (as indicated in Table 1, denoted F–x), and the water–cement ratio (W/C). For example, the designation FRC–2.0–F–4–0.63 refers to a concrete mix with a glass composite fiber content of 2%, a fiber winding pitch of 4 mm, and a water–cement ratio of 0.63.

The central test method was the determination of residual tensile strength in bending (test setup shown in Figure 1, based on SP 297.1325800.2017, Appendix B. Compressive strength was also tested according to GOST 10180–2012.

Energy-related properties were measured as per GOST 29167–2021, including specific energy required to initiate the main crack and to extend it to a width of 4 mm.

ТАБЛИЦА 3 СОСТАВЫ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА
Table 3 The compositions of heavy concrete

№	Маркировка Notation	Цемент Cemet	Вода Water	Песок Sand	Щебень Coarse aggre- gate	Фибра Fiber	Пластифика- тор Plasticizer
Расход компонентов на 1м3 бетонной смеси, кг							
1	ФБ-1.2-Ф-2-0.47 ----- ФБ -1.2-Ф-4-0.47	338	159	883	1197,5	30	5,4
2	ФБ -1.2-Ф-2-0.63 ----- ФБ -1.2-Ф-4-0.63	321	203	840	1139,0	30	1,8
3	ФБ -2.0-Ф-2-0.47 ----- ФБ -2.0-Ф-4-0.47	338	159	883	1197,5	50	5,4
4	ФБ -2.0-Ф-2-0.63 ----- ФБ -2.0-Ф-4-0.63	321	203	840	1139,0	50	1,8
5	ФБ -1.6-Ф-5-0.55 ----- ФБ -1.6-Ф-1-0.55	330	180	862	1169,0	40	1,6
6	ФБ -2.15-Ф-3-0.55	330	180	862	1169,0	54	3,6
7	ФБ -1.06-Ф-3-0.55	330	180	862	1169,0	27	5,2
8	ФБ -1.6-Ф-3-0.66	305	201	797	1080,0	40	1,4
9	ФБ -1.6-Ф-3-0.44	327	144	853	1156,0	40	1,4
10	ФБ -1.6-Ф-3-0.55	330	180	862	1169,0	40	4,3

РИСУНОК 1

ВНЕШНИЙ ВИД ИСПЫТАНИЯ

- 1 - схема испытания фибробетона на остаточную прочность на растяжение
- 2 – реальный образец в момент испытания

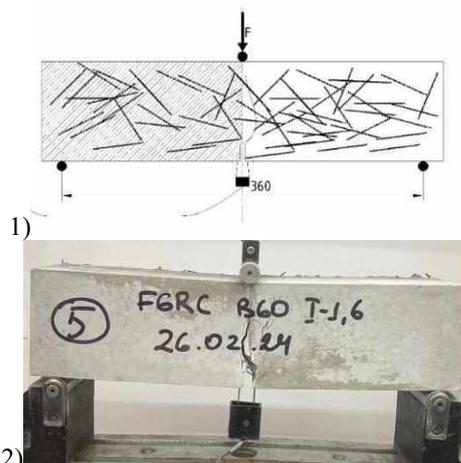


Figure 1

Test appearance

- 1– fiber concrete residual tensile strength test scheme
- 2 – real specimen at the time of testing

Для ограничения числа испытаний без потери точности полученной математической модели был применен метод математического планирования эксперимента. Подготовлен ортогональный центральный композиционный план (ОЦКП) 2-го порядка с 3-я факторами варьирования.

Наиболее значимые факторы выявлены для фибробетона исходя из результатов предварительных испытаний и анализа литературы. В качестве факторов варьирования приняты следующие рецептурные параметры: водоцементное соотношение [10], шаг навивки фибры и концентрация

To limit the number of tests without loss of accuracy of the obtained mathematical model, the method of mathematical planning of experiment was applied. A 2nd order orthogonal central compositional plan (CPCP) with 3 variation factors was prepared.

To minimize the number of tests without compromising model accuracy, a second-order orthogonal central composite design (CCD) with three varying factors was used. The most significant parameters—water-cement ratio [10], fiber concentration, and helix pitch—were chosen

фибры [11,12] в бетоне. Факторы и уровни варьирования представлены в таблице 4.

Подготовленный план состоит из 17 испытаний. Для получения ортогонального центрального композиционного плана 2-го порядка добавлены эксперименты в звездных точках. Основа эксперимента состоит из полного трехфакторного эксперимента, а также в центре плана произведено 3 независимых эксперимента [13,14].

Для оценки качества модели проводили вычисление критерия Кохрена (G), Фишера (F) и коэффициента детерминации (R²). Значимость факторов оценивалась по критерию Стьюдента (t) при уровне значимости α = 0,05.

based on preliminary experiments and literature [11,12] (see Table 4).

The design included 17 experimental runs, incorporating star points to complete the CCD. The core plan was a full three-factor design with three central-point replications [13,14].

Model quality was evaluated using Cochran’s (G), Fisher’s (F), and Student’s (t) criteria, along with the coefficient of determination (R²) at a significance level of α = 0.05

ТАБЛИЦА 4 УРОВНИ И ИНТЕРВАЛЫ ВАРЬИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ
Table 4 Levels and intervals of variation of factors

Фактор Factor Наименование Name	Уровни варьирования фактора Levels of variation of the factor			Интервал варьирования Interval variation
	-1	0	+1	
Водоцементное отношение (В/Ц)	0,47	0,55	0,63	0,08
Шаг навивки фибры, мм	4	7	10	3
Концентрация волокна, %	1,2	1,6	2,0	0,4

Эксперименты и обсуждение результатов

Результаты испытаний определены в каждой точке. Для проверки однородности дисперсий опытов критерий Кохрена не должен превышать 0,354 для данного плана. Такую проверку прошли результаты испытания для всех целевых функций.

Формула (1) конечная модель остаточной прочности фибробетона на растяжение, где учтены только значимые коэффициенты. По полученной модели видно, что понижение В/Ц соотношения и шага навивки приводит к повышению целевого признака. Квадратичный член с отрицательным коэффициентом отражает снижение темпа прироста прочности при уменьшении шага навивки.

$$Y_{Rmax} = 9,82 - 1,72x_1 - 2,09x_2 + 0,95x_3 + 0,93x_1x_2 - 1,00x_2^2 \tag{1}$$

Значимость общего коэффициента для первого и второго фактора свидетельствует о наличии взаимного влияния между геометрическими характеристиками волокна и прочностью матрицы. Иными словами, более выраженный эффект зафиксирован для более прочной матрицы с фиброй, имеющей частую навивку, а также для слабой матрицы с волокном с большим шагом навивки. Данный эффект может быть связан с тем, с увеличением водоцементного соотношения увеличивается количество капиллярных пор, что снижает прочность матрицы, в том числе прочность на срез. При частом шаге навивки разрушить контакт волокна с бетонной матрицей проще на срез.

На рисунке 2 представлены изолинии, являющиеся графическим отображением целевой функции (1). По графикам видно, что при увеличении концентрации и уменьшении водоцементного соотношения предел остаточной прочности возрастает линейно. По графику видно, что максимум целевой функции находится за пределами области исследования, в тех границах исследования максимум при

Results and Discussion

The homogeneity of variances was confirmed by Cochran’s test (threshold G = 0.354). All target variables met this condition.

Equation (1) is the final model for residual tensile strength, including only significant coefficients. It indicates that lowering both W/C ratio and helix pitch increases the target variable. A negative quadratic term implies a decreasing rate of strength gain as pitch decreases.

The mutual influence of fiber geometry and matrix strength is evident. A strong matrix combined with tightly wound fiber, or a weak matrix with widely spaced winding, amplifies the effects. Increased W/C ratio results in more capillary pores, reducing matrix strength—including shear strength. A tighter winding pitch weakens fiber–matrix adhesion under shear.

Figure 2 presents isolines that graphically represent the response function (1). The graphs show that an increase in fiber concentration combined with a decrease in the water–cement ratio leads to a linear increase in residual strength. It can be seen from the graph that the maximum of the response function lies outside the investigated range; within the studied domain, the maximum is observed at W/C = 0,47 and a winding pitch b=4 mm. A noticeable improvement due to fiber addition is observed in the pitch range from 4 to 5,5 mm. Within this interval, across all concrete strength classes, an increase in fiber content results in a rise in residual tensile strength.

В/Ц=0,47 и шаг навивки b=4 мм. Качественный эффект от добавления фибры наблюдается при шаге навивки от 4 до 5,5 мм. В данном диапазоне для всех классов бетона видно, что увеличение содержания повышает остаточную прочность.

РИСУНОК 2

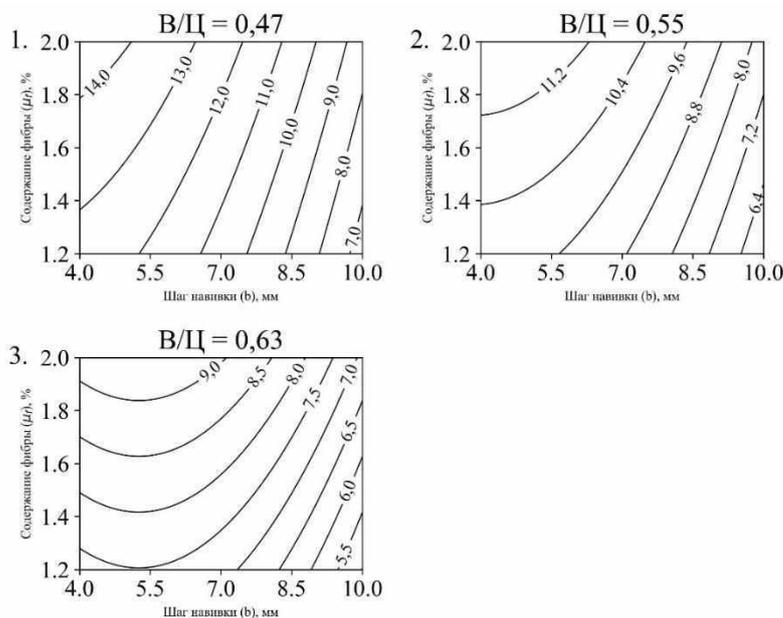
ИЗОЛИНИИ ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ НА РАСТЯЖЕНИЕ

- 1 – значения целевого признака при В/Ц = 0,47
- 2 – значения целевого признака при В/Ц = 0,55
- 3 – значения целевого признака при В/Ц = 0,63

Figure 2

Isolations of residual tensile strength:

- 1 – values of the target attribute at W/C = 0,47
- 2 – values of the target attribute at W/C = 0,55
- 3 – values of the target attribute at W/C = 0,63



Модель фибробетона на сжатие представленная в виде формулы (2), отражает в большей степени, что на прочность композита влияет водоцементное соотношение, что собственно справедливо и для тяжелых бетонов. Вторая степень 1-го фактора говорит о нелинейной связи этого параметра и прочности фибробетона на сжатие, что так же не противоречит общепринятым законам прочности тяжелого бетона. Отрицательный коэффициент перед фактором совместного влияния шага навивки и концентрации фибры говорит о том, что волокна с большим шагом навивки играют в большей степени роль дефектов и не сопротивляются распространению трещин при сжатии. Волокна с частой навивкой увеличивают прочность на сжатие, но более важным фактором остается водоцементное соотношение [15].

$$Y_{R_{сж}} = 41,05 - 8,18x_1 - 1,98x_2 - 1,85x_2x_3 + 2,48x_1^2 \tag{2}$$

На графиках рисунка 3 видно, что с увеличением шага навивки снижается прочность. Другими словами, фибра с большим шагом навивки являются дефектами повышение концентрации которых снижает прочностные характеристики фибробетона. С увеличением частоты навивки начиная с 7 мм повышение концентрации упрочняет материал. Это можно объяснить тем, что при хорошем сцеплении волокно противостоит раскрытию трещины, образующейся в момент разрушения при сжатии.

Модель фибробетона (3) по удельным энергозатратам, показывает, что целевой признак линейно зависит от прочности матрицы, нелинейная связь с целевым признаком имеется у факторов, отвечающих за концентрацию фибры и её вид. Момент начала движения магистральной трещины связан с нарушением целостности композита и постепенным выдергиванием волокон.

Equation (2) shows that compressive strength is primarily influenced by the W/C ratio a known fact in concrete science. The second-degree term for W/C reflects a non-linear dependency. The negative coefficient on the interaction between pitch and concentration suggests that larger pitch fibers act as defects under compression, while frequent winding enhances compressive strength. However, W/C ratio remains the dominant factor. The negative coefficient in front of the joint effect of winding pitch and fiber concentration indicates that fibers with large winding pitch play a greater role as defects and do not resist crack propagation in compression. Frequently coiled fibers increase compressive strength, but the water-cement ratio remains a more important factor [15].

The graphs in Figure 3 show that as the winding pitch increases, the strength decreases. In other words, fibers with a larger winding pitch act as defects, and increasing their concentration leads to a reduction in the strength characteristics of fiber-reinforced concrete. As the winding becomes more frequent (i.e., the pitch decreases below 7 mm), increasing the fiber concentration begins to strengthen the material. This effect can be attributed to the fact that, under conditions of good bond strength, the fiber resists the opening of cracks that form at the moment of compressive failure.

Equation (3) demonstrates that the target variable depends linearly on matrix strength, and non-linearly on fiber type and concentration. Crack initiation corresponds to composite failure onset and progressive fiber pull-out. At this stage, both matrix and fibers resist cracking.

РИСУНОК 3

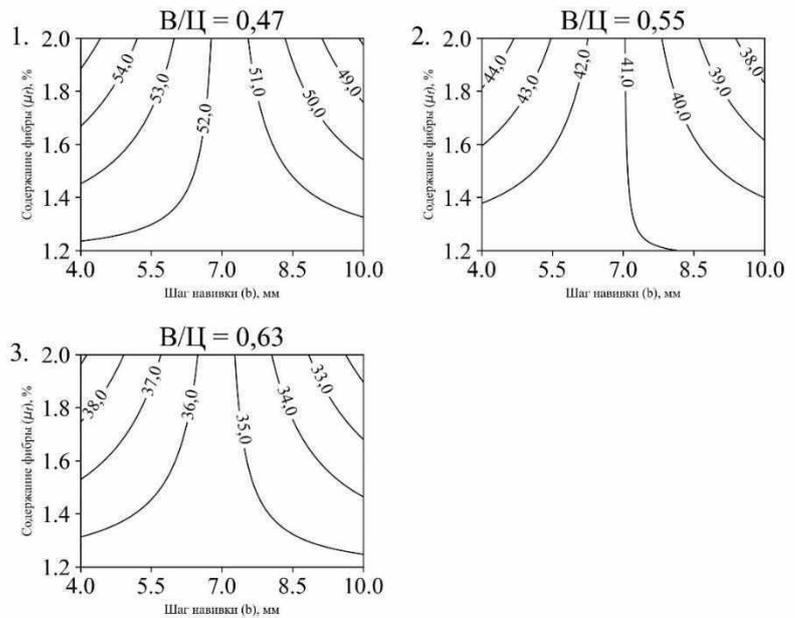
ИЗОЛИНИИ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ

- 1 – значения целевого признака при В/Ц = 0,47
- 2 – значения целевого признака при В/Ц = 0,55
- 3 – значения целевого признака при В/Ц = 0,63

Figure 3

Compressive strength isolines:

- 1 – values of the target attribute at W/C = 0,47
- 2 – values of the target attribute at W/C = 0,55
- 3 – values of the target attribute at W/C = 0,63



$$Y_{Gi} = 37,98 - 1,86x_1 - 3,83x_2 + 1,27x_3 - 3,63x_2^2 - 1,76x_3^2 \quad (3)$$

Таким образом, до начала движения магистральной трещины разрушению сопротивляется волокно совместно с матрицей, не давая последней разрушаться. Снижение интенсивности роста прочности от концентрации и шага навивки скорее всего связано со снижением процентного содержания материала матрицы в сечении вдоль трещины и увеличения содержания волокон. Стеклокомпозитное волокно в силу другой природы материала имеет отличающийся от основной матрицы характер разрушения, что приводит к более раннему растрескиванию бетона и переходу в нелинейный характер деформирования. Снижение эффективности сцепления стеклокомпозитной фибры с бетоном при повышении шага навивки так же может быть связано с изменением характера нарушения контакта.

The decline in strength gain with fiber content and pitch is linked to reduced matrix area and increased fiber volume. Due to their material nature, glass composite fibers fracture differently, causing earlier cracking and nonlinear deformation. Increased pitch weakens fiber–matrix bonding due to altered contact dynamics. Glass composite fiber due to the different nature of the material has a different character of failure from the basic matrix, which leads to earlier cracking of concrete and transition to a nonlinear character of deformation. Decrease in the bonding efficiency of glass composite fiber with concrete at increasing the winding pitch can also be related to the change in the nature of contact failure.

РИСУНОК 4

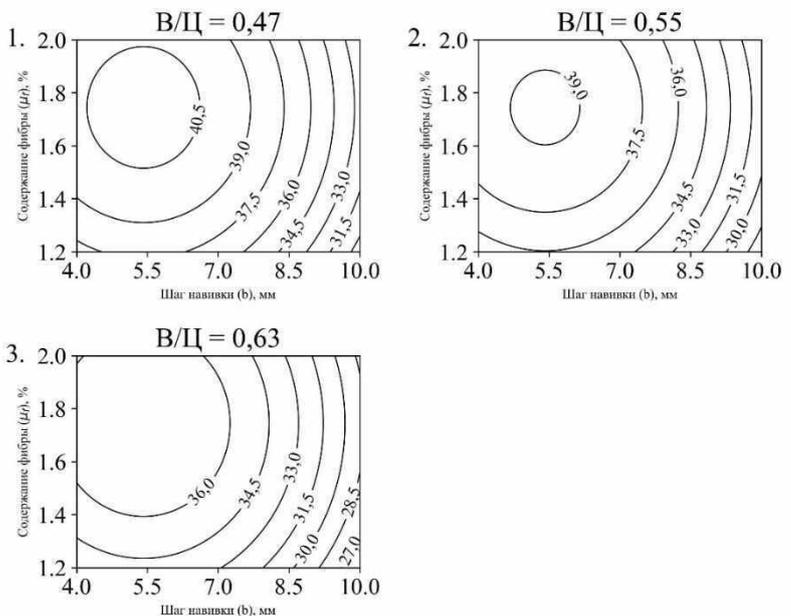
ИЗОЛИНИИ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ДО МОМЕНТА НАЧАЛА РАСКРЫТИЯ МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ

- 1 – значения целевого признака при В/Ц = 0,47
- 2 – значения целевого признака при В/Ц = 0,55
- 3 – значения целевого признака при В/Ц = 0,63

Figure 4

Isolines of specific energy inputs during fracture up to the moment of initiation of main crack opening:

- 1 – values of the target attribute at W/C = 0,47
- 2 – values of the target attribute at W/C = 0,55
- 3 – values of the target attribute at W/C = 0,63



На рисунке 4 на графиках виден пик в верхней левой четверти. При снижении водоцементного соотношения удельные энергозатраты на разрушение до момента начала движения магистральной трещины растут, что объясняется снижением капиллярной пористости и как следствие повышением энергии необходимой на растрескивание бетона. Из графиков можно заключить, что наиболее эффективно работает волокно с шагом навивки около $t=5,5$ мм и при концентрации примерно 1,8%.

При анализе модели (4) видно, что значимые коэффициенты совпадают с моделью (1).

По рисунку 5 видно, что повышение концентрации волокна благоприятно сказывается на вязкости разрушения. По 1 графику на рисунке 5 можно сделать вывод о том, что наиболее эффективен шаг навивки 5,5–7 мм при котором вырастают энергозатраты при увеличении концентрации.

$$Y_{Gf} = 4570,81 - 273,50x_1 - 485,55x_2 + 783,07x_3 - 243,21 x_1x_2 - 624,61 x_2^2 \quad (4)$$

РИСУНОК 5

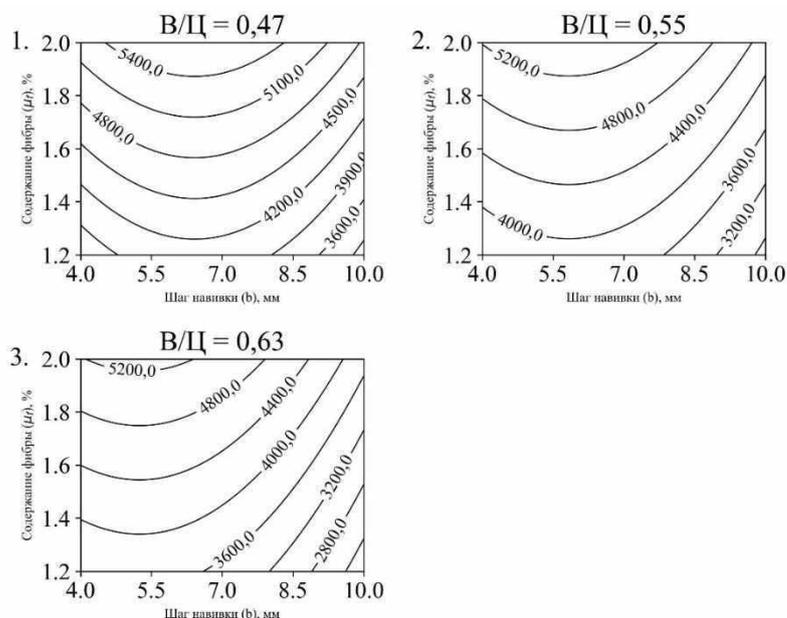
ИЗОЛИНИИ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ДО МОМЕНТА РАСКРЫТИЯ МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ 4 ММ

- 1 – значения целевого признака при В/Ц = 0,47
- 2 – значения целевого признака при В/Ц = 0,55
- 3 – значения целевого признака при В/Ц = 0,63

Figure 5

Isolines of specific energy consumption during fracture up to the moment of opening of the main crack 4 mm:

- 1 – values of the target attribute at W/C = 0,47
- 2 – values of the target attribute at W/C = 0,55
- 3 – values of the target attribute at W/C = 0,63



Заключение

Общие исследования прочностных характеристик фибробетона на основе стеклокомпозитной фибры позволяют сделать следующие выводы:

1. Получены и проанализированы математические модели фибробетона описывающие физико-механические характеристики, такие как предел прочности на сжатие, остаточная прочность на растяжение при изгибе. Получены математические модели фибробетона описывающие энергетические характеристики, такие как, удельные энергозатраты на разрушение до момента начала движения магистральной трещины и до момента раскрытия магистральной трещины 4 мм

2. Доказано положительное влияние стеклокомпозитного волокна на физико-механические характеристики фибробетона на всей области исследования. Оптимальным для бетонов классов В30-В45 является фибра с шагом навивки 4 мм и с объемным содержанием 2,0 %.

Conclusions

General studies of the strength characteristics of fiber-reinforced concrete based on glass-composite fiber allow the following conclusions:

1. Mathematical models of fiber-reinforced concrete have been obtained and analyzed, describing physical and mechanical characteristics such as compressive strength and residual tensile strength in bending. Mathematical models of fiber-reinforced concrete have been developed describing energy characteristics, such as specific energy consumption for static fracture up to the moment of main crack initiation and up to the moment of main crack opening of 4 mm.

2. The positive effect of glass-composite fiber on the physical and mechanical characteristics of fiber-reinforced concrete has been proven throughout the entire research area. For concrete classes B30-B45, the optimal fiber has a winding pitch of 4 mm with a volumetric content of 2.0%.

3. The optimal fiber geometry in terms of fracture toughness within the research area has been determined.

3. Определена оптимальная геометрия волокна с точки зрения вязкости разрушения в области исследования. С точки зрения повышения вязкости разрушения является волокно с навивкой шагом 5,5 мм и содержания фибры (1,8–2,0) %

Установленные зависимости от рецептурных параметров позволяют проектировать фибробетоны с заданными свойствами. Требуемые параметры по прочности на растяжение, сжатие, а также требования к вязкости разрушения фибробетона достигаются за счет добавления необходимого количества фибр и её вида (величина шага навивки).

Литература:

1. Ю.М. Баженов, Чернышев Е.М., Коротких Д.Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 6–14.
2. Tang J. et al. A Review on Multi-Scale Toughening and Regulating Methods for Modern Concrete: From Toughening Theory to Practical Engineering Application // Research. 2024. Vol. 7. Pp. 0518. DOI: 10.34133/research.0518.
3. Yang W. et al. Effect of Glass Fiber on Flexural Performance of Gfrp-Rc Beams Under Sustained Loading and Alkaline Environment: Experimental, Numerical and Analytical Investigations. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.4712786.
4. Yuan H., Fan Y.C., You X.M., Fu B., Zou Q.Q. Pullout behavior of recycled macro fibers in the cementitious matrix: Analytical model and experimental validation // Composite Structures. 2024. Vol. 328. Pp. 117690. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.117690.
5. Hoffman I.S., Piva J.H., Wanderlind A., Antunes E.G.P. Reinforced concrete beams coated with fiberglass-reinforced polymeric profiles as partial substitutes for the transverse reinforcement // Rev. IBRACON Estrut. Mater. 2020. Vol. 13, № 6. Pp. e13608. DOI: 10.1590/s1983-41952020000600008.
6. Barbhuiya S., Das B.B., Kanavaris F. A review of fracture propagation in concrete: fundamentals, experimental techniques, modelling and applications // Magazine of Concrete Research. 2024. Vol. 76, № 10. Pp. 482–514. DOI: 10.1680/jmacr.23.00143.
7. Сизяков И.Д., Веселов В.К. Влияние стеклопластиковой фибры на свойства бетонных смесей // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Самара, 2024. С. 810–816.
8. Сизяков И.Д. Трещиностойкость бетона со стеклопластиковой и стальной фиброй // Инженерный вестник Дона. 2024. Т. 5, № 113. С. 379–387.
9. Соловьев В.Г., Сизяков И.Д. Физико-механические свойства бетонов со стеклопластиковой фиброй // Сборник материалов III Всероссийской научной конференции, посвящённой девяностолетию кафедры Строительного материаловедения. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2023. С. 278–283.
10. Хозин В.Г., Гиздатуллин А.Р. Совместимость полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 30–38.
11. Başsürücü M., Fenerli C., Kina C., Akbaş Ş.D. Effect of Fiber Type, Shape and Volume Fraction on Mechanical and Flexural Properties of Concrete // Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies. 2022. Vol. 7, № 3. Pp. 158–171. DOI: 10.47481/jscmt.1137088.
12. Abd Elmoaty A.E.M., Morsy A.M., Harraz A.B. Effect of Fiber Type and Volume Fraction on Fiber Reinforced Concrete and Engineered Cementitious Composite Mechanical Properties // Buildings. 2022. Vol. 12, № 12. Pp. 2108. DOI: 10.3390/buildings12122108.
13. Александрова О.В., Мацевич Т.А., Кирьянова Л.В., Соловьев В.Г. Статистические методы решения технологических задач: учебное пособие. Москва: НИУ МГСУ, 2017. 154 с.
14. Задорожная Е.А. Теория планирования эксперимента. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2018. 92 с.

From the perspective of increasing fracture toughness, the optimal configuration is fiber with a winding pitch of 5.5 mm and fiber content of (1.8–2.0) %.

The established dependencies on compositional parameters allow for the design of fiber-reinforced concretes with specified properties. The required parameters for tensile strength, compressive strength, as well as requirements for fracture toughness of fiber-reinforced concrete are achieved by adding the necessary amount of fibers and selecting the appropriate type (winding pitch value).

References:

1. Bazhenov Yu.M., Chernyshev E.M., Korotkikh D.N. Designing of modern concrete structures: determining principles and technological platforms. *Stroitel'nye materialy*. 2014. No. 3. Pp. 6–14. (in Russian).
2. Tang J. et al. A Review on Multi-Scale Toughening and Regulating Methods for Modern Concrete: From Toughening Theory to Practical Engineering Application. *Research*. 2024. Vol. 7. Pp. 0518. DOI: 10.34133/research.0518.
3. Yang W. et al. Effect of Glass Fiber on Flexural Performance of Gfrp-Rc Beams Under Sustained Loading and Alkaline Environment: Experimental, Numerical and Analytical Investigations. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.4712786.
4. Yuan H., Fan Y.C., You X.M., Fu B., Zou Q.Q. Pullout behavior of recycled macro fibers in the cementitious matrix: Analytical model and experimental validation. *Composite Structures*. 2024. Vol. 328. Pp. 117690. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.117690.
5. Hoffman I.S., Piva J.H., Wanderlind A., Antunes E.G.P. Reinforced concrete beams coated with fiberglass-reinforced polymeric profiles as partial substitutes for the transverse reinforcement. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* 2020. Vol. 13, No. 6. Pp. e13608. DOI: 10.1590/s1983-41952020000600008.
6. Barbhuiya S., Das B.B., Kanavaris F. A review of fracture propagation in concrete: fundamentals, experimental techniques, modelling and applications. *Magazine of Concrete Research*. 2024. Vol. 76, No. 10. Pp. 482–514. DOI: 10.1680/jmacr.23.00143.
7. Sizyakov I.D., Veselov V.K. Influence of fibreglass fibre on the properties of concrete mixtures. *Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arhitekture* Samara, 2024. Pp. 810–816. (in Russian).
8. Sizyakov I.D. Residual strength of concrete with fibreglass and steel fibres *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2024. Vol. 5, No. 113. Pp. 379–387. (in Russian).
9. Solov'ev V.G., Sizyakov I.D. Physical and mechanical properties of concrete with fiberglass fiber. *Sbornik materialov III Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi devyanostoletiyu kafedry Stroitel'nogo materialovedeniya*. Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2023. Pp. 278–283. (in Russian).
10. Khozin V.G., Gizdatullin A.R. Compatibility of Polymer-Composite Reinforcement with Cement Concrete in Structures. *Stroitel'nye materialy*. 2017. No. 11. Pp. 30–38. (in Russian).
11. Başsürücü M., Fenerli C., Kina C., Akbaş Ş.D. Effect of Fiber Type, Shape and Volume Fraction on Mechanical and Flexural Properties of Concrete. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*. 2022. Vol. 7, No. 3. Pp. 158–171. DOI: 10.47481/jscmt.1137088.
12. Abd Elmoaty A.E.M., Morsy A.M., Harraz A.B. Effect of Fiber Type and Volume Fraction on Fiber Reinforced Concrete and Engineered Cementitious Composite Mechanical Properties. *Buildings*. 2022. Vol. 12, No. 12. Pp. 2108. DOI: 10.3390/buildings12122108.

15. Дворкин Л.И., Ковальчук Т.В. Проектирование составов фибробетона с использованием экспериментально-статистических моделей // Технологии бетонов. 2016. № 11–12. С. 29–35.

13. Aleksandrova O.V., Matseevich T.A., Kir'yanova L.V., Solovov V.G. Statistical methods for solving technological problems: a textbook. Moscow: NIU MGSU, 2017. 154 p. (in Russian).

14. Zadorozhnaya E.A. Theory of experiment planning. Chelyabinsk: SUSU Publishing Centre, 2018. 92 p. (in Russian)

15. Dvorkin L.I., Kovalchuk T.V. Design of fibre concrete compositions using experimental-statistical models // *Tekhnologii betonov*. 2016. No 11–12. Pp. 29–35 (in Russian)

Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».

The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”. Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”

Соловьев Вадим Геннадьевич – доцент кафедры Строительного материаловедения, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), E-mail: s_vadim_g@mail.ru

Сизяков Иван Дмитриевич – преподаватель, аспирант кафедры Строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), E-mail: sid89152578878@yandex.ru (автор для связи)

Solovov Vadim Gennadievich – docent кафедры Строительного материаловедения, Candidate of Engineering Sciences, associate professor, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: s_vadim_g@mail.ru

Сизяков Иван Дмитриевич – postgraduate student, The National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: sid89152578878@yandex.ru (author for contact)

The authors declare that there is no conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов