

УДК: 69.05, 691.3

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.3

EDN: CDEFKU



Реотехнологические свойства бетонных смесей дисперсно-армированных стальными волокнами в технологии аддитивного строительного производства

Л.В. Зиганшина¹, Р.Х. Мухаметрахимов¹

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Ограничение применения традиционного стержневого армирования в технологии аддитивного строительного производства, обусловленное текущим уровнем ее развития, вызывает необходимость применения альтернативных способов повышения физико-механических свойств бетонов без ухудшения реотехнологических характеристик смеси. С этой точки зрения в технологии строительной 3D-печати эффективным является применение дисперсного армирования. Цель исследований – выявить зависимости формирования реологических свойств бетонных смесей дисперсно-армированных стальными волокнами при объемном содержании 0,5; 1,0; 1,5% в технологии аддитивного строительного производства с целью оптимизации их структурно-технологических характеристик. Задачи исследований – оценка реотехнологических свойства бетонных смесей дисперсно-армированных стальными волокнами 6 и 12 мм при объемном содержании 0,5; 1,0; 1,5%.

Результаты. Установлено, что длина стальных волокон (6 или 12 мм) оказывает влияние на реотехнологические характеристики равноподвижных дисперсно-армированных смесей. Наиболее эффективным с точки зрения сохранения пластической прочности, плотности и предельного напряжения сдвига является диапазон объемного содержания волокон 0,5-1,0% по объему, тогда как дальнейшее увеличение концентрации требует значительного повышения водоцементного отношения для сохранения подвижности, что приводит к большему разуплотнению цементной матрицы, снижению пластической прочности смеси.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в научном обосновании выбора оптимальной длины и концентрации стальных волокон при сохранении требуемой подвижности и возможности формирования смеси в технологии аддитивного строительного производства.

Ключевые слова: аддитивное строительное производство, 3D-печать, дисперсно-армированный бетона, стальные волокна, реотехнологические свойства смеси

Для цитирования: Зиганшина Л.В., Мухаметрахимов Р.Х. Реотехнологические свойства бетонных смесей дисперсно-армированных стальными волокнами в технологии аддитивного строительного производства // Известия КГАСУ, 2026, № 2 (76), с. 34-44, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.3, EDN: CDEFKU

Rheotechnological properties of steel-fiber-reinforced concrete mixtures in 3D concrete printing

L.V. Ziganshina¹, R.Kh. Mukhametrakhimov¹

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The limitations on using traditional rebar reinforcement in 3D concrete printing from the technology's current stage of development necessitate alternative

methods to enhance physical and mechanical properties of concrete without compromising the mixture's rheological and processing characteristics. In this context, dispersed (fiber) reinforcement proves effective for 3D concrete printing. The study aims to determine the relationships governing the rheological properties of steel-fiber-reinforced concrete mixtures (with fiber volume fractions of 0.5%, 1.0%, and 1.5%) within the additive construction process, with the goal of optimizing their structural and processing characteristics. The research tasks involve evaluating the rheological and processing properties of mixtures reinforced with 6 mm and 12 mm steel fibers at the volume fractions of 0.5%, 1.0%, and 1.5%.

Results. It was found that steel fiber length (6 mm or 12 mm) influences the rheological and processing characteristics of fiber-reinforced mixtures with equivalent initial workability. A fiber volume fraction range of 0.5–1.0% proved to be most effective for maintaining plastic strength, density, and yield stress; conversely, increasing the concentration further necessitates a significant rise in the water-to-cement (W/C) ratio to maintain workability, resulting in greater porosity within the cement matrix and reduced plastic strength.

Conclusions. The significance of these findings for the construction industry lies in providing a scientific basis for selecting the optimal steel fiber length and concentration, ensuring the mixture retains the necessary workability and formability required for 3D concrete printing.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, fiber-reinforced concrete, steel fibers, rheotechnological properties of the mixture.

For citation: Ziganshina L.V., Mukhametrakhimov R.Kh. Rheotechnological properties of steel-fiber-reinforced concrete mixtures in 3D concrete printing // News of KSUAE, 2026, № 2 (76), p. 34-44, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.3, EDN: CDEFKU

1. Введение

Аддитивное строительное производство (3D-печать) является перспективной роботизированной технологией изготовления различных конструкций благодаря отсутствию необходимости применения опалубки, снижению трудозатрат и отходов при производстве, ускорению строительных процессов [1–4]. Высокий потенциал данной технологии позволяет применять ее при строительстве различных объектов – малых архитектурных форм, элементов зданий и сооружений, жилых домов и др [5, 6].

Несмотря на имеющиеся достоинства, широкое применение 3D-печати сталкивается с рядом проблем, в частности с труднореализуемостью традиционного стержневого армирования [7, 8]. В технологии аддитивного строительного производства эффективным с этой точки зрения может являться дисперсное армирование бетонных смесей и бетонов. Однако введение фибр в бетонную смесь изменяет ее реологические и технологические свойства, существенно влияя на ее формуемость, формоустойчивость напечатанных слоев. Повышенные показатели пределов прочности при изгибе и сжатии, трещиностойкости, ударной вязкости по сравнению с неармированными бетонами успешно достигаются в классических технологиях формования [9], в которых присутствует этап уплотнения смеси. Применение дисперсно-армированных бетонов в технологии аддитивного строительного производства может обеспечить повышенные показатели формоустойчивости напечатанных слоев, трещиностойкости, прочности при рациональном учете реологических ограничений, накладываемых технологией 3D-печати на свойства свежееуложенной смеси [10–13].

Важнейшим фактором при выборе вида и содержания дисперсных волокон в технологии 3D-печати является их влияние на реологические параметры смеси. Однако требования к реологическим характеристикам смесей в 3D-печати носят двойственный характер – с одной стороны необходимо обеспечивать достаточную текучесть смеси для ее прокачиваемости и экструдированности, с другой стороны – высокую вязкость для сохранения формы экструдата и возможности наращивать слои без ухудшения качества нижележащих слоев [14].

Среди существующих типов волокон, применяемых в аддитивном строительстве, использование стальных волокон является наиболее популярным благодаря высокой механической прочности и способности эффективно сопротивляться

трещинообразованию. Как показано в работе [15], равномерное распределение стальных волокон в цементной матрице при 3D-печати позволяет принципиально изменить характер разрушения композита как при статических, так и при динамических нагрузках, заменяя хрупкое разрушение на псевдопластическое.

Значительный интерес представляют также углеродные волокна, которые, помимо традиционного использования в качестве электропроводящих наполнителей, демонстрируют высокую несущую способность в легких конструкциях [16]. Их способность эффективно воспринимать растягивающие напряжения предотвращает образование микротрещин в сложных геометрических формах, получаемых методом 3D-печати [17]. Применение углеродных волокон открывает перспективы создания легких архитектурных элементов, однако по прочности на изгиб и несущей способности они уступают стальным волокнам [18].

При этом для технологии 3D-печати принципиальное значение имеет не только конечная прочность, но и поведение смеси в процессе экструзии. Однако в доступной литературе отсутствуют систематические данные о том, как введение стальных волокон изменяет предельное напряжение сдвига и среднюю плотность смеси при фиксированной подвижности, что предпочтительно для обеспечения стабильной геометрии печатаемых слоев. Указанная проблема приобретает особую актуальность в условиях эксплуатации большинства современных строительных 3D-принтеров, экструзионные системы которых не рассчитаны на перекачивание и экструзию малоподвижных смесей, что накладывает ограничения на вязкость, предельное напряжение сдвига и содержание фибры. Таким образом, определение указанных реологических характеристик для дисперсно-армированных стальной фиброй составов является первоочередной задачей, без решения которой невозможно прогнозирование формоустойчивости изделий.

Широкое применение в аддитивном строительном производстве находят синтетические волокна – из поливинилового спирта (ПВА) [19] и полиэтилена (ПЭ) [20], полипропилена [21], а также натуральные волокна (целлюлозные) [22]. Экспериментально подтверждено, что введение данных типов волокон способствует повышению прочностных характеристик при изгибе и растяжении. При этом применение ПВА-волокон и полипропиленовых волокон позволяет регулировать трещинообразование бетона: ПВА-волокна улучшает межслойное сцепление, а полипропиленовые предотвращает образование усадочных трещин на ранних стадиях твердения [23].

Однако приведенные данные касаются преимущественно конечных прочностных характеристик или реологических параметров. В то же время для технологии 3D-печати не менее значимым является кинетика набора пластической (структурной) прочности после экструзии, поскольку именно этот параметр определяет максимально допустимую скорость печати или высоту печатаемой конструкции без потери устойчивости и деформации нижележащих слоев. В литературе отсутствуют систематические сведения о том, как наличие волокон влияет на скорость структурообразования смеси при фиксированной подвижности, что не позволяет прогнозировать темпы укладки и оценивать риски обрушения при наращивании слоев.

В связи с разнонаправленным действием различных типов волокон, в последнее время активно разрабатываются гибридные волокнистые системы, позволяющие достичь сбалансированные механические свойства и повысить трещиностойкость. Так, в исследовании [24] изучалось совместное применение стеклянных и полипропиленовых волокон при различных соотношениях. Установлено, что оптимальной является комбинация 75% полипропиленовых волокон в сочетании с 25% стекловолокна, при которой наблюдается максимальный прирост прочности на растяжение и улучшение пластических характеристик материала.

В работах [25, 26] изучено влияние длины волокон на механические характеристики цементных композитов в технологии строительной 3D-печати. Длина волокна играет решающую роль в образовании трещин и должна быть оптимизирована с учетом текучести смеси, формуемости и трещиностойкости [27]. Показано, что для гибридных систем (полиэтиленовые, стальные и целлюлозные волокна) длиной волокон 18 мм, 13 мм и 300 мкм достигается сбалансированное сочетание формуемости, межслойной адгезии и долговечности [27].

При этом, несмотря на широкую распространенность и высокие прочностные характеристики стальной фибры, систематические исследования ее влияния на реологию именно в условиях 3D-печати остаются фрагментарными. Большинство имеющихся данных получено для традиционных технологий с вибрационным уплотнением, что не позволяет экстраполировать их на аддитивные процессы.

Выполненный обзор литературных источников показывает, что выбор типа, длины и концентрации волокон является ключевым фактором, определяющим как технологическую пригодность смеси к экструзии, так и эксплуатационные характеристики готового изделия. Однако малоизученным остается вопрос влияния стальных волокон на реологические свойства бетонных смесей в технологии аддитивного строительного производства, в частности – на показатели подвижности, предельное напряжение сдвига и кинетику набора пластической прочности смеси.

Цель работы – выявить зависимости формирования реологических свойств бетонных смесей дисперсно-армированных стальными волокнами при объемном содержании 0,5; 1,0; 1,5% в технологии аддитивного строительного производства с целью оптимизации их структурно-технологических характеристик.

Задачи исследования:

1. Определить влияние дисперсного армирования бетонной смеси стальными волокнами на среднюю плотность и предельное напряжение сдвига при равной подвижности смеси в технологии аддитивного строительного производства.
2. Определить влияние дисперсного армирования бетонной смеси стальными волокнами на кинетику набора пластической прочности при равной подвижности смеси в технологии аддитивного строительного производства.
3. Определить наиболее эффективную длину и объемное содержание стальных волокон, обеспечивающих оптимальные структурно-технологических характеристики бетонных смесей для аддитивного строительного производства

Объект исследований – бетонные смеси дисперсно-армированные стальными волокнами в технологии аддитивного строительного производства.

Предмет исследований – реологические свойства бетонных смесей дисперсно-армированных стальными волокнами при объемном содержании 0,5; 1,0; 1,5%.

2. Материалы и методы

Исследования выполнялись в лаборатории аддитивных технологий строительного производства Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

При выполнении исследований использовались следующие материалы:

– цементное вяжущее. Для изготовления образцов применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства ОАО «Магнитогорский цементно-огнеупорный завод» по ГОСТ 31108-2020. Вещественный и химический состав портландцемента приведен в таблицах 1 и 2. Физико-механические показатели портландцемента приведены в таблице 3.

Таблица 1

Вещественный состав портландцемента

Наименование	Содержание основных компонентов, %				Содержание вспомогательных компонентов, %
	Портландцементный клинкер				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
ЦЕМ I 42,5Н	59,7	14,4	8,0	12,9	5,0

Таблица 2

Химический состав портландцемента

Наименование	Химический состав, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl
ЦЕМ I 42,5Н	22,0	5,3	4,0	61,5	3,9	2,8	0,03

Таблица 3

Физико-механические показатели портландцемента

№	Наименование показателя	Ед.изм.	ЦЕМ I 42,5Н
1	Тонкость помола (остаток на сите № 008)		4,0
2	Сроки схватывания: - начало - конец	мин	170 255
3	Равномерность изменения объема (расширение)	мм	0,1
4	Нормальная густота	%	27,8
5	Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток	МПа	49,4

– заполнитель. В качестве мелкого заполнителя для приготовления бетонных смесей использовался кварцевый песок повышенной крупности с Мк 3,5.

– активная минеральная добавка. Применялся метакраин месторождения «Журавлиный лог», удовлетворяющий требованиям ГОСТ Р 56592-2015. Минералогический состав представлен полностью аморфизованным каолинитом (90–93%), кристаллическая фаза – реликтовыми слюдой (2,5–3,0%) и кварцем (4–5%). Химический состав метакраина, %: SiO_2 – 53,8; TiO_2 – 0,5; Al_2O_3 – 42,9; Fe_2O_3 – 0,7; CaO – 0,15; Na_2O – 0,05; п.п.п. – 0,09.

– модифицирующие добавки. Использовалась поликарбоксилатная пластифицирующая добавка «Master Glenium 430» производства ООО «BASF Строительные системы», удовлетворяющая требованиям ГОСТ 24211-2008, жидкость оранжевого цвета, плотность (при 20 °С) 1,06 г/см³, рН при 20°С – 5,5.

– армирующие волокна. В качестве дисперсно-армирующих волокон использовались стальные волокна длиной 6 и 12 мм (рис. 1). Технические характеристики приведены в таблице 4

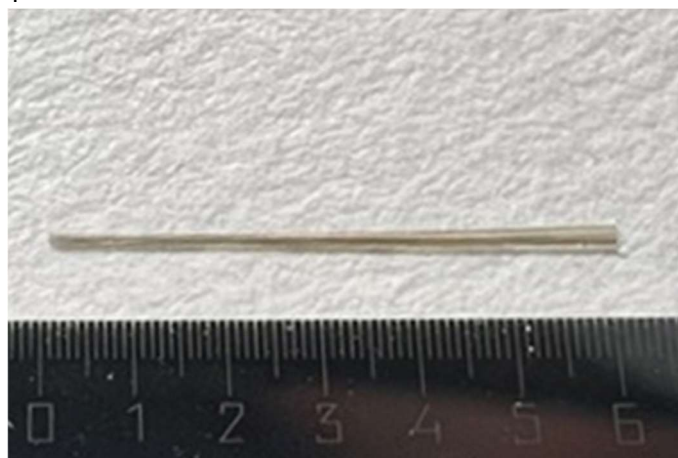


Рис. 1. Стальное волокно длиной 6 мм. Измерение проведено с использованием лупы измерительной ЛИ-3-10х с ценой деления 0,1 мм (иллюстрация авторов)

Fig.1. 6 mm long steel fiber. Measurement performed using an LI-3-10x measuring magnifier with a scale division of 0.1 mm (illustration by the authors)

Таблица 4

Технические характеристики стальных волокон длиной 6 и 12 мм

Наименование	Показатели
Внешний вид	Из нержавеющей проволоки
Диаметр, мм	0,2
Модуль упругости, МПа	200 000
Предел прочности на растяжение, МПа	2000
Содержание хрома, %	18-20
Содержание никеля, %	8-10

– вода. Применялась водопроводная питьевая с водородным показателем pH не менее 4 и с содержанием сульфатов не более 2700 мг/л (в пересчете на SO₃) и всех солей не более 5000 мг/л, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732-2011.

Соотношение вяжущее/заполнитель составляло 1/3, содержание воды регулировалось до достижения подвижности смеси Пк 3. Равноподвижность бетонных смесей достигалась за счет регулирования В/Ц. Объемное содержание исследуемых волокон составляло 0,5; 1,0; 1,5%.

Перемешивание компонентов сырьевой смеси производили в бетоносмесителе принудительного действия в течение 10 минут до получения однородной массы.

Подвижность бетонных смесей определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 5802-2024 «Растворы строительные. Методы испытаний».

Оценка предельного напряжения сдвига смеси осуществлялась с помощью полипропиленового полого цилиндра. Геометрические параметры измерительного устройства: высота – 200 мм, внутренний диаметр – 105 мм. Определение данного параметра производилось согласно методике [28] по формуле:

$$\tau_0 = \frac{hd^2\rho}{kD^2},$$

где τ_0 – предельное напряжение сдвига смеси, Па;

h и d – соответственно высота и диаметр вискозиметра, м;

ρ – плотность смеси, кг/м³;

D – диаметр расплыва смеси, м;

k – коэффициент, учитывающий перераспределение напряжений в вязкопластических телах, равный 2.

Кинетику набора пластической прочности бетонной смеси определяли в соответствии с требованиями ASTM C403 с помощью карманного пенетromетра C194 в интервале времени от 0 до 430 минут.

3. Результаты и обсуждение

На первом этапе изучено влияние содержания стальных волокон длиной 6 и 12 мм в концентрации 0; 0,5; 1; 1,5% по объему на среднюю плотность и предельное напряжение сдвига смеси. Результаты исследований приведены на рис. 2, 3.



Рис. 2. Влияние содержания стальных волокон длиной 6 мм на среднюю плотность и предельное напряжение сдвига смеси (иллюстрация авторов)

Fig.2. Effect of 6 mm steel fiber content on the average density and ultimate shear stress of the mixture (illustration by the authors)

Анализ данных, приведенных на рис. 2, свидетельствует о последовательном снижении значения предельного напряжения сдвига смеси с 75 Па до 64 Па (на 14,7% относительно контрольного состава). Данное явление обусловлено снижением межмолекулярного сцепления частиц в цементном геле в связи с необходимостью увеличения количества воды затворения для достижения требуемой подвижности бетонной смеси, обеспечивающей ее формуемость на строительном 3D-принтере. В технологии 3D-печати это свидетельствует о том, что равноподвижная бетонная смесь дисперсно-армированная стальными волокнами длиной 6 мм требует меньшего давления экструзии, чем контрольный состав (без волокон).

Анализ влияния исследуемых волокон на среднюю плотность бетонной смеси (рис. 2) позволил установить, что данный показатель снижается незначительно – на 2,9% относительно контрольного состава. При этом наибольшее снижение средней плотности бетонной смеси наблюдается на участке увеличения в концентрации волокон от 1,0 до 1,5%, что свидетельствует о нежелательности увеличения содержания волокон более 1,0% без применения комплексных модифицирующих добавок.

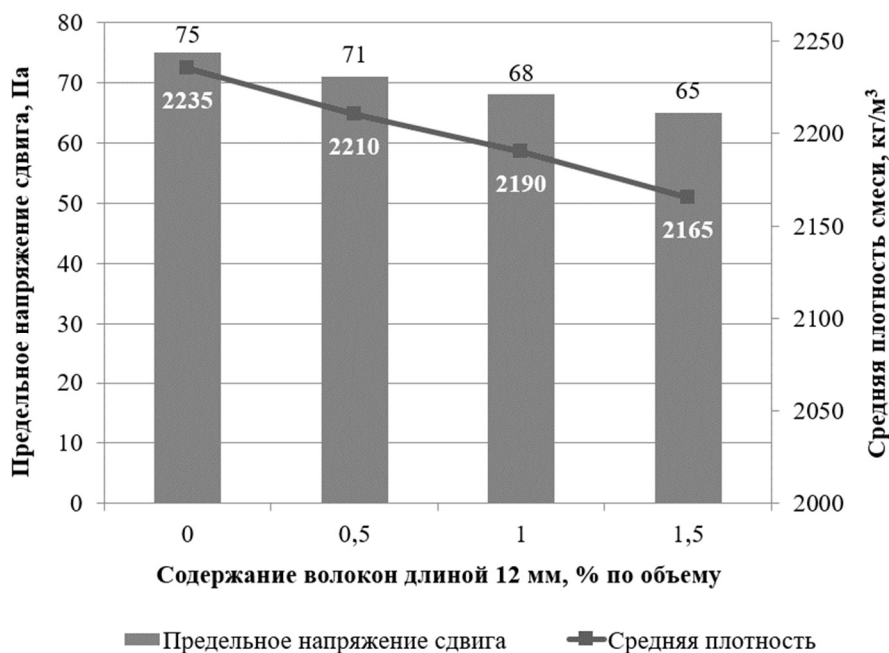


Рис. 3. Влияние содержания стальных волокон длиной 12 мм на среднюю плотность и предельное напряжение сдвига смеси (иллюстрация авторов)

Fig.3. Effect of 12 mm steel fiber content on the average density and ultimate shear stress of the mixture (illustration by the authors)

Как видно из рис. 3, предельное напряжение сдвига смеси дисперсно-армированной волокнами длиной 12 мм аналогично волокнам длиной 6 мм последовательно снижается в случае увеличения концентрации волокон, но в меньшей степени – на 13,3% относительно контрольного состава. Средняя плотность бетонной смеси снижается до 3,1% по сравнению с контрольным составом, смесь характеризуется меньшей пластичностью и связанностью, тем самым приводя к разуплотнению матрицы смеси и разрывам при печати слоев.

На втором этапе исследований изучено влияние содержания стальных волокон длиной 6 и 12 мм в концентрации 0; 0,5; 1; 1,5% по объему на кинетику набора пластической прочности (сопротивление пенетрации) цементной системы. Результаты исследований приведены на рис. 4. Поскольку экспериментальные данные для исследуемых длин волокон (6 и 12 мм) демонстрируют идентичные тренды (разница в показателях находится в пределах погрешности эксперимента и вариативности состава), в тексте статьи выполнен общий анализ влияния на кинетику набора пластической прочности цементной системы.

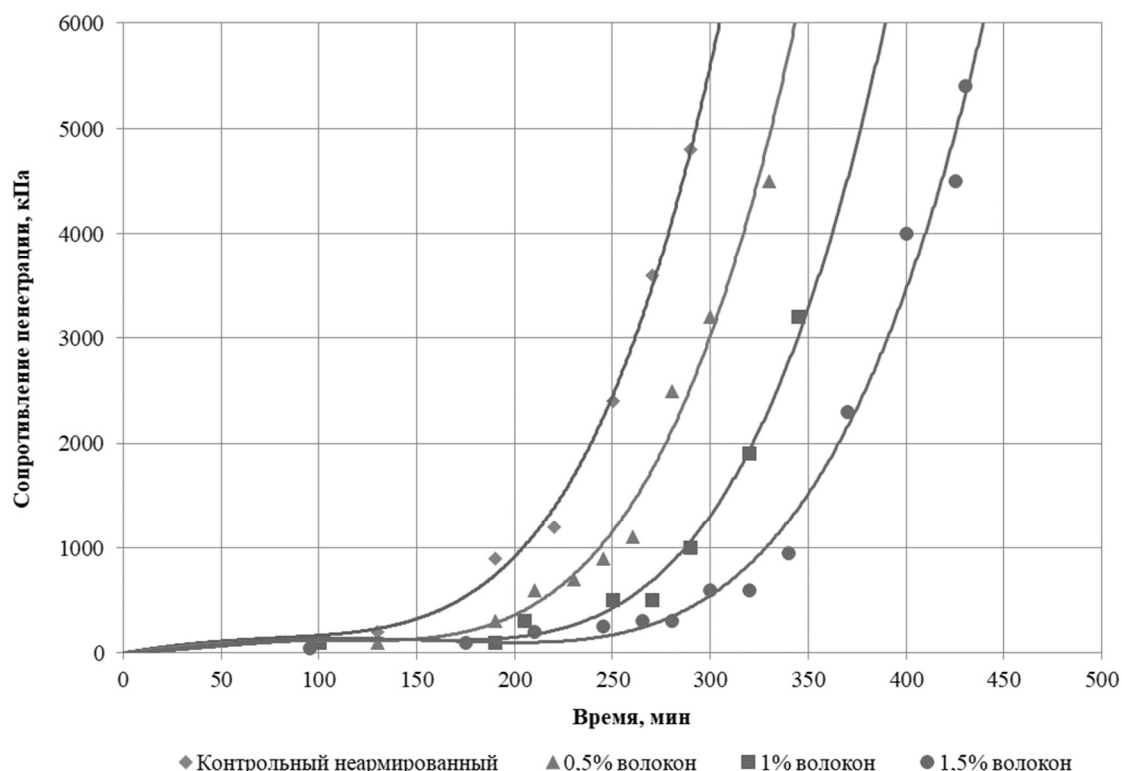


Рис. 4. Влияние содержания стальных волокон длиной 6 и 12 мм на кинетику набора пластической прочности (сопротивление пенетрации) цементной системы (иллюстрация авторов)

Fig.4. Effect of 6 mm and 12 mm steel fiber content on the kinetics of plastic strength development (penetration resistance) of a cement system (illustration by the authors)

Анализ данных, приведенных на рис. 4 показывает, что увеличение содержания стальных волокон замедляет начальное структурообразование, что обусловлено ростом водопотребности смеси при сохранении равной подвижности (Пк 3). Повышение эффективного водоцементного отношения снижает концентрацию цементного геля и уменьшает скорость гидратационных процессов на ранних стадиях.

Важным параметром для 3D-печати является время достижения сопротивления пенетрации, обеспечивающего устойчивость слоев под нагрузкой (принято равным 5000 кПа). Для контрольного состава оно составляет 303 мин. Введение 0,5% волокон увеличивает этот период до 338 мин, 1,0% – до 375 мин, 1,5% – до 428 мин. Зависимость носит нелинейный характер – замедление резко возрастает при переходе от 1,0% к 1,5%, что указывает на пороговый эффект избыточного армирования, требующий непропорционально большего количества воды.

Для аддитивного строительного производства оптимальным является содержание волокон 0,5-1,0%. Состав с 0,5% фибры обеспечивает наилучший баланс между скоростью структурообразования и армирующим эффектом. Применение 1,5% волокон без модификаторов нецелесообразно из-за невысокой связанности смеси и значительного снижения скорости набора пластической прочности. Длина волокон (6–12 мм) не оказывает значимого влияния на исследуемые параметры.

Полученные результаты согласуются с исследованиями [29, 30], а также дополняют их и расширяют знания по применению дисперсно-армированных бетонных смесей в технологии аддитивного строительного производства.

4. Заключение

1. Установлено, что обеспечение равноподвижности дисперсно-армированных смесей требует принудительного увеличения В/Ц с ростом содержания волокон. Показано, что для волокон длиной 6 мм это приводит к монотонному снижению предельного напряжения сдвига на 14,7% и снижению средней плотности бетонной смеси на 2,9 %. Для волокон длиной 12 мм аналогичные усилия по поддержанию подвижности дают менее

выраженный эффект разжижения (снижение предельного напряжения сдвига на 13,3 %) при более интенсивном падении плотности (на 3,1 %). Выявлено, что в технологии аддитивного строительства для сохранения структурной целостности слоя применение стальных волокон (независимо от длины) в равноподвижных смесях целесообразно ограничивать объемом 1,0 %, так как дальнейшее армирование ведет к критическому разуплотнению цементной матрицы.

2. Установлено, что длина стальных волокон (6 и 12 мм) не является определяющим фактором в кинетике набора пластической прочности дисперсно-армированной бетонной смеси. Оптимальной концентрацией, обеспечивающей максимальное сопротивление пенетрации (6350 кПа) при умеренной задержке начального структурообразования, является содержание 0,5% по объему. Увеличение содержания волокон до 1,5% приводит к торможению процессов гидратации и снижению пластической прочности на 10% относительно контрольного состава, что обусловлено снижением сцепления цементных зерен избыточной водой, вводимой для сохранения равноподвижности смеси.

3. По совокупности исследуемых критериев для технологии аддитивного строительного производства рекомендовано применение стальных волокон в концентрации 0,5-1% по объему при длине 6 или 12 мм. Данные составы обеспечивают наилучший баланс между сохранением технологической подвижности, умеренным расширением окна печатаемости. Применение 1,5% волокон без модифицирующих добавок нецелесообразно из-за критического замедления структурообразования, снижения прочности и ухудшения реологических характеристик смеси.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-01499, <https://rscf.ru/project/25-29-01499/>

Список литературы/ References

1. Paolini A., Kollmannsberger S., Rank E. Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods // *Addit. Manuf.* Elsevier B.V., 2019. Vol. 30.
2. Brescghello L., Naboni R. Toolpath-based design for 3D concrete printing of carbon-efficient architectural structures // *Addit. Manuf.* Elsevier B.V., 2022. Vol. 56, - No. February. - P. 102872.
3. Bai G. , Guan J., Wang L., Li Z., Ma G. Bending performance of 3D printed ultra high-performance concrete composite beams // *Addit. Manuf.* Elsevier B.V., 2024. Vol. 89.
4. Рязанов А.Н., Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Кинзябулатова Д.Ф., Недосеко И.В. Использование гипсовых композиций в технологиях строительной 3D-печати малоэтажных жилых зданий. Проблемы и перспективы // *Строительные материалы*. 2021. - № 8. - С. 39–44.
Ryazanov A.N., Shigapov R.I., Sinitsin D.A., Kinzyabulatova D.F., Nedoseko I.V. The use of gypsum compositions in 3D construction printing technologies for low-rise residential buildings. Problems and prospects // *Building materials*. 2021. - No. 8. - P. 39-44.
5. Le T.T. , Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete // *Mater. Struct.* Springer Netherlands, 2012. Vol. 45, - No. 8. - P. 1221–1232.
6. Wang L. , Yang Y., Yao L., Ma G. Interfacial bonding properties of 3D printed permanent formwork with the post-casted concrete // *Cem. Concr. Compos.* Elsevier Ltd, 2022. Vol. 128.
7. Zhou W. , Zhang Y., Ma L., Li V.C. Influence of printing parameters on 3D printing engineered cementitious composites (3DP-ECC) // *Cem. Concr. Compos.* 2022. Vol. 130. - P. 104562.
8. Li V.C. et al. On the emergence of 3D printable Engineered, Strain Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC) // *Cem. Concr. Res.* 2020. Vol. 132. - P. 106038.
9. Антаков И.А., Сулейманов А.М. Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой // *Известия*

- КГАСУ. 2023. Т. 3, - № 65. - С. 101–109.
- Antakov I.A., Suleymanov A.M. Deformability of flexural concrete elements reinforced with polymer composite reinforcement // *News of KSUAE*. 2023. Vol. 3, No. 65. P. 101–109.
10. Bai M., Xiao J., Wu Y., Ding T. Experimental and numerical study on the flexural behavior of 3D-printed composite beams with U-shaped ECC formwork // *Eng. Struct.* Elsevier, 2024. Vol. 312. - С. 118225.
 11. Zhang Y., Wang W., Kang X., Li B. Design, analysis, and experimentation of deployable multi-closed-loop truss modules for aerospace platforms // *Mech. Mach. Theory*. 2025. Vol. 205. - P. 105897.
 12. Wu M., Johannesson B., Geiker M. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material // *Constr. Build. Mater.* 2012. Vol. 28, - No. 1. - P. 571–583.
 13. Молодин В.В., Ильина Л.В., Коробова О.А., Чернова С.Г. Совершенствование технологии 3D-печати полистиролбетоном применением дисперсного армирования // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2026. Т. 807, - № 3. - С. 93–103.
Molodin V.V., Ilyina L.V., Korobova O.A., Chernova S.G. Improving polystyrene concrete 3D printing technology through dispersed reinforcement // *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2026. Vol. 807, No. 3. P. 93–103.
 14. Fang Z., Aslani F. Fire-performance of 3D-printed carbon fibre-reinforced cementitious composites // *J. Build. Eng.* Elsevier, 2026. Vol. 129. - P. 116818.
 15. Zhou J., Lai J., Du L., Wu K., Dong S. Effect of directionally distributed steel fiber on static and dynamic properties of 3D printed cementitious composite // *Constr. Build. Mater.* Elsevier Ltd, 2022. Vol. 318.
 16. Wang L., Aslani F. Structural performance of reinforced concrete beams with 3D printed cement-based sensor embedded and self-sensing cementitious composites // *Eng. Struct.* Elsevier, 2023. Vol. 275. - P. 115266.
 17. Rutzen M., Schulz M., Moosburger-Will J., Lauff P., Fischer O., Volkmer D. 3D printing as an automated manufacturing method for a carbon fiber-reinforced cementitious composite with outstanding flexural strength (105 N/mm²) // *Mater. Struct.* 2021 546. Springer, 2021. Vol. 54, - No. 6. - P. 234-.
 18. Shi L., Lu Y., Bai Y. Mechanical and Electrical Characterisation of Steel Fiber and Carbon Black Engineered Cementitious Composites // *Procedia Eng.* No longer published by Elsevier, 2017. Vol. 188. - P. 325–332.
 19. Sun J., Aslani F., Lu J., Wang L., Huang Y., Ma G. Fibre-reinforced lightweight engineered cementitious composites for 3D concrete printing // *Ceram. Int.* Elsevier, 2021. Vol. 47, - No. 19. - P. 27107–27121.
 20. Xiao J., Zou S., Ding T., Duan Z., Liu Q. Fiber-reinforced mortar with 100% recycled fine aggregates: A cleaner perspective on 3D printing // *J. Clean. Prod.* Elsevier, 2021. Vol. 319. - P. 128720.
 21. Славчева Г.С., Бритвина Е.А. Влияние дисперсного армирования на пластичность и формоустойчивость смесей для строительной 3D-печати // В сборнике: *Строительное материаловедение: настоящее и будущее. Сборник материалов I Всероссийской научной конференции, посвящённой 90-летию выдающегося учёного-материаловеда, академика РААСН Юрия Михайловича Баженова*. 2020. - С. 331–336.
Slavcheva G.S., Britvina E.A. Influence of dispersed reinforcement on the plasticity and shape stability of mixtures for construction 3D printing // In: *Construction Materials Science: Present and Future. Proceedings of the 1st All-Russian Scientific Conference dedicated to the 90th anniversary of the prominent materials scientist and Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAASN) Yuri Mikhailovich Bazhenov*. 2020. – P. 331–336.
 22. Kilic U., Soliman N., Omran A., Ozbulut O.E. Effects of cellulose nanofibrils on rheological and mechanical properties of 3D printable cement composites // *Cem. Concr. Compos.* Elsevier, 2024. Vol. 152. - P. 105617.

23. Sun X., Zhou J., Wang Q., Shi J., Wang H. PVA fibre reinforced high-strength cementitious composite for 3D printing: Mechanical properties and durability // *Addit. Manuf. Elsevier*, 2022. Vol. 49. - P. 102500.
24. Shabakhty N., Karimi H.R., Yeganeh Bakhtiary A. Effect of short to long hybrid elastic/hyperelastic (Glass/PP) fibers on high-strength engineered cementitious composites (ECC), along with presenting a constitutive model // *J. Build. Eng. Elsevier*, 2024. Vol. 89. - P. 109215.
25. Arunothayan A.R., Nematollahi B., Ranade R., Bong S.H., Sanjayan J.G., Khayat K.H. Fiber orientation effects on ultra-high performance concrete formed by 3D printing // *Cem. Concr. Res. Pergamon*, 2021. Vol. 143. - P. 106384.
26. Singh M., Saini B., Chalak H.D. Performance and composition analysis of engineered cementitious composite (ECC) – A review // *J. Build. Eng. Elsevier*, 2019. Vol. 26. - P. 100851.
27. Ding Y., Liu J., Ou X., Nishiwaki T., Xiong G., Chen X., Yu K., Qi H. 3D printing hybrid-fiber reinforced engineered cementitious composites (3DP-HECC): Feasibility in long-open-time applications // *Constr. Build. Mater. Elsevier*, 2024. Vol. 445. - P. 137960.
28. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. 2006. - 368 с.
Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. Modified High-Quality Concretes. 2006. — 368 p.
29. Delavar M.R., Aslani F., Sercombe T. Cracking behaviour in 3D concrete printed fibre-reinforced cementitious composites: A review // *J. Build. Eng. Elsevier*, 2025. Vol. 114. - P. 114312.
30. Bos F.P., Bosco E., Salet T.A.M. Ductility of 3D printed concrete reinforced with short straight steel fibers // *Virtual Phys. Prototyp. Taylor and Francis Ltd.*, 2019. Vol. 14, - No. 2. - P. 160–174.

Информация об авторах

Зиганшина Лилия Валиевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: lilya0503199@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0090-2410

Мухаметрахимов Рустем Ханифович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: muhametrahimov@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2062-5289

Information about the authors

Liliya V. Ziganshina, candidate of technical sciences, senior researcher, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: lilya0503199@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0090-2410

Rustem Kh. Mukhametrakhimov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: muhametrahimov@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2062-5289

Дата поступления: 09.07.2026

Дата принятия: 29.09.2026