

Ван Сяньпэн, Вэй Минкунь, Сергей Ковшар, Сергей Леонович

# КОНСТРУКЦИОННЫЙ БЕТОН, АРМИРОВАННЫЙ ТРОСТНИКОВЫМ И КОКОСОВЫМ ВИДАМИ ВОЛОКОН

УДК 624.011

DOI: <https://orcid.org/0000-0002-1538-0099>

**Аннотация.** В статье анализируются механические свойства двух растительных неметаллических волокон и одного металлического волокна в бетоне. С использованием двух переменных показателей нормального напряжения ( $\sigma_{\text{н}}/\text{МПа}$ ) и градиента содержания волокон ( $r/\%$ ) был проведен расчетный эксперимент. В ходе эксперимента сравнивались свойства на изгиб и сжатие бетона с тростниковым и кокосовым волокном, фибробетона из скорлупы кокосового ореха, стального фибробетона и обычных бетонных тестовых блоков. Сделан вывод, что как неметаллические волокна, так и металлические могут эффективно улучшать механические свойства конструкционного бетона. Согласно анализу диаграммы параметров испытаний, оптимальное соотношение смешивания тростникового и кокосового волокна составляет 2 %, а оптимальное соотношение смешивания стального волокна – 1,5 %. Напротив, ударная вязкость металлических волокон приводит к тому, что их характеристики сжатия намного сильнее, чем неметаллических волокон, в то время как изгиб неметаллических растительных волокон может хорошо улучшить прочность бетона на изгиб и приводит к тому, что характеристики изгиба неметаллических волокон намного выше, чем у металлических. Таким образом, соотношение между механическим напряжением фибробетона выглядит следующим образом: бетон со стальными волокнами > бетон с тростниковыми волокнами > бетон с кокосовыми волокнами.

**Abstract.** In this paper, the mechanical properties of two plant non-metallic fibers and one metallic fiber in concrete were analyzed. Design tests were conducted using two variable indicators of normal stress ( $\sigma_{\text{н}}/\text{MPa}$ ) and gradient fiber admixture ( $r/\%$ ). The flexural and compressive properties of reed fiber concrete, coconut fiber concrete, steel fiber concrete and plain concrete specimens were compared by the tests. It was concluded that both non-metallic fibers and metallic fibers can effectively improve the mechanical properties of structural concrete. According to the analysis of the experimental parameter diagram, the optimal dosing ratio of reed fiber and coconut shell fiber is 2 %, and the optimal dosing ratio of steel fiber is 1,5 %. In contrast, the impact toughness of metal fibers prompted the compressive performance of metal fibers is much stronger than non-metallic fibers, while the bending of non-metallic plant fibers can well improve the flexural strength of concrete prompted the flexural performance of non-metallic fibers is much higher than that of metal fibers. Therefore, the relationship between the mechanical stress of fiber concrete is: steel fiber concrete > reed fiber concrete > coconut fiber concrete.

## ВВЕДЕНИЕ

Сегодня растет интерес к экологичным и натуральным строительным материалам и методам. Большое количество растительных волокон, которые являются побочными продуктами сельского хозяйства, также широко используются, например рисовая шелуха, джутовое волокно, тростник, солома, скорлупа арахиса, кожура и початки кукурузы, скорлупа кокоса, стебли хлопка и другие. Эти материалы применялись для разработки новых экологичных строительных материалов. Тростник – один из наиболее широко распространенных видов растений на планете – является многолетним растением. В Центральной и Восточной Европе он встречается в чрезвычайно широком диапазоне местообитаний, в основном на берегах озер, болотах, микросолончаках, где есть определенный уровень грунтовых вод ниже уровня почвы. В многочисленных исследованиях была показана возможность использования тростникового волокна в бетоне, при этом ряд исследователей рекомендуют предварительно обрабатывать волокно. Также его можно измельчить и использовать в качестве добавки в конструкционный бетон. Но чаще натуральные волокна применяются в качестве волокнистого материала для улучшения цементных или известковых растворов – это хороший способ улучшить механические свойства бетона [1, 2]. Согласно исследованиям, прочность волокон тростника на растяжение имеет важное значение. Более того, использование натуральных волокон играет важную роль в улучшении механических и деформационных характеристик цементных материалов. Деформативность и трещиностойкость цементных материалов с натуральными волокнами значительно расширяет область их применения в строительстве [3].

Большое количество научных работ было посвящено изучению количества тростникового волокна, которое необходимо добавить, чтобы обеспечить максимальный эффект от его использования. Последние исследования в этой области продемонстрировали хорошие механические и теплофизические свойства бетона, изготовленного с применением тростниковых волокон. Изделия из такого бетона имеют теплопроводность от 0,245 до 0,191 Вт/м·К, прочность на сжатие от 0,848 до 1,509 МПа и прочность на изгиб от 0,483 до 0,829 МПа [4]. Такие материалы, как тростниковое и соломенное волокно, широко используются в современном строительстве, но потенциальные возможности тростника использованы не до конца. Республика Беларусь расположена на Европейской равнине и известна как Страна десяти тысяч озер, где произрастает большое количество камыша, однако применение тростникового волокна в строительных материалах в настоящее время составляет всего 2 % от общего объема.

Целью данной работы является изучение возможности применения тростникового волокна, произрастающего в Республике Беларусь, в бетонных материалах и анализ механических свойств и долговечности тростникового волокна в бетоне.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Обзор литературы

Исследование увеличения механических свойств бетона за счет растительных волокон поддерживается национальными и международными учеными. Montaña Jiménez-Espada, Daniel Hegero-Adán, например, в своем исследовании называют поверхностное тростниковое волокно новым устойчивым строительным источником энергии и экологически чистым материалом для строительства. Он обладает структурными свойствами, которые, по крайней мере, аналогичны свойствам используемых в настоящее время экологических материалов. Среди общих механических свойств, таких как предельное напряжение, предел текучести и модуль упругости, тростниковый бетон отвечает требованиям развития зеленого строительства и структурным нагрузкам. Это устойчивый и биоразлагаемый материал из лигниновых волокон, обладающий превосходными механическими свойствами, а также исключительной прочностью и жесткостью. Различные анизотропные свойства тростника хорошо используются в бетоне и могут значительно повысить прочность и жесткость бетона, что делает его сильным претендентом на экологически чистую инженерию в современном строительстве [5]. Кокосовое волокно обладает определенной прочностью на растяжение и может использоваться в качестве армирующего материала из растительных волокон для матрицы цементного раствора. Ожидается, что оно повысит прочность на изгиб цементной матрицы и улучшит свойства хрупкого разрушения. Добавление волокон из скорлупы кокосового ореха может сократить использование песка и гравия в бетоне, уменьшить плотность и подготовить легкие наполнители с лучшими комплексными механическими и физическими свойствами [6]. Волокно кокосовой койры имеет длину 350 мм, диаметр 0,12–0,25 мм и плотность 1250 кг/м<sup>3</sup>. Кокосовое волокно имеет одно из самых высоких количеств лигнина, что делает его более прочным, чем большинство других видов натуральных волокон [7]. В литературе также было показано, что добавление стальных волокон в бетон может увеличить прочность бетона на сжатие примерно на 4–19 %. Поэтому стальные волокна в бетоне значительно повышают прочность на растяжение при раскалывании и изгибе бетона [8]. Вышеупомянутые исследования ученых по тростниковым волокнам, волокнам скорлупы кокосового ореха и стальным волокнам показывают, что волокна тростника, скорлупы кокосового ореха и стальные волокна в виде смеси в бетоне могут не только улучшить механические свойства и характеристики, теплопроводность бетона, но и являются отличным новым зеленым строительным материалом, который может решить проблемы, связанные с нехваткой строительных ресурсов и развитием зеленого строительства в Беларуси.

Основное внимание в настоящей работе уделяется анализу оценки эффективности использования тростникового волокна для структурных бетонных смесей в качестве основного материала, используя основные механические, а также физические свойства тростникового волокна для разработки ряда новых строительных материалов, которые могут быть использованы в «зеленых» зданиях и строительных

компонентах существующих зданий (например, структурный бетон с тростниковым волокном и производные тростникового волокна, такие как кирпичи, блоки, панели и свободные изоляционные перегородки) для энергоэффективной модернизации.

На основании вышеприведенного анализа общей литературы и экспериментальных представлений о применении тростникового волокна в конструкционном бетоне мы предлагаем следующую экспериментальную схему и проводим соответствующее экспериментальное сравнительное исследование между тростниковым волокном, волокном из скорлупы кокосового ореха и стальным волокном.

#### Методика испытаний и состава бетона

Для изучения механических свойств бетона с тростниковым волокном при композитном сдвиге были разработаны стандартные кубические образцы для испытаний на композитный сдвиг с использованием коэффициента замещения, нормального напряжения и добавки тростникового волокна в качестве параметров изменения. Наблюдалась картина повреждения бетона с тростниковыми волокнами при прямом и сжимающем сдвиге, были получены кривые полного напряжения сдвига и смещения при прямом и сжимающем сдвиге. Был проведен углубленный анализ влияния степени замещения, нормального напряжения и добавки тростниковых волокон на прочность при сдвиге и пиковое смещение бетона с тростниковыми волокнами. Целью экспериментов было определение оптимального значения добавки тростникового волокна и прочности на сдвиг бетона с тростниковым волокном. Мы также использовали стальную и кокосовую фибру в качестве контрольной группы для определения влияния тростникового волокна на бетон, чтобы сравнить и проанализировать механические свойства и экологическую и экономическую ценность обычного бетона с бетоном из кокосового волокна, бетоном из стальной фибры и бетоном из тростникового волокна. Волокна тростника показаны на рис. 1а и 1б, волокна скорлупы кокосового ореха – на рис. 2а, а стальные волокна – на рис. 2б.



Рис. 1а. Неизмельченное камышовое волокно



Рис. 1б. Измельченное камышовое волокно



Рис. 2а. Кокосовые волокна



Рис. 2б. Стальные волокна

Экспериментальный материал был подготовлен следующим образом.

Использовался обычный силикатный цемент R42,5; природный крупный заполнитель – обычный щебень (0/5 размер зерен 5–10 мм, 1/2 размер зерен 10–20 мм, 1/3 размер зерен 16–31,5 мм), размер зерен крупного заполнителя 10–20 мм, непрерывная градация, мелкий заполнитель – природный речной песок Минского моря; вода для затворения – лабораторная водопроводная вода; использовались волокна скорлупы кокосового ореха (100–450 мкм в диаметре, 100–250 мм в длину, 2–3 мм в ширину, 1,12 г/см<sup>3</sup> в плотности), обработанные 4-процентным раствором

NaOH из скважины (диаметр 100–450 мкм, длина 100–250 мм, ширина 2–3 мм, плотность 1,12 г/см<sup>3</sup>); тростниковые волокна (длина 40 мм, ширина 3–5 мм, диаметр 0,45 мм, плотность 1,7 г/см<sup>3</sup>), стальные волокна (длина 37 мм, ширина 3 мм, диаметр 0,9 мм, плотность 7850 кг/м<sup>3</sup>; прочность на разрыв более 1150 МПа). Смесь разработана с коэффициентом замещения 0 %, целевой проектной прочностью C35 и стандартным осадком 180–220 мм. Физические свойства материалов приведены в табл. 1. Соотношения смешивания материалов и добавок приведены в табл. 2, 3.

Снимки электронной микроскопии SEM волокон тростника, волокон

Табл. 1. Физические свойства материалов

	Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Индекс дробления, %	Содержание влаги, %	Водопоглощение, %
Природные крупные заполнители	2609	1450	18	0,07	0,43
Песок	2635	1640	–	0,45	–
Камышовое волокно	–	–	–	1,10	4,85
Кокосовое волокно	–	–	–	4,8	16,3
Стальные волокна	–	–	–	0,35	0,58

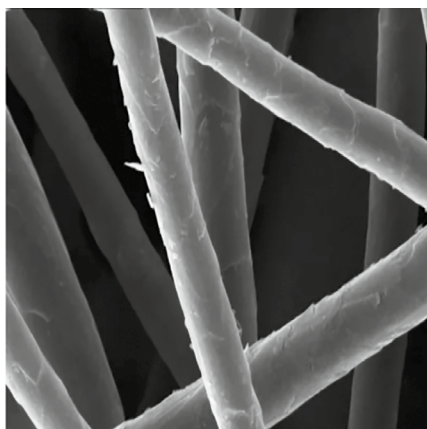


Рис. 3а. Тростниковое волокно

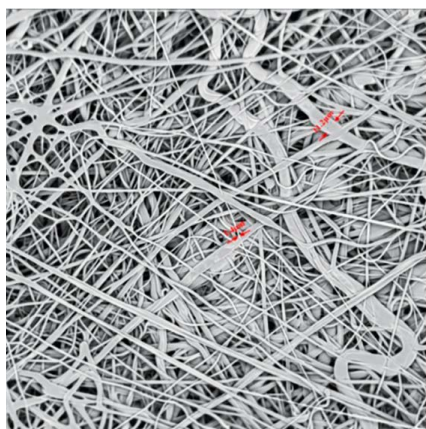


Рис. 3б. Кокосовое волокно



Рис. 3с. Стальное волокно

Табл. 2. Соотношение компонентов фибробетонной смеси

г/%	В/Ц	Количество бетонного материала г/см <sup>3</sup>									
		Цемент	Вода	Песок	Природные крупные заполнители			Кокосовое волокно/ камышовое волокно/ стальное волокно		Добавки	
					0/5	1/2	1/3				
0 %	0,45	400	180	730	110	550	440	0	0	0	4,0
0,5 %	0,45	400	180	730	110	550	440	25	25	3,875	4,0
1 %	0,45	400	180	730	110	550	440	50	50	7,75	4,0
1,5 %	0,45	400	180	730	110	550	440	75	75	11,625	4,0
2 %	0,45	400	180	730	110	550	440	100	100	15,5	4,0
2,5 %	0,45	400	180	730	110	550	440	125	125	19,375	4,0
3 %	0,45	400	180	730	110	550	440	150	150	23,25	4,0

Табл. 3. Соответствующие показатели для высокоэффективных водоредуцирующих средств

Коэффициент снижения воды, %	Содержание твердых веществ, %	Плотность (г/мл)	Содержание хлорид-иона, %
26	35	1,12	0

кокосовой скорлупы и стальных волокон показаны на рис. 3а, 3б и 3с.

Используя нормальное напряжение, степень дозирования тростникового, кокосового и стального волокон в качестве параметров изменения, мы должны разработать стандартные кубические образцы с размерами 100×100×100 мм случая нормального напряжения ( $\sigma_{II}$ ) 0 МПа и шесть случаев добавок неметаллических волокон ( $n$ ) 0,5 %, 1 %, 1,5 %, 2 %, 2,5 %, 3 % – шесть групп по 24 образца в каждой. При проведении испытаний на прямой сдвиг и просто при сжатии было рассмотрено 72 образца. А также отливка такого же количества призматических образцов стандартного размера 150×150×600 мм для испытаний на сжатие, осевое растяжение, растяжение при

изгибе. Была сделана ссылка на белорусский метод испытаний контрольных образцов бетона ГОСТ 10180-2012 [9]. Подробные параметры приведены в табл. 4.

**Введение в метод экспериментальных испытаний.** Испытание на прочность при сжатии DS2-1000N использовалось

для проведения испытания на осевое сжатие стандартного кубического образца бетона проектного размера 150×150×150 мм и образца фибробетона с добавлением различных типов и градиентов. Затем применялся гидравлический испытатель давления – GB/T3722 для проведения испытания на изгиб стандартного призматического образца бетона размера 150×150×550 мм и образца фибробетона с добавлением различных типов и градиентов. 150×150×550 мм – стандартные призматические бетонные образцы и добавление различных типов и градиентов фибробетонных образцов для экспериментов на изгиб, используя 100 мм верхнее отверстие, 200 мм нижнее отверстие, 300 мм высокое трубообразное просадочное ведро, заполненное бетоном в три заполнения, каждое заполнение с молотком вдоль стенки ведра равномерно от внешней стороны к внутренней 25 ударов, сглаживания. Затем ведро подтягивалось вверх, и бетон разрушался под действием собственного веса, при этом фиксировалась высота ведра (300 мм) минус наивысшая точка бетона после разрушения.

Табл. 4. Таблица параметров образцов

NO	Обычный бетон		Фибробетон из тростника		Бетон из кокосового волокна		Стальной фибробетон	
	$\sigma_{II}$ /МПа	г/%	$\sigma_{II}$ /МПа	г/%	$\sigma_{II}$ /МПа	г/%	$\sigma_{II}$ /МПа	г/%
C1	0	0	0	0,5 %	0	0,5 %	0	0,5 %
C2	0	0	0	1 %	0	1 %	0	1 %
C3	0	0	0	1,5 %	0	1,5 %	0	1,5 %
C4	0	0	0	2 %	0	2 %	0	2 %
C5	0	0	0	2,5 %	0	2,5 %	0	2,5 %
C6	0	0	0	3 %	0	3 %	0	3 %

После завершения всех испытаний результаты наносятся на график и заносятся в лист EXCEL.

**Результаты эксперимента.** Чтобы определить архитектурно-механические свойства бетона из тростникового волокна, кокосового волокна и стальной фибры, необходимо провести испытания на осадку, прочность на растяжение и прочность на изгиб образцов, выращенных в течение 7 и 28 дней, чтобы получить соответствующие данные и проанализировать

их соответствующие механические свойства и область архитектурного использования. Образцы для испытаний показаны на рис. 4а и 4б, а механические свойства – на рис. 5а и 5б, испытания образца на сжатие – на рис. 6а и 6б. Результаты испытаний приведены в табл. 5–7.

Для того чтобы изучить различия в использовании бетона с тростниковым, стальным, кокосовым волокнами и обычного бетона в экологических строительных материалах,



Рис. 4а. Изготовление бетонных образцов



Рис. 4б. Обработка выпуска образца



Рис. 5а. Образец на изгиб



Рис. 5б. Образец на изгиб



Рис. 6а. Испытание образца на сжатие



Рис. 6б. Испытание образца на сжатие

Табл. 5. Нормальное напряжение ( $\sigma$ ) 0 МПа у тростникового, кокосового, стального волокон 7, 28 дней. Прочность на изгиб, МПа

N0	Параметры подстановки		Обычный бетон		Тростниковое волокно		Кокосовое волокно		Стальные волокна	
	$\sigma$ /МПа	r/%	7d	28d	7d	28d	7d	28d	7d	28d
C1	0	0,5 %	3,6	4,1	4,1	5,0	3,9	4,9	4,1	4,9
C2	0	1 %	3,5	3,9	4,0	4,9	4,1	4,8	4,2	5,1
C3	0	1,5 %	3,9	4,5	4,3	5,8	4,0	5,7	4,6	6,0
C4	0	2 %	4,1	4,2	4,8	5,9	4,5	5,9	4,8	5,8
C5	0	2,5 %	4,0	4,2	4,5	5,4	4,2	5,3	4,6	5,3
C6	0	3 %	3,8	4,0	4,4	4,9	4,4	4,7	4,5	4,8

Табл. 6. Нормальное напряжение ( $\sigma$ ) 0 МПа у тростникового, кокосового, стального волокон 7, 28 дней. Прочность на сжатие, МПа

N0	Параметры подстановки		Обычный бетон		Тростниковое волокно		Кокосовое волокно		Стальные волокна	
	$\sigma$ /МПа	r/%	7	28d	7d	28d	7d	28d	7d	28d
C1	0	0,5 %	35,8	44,1	35,2	44,1	33,2	43,5	34,8	53,6
C2	0	1 %	35,1	42,3	37,6	45,6	35,1	46,7	36,6	52,1
C3	0	1,5 %	36,3	42,8	40,1	43,8	39,6	47,3	46,3	54,5
C4	0	2 %	38,6	41,5	43,8	50,7	43,2	49,2	44,5	52,8
C5	0	2,5 %	39,0	40,2	41,5	48,3	42,1	46,5	45,2	50,1
C6	0	3 %	38,3	42,5	40,6	43,9	42,7	43,1	45,6	51,2

Табл. 7. Измерение просадки тростникового, кокосового, стального волокон

Просадка (мм) \ Серийный номер	Обычный бетон	Тростниковое волокно	Кокосовое волокно	Стальные волокна
C1	195	190	196	190
C2	180	200	204	185
C3	185	205	198	200
C4	198	205	203	198
C5	200	195	210	200
C6	205	210	216	210

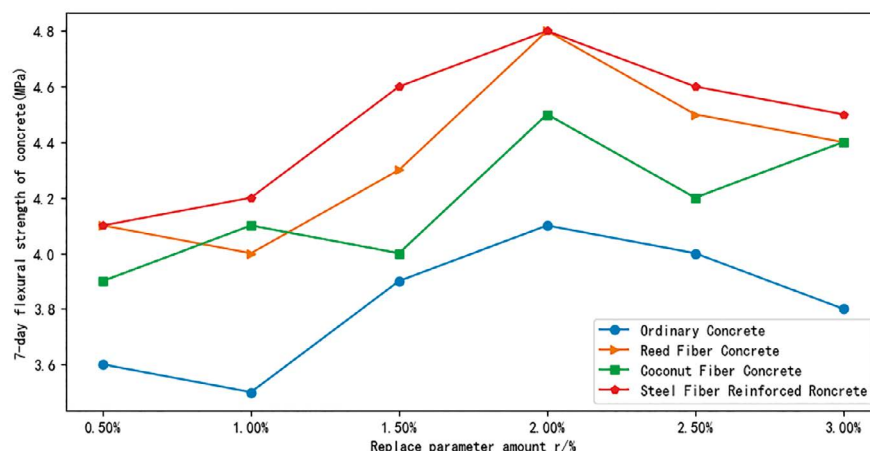


Рис. 8. Значения нормального напряжения ( $\sigma$ ) прочности 7-дневного бетона при изгибе для тростникового, кокосового, стального волокон и обычного бетона при 0 МПа

а также различия в механических свойствах (растяжение и изгиб), мы провели соответствующий графический анализ вышеуказанных данных испытаний с помощью программного анализа python. Программа составлена следующим образом: результаты экспериментального анализа подробно представлены на рис. 8, 9, 10, 11 и 12.

Анализ рис. 8 ясно показывает, что 7-дневная прочность на изгиб фибробетона значительно увеличилась по сравнению с обычным бетоном, причем стальные волокна показали наиболее значительное увеличение прочности на изгиб, за ними следуют волокна тростника и, наконец, кокосовые. Пик 7-дневной прочности на изгиб наблюдается при добавлении 2 % волокон. Прочность при изгибе увеличивается с увеличением количества добавленного волокна, и после достижения 2-процентного пика напряжение при изгибе уменьшается по мере увеличения количества волокна.

Анализируя рис. 9, мы ясно видим, что 28-дневная прочность на изгиб фибробетона значительно выше, чем у обычного бетона, с пиковой точкой стальной фибры на уровне 1,5 %, за которой следует постепенное снижение прочности на изгиб по мере увеличения количества фибры. Пиковые точки волокон тростника и скорлупы кокоса также остаются в том же положении, что и значения 7-дневной прочности на изгиб, сохраняя градиент добавления 2 % фибры. Общность трех волокон заключается в том, что все они повышают прочность бетона на изгиб, при этом нормальное распределение при определенном количестве добавленного волокна продолжает повышать прочность на изгиб, а после достижения пика напряжения прочность на изгиб снижается по градиенту по мере увеличения количества волокна. Соотношение между напряжением при изгибе фибробетона следующее: бетон со стальными волокнами > бетон с тростниковыми волокнами > бетон с кокосовыми волокнами.

Анализируя рис. 10, мы ясно видим, что наблюдается значительное увеличение 7-дневной прочности на сжатие фибробетона по сравнению с обычным бетоном с положительными корреляционными кривыми для бетона

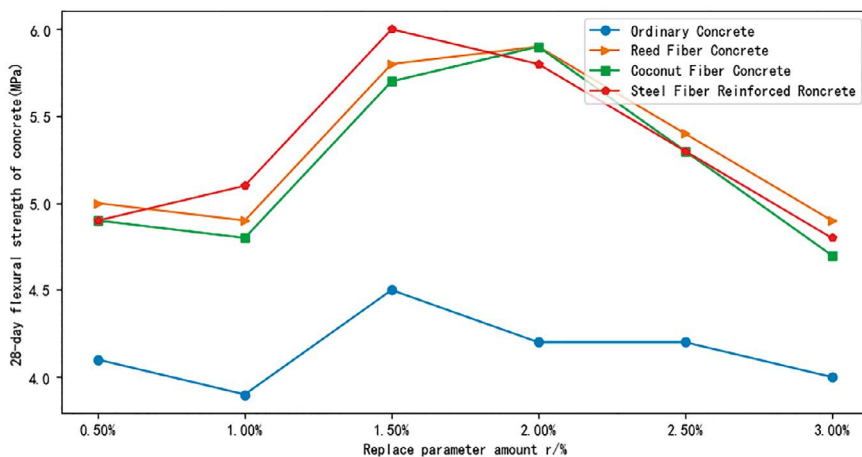


Рис. 9. Значения нормального напряжения ( $\sigma$ ) прочности 28-дневного бетона на изгиб МПа для тростникового, кокосового, стального волокон и обычного бетона при 0 МПа

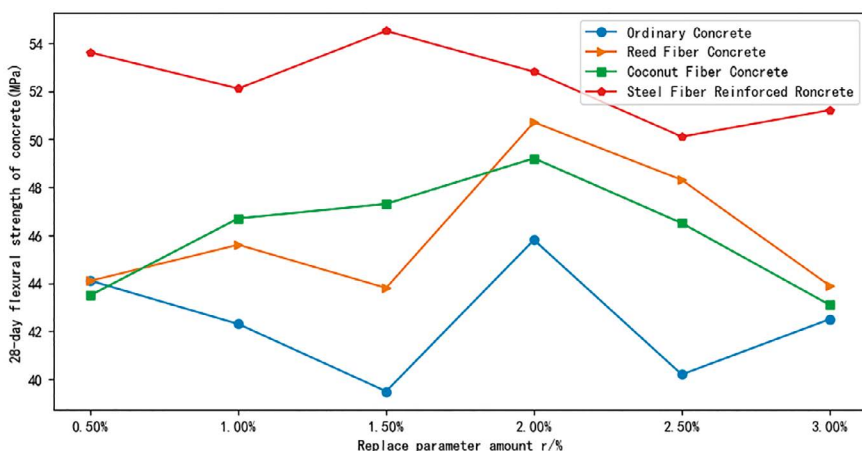


Рис. 10. Нормальное напряжение ( $\sigma$ ) 7-дневной прочности на сжатие МПа для волокон тростника, скорлупы кокосового ореха, стального волокна и обычного бетона при 0 МПа

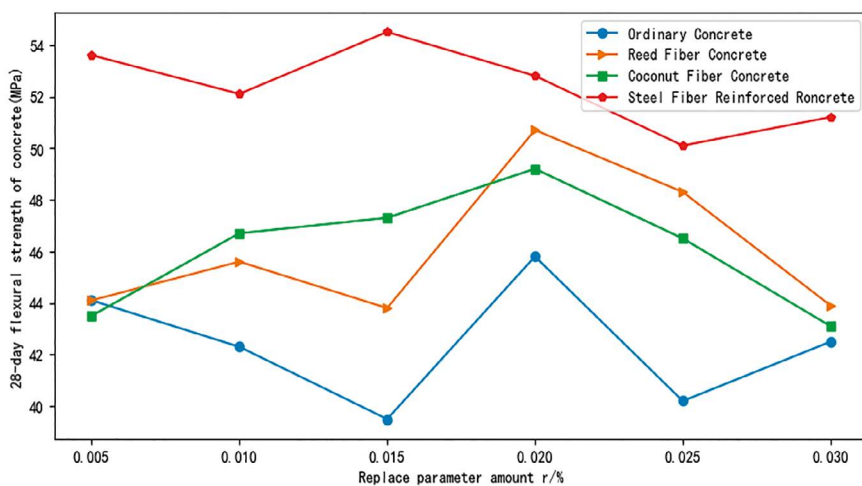


Рис. 11. Нормальное напряжение ( $\sigma$ ) прочности 28-дневного бетона на сжатие МПа для тростникового, кокосового, стального волокон и обычного бетона при 0 МПа

из тростникового волокна и бетона из кокосового волокна. Общность заключается в том, что фибробетон сопровождается увеличением

градиента добавки фибры, что повышает прочность образцов на сжатие. Она значительно увеличивается в диапазоне 0,5–1,5 % добавки фибры.

После достижения пика в 2 % увеличение количества волокна не увеличивает прочность на сжатие образцов фибробетона, а скорее приводит к ее снижению по мере увеличения добавки волокна.

Анализируя рис. 11, мы ясно видим, что прочность 28-дневного фибробетона на сжатие значительно выше, чем у обычного бетона, причем самое высокое ее значение у сталефибробетона при 1,5 % добавки фибры, а с увеличением добавки фибры оно постепенно снижается. Прочность на сжатие волокон скорлупы кокосового ореха и тростника показывает линейную корреляцию с увеличением количества градиентного волокна, при этом прочность на сжатие бетонных образцов постепенно увеличивается, а после достижения пика в 2 % прочность на сжатие постепенно снижается по мере увеличения количества волокна.

Анализ графика на рис. 12 показывает, что все измеренные просадки бетона находились в пределах диапазона просадок экспериментального проекта (180–220 мм), а просадки трех типов фибробетона были в целом меньше, чем просадки обычного бетона с фиброволокнами, причем фиброволокна из тростника имели наименьшую просадку, затем шли фиброволокна из скорлупы кокосового ореха и, наконец, стальные фиброволокна. Их просадка уменьшается с увеличением градиента волокон, что иллюстрирует тенденцию добавления волокон в бетон к возникновению реакции агрегации при изгибе. В частности, такое изгибное агрегирование растительных волокон снижает текучесть перекачиваемого бетона.

Проведены исследования влияния на прочность бетона варьирования нормального напряжения и количества градиента волокон при неизменном соотношении В/Ц, добавок, крупного заполнителя и дозировки материала. Графики рассеяния были проанализированы с помощью программного обеспечения python, и были подогнаны с использованием пяти полиномов, где выборочные коэффициенты для шести подгонок

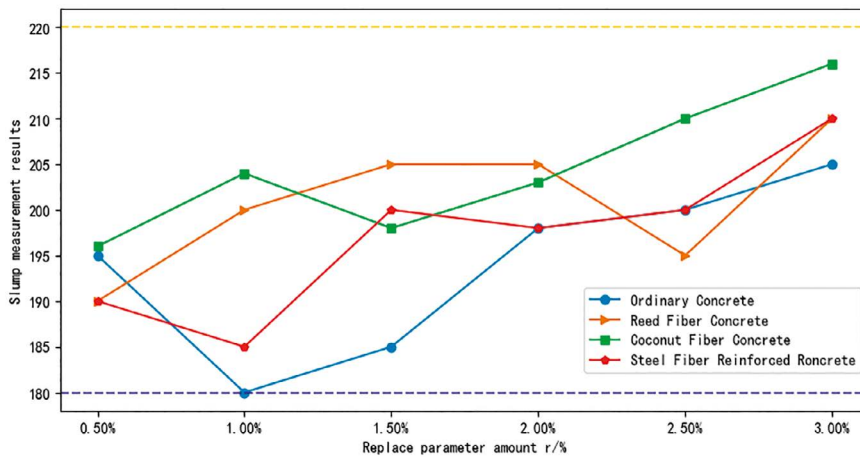


Рис. 12. Диаграмма рассеяния для волокна тростника, скорлупы кокосового ореха, стальной фибры и нормальной просадки бетона

в основном сходились к «1». Таким образом, это еще раз подтверждает, что данный тест не содержал ошибок. Анализ показывает, что прочность бетона на изгиб и сжатие наибольшая при содержании

неметаллических растительных волокон (волокна скорлупы кокосового ореха, тростника) на уровне 2%. Максимальная прочность бетона на изгиб и сжатие достигается при 1,5% стальных волокон.

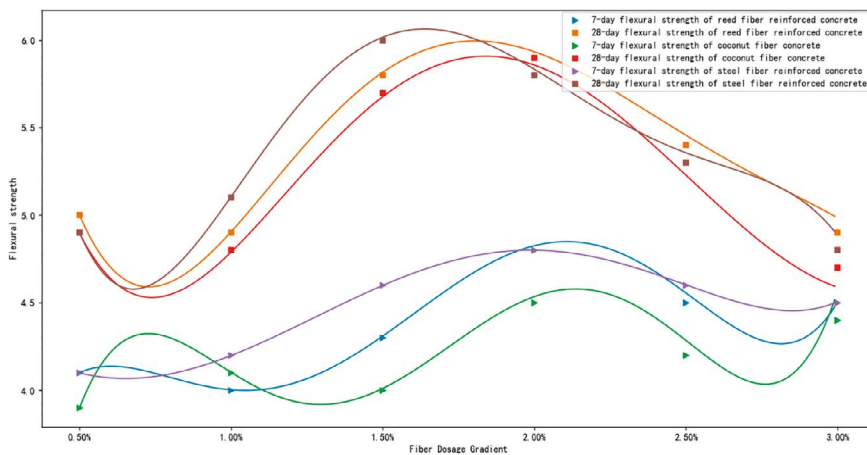


Рис. 13. Распределение кривых изгиба по методу рассеяния

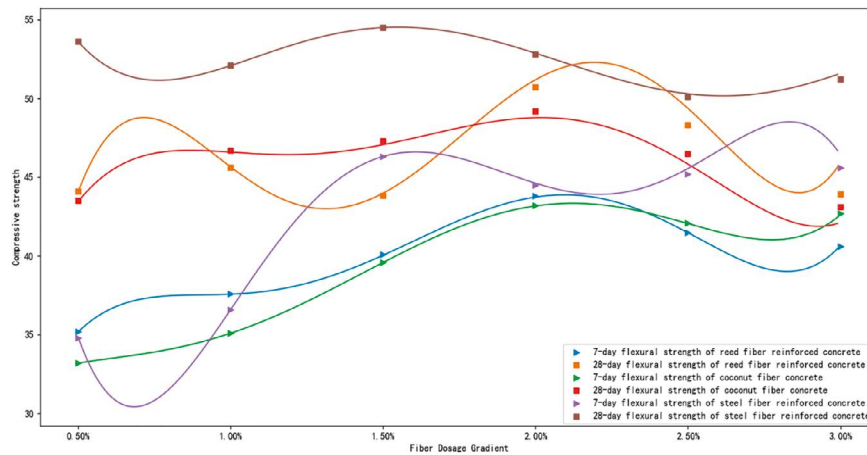


Рис. 14. Scatter-fit распределение кривых сопротивления давлению

Уравнение для подгонки кривой изгиба имеет вид

$$y_7 = (7.467 \cdot 10^{**9}) \cdot x^{**5} - (6.133 \cdot 10^{**8}) \cdot x^{**4} + (1.827 \cdot 10^{**7}) \cdot x^{**3} - (2.407 \cdot 10^{**5}) \cdot x^{**2} + 1399 \cdot x + 1.2$$

$$y_8 = (-4.267 \cdot 10^{**9}) \cdot x^{**5} + (4.533 \cdot 10^{**8}) \cdot x^{**4} - (1.813 \cdot 10^{**7}) \cdot x^{**3} + (3.287 \cdot 10^{**5}) \cdot x^{**2} - 2544 \cdot x + 11.5$$

$$y_9 = (1.333 \cdot 10^{**10}) \cdot x^{**5} - (1.153 \cdot 10^{**9}) \cdot x^{**4} + (3.72 \cdot 10^{**7}) \cdot x^{**3} - (5.512 \cdot 10^{**5}) \cdot x^{**2} + 3702 \cdot x - 4.8$$

$$y_{10} = (-1.867 \cdot 10^{**9}) \cdot x^{**5} + (2.467 \cdot 10^{**8}) \cdot x^{**4} - (1.157 \cdot 10^{**7}) \cdot x^{**3} + (2.338 \cdot 10^{**5}) \cdot x^{**2} - 1930 \cdot x + 10$$

$$y_{11} = (1.067 \cdot 10^{**9}) \cdot x^{**5} - (6 \cdot 10^{**7}) \cdot x^{**4} + (6 \cdot 10^{**5}) \cdot x^{**3} + (1.35 \cdot 10^{**4}) \cdot x^{**2} - 195.7 \cdot x + 4.7$$

$$y_{12} = (-8.267 \cdot 10^{**9}) \cdot x^{**5} + (7.933 \cdot 10^{**8}) \cdot x^{**4} - (2.863 \cdot 10^{**7}) \cdot x^{**3} + (4.702 \cdot 10^{**5}) \cdot x^{**2} - 3329 \cdot x + 12.9$$

Уравнение для кривой сжатия имеет вид

$$y_7 = (6.107 \cdot 10^{**10}) \cdot x^{**5} - (5.133 \cdot 10^{**9}) \cdot x^{**4} + (1.589 \cdot 10^{**8}) \cdot x^{**3} - (2.244 \cdot 10^{**6}) \cdot x^{**2} + (1.477 \cdot 10^{**4}) \cdot x + 0.6$$

$$y_8 = (1.475 \cdot 10^{**11}) \cdot x^{**5} - (1.306 \cdot 10^{**10}) \cdot x^{**4} + (4.294 \cdot 10^{**8}) \cdot x^{**3} - (6.443 \cdot 10^{**6}) \cdot x^{**2} + (4.344 \cdot 10^{**4}) \cdot x - 58$$

$$y_9 = (2.8 \cdot 10^{**10}) \cdot x^{**5} - (2.12 \cdot 10^{**9}) \cdot x^{**4} + (5.583 \cdot 10^{**7}) \cdot x^{**3} - (6.13 \cdot 10^{**5}) \cdot x^{**2} + 3237 \cdot x + 26.6$$

$$y_{10} = (5.227 \cdot 10^{**10}) \cdot x^{**5} - (4.573 \cdot 10^{**9}) \cdot x^{**4} + (1.489 \cdot 10^{**8}) \cdot x^{**3} - (2.25 \cdot 10^{**6}) \cdot x^{**2} + (1.588 \cdot 10^{**4}) \cdot x + 4.4$$

$$y_{11} = (-1.339 \cdot 10^{**11}) \cdot x^{**5} + (1.227 \cdot 10^{**10}) \cdot x^{**4} - (4.217 \cdot 10^{**8}) \cdot x^{**3} + (6.647 \cdot 10^{**6}) \cdot x^{**2} - (4.596 \cdot 10^{**4}) \cdot x + 143.9$$

$$y_{12} = (-2.507 \cdot 10^{**10}) \cdot x^{**5} + (2.62 \cdot 10^{**9}) \cdot x^{**4} - (1.009 \cdot 10^{**8}) \cdot x^{**3} + (1.75 \cdot 10^{**6}) \cdot x^{**2} - (1.332 \cdot 10^{**4}) \cdot x + 87.5$$

Уравнения взяты из программы для анализа регрессионной связи данных



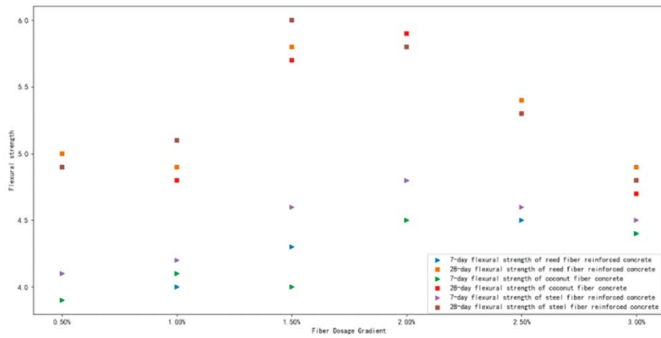


Рис. 15. Распределение точек разброса разрушения фибробетона

Из анализа графиков на рис. 13–16 видно, что все три волокна могут увеличить механические свойства бетона при нормальном напряжении  $\sigma_{\text{н}} = 0$  МПа и коррелируют между собой. Оптимальное соотношение добавок для бетона с тростниковым и кокосовым волокнами составляет 2 %, что может эффективно улучшить механические свойства бетона как при 7-дневном, так и при 28-дневном изгибе и сжатии. Оптимальное соотношение добавок для стальных волокон составило 1,5 %, и стальные волокна значительно превосходили растительные волокна в повышении свойств бетона при изгибе и деформации. Данный результат согласуется с результатами, полученными М. К. Yashwanth, G. S. Sushmitha в работе «Оценка прочности на сжатие бетона, армированного кокосовыми волокнами» [10]. Это показывает, что данные наших научных испытаний являются строгими и играют решающую роль в исследовательской работе данной статьи, которая задает новые направления для научных исследований в Республике Беларусь в сфере «зеленых» строительных материалов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показывают, что как металлические, так и кокосовые и тростниковые волокна могут улучшить механические свойства бетона. Прочность на сжатие и изгиб бетонных образцов значительно увеличилась по сравнению с обычным бетоном. Оптимальное соотношение примесей для неметаллических растительных волокон (тростниковое и кокосовое) составляет 2 %. При тех же условиях прочность на изгиб бетона с волокнами тростника увеличилась на 1,7 МПа, а прочность на сжатие на 9,2 МПа, в то время как прочность на изгиб бетона с волокнами скорлупы кокосового ореха увеличилась на 1,7 МПа, а прочность на сжатие – на 7,7 МПа по сравнению с обычным бетоном. Оптимальная дозировка стальной фибры составляет 1,5 %, что увеличивает прочность на изгиб на 1,5 МПа и прочность на сжатие на 11,7 МПа по сравнению с обычным бетоном. Для сравнения, прочность на изгиб неметаллических растительных волокон может очень хорошо улучшить прочность бетона на изгиб, в то время как прочность на сжатие стальных волокон намного выше, чем у неметаллических растительных волокон. Результаты экспериментального сравнительного исследования показывают, что прочность на изгиб неметаллических растительных волокон выше, чем у стальных волокон, а прочность на сжатие ниже, чем у стальных волокон, но разница невелика, и существует градиент взаимозаменяемости. Однако неметаллические растительные волокна недороги, в основном являются

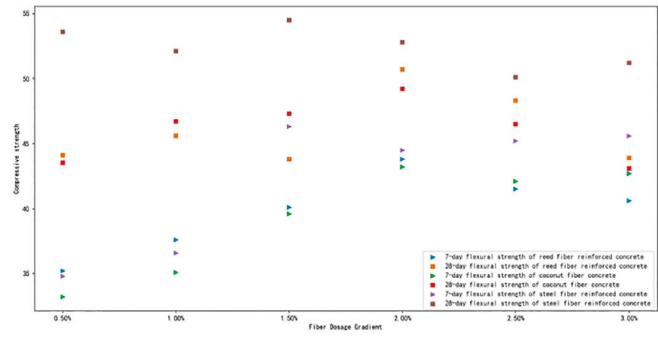


Рис. 16. Распределение точек разброса при сжатии фибробетона

сельскохозяйственными отходами и могут обеспечить устойчивую энергию для зданий, в то время как стальные волокна дороги и невозобновляемы. Поэтому неметаллические растительные волокна являются важным источником энергии для новых строительных материалов.

Данное исследование поможет решить проблему нехватки ресурсов и экологичности «зеленых» строительных материалов в Республике Беларусь, показывает, как использовать имеющиеся ресурсы для разработки новых энергосберегающих и снижающих выбросы строительных материалов, реализовывая идею устойчивого развития с помощью концепции «зеленого» строительства. Таким образом, обеспечивается разработка новых экономических, экологически чистых и долговечных материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Agopyan, V. Developments on vegetable fibre-cement based materials in Sao Paulo, Brazil: an overview / V. Agopyan, H. Savastano Jr., V. M. John, M. A. Cincotto // *Cement and Concrete Composites* 27. – 2005. – № 5. – P. 527–536.
- Fiore, V. Characterization of a new natural fiber from arundo donax L. as potential reinforcement of / V. Fiore, T. Scalici, A. Valenza // *Carbohydrate Polymers*. – 106. – 2014. – P. 77–83.
- Santos, S. F. Non-conventional cement-based composites reinforced with vegetable fibers: A review of strategies to improve durability / S. F. Santos, G. H. D. Tonoli, J. E. B. Mejia, J. Fiorelli, H. Savastano Jr. // *Materiales de Construcción*. – 65. – 317. – 2015.
- Caponetto, R. Performance Assessment of Giant Reed-Based Building Components / R. Caponetto, M. Cuomo, M. Detommaso, G. Giuffrida, A. L. Presti, F. Nocera // *Sustainability*. – 2023. – № 15. <https://doi.org/10.3390/sul15032114>.
- Jiménez-Espada, M. Characterization of Mechanical and Hygroscopic Properties of Individual Canes of Reed [J] / M. Jiménez-Espada, D. Herrero-Adán, R. González-Escobar // *Materials*. – 2021. – 14(9): 2193. <https://doi.org/10.3390/ma14092193>
- Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/ma14092193>. – Дата доступа: 12.03.2022.
- Pardeshi, S. Studies on fiber-concrete composite [J]. / S. Pardeshi, M. Y. Gudiyawar, P. M. Katkar // *Technical Textiles/Technische Textilien*. – 2013. – 56(4). – Режим доступа: <https://web.p.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=0323243&AN=90420638&h=dBxGdprYBbUWCU3xPK12QntrpXmOFWfJKb9hemzn5KQgPpGinDBlyqF9ybTobPVtLEQ3UEVwL0UoAMtB%2bXDA%3d%3d&crI=c&resultN s=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCriNotAuth&crIhashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jrnl%3d0323243%26AN%3d90420638>. – Дата доступа: 15.01.2023.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *Natural Fibers: Coir, International Year of Natural Fibers*. Retrieved December 1, 2012. – Режим доступа: [www.naturalfibres2009.org](http://www.naturalfibres2009.org). – Дата доступа: 15.01.2023.
- S.-J. Jang, H.-D. Yun. Combined effects of steel fiber and coarse aggregate size on the compressive and flexural toughness of high-strength concrete / S.-J. Jang, H.-D. Yun. // *Composite Structures* – 2018. – Vol. 185. – P. 203–211.
- ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://normy.by/fond.php>. – Дата доступа: 18.01.2023.
- Yashwanth, M. K. Evaluation of Compressive Strength of Coir Fiber Reinforced Concrete [J]. / M. K. Yashwanth // *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*. – 2021. – 12(10). – P. 68–73. <https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i10.4044>.