

10.33942/sit042226

УДК 693.55

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРЫ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА

*Сатынбек уулу Билимбек, магистрант,
Международный университет инновационных технологий, bili_kg99@mail.ru*

*Касымов Туратбек Мугалимович, канд. техн. наук,
Международный университет инновационных технологий, muitpro@mail.ru*

БЕТОНДУН БЫШЫКТЫК КАСИЕТТЕРИН ЖАКШЫРТУУ ҮЧҮН БАЗАЛЬТ ФИБРАСЫН КОЛДОНУУ БОЮНЧА ЧЕТ ӨЛЖӨДӨГҮ ТАЖРЫЙБА

*Сатынбек уулу Билимбек,
Эларалык инновациялык технологиялар университетинин магистранты, bili_kg99@mail.ru*

*Касымов Туратбек Мугалимович, техника илимдеринин кандидаты,
Эларалык инновациялык технологиялар университети, muitpro@mail.ru*

FOREIGN EXPERIENCE IN THE USE OF BASALT FIBER TO IMPROVE THE STRENGTH PROPERTIES OF CONCRETE

*Satynbek uulu Bilimbek, graduate student,
International University of Innovative Technologies, bili_kg99@mail.ru*

*Kasymov Turatbek Mugalimovich,
International University of Innovative Technologies, muitpro@mail.ru*

Аннотация

Как известно, бетон хорошо работает на сжатие, но плохо сопротивляется растяжению и изгибу. В целях улучшения технических характеристик бетона активно используются различные виды фибр. Применяемые фибры отличаются не только видами, но и техническими характеристиками. В последние годы базальтовые фибры, по сравнению с другими минеральными волокнами, привлекают все больше внимание исследователей, т.к. базальтовые фибры обладают рядом преимуществ, таких как: высокая прочность и высокая модуль упругости. Однако, информация по использованию базальтовой фибры в бетоне разрознена, и трудно определить преимущества базальтовых фибр в отличие от других.

В данной работе рассматривается зарубежный опыт использования базальтовой фибры при изготовлении бетона и проделана попытка обобщения имеющейся в открытой доступности соответствующей информации. Результаты показывают, что базальтовые фибры могут значительно улучшить прочностные свойства бетона. Показано, что количество введения базальтовой фибры важна, т.к. более высокое его содержание неблагоприятно влияет на прочностные свойства бетона. По данным

зарубежных исследователей оптимальным содержанием базальтовой фибры в бетоне колеблется от 0,5 до 1,5 %.

Ключевые слова: базальтовая фибра, ровинг, прочность при сжатии, прочность при изгибе.

Аннотация

Белгилүү болгондой, бетон кысуу туруктуулугу жакшы иштейт, бирок чоюлууга жана ийилүүгө начар туруштук берет. Бетондун техникалык мүнөздөмөлөрүн жакшыртуу үчүн фибралардын ар кандай түрлөрү активдүү колдонулат. Колдонулган фибралар түрү боюнча гана эмес, техникалык мүнөздөмөлөрү боюнча да айырмаланат. Акыркы жылдары базальт фибралары башка минералдык булаларга салыштырмалуу изилдөөчүлөрдүн көңүлүн көбүрөөк буруп жатат, анткени базальт фибралары бир катар артыкчылыктарга ээ, мисалы: жогорку бекемдик туруктуулугу жана ийкемдүүлүктүн жогорку модулу. Бирок, бетондо базальт фибраларын колдонуу боюнча изилдөөлөрдүн маалыматтары чачыранды жана бири-биринен айырмаланышып турушу, алардын башка минералдык булаларга карата артыкчылыктарын аныктоо таталдаштырылууда.

Бул макалада бетон өндүрүүдө базальт фибрасын колдонуунун чет өлкөлүк тажрыйбасы каралды жана тиешелүү маалыматтар чогултулуп чет-өлкөлүк изилдөөлөрдүн жыйынтыктарын жалпылоо аракети жасалды. Натыйжада базальт фибралары бетондун бекемдик туруктуулугун бир топ жакшырта аларын көрсөтүлдү. Базальт фибрасынын кошулчу көлөмү маанилүү экени аныкталды, анткени алардын көбүрөөк кошулусу бетондун бекемдик туруктуулугуна терс таасирин тийгизет. Чет элдик изилдөөчүлөрдүн жыйынтыгында, бетондогу базальт фибрасынын оптималдуу кошуу көлөмү 0,5% дан 1,5%ке чейин болушу зарыл.

Ачкыч сөздөр: базальт фибрасы, ровинг, кысуу туруктуулугу, ийилүүчү бекемдиги.

Abstract

As is known, concrete works well in compression, but poorly resists tension and bending. In order to improve the technical characteristics of concrete, various types of fibers are actively used. Used fibers differ not only in types, but also in technical characteristics. In recent years, basalt fibers, in comparison with other mineral fibers, are attracting more and more attention of researchers, because basalt fibers have several advantages, such as: high strength and high elastic modulus. However, information on the use of basalt fibers in concrete is scattered, and it is difficult to determine the advantages of basalt fibers in contrast to others.

This paper examines foreign experience with the use of basalt fibers in the manufacture of concrete and attempts to summarize the relevant information available in the public domain. The results show that basalt fibers can significantly improve the strength properties of concrete. It is shown that the amount of basalt fiber introduction is important, because its higher content adversely affects the strength properties of concrete. According to the data of foreign researchers the optimum content of basalt fiber in concrete fluctuates from 0.5 to 1.5 %.

Keywords: basalt fiber, roving, compressive strength, tensile strength.

Введение. В настоящее время бетон остается один из основных материалов для реализации любых объектов, которые эксплуатируется в разнообразных условиях. При этом в бетонных материалах существуют следующие основные проблемы: низкая прочность на растяжение и способность легко ломаться [1]. Для повышения прочности при растяжении и жесткости бетона зарубежные ученые рекомендуют использовать фибры из минеральных волокон [2-4]. Исследователями [5, 6] было установлено, что базальтовые

волокна обладают не только превосходными техническими характеристиками, но и более доступны по стоимости, чем другие минеральные волокна. За счет замены стальной арматуры и проволочной сетки (традиционных и энергоемких методов использования) на базальтовые фибры можно снизить стоимость строительства [7-9], т.к., снижаются энерго- и трудозатраты, количество времени необходимое для строительства, и в итоге общая стоимость здания. К основным недостаткам стальной фибры относятся: высокая стоимость, пониженная обрабатываемость и склонность к коррозии. [10].

Базальтовой фиброй (рис.1) называют короткие кусочки ровинга. Ровинг представляет с собой пучок базальтовых непрерывных волокон, без переплетения. Базальтовые фибры, используемые в бетоне, имеют темно-оливкового цвета. Исходным материалом ровинга служат базальтовые породы. Обычно диаметр волокон колеблется от 9 до 12 мкм, длина фибры от 10 до 70 мм, прочность на растяжение в среднем 3500 МПа, модуль упругости не менее 75 ГПа, коэффициент удлинения – 3,2 %, плотность 2,6 г/см³, стойкость к щелочам и коррозии - высокая. В разных работах [11-15] приводятся различные физические характеристики базальтовой фибры. Так в табл.1 представлены физические характеристики базальтовых фибр из разных источников.



Рис.1. Базальтовый ровинг и базальтовая фибра

Благодаря своим превосходным физико-техническим свойствам, фибра из базальтовых волокон является быстро развивающимся материалом в бетонных материалах. В щелочном растворе базальтовая фибра проявляет сильную химическую стабильность и коррозионную стойкость.

Таблица 1. Физические свойства базальтовых фибр из разных источников

Параметры	Ссылка				
	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]
Удельный вес	-	-	-	2,7	-
Плотность, г/см ³	2,8	2,7	2,7	-	2,6

Предел прочности, МПа	4840	3200-4800	2800	4150-4800	4200
Модуль упругости, ГПа	89	90	-	100-110	98
Удлинение, %	3,2	-	4,0	-	3,1

Формулировка проблемы. Согласно исследованиям [16], базальтовые фибры значительно повышают твердость и сопротивление разрушению бетона, а также обладают высокой щелочестойкостью. Исследователями в работе [17] установлены оптимальное соотношение базальтовой фибры в бетоне. В работе [18] показаны влияние базальтовой фибры с различным объемным процентным содержанием на трещиностойкость бетонных балок. Согласно их экспериментальным данным, предельная нагрузка и деформация бетонных балок увеличилось. В работе [19] исследованы физико-механические характеристики самоуплотняющегося бетона с армированием базальтовой фибры. Результаты исследований показали, что добавление базальтовой фибры делает самоуплотняющийся бетон менее удобоукладываемым. При этом, значительно улучшаются физические характеристики образцов бетона. Было проведено исследование влияния полипропилена и базальтовой фибры на механические характеристики [20]. Было установлено, что прочность при растяжении и прочность на изгиб образцов бетона значительно повышаются за счет фибры. Однако, не указывается, каким образом увеличивается прочностные показатели. В работе [21] показано, что фибра улучшило прочность при сжатии на 6%. Базальтовые фибры обладают отличными механическими и физическими характеристиками, в том числе высокой коррозионной стойкостью, отличной термостойкостью, устойчивостью к щелочам и кислотам [22]. Согласно исследованиям [23], базальтовые фибры могут значительно увеличить способность бетона к деформации и поглощению энергии, но они практически не влияют на прочность при растяжении.

Очень важно оптимальное содержание, так как большое количество фибр как указано выше неблагоприятно влияет на прочностные свойства бетона. Оптимальный диапазон идеального количества базальтовой фибры колеблется от 0,5 до 1,5%. Наконец, анализ также указывает на пробелы в области потенциальных исследований, которые необходимо изучить, прежде чем использовать их на практике [24].

Предлагаемое решение и его теоретическое обоснование. Прочность на сжатие с добавлением базальтовых фибр показана на рис.1.2. Можно заметить, что добавление базальтовой фибры увеличивает прочность на сжатие. Когда количество базальтовой фибры в смеси было увеличено до 1,5%, наблюдалось незначительное улучшение прочность на сжатие. Однако, когда количество фибр было увеличено до 2,0%, наблюдалась снижение прочность на сжатие материала. Объяснение может заключаться в

том, что в бетонной смеси было большее количество объемной доли фибры. Это могло привести к тому, что распределение фибр стало более неравномерным, что, в свою очередь, могло вызвать потерю прочности на сжатие. По сравнению с обычной бетонной матрицей максимальное улучшение прочности на сжатие достигло 4,45% при объемной доле фибр в бетоне, равной 1,5% [22].

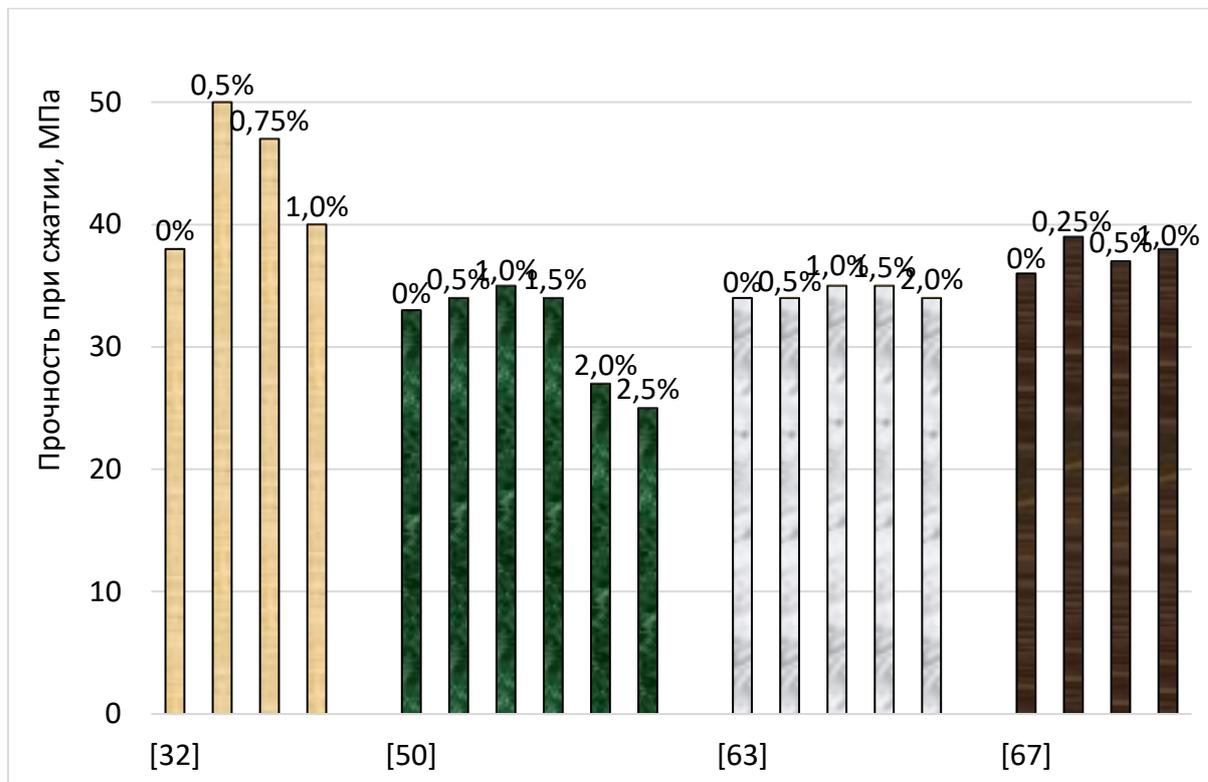


Рис.1.2. Прочность при сжатии бетона с использованием базальтовой фибры (источники [25, 21, 22, 23])

Базальтовые фибры добавляют в бетон в объемных долях 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 3,0 %, в результате чего прочность на сжатие при 7-сут. твердении на 55-64 % выше, чем 28-сут. Прочность на сжатие обычного бетона увеличилась на 4,72 % при добавлении базальтовой фибры в количестве 0,5%. Прочность при сжатии увеличивается до 11,45% по сравнению с эталонным бетоном, когда базальтовая фибра увеличивается до 1%. Поскольку базальтовые фибры заполнили поры бетона в различных ориентациях, была вызвана функция повышения прочности. При дальнейшем повышении концентрации базальтовой фибры на 1,5%, прочность при сжатии снижается до 8,2%, но при этом увеличивается до 3,45% по сравнению с обычным бетоном. Когда концентрация фибры превышает 1,5%, прочность при сжатии постепенно снижается на 16,48 %, 25,26 % и 33,87 % при содержании фибры 2 %, 2,5 % и 3 % соответственно. Это может быть результатом сгущения фибр, проблем с уплотнением или отсутствия связи между фибрами и бетонной смесью [23].

Согласно исследованиям [26], содержание базальтовой фибры оказывает существенное влияние на прочность при сжатии бетона. Все образцы бетона в возрасте 90 дней имеют прочность при сжатии, который как минимум на 20% выше, чем в возрасте 28 дней, демонстрируя, что более длительное время твердения приводит к более высокой прочности бетонов. Вероятно, это связано с тем, что бетону с добавлением базальтовой фибры требуется больше времени, чем обычному бетону, для полной гидратации [27]. Несущая способность композитных образцов была улучшена за счет включения базальтовой фибры. Эффект поперечного удержания и прочная связь между волокнами и цементом были ответственны за это улучшение характеристик [25]. В то время как фибры с заменой 1,0 и 1,5% продемонстрировали почти такую же прочность при сжатии, как и контрольный бетон.

Согласно исследованиям [28], добавление базальтовой фибры в количестве 0,5% привело к снижению прочности при сжатии на 3,9% через 28 сут. В этом исследовании не было заметного увеличения прочности на сжатие при добавлении базальтовой и полипропиленовой фибры. Прочность при сжатии образцов, армированных полипропиленовой фиброй с объемной долей 0,05, 0,1 и 3 %, увеличивается на 2,41, 6,13 и 4,32 % соответственно по сравнению с обычным бетоном. Базальтовые фибры продемонстрировали лучший прирост прочности при той же объемной доле по сравнению с полипропиленовой фиброй. Улучшение прочности при сжатии железобетона с базальтовой фиброй (длина 12 мм) колеблется от 3,74 до 6,49 % при добавлении с объемными долями 0,05, 0,1, 3,0 и 0,5 % [27].

Согласно исследованию [29], для увеличения прочности на сжатие в разном возрасте может быть включено достаточное количество базальтовой фибры. Прочность при сжатии с базальтовой фиброй (0,5%) является самым высоким, будучи на 9,87% и 17,13% выше через 28 и 90 сут., соответственно, чем у эталонного бетона (без содержания базальтовой фибры 0%). Однако прочность на сжатие снижается по мере увеличения содержания фибр, и снижение прочности становится тем более выраженным, чем выше содержания фибр. Наименьшую прочность показывают при содержании базальтовой фибры (0,20 %), что на 8,08 и 5,15 % меньше, чем у контрольного бетона через 28 и 90 сут. соответственно. Трехмерные беспорядочно распределенные пучки базальтовой фибры, плотно связанные при подходящем содержании волокон, ограничивают поперечную деформацию при сжатии [29]. В соответствии с теорией расстояния между волокнами часть нагрузки также приходится на фибру при нагружении бетона, потому что напряжение распространяется вдоль поверхности заполнителя, прежде чем перейти к положению фибры. Общая площадь поверхности фибр значительно возрастает, когда доля волокна находится в более высоком

соотношении. В результате для покрытия фибр требуется больше цементных паст, что влияет на то, насколько хорошо цементные составляющие и заполнители сцепляются друг с другом. Кроме того, высокое содержание волокон напрямую уменьшает средний интервал между фибрами в матрице, что приводит к снижению прочности. В табл.1.2-1.4 приведены сводные данные о прочностных характеристиках бетона с добавкой базальтовой фибры [25].

Вид разрушения кубов при испытании на сжатие показан на рис.1.3. Образование значительных трещин по всей их длине привело к обрушению кубического образца из простого бетона. Напротив, добавление базальтовой фибры в бетон не удалось из-за образования небольших тонких трещин на их поверхности. Это демонстрирует, насколько хорошо базальтовая фибра и бетонная матрица сцепляются друг с другом. Аналогичные результаты были получены в работе [30]. Количество базальтовой фибры и дисперсионные волокна влияют на прочность бетона. На рис.1.3 показан режим разрушения обычного бетона. Согласно результатам исследования [25], трещина в образце из гладкого бетона начала формироваться в месте наклонного положения и продолжала расти, пока окончательно не разрушилась. Добавление базальтовой фибры продемонстрировало, что значение прочности на сжатие сначала немного увеличилось, но впоследствии упало с увеличением процентного содержания волокон.

Таблица 1.2. Сведения прочностных характеристик бетона с базальтовой фиброй

Ссылка	[27]	[31]	[32]	[33]	[34]
Содержание базальтовой фибры, %	до 1,3	до 4,6	до 1,0	до 0,5	до 3,0
Длина фибры, мм	20	36	24	12	6
Содержание фибры, %	1,25	0,31	0,50	0,10	1,0
Срок твердения, сут.	7 28	28	7 28	7 28 90	7 28
Прочность при сжатии, %	13,7 16,1	5,2	20,6 31,5	8,0 4,6 0,0	33,0 6,0
Прочность при изгибе, %	-	25	- 44,1	14,6 8,0 1,2	-

Таблица 1.3. Сведения прочностных характеристик бетона с базальтовой фиброй

Ссылка	[20]	[30]	[35]	[36]	[37]
Содержание базальтовой фибры, %	до 3,0	до 0,2	до 2,0	до 2,0	до 0,3
Длина фибры, мм	25	12	18	18	-

Содержание фибры, %	2,0	0,2	1,5	5,0	0,2
Срок твердения, сут.	28	28	28	7 28 90	28
Прочность при сжатии, %	3,1	7,21	15 29	10,47 9,8 17,13	7,5
Прочность при изгибе, %	-	15,3	-	-	29,0

Таблица 1.4. Сведения прочностных характеристик бетона с базальтовой фиброй

Ссылка	[38]	[26]	[21]	[22]	[39]	[23]
Содерж. баз. фибры, %	до 1,5	до 1,5	до 1,0	до 2,0	до 0,6	до 2,0
Длина фибры, мм	45	18	-	12	18	12
Содержание фибры, %	0,5	1,0	0,25	2,0	0,36	1,5
Срок твердения, сут.	28	28	28	28 56	28	28
Прочность при сжатии, %	5,1	4,2	9,7	4,3 1,8	8,16	7,7
Прочность при изгибе, %	8,4	33,4	-	37,7 26,9	22,36	39,6

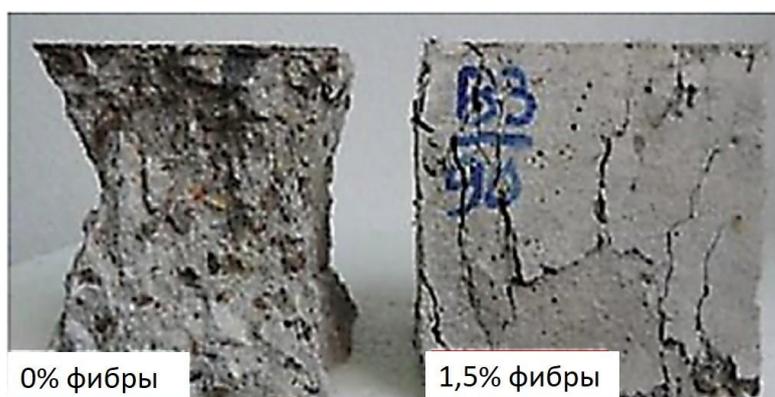


Рис.1.3. Разрушения бетонного образца при сжатии без (0%) и с содержанием (1,5%) базальтовой фибры [35]

Эта схема продолжалась до тех пор, пока базальтовые фибры не были удалены. Когда процент базальтовой фибры составлял 0,1 %, ширина трещины уменьшалась, но длина оставалась прежней. Однако длина не уменьшилась. Как ширина, так и длина трещины уменьшились, когда содержание базальтовой фибры достигло 0,2 %, и в этот момент на поверхности образца бетона было видно много трещин. Однако влияние армирования на сжимающую способность не было очевидным, так как было использовано лишь небольшое количество [37].

Рис.1.4 иллюстрирует многомасштабную функцию, в котором какую роль играет базальтовая фибра в распространении трещины как на макро-, так и на микроуровне. Роль базальтовой породы указывает на механизме упрочнения и устойчивости к растрескиванию бетона. Тщательно изучив поврежденный образец, мы смогли установить, что он имел достаточный уровень целостности, о чем свидетельствует способность образца разрушаться под действием внешней силы. Образец также включал несколько извилистых трещин. Кроме того, поверхность излома бетона ВФ изогнута, а не прямая, что указывает на то, что фибра оказывает явное влияние на предотвращение образования трещин [25, 35].

На рис.1.5 показан предел прочности при растяжении бетона с добавкой базальтовой фибры. Можно заметить, что добавление базальтовой фибры увеличило прочность растяжения бетона. Согласно результатам исследования [38], содержание базальтовой фибры от 0 до 2 % по объему не влияли на прочность при сжатии, но повышали прочность при растяжении.

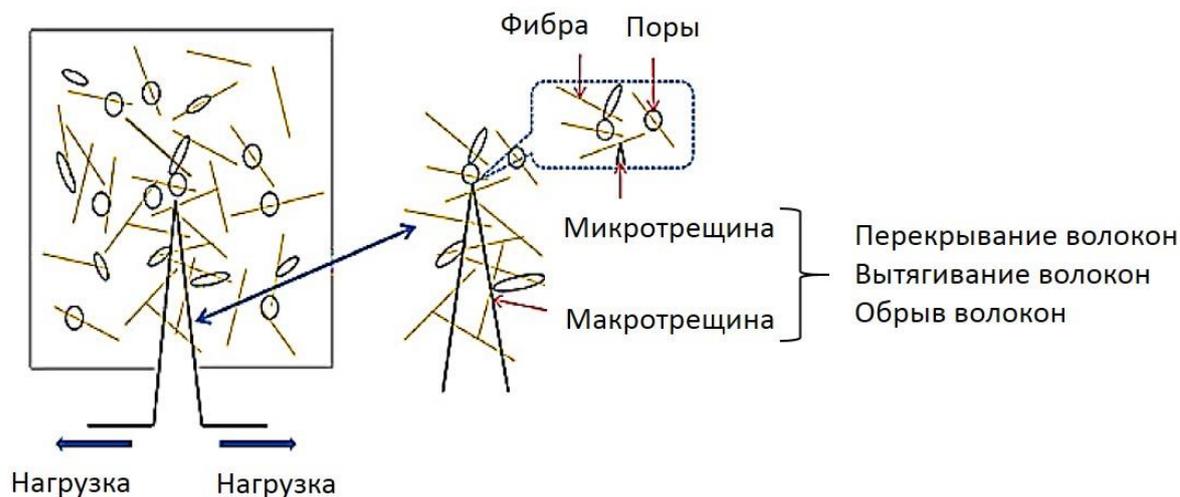


Рис.1.4. Роль базальтовой фибры в распространении трещины на макро- и микроуровне

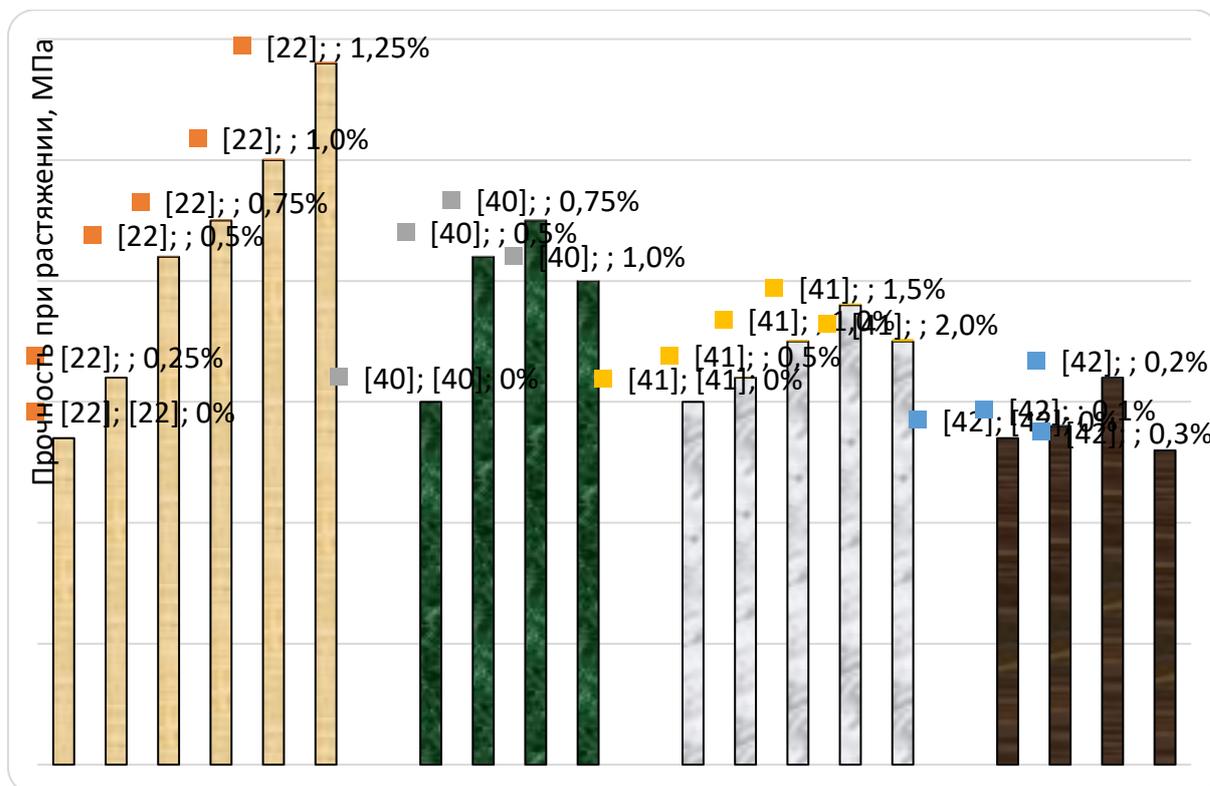


Рис.1.5. Прочность при растяжении бетона с использованием базальтовой фибры (источники [22, 40, 41, 42])

Заключение. На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

- увеличение доли базальтовой фибры приводит к увеличению прочности при растяжении бетона;
- по сравнению с обычной бетонной смесью бетонная смесь с базальтовой фиброй (1,5%) увеличивает прочность при растяжении на 22,58%;
- по сравнению с эталонным бетоном прочность при растяжении бетонных смесей с содержанием базальтовой фибры 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0% улучшает на 9,6; 12,9; 22,58 и 16,12% соответственно;
- добавление базальтовой фибры делает самоуплотняющийся бетон менее удобоукладываемым;
- базальтовые фибры обладают отличными механическими и физическими характеристиками, в том числе высокой коррозионной стойкостью, отличной термостойкостью, устойчивостью к щелочам и кислотам;
- очень важно оптимальное содержание базальтовой фибры, так как большое его количество неблагоприятно влияет на прочностные свойства бетона;
- оптимальный диапазон идеального количества базальтовой фибры колеблется от 0,5 до 1,5%.

- по сравнению с обычной бетонной матрицей максимальное улучшение прочности на сжатие достигло 4,45% при объемной доле фибры в бетоне, равной 1,5%;

- для покрытия фибр требуется больше цементных паст, что влияет на то, насколько хорошо цементные составляющие и заполнители сцепляются друг с другом;

- базальтовые волокна продемонстрировали лучший прирост прочности бетона при той же объемной доле по сравнению с полипропиленовым волокном.

Литературный анализ также указывает и на пробелы в области потенциальных исследований, которые необходимо изучить, прежде чем начать использовать базальтовые фибры в строительной отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lam, N.N.; Van Hung, L. Mechanical and Shrinkage Behavior of Basalt Fiber Reinforced Ultra-High-Performance Concrete. *GEOMATE J.* 2021, 20, 28–35.

2. Thanushan, K.; Yogananth, Y.; Sangeeth, P.; Coonghe, J.G.; Sathiparan, N. Strength and Durability Characteristics of Coconut Fibre Reinforced Earth Cement Blocks. *J. Nat. Fibers* 2021, 18, 773–788.

3. Ahmad, J.; Majdi, A.; Al-Fakih, A.; Deifalla, A.F.; Althoey, F.; El Ouni, M.H.; El-Shorbagy, M.A. Mechanical and Durability Performance of Coconut Fiber Reinforced Concrete: A State-of-the-Art Review. *Materials* 2022, 15, 3601.

4. Yin, S.; Yu, Y.; Na, M. Flexural Properties of Load-Holding Reinforced Concrete Beams Strengthened with Textile-Reinforced Concrete under a Chloride Dry–Wet Cycle. *J. Eng. Fiber. Fabr.* 2019, 14, 1558925019845902.

5. Divyah, N.; Thenmozhi, R.; Neelamegam, M.; Prakash, R. Characterization and Behavior of Basalt Fiber-reinforced Lightweight Concrete. *Struct. Concr.* 2021, 22, 422–430.

6. Sundaresan, S.; Ramamurthy, V.; Meyappan, N. Improving Mechanical and Durability Properties of Hypo Sludge Concrete with Basalt Fibres and SBR Latex. *Adv. Concr. Constr.* 2021, 12, 327–337.

7. Ahmad, J.; Manan, A.; Ali, A.; Khan, M.W.; Asim, M.; Zaid, O. A Study on Mechanical and Durability Aspects of Concrete Modified with Steel Fibers (SFs). *Civ. Eng. Archit.* 2020, 8, 814–823.

8. Ahmad, J.; González-Lezcano, R.A.; Majdi, A.; Ben Kahla, N.; Deifalla, A.F.; El-Shorbagy, M.A. Glass Fibers Reinforced Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis. *Materials* 2022, 15, 5111.

9. Yin, S.; Tuladhar, R.; Shi, F.; Combe, M.; Collister, T.; Sivakugan, N. Use of Macro Plastic Fibres in Concrete: A Review. *Constr. Build. Mater.* 2015, 93, 180–188.

10. AL-Kharabsheh, B.N.; Arbili, M.M.; Majdi, A.; Alogla, S.M.; Hakamy, A.; Ahmad, J.; Deifalla, A.F. Basalt Fibers Reinforced Concrete: Strength and Failure Modes. *Materials* 2022, 15, 7350. [https:// doi.org/10.3390/ma15207350](https://doi.org/10.3390/ma15207350)
11. Katkhuda, H.; Shatarat, N. Improving the Mechanical Properties of Recycled Concrete Aggregate Using Chopped Basalt Fibers and Acid Treatment. *Constr. Build. Mater.* 2017, 140, 328–335.
12. Dilbas, H.; Çakır, Ö. Influence of Basalt Fiber on Physical and Mechanical Properties of Treated Recycled Aggregate Concrete. *Constr. Build. Mater.* 2020, 254, 119216.
13. Du, Q.; Cai, C.; Lv, J.; Wu, J.; Pan, T.; Zhou, J. Experimental Investigation on the Mechanical Properties and Microstructure of Basalt Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composite. *Materials* 2020, 13, 3796.
14. Loh, Z.P.; Mo, K.H.; Tan, C.G.; Yeo, S.H. Mechanical Characteristics and Flexural Behaviour of Fibre-Reinforced Cementitious Composite Containing PVA and Basalt Fibres. *Sādhanā* 2019, 44, 98.
15. Qin, J.; Qian, J.; Li, Z.; You, C.; Dai, X.; Yue, Y.; Fan, Y. Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Magnesium Phosphate Cement Composites. *Constr. Build. Mater.* 2018, 188, 946–955.
16. Khan, M.; Ali, M. Use of Glass and Nylon Fibers in Concrete for Controlling Early Age Micro Cracking in Bridge Decks. *Constr. Build. Mater.* 2016, 125, 800–808.
17. Palme, J. Investigation of the Addition of Basalt Fibres into Cement. Master's Thesis, Western Kentucky University, Bowling Green, KY, USA, 2014.
18. Williamson, G.R. The Effect of Steel Fibers on the Compressive Strength of Concrete. *Spec. Publ.* 1974, 44, 195–208.
19. Sundaresan, S.; Ramamurthy, V.; Meyappan, N. Improving Mechanical and Durability Properties of Hypo Sludge Concrete with Basalt Fibres and SBR Latex. *Adv. Concr. Constr.* 2021, 12, 327–337.
20. Ayub, T.; Shafiq, N.; Nuruddin, M.F. Mechanical Properties of High-Performance Concrete Reinforced with Basalt Fibers. *Procedia Eng.* 2014, 77, 131–139.
21. Dilbas, H.; Çakır, Ö. Influence of Basalt Fiber on Physical and Mechanical Properties of Treated Recycled Aggregate Concrete. *Constr. Build. Mater.* 2020, 254, 119216.
22. Du, Q.; Cai, C.; Lv, J.; Wu, J.; Pan, T.; Zhou, J. Experimental Investigation on the Mechanical Properties and Microstructure of Basalt Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composite. *Materials* 2020, 13, 3796.
23. Loh, Z.P.; Mo, K.H.; Tan, C.G.; Yeo, S.H. Mechanical Characteristics and Flexural Behaviour of Fibre-Reinforced Cementitious Composite Containing PVA and Basalt Fibres. *Sādhanā* 2019, 44, 98.
24. Elgabbas, F.; Ahmed, E.A.; Benmokrane, B. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Ribbed Basalt-FRP Bars under Static Loads. *J. Compos. Constr.* 2017.

25. Buthainah Nawaf AL-Kharabsheh 1 , Mohamed Moafak Arbili 2 , Ali Majdi 3 , Saleh M. Alogla 4 , A. Hakamy 5 , Jawad Ahmad 6,* and Ahmed Farouk Deifalla 7,* Basalt Fibers Reinforced Concrete: Strength and Failure Modes
26. Katkhuda, H.; Shatarat, N. Improving the Mechanical Properties of Recycled Concrete Aggregate Using Chopped Basalt Fibers and Acid Treatment. *Constr. Build. Mater.* 2017, 140, 328–335.
27. Qin, J.; Qian, J.; Li, Z.; You, C.; Dai, X.; Yue, Y.; Fan, Y. Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Magnesium Phosphate Cement Composites. *Constr. Build. Mater.* 2018, 188, 946–955.
28. Dias, D.P.; Thaumaturgo, C. Fracture Toughness of Geopolymeric Concretes Reinforced with Basalt Fibers. *Cem. Concr. Compos.* 2005, 27, 49–54.
29. Divyah, N.; Thenmozhi, R.; Neelamegam, M.; Prakash, R. Characterization and Behavior of Basalt Fiber-reinforced Lightweight Concrete. *Struct. Concr.* 2021, 22, 422–430.
30. Wang, D.; Ju, Y.; Shen, H.; Xu, L. Mechanical Properties of High Performance Concrete Reinforced with Basalt Fiber and Polypropylene Fiber. *Constr. Build. Mater.* 2019, 197, 464–473.
31. Branston, J.; Booya, E.; Gorospe, K.; Adesina, A.; Das, S.; Lawn, D. Microstructure and Mechanical Properties of Basalt Fibre Reinforced Concrete. In *Proceedings of the 17th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, Toronto, ON, Canada, 20–23 May 2019; pp. 121–127.
32. Kirthika, S.K.; Singh, S.K. Experimental Investigations on Basalt Fibre-Reinforced Concrete. *J. Inst. Eng. Ser. A* 2018, 99, 661–670.
33. Jiang, C.; Fan, K.; Wu, F.; Chen, D. Experimental Study on the Mechanical Properties and Microstructure of Chopped Basalt Fibre Reinforced Concrete. *Mater. Des.* 2014, 58, 187–193.
34. Meyyappan, P.L.; Carmichael, M.J. Studies on Strength Properties of Basalt Fibre Reinforced Concrete. *Mater. Today Proc.* 2021, 43, 2105–2108.
35. Ramesh, B.; Eswari, S. Mechanical Behaviour of Basalt Fibre Reinforced Concrete: An Experimental Study. *Mater. Today Proc.* 2021, 43, 2317–2322.
36. Niu, D.; Su, L.; Luo, Y.; Huang, D.; Luo, D. Experimental Study on Mechanical Properties and Durability of Basalt Fiber Reinforced Coral Aggregate Concrete. *Constr. Build. Mater.* 2020, 237, 117628.
37. Jia, M.; Xie, W.; Yu, K.; Qian, K. A Comparative Study of the Mechanical Properties of Basalt Fiber and Basalt Grille Reinforced Concrete Composites and Theoretical Prediction. *J. Nat. Fibers* 2021, 1–18.
38. Alnahhal, W.; Aljidda, O. Flexural Behavior of Basalt Fiber Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Coarse Aggregates. *Constr. Build. Mater.* 2018, 165–178.

39. Dong, J.Q. Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced Concrete at Low Cycle Impact. *Appl. Mech. Mater.* 2012, 174, 1524–1527.
40. Ramesh, B.; Eswari, S. Mechanical Behaviour of Basalt Fibre Reinforced Concrete: An Experimental Study. *Mater. Today Proc.* 2021, 43, 2317–2322.
41. Kirthika, S.K.; Singh, S.K. Experimental Investigations on Basalt Fibre-Reinforced Concrete. *J. Inst. Eng. Ser. A* 2018, 99, 661–670.
42. Jia, M.; Xie, W.; Yu, K.; Qian, K. A Comparative Study of the Mechanical Properties of Basalt Fiber and Basalt Grille Reinforced Concrete Composites and Theoretical Prediction. *J. Nat. Fibers* 2021, 1–18.