



Dr.-Ing.

Viktor Mechtcherine

Institutsdirektor

Marko. Butler

Arbeitsgruppenleiter Baustofftechnik

Bearbeiter: Dr.-Ing. Marko Butler

Telefon: 0351 4731 356

Telefax: 0351 471 51 69

E-Mail: Marko.Butler@tu-dresden.de

AZ: 5.5.1-16/2009

Отчет по испытанию материалов с базальтовыми волокнами – серия 1 А: Основные свойства цементных систем с тремя типами базальтовых волокон и двумя типами щелочестойкого стекловолокна, длиной 6 мм.

1. Цель экспериментального исследования

В серии 1А были исследованы основные механические свойства цементных систем с тремя типами базальтовых волокон и, для сравнения, система без волокон и две системы с двумя типами щелочестойкого стекловолокна. Проводились следующие испытания:

- трех-точечный изгиб,
- осевое сжатие.

Выдержка образцов до испытания составляла 14 дней. Длина рубленого базальтового волокна составляла 6,4 мм. Объемное содержание волокна в замесе выбиралось на основании результатов испытаний серии 0.

Для сравнения были взяты два типа щелочестойкого стекловолокна (AR-стекла). Объемное содержание AR-стекла было взято таким же как для базальтового волокна.

2. Используемые волокна

В Табл.1 приведено описание базальтовых волокон и волокон AR-стекла, использованных в работе. Базальтовое волокно произведено компанией Каменный Век. AR-стекло произведено компанией Owens Corning.

Табл.1 Характеристика базальтовых волокон и AR-стекловолокон.

Полное название	Сокращение	Диаметр, мкм	Длина рубки, мм	Замасливател
Базальтовое волокно BCS 17-1/4"(6.4)-KV05/1	KV05/1-6.4	17	6.4	Гидрофильный/легко диспергируемый
BCS 13-1/4"(6.4)-B1.5	B1.5-6.4	13	6.4	Гидрофильный/медленно диспергируемый
BCS 17-1/4"(6.4)-KV12	KV12-6.4	17	6.4	Гидрофобный
AR-стекло SEMFIL 70/30	CF70-6	16	6.0	Зам-тель неизвестен, легко диспергируемый
SEMFIL 62/2	CF62-6	18	6.0	Зам-тель неизвестен, почти не диспергируемый

3. Состав цементной матрицы

Цементная матрица, использованная в механических тестах, была та же, что использовалась в серии 0. Эта матрица имеет высокую концентрацию связующего и максимальный размер частиц 1мм. Связующее состоит из цемента марки СЕМ III/B, золы и микросилики (аморфного кремнезема). Количество рубленого базальтового волокна определялось исходя из тестов серии 0 и составляло 0.8 %(об.) для KV05/1, 1.2%(об.) для B1.5 и 0.8%(об.) для KV12. Плотность волокна взята примерно 3 г/см³ для всех типов.

Количество AR-стекловолокон CF70-6 и CF62-6 было выбрано исходя из максимального объемного содержания базальтовых волокон и составляло 1,2% (об.). Плотность AR-стекловолокон равна 2,7 г/см³. Выбранное объемное содержание AR-стекла не является максимальным. В случае волокна CF70-6 объемное содержание может быть повышено до 1,5%. Для волокна CF62-6 максимальное объемное содержание равно 1,8%.

В качестве пластификатора использовался Glenium ACE 30 (от BASF) для контроля вязкости системы. Количество волокна и пластификатора не учитывалось в объемных расчетах. В Табл.2 приведены составы исследованных композиций.

Табл.2 Состав исследованных цементных систем (кг/м³)

Компонент	М-KV05/1	М-B1.5	М-KV12	М-без вол.	М-CF70	М-CF62
цемент СЕМ III/B	539.4	539.4	539.4	539.4	539.4	539.4
зола	242.7	242.7	242.7	242.7	242.7	242.7
Суспензия	53.9	53.9	53.9	53.9	53.9	53.9

микросилики						
Песок 0/1 мм	1078.7	1078.7	1078.7	1078.7	1078.7	1078.7
Вода	242.7	242.7	242.7	242.7	242.7	242.7
Glenium ACE 30	8.1	4.2	5.6	2.6	4.7	3.9
KB05/1-6.4	24.0	-	-	-	-	-
B1.5-6.4	-	36.0	-	-	-	-
KB12-6.4	-	-	24.0	-	-	-
CF 70-6	-	-	-	-	32.0	-
CF 62-6	-	-	-	-	-	32.0

4. Изготовление образцов, твердение и условия испытания

Объем матрицы для каждого испытания был 4,5 л. Для замеса использовался лабораторный миксер производства компании Hobart (Рис.1, Рис.2). Миксер предлагает 3 различных скорости замеса, обозначаемых как I, II и III. Скорость I соответствует 120 об./мин., II – 200 об./мин, III – 380 об./мин. Процедура смешения была следующая:

- Смешение цемента и золы, скорость I, в течение 10 сек
- Добавление воды, скорость I, 30 сек
- Добавление микросилики, скорость I, 60 сек
- Добавление песка, скорость I, 30 сек
- Добавление пластификатора, скорость II, 60 сек
- Добавление волокна, скорость I, 10 сек
- После гомогенизации волокна замес на скорости III в течение 15 сек.

Сразу после замеса определяли "оседание" раствора по DIN EN 1015-3. Краткое описание процедуры приведено в отчете по серии 0. Затем цементные системы заливались в формы. С одного замеса получали 3 образца на изгиб (призмы 160x40x40 мм, см. Рис.3). Образцы на изгиб использовались также для испытания на сжатие. После заполнения, формы отправлялись на виброусадку в течение 30 сек с частотой вибрации 50Гц. Дополнительно производился замер захваченного воздуха по DIN EN 12350 – T7. Форма для определения воздуха проходила виброусадку по тому же режиму.

Образцы вынимались из форм через день после замеса и помещались на выдержку в воде при 20°C. Через 7 дней образцы вынимались из воды и помещались на хранение на воздухе при отн. влажности 65% до достижения возраста образцов 14 дней.

Как для базальтового волокна, так и для AR-стекловолокна было получено по 6 образцов на изгиб по каждому типу волокна.



Рис.1 Лабораторный смеситель от компании Hobart



Рис.2 Миксер и емкость смесителя Hobart

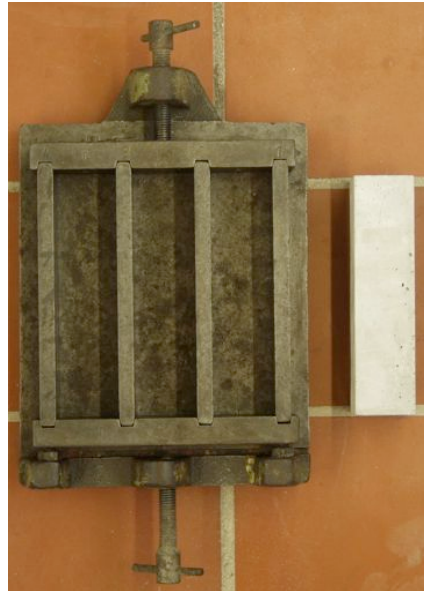


Рис.3 Форма и образец для испытаний на изгиб и сжатие

5. Оборудование для механических испытаний

5.1 Испытание на изгиб

Испытание на изгиб проводилось по трех-точечной схеме. Расстояние между опорами 100 мм. Точка приложения нагрузки посередине между опорами образца. Скорость испытания – 0,5 мм/мин. Контроль деформации производился по перемещению нижней поверхности образца. Измеряющий элемент находился в контакте с нижней поверхностью образца в его серединной части. При испытании записывались нагрузка, перемещение траверсы и прогиб серединной части образца. Записываемый прогиб образца содержит только упругую деформацию измеряющего элемента, сделанного из стали, и поэтому непосредственно отражает деформацию образца. Для исключения нелинейной деформации механических частей машины проводилось аппроксимационное сглаживание.

5.2 Испытание на сжатие

Для испытания на сжатие использовались половинки образцов, испытанных на изгиб. Испытания проводились согласно DIN 18555-T3. При испытании не было непрерывной записи нагрузки и перемещения, фиксировалась только максимальная предельная нагрузка разрушения.

6. Результаты испытания цементных систем с базальтовым волокном и системы без волокна

6.1 Свойства замесов, плотность затвердевших систем

В Табл.3 приведены значения параметров "оседания" раствора, плотности затвердевших растворов и величина захваченного воздуха. На Рис.4-7 показаны "осевшие" образцы по каждому типу материала.

Табл.3 Величина "оседания" раствора, плотность затвердевших растворов и количество захваченного воздуха.

	М-КВ05/1	М-Б1.5	М-КВ12	М-без вол.
Величина "оседания", мм				
Тест 1	154	176	162	182
Тест 2	157	174	158	179
<i>Среднее</i>	<i>156</i>	<i>175</i>	<i>160</i>	<i>181</i>
Пористость, % (объемн.)				
Тест 1	12,5	13,6	9,1	4,4
Плотность затверд. растворов, г/см³				
Среднее значение	1,96	1,94	2,03	2,17
Стандартное отклонение	0,017	0,016	0,015	0,011

В случае М-КВ05/1 и М-КВ12 "оседание" было близко к максимальному. Дальнейшее добавление пластификатора приводит к т.н. "истечению" раствора, когда происходит фазовое разделение частиц разного размера в результате избыточной пластификации. В случае Б1.5 возможно использование большего количества волокна для получения величины "оседания" в районе 150-160 мм.



Рис.4 Тест на "оседание" системы с КВ05/1



Рис.5 Тест на "оседание" системы с Б1.5



Рис.6 Тест на "оседание" системы с KV12



Рис.7 Тест на "оседание" системы без волокна

Количество захваченного воздуха оказалось очень высокое, по сравнению со стандартными бетонными системами и по сравнению с референтной системой без волокна. В результате плотность затвердевших растворов, содержащих базальтовое волокно, было относительно низким, - приблизительно $1,9 \text{ г/см}^3$.

6.2 Испытание на изгиб

Результаты испытания приведены на Рис. 8-11. В Табл.4 приведены значения прочности при изгибе и предельной деформации по каждому типу образцов.

Из результатов видно, что все системы с базальтовым волокном показали более высокие значения прочности при изгибе, по сравнению с системой без волокна. Наиболее высокая прочность получена для системы М-В1.5, чуть ниже значения у систем М-KV12 и М-KV05/1.

Контроль деформации образца позволяет увидеть пластичное разрушение материала после возникновения трещины. Форма кривых после возникновения трещины различна: М-KV05/1 и М-В1.5 имеют "острый" пик в районе возникновения трещины, тогда как М-В1.5 имеет более пологую вершину кривой. В последнем случае это говорит о предпочтительном частичном отслоении волокна или о выколзании волокна из матрицы при раскрытии и распространении трещины. Это одна из причин большой величины энергии разрушения системы М-В1.5. Другая причина, - это высокая прочность М-В1.5.

Для все систем было отмечено формирование только одной трещины в срединной части образцов.

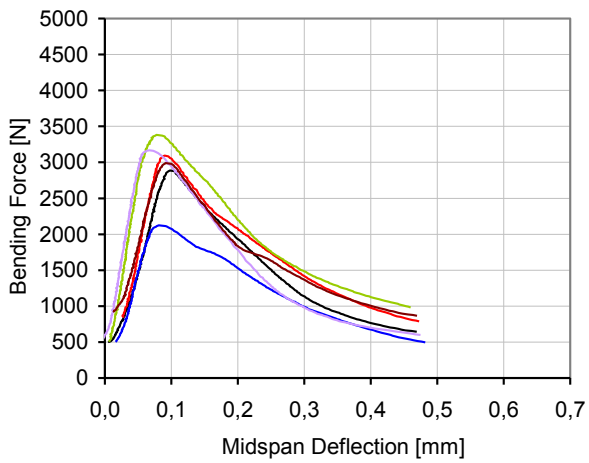


Рис.8 Диаграммы изгиба образцов с KV05/1

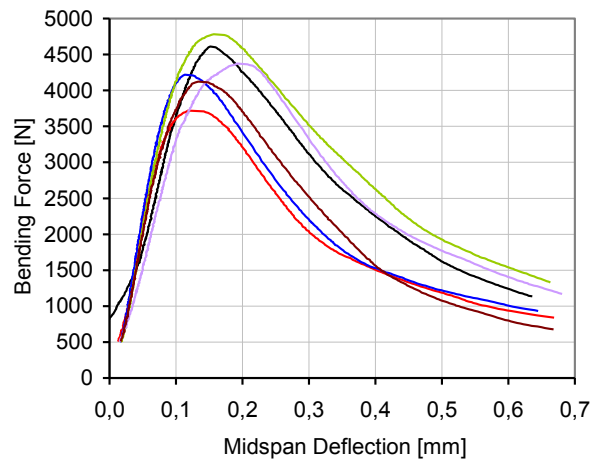


Рис.9 Диаграммы изгиба образцов с Б1.5

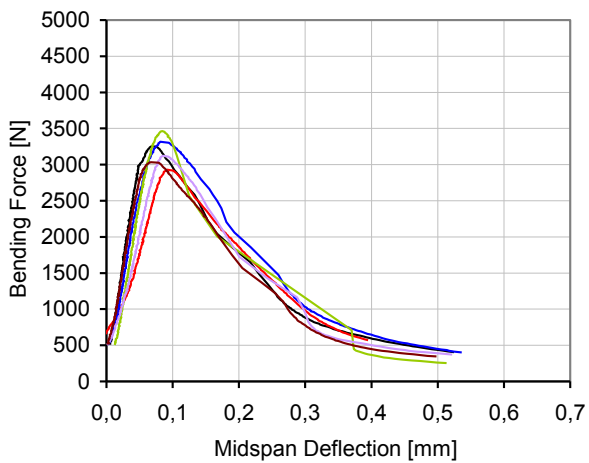


Рис.10 Диаграммы изгиба образцов с KV12

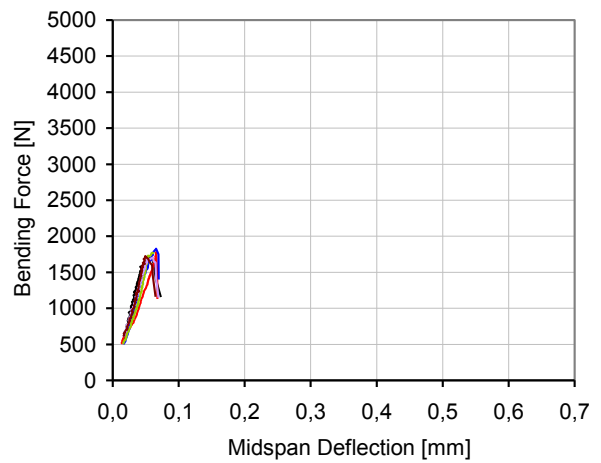


Рис.11 Диаграммы изгиба образцов без волокна

Табл.4 Прочность при изгибе (МПа) и предельный прогиб образца (мм)

	М-КВ05/1	М-Б1.5	М-КВ12	М-без вол.
Прочность				
Образец 1	6,5	10,4	7,0	3,9
Образец 2	4,8	8,2	6,3	4,0
Образец 3	7,0	9,3	7,5	4,2
Образец 4	7,5	10,7	7,8	4,1
Образец 5	7,1	9,8	6,8	4,0
Образец 6	6,6	9,2	6,9	4,1
<i>Среднее</i>	6,6	9,6	7,1	4,0
<i>Станд.отклон</i>	0,95	0,91	0,53	0,10
Предельный прогиб				
Образец 1	0,098	0,152	0,068	0,055
Образец 2	0,081	0,118	0,092	0,066
Образец 3	0,090	0,113	0,081	0,066
Образец 4	0,077	0,157	0,084	0,060
Образец 5	0,067	0,192	0,085	0,061
Образец 6	0,091	0,134	0,067	0,049
<i>Среднее</i>	0,084	0,144	0,080	0,059
<i>Станд.отклон</i>	0,011	0,029	0,010	0,006

6.3 Испытание на сжатие

Результаты испытаний на сжатие представлены в Табл.5. Разброс результатов небольшой. Образцы с КВ05/1 и КВ12 показали более высокую прочность, чем референтные образцы без волокна. Прочность образцов с Б1.5 была такая же как у референтных образцов.

Табл.5 Прочность на сжатие (МПа)

	М-КВ05/1	М-Б1.5	М-КВ12	М-без вол.
Образец 1А ¹⁾	46,9	36,9	44,4	40,6
Образец 1Б ¹⁾	49,4	35,0	43,8	40,0
Образец 2А	48,8	38,1	42,5	38,8
Образец 2Б	46,3	39,4	45,6	38,1
Образец 3А	45,6	35,6	42,5	40,0
Образец 3Б	46,9	37,5	44,4	38,8
Образец 4А	48,1	36,3	45,0	38,1
Образец 4Б	45,6	35,6	47,5	35,6
Образец 5А	45,0	36,9	46,3	35,0
Образец 5Б	46,3	38,8	42,5	40,6
Образец 6А	48,8	38,1	45,0	41,3
Образец 6Б	45,0	36,3	47,5	41,3
<i>Среднее</i>	<i>46,9</i>	<i>37,0</i>	<i>44,8</i>	<i>39,0</i>
<i>Станд.отклон</i>	<i>1,54</i>	<i>1,37</i>	<i>1,78</i>	<i>2,07</i>

¹⁾ – А и Б – обозначения двух половинок образца на изгиб

7. Результаты испытания цементных систем на основе AR-стекловолокна

7.1 Свойства цементных растворов, плотность затвердевших растворов

Значения "оседания" цементов и плотность затвердевших растворов на основе AR-стекловолокна приведены в Табл.6.

Величина "оседания" была не максимальной. Более высокое содержание пластификатора возможно для достижения более мягкой консистенции, или добавление одновременно некоторого количества волокна и пластификатора для достижения нужного значения "оседания". Количество AR-стекловолокна CF70-6 и CF62-6 было выбрано исходя из максимального объемного содержания базальтовых волокон и составляло 1,2% (об.).

Табл.6 Величина "оседания" раствора, плотность затвердевших растворов для систем с AR-стекловолокном.

	М-CF70	М-CF62
Величина "оседания", мм		
Тест 1	171	178
Тест 2	167	181
<i>Среднее</i>	<i>169</i>	<i>180</i>
Плотность затверд. растворов, г/см³		
Среднее значение	1,81	2,01
Стандартное отклонение	0,014	0,007

7.2 Испытания на изгиб

Диаграммы испытания приведены на Рис.12 и 13. В Табл.7 приведены значения прочности и предельной деформации.

Системы с AR-стекловолокном показали довольно высокие разбросы значений, несмотря на хорошую перерабатываемость растворов (величина "оседания" 170 и 180 мм, см. Табл. 6). Исследованные системы показывают различное поведение в зоне пластичного разрушения после возникновения трещины. В случае М-CF70 дисперсные волокна показывают незначительное смягчение кривой после возникновения трещины (см. Рис. 12). Интегральные (склеенные) чопы в системе М-CF62 позволяют нагрузки возрастать даже после возникновения трещины (см. Рис. 13). В результате, прочность при изгибе системы М-CF62 оказывается заметно больше. Благодаря специфическому поведению волокон CF62 в связи со стягиванием стенок трещины, интегральные AR-стекловолокна показывают наиболее высокую энергию разрушения цементных систем.

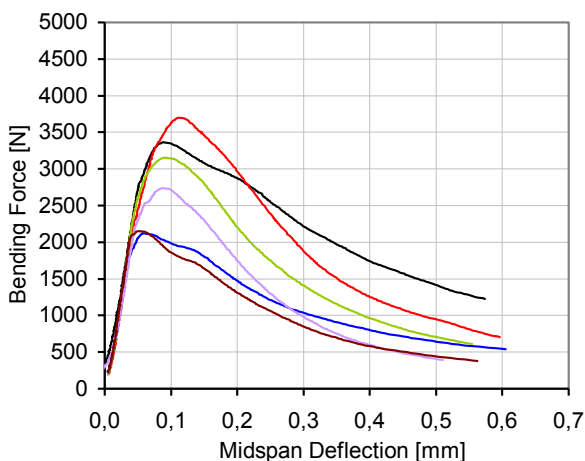


Рис.12 Диаграммы изгиба образцов с CF70

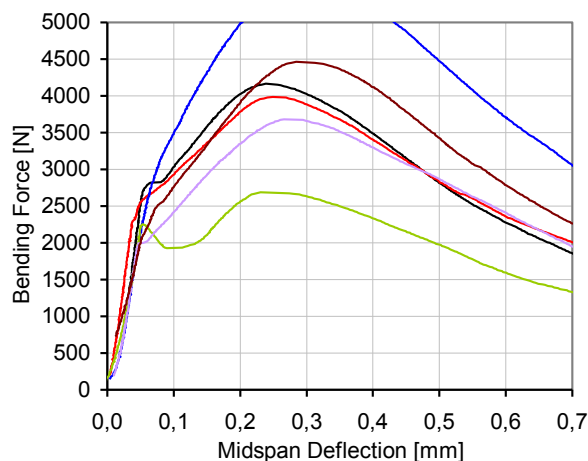


Рис.13 Диаграммы изгиба образцов с CF62

Табл.7 Прочность при изгибе (МПа) и предельный прогиб образца (мм)

	М-CF70	М-CF62
Прочность		
Образец 1	7,9	9,7
Образец 2	8,9	9,4
Образец 3	5,0	12,7
Образец 4	7,4	6,3
Образец 5	6,4	8,6
Образец 6	5,0	10,2
<i>Среднее</i>	<i>6,8</i>	<i>9,5</i>
<i>Станд.отклон</i>	<i>1,59</i>	<i>2,09</i>
Предельный прогиб		
Образец 1	0,087	0,238
Образец 2	0,111	0,249
Образец 3	0,057	0,270
Образец 4	0,089	0,231
Образец 5	0,087	0,266
Образец 6	0,051	0,284
<i>Среднее</i>	<i>0,080</i>	<i>0,256</i>
<i>Станд.отклон</i>	<i>0,022</i>	<i>0,020</i>

7.3 Испытание на сжатие

Результаты испытания на сжатие систем с AR-стекловолокном приведены в Табл.8. Разброс данных небольшой. Система с CF70 показала более низкие значения, чем система с CF62. Средняя прочность на сжатие образцов с AR-стекловолокном оказалась ниже, чем прочность образцов без волокна (см. Табл. 5).

Табл.8 Прочность на сжатие (МПа) – партия 2

	М-CF70	М-CF62
Образец 1А ¹⁾	24,8	35,3
Образец 1Б ¹⁾	31,0	34,0
Образец 2А	31,0	34,4
Образец 2Б	31,8	36,3
Образец 3А	30,0	38,0
Образец 3Б	29,4	38,0
Образец 4А	29,0	35,6
Образец 4Б	29,7	35,6
Образец 5А	30,0	35,4
Образец 5Б	30,6	34,8
Образец 6А	29,8	35,0
Образец 6Б	29,8	35,6
<i>Среднее</i>	<i>29,8</i>	<i>35,7</i>
<i>Станд.отклон</i>	<i>1,75</i>	<i>1,25</i>

¹⁾ – А и Б – обозначения двух половинок образца на изгиб

8. Общие комментарии

Все механические испытания проедены на системах возрастом 14 дней. Использованный состав связующего имеет довольно медленную скорость отверждения. Это вызвано применением цемента марки СЕМ III, в котором используется измельченный шлак доменных печей и который снижает скорость гидратации цемента. Продолжение гидратации повлияет на морфологию границы раздела между волокном и цементом. При более зрелом возрасте цементных систем можно ожидать повышение прочности и более хрупкое поведение материалов после трещины. Помимо этого, щелочестойкость волокна и влияние замасливателя также могут сказаться при более длительной выдержке цементной системы и изменить картину, полученную для 14 дней выдержки.

Table 9: Сравнение результатов по клееным (интегральным) волокнам.

	М-CF62	М-B1.5	Разница
Прочность при изгибе, МПа	9.5	9.6	+1%
Ст.откл., МПа	2.09	0.91	
Прочность при сжатии, МПа	35.7	37.0	+4%
Ст.откл., МПа	1.25	1.37	

Table 10: Сравнение результатов по хорошо диспергируемым волокнам.

	М-CF70	М-KV05	Разница	М-KV12	Разница
Прочность при изгибе, МПа	6.8	6.6	-3%	7.1	+4%
Ст.откл., МПа	1.6	0.95		0.53	
Прочность при сжатии, МПа	29.8	46.9	+57%	44.8	+50%
Ст.откл., МПа	1.75	1.54		1.78	

9. Обсуждение результатов

В целом, как волокно Cem-FIL, так и Basfiber показали ожидаемый характер поведения. Существует два основных применения волоконно-армированных бетонов:

1. Повышение механических свойств
2. Предотвращение растрескивания бетона

В первом случае используются клеенные (интегральные) волокна, такие как Cem-FIL 62 или Basfiber B1.5. Результаты испытания этих волокон показывают пластичный характер разрушения бетона при испытании на изгиб и высокие значения энергии деформации.

Второе применение требует использования хорошо диспергируемых волокон, таких как Cem-FIL 70/30 или Basfiber KB05, KB12. Эти волокна так же демонстрируют повышение пластичности бетонов, но в меньшей степени. Они добавляются в замес в меньшем количестве и служат только как вторичный армирующий элемент при наличии первичного армирования, такого как, например, стальная или пластиковая арматура.

Сравнение результатов, полученных для одинаковых типов волокна, приведено в Табл. 9 и Табл. 10. Можно отметить, что результаты испытания базальтовых и AR-стеклянных волокон более-менее идентичны. Наиболее заметное преимущество базальтовых волокон было получено при испытании на сжатие для хорошо диспергируемых волокон (KB05 и KB12). Однако, повышение достаточно высокой прочности на сжатие ненаполненного бетона не является задачей волоконного армирования и, таким образом, не может рассматриваться как важное преимущество.

10. Заключение

На основании проведенного исследования можно заключить, что базальтовые волокна Basfiber могут быть использованы для армирования

бетонов, - клееные (интегральные) волокна Б1.5 в тех же применениях, что волокно Cem-FIL 62 и хорошо диспергируемые волокна KB05 и KB12 в тех же применениях, что волокно Cem-FIL 70.

Конец отчета

Отчет содержит 14 страниц

Подпись редактора

Marko Butler

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marko Butler', with a long horizontal stroke extending to the right.