

Производственная долговечность торкретбетона, укрепленного волокном, в агрессивной среде.

Ж.П. Кауфман

Швейцарский научно-исследовательский институт материаловедения и технологии (EMPA),
Лаборатория по исследованию бетона/строительной химии, Дюбендорф, Швейцария

КРАТКИЙ ОБЗОР: В туннельной и горнодобывающей промышленности распыление бетона устоявшаяся экономическая альтернатива традиционному методу отливки бетона.

Применение армированного бетона позволяет экономить время и финансовые затраты. Как следствие стресса на ранней стадии ввиду пластической усадки или усадки при высыхании могут возникнуть постоянные трещины или трещины, вызванные циклическими нагрузками, что в свою очередь способствует проникновению агрессивных растворов. Волокна, армирующие или служащие перемычкой таким трещинам, могут повредиться и тем самым утратить способность выдерживать растягивающие нагрузки, что может привести к ухудшению механических свойств армированного торкрет бетона. Наблюдается воздействие на механические свойства панелей торкрет бетона, имеющих трещины, при погружении в различные водные растворы: натриевая соль, сульфатный раствор, кислоты и другие условия, которые присутствуют в туннелях. У некоторых типов волокон наблюдается значительное ухудшение несущей способности.

1 ВВЕДЕНИЕ

Армированный торкрет успешно используется при производстве туннельных сводов с начала 70-х (Розе, 1985). В основном используют стальные волокна (Майдл, 1992). Из-за растрескивания при ползучести использование синтетических волокон в подземных выработках считается проблематичным с точки зрения срока службы. С другой стороны, наиболее вероятные большие повреждения торкрет бетона, укрепленного синтетическим макро волокном, были отмечены как благоприятные в некоторых случаях: наземный контроль в шахтах или временные работы (Бернард, 2014). Многие пластиковые волокна на основе полиолефина имеют недостаточные механические свойства в торкрете из-за низкого модуля упругости. Тем не менее, при использовании соответствующих добавок, увеличивающих степень уровня кристаллизации и повышающих уровень растяжения, возможно производить полимерные волокна с улучшенными механическими свойствами. Как следствие стресса на ранней стадии ввиду пластической усадки, или усадки при высыхании могут возникнуть постоянные трещины или

трещины, вызванные циклическими нагрузками, что способствует проникновению агрессивных растворов. Волокна, армирующие или служащие перемычкой для трещин могут повредиться и утратить способность выдерживать растягивающие нагрузки, что приводит к ухудшению механических свойств бетона. Стальные волокна могут привести к коррозии. мало известно о свойствах волокон, особенно пластмассовых, укрепляющих потрескавшийся бетон. Было зафиксировано несколько случаев укрепления потрескавшегося бетона в агрессивной среде.

2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Торкрет был произведен в тестовой камере Хагербах (Швейцария) в соответствующих условиях. При производстве использовалась традиционная торкретная смесь. Использовали бетон (CEM I 42.5N 400 кг/м³, зола 50 кг/м³, песок 0.1 мм: 116 кг/м³, песок 0.4 мм: 958 кг/м³, гравий 4..8 мм: 578 кг/м³, суперпластификатор: Sika viscocrete SC-303 (1.2% цемента),

ускоритель: Sika L53 AF (6% цемента), в/ц e_q § 0.40) предварительно смешивали 2 мин., затем добавили волокна. Были использованы 4 типа полимерных волокон (на основе полиолефина, кроме волокна 2, - на основе "модифицир." полиэстера. В качестве образца изучали также стальное волокно. Технические данные представлены в Таблице 1. Стальное волокно в данном тесте было изготовлено из обычной, неоцинкованное, относительно прочной стали. Волокно 3 было двухкомпонентным.

Механические данные (прочность на растяжение и модуль) не могут быть проверены в рамках этого проекта. Некоторые данные сомнительны (волокно 2: сила представлена не достаточно определенно от 400-800 МПа, тогда как модуль представлен четко 11,3 ГПа). К сожалению, не было применено ни одной унифицированной процедуры тестирования, хотя такие стандарты и существуют в текстильном секторе. Не были доступны данные по прочности в отношении бетонной матрицы, что позволило бы оценить коэффициент использования (прочности волокна) в торкрете.

Содержание волокна для полимерных волокон между 5,4 и 8 кг/м³. Более высокие дозы (в кг/м³, не в объеме - %) были использованы в случае стального волокна, при том, что полимерные волокна (3 и 4), имеют меньшую прочность раунда 0.9 кг/см³.

Таблица 1 Свойства волокна.

	Волокно 1	Волокно 2	Волокно 3	Волокно 4	Волокно 5
Материал	Сталь	Полим.	Полим.	Полим.	Полим.
Крепление	крючки	крючки	нет	нет	нет
Поверхн.	гладк.	структ.	структ.	структ.	гладк.
Прим.	кругл.	плоск.	кругл.	кругл.	плоск.
Длина	35	40	50	54	50
Диаметр	0.55	0.88*)	0.5	0.56	0.59*)
Сила	1345	>400	>625	>550	>620
Модуль	210	>11.3	>11	>7.1	>9.5

Длина/мм, Диаметр/мм, Сила/МПа, Модуль/ГПа

*) эквивалентные диаметры

Таблица 2 Свойства свежего бетона и параметры применения.

	A1	A2	A3	A4	A5
Параметры волокна					
тип	Вол.1	Вол.2	Вол.3	Вол.4	Вол.5
дозировка	35	8	6	6	5.4
Свойства свежего бетона					
Температура	21.2	19.3	20.4	18.4	19.9
Оползание	470	600	510	490	470
Состав воздух	2.3	1.4	4.9	3.9	3.2
в/ц	0.46	0.47	0.45	0.46	0.47

Свежий бетон был доставлен (длит. 5 мин.) к распылительному оборудованию (Meuco suprema), закачан в сопло и распылен. Оприскивание осуществлялось одним и тем же рабочим в аналогичных условиях распыления (воздух и давление насоса). Показатели давления распыления и насоса приведены в Таблице 2. Квадратные панели были изготовлены путем распыления в квадратные кожухи (площадью 600x600 мм²), которые были заполнены в высоту не менее 100 мм. После распыления панели были оставлены в условиях идентичных условиям туннеля (10-15 С) в течение 2 дней, затем извлечены и порезаны до 100 мм высотой.

Тестирование квадратных туннелей было произведено в соответствии с SIA 162/6 (1999) "Тестирование бетона, укрепленного стальным волокном" (подготовка теста Рисунок 1). Груз был расположен в центре квадратной панели. прогиб панели осуществлялся непрерывно. Панель имела размерность 600x600x100 мм³. Квадратная поддержка была длиной 500 мм и скорость загрузки составляла 1,0 мм/мин. Для того, чтобы уменьшить трение, пластины были отполированы параллельно, так что шероховатость составляла меньше, чем 1/10 мм. Данный метод испытания соответствует EN 14488-5(2006) и Европейский Спецификации руководства по распылению бетона (EFNARC, 2000) касательно тестирования размеров тела и применяемой нагрузки. Поглощение энергии (в джоулях) определяется в соответствии с директивой EFNARC (и EN 14488-5) путем интеграции нагрузки - прогиб кривой к отклонению 25 мм, как это определено в настоящем стандарте. Следует подчеркнуть, что это испытание отличается от ASTM тестирования круглой панели C 1550 с прогибом в 40 мм.



Рисунок 1 Получение трещин в тестируемой прерванной квадратной панели EFNARC. Тест прерван при деформации 3 мм

На момент проведения теста на долговечность бетон имел трещины. Первоначальная ширина трещин, соответствующие состоянию использования, были получены в результате прерванного теста квадратной панели (SIA 162/6). В возрасте около 120 дней, тестируемые панели (600x600x100мм²) были загружены, при этом регулируя расширение, пока отклонение не достигло $\delta=3$ мм, затем сразу же как только был достигнут этот предел, груз был снят с панелей контролируемым образом. От 4 до 6 пересекающихся трещин появились на квадратных панелях. Ширины трещин были в диапазоне от 0.5 до 1 мм на расстоянии 15 см от центра и 2 мм в центре квадратных панелей. Затем панели хранились в различных условиях. Кроме того для микроскопического анализа после воздействия условий хранения, из квадратных панелей были вырезаны призмы (600x100x100мм³). Две разных трещины, одна панель с трещиной шириной около 1,2 мм и другая с трещиной около 0,5 мм появились на данных образцах в результате трехточечного теста на изгиб. Пять таких балок из пяти различных партий торкрета были подвержены тем же условиям хранения.

Квадратные панели и призмы были подвержены условиям хранения согласно Таблице 3.

Они были размещены в больших контейнерах, один экземпляр для каждого вида торкрета с индивидуальными условиями хранения. Некоторые из потрескавшихся образцов хранились (с образованием трещин) в климатической камере при 20°C/90%RH (хранение 1), другие подвергались текущей погоде в северной Швейцарии (хранение 2) и воздействию различных растворов. Каждый образец промывали 5 литрами одного из трех растворов (всегда одних и тех же) раз в неделю в течение года. Некоторые растворы собирались в нижней части контейнеров и использовались для полоскания каждый второй раз, в других случаях растворы были подготовлены специально. Уровень заполнения контейнера раствором не достигал уровня при котором раствор касался образцов. Контейнеры были крытыми (кроме хранения 2)

Таблица 3 Условия Хранения.

	Хр. 1	Хр. 2	Хр. 3	Хр. 4	Хр. 5
Среднее	90% RH	свобод. погода	NaCl Sol.	Na ₂ SO ₄ Sol.	Серн. кисл.
Конк.	-	-	3%	4г/л	2%
Длительн.	365 д	365 д	365 д	365 д	365 д

Были использованы два контрольных образца. Один был протестирован прямо перед началом периода хранения (полноценное тестирование, без трещин в начале теста). Одна панель, не имеющая трещин (для каждого торкрета) хранилась в 20°C/90%RH относительной влажности, для того, чтобы оценить эффект созревания и испытана год спустя.



Рисунок 3 Установка экспозиции с применением жидких растворов (вверху), покрытия (в центре) и различных образцов (квадратных панелей для механических испытаний и призм для микроскопии, внизу).

Через год после начала испытания, остаточные механические свойства были определены в тесте квадратной панели (в соответствии SIA 162/6) и и получен полный график нагрузки смещения.

От призм были отрезаны более мелкие куски (100x100x50 мм³) и она были пропитаны (в вакууме) смолой, для того, чтобы сохранить микроструктуру и появление волокон после экспозиции до того как микроскопический анализ мог быть произведен.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 4 представлен максимальный уровень нагрузки [кН] полученная кривая нагрузка-раскрытие трещины и энергии разлома согласно EFNARC до смещения в 25мм, определенного SIA162/6 для тестирования квадрат. панелей после года экспозиции (внешн. воздейс.)

Table 4 Механческие свойства до и после хранения.

	Макс. Нагрузка [кН]				
	A1	A2	A3	A4	A5
ОБР.109d	77.2	55.8	53.3	46.9	53.4
ОБР 521d	75.2	51.6	51.3	49.1	59.2
Хранение1	58.5	33.7	53.4	33.1	47.6
Хранение2	53.8	21.8	33.5	43.7	36.7
Хранение3	40.3	27.4	48	43.2	46.8
Хранение4	56.9	33.9	39.2	40.8	46.9
Хранение5	30.8	26.8	44.2	40.3	46.2

	Энергия EFNARC 25 мм [Дж]				
	A1	A2	A3	A4	A5
ОБР 109d	831	446	712	537	785
ОБР 521d	789	358	660	620	722
Хранение1	590	382	822	559	526
Хранение2	449	310	551	703	546
Хранение3	394	326	673	740	640
Хранение4	508	393	647	578	597
Хранение5	260	271	655	559	600

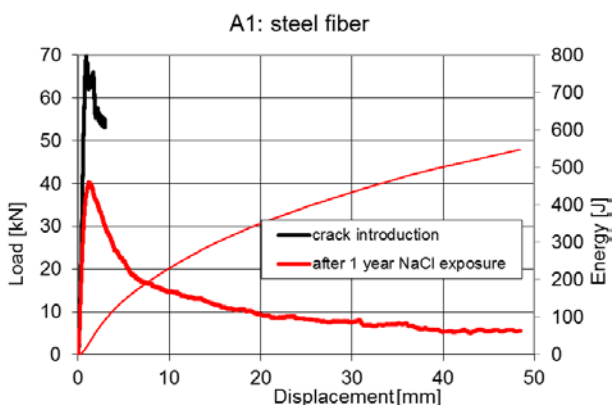


Рисунок 3 Кривая смещения нагрузки стального 1 (A1) волокна после года воздействия раствора (3% NaCl).

В случае со стальными волокнами, как макс. нагрузка, так и энергия разрыва (EFNARC) снизились для всех образцов, подверженных внешн. воздействиям по сравнению с образцами, которые не были подвержены (без трещин). Подобная тенденция просматривается и для образцов, подверженных условиям умеренного климата: свободное выветривание, климатологическая комната (20°C/90% ОВ)

самое значительное снижение механической производительности наблюдалось при взаимодействии с раствором хлорида натрия (Хр.3 Рис.3) и серной кислотой (2%) (Хр.5) результаты тестирования полимерных волокон различительно отличаются в зависимости от их типа. В некоторых случаях разброс показателей при макс. нагрузках был связан с разбросом в уровне качества торкрета, а не с воздействием внешних условий. Такое поведение было зафиксировано для силы разрыва. Незначительное влияние режима хранения наблюдается только у полимерных волокон. Однако, возраст образца имеет негативное влияние на некоторые типы волокна (A2) и может вызвать хрупкость. Иногда старение бетона может привести к улучшению сцепления волоконной матрицы. Если волокно обладает слабыми механич. св-вами, может возникнуть разрыв волокна, вместо выхода наружу. Значит, энергия переходит в торкрет и значения EFNARC снижаются.

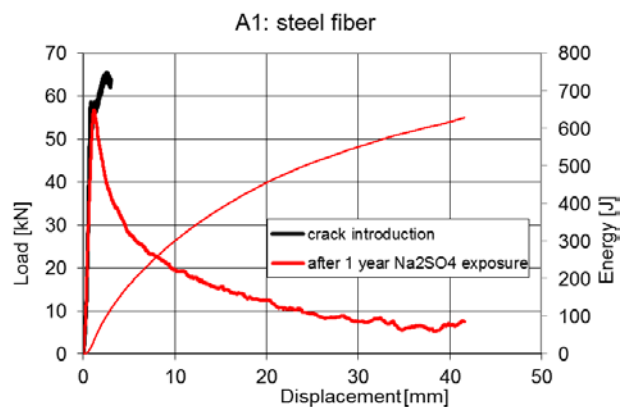


Рисунок 4 Кривая смещения нагрузки стального волокна 1 (A1) после года воздействия раствора сульфата (4г/л Na2SO4)

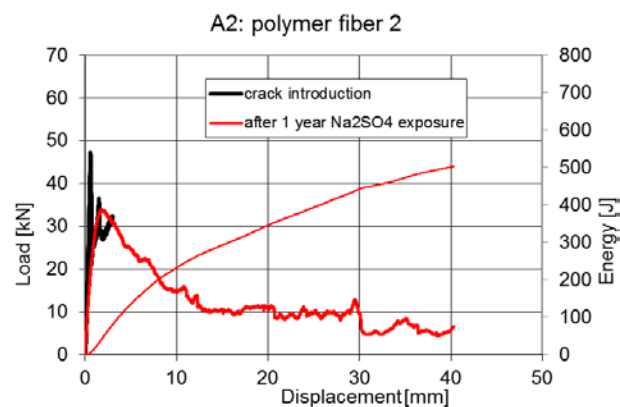


Рисунок 5 Кривая смещения нагрузки стального волокна 2 (A2) после года воздействия раствора сульфата (4г/л Na2SO4)

Так как сульфаты часто присутствуют в туннелях, для дополнительной иллюстрации на рисунке 4-6 типовые кривые нагрузки-перемещения после воздействия раствора Na_2SO_4 сравниваются с кривыми появления трещин (до смещения в 3 мм).

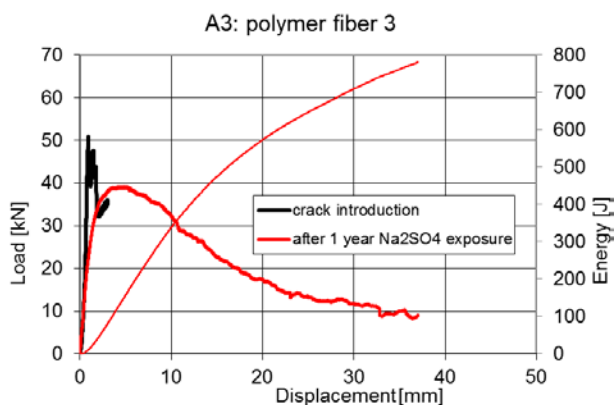


Рисунок 6 Кривая смещения нагрузки волокна 3 (A3) после года воздействия раствора сульфата 4г/л Na_2SO_4

Причиной ухудшения мех. св-в торкрета, армированного стальным волокном, является коррозия, появление которой наблюдается у всех панелей армированных сталью (хранение 1). Это показано на рисунках 7 и 8. Коррозия не развилась в той же степени по всей длине трещины, но сократилось расстояние от поверхности. Что особенно наблюдается под воздействием раствора хлорида натрия (Рисунок 8).

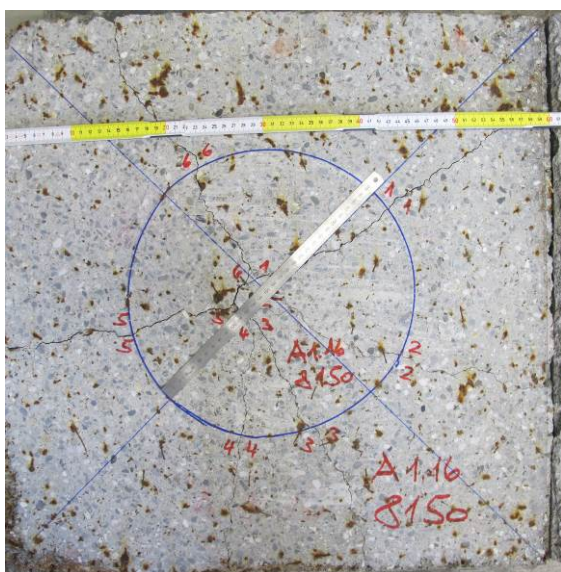


Рисунок 7 Фото квадратной панели, армированной (A1) стальным волокном послу года в соли(NaCl -раствор:3%).



Рисунок 8 Фото квадратной панели, армированной стальным волокном (A1), после года воздействия соли (NaCl)-раствора (3%) после тестирования квадратной панели.

Это подтверждается микроскопическим анализом образцов призмы до появления трещин. Тогда как в случае стальных волокон следы коррозии вблизи трещин очевидны (Рис. 9), в случае с полимерными волокнами повреждений не обнаружено (Рис. 10).



Рисунок 9 Микрфотграфия стальной фибры вблизи трещин (пропитанной для сохранения зеленой смолой) на расстоянии 35 мм от поверхности после 1 года экспозиции в растворе Na_2SO_4 (A1).

Однако, в случае со стальными волокнами, коррозии не было обнаружено на определенном расстоянии (несколько мм - достаточно) от трещины (Рисунок 11). Густой слой торкрета в этом случае защищает стальные волокна от коррозии. Это позволяет нам заключить, что торкрет без трещин, укрепленный стальными волокнами, не должен столкнуться с проблемой сокращения срока службы. Однако растрескивание произойдет неизбежно.

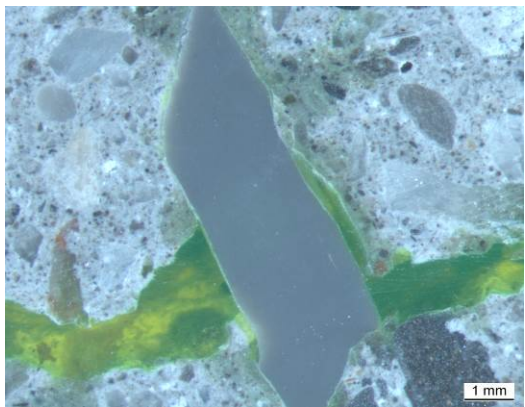


Рисунок 10 Микрофотография полимерного волокна2
вблизи трещин (пропитанных зеленой смолой) на
расстоянии 45 мм от поверхности после 1 года воздействия
 Na_2SO_4 -раствора (A2).

Некоторые полимерные волокна, с другой стороны могут страдать от повреждения, происходящего из-за высокого давления насоса и распыления и, как следствие, повышенной силы сдвига, воздействующей на бетон во время его производства. волокна могут растрескаться или даже расколоться (полим. волокно A5) по всей длине (стрелки на рис. 12). Рис. 12 хорошо показывает разорванные полимерные волокна, расположенные близко к трещине. Так как разорванная часть заполняется цементом, разрыв был обусловлен распылением, а не механич. нагрузкой на торкрет (напр. во время повления трещин). Такой разрыв вдоль волокон, однако, не является критическим, если сцепление матрицы бетона остаётся неизменным.

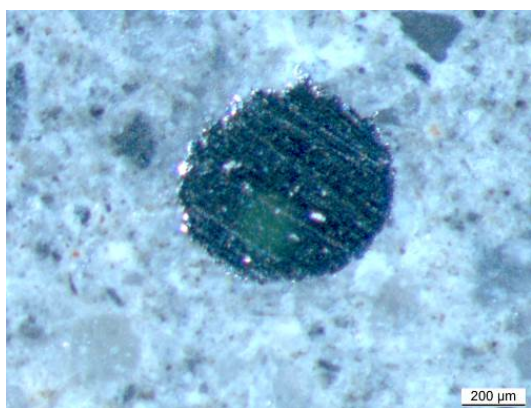
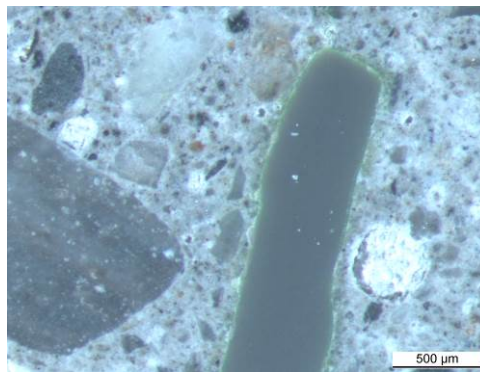
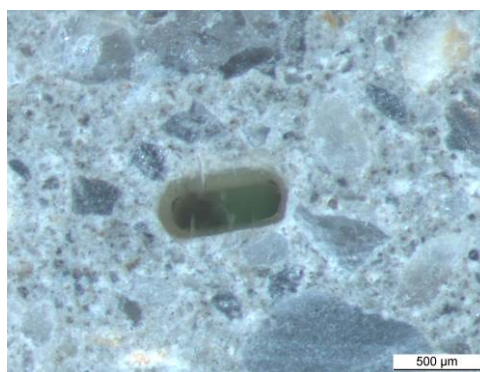


Рисунок 11 Типичные фотографии стальной фибры в
неповрежденном торкрете на расстоянии 5 мм от
трещины (хранение 3).

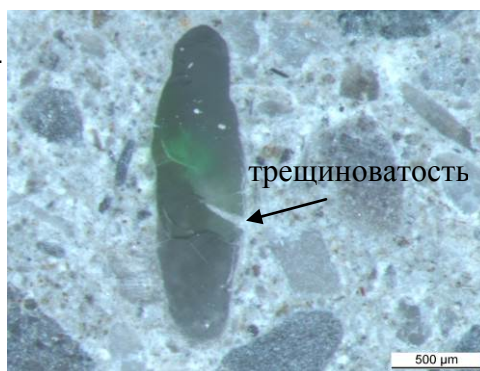
Полимерное волокно (A2)



Полимерное волокно (A3)



Полимерное волокно (A4)



Полимерное волокно (A5)



Рисунок 12 Типичные микрофотографии фибры
в неповрежденном торкрете (хранение 3).

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В торкрете, армированном потрескавшимся волокном, проблемы долговечности могут возникнуть из-за коррозии, возникшей в условиях туннеля, под воздействием сульфатов и солевых растворов (при использовании противогололедных солей. Было выявлено, что использование стальных волокон, имеющих крупные трещины, может привести к коррозии, ведущей к потере остаточной несущей способности, а значит энергии после трещинообразования. Однако, торкрет без трещин защищает стальные волокна на какое-то время. Полимерные волокна выдерживают атаки прочности лучше, и чаще всего падения несущей способности не наблюдается. Под воздействием сульфатов и серной кислоты, было отмечено ухудшение бетона.

Эффекты старения, ведущие к разрыву волокна, наблюдаются у полимерных волокон со слабыми механическими свойствами. Такие эффекты не наблюдаются у волокон с улучшенными свойствами.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы также хотели бы выразить благодарность Научно-исследовательской лаборатории Хагербах, Швейцария (В.Wetzig и М.Reinhold) за помощь в производстве торкрет панели.

ИСТОЧНИКИ

- Бернард, Е. 2004. Прочность бетона, армир. потрескавшимся волокном В Торкрете: Больше Инженерных разработок, Тэйлор и Фрэнсис, Лондон, *E.S. Бернард (ed)*, с.59–66.
- Бернард, Е. 2008. Охрупчивание торкрета, укрепленного волокном. Торкрет-бетон, Том. 10, No 3, с. 16-21.
- Клементс, М. ; Бернард, Е. 2004. Использование торкрета , укрепленного макро-синтетич. волокном Австралия. В Торкрете: Больше Инженерных Разработок, Тэйлор и Фрэнсис, Лондон, Бернард, *E.C. (ed)*, с.20–22.
- Ханант, Д. 1998. Долговечность полипропиленового волокна в смесях на основе цемента в Портланде: Данные за 18 лет. Цемент и бетон Исследования, Том. 28, No. 12, с.1809–1817.

- Кауфман, Дж. ; Lübben, J. ; Schwitter, E. 2007 Механическое армирование бетона двух-компонентным волокном: Композиты часть 2 Прикладная наука и производство, Том. 38, с.1975–1984.
- Кауфман, Дж. ; Мансер, М. 2013. Долговечность двухкомпонентных полимерных волокон в условиях ползучести и агрессивных средах. Наземное обеспечение 2013, Потвин, У. ; Брэйди, В. (ред), Австралийский центр геомеханики, Перт, с.585-596.
- Кёрц, с. ; Балагуру, п. 2000. Ползучесть на стадии образования трещин у полимерного фибробетона при изгибе. Исследования в области цемента, бетона Vol. 30 (2), с.183–190.
- Майдл, В. 1992. Справочник по торкрету – *Handbuch für Spritzbeton, Berlin*.
- Нордстром Е. 2005. Долговечность распыленного Бетона. Докторская диссертация Университа Технологии *Luleå* , ISSN: 1402-1544.
- Розе, Д. 1985. Торкретирование туннеля – сила волокна. Гражданское проектирование, Нью Йорк, Том. 55(12), с.62–63.