



УДК 539.384.2

Жворонков М.И. – аспирант

E-mail: Sith07@list.ru

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4

Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона

Аннотация

В данной работе описывается методика и прибор оригинальной конструкции, позволяющий определять энергетические характеристики разрушения фибробетонных образцов, представлены диаграммы зависимости деформаций (прогибов) от прилагаемых нагрузок, построенные при испытании образцов, изготовленных с применением различных видов фибры, которые наглядно демонстрируют некоторые механизмы разрушения. Представлены значения модуля упругости, определенные с применением оригинальной методики.

Ключевые слова: фибробетон, трещиностойкость, вязкость разрушения, модуль упругости, аморфная металлическая фибра.

В настоящее время на кафедре технологии строительных материалов и метрологии Санкт-Петербургского Государственного архитектурно-строительного университета продолжается исследование, направленное на изучение свойств фибробетона, изготовленного с применением аморфной металлической фибры.

Фибробетон это композиционный материал, представляющий собой бетонную матрицу, по всему объему которой равномерно распределены дискретные волокна (фибры).

Аморфная фибра представляет собой отрезки лент определенной длины толщиной в 20-30 микрон и шириной 2-3 мм. Основное отличие аморфных материалов заключается в отсутствии порядка в их кристаллической структуре. В металлах такого эффекта удалось добиться быстрым охлаждением расплава. Расплавленный металл с различными легирующими добавками выливается на охлаждаемую подложку и отверждается, не успевая приобрести упорядоченную кристаллическую решетку.

Существует большое количество различных видов фибр, имеющих различные свойства и характеристики, но, не смотря на все имеющееся многообразие, все волокна можно классифицировать по двум типам. Классификация производится в зависимости от модуля упругости волокон и сравнении его с модулем упругости бетонной матрицы. Таким образом, выделяются две категории: волокна, имеющие низкий, по сравнению с бетоном модуль упругости, то есть низко модульные, и волокна с высоким по сравнению с бетоном модулем упругости, то есть высоко модульные. Введение в состав бетона низко модульных или высоко модульных волокон не может не влиять на модуль упругости получаемого фибробетона [1, 2]. В связи с чем особую актуальность приобретает разработка оригинальных методов проведения испытаний свойств фибробетонов.

Существует ГОСТ 24452 «Методы определения призмочной прочности модуля упругости и коэффициента Пуассона».

Методика ГОСТ 24452 позволяет определить модуль упругость расчетным путем, в котором участвуют величины относительных продольных деформаций образца.

В соответствии с данной методикой образец – балка, размеры которой подбираются исходя из значений максимальной крупности заполнителя, устанавливается в прессе вертикально и к ней прикладывается сжимающая нагрузка. В ходе испытания контролируется нагрузка, время и деформации образца.

Наиболее полно фибробетон проявляет свои свойства при работе на растяжение при изгибе, разумно предположить, что и испытывать его следует в том положении, в каком он будет работать в конструкции.

Не меньшее влияние оказывает введение фибры на силовые и энергетические характеристики трещиностойкости, которые можно определить, используя методику, описанную в ГОСТ 29167 [3, 4, 5, 6, 7, 8].

В ГОСТ 29167 описывается методика проведения испытаний образцов и обработки полученных данных. Испытанию подвергается образец – балка. Образец испытывается на прочность на растяжение при трехточечном изгибе, в ходе испытания непрерывно контролируется прилагаемая нагрузка и прогиб образца, вызванный действием этой нагрузки. После проведения испытания строится диаграмма зависимости прогибов от прикладываемых нагрузок, и далее, по полученной диаграмме расчетным путем, определяются энергетические и силовые характеристики трещиностойкости.

В ГОСТ 29167 указываются требования к точности измерительного оборудования, так например прогибы образца должны контролироваться с погрешностью, не превышающей 0,01 мм. Очевидно, что в ряде случаев для достоверной оценки свойств материала такой точности может оказаться недостаточно.

Из вышеупомянутого можно сделать вывод, что в случае исследования свойств фибробетона некоторые существующие методики могут не давать достаточно точных данных. Поэтому было принято решение создать прибор, позволяющий определять модуль упругости и характеристики трещиностойкости, и применить его при испытании фибробетонных образцов.

Прибор устанавливается в пресс и с помощью упоров обеспечивается четырехточечный изгиб образцов-балок. На верхнюю грань образца приклеен тензорезистор. Данные о деформациях образца полученные с помощью этого тензорезистора можно расчетным путем преобразовать в его прогиб. Такой способ контроля прогиба исключает влияние такого фактора как вдавление упоров в образец. В отличие от трехточечного при четырехточечном изгибе вследствие постоянства изгибающего момента между точками приложения нагрузки создаются условия, при которых получаемые результаты испытаний правильно характеризуют материал и не зависят от возможных неоднородностей образца в области максимального изгибающего момента.

В приборе предусмотрен датчик, позволяющий контролировать нагрузку, прилагаемую к образцу. Так же в приборе используется цифровой штангенциркуль, позволяющий контролировать прогибы образца с точностью составляющей 0,01 мм. Несложное схемотехническое решение позволяет опрашивать датчики и штангенциркуль в ходе испытаний и отправлять эти данные в компьютер (рис. 1).

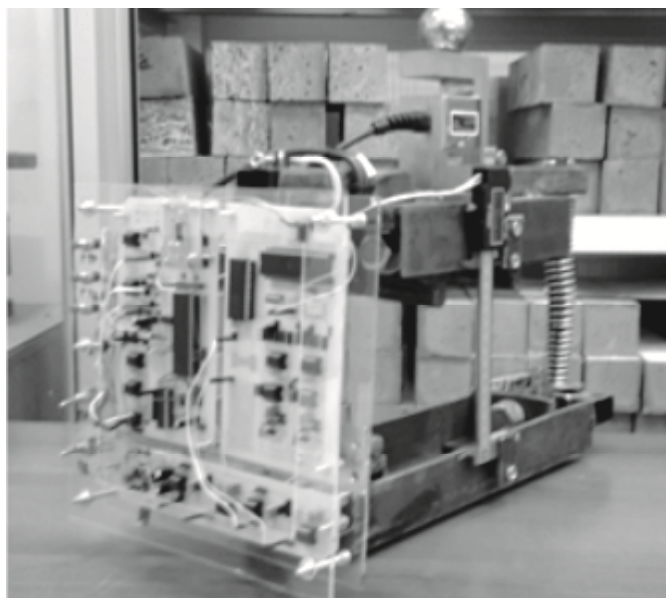


Рис. 1. Прибор для построения диаграмм разрушения образцов

Далее по полученным данным строится диаграмма зависимости прогибов от прикладываемых нагрузок. При этом, участок диаграммы, описывающий упругие деформации строится по данным полученным с тензорезистора, а участок пластических деформаций по данным штангенциркуля.

Далее, по полученной диаграмме можно рассчитать силовые и энергетические характеристики трещиностойкости, используя методику, описанную в ГОСТ 29167.

Тензорезистор позволяет получить достаточно точные данные об упругих деформациях образца, которые можно преобразовать в прогиб этого образца. Имея данные о прогибе и нагрузке можно расчетным путем определить модуль упругости испытываемого образца.

Такой метод определения модуля упругости исключает трудоемкий процесс центрирования образца, и вообще значительно ускоряет и упрощает испытание.

Метод определения упругости при изгибе описан в ГОСТ 9550 «Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе». Также во ВНИИКРнефти была разработана методика определения модуля упругости тампонажного камня [9], в этих методиках измеряется прогиб образца. Метод определения модуля упругости при изгибе с использованием тензорезистора описан в ГОСТ 25485. Данный ГОСТ распространяется на ячеистые бетоны. От описанных в имеющихся методиках, данный прибор, отличается большей универсальностью, так как позволяет контролировать кроме упругих еще и пластические деформации образца.

В описываемом исследовании была предпринята попытка определить модуль упругости и характеристики трещиностойкости фибробетона, изготовленного с применением аморфной металлической фибры, при разном ее объемном содержании. Так же планировалось испытать образцы изготовленные с применением других видов фибр.

В данном исследовании были применены следующие виды фибр:

- фибра стальная, проволочная, волнового профиля производства «Белорусского металлургического завода»;
- фибра аморфнометаллическая производства ООО «Химмет»;
- фибра полипропиленовая «Kalcifil S» длиной 12 мм и диаметром 25 мкм.

В качестве матрицы было принято решение использовать мелкозернистый бетон, позволивший добиться высокой степени дисперсности распределения использованных волокон. Состав бетонной смеси использованный при изготовлении всех образцов был одинаков: Ц:П = 1:2 при В:Ц = 0,32 и расходе добавки суперпластификатора 0,7 % от массы цемента.

Испытаниям подвергались образцы – балки, размеры которых подбирались в соответствии с требованиями ГОСТ 29167 равными 7х7х28 см.

Значения энергетических и силовых характеристик трещиностойкости и модуля упругости приведены в таблице.

Далее представлены диаграммы зависимости прогибов от прилагаемых нагрузок, построенные в ходе испытаний фибробетонных образцов (рис. 2).

По данным диаграммам можно производить расчет энергетических и силовых характеристик разрушения материала. На одном из этапов расчета требуется определить энергозатраты на процессы, протекающие до образования магистральной трещины. Это подразумевает определение прогибов, соответствующих упругим деформациям образца. На рисунке 3 представлены диаграммы разрушения фибробетонных образцов, масштаб которых увеличен для более детального рассмотрения зон упругих деформаций. На рисунке так же представлены диаграммы разрушения неармированного образца, армированного аморфной металлической и синтетической фиброй. По диаграммам видно, что прогибы образцов армированных стальной проволочной фиброй, при одинаковых с неармированным нагрузках, оказываются несколько меньшими. Это свидетельствует о некотором повышении модуля упругости, что можно объяснить тем, что введенная в состав бетона фибра некоторым образом модифицирует ее структуру. Во-первых, на макроуровне, присутствие волокон беспорядочно ориентированных по всему объему образца ограничивает его деформации, во-вторых, на микроуровне, вдоль всей поверхности волокон образуется контактная зона, обладающая более высокой твердостью и прочностью, такие зоны создают, как и фибра, микрокаркас, который также ограничивает деформации всего материала.

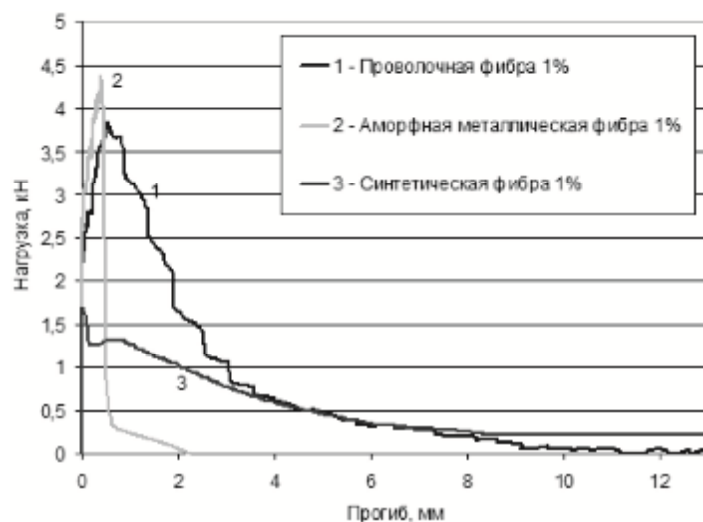


Рис. 2. Диаграммы разрушения фибробетонных образцов

Деформации образца уменьшаются с увеличением содержания проволоочной фибры, и увеличиваются с увеличением содержания синтетической фибры. Следует отметить также тот факт, что образование трещин в сталефибробетонных образцах начиналось при более высоких нагрузках чем у контрольного. Данная особенность прослеживается по величине энергозатрат на разрушение до момента начала движения магистральной трещины.

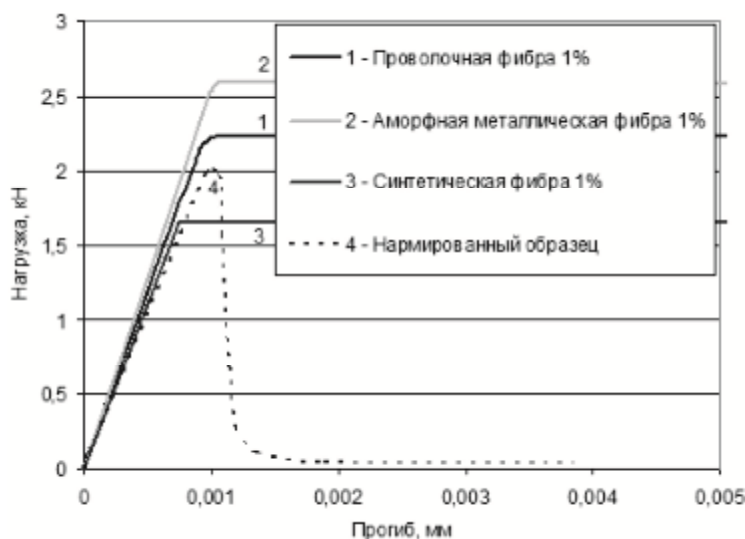


Рис. 3. Упругие деформации фибробетонных образцов

После образования трещин напряжения в фибробетоне, армированном стальной проволоочной фиброй, перераспределяются таким образом, что работать начинают преимущественно волокна. Они начинают вытягиваться из образца, причем данный процесс протекает при повышающейся нагрузке. В определенный момент фибра вытягивается из образца настолько, что прекращает воспринимать прилагаемую нагрузку, после чего прогиб увеличивается уже при понижающейся нагрузке. Этот процесс в значительной степени влияет на энергозатраты на статическое разрушение.

По диаграмме разрушения фибробетонного образца армированного синтетической фиброй видно некоторое уменьшение прогибов при упругом деформировании, по сравнению с контрольным образцом, что говорит о том, что и низко модульная синтетическая фибра может способствовать повышению модуля упругости фибробетона, что так же можно объяснить модификацией структуры цементного камня.

По диаграммам видно, что образование магистральной трещины происходит при нагрузке близкой к разрушающей нагрузке неармированного образца. После этого нагрузка понижается с увеличением прогиба. При небольшом раскрытии магистральной трещины синтетические волокна задействованы в процессе разрушения не в полной мере, однако при увеличении раскрытия трещины увеличивается и количество волокон вступающих в работу. При этом наблюдается повышение нагрузки. Эти особенности прослеживаются и по величинам энергозатрат на соответствующих этапах деформирования и разрушения.

Аморфная металлическая фибра за счет своей геометрии и развитой боковой поверхности имеет значительную анкеровку в бетоне. Так же такая фибра имеет высокий модуль упругости. Эти особенности способствуют повышению модуля упругости фибробетона изготовленного с применением такого вида фибры. По диаграммам видно, что образование трещин происходит при нагрузке значительно превышающей разрушающую нагрузку контрольного образца, что подтверждается энергозатратами на разрушение до образования магистральной трещины.

После образования трещин происходит обрыв большей части волокон. Значительного увеличения вязкости разрушения, по сравнению с неармированным образцом, не наблюдается.

Таблица

Характеристики трещиностойкости и модуль упругости

Характеристика трещиностойкости	Вид фибры/объемное содержание						
	Kalcifil/ 1 %	Kalcifil/ 0,5 %	Аморфная/ 2 %	Аморфная/ 1 %	Проволока/ 2 %	Проволока/ 1 %	Без фибры
G_i – удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м ²	0,16	0,25	0,64	0,48	0,36	0,28	0,32
G_f – удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, кДж/м ²	0,67	0,79	1,59	0,55	8,99	5,28	0,001
K_c – условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м ^{0,5}	0,34	0,40	0,63	0,53	0,48	0,43	0,41
Средняя плотность, кг/м ³	2160	2150	2320	2230	2230	2120	2110
Модуль упругости, МПа·10 ³	39	41	46	44	45	42	31

По полученным данным можно сказать, что стальная проволочная фибра не дает значительного увеличения энергозатрат на упругое деформирование, однако значительно повышает энергозатраты на пластическое деформирование фибробетона изготовленного на ее основе. Модуль упругости такого композита повышается с увеличением содержания волокон. Притом, даже небольшого количества фибры достаточно для значительного увеличения модуля упругости, при дальнейшем увеличении ее количества модуль упругости повышается, но в меньшей степени. То же можно сказать и о синтетической фибре, за исключением того факта, что увеличение количества такой фибры снижает модуль упругости. Аморфная металлическая фибра значительно отличается от перечисленных тем, что не оказывает заметного влияния на вязкость разрушения, однако значительно увеличивает модуль упругости, и повышает энергозатраты на деформирование и разрушение до начала движения магистральной трещины.

Список библиографических ссылок

1. Леонович И.А., Леонович А.А. Влияние упругих характеристик композитного материала на свойства фибробетона // Вестник Белорусско-Российского университета, 2007, № 3 (16). – С. 148-155.

2. Смирнов Д.А. Упругость и ползучесть сталефибробетона // Сборник докладов 68-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета / СПбГАСУ, Ч. IV. – СПб., 2011. – С. 137-142.
3. Пухаренко Ю.В., Магдеев У.Х., Морозов В.И., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Исследование свойств сталефибробетона на основе аморфной металлической фибры // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура, 2013, Выпуск 31 (50). – С. 132-135.
4. Пухаренко Ю.В., Голубев В.Ю. О вязкости разрушения фибробетона // Вестник гражданских инженеров, 2008, № 3 (16). – С. 80-83.
5. Пухаренко Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Строительные материалы. – СПб., 2004, № 10. – С. 47-50.
6. Жаворонков М.И. Методика определения энергетических и силовых характеристик разрушения фибробетона // Вестник гражданских инженеров, 2014, № 6 (47). – С. 155-160.
7. Жаворонков М.И., Туровинин А.В., Доржу А.С. Оценка эффективности армирования аморфной металлической фиброй / В 3 ч. Ч.II. Актуальные проблемы современного строительства: 64-я международная научно-техническая конференция молодых ученых. – СПб: СПбГАСУ, 2011. – С. 228-230.
8. Жаворонков М.И. Свойства сталефибробетона, армированного аморфнометаллической фиброй // Научно-исследовательская работа студентов, аспирантов и молодых ученых СПбГАСУ. – СПб: СПбГАСУ, 2012. – С. 120-129.
9. Булатов А.И. Формирование и работа цементного камня в скважине. – М.: Недра, 1990. – 409 с.

Zhavoronkov M.I. – post-graduate student

E-mail: sith07@list.ru

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

The organization address: 190005, Russia, Saint-Petersburg, 2 Krasnoarmeyskay st., 4

Determining characteristics of the destruction and elasticity modulus of fiber-reinforced concrete

Resume

The purpose was to study the energy and power characteristics of the destruction of fiber-reinforced concrete made with amorphous metal fiber and determination of the elasticity modulus of the composite.

The aim of the work was the experimental study of the properties of fiber-reinforced concrete, their shortcomings determined by standard methods, and therefore it was decided to develop an original method for the application of which was necessary to create a special device. The developed device allows charting dependencies of deflections samples from accompanying bending loads. By the obtained diagrams can be calculated the values of force and power characteristics of the destruction and the elastic modulus of fiber-reinforced concrete of the test specimen.

To assess the effectiveness of amorphous metal fiber samples manufactured with other types of fibers were tested. The results of comparative tests of the characteristics of fracture toughness and elastic modulus of fiber concretes samples. With the help of the obtained diagrams mechanisms of destruction of fiber-reinforced concrete made with different types of fibers are analyzed.

When using amorphous metal fiber observed the increase of modulus and tensile strength in bending, however, such a composite, as opposed to the reinforced steel wire or synthetic fiber, brittle breaks.

Keywords: fiber-reinforced concrete, crack resistance, fracture toughness, modulus of elasticity, amorphous metal fiber.

Reference list

1. Leonovich I.A., Leonovich A.A. Effect of the elastic characteristics of the composite material on the properties of fiber reinforced concrete // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta, 2007, № 3 (16). – P. 148-155.
2. Smirnov D.A. Elasticity and creep of steel fiber reinforced concrete: Sbornik dokladov 68-y nauchnoy konferencii professorov, prepodavateley, nauchnykh rabotnikov, inzhenerov i aspirantov universiteta / SPbGASU. P. IV. – SPb., 2011. – P. 137-142.
3. Magdeev U.H., Pukharenko Yu.V., Morozov V.I., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Study the properties of fiber-reinforced concrete on the basis of amorphous metal fiber // Vestnik VolgGASU. Ser.: Stroitelstvo i arkhitektura, 2013, Vypusk 31 (50). – P. 132-135.
4. Pukharenko Yu.V., Golubev V.Yu. About the fracture toughness of fiber-reinforced concrete // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov, 2008, № 3 (16). – P. 80-83.
5. Pukharenko Yu.V. Principles of forming the structure and predicting the strength of fiber-reinforced concrete // Stroitelnye materialy. – Spb., 2004, № 10. – P. 47-58.
6. Zhavoronkov M.I. Method for determining the energy and power characteristics of the destruction of fiber-reinforced concrete // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov, 2014, № 6 (47). – P. 155-160.
7. Zhavoronkov M.I., Turovinin A.V., Dorzhu A.S. Evaluating the effectiveness of the reinforcement of the amorphous metal fibers // V 3 ch. Ch.II. Aktualnye problemy sovremennogo stroitelstva: 64-ya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh. – SPb: SPbGASU, 2011. – P. 228-230.
8. Zhavoronkov M.I. Properties of steel fiber-reinforced concrete, reinforced amorphous metal fiber // Nauchno-issledovatel'skaya rabota studentov, aspirantov i molodykh uchenykh SPbGASU. – SPb: SPbGASU, 2012. – P. 120-129.
9. Bulatov A.I. Forming and operation of a cement stone in the well. – M.: Nedra. 1990. – 409 p.