

УДК 539.32

**Пантелеев Д.А.** – аспирант

E-mail: [dm-pant@yandex.ru](mailto:dm-pant@yandex.ru)

**Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет**

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

## **Деформативные и прочностные характеристики полиармированного фибробетона**

### **Аннотация**

Целью работы являлось исследование деформативных и прочностных характеристик полиармированного фибробетона с использованием аморфной металлической фибры.

Приведены результаты сравнительных испытаний прочности на растяжение при изгибе, призмной прочности и модуля упругости фибробетонных образцов. Экспериментально доказано, что за счет применения полидисперсного армирования, возможно добиться улучшения деформативных и прочностных характеристик фибробетона.

**Ключевые слова:** фибробетон, полиармирование, призмная прочность, модуль упругости, аморфнометаллическая фибра.

В настоящее время в строительстве все большее развитие получает такой актуальный на сегодняшний день материал, как фибробетон, который повышает прочностные и деформативные характеристики материала. Однако, при этом останавливаются на применении моноармированных фибробетонов, управление свойствами, которых достаточно ограничено, тогда как полиармирование дает возможность управлять целым комплексом свойств композита.

Полиармированный фибробетон – это материал, содержащий два и более разных по составу или (и) геометрическим параметрам армирующих компонента, равномерно распределенных в матрице относительно друг друга. Целью полиармирования является создание такого материала, который бы сохранял преимущества и исключал недостатки композита при моноармировании.

Проведенные ранее исследования [1, 2, 3] показали, что использование полидисперсного армирования позволяет управлять свойствами композиционных материалов. Упругопластические и геометрические параметры разных фибр, их прочность сцепления с бетонной матрицей композита оказывают значительное влияние на свойства фибробетона, в связи с чем можно сделать вывод о перспективности использования полиармирования.

На кафедре технологии строительных материалов и метрологии СПбГАСУ продолжают исследования по изучению эффективности полидисперсного армирования фибробетонов. Ранее [4, 5, 6] были исследованы прочностные характеристики фибробетонов, целью настоящей работы является исследование деформативных характеристик, таких, как модуль упругости, которые, несмотря на то, что область применения фибробетона в значительной степени зависит от его упругих свойств, изучены, на данный момент, недостаточно полно. Литературный обзор показал, что существующие теоретические и экспериментальные результаты исследования деформативности фибробетона довольно противоречивы, и имеют большой разброс значений. Так, в одних работах ученые настаивают на том, что введение волокна крайне незначительно влияет на модуль упругости бетона [7], а в других – утверждают об увеличении модуля упругости вплоть до 50 % [8].

В работе [9] установлено, что при нагружении конструкций до исчерпания их несущей способности, при условии прочного сцепления фибры с бетоном, модуль упругости фибробетона меняется незначительно, за счет разгрузки фибр, перераспределения деформаций и напряжений между бетоном и армирующим волокном. Это значит, что при любом уровне нагрузок можно иметь дело только с начальным значением модуля упругости композита. Важным условием для заметного влияния фибр на модуль упругости фибробетона, является обеспечение надежного сцепления фибр с бетонной матрицей композита.

При проведении экспериментальных исследований был использован портландцемент марки ПЦ 500 Д0 производства ОАО «Осколцемент». В качестве мелкого заполнителя применялся кварцевый песок с модулем крупности  $M_{кр} = 2,34$ . Для регулирования подвижности бетонных смесей использовался суперпластификатор Schomburg Remicrete SP-10 (FM).

Для дисперсного армирования бетонов применялись:

§ фибра стальная проволочная волнового профиля производства «Белорусского металлургического завода»;

§ фибра аморфнометаллическая производства ООО «Химмет»;

§ фибра полимерная макросинтетическая «BarChip».

Геометрические и физические параметры армирующих волокон представлены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические и физические параметры армирующих волокон

Вид фибры	Эквивалентный диаметр, мм	Длина, мм	Плотность материала, г/см <sup>3</sup>
Стальная	0,3	22	7,8
Аморфнометаллическая	0,28	30	7,8
Полимерная	0,87	54	0,9

Для получения фибробетонных образцов использовался мелкозернистый бетон, что позволило обеспечить высокую степень дисперсности армирования. Образцы, изготовленные в ходе исследования, имели одинаковый состав матрицы: Ц:П = 1:2 при В:Ц = 0,32 и расходе добавки суперпластификатора 0,7 % от массы цемента.

Приготовление фибробетонной смеси осуществлялось в лабораторном смесителе БЛ-10 принудительного действия в течение 2 минут при следующей очередности загрузки компонентов: песок, портландцемент и вода с растворенной в ней добавкой суперпластификатора. По готовности цементно-песчаного раствора в него вводилась фибра, и перемешивание продолжалось до обеспечения равномерного распределения фибры по всему объему замеса. Для уплотнения смесей в процессе формования образцов применялась стандартная виброплощадка; время вибрирования, в зависимости от вида и количества вводимой фибры, составляло 30...90 секунд. Из приготовленных фибробетонных смесей были изготовлены образцы-призмы квадратного сечения с размером 70x70x280 мм. Каждая серия состояла из 4 образцов. Тепловлажностная обработка осуществлялась в пропарочной камере при температуре изотермической выдержки 80°С, после чего образцы выдерживались в естественно-воздушных условиях в течение 14 суток. Далее была определена средняя плотность образцов, после чего они подверглись испытаниям по определению призмочной прочности и модуля упругости в соответствии с ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона».

На первом этапе работы комбинированию подверглась высокомодульная фибра: аморфнометаллическая и стальная. В ходе эксперимента уменьшалось количество стальной фибры за счет увеличения количества аморфнометаллической, при этом общий расход волокон оставался неизменным и составлял 2 % по объему. Результаты испытаний фибробетонных образцов приведены в табл. 2.

Модуль упругости рассчитан с учетом экспериментальных данных, которые были получены при помощи механических тензометров, представленных на рис. 1. Тензометры, для измерения деформаций образцов, устанавливались по всем четырем граням, развернутым на 90°.

Таблица 2

**Результаты испытаний образцов,  
полиармированных стальной и аморфнометаллической фиброй**

Вид фибры	Содержание фибры по объему, %	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Призменная прочность, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Модуль упругости, МПа
Неармированный	-	2249	45,5	8,12	31643
Стальная	2,0	2388	52,3	17,21	40654
Аморфнометаллическая	0,1	2392	52,5	18,57	40837
Стальная	1,9				
Аморфнометаллическая	0,3	2386	55,9	17,91	41030
Стальная	1,7				
Аморфнометаллическая	0,5	2383	58,2	19,93	41327
Стальная	1,5				
Аморфнометаллическая	0,7	2379	58,5	21,2	41771
Стальная	1,3				
Аморфнометаллическая	1,0	2373	60,4	21,55	42000
Стальная	1,0				
Аморфнометаллическая	1,3	2369	61,5	22,52	42575
Стальная	0,7				
Аморфнометаллическая	1,5	2365	62,2	22,21	42911
Стальная	0,5				
Аморфнометаллическая	1,7	2361	62,8	21,85	43427
Стальная	0,3				
Аморфнометаллическая	1,9	2359	63,2	21,8	43627
Стальная	0,1				
Аморфнометаллическая	2,0	2351	62,9	21,73	43945

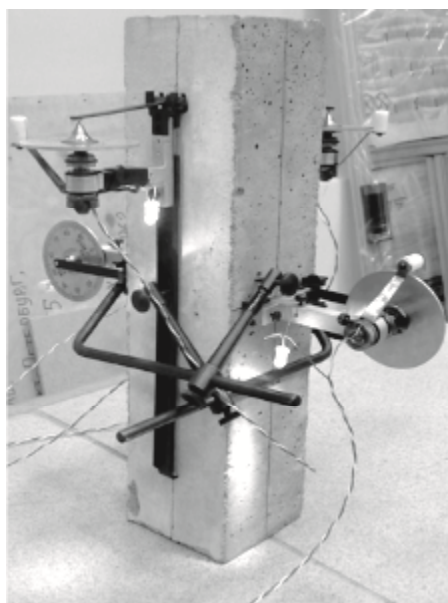


Рис. 1. Подготовка фибробетонного образца к испытанию модуля упругости

Модуль упругости  $E_s$  вычислялся для каждого образца при уровне нагрузки равной 30 % от разрушающей по формуле (1):

$$E_s = \frac{s_1}{e_{1y}} = \frac{R_1}{F \cdot (e_{1g} - a \cdot e_{1n})}, \quad (1)$$

где  $s_1$  – приращение напряжения от условного нуля до уровня внешней нагрузки, равной 30 % от разрушающей;  $R_1$  – приращение внешней нагрузки;  $e_{1g}$  – приращение упругомгновенной относительной продольной деформации образца, соответствующее уровню нагрузки  $R_1 = 0,3 \cdot R_p$  и измеренное в начале каждой ступени ее приложения;  $e_{1n}$  –

приращение полных относительных продольных деформаций образца, соответствующее уровню нагрузки  $R_i = 0,3 \cdot R_p$  и измеренное в конце ступени ее приложения;  $\Delta \epsilon_{1n}$  – приращение относительных продольных деформаций быстроснатекающей ползучести, полученной при выдержке нагрузки на ступенях нагружения до уровня нагрузки  $R_i = 0,3 \cdot R_p$ .

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

- Несмотря на одинаковую среднюю плотность материала, из которого было приготовлено аморфнометаллическое и стальное волокно, образцы, армированные стальной фиброй, имеют среднюю плотность более высокую, чем образцы армированные аморфной металлической. Вероятнее всего это связано с трудностью равномерного распределения аморфнометаллического волокна в заданном объеме бетона и создания плотной упаковки составляющих матрицы в системе «дисперсная арматура-бетон»;

- За счет армирования бетона аморфнометаллической и стальной фиброй, в количестве 2 % по объему, можно повысить модуль упругости бетона в 1,3 и 1,4 раза, призмную прочность в 1,3 и 1,2 раза, прочность на растяжение при изгибе в 2,1 и 2,7 раза;

- При уменьшении количества стальной фибры, за счет увеличения аморфной металлической, модуль упругости фибробетона повышается. На рис. 2 представлен график зависимости модуля упругости от объемного содержания комбинации аморфной и стальной фибры, так общий расход волокна был постоянен  $\mu_{\text{общ}} = 2\%$  по объему, а количество стальной фибры ( $n$ ) уменьшалось за счет увеличения количества аморфнометаллической;

- Использование полиармирования, за счет разности свойств волокон и их поведения в бетонной матрице композита, дает возможность управлять целым комплексом свойств фибробетона, влияя в большую или меньшую сторону на ту или иную характеристику. Так образцы, армированные аморфнометаллической фиброй, имеющей хорошее сцепление с матрицей композита, показывают большие значения при испытаниях прочности на растяжение при изгибе и модуля упругости, нежели образцы, армированные стальной фиброй, которая способствует увеличению вязкости разрушения.

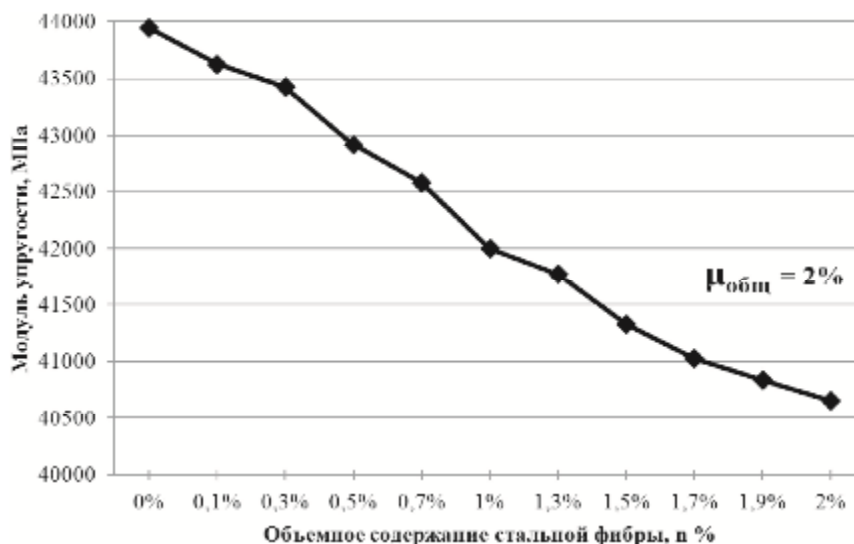


Рис. 2. График зависимости модуля упругости полиармированного фибробетона от объемного содержания стальной и аморфнометаллической фибры

На втором этапе была использована комбинация высокомодульного и низко модульного волокна, а именно комбинация аморфной металлической и полимерной макросинтетической фибры. Содержание аморфной металлической фибры было неизменным и составляло 1 % по объему, содержание полимерной фибры увеличивалось от 0 до 1 % по объему с шагом составляющим  $h = 0,1\%$ . Результаты испытаний фибробетонных образцов приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты испытаний образцов,  
полиармированных полимерной макросинтетической  
и аморфнометаллической фибрами**

Вид фибры	Содержание фибры по объему, %	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Призменная прочность, МПа	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Модуль упругости, МПа
Неармированный	-	2260	44,2	7,1	30705
Аморфнометаллическая	1,0	2322	53,7	13,51	40340
Полимерная «VarChip»	1,0	2251	43,3	7,17	36131
Аморфнометаллическая Полимерная «VarChip»	1,0 0,1	2335	51,6	13,99	40275
Аморфнометаллическая Полимерная «VarChip»	1,0 0,2	2339	52,5	14,0	40210
Аморфнометаллическая Полимерная «VarChip»	1,0 0,3	2338	51,4	14,16	40154
Аморфнометаллическая Полимерная «VarChip»	1,0 0,4	2335	51,2	14,73	40076
Аморфнометаллическая Полимерная «VarChip»	1,0 0,5	2333	51,9	15,04	40005
Аморфнометаллическая Полимерная «VarChip»	1,0 0,6	2329	50,3	15,1	39937
Аморфнометаллическая Полимерная «VarChip»	1,0 0,7	2338	49,3	15,45	39898
Аморфнометаллическая Полимерная «VarChip»	1,0 0,8	2335	49,9	15,31	39862
Аморфнометаллическая Полимерная «VarChip»	1,0 0,9	2341	49,1	15,58	39814
Аморфнометаллическая Полимерная «VarChip»	1,0 1,0	2337	48,6	15,84	39755

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

- Из-за того, что фибра «VarChip» является низко модульной, повышение ее содержания в смеси приводит к понижению модуля упругости фибробетона;

- При постоянном расходе высоко модульной фибры и повышении низко модульной, такой как полимерная фибра «VarChip», понижается модуль упругости фибробетона. На рис. 3 представлен график зависимости модуля упругости от объемного содержания волокна, расход аморфной металлической фибры был постоянен и составлял 1% по объему, содержание полимерной фибры увеличивалось от 0 до 1 % по объему с шагом составляющим 0,1 %;

- При помощи применения полимерной фибры «VarChip» в комбинации с аморфнометаллической в количестве 1 % по объему, можно добиться повышения прочности на растяжение при изгибе по сравнению с образцом, армированным исключительно аморфной металлической фиброй, так же разрушение такого образца более вязкое, что способствует снижению хрупкости материала.

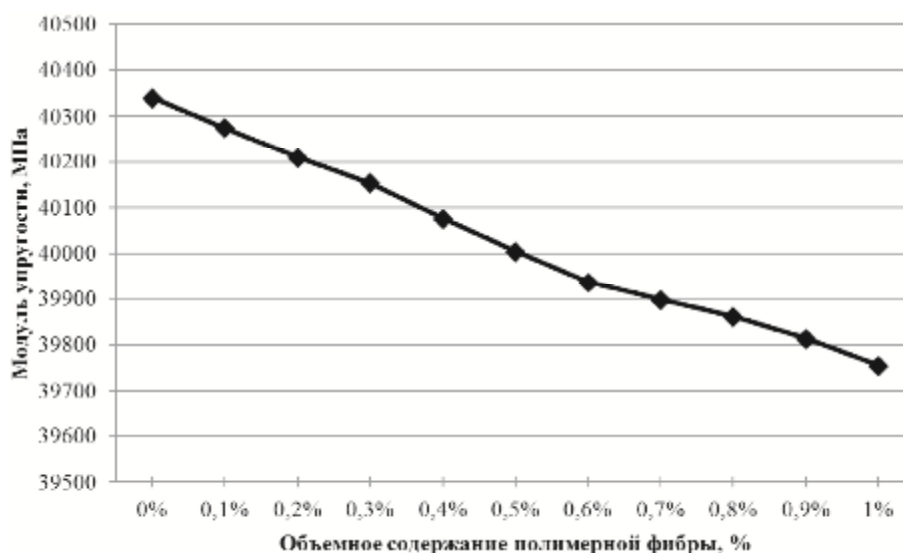


Рис. 3. График зависимости модуля упругости полиармированного фибробетона от объемного содержания аморфнометаллической и полимерной фибры

Требуется и дальнейшее изучение деформативных характеристик фибробетона, как в экспериментальном, так и теоретическом плане, однако и по результатам, полученным в ходе данного эксперимента, можно сделать вывод о том, что при помощи применения полидисперсного армирования, существует возможность регулирования такого важного свойства фибробетона, как модуль упругости.

#### Список библиографических ссылок

1. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У. Полидисперсное армирование строительных композитов // Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века, 2011, № 2. – С. 2.
2. Пухаренко Ю.В., Морозов В.И. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях // Вестник МГСУ, 2014, № 3. – С. 189-196.
3. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У. Полидисперсное армирование строительных композитов – фибробетонов // Технологии бетонов, 2011, № 1-2. – С. 28-29.
4. Пантелеев Д.А. Оценка эффективности полиармирования фибробетона // Вестник гражданских инженеров, 2013, № 6 (41). – С. 102-108.
5. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Эффективность полиармирования фибробетона стальной фиброй разного типоразмера // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2013». Выпуск 1. Том 43. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. – С. 60-64.
6. Магдеев У.Х., Пухаренко Ю.В., 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.
7. Леонович И.А., Леонович А.А. Влияние упругих характеристик композитного материала на свойства фибробетона // Вестник Белорусско-Российского университета, 2007, № 3 (16). – С. 148-155.
8. 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.
9. Харлаб В.Д., Смирнов Д.А. Упругость сталефибробетона // Вестник гражданских инженеров, 2010, № 4 (25). – С. 56-60.

**Panteleev D.A.** – post-graduate student

E-mail: [dm-pant@yandex.ru](mailto:dm-pant@yandex.ru)

**Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering**

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

### **The deformation and strength characteristics of polyreinforced fiber concrete**

#### **Resume**

The aim of the work was to study the deformability and strength characteristics of the fiber-reinforced concrete polyreinforced by using amorphous metal fiber, as well as obtaining new scientific results related to the study of the regularities of the formation of structure and properties of composites based on building the amorphous metal fiber.

Results of comparative tests of tensile strength at bending, prism strength and modulus of fiber concretes samples. Due to the high clutch of amorphous metal fiber with cement stone until the fiber break, while ensuring close cooperation between the amorphous metal fiber with another type of fiber-steel or polymer to form between the frame, managed to increase the strength of the composition on the tensile bending while increasing fracture toughness.

It is experimentally proved that the use of polyreinforcement, due to the difference properties of the fibers and their behavior in the concrete matrix composite provides the ability to manage a complex of properties of fiber-reinforced concrete, affecting up or down on a particular characteristic.

**Keywords:** fiber reinforced concrete, polyreinforcement, prism strength, modulus of elasticity, amorphousmetallic fiber.

#### **Reference list**

1. Pukhareno Yu.V., Aubakirova I.U. Polyreinforcement building of composites // *Stroitelnye materialy, oborudovaniye, tekhnologii 21 veka*, 2011, № 2. – P. 2.
2. Pukhareno Yu.V., Morozov V.I. The effectiveness of fiber-reinforced concrete in structures under dynamic loading // *Vestnik MGSU*, 2014, № 3. – P. 189-196.
3. Pukhareno Yu.V., Aubakirova I.U. Polyreinforcement building of composites – fiber reinforced concrete // *Tekhnologii betonov*, 2011, № 1-2. – P. 28-29.
4. Panteleev D.A. Evaluating the effectiveness of fiber-reinforced concrete // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2013, № 6 (41). – P. 102-108.
5. Pukhareno Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Efficiency polyreinforcement concrete steel fiber of different sizes // *Sbornik nauchnyh trudov SWorld. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye napravleniy teoreticheskikh i prikladnyh issledovaniy 2013»*. Issue 1. Book 43. – Odessa: KUPRIENKO, 2013. – P. 60-64.
6. Magdeev U.H., Pukhareno Yu.V., Morozov V.I., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Investigation of properties steel fiber reinforced concrete based amorphous metal fiber // *Vestnik VolgGASU: Construction and architecture* 2013, Issue 31 (50). – P. 132-135.
7. 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.
8. Smirnov D.A. Elasticity and creep steel of fiber reinforced concrete: *Sbornik dokladov 68-y nauchnoy konferencii professorov, prepodavateley, nauchnyh rabotnikov, inzhenerov I aspirantov universiteta / SPbGASU*. P. IV. – SPb., 2011. – P. 137-142.
9. Kharlab V.D., Smirnov D.A. Elasticity steel fiber reinforced concrete // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2010, № 4 (25). – P. 56-60.