

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛЬНОЙ ФИБРЫ ДЛЯ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ БЕТОНА

MODIFICATION OF THE STEEL FIBERS SURFACE FOR DISPERSE REINFORCEMENT OF CONCRETE

Н.П. Матвейко^{1*}, В.Г. Зарапин¹, В.С. Артимович²

¹ Белорусский государственный экономический университет

² ГП «БелдорНИИ»

УДК 691.328; 669.697

M. Matveika^{1*}, V. Zarapin¹, V. Artimovich²

¹ Belarusian State Economic University

² SE «BeldorNIИ»

РЕФЕРАТ

ФИБРОБЕТОН, СТАЛЬНАЯ ФИБРА, МОДИФИЦИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ, АНКЕРОВКА, ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ

Цель работы – разработка состава композиции для модификации поверхности стальной фибры, используемой в сталефибробетоне, позволяющей усилить анкеровку фибры в бетоне и создать на ней антикоррозионный пассивирующий защитный слой.

Разработан новый состав модифицированной антикоррозионной композиции для обработки стальной фибры. Использование разработанной композиции дает возможность зацементации стальной нити фибры в объеме бетона по всей длине за счет связывания ее поверхности с бетонной матрицей и минимизации возможности беспрепятственного растяжения фибры под действием нагрузок с одновременной защитой фибры от коррозии.

Обработка стальной фибры модифицированной антикоррозионной композицией может быть использована для получения стальных арматурных элементов с усиленными анкерующими свойствами. Обработка поверхности фибры модифицированной антикоррозионной композицией позволяет существенно (более чем на 60 %) повысить предел прочности дисперсно-армированного бетона с одновременной защитой фибры от коррозии, что позволит увеличить долговечность дисперсно-армированных бетонов.

ABSTRACT

FIBER CONCRETE, STEEL FIBER, SURFACE MODIFICATION, ANCHORING, CORROSION PROTECTION

The purpose is to develop composition for surface modification of steel fibers used for steel fiber concrete to strengthen the anchoring fibres in concrete and create it corrosion passivating protective layer.

A new composition of modified anticorrosion compositions is developed for processing of steel fibers. The use of the developed composition allows for steel filament fibers to volume concrete throughout its length by binding the surface with a concrete matrix and to minimize the possibility of unimpeded stretching of the fibers under the action of loads, while still protecting the fibers from corrosion.

Processing of steel fibers modified anticorrosive composition can be used to receive reinforcing steel elements with reinforced anchoring properties. Surface treatment of fiber modified anticorrosion composition can significantly (more than 60 %) increase the tensile strength of dispersion-reinforced concrete, while still protecting the fiber from corrosion, which enables to increase durability dispersion-reinforced concrete.

* E-mail: matveiko_np@mail.ru (M. Matveika)

Большинство строительных сооружений в настоящее время возводится с использованием бетонов. Для увеличения ударной прочности, сопротивления на разрыв, прочности при растяжении и изгибе используют вторичное армирование бетона. В конструкционном бетоне для этих целей применяют стальную арматуру, а в бетонных перекрытиях – металлическую сетку. Однако присутствие в цементных бетонах электролитов приводит к коррозии стальной арматуры, что обуславливает образование пустот, которые являются концентраторами напряжений, ведущими к снижению эксплуатационных свойств. Для улучшения коррозионных свойств конструкций, одного из условий обеспечения качества возводимых зданий и сооружений, применяют новые эффективные строительные материалы, в том числе бетоны, армированные при помощи фибры. Такой бетон (фибробетон) представляет собой композиционный материал, состоящий из цементной матрицы с равномерным или заданным распределением по ее объему ориентированных, но чаще хаотично расположенных волокон (фибр) различного происхождения. В качестве дисперсного армирующего материала (фибр) широко применяют различные волокна. Материалом таких волокон или фибр могут быть металлы, базальт, минеральные, искусственные и синтетические полимеры [1].

Использование фибры позволяет избежать недостатков, которые связаны с коррозией арматуры вследствие минимизации верхнего защитного слоя бетона, поскольку фибра армирует бетон дисперсно и насыщает его по всему объему. В настоящее время самым распространенным вариантом фибры для армированного дисперсным способом бетона является стальная фибра, которая производится различными мировыми производителями в достаточно больших объемах. Использование стальной фибры обусловлено в первую очередь таким свойством стали, как технологическая возможность изготовления фибры различного профиля, размера и состава. Кроме того, стальные фибры имеют более высокие прочностные характеристики по сравнению с фибрами из полимерных материалов или минеральных волокон. Наконец, стоимость стальной фибры и ее производства существенно ниже стоимости фибр из других

материалов [2].

На показатели прочности сталефибробетона существенно влияет качество анкеровки фибр в бетонной матрице. Способов улучшения анкеровки фибры в бетоне существует достаточно много, большинство из которых защищено патентами. Например, существует способ получения стальных арматурных элементов (фибр) для дисперсного армирования бетона с улучшенными анкерующими свойствами, состоящий в изготовлении металлического волокна в виде плоского протяженного основания со сквозной перфорацией, снабженного анкерами из кристаллитов металла [3]. Предлагаются также фибры в виде отрезка проволоки с равномерно деформированными участками, имеющими выступы и впадины в форме волны в трехмерном измерении [4]. Известны фибры в виде проволочного тора эллипсоидного или сферического профиля с выпусками-анкерами в виде усов [5]. Однако такие фибры имеют некоторые недостатки. Во-первых, сложность изготовления стальных арматурных элементов вследствие их непростой конфигурации. Во-вторых, из-за развитости формы такие фибры склонны к комкованию и имеют высокую способность сцепляться между собой с образованием «ежей». Это препятствует их равномерному распределению в бетонной смеси, и, как следствие, приводит к формированию в дисперсно-армированном бетоне областей с повышенным и пониженным содержанием фибры, в результате чего фибробетон состоит из участков с различными физико-механическими характеристиками.

Недостатком стальных фибр, изготовленных, как правило, из низкоуглеродистой стали, является также их низкая коррозионная стойкость, что с учетом малых поперечных сечений стальных арматурных элементов, даже при небольшом коррозионном разрушении фибр в процессе эксплуатации сталефибробетона приводит к существенному снижению его механических свойств. Для повышения коррозионно-защитных свойств поверхности стальной волоконной фибры предлагается, например, проводить ее обработку раствором фосфата цинка [6]. Однако такая обработка позволяет повысить коррозионную стойкость стальной фибры, находящейся в индивидуальном (изолированном) состоянии, а

не в составе фибробетона. Тонкий механически непрочный защитный слой, сформированный обработкой фибры раствором фосфата цинка, разрушается и теряет свои защитные свойства в процессе эксплуатации фибробетона вследствие механических воздействий, приводящих к растяжению и сжатию фибры.

Цель работы – разработка состава композиции для модификации поверхности стальной фибры, используемой в сталефибробетоне, позволяющей усилить анкеровку фибры в бетоне и создать на ней антикоррозионный пассивирующий защитный слой.

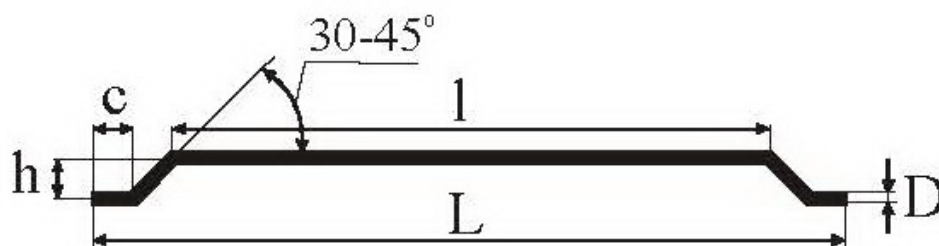
МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Поскольку задачей исследований является исключение или минимизация возможности беспрепятственного растяжения фибры под действием внешних нагрузок, применяя заземление стальной нити фибры по всей ее длине в объеме бетона вследствие повышения ее сцепляемости с бетонной матрицей при одновременной защите от коррозионного разрушения, то в качестве основы композиции для модифицирования фибр использовали антикоррозионные составы, разработанные нами ранее [7]. В эти антикоррозионные составы вводили добавки, способствующие повышению сцепляемости поверхности стальной фибры с бетоном. В качестве таких модифицирующих добавок использовали жидкое стекло, мелкодисперсный кварцевый песок и тонкодисперсную порошковую глину, которые

вводили в антикоррозионные композиции в количестве до 20 мас. %.

Исследование величины сцепляемости стальной поверхности, обработанной модифицированной антикоррозионной композицией, с бетоном проводили на образцах из стали Ст3 (ГОСТ 380-71). Стальные образцы в форме прутьев диаметром 4 мм, обрабатывали модифицированными различными добавками антикоррозионными композициями, анкеровали в смесь, приготовленную из портландцемента ПЦ 500 – Д 20 (ГОСТ 31108-03) и песка в соотношении 1:4 при водоцементном соотношении 1:2 на глубину анкеровки в 25–30 мм. Величину прочности сцепления поверхности стали с бетоном определяли статическим выдергиванием анкерowanych в бетон прутьев после достижения бетоном возраста в 28 суток и рассчитывали сцепляемость (S , МПа) как отношение нагрузки, необходимой для выдергивания анкерowanego прута, к площади поверхности анкеровки.

Дисперсное армирование бетона для исследований влияния обработки фибры на прочность последнего проводили с использованием стандартной стальной фибры, производимой РУП «Белорусский металлургический завод». Фибра выполнена в виде металлической нити с прямолинейным протяженным средним участком и разнесенными от середины сопряженными с ним двумя анкерами (рисунок 1). Такая конструкция позволяет фиксировать элементы фибр за



$$D = 1,1 \pm 0,05 \text{ мм}$$

$$L = 60 \pm 3 \text{ мм}$$

$$h = 3 \pm 2 \text{ мм}$$

$$l = 48 \pm 4 \text{ мм}$$

$$c = 4 \pm 3 \text{ мм}$$

Рисунок 1 – Геометрические параметры стальной фибры

счет анкеровки в бетоне концевых участков.

Поскольку более 80 % длины фибры составляет прямая металлическая нить, основной целью было усилить сцепление с цементным камнем этого прямолинейного участка. Для этого поверхность фибры обрабатывали модифицированной антикоррозионной композицией, усиливающей анкеровку и ингибирующей коррозию. Фибру до закладки в бетонную смесь предварительно обезжировали, а затем погружали в модифицированную антикоррозионную композицию, извлекали и высушили на воздухе. Образцы сталефибробетона готовили на основе цементного раствора, состоящего из 5,5 кг песка, 1,8 кг цемента марки ПЦ-500 и 0,9 кг воды (водоцементное соотношение $V/C = 0,5$), в который вводили 0,285 кг фибры. Образцы готовили в форме балочек размером 40×40×160 мм, которые после формования хранились 28 суток в камере нормального твердения, после чего их испытывали на растяжение при изгибе в соответствии с ГОСТ 310.4 – 81.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам проведенных исследований было установлено, что наилучшей модифицирующей добавкой к антикоррозионным составам для усиления сцепляемости поверхности стальных фибр с бетоном является тонкодисперсная глина. Антикоррозионные композиции с жидким стеклом и кварцевым песком не позволяют добиться достаточного эффекта увеличения сцепляемости стальной фибры с бетоном.

Глина является наиболее перспективным модифицирующим компонентом антикоррозионной композиции для улучшения адгезивных свойств поверхности стали по отношению к бетону, во-первых, потому что она достаточно химически устойчива и способна образовывать с антикоррозионной композицией коллоидные дисперсные системы. Во-вторых, глина широко распространена, поэтому доступна и имеет низкую стоимость.

Глина представляет собой мелкозернистую осадочную горную породу, пылевидную в сухом состоянии, состоящую преимущественно из оксида кремния (~ 47 мас. %) и оксида алюминия (~ 39 мас. %) с диаметром частиц менее 5 мкм [8]. Поскольку глина является одним из видов сырья при производстве цемента, ее применение

в качестве наполнителя и создание на ее основе модифицированной антикоррозионной композиции в дисперсно-коллоидном состоянии представляется вполне обоснованным.

Экспериментально установлено, что среди антикоррозионных составов [7], наибольшую эффективность для получения модифицирующей композиции показал состав, содержащий 24 г/дм³ фосфата цинка, и 98 г/дм³ ортофосфорной кислоты (75 %). В качестве модифицирующей добавки к антикоррозионной композиции использовали глину белую (анапскую), представляющую собой тонкодисперсный порошок светло-серого цвета, содержащий не более 1,5–2 % влаги. Введение глины к антикоррозионному составу выполняли при непрерывном перемешивании раствора, что позволило равномерно распределить частицы глины во всем объеме и перевести их во взвешенное, достаточно устойчивое во времени состояние. Частичная седиментация суспензии глины происходит примерно через 6–8 часов, однако при кратковременном перемешивании или встряхивании композиция вновь приобретает однородность.

На рисунке 2 приведена зависимость сцепляемости (S , МПа) бетонной смеси с поверхностью стальных образцов, обработанных модифицированной антикоррозионной композицией, от содержания в ней глины, полученная по результатам статического выдергивания анкерowanych в бетон стальных прутьев.

С увеличением содержания добавки – глины – в композиции вначале имеет место возрастание сцепляемости, а потом ее снижение. Добавка мелкодисперсной глины, компоненты которой в большинстве своем по отношению к компонентам антикоррозионной композиции являются инертными веществами, скорее всего, приводит к формированию более прочной и устойчивой пленки с более высокой шероховатостью поверхности. Кроме того, поскольку глина входит в состав портландцемента, из которого изготавливают бетонные смеси, адгезионные силы между компонентами бетона и фосфатными частицами, содержащими аналогичные компоненты, выше, чем без них. В результате получается плавное распределение микрочастиц кремнезема и глинозема между защитным слоем и объемом бетона. Все эти факторы, очевидно, приводят к

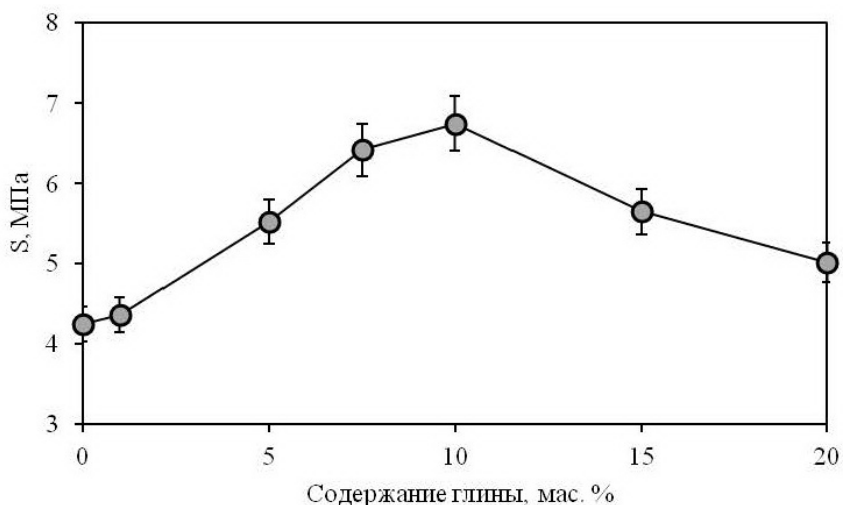


Рисунок 2 – Зависимость сцепляемости бетона со сталью, обработанной модифицированной антикоррозионной композицией, от содержания в ней глины

увеличению сил сцепления бетонной смеси со стальными поверхностями, обработанными модифицированными глиной антикоррозионными композициями. При достаточно высоком содержании глины в композициях, вероятно, количество микрочастиц глины превышает некоторый предел, после которого сцепление частиц защитной пленки на поверхности стали становится меньше, и при больших количествах глины в составе композиций образуется менее прочный слой, что приводит к снижению сцепляемости поверхности стали с бетоном.

Таким образом, установлено, что для обработки стали наиболее эффективно использовать модифицированную добавлением глины до 10 мас. % антикоррозионную композицию, что позволяет увеличить сцепляемость поверхности стали с бетоном в 1,85 раза по сравнению со сцепляемостью необработанной поверхности. Интересно отметить, что обработка поверхности стали антикоррозионной композицией, содержащий 24 г/дм^3 фосфата цинка, и 98 г/дм^3 ортофосфорной кислоты (75 %), но не модифицированной глиной также увеличивает сцепляемость с бетоном, но лишь на 16 %.

В таблице 1 представлены результаты испытаний на растяжение при изгибе образцов бетона без наполнителя и с тремя видами наполнителей: из стальной фибры, не подвергнутой обработке; из стальной фибры, обработанной

антикоррозионной композицией; из стальной фибры, обработанной модифицированной антикоррозионной композицией.

Актуальность проведенных исследований обусловлена тем, что стальная фибра, применяемая для дисперсного армирования бетона, не имеет химической связи с бетоном, обладает низкой сцепляемостью, и не позволяет в достаточной степени образовывать прочную анкеровку. Стальная фибра обладает малым поперечным сечением и при эксплуатации подвергается коррозии и разрушению, что существенно снижает прочность дисперсно-армированных бетонов. Эти недостатки устраняются использованием нового разработанного состава модифицированной антикоррозионной композиции для обработки стальной фибры.

Научной новизной проведенных исследований является возможность заземления стальной нити фибр в объеме бетона по всей длине за счет связывания ее поверхности с бетонной матрицей и минимизации возможности беспрепятственного растяжения фибры под действием нагрузок с одновременной защитой фибры от коррозии.

Практическое значение результатов исследований заключается в том, что разработанная композиция для обработки стальной фибры для дисперсного армирования бетонов состоит из недорогих исходных компонентов, что позво-

Таблица 1 – Результаты определения предела прочности образцов бетона

№ обр.	Тип фибры	Дозировка фибры, масс. %	Разрушающая нагрузка, Н	Предел прочности, МПа
1	без фибры	нет	2295,20	5,34
2	без фибры	нет	2310,40	5,26
3	без фибры	нет	2314,50	5,24
4	фибра без обработки	0,0285	3198,90	7,24
5	фибра без обработки	0,0285	2681,94	6,07
6	фибра без обработки	0,0285	3085,72	7,00
7	фибра, обработанная антикоррозионной композицией	0,0285	3008,47	6,97
8	фибра, обработанная антикоррозионной композицией	0,0285	2868,79	6,48
9	фибра, обработанная антикоррозионной композицией	0,0285	2845,09	6,36
10	фибра, обработанная модифицированной антикоррозионной композицией	0,0285	4824,11	11,20
11	фибра, обработанная модифицированной антикоррозионной композицией	0,0285	4139,26	9,61
12	фибра, обработанная модифицированной антикоррозионной композицией	0,0285	5551,65	12,00

ляет минимизировать денежные затраты на ее производство. Результаты работы могут быть внедрены в практику обработки стальной фибры для дисперсного армирования бетонов при производстве изделий и сооружений из сталефибробетона в гражданском и промышленном строительстве, дорожном строительстве, мостостроении.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных экспериментальных исследовательских работ установлено, что обработка стальной фибры модифициро-

ванной глиной антикоррозионной композицией может быть использована для получения стальных арматурных элементов с усиленными анкерующими свойствами. Обработка поверхности фибры модифицированной глиной антикоррозионной композицией позволяет существенно (более чем на 60 %) повысить предел прочности дисперсно-армированного бетона с одновременной защитой фибры от коррозии, что позволит увеличить долговечности дисперсно-армированных бетонов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Войлоков, И.А. (2007), Армирование фиброй как средство улучшения коррозионной стойкости бетона. *Инфострой*, 2007, № 3 (33), С. 42-44.
2. Савченко, В. Сталефибробетон – новый конструкционный материал (2013), режим доступа: <http://allby.tv/article/2167/stalefibrobeton-novyiy-konstruktsionnyiy-material> (дата доступа: 20.01.2017).
3. Ахметшин, М.Р., Ахметшин, Р.Р., Ласковский, С.И., Подольский, В.А., Ткаченко, В.А., Штейнерт, В.А. (2006), Металлическое волокно В.А. Шейнерта. *Патент РФ № 2278180*, МПК С 22 С 49/14, опубл. 20.06.2006.
4. Шеметов, Г.В., Аксанов, Р.М., Камалутдинов, И.М., Камалутдинов, М.К. (2011), Арматурный элемент для дисперсного армирования бетона. *Патент РФ № 2433227*, МПК Е 04 С 5/00, опубл. 10.11.2011.
5. Трофимов, В.И., Данилова, О.Г., Лопиков, Р.И., Соколов, Э.В. (2013), Арматурный элемент для дисперсного армирования бетона. *Патент РФ № 2490406*, МПК Е 04 С 5/03, опубл. 20.08.2013.
6. Son, M. (2014), Corrosion protection method of steel fibers. *Patent CN 103787603 A*, C04B 14/48, Suzhou Institute of Technology, China, publ. 14.05.2014.
7. Матвейко, Н.П., Зарапин, В.Г., Бусел, Е.А. (2012), Антикоррозионная композиция для защиты арматуры и закладных деталей железобетона. *Вестник ВГТУ*, 2012, Вып. 23, С. 113-119.
8. Ceramic portal.ru (2013), режим доступа: <http://ceramicportal.ru/articles/keramicheskye-massy.htm> (дата доступа: 16.01.2017).

REFERENCES

1. Voilokov, I.A. (2007), Reinforcement fiber reinforcement as a means of improving the corrosion resistance of concrete [Armirovaniye fibroj kak sredstvo uluchsheniya korrozionnoj stoikosti betona], *Infostroj – Infostroy*, 2007, № 3 (33), P. 42-44.
2. Savchenko, V. *Stalefibrobeton – novyj konstruktsionnyj material* [Steel fiber reinforced concrete – a new construction material] (2013) [Electronic resource]. Access: <http://allby.tv/article/2167/stalefibrobeton-novyiy-konstruktsionnyiy-material>. Access Date: 20.01.2017.
3. Ahmetshin, M.R., Ahmetshin, R.R., Laskovskij, S.I., Podolskij, V.A., Tkachenko, V.A., Shteinert, V.A. (2006), *Metallicheskoe volokno V.A. Shteinerta* [Metallic fiber V.A. Sheinart], Patent RF № 2278180, МПК С 22 С 49/14, publ. 20.06.2006.
4. Shemetov, G.V., Aksanov, R.M., Kalamutdinov, I.M., Kalamutdinov, M.K. (2011), *Armaturnyj element dlja dispersnogo armirovanija betona* [Reinforcing element for dispersed reinforcement of concrete], Patent RF № 2433227, МПК Е 04 С 5/00, publ. 10.11.2011.
5. Trofimov, V.I., Danilova, O.G., Lopakov, R.I., Sokolov, E.V. (2013), *Armaturnyj element dlja dispersnogo armirovanija betona* [Reinforcing element for dispersed reinforcement of concrete], Patent RF № 2490406, МПК Е 04 С 5/03, publ. 20.08.2013.
6. Son, M. (2014), Corrosion protection method of steel fibers. Patent CN 103787603 A, C04B 14/48, Suzhou Institute of Technology, China, publ. 14.05.2014.
7. Matveiko, N.P., Zarapin, V.G., Busel, E.A. (2012), Anticorrosive composition for protection of reinforcement and embedded parts of reinforced concrete [Antikorrozionnaja kompozicija dlja zaschity armatury i zakladnyh

detalej zhelezobetona], *Vestnik VGTU – Vestnik VSTU*, 2012, Edit. 23, P. 113-119.

8. Ceramic portal.ru (2013) [Electronic resource]. Access: http://ceramicportal.ru/articles/keramicheskyye_massy.htm. Access Date: 16.01.2017.

Статья поступила в редакцию 21. 02. 2017 г.