

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА ГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ БЕТОНА И ФИБРЫ С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

## PECULIARITIES OF STRUCTURE AND COMPOSITION OF BOUNDARY LAYERS OF CONCRETE AND FIBER WITH MODIFIED SURFACE

УДК 691.328; 669.697

**Н.П. Матвейко<sup>1\*</sup>, В.Г. Зарапин<sup>1</sup>, В.Г. Лугин<sup>2</sup>,  
В.С. Артимович<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Белорусский государственный экономический университет

<sup>2</sup> Белорусский государственный технологический университет

<sup>3</sup> ГП «БелдорНИИ»

<https://doi.org/10.24411/2079-7958-2018-13508>

**M. Matveika<sup>1\*</sup>, V. Zarapin<sup>1</sup>, V. Lugin<sup>2</sup>,  
V. Artimovich<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Belarusian State Economic University

<sup>2</sup> Belarusian State University of Technology

<sup>3</sup> SE «BeldorNI»

### РЕФЕРАТ

СТАЛЬНАЯ ФИБРА, МИКРОСТРУКТУРА, СЦЕПЛЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТЬЮ, ФИБРОБЕТОН, АНКЕРУЮЩАЯ КОМПОЗИЦИЯ

*Цель работы – изучить микроструктуру и химический состав граничных слоев бетона и фибры, обработанной антикоррозионной и анкерующей композициями, и их влияние на механические свойства сталефибробетона.*

*Методами электронной микроскопии и микрорентгеновского анализа установлено, что обработка стальной фибры антикоррозионной композицией на основе фосфата цинка и ортофосфорной кислоты, а также анкерующей композицией, модифицированной белой глиной, приводит к химическому сцеплению цементного камня бетона с поверхностью фибр.*

*Обработка поверхности фибры модифицированной глиной анкерующей композицией позволяет формировать механически прочный слой, объединяющий контактирующие фазы цементного камня бетона и анкерующего покрытия на фибре. Использование анкерующей композиции приводит к образованию промежуточных слоев из продуктов взаимодействия компонентов покрытия на фибре и цементного камня бетона,*

### ABSTRACT

STEEL FIBER, MICROSTRUKUR, CLUTCH WITH SURFACE, FIBROBETON, ANCHORING COMPOSITION

*The purpose of the research is to study the microstructure and chemical composition of the boundary layers of concrete and fiber treated with anticorrosive and anchoring compositions and their influence on the mechanical properties of steel-fiber-reinforced concrete.*

*Using electron microscopy and micro-X-ray analysis, it has been found that the treatment of steel fiber with an anticorrosive composition based on zinc phosphate and orthophosphoric acid, and also with an anchoring composition modified with white clay, leads to the chemical bonding of the cement stone of concrete to the surface of the fibers.*

*The treatment of the surface of the fiber with a clay-modified anchoring composition allows the formation of a mechanically strong layer that combines the contacting phases of the concrete cementitious cement and the anchoring coating on the fiber. The use of the anchoring composition leads to the formation of intermediate layers from the interaction products of the coating components on the fiber and the cement concrete stone, which combine the contact-*

\* E-mail: [matveiko\\_np@mail.ru](mailto:matveiko_np@mail.ru) (M. Matveika)

*которые объединяют контактирующие фазы. Прочность зоны контакта цементного камня и сила его химического связывания с анкерующей композицией на поверхности фибр дает возможность зацементирования стальной нити фибр по всей длине, минимизирует возможность беспрепятственного растяжения фибры под действием нагрузок, что приводит к повышению предела прочности дисперсно-армированного бетона.*

*ing phases. The strength of the contact zone of cement stone and the strength of its chemical bonding with the anchoring composition on the surface of the fibers makes it possible to pinch the steel filament along the entire length, minimizing the possibility of unobstructed stretching of the fiber under the action of loads, which leads to an increase in the strength of the dispersed reinforced concrete.*

Свойства бетона, как конгломератного материала, во многом зависят от прочности сцепления цементного камня с поверхностью заполнителей, и в идеале она должна соответствовать прочности цементного камня. Прочность сцепления для одинакового цементного клея зависит от микрорельефа поверхности, состава и химических свойств заполнителей. Поскольку фибра, используемая для дисперсного армирования, является заполнителем наряду с песком и каменными материалами, то прочность сцепления с ее поверхностью цементного камня также будет в конечном итоге определять прочность армированного ею бетона.

При твердении цемента в результате химических реакций между цементными зернами возникают пространственные связи (цемент «схватывается») и объем между зернами цемента заполняется иглообразными кристаллами «алюминатной структуры» ( $3Ca \cdot Al_2O_3$ ). Затем в ней формируются продукты гидратации клинкерных минералов  $3Ca \cdot SiO_2$  и  $2Ca \cdot SiO_2$ , образующие мелкокристаллический тонкопористый ворс – силикатную структуру, которая обеспечивает прочность цементного камня, и к возрасту в 28 суток в основном остается только она. Затвердевший цементный камень содержит три основные фазы: алитовую (фазу трехкальциевого силиката), белитовую (фазу двухкальциевого силиката) и алюминатную (фазу трехкальциевого алюмината) [1].

Если заполнитель по отношению к цементному камню химически инертен, то прочность адгезионного сцепления цементного камня с ним обеспечивается преимущественно за счет зацепления за неровности поверхности, а контактирующие с заполнителем слои цементного

камня обычно имеют повышенные плотность и прочность [2]. Если заполнитель способен образовывать химические связи с цементным камнем, то между ними, преимущественно на стадии тестообразного цементного камня, возможно протекание химических взаимодействий, приводящих к формированию промежуточных слоев из продуктов взаимодействий, которые объединяют контактирующие фазы. Если прочность контактной зоны сопоставима с прочностью цементного камня в объеме бетона, то это повышает однородность бетона в напряженном состоянии и увеличивает его прочность [2].

Ранее нами было установлено, что обработка фибры модифицирующей композицией, содержащей фосфат цинка, ортофосфорную кислоту и белую глину, существенно увеличивает предел прочности сталефибробетона [3].

Цель работы – изучить микроструктуру и химический состав граничных слоев бетона и фибры, обработанной антикоррозионной и анкерующей композициями, и их влияние на механические свойства сталефибробетона.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы сталефибробетона для исследований готовили с использованием стальной фибры, производимой РУП «Белорусский металлургический завод». Для изучения химического сцепления поверхности фибры с цементным камнем бетона поверхность фибры модифицировали обработкой ингибирующей коррозию композицией, усиливающей анкеровку.

Для исследований были подготовлены образцы сталефибробетона с фиброй, обработанной анкерующим составом, а для сравнительного анализа – с фиброй, обработанной антикоррозионным составом, и с необработанной фиброй.

Фибру, модифицируемую антикоррозионной и анкерующей композициями, до закладки в бетонную смесь погружали в соответствующую композицию на 30 минут, извлекали и высушивали 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 фибру. После формования образцы хранили 28 суток в камере нормального твердения, а затем на воздухе в течение 11 месяцев. Предположительно, по истечении указанного срока, подавляющее большинство структурных изменений в цементном камне бетона должно завершиться.

Для проведения исследований образцы разрушали, извлекали элементы фибр, а из бетона вырезали участки со следами контакта между фиброй и бетоном. Изучение микроструктуры поверхности извлеченных из бетона фибр и следы контакта фибр с бетоном проводили на электронном микроскопе JSM-5610 LV (Jeol, Япония). Химический состав изучали методом микро-рентгеновского анализа с помощью приставки EDX JED-2201 к этому микроскопу. Расчет содержания элементов проводился автоматически с учетом сечений фотоионизации элементов.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При извлечении необработанной фибры из бетона было установлено, что сцепление поверхности такой фибры с бетоном практически отсутствует, ее прямолинейные участки извлека-

лись из бетонных «гнезд» почти без сопротивления, а извлеченная фибра была внешне идентична фибре до анкеровки. Отсутствие сцепления с бетоном можно объяснить наличием на фибре тонкой масляной пленки, нанесенной производителем в качестве защитного покрытия, поэтому свои анкерующие свойства такая фибра обеспечивает только за счет изогнутых анкерных участков на краях фибры [3].

Микрофотографии необработанной фибры, извлеченной из бетона, приведены на рисунке 1, из которых видно, что на ее поверхности присутствуют следы от вытяжки проволоки и микротрещины, которые, видимо, образовались при вытяжке. На поверхности фибры обнаружены фрагменты цементного камня размерами до 30 мкм, образовавшиеся за счет его сцепления с крупными микротрещинами за счет проникновения в них микрокристаллов цементного камня. Также на поверхности фибры видны следы отделения фрагментов металла размером от 2 до 20 мкм.

Микрофотографии поверхности следа от необработанной фибры в бетоне приведены на рисунке 2, из которого видно, что контактирующий с заполнителем-фиброй слой бетона имеет более плотную структуру, чем его остальные участки, что согласуется с [2]. Цементный камень сформирован мелкими кристаллитами с размерами зерна 1–5 мкм, среди которых встречаются отдельные игольчатые кристаллы, размерами 8–12 мкм длиной и до 2 мкм в поперечнике,

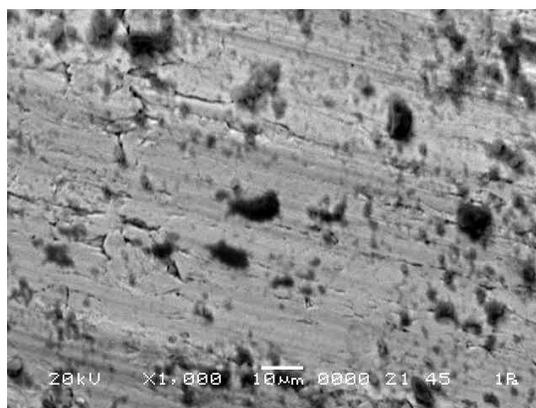


Рисунок 1 – Микроструктура поверхности необработанной фибры, извлеченной из бетона

возможно, остатки алюминатной структуры [1].

На микрофотографиях также видны отделившиеся от поверхности фибры микрочастицы стали (светлые фрагменты с высокой отражательной для электронов способностью) размерами 1–10 *мкм*. С учетом того, что при извлечении фибр не выявлено их сцепления с бетоном, можно заключить, что отделение этих частиц обусловлено наличием дефектов (отделяющихся фрагментов) в проволоке фибр. В противном случае такие частицы оказывали бы анкерующее действие, и сцепление поверхности фибры с цементным камнем было бы более значительным. В контактном слое бетона с фиброй имеются отдельные поры-пустоты, по размерам совпадающие с размерами фрагментов цементного камня, обнаруженного на извлеченной из бетона фибре, из чего можно заключить, что эти поры образованы за счет отделения фрагментов цементного камня при извлечении фибры.

В рентгеновском спектре граничного слоя бетона и необработанной фибры зарегистрированы интенсивные рентгеновские характеристические линии *O*, *Ca*, *Si*, *Fe*, а также слабые линии *Al*, *S* и *Mg*. При проведении микрорентгеновского анализа, как сказано выше, расчет содержания элементов проводился автоматически с учетом сечений фотоионизации элементов. Получены следующие количественные соотношения элементов (в ат. %): *O* (45,94 %), *Ca* (30,88 %), *Si* (14,13 %), *Fe* (4,73 %), *Al* (1,97 %), *S* (1,47 %), *Mg* (0,88 %).

Исходя из установленного количественного содержания элементов, можно заключить, что основными фазами в граничном слое являются алитовая и белитовая, а содержание алюминатной фазы не превышает 2 %. Обнаруженное наличие железа в количестве около 5 ат. % подтверждает присутствие на границе раздела частиц стали, отделившейся от фибры, поскольку в бетоне на основе портландцемента алюмоферритовая фаза присутствует в гораздо меньших количествах.

При извлечении из бетона фибр, обработанных антикоррозионной композицией, было установлено, что существенного сцепления их с бетоном не происходит, однако на извлеченных из бетона фибрах, в отличие от фибр без обработки, присутствуют частицы бетонного камня.

Микрофотографии фибры, обработанной антикоррозионной композицией до закладки в бетон и извлеченной из бетона, приведены на рисунках 3 и 4 соответственно. Из рисунка 3 видно, что фибру до закладки покрывает фосфатный пассивирующий слой, по своей структуре практически идентичный защитному покрытию, рассмотренному нами в работе [4]. Это защитное покрытие из антикоррозионной композиции содержит микротрещины шириной 0,5–1 *мкм* и поры размером до 30 *мкм*, окруженные игольчатыми кристаллитами толщиной менее 0,5 *мкм*. Появление трещин обусловлено усадкой композиции при ее высыхании, а поры, вероятно, образовались в точках остатков масляной пленки

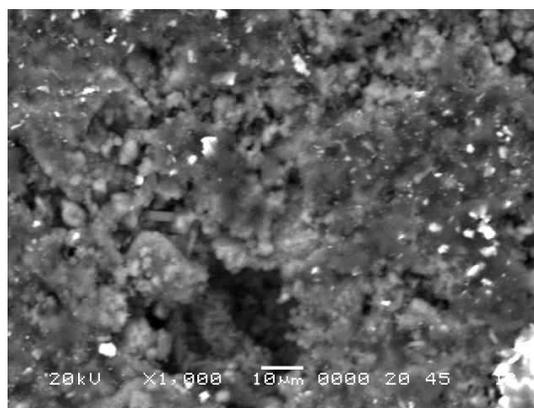


Рисунок 2 – Микроструктура поверхности следа в бетоне от необработанной фибры

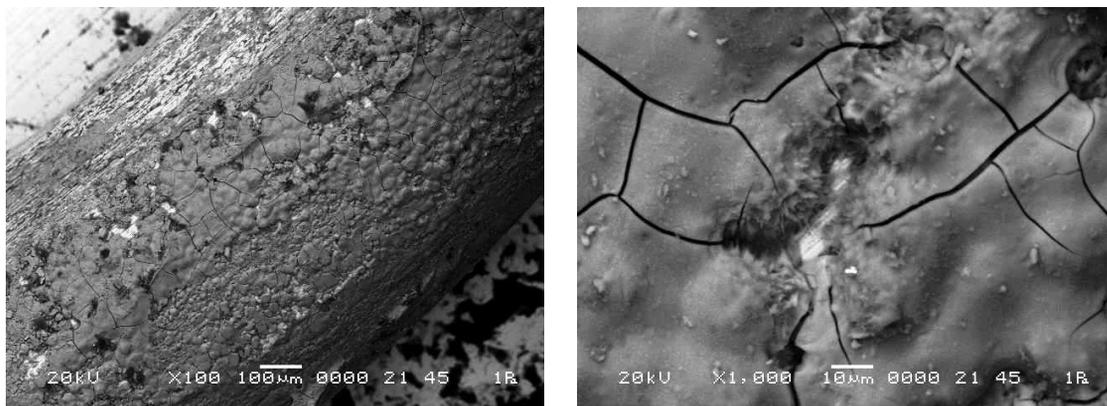


Рисунок 3 – Микроструктура поверхности фибры, обработанной антикоррозионной композицией, до закладки в бетон

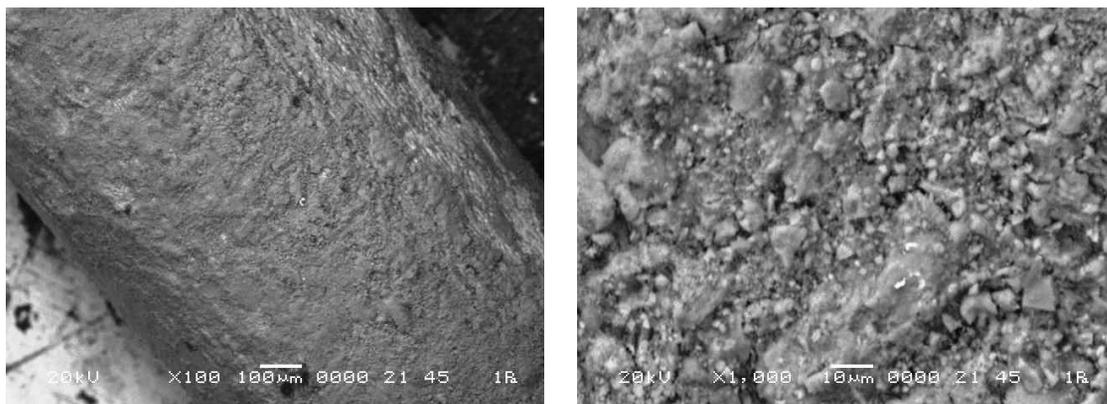


Рисунок 4 – Микроструктура поверхности фибры, обработанной антикоррозионной композицией, после извлечения из бетона

на поверхности фибр, которая не полностью удалась при нанесении композиции.

Из рисунка 4 видно, что поверхность извлеченных из бетона фибр покрыта микрокристаллами размером 1–3 мкм, среди которых расположены достаточно крупные агломераты размером до 50 мкм. Структура этих кристаллитов сходна с контактными слоями бетона, приведенным на рисунке 2, из чего можно заключить, что поверхность фибр покрыта слоем бетона, сцепленным с антикоррозионной композицией. Следовательно, при извлечении фибр, покрытых антикоррозионной композицией, из бетона разрушение происходит в слоях цементного камня.

Области контактов между цементным камнем (компонентом бетона) и антикоррозионной композицией, а также между композицией и поверхностью фибры имеют более высокое сцепление, чем между частицами самого цементного камня. Ранее нами установлено [3], что антикоррозионное покрытие не оказывает существенного влияния на предел прочности сталефибробетона. Возможно компоненты антикоррозионного покрытия – фосфаты цинка и железа, снижают силы сцепления кристаллов цементного камня между собой.

При микрорентгеновских исследованиях поверхности фибры, покрытой антикоррозионной

композицией до закладки в бетон был получен следующий элементный состав (в ат. %): **O** (48,23 %), **Fe** (28,26 %), **P** (17,42 %), **Zn** (3,05 %), **Al** (1,40 %), **Si** (0,91 %), **Ca** (0,45 %), **Mg** (0,29 %). Из данных об элементном составе можно заключить, что пассивирующее покрытие из антикоррозионной композиции сформировано фосфатами железа и цинка. Существенное количество обнаруженного железа обусловлено возбуждением его характеристических рентгеновских квантов в стали фибры через поры и трещины в покрытии. Присутствие в покрытии незначительного количества **Al**, **Si**, **Ca** и **Mg**, скорее всего, обусловлено их примесями в стали фибры и в реактивах, использованных для приготовления антикоррозионной композиции. Кроме того, эти элементы могли диффундировать из стали в пленку композиции и сегрегироваться в ее приповерхностном слое, создавая эффект незначительного (0,3...1,5 ат. %) присутствия.

При микрорентгеновском анализе поверхности фибры, извлеченной из бетона, получено следующее соотношение элементов (в ат. %): **O** (47,35 %), **Ca** (22,53 %), **Fe** (16,27 %), **Si** (4,24 %), **P** (3,53 %), **Zn** (2,92 %), **Al** (1,98 %), **S** (1,18 %). Такой элементный состав соответствует «усредненному» составу антикоррозионной композиции и цементного камня: количество кальция примерно в 1,5 раза ниже, чем в цементном камне, а количество железа и фосфора соответственно в 1,8 и 5 раз ниже, чем в пленке антикоррозион-

ной композиции.

Известно, что выход характеристического рентгеновского излучения при возбуждении поверхности электронным пучком происходит с глубины до 1 *мкм*. Поскольку на микрофотографиях (рисунок 4) видно, что толщина слоя бетона и его отдельных микрокристаллов значительно больше 1 *мкм*, то присутствие элементов антикоррозионной композиции может свидетельствовать о том, что при схватывании цемента происходит смешение и сращивание кристаллитов цементного камня и антикоррозионной композиции.

Важно отметить, что содержание цинка около 3 ат. % на поверхности фибры, извлеченной из бетона, практически идентично его количеству, обнаруженному в антикоррозионной композиции до закладки ее в бетон. Вероятно катионы и фосфат цинка принимают наибольшее участие в формировании «объединенных» с цементным камнем кристаллитов, которые обладают более низкой силой сцепления между собой, чем кристаллы самого цементного камня, и прочность сталефибробетона не возрастает несмотря на химическое связывание поверхности стальной фибры с цементным камнем.

Микрофотографии поверхности следа в бетоне от фибры, обработанной антикоррозионной композицией, приведены на рисунке 5, из которых видно, что, как и в случае необработанной фибры, слой бетона, контактирующий с фиброй,

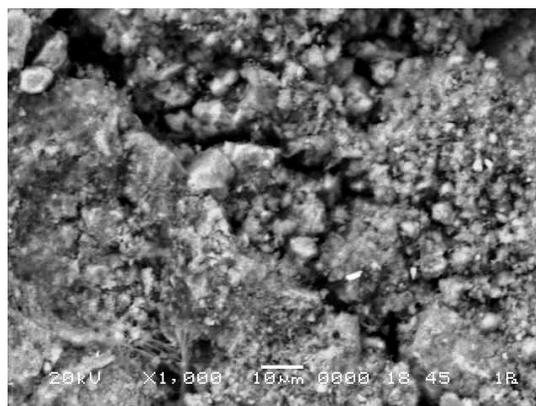


Рисунок 5 – Микроструктура поверхности следа в бетоне от фибры, обработанной антикоррозионной композицией, не содержащей глины

имеет более плотную структуру, чем остальной бетон. Причем этот слой был частично разрушен при извлечении фибры – присутствуют следы (впадины и трещины) отделения фибры от цементного камня. Видно, что цементный камень сформирован мелкими кристаллитами размером 1–5 мкм с включением игольчатых микрокристаллов алюминатной фазы, размеры которых коррелируют с данными рисунка 2.

Микрорентгеновский анализ поверхности следа показал следующее соотношение элементов (в ат. %): **O** (58,74 %), **Ca** (25,52 %), **Si** (7,11 %), **P** (2,87 %), **Al** (2,31 %), **Fe** (1,51 %), **S** (1,17 %), **Mg** (0,52 %), **Zn** (0,25 %). Количество кислорода, кальция, алюминия и кремния возросло, по сравнению с их количеством на поверхности фибры, что обусловлено преимущественным присутствием на поверхности следа кристаллитов цементного камня. В граничном слое также обнаружены фосфор, железо и цинк в количестве, на порядок меньшем, чем в поверхностном слое фибры, извлеченной из бетона. Можно заключить, что отделившийся вместе с фиброй цементный камень насыщен фосфатами цинка и железа, что обеспечило его химическое сцепление с пассивирующим покрытием из антикоррозионной композиции. Однако это насыщение приводит к возникновению напряженного состояния между слоями, обогащенными и обедненными фосфатами, и, как следствие, к появлению микротрещин и легкому отделению

их друг от друга при извлечении фибры.

При извлечении из бетона фибры, обработанной анкерующей антикоррозионной композицией, модифицированной глиной, установлено, что в отличие от предыдущих образцов, фибра из бетона извлекалась с большим усилием, и на ее поверхности заметны остатки цементного камня. Микрофотографии фибры, обработанной анкерующей композицией, модифицированной глиной, до закладки в бетон и извлеченной из бетона, приведены на рисунках 6 и 7 соответственно.

Из рисунка 6 видно, что структура пленки анкерующей композиции с глиной существенно отличается от пленки, образуемой антикоррозионной композицией без нее. Покрытие сформировано протяженными слоями, идущими вдоль оси проволоки фибры. Ширина слоев варьируется от 5 до 25 мкм, между ними различимы щели шириной 0,5–2 мкм. Отдельные кристаллиты в этих слоях не просматриваются, но по внешнему виду самой структуры можно предположить, что покрытие сформировано плоскими, плотно прилегающими друг к другу микрокристаллами, растущими в направлении от поверхности фибры. На поверхности фибры, как видно из рисунка 6, также имеются участки, сформированные локализованными областями скопления кристаллитов размером 1–5 мкм и субмикрокристаллов, размеры которых значительно меньше 1 мкм. Причиной формирования

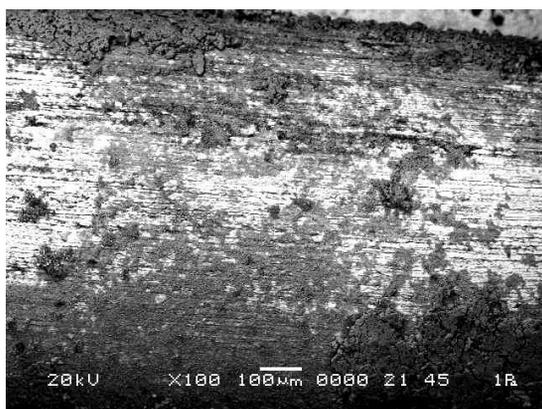


Рисунок 6 – Микроструктура поверхности фибры, обработанной антикоррозионной композицией, содержащей глину, до закладки в бетон

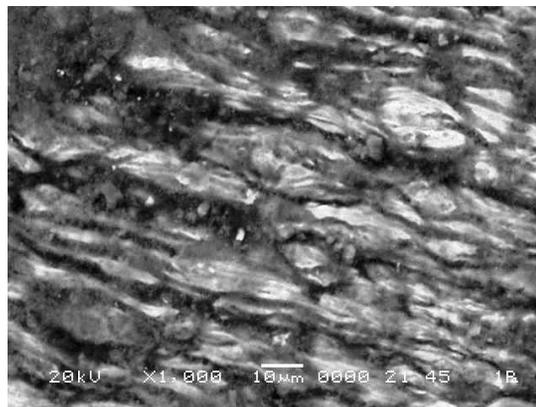
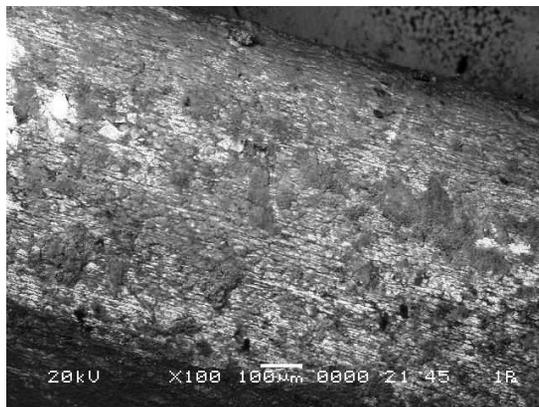


Рисунок 7 – Микроструктура поверхности фибры, обработанной антикоррозионной композицией, содержащей глину, после извлечения из бетона

такой двойной структуры покрытия фибры может являться разброс частиц глины по размерам. Анкерующая композиция с глиной представляет собой суспензию, состоящую из дисперсных частиц глины, равномерно распределенных в водном растворе, содержащем фосфат цинка и ортофосфорную кислоту. Часть достаточно крупных частиц глины седиментирует из суспензии на поверхность фибр достаточно быстро. Эти частицы формируют слоистую основу покрытия. Однако в суспензии присутствуют субмикрочастицы, которые находятся во взвешенном состоянии достаточно продолжительное время, возможно из-за формирования вокруг них сольватных оболочек. Осаждение этих частиц происходит гораздо медленнее, в основном, по мере высыхания композиции на поверхности фибр, и, в первую очередь, вокруг активных центров на поверхности, наподобие центров кристаллизации. Видимо из таких частиц формируется локально распределенные по поверхности зоны скопления микрочастиц.

Из рисунка 7 видно, что после извлечения фибр из бетона основа покрытия в виде слоистой структуры почти не нарушается, лишь изменяется ее внешний вид – из вытянутых параллельных слоев образуется подобие чешуйчатой основы. Это может быть обусловлено взаимодействием анкерующего покрытия с водной средой цементного теста в период его схватывания и частичного растворения слоя анкерующего покрытия. На поверхности фибр присутствуют

фрагменты цементного камня, преимущественно в виде микрочастиц. Можно предположить, что при отделении фибры от бетона разрушение происходит по цементному камню. При обработке фибр анкерующей композицией, содержащей глину, имеет место существенное усиление сцепления фибр с бетоном [3], то есть силикатная структура цементного камня не ослабляется, а прочность контактной зоны между цементным камнем и анкерующим покрытием на фибре не ниже, чем прочность самого цементного камня.

При проведении микрорентгеновского анализа покрытия фибры, обработанной анкерующей композицией, содержащей глину, до ее закладки в бетон получено следующее соотношение элементов (в ат. %): **O** (38,72 %), **P** (19,67 %), **Fe** (18,37 %), **Si** (10,52 %), **Al** (6,45 %), **Zn** (5,74 %), **Ca** (0,42 %), **Mg** (0,11 %). Покрытие состоит из фосфатов железа и цинка, а также компонентов глины – оксидов кремния и алюминия.

Микрорентгеновский анализ поверхности фибры, извлеченной из бетона, дал следующее соотношение элементов (в ат. %): **O** (38,16 %), **Ca** (21,52 %), **Si** (17,66 %), **Fe** (14,16 %), **Al** (2,54 %), **P** (2,47 %), **Zn** (1,94 %), **S** (1,55 %). Видно, что содержание кальция и кремния в поверхностном слое значительно выше, чем в покрытии на фибре до закладки в бетон, что подтверждает присутствие на поверхности фибры цементного камня.

Необходимо отметить, что количество цинка на поверхности фибры с анкерующим покрытием с глиной, после ее извлечения из бетона,

в ~1,5 раза меньше, чем на поверхности фибры с антикоррозионным покрытием без глины. Поскольку присутствие в анкерующей композиции глины приводит к значительному увеличению прочности сцепления фибры с бетоном, можно предположить, что проникновение фосфата цинка в больших количествах в цементный камень не лучшим образом сказывается на его прочности. При этом содержащаяся в анкерующей композиции глина не только изменяет структуру покрытия на фибре, но и снижает количество фосфата цинка, мигрирующего в цементный камень.

Из микрофотографий поверхности следа в бетоне от фибры, обработанной анкерующей композицией, содержащей глину, приведенных на рисунке 8, видно, что структура поверхности этого следа почти идентична структуре следа в бетоне от фибры, обработанной антикоррозионной композицией без глины (рисунок 5). Цементный камень сформирован мелкими кристаллитами с размером зерна 1–5 мкм и их сростками в агломераты размером до 50 мкм. Из рисунка 8 видно, что в бетоне присутствуют игольчатые кристаллы алюминатной фазы. Имеются также следы отделения фибры с разрушением по слою цементного камня в виде впадин и трещин.

Микрорентгеновский анализ граничного слоя бетона и фибры, обработанной анкерующей композицией, содержащей глину, показал следующий элементный состав (в ат. %): **O** (58,51 %),

**Ca** (23,02 %), **Si** (10,68 %), **Al** (2,44 %), **Fe** (1,90 %), **S** (1,41 %), **P** (1,05 %), **Mg** (0,50 %), **Zn** (0,30 %). Количество кислорода, кальция, алюминия, серы, железа и цинка в этом случае практически такое же, как следа от фибры, обработанной антикоррозионной композицией без глины. В то же время содержание железа и цинка в следе от фибры примерно в 7 раз меньше, чем на поверхности извлеченной из бетона фибры. Следовательно, как и в случае фибры, обработанной антикоррозионной композицией без глины, при ее извлечении из бетона количество этих элементов существенно меньше, чем на поверхности фибры.

Увеличенное содержание кремния в следе от фибры с покрытием, содержащем глину, по сравнению со следом от фибры с покрытием без глины, обусловлено высоким содержанием кремнезема в кристаллитах цементного камня.

Можно предположить, что частицы глины, содержащие фосфаты цинка и железа, достаточно глубоко проникают в цементный камень в процессе его формирования, что обеспечивает его химическое сцепление с пленкой анкерующей композиции на поверхности фибры. Вместе с тем насыщение фосфатами цементного камня ниже, чем при использовании антикоррозионной композиции без глины, что не снижает прочную химическую анкеровку фибры в бетоне. Помимо этого, глина, как модифицирующий компонент анкерующей композиции, увеличивает количество коллоидных частиц на границе

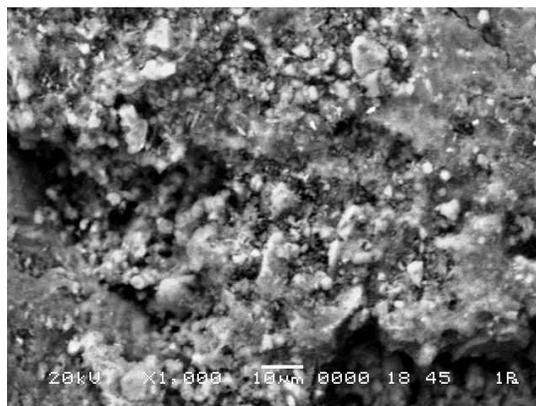


Рисунок 8 – Микроструктура поверхности следа в бетоне от фибры, обработанной антикоррозионной композицией, модифицированной глиной

контакта между цементным тестом и поверхностью фибры, повышая адгезионную способность цемента. Кроме того, поскольку основной компонент глины – каолин, то его наличие в субмикронном состоянии позволяет сформировать химическую связь между цементным камнем и фиброй, обработанной анкерующей композицией, тем самым усиливая сцепление поверхности фибры с бетоном.

#### ВЫВОДЫ

Экспериментально установлено, что обработка стальной фибры антикоррозионной

композицией на основе фосфата цинка и ортофосфорной кислоты, а также анкерующей композицией, модифицированной белой глиной, приводит к химическому сцеплению цементного камня с поверхностью фибры. Обработка поверхности фибры анкерующей композицией, содержащей глину, позволяет сформировать механически прочный слой, объединяющий цементный камень и анкерующее покрытие на фибре, что приводит к повышению предела прочности дисперсно-армированного бетона.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сущность процесса гидратации [Электронный ресурс] (2008), режим доступа: <http://stroy-spravka.ru/article/sushchnost-protssessa-gidratatsii> (дата доступа: 28.05.2018).
2. Технология бетона. Сцепление цементного камня с заполнителями (2006), режим доступа: <http://www.bibliotekar.ru/spravochnik-121-beton/5.htm> (дата доступа: 02.06.2018).
3. Матвейко, Н. П., Зарапин, В. Г., Артимович, В. С. (2017), Модифицирование поверхности стальной фибры для дисперсного армирования бетона, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2017, Вып. 32, С. 171–178.
4. Матвейко, Н. П., Зарапин, В. Г., Бусел, Е. А. (2012), Антикоррозионная композиция для защиты арматуры и закладных деталей железобетона, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2012, Вып. 23, С. 113–119.

#### REFERENCES

1. Sushchnost' processa gidratatsii [The essence of the hydration process], (2008), available at: <http://stroy-spravka.ru/article/sushchnost-protssessa-gidratatsii> (accessed 28 May 2018).
2. Tekhnologiya betona. Scephlenie cementnogo kamnya s zapolnitelyami [Technology of concrete. Cohesion of cement stone with aggregates], (2006), available at: <http://www.bibliotekar.ru/spravochnik-121-beton/5.htm> (accessed 02 June 2018).
3. Matveiko, N. P., Zarapin, V. G., Artimovich V. S. (2017), Modification of the surface of steel fiber for disperse reinforcement of concrete [Modificirovanie poverhnosti stal'noj fibry dlya dispersnogo armirovaniya betona], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk state technological University*, 2017, Edit. 32, P. 171–178.
4. 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 Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – Vestnik of Vitebsk state technological University*, 2012, Edit. 23, P. 113–119.

Статья поступила в редакцию 13. 06. 2018 г.