

Плугин Ал.А., Плугин А.А.*Украинская государственная академия железнодорожного транспорта***Кагановский А.С.***ООО «АС Капитал менеджмент»***Градобоев О.В.***ООО «Балакле́йский шиферный завод»***ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ И СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН:
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОН**

Введение и постановка проблемы. В асбестоцементной промышленности многих стран по разным, не только экологическим, причинам стоит вопрос замены хризотила на другие волокнистые материалы. Такая замена осложнена тем, что именно уникальные физико-механические и физико-химические свойства хризотила определяют технологию производства асбестоцемента из него – хризотил-цемента и его свойства. С 1970-х гг. были проведены многочисленные исследования по поиску заменителя хризотила для получения аналогичных асбестоцементу листовых материалов. Однако полученные в результате таких исследований фиброцементные изделия не являются полным аналогом хризотил-цемента и, как правило, имеют гораздо более высокую себестоимость. Таким образом, дальнейший поиск заменителя такого уникального сырьевого материала как хризотил, является непростой задачей, а исследование свойств различных волокнистых материалов и их сопоставление со свойствами хризотила с целью его замены является актуальным. Для полноценной замены хризотила в асбестоцементе необходимо подобрать такие виды волокон или смеси волокон, чтобы они по своим свойствам были как можно ближе к хризотилу. Их поиск наиболее продуктивен на основе представлений и закономерностей коллоидной химии и физико-химической механики дисперсных систем. Статья является продолжением исследований, результаты которых опубликованы в [1–3].

Анализ исследований и публикаций.

Проведен анализ источников, содержащих

результаты исследований свойств хризотила и других волокон, технологии асбестоцемента: отчета о научно-исследовательской работе ВНИИпроектасбестцемента [4], монографий и учебных пособий профессоров П.Н.Соколова, Т.М.Берковича, Н.И.Бернея [5–8], работ В.И.Боровика, А.И.Бирюкова [4; 9] и др. В результате анализа установлено, что наиболее важными свойствами хризотила являются технологические, определяющие возможность производства по технологии хризотил-цемента, физико-механические (прочность, модуль упругости), химические (щелочестойкость), физико-химические (электроповерхностный и электрокинетический потенциал, адсорбция).

Первоначально поиск заменителей проводился эмпирическим путем. Исследовались волокнистые материалы: стеклянное и базальтовое волокно, органические волокна – полиамидные, полиэфирные (лавсановые), полиакрилонитрильные, поливинилспиртовые (винол), полиолефиновые. Так, в результате исследований, проведенных в лаборатории сырья ВНИИпроектасбестоцемента под руководством А.И.Бирюкова [4], было установлено, что синтетические волокна обладают пониженными цементоудерживающей и водоудерживающей способностью в связи с тем, что гладкая поверхность волокон слабо взаимодействует с цементом на стадии приготовления волокнисто-цементной суспензии. Синтетические волокнистые добавки положительно влияют на физико-механические свойства хризотил-цемента, но отрицательно – на технологические свойства хризотил-цементной суспензии, поэтому их

использование возможно лишь в качестве добавки к хризотилу, вводимой в ограниченном количестве [4]. На этом эмпирический подход в поиске заменителей хризотила в основном исчерпал свои возможности.

Поиск заменителей хризотила продолжался на основе изучения его структуры, физико-химических свойств волокон, их взаимодействия с цементным камнем. Хризотил является гидросиликатом магния $3MgO \times 2SiO_2 \times 2H_2O$ с кристаллохимической формулой $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$. Оксидный состав хризотила по массе: MgO – 43,46 %, SiO_2 – 43,5 %, H_2O – 13,04 %. Кроме того, присутствуют и другие элементы, замещающие как магний (железо – до 3 % в хризотиле нормальной прочности и до 6 % в ломких разновидностях, в небольших количествах оксиды кальция, марганца, никеля, меди, кобальта, стронция), так и кремний (алюминий – до 3 %, титан – до 0,2 %).

В результате электронно-микроскопических исследований структуры хризотила кристаллохимии пришли к выводу, что он имеет трубчатое строение. Еще в 1956 г. Н.В.Белов представил структуру хризотилового пакета (рис. 1) и объяснил, что причиной закручивания слоев пакетов в трубочки является несовпадение размеров октаэдрической «бруситовой» сетки с размерами гексагональной сетки кремнекислородных тетраэдров [7]. Толщина одного пакета равна 7,1 Å, а толщина стенки трубки 65 Å, т.е. трубка состоит из 9 слоев. В подавляющем большинстве случаев трубочки имеют диаметр 340 Å [6].

Н.Д. Соболев [6] проанализировал результаты химического анализа хризотила различных месторождений СССР и установил, что прочный неломкий хризотил имеет следующий средний химический состав $H_4Mg_{2,85}Si_2O_9$, а ломкий малопрочный хризотил – $H_4Mg_{2,73}Si_2O_9$. Эти результаты хорошо согласовывались с зарубежными данными. Таким образом, мы можем наблюдать существенное влияние количества магния в хризотиле на его прочность – чем больше магния, тем выше прочность волокна.

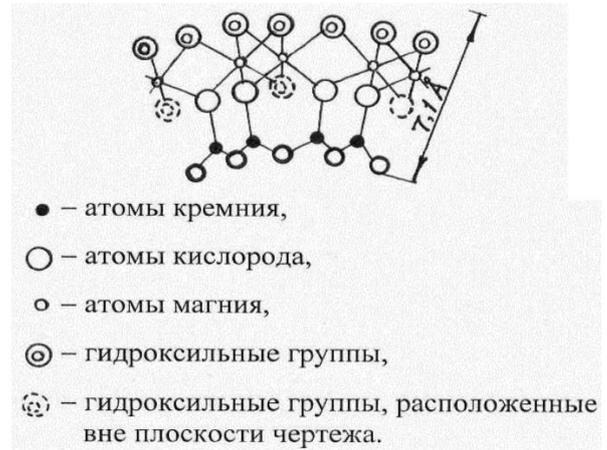


Рис. 1 - Структура хризотилового пакета по Н.В. Белову

В качестве заменителя хризотила в хризотил-цементе может быть использовано щелочестойкое стекловолокно, содержащее оксид циркония ZrO_2 . Такое стекловолокно согласно стандарту ASTM D 578-98 маркируется как AR-стекло. Его химический состав: Na_2O – 13,0–14,1 %; SiO_2 – 58,3–60,6 %; ZrO_2 – 18,1–21,2 % [10]. Представим этот состав в виде формулы со стехиометрическими коэффициентами, пропорциональными массовому соотношению оксидов: $0,14Na_2O \times 0,6SiO_2 \times 0,2ZrO_2$.

Химический состав базальтового волокна имеет существенные колебания в зависимости от сырьевых месторождений: MgO – 2,3–9,8 % (в среднем 6,1 %); CaO – 4,4–13,4 % (8,9 %); SiO_2 – 46,1–58,9 % (52,5 %); Al_2O_3 – 13,3–19,4 % (16,4 %); Fe_2O_3 – 7,5–16,5 % (12 %) [10]. Представим этот состав в виде стехиометрической формулы $0,09CaO \times 0,06MgO \times 0,53SiO_2 \times 0,16Al_2O_3 \times 0,12Fe_2O_3$.

Все составляющие хризотил-цемента, фиброцемента, бетона, от исходных фаз до конечных продуктов гидратации цемента обладают электроповерхностными свойствами. Эти свойства обусловлены наличием двойного электрического слоя ионов и скачка электрического потенциала на границе раздела фаз. Электроповерхностные свойства и явления определяют практически все свойства волокнисто-цементных суспензий, готового фиброцемента или хризотил-цемента и процессы, протекающие в

них при изготовлении, твердении, формировании структуры и прочности, разрушении. В качестве характеристики двойного электрического слоя используется экспериментально измеряемый электрокинетический ζ -потенциал. Знак ζ -потенциала определяется знаком заряда потенциалопределяющих ионов (ПОИ): если ПОИ анионы, ζ -потенциал отрицательный, если катионы – положительный. Величина ζ -потенциала зависит от свойств среды, в т.ч. вида и концентрации в ней противоионов [7].

Т.М. Берковичем [7] в результате анализа работ отечественных и зарубежных ученых установлено, что поверхность волокон хризотила в воде и водных растворах является заряженной, причем знак и величина заряда, выраженные ζ -потенциалом, зависит от степени сохранности структуры хризотила, а также химического состава жидкой фазы, в которой он находится. У хризотила первой группы (прочного из ультраосновных массивов) обнаружен положительный заряд поверхности волокон, что, вероятно, обусловлено преимущественной десорбцией ионов OH^- с их поверхности и возникающим при этом на ней избытком ионов Mg^{2+} . Хризотил второй группы (ломкий, непрочный) характеризуется близким к нулю или отрицательным ζ -потенциалом. В [7] это объяснено тем, что внешний бруситовый слой фибрилл вследствие выветривания поврежден, и в контакт с жидкой средой вступают более глубокие кремнекислородные тетраэдрические слои. При этом образуется тончайший слой кремнекислоты H_2SiO_3 , в результате диссоциации которой происходит преимущественная десорбция ионов H^+ , а ионы SiO_3^- остаются на поверхности, в результате чего электроповерхностный потенциал волокна становится близким к нулю или отрицательным.

Результаты экспериментальных исследований ζ -потенциала хризотила в суспензиях водных растворов по данным [7] и с обобщением данных [6] приведены в табл. 1.

На основе анализа данных табл. 1 можно предположить, что именно количество магния определяет величину и знак

электроповерхностного заряда хризотила и что слабое взаимодействие различных синтетических волокон с цементной матрицей может быть обусловлено несоответствием их электроповерхностных свойств. Для выбора наиболее подходящих заменителей хризотила следует проанализировать их электроповерхностные свойства.

Таблица 1 - Влияние солевого состава жидкой фазы на ζ -потенциал хризотила

Вид хризотила	Состав жидкой фазы	ζ -потенциал, мВ
1-й группы (невыветрелый, прочный)	Вода	+14
	Р-р $Ca(OH)_2$	+42
	Р-р $Ca(OH)_2 + CaSO_4 \times 2H_2O$	-
2-й группы (выветрелый, с дефицитом магния, ломкий непрочный)	Вода	-10
	Р-р $Ca(OH)_2$	0
	Р-р $Ca(OH)_2 + CaSO_4 \times 2H_2O$	0

Данных об электрокинетическом потенциале стекловолокна и базальтового волокна в контексте замены ими хризотила в проанализированных источниках не обнаружено.

Фактором, во многом обуславливающим электроповерхностные свойства синтетических волокон, является способ их получения. Основным способом получения волокна является осуществляемое различными технологическими приемами вытягивание из расплава с удлинением на 400–2000 %. В результате этого происходит значительное повышение степени ориентации полимерных молекул. Это повышает их прочность, эластичность и другие свойства. Рассмотрим результаты исследований электроповерхностных свойств

наиболее распространенных и перспективных в качестве заменителя хризотила синтетических волокон.

Полиамидные волокна гидрофобны, амфотерны с изопотенциальной точкой при $pH=5$. При $pH \leq 5$ волокно обладает положительным поверхностным зарядом, при $pH > 5$ – отрицательным [4; 7]. В.И.Карслиева [11] изучала электрокинетические свойства данных волокон в зависимости от степени ориентированности в них макромолекул, достигнутой различной степенью вытяжки волокон. ζ -потенциал волокна составил $-18; -32; -43; 51$ мВ при кратности вытяжки, соответственно, 1; 2; 3; 4. Полиакрилонитрильные волокна («нитрон» Саратовского завода), исследованные К.И.Андреевой [4; 12], также амфотерны с изопотенциальной точкой при $pH=5$. ζ -потенциал изменяется от $+60$ до -60 мВ, в дистиллированной воде составляет -20 мВ.

Полиэфирные волокна («лавсан») были исследованы в [4]. Их ζ -потенциал в $0,0001N$ растворе KCl составил: невытянутого волокна -20 мВ, вытянутого -92 мВ. Поливинилспиртовые волокна («винол») были исследованы И.Д.Тугаев [13]. При $pH=3; 6; 10$ их ζ -потенциал составил, соответственно, $-17; -50; -50$ мВ. Было также установлено, что при добавлении катионных ПАВ поверхность поливинилспиртовых волокон перезаряжается и становится положительно заряженной. Полиолефиновые волокна, в частности, полипропиленовые, в дистиллированной воде обладают ζ -потенциалом -80 мВ. Не отмечена изопотенциальная точка также у хлопковых волокон.

Электрокинетические потенциалы рассмотренных волокон представлены в табл. 2, из которой видно, что полиамидные и полиакрилонитрильные волокна являются амфотерными, в кислых средах обладают положительным поверхностным зарядом, в щелочных – отрицательным. Полиэфирные, поливинилспиртовые, полиолефиновые (полипропиленовые) волокна в любых средах отрицательно заряжены.

Однако электрокинетический потенциал – это потенциал на поверхности скольжения при взаимном перемещении

фаз, достаточно удаленной от реальной поверхности волокон (рис. 2) [14].

Таблица 2 - Электрокинетические потенциалы волокнистых материалов

Химический состав волокон	pH	ζ , мВ
Полиамидные	менее 5	+
	5	0
	более 5	$-(18-51)$
Полиакрилонитрильные («нитрон»)	менее 5	60
	5	0
	7	-20
	более 7	-60
Полиэфирные («лавсан»)	более 7*	$-(20-92)$
Поливинилспиртовые («винол»)	3	-17
	6	-50
	10	-50
Полиолефиновые – полипропиленовые	7	-80

* в $1N$ растворе KCl

Значительное влияние на него оказывает солевой состав жидкой фазы. Электроповерхностные свойства волокон и их способность к взаимодействию с продуктами гидратации цемента более корректно могут характеризовать абсолютный $\psi_{эн}^0$ и равновесный ψ_p^0 электроповерхностный потенциалы волокон, концентрация потенциалопределяющих ионов ПОИ n^0 на их поверхности и расстояние a между смежными ПОИ на поверхности [15].

Методы исследования. Абсолютный электроповерхностный потенциал $\psi_{энABC}^0$ сложного вещества $A_aB_bC_c$ определяли по формуле [15]:

$$\psi_{энABC}^0 = -\frac{a\psi_{энA}^0 + b\psi_{энB}^0 + c\psi_{энC}^0}{a + b + c}, \text{ В}, \quad (1)$$

где $\psi_{энA}^0, \psi_{энB}^0, \psi_{энC}^0$ – электроповерхностные потенциалы простых веществ A, B, C , A, B, C , определяемые по [16] (табл. 3); a, b, c – стехиометрические коэффициенты.

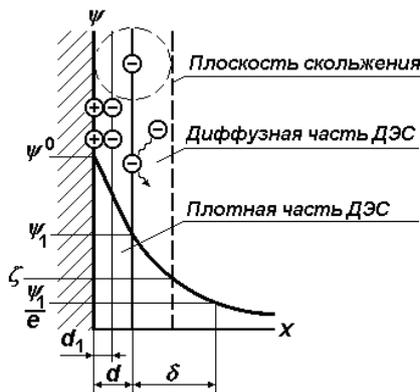


Рис. 2 – Строение двойного электрического слоя ДЭС на поверхности волокна неветрелого хризотила и распределение потенциала в нем [15]: ψ^0 – электроповерхностный (поверхностный) потенциал ($\psi_{эп}^0$); ψ_1 – потенциал на границе плотной и диффузной частей ДЭС (можно принять соответствующим ψ_p^0); ζ – электрокинетический потенциал на поверхности скольжения; d – толщина плотной части ДЭС; δ – толщина диффузной части ДЭС

Равновесный электроповерхностный потенциал ψ_p^0 определяли в зависимости от рН жидкой фазы:

$$\psi_p^0 = \psi_{эп}^0 - 0,059pH, \text{ В.} \quad (2)$$

Поверхностную концентрацию ПОИ n^0 определяли по формуле [14]:

$$n^0 = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_0 |\psi_p^0|}{4\pi d_1 z e}, \text{ 1/м}^2, \quad (3)$$

где ε_1 – диэлектрическая проницаемость среды, в межионном пространстве соответствующая диэлектрической проницаемости вакуума, 1; ε – электрическая постоянная, $8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м; ψ_p^0 – равновесный электроповерхностный потенциал, 0,22 В; d_1 – расстояние между центрами ПОИ и специфически адсорбированного на нем противоиона, равное сумме их радиусов (рис. 2); z – заряд ПОИ; e – элементарный заряд, $1,6 \times 10^{-19}$ Кл.

Таблица 3 - Абсолютные электроповерхностные потенциалы простых веществ [16]

Элемент	Ca	Na	Mg	Al	Zr	Fe	Si	H	O
$\psi_{эп}^0, \text{ В}$	-4,2	-4,04	-3,69	-2,99	-2,86	-1,77	-1,23	-1,2	1,44

Расстояние между смежными ПОИ на поверхности составляет [14]:

$$a = \sqrt{1/n^0}. \quad (4)$$

Основная часть исследований. Электроповерхностные свойства веществ, как видим из (1), определяют их химический состав. Химический состав неветрелого хризотила, щелочестойкого стекловолокна и базальтового волокна сопоставлены в табл. 4. Выполним расчет их абсолютных и равновесных электроповерхностного потенциалов, поверхностной концентрации ПОИ и расстояния между ними по (1–4). Исходными данными для расчета являются величины абсолютных электроповерхностных потенциалов простых веществ, входящих в указанные сложные (табл. 4).

Предварительный расчет потенциалов хризотила по его полной стехиометрической формуле не дал результатов, согласующихся

с измеренными величинами электрокинетического потенциала (табл. 1). Анализ рис. 1 показывает, что у волокна хризотила наружу обращен «бруситовый» слой, поэтому предположим, что именно он определяет электроповерхностный потенциал наружной поверхности волокон хризотила и выполним расчет для стехиометрической формулы $Mg_6(OH)_8$:

$$\psi_{эп}^0 = - \frac{6 \times (-3,69) + 8 \times 1,44 + 8 \times (-1,2)}{6 + 8 + 8} = 0,92 \text{ В.}$$

Равновесный электроповерхностный потенциал хризотила для щелочной среды цементно-водной суспензии с рН = 12,5 составит: $\psi_p^0 = 0,92 - 0,059 \times 12,5 = 0,22 \text{ В.}$

Как видим, знак рассчитанного электроповерхностного потенциала хризотила совпадает со знаком ζ -потенциала, полученного экспериментальным путем, а его величина 0,22 В = 220 мВ в несколько раз выше величины ζ -потенциала 42 мВ, что подтверждает корректность расчета.

Таблица 4 - Результаты исследования электроповерхностных свойств минеральных волокнистых материалов

Химический состав	Хризотил	Щелочестойкое стекловолокно	Базальтовое волокно
	$Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$	$0,14Na_2O \times$	$0,09CaO \times 0,06MgO \times$
	$Mg_6(OH)_8^*$	$\times 0,6SiO_2 \times 0,2ZrO_2$	$\times 0,53SiO_2 \times 0,16Al_2O_3 \times$ $\times 0,12Fe_2O_3$
ζ , мВ	14–42		
$\psi_{эн}^0$, В	0,92	0,023	-0,097
ψ_p^0 , В	0,22	-0,68	-0,84
ПОИ; r , Å	Mg^{2+} ; 0,78	OH^- ; 1,53	OH^- ; 1,53
ПИ; r , Å	OH^- ; 1,53	Ca^{2+} ; 1,051	Ca^{2+} ; 1,051
d^1 , м	$2,31 \times 10^{-10}$	$2,58 \times 10^{-10}$	$2,58 \times 10^{-10}$
n^0 , $1/M^2$	$0,95 \times 10^{16}$	$1,16 \times 10^{16}$	$1,43 \times 10^{16}$
a , нм	10,2	9,2	8,4

*Состав «бруситового» слоя, для которого рассчитывались потенциалы

Исследуем распределение ПОИ на поверхности хризотила. Судя по положительному знаку заряда и структурной формуле хризотила ПОИ являются ионы Mg^{2+} . Их поверхностную концентрацию определим, подставив в (3) $\psi_p^0 = 0,22$ В, $d_1 = r_{Mg^{2+}} + r_{OH^-} = (0,78 + 1,53) \times 10^{-10} = 2,31 \times 10^{-10}$ м; $r_{Mg^{2+}}$, r_{OH^-} – радиусы ионов магния и гидроксония, соответственно, 0,78 и $1,53 \times 10^{-10}$ м [17]; $z = 2$ (заряд ПОИ Mg^{2+}):

$$n^0 = \frac{1 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 0,22}{4\pi \times 2,31 \times 10^{-10} \times 2 \times 1,6 \times 10^{-19}} = 0,953 \times 10^{16}, 1/M^2,$$

Расстояние между смежными ПОИ Mg^{2+} на поверхности волокон составит:

$$a = \sqrt{1/(0,9532 \times 10^{16})} = 1,024 \times 10^{-8} \text{ м} = 10,2 \text{ нм}.$$

Выполним аналогичные расчеты для щелочестойкого стекловолокна:

$$\psi_{эн}^0 = 0,023 \text{ В};$$

$$\psi_p^0 = 0,023 - 0,059 \times 12,5 = -0,68 \text{ В};$$

$$d_1 = (1,53 + 1,051) \times 10^{-10} = 2,58 \times 10^{-10} \text{ м};$$

$$n^0 = \frac{1 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 0,68}{4\pi \times 2,58 \times 10^{-10} \times 1 \times 1,6 \times 10^{-19}} = 1,16 \times 10^{16}, 1/M^2;$$

$$a = \sqrt{1/(1,16 \times 10^{16})} = 0,92 \times 10^{-8} \text{ м} = 9,2 \text{ нм},$$

а также базальтового волокна:

$$\psi_{эн}^0 = 0,097 \text{ В};$$

$$\psi_p^0 = 0,097 - 0,059 \times 12,5 = -0,84 \text{ В};$$

$$d_1 = (1,53 + 1,051) \times 10^{-10} = 2,58 \times 10^{-10} \text{ м};$$

$$n^0 = \frac{1 \times 8,85 \times 10^{-12} \times 0,84}{4\pi \times 2,58 \times 10^{-10} \times 1 \times 1,6 \times 10^{-19}} = 1,43 \times 10^{16}, 1/M^2;$$

$$a = \sqrt{1/(1,43 \times 10^{16})} = 0,84 \times 10^{-8} \text{ м} = 8,4 \text{ нм}.$$

Результаты расчетов занесем в табл. 4. Электроповерхностный потенциал стекловолокна состава, близкого к $Na_2O \times CaO \times 6SiO_2$, $\psi_p^0 = -0,50$ В при pH=12,5 был получен расчетным путем в [18], что подтверждает достоверность результатов расчета.

Таким образом, свойства поверхности материалов, в т.ч. волокнистых, обусловлены наличием на ней точечных активных центров, расположенных на значительных расстояниях между собой: в невыветрелом хризотиле – потенциалопределяющих ионов Mg^{2+} на расстоянии 10,2 нм, в щелочестойком стекловолокне и базальтовом волокне – ПОИ OH^- на расстоянии 9,2 и 8,4 нм, соответственно. Такие расстояния значительно больше (до двух порядков) ионных размеров, сопоставимы с размерами гелевых частиц гидросиликатов кальция (около 10 нм) и значительно меньше размеров кристаллогидратов гидроксида, гидроалюминатов и гидросульфалюминатов кальция (до 500 нм или 0,5 мкм). Это позволяет представить взаимодействие продуктов гидратации цемента с различными волокнами в виде схем рис. 3 а, б.

На рис. 3, а представлена схема взаимодействия продуктов гидратации портландцемента с волокнами невыветрелого хризотила.

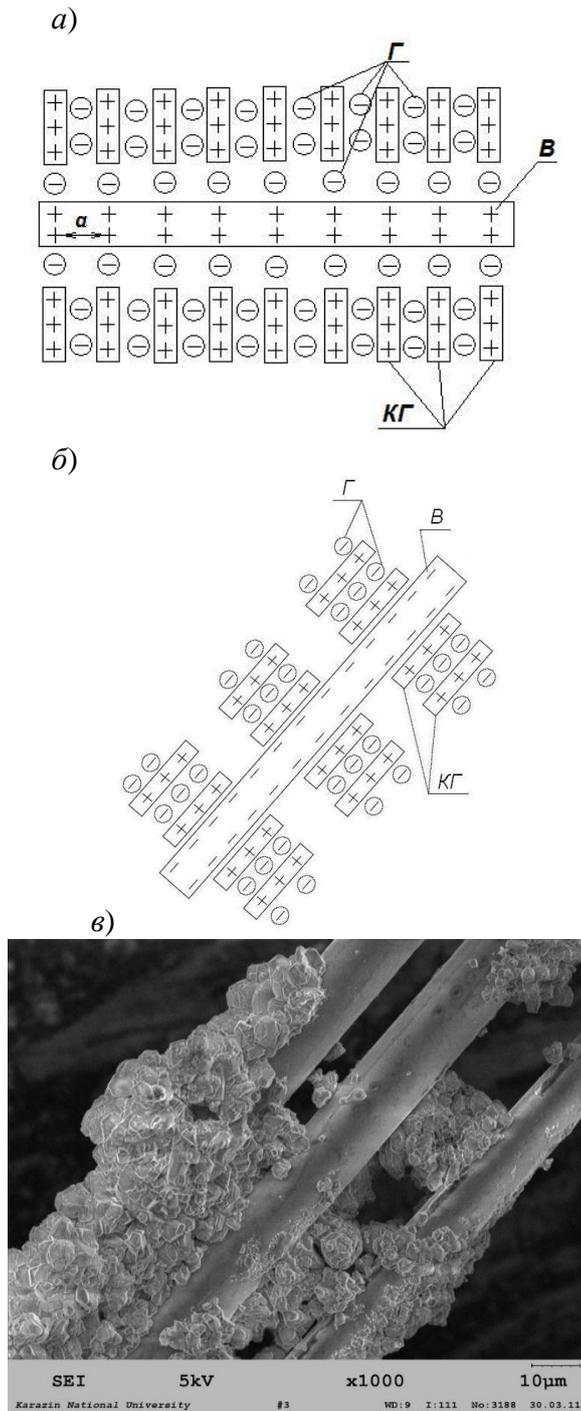


Рис. 3 – Схемы (а, б) и электронный микроснимок (в) [18] зоны контакта продуктов гидратации цемента с волокном: а – с положительным поверхностным зарядом – неветрелого хризотила; б, в – с отрицательным поверхностным зарядом – стекловолокна (в), базальтового волокна

Как видим, с положительно заряженной поверхностью волокна цементный камень контактирует через частицы гидроси-

ликатного геля, обладающего отрицательным поверхностным зарядом. При этом расстояние между активными центрами на поверхности волокна 10,2 нм сопоставимо с размерами глобул гидросиликатного геля 10 нм, что обеспечивает плотный контакт принимающего любую форму гидросиликатного геля цементного камня с волокном.

На рис.3, б представлена схема взаимодействия продуктов гидратации портландцемента со стеклянными и базальтовыми волокнами. Как видим, с отрицательно заряженной поверхностью волокна цементный камень контактирует через кристаллогидраты гидроксида кальция – портландита, обладающего положительным поверхностным зарядом. Такая схема подтверждается электронно-микроскопическим снимком рис. 3, в [18], на котором отчетливо видны волокна диаметром около 10 мкм, обросшие кристаллогидратами портландита. При этом расстояние между активными центрами на поверхности волокна 8,4–9,2 нм значительно меньше размеров кристаллогидратов (сотен нм), что приводит к образованию не плотных, как в случае гидросиликатного геля, а локальных контактов между крупными кристаллами определенной формы с и волокнами хризотила.

Выводы и рекомендации

1. Впервые предложено рассчитывать электроповерхностный потенциал неорганических веществ со сложной кристаллической структурой, например слоистых силикатов, исходя не из полной стехиометрической формулы соединения, а из стехиометрии его поверхностного слоя. В результате расчета электроповерхностного потенциала хризотила $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ по стехиометрической формуле $Mg_6(OH)_8$ получены значения электроповерхностных потенциалов: абсолютного +0,92 В, равновесного при рН=12,5 – (+0,22) В, хорошо согласующиеся с полученными экспериментально значениями электрокинетического потенциала +(14–42) мВ.

2. В результате анализа химического состава и структуры, а также соответствующих расчетов установлены электропо-

верхностные свойства невыветрелого хризотила, щелочестойкого стекловолокна, базальтового волокна:

- равновесные электроповерхностные потенциалы при $pH = 12,5$ составляют: невыветрелого хризотила – $(+0,22)$ В, щелочестойкого стекловолокна – $(-0,68)$ В, базальтового волокна – $(-0,84)$ В;

- потенциалопределяющими ионами ПОИ при $pH=12$ являются: у невыветрелого хризотила – Mg^{2+} , у щелочестойкого стекловолокна и базальтового волокна – OH^- ;

- поверхностная концентрация ПОИ составляет: у невыветрелого хризотила – $0,95 \times 10^{16}$, у щелочестойкого стекловолокна – $1,16 \times 10^{16}$, у базальтового волокна – $1,43 \times 10^{16}$ $1/m^2$;

- расстояние между ПОИ на поверхности составляет: у невыветрелого хризотила – $10,2$, у щелочестойкого стекловолокна – $9,2$, у базальтового волокна – $8,4$ нм;

3. Установлен характер контактов между продуктами гидратации портландцемента и волокнами невыветрелого хризотила, щелочестойкого стекловолокна и базальтового волокна:

- с положительно заряженной поверхностью волокон невыветрелого хризотила цементный камень контактирует через частицы гидросиликатного геля, обладающего отрицательным поверхностным зарядом, при этом расстояние между активными центрами на поверхности волокна $10,2$ нм сопоставимо с размерами глобул гидросиликатного геля 10 нм, что обеспечивает плотный контакт принимающего любую форму гидросиликатного геля цементного камня с волокном;

- с отрицательно заряженной поверхностью стеклянных и базальтовых волокон цементный камень контактирует через кристаллогидраты гидроксида кальция – портландита, обладающего положительным поверхностным зарядом, при этом расстояние между активными центрами на поверхности волокна $8,4-9,2$ нм значительно меньше размеров кристаллогидратов (сотен нм), что обуславливает образование неплотных локальных контактов между крупными кристаллами с волокнами хризотила.

4. Установленный характер контактов между ПОИ частиц продуктов гидратации цемента и волокон является основой для расчета теоретической прочности адгезии цементного камня к различным волокнам.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Кагановский А.С. Высокоэффективные композиционные материалы на основе минеральных и синтетических волокон: Проблемы производства хризотил-цемента / А.С. Кагановский, О.В. Градобоев, Ал.А. Плугин // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип.138. – С. 50 – 55.
2. Плуґін А.А. Колоїдна хімія та фізико-хімічна механіка як основа виробництва ресурсозберігаючих мінеральних в'язучих речовин та високо-ефективних композиційних матеріалів на їх основі / А.А. Плуґін, А.М. Плуґін, О.С.Кагановський [та ін.] // Зб.наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип.138. – С.7 – 19.
3. Плуґін А.А. Колоїдна хімія та фізико-хімічна механіка як основа виробництва ресурсозберігаючих мінеральних в'язучих речовин та високо-ефективних композиційних матеріалів на їх основі. Управління водонепроникністю / А.А.Плуґін, А.М.Плуґін, О.С.Кагановський [та ін.] // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2013. – Вип.26. – С.338 – 349.
4. Разработка основ теории прочности асбестоцемента с учетом физико-химических закономерностей его образования: Отчет о НИР № 0.20.9.05.71.15/ ВНИИпроектасбестцемент. – Москва, 1974.
5. Соколов П. Н. Технология асбестоцементных изделий / Соколов П. Н. – М.: Стройиздат, 1968. – 288 с.
6. Соболев Н.Д. Введение в асбестоведение / Соболев Н.Д. – М.: Недра, 1971. – 280 с.
7. Беркович Т. М. Основы технологии асбестоцемента / Беркович Т. М. – М.: Стройиздат, 1979. – 233 с.
8. Берней И. И. Технология асбестоцементных изделий / И. И. Берней, В. М. Колбасов. – М.: Стройиздат, 1985. – 399с.
9. Боровик В.И. Исследование добавки синтетических волокон на технологию и свойства асбестоцемента: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.11 „Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов” / В.И. Боровик. – М., 1982. – 175 с.
10. Гутников С.И. Стеклообразующие волокна: учебное пособие для студ. по спец. «Композиционные наноматериалы» / С.И. Гутников, Б.И. Лазорьяк, А.Н. Селезнев. – М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2010. – 53 с.

11. Карслиева В.И. Исследование электрокинетических потенциалов ориентированных полиамидных волокон: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. химич. наук: спец. 02.00.11 „Коллоидная химия” / В.И. Карслиева. – Л., 1973. – 20 с.
12. Андреева К.И. Исследование электрокинетических свойств полиакрилонитрильных волокон различных модификаций: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. химич. наук: спец. 02.00.11 „Коллоидная химия” / К.И. Андреева. – Л., 1970. – 20 с.
13. Тугай И.Д. Электрокинетический потенциал поливинилспиртовых волокон: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. химич. наук: спец. 02.00.11 „Коллоидная химия” / И.Д. Тугай. – Л., 1968. – 18 с.
14. Плугин А.А. Долговечность бетона и железобетона в обводненных сооружениях: Коллоидно-химические основы: дисс. ... доктора техн. наук: 05.23.05 / Плугин Андрей Аркадьевич. – Х., 2005. – 442 с.
15. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них: Монография в 3-х томах Том 1. Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов / [А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Л.В. Трикоз и др.]; под ред. А.Н.Плугина. – К.: Наук. думка, 2011. – 331с.
16. Плугин А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих: дисс. ... доктора химич. наук: 02.00.11 / Плугин Аркадий Николаевич. – Х., 1989. – 282 с.
17. Краткий справочник физико-химических величин [Под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой]. – СПб: Спец. литература, 1998. – 232 с.
18. Плугин А.А. Изотропное микроармирование цементного камня продуктами гидратации для повышения физико-механических характеристик гидроизоляционных покрытий / А.А. Плугин, Т.А. Костюк, М.Г. Салия // Вісник НТУ «ХП». – Харків, 2011. – №50. – С. 97 – 103.

УДК 691.002

Парута В.А., Гнып О.П., Лавренюк Л.И., Русев А.Г., Цонда Д.А., Вандинский В.Ю.
Одесская государственная академия строительства и архитектуры

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА ШТУКАТУРНОГО РАСТВОРА ДЛЯ СТЕН ИЗ ГАЗОБЕТОННЫХ КАМНЕЙ С УЧЕТОМ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ СИСТЕМЫ «КЛАДКА-ШТУКАТУРНОЕ ПОКРЫТИЕ»

Разработка составов штукатурных растворов для стен из автоклавного газобетона и технологии их применения, является актуальной задачей, которую решают многие специалисты [1-4]. Недостатком разработанных составов является то, что им всем, в той или иной мере, присуще трещинообразование [5,3] которое приводит к разрушению штукатурного покрытия, снижению долговечности ограждающей конструкции.

По нашему мнению, происходит это из-за того, что при проектировании состава и свойств, штукатурного покрытия не в полной мере учитывают совместность его работы с кладкой. Стеновую конструкцию следует рассматривать как многослойную систему. В зависимости от характеристик газобетонной кладки, ее деформаций, напряжений в кладке и штукатурном покрытии, необходимо целенаправленно под-

бирать состав штукатурной смеси, с определенными качественными и количественными параметрами.

Нормативные документы определяют необходимые параметры для штукатурных растворов, это средняя плотность, прочность при сжатии и изгибе, водопоглощение, морозостойкость, паропроницаемость, адгезия к кладке. При этом в разных нормативных документах требуются различные показатели прочности и нет требований по трещиностойкости для фасадных штукатурок. Не совсем понятно, из каких предпосылок вытекают требования по прочностным параметрам.

Задачей исследований является разработка теоретических и практических основ совместной работы газобетонной кладки и штукатурного покрытия, на основании которых проектировать составы штукатурных растворов с высокой трещиностойко-