

УДК 624.13:691.5

**П. А. Лыщик**, кандидат технических наук, профессор (БГТУ);  
**А. И. Науменко**, магистр технических наук, аспирант (БГТУ)

### МЕХАНИЗМЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ДОРОЖНЫХ ГРУНТОВ, УКРЕПЛЕННЫХ МИНЕРАЛЬНЫМИ ВЯЖУЩИМИ

Природа структурных связей в грунтах изучена недостаточно. В них имеются связи с различной природой и свойствами, комбинации которых определяют в основном их прочностные и деформативные свойства. В статье рассмотрены основные механизмы структурообразования в дорожных грунтах, укрепленных минеральными вяжущими.

Nature of structural relations in soils is not well understood. They are due to the different nature and properties, a combination which mainly determine strength and deformation properties of difference. The article describes the basic mechanisms of pattern formation in road soils fortified mineral binders.

**Введение.** Глинистые грунты являются сложной полидисперсной системой, которая в основном представлена коллоидами. Характерными особенностями глинистых коллоидов являются большая суммарная и удельная поверхность, что определяет их большую реакционную способность и степень взаимодействия с минеральным вяжущим.

Введение в грунты активных вяжущих добавок приводит к существенному изменению их физико-механических свойств, особенно грунтов, содержащих коллоидные частицы, что дает возможность использования их в качестве конструкционных материалов. Для укрепления грунтов широко применяют минеральные вяжущие материалы, относящиеся к гидратационным, твердеющим после смешения с водой [1].

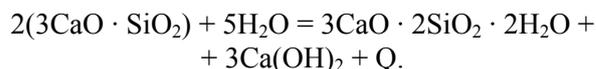
В связи с увеличением объемов строительства лесных автомобильных дорог актуальным является использование грунтов, укрепленных вяжущими, а также поиск нового вида вяжущего.

**Основная часть.** Процессы твердения портландцемента подробно изучены многими исследователями. При укреплении грунтов, содержащих тонкодисперсные частицы (глинистые и коллоидные), важно их рассматривать как активную среду, влияющую на процессы гидратации и твердения минеральных вяжущих материалов [2]. Теоретическое обоснование процессов, протекающих в цементогрунтовых смесях, впервые было дано профессором Безруком В. М. [3].

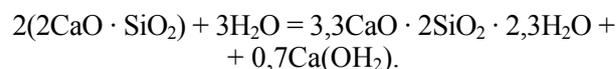
Установлено, что твердение портландцемента, как и многих минеральных гидратационных вяжущих, является сложным комплексом взаимосвязанных химических, физико-химических и физических процессов. С химической точки зрения твердение представляет собой переход безводных клинкерных минералов (основными из которых являются трехкальциевый силикат  $C_3S$ , двухкальциевый алюминат  $C_2S$ , трехкальциевый алюминат  $C_3A$ , четырехкальциевый алюмоферрит  $C_4AF$ ) в гидраты. Этот процесс

происходит в результате реакций гидролиза и гидратации, которые начинаются сразу после затворения цемента водой.

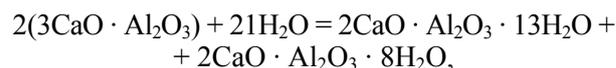
Взаимодействие трехкальциевого силиката ( $C_3S$ ) с водой описывают реакцией [1]:



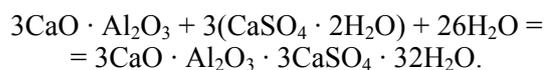
Двухкальциевый силикат  $C_2S$  в процессе гидратации при нормальной температуре образует гидросиликаты, химический состав которых меняется с течением времени. На конечной стадии реакция выражается уравнением [1]



Гидратация алюминатов портландцемента идет с образованием первичных гидроалюминатов  $C_4AH_{13}$  и  $C_2AH_8$  [1]:



которые выделяются сначала в виде тонких неправильной формы хлопьев, но со временем растут и приобретают гексагональную, хорошо выраженную кристаллическую форму, а затем в связи с высоким тепловым эффектом реакции очень быстро переходят в кубический  $C_3AH_6$  с рыхлой структурой, способствующей быстрой и полной гидратации  $C_3A$ . На гидратацию  $C_3A$  сильно влияют различные добавки, и прежде всего сульфаты. В присутствии гипса образуется гидросульфалюминат кальция (фазы этрингитового типа  $Aft$ ) [1]:



По скорости гидратации клинкерные минералы располагаются в ряд  $C_3A > C_4AF > C_3S > C_2S$ . Состав новообразований определяется прежде всего соотношением твердой и жидкой фаз, температурными условиями твердения,

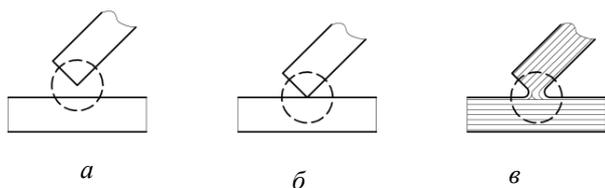
а также составом и свойствами заполнителей [4]. Главными продуктами гидратации портландцемента при обычных температурах являются: аморфизационный гидрат  $C-S-H$  нескольких разновидностей, гидроксид кальция  $Ca(OH)_2$ , незначительное количество гексагональных пластинок фазы AFm и фазы эттрингитового типа AFt. Причем ни одна из этих фаз не является полностью кристаллической [5, 6].

Первые теории твердения вяжущих были предложены в 1882 г. (Ле-Шателье – кристаллизационная), 1893 г. (Михаэлис – коллоидная) и 1925 г. (А. А. Бойков – топохимическая теория). Существует три основных взгляда на механизм гидратации: по растворному (сквозьрастворному), топохимическому и смешанному типам.

Растворный механизм (П. А. Ребиндер, В. Б. Рапинов, Е. Е. Сегалова, А. Ф. Полак и др.) предусматривает гидратацию минералов цемента путем их растворения с последующей кристаллизацией из пересыщенного раствора гидратированных новообразований. Топохимический механизм (И. П. Выродов, Д. Джеффри, Р. Кондо) рассматривает гидратацию как процесс взаимодействия на границе раздела фаз, осуществляющихся путем непосредственного присоединения молекул воды или ионов  $H^+$  и  $OH^-$  к поверхностным слоям кристаллов с образованием первичного гидратированного слоя из термодинамически неустойчивых соединений и последующим их растворением и перекристаллизацией. По смешанному типу (М. М. Сычев, В. В. Волженский, А. А. Пашенко, О. П. Мчедлов-Петросян) гидратация возможна частично как через растворение, так и топохимически.

Свойства любого материала определяются его составом и структурой. Принято различать три типа пространственных структур композиционных материалов: коагуляционные, конденсационные и кристаллизационные.

Коагуляционные структуры характеризуются беспорядочным расположением дисперсных частиц, которые между собой не контактируют и образуют связи через тонкую прослойку воды за счет ван-дер-ваальсовых сил (рисунок, а). Такие материалы имеют малую прочность, тиксотропны, пластичны.



Типы контактов:  
а – коагуляционный; б – конденсационный;  
в – кристаллизационный

В конденсационных структурах частицы связаны между собой через точечные контакты. Материалы с такой структурой обладают определенной прочностью, упругостью, пластичностью, а некоторые хрупки и нетиксотропны (рисунок, б). К ним относятся материалы на основе грунтов, укрепленных органическими вяжущими, битумогрунты (пластичны), смологрунты (хрупки).

В материалах с кристаллизационной структурой частицы заполнителя связаны между собой посредством контактов срастания или спекания (рисунок, в), возникающих между частицами грунтов и неорганическими вяжущими (цемент, известь). Материалы с такой структурой имеют высокую прочность, но вместе с тем хрупки (цементогрунты, известегрунты и др.).

Формирование структуры цементного камня обуславливается общими структурообразовательными процессами коллоидных систем, протекающими в цементно-водной суспензии с образованием на первом этапе структур коагуляционного типа. На последующем этапе с развитием кристаллов новообразований возникают контакты срастания между отдельными кристаллами с образованием пространственной сетки кристаллизационных связей, которая в дальнейшем упрочняется.

Многочисленными исследованиями в области кристаллохимии продуктов гидратации портландцемента выявлены особенности структуры цементного камня, и прежде всего наличие гетерогенности его фазового состава [6, 7]. Так, по данным Л. Г. Шпыновой, в продуктах гидратации отмечается образование двух различных структур, отличающихся друг от друга строением и составом – гидросульфатоалюминатной (алюминатной) и гидросиликатной [4].

Проявление вяжущих свойств минеральными материалами типа активными золь уноса молотых шлаков обусловлено содержанием в них в той или иной степени клинкероподобных минералов разной основности и строения (белит  $C_2S$ , монокальциевый силикат и алюминат  $CS$  и  $CA$ , алюминат кальция  $C_3A$ , алюмоферриты кальция), а также извести, гипсового ангидрида, кварца [8, 9]. Структура затвердевшего камня подобных материалов, получаемая в поздние сроки твердения, по плотности и морфологическим особенностям близка к структуре цементного камня.

Рассмотренные химические и физико-химические процессы, приводящие к образованию продуктов гидратации и развитию структурных связей кристаллизационного типа, наблюдаются как при твердении самих минеральных вяжущих, так и в зоне их контакта с поверхностью заполнителей. Причем крупные

заполнители являются относительно инертными, что нельзя сказать о глинистых грунтах, содержащих тонкодисперсные, глинистые и коллоидные частицы. При укреплении таких грунтов минеральными вяжущими они оказывают существенное влияние на процессы гидратации и твердения вяжущих благодаря способности глинистых частиц к активному химическому и физико-химическому взаимодействию с продуктами гидратации [4]. Глинистые грунты являются природными активными минеральными добавками по отношению к продуктам гидратации цемента и подобных ему минеральных вяжущих.

В настоящее время происходит усложнение материалов в результате применения улучшенных и композиционных вяжущих, поэтому наиболее правильно выделять структуры смешанного типа (например, кристаллизационно-коагуляционную и т. д.).

Путем усложнения структуры можно улучшить физико-механические свойства укрепляемого материала. Так, цементогрунты не обладают достаточной деформативностью и трещиностойкостью. Улучшить их свойства можно приданием материалу кристаллизационно-коагуляционной структуры, которая снижает жесткость цементогрунтов и улучшает их деформационные свойства. Деформативность материала благодаря приданию такой структуры повышается в 1,5–6,2 раза по сравнению с цементогрунтом с кристаллизационной структурой [10].

Получение определенной структуры композиционного материала достигается совокупностью методов подготовки исходных компонентов, их смешения и уплотнения. Все эти методы относятся к технологическим аспектам получения материала. Однако формирование структуры последнего происходит не только за счет совокупности методов воздействия на компоненты и их смесь, но и благодаря процессам, протекающим при взаимодействии компонентов на физическом, химическом и физико-химическом уровнях.

**Заключение.** При рассмотрении условий кристаллообразования грунтов лесной зоны, укрепленных портландцементом, установлено, что характерными параметрами, оказывающими влияние на возникновение кристаллизационных контактов срастания, являются недоста-

точная структурная плотность материала и низкая величина пересыщения дисперсной среды.

Интенсификация процесса гидратации цемента в конечном счете ускоряет процесс химического взаимодействия минералов грунта с продуктами гидратации, что ведет к интенсивному увеличению общего количества коллоидных новообразований.

Глинистые частицы в грунтах – это многофункциональные добавки – ускорители твердения цементогрунтов. Процессы ускоренной гидратации и твердения цемента в цементогрунтах протекают тем интенсивнее, чем выше дисперсность грунта, т. е. чем больше содержание глинистых частиц.

Влияние активности грунта, содержащего глинистые частицы, необходимо учитывать при исследовании процессов структурообразования в грунтах, укрепленных минеральными вяжущими.

### Литература

1. Пашенко А. А. Вяжущие материалы. Киев: Вища школа, 1985. 440 с.
2. Безрук В. М. Укрепленные грунты. М.: Транспорт, 1982. 231 с.
3. Безрук, В. М. Теоретические основы укрепления грунтов цементом. М.: Автотрансиздат, 1956. 86 с.
4. Дорожные одежды с основаниями из укрепленных материалов Ю. М. Васильев [и др.] М.: Транспорт, 1989. 191 с.
5. Бойкова А. И. Химия, кристаллохимия и физическая химия минералов клинкера и цементного камня. Цемент. 1980. № 12. С. 6–9.
6. Тейлор Х. Кристаллохимия продуктов гидратации портландцемента // VI Международный конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1976. С. 192–207.
7. Формирование и генезис микроструктуры цементного камня / под ред. Л. Г. Шпыновой. Львов: Вища школа, 1975. 157 с.
8. Гончарова Л. В. Основы искусственного улучшения грунтов. М.: МГУ, 1973. 375 с.
9. Дмитриев А. М. Цементы с минеральными добавками // Цемент. 1980. № 12. С. 12–14.
10. Васильев Ю. М. Новое в разработке комплексных методов укрепления грунтов при строительстве автомобильных дорог. М.: Союздорнии, 1984. С. 31–37.

*Поступила 28.02.2014*