

УДК 691.544:539.2

Е.А. ХУДОВЕКОВА<sup>1</sup>, инженер (Khudovekova\_ea@mail.ru);

М.С. ГАРКАВИ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, заместитель главного инженера по науке и инновациям

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (455000, г. Магнитогорск, пр-т Ленина, 38)

<sup>2</sup> ЗАО «Урал-Омега» (455037, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр-т Ленина, 89, стр. 7)

## Образование наносистем в процессе гидратации шлакощелочного вяжущего

Рассмотрен процесс образования наносистем при взаимодействии ионов щелочного активатора с частицами доменного гранулированного шлака в растворе. Проанализировано влияние ионов щелочных металлов  $K^+$ ,  $Na^+$  на свойства и структуру водных растворов. Подобраны оптимальные концентрации растворов-активаторов NaOH, KOH с учетом структурных изменений жидкости затворения. Представлены зависимости прочности шлакощелочного камня от концентрации и вида активатора. Показано, что активаторы, содержащие отрицательно гидратирующиеся катионы, позволяют увеличить как скорость набора, так и конечную прочность шлакощелочного камня. Прочность образцов ШЩК, твердевших в нормальных условиях на основе раствора KOH, на 27% выше, чем на основе раствора NaOH.

**Ключевые слова:** доменный гранулированный шлак, наносистема, шлакощелочное вяжущее, активаторы, механизм гидратации.

E.A. KHUDOVEKOVA<sup>1</sup>, Engineer (Khudovekova\_ea@mail.ru); M.S. GARKAVI<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering),  
Deputy Chief Engineer for Science and Innovation

<sup>1</sup> Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (38, Lenin Avenue, Magnitogorsk, 455000, Russian Federation)

<sup>2</sup> ЗАО «Ural-Omega» (structure 7, 89, Lenina Avenue, Magnitogorsk, 455037, Chelyabinskaya Oblast, Russian Federation)

### Formation of Nanosystems During Slag-Alkaline Binder Hydration

The process of nanosystem forming during interaction alkali activator ions with particles of ground-granulated blast furnace slag have been discussed. The effect of positive and negative hydration of ions on the properties and structure of water solution has been analyzed. Taking into account structural changes of mixing liquid, optimal concentration of activators were selected. It was shown that activators having as a part of ions with negative hydration promote to increase as curing rate and 28-age strength of stone. The strength of samples prepared from GGBFS and KOH solution is 27% higher, then strength of sample on a base of NaOH solution (under normal curing conditions).

**Keywords:** ground-granulated blast furnace slag, nanosystems, slag structure, slag-alkaline binder, activators, mechanism of hydration.

В настоящее время в строительстве наблюдается тенденция к снижению материало- и энергоёмкости изделий, расширению минерально-сырьевой базы, созданию альтернативных портландцементу вяжущих веществ. Основными побудительными мотивами в поиске такой альтернативы являются в большей степени экологические и экономические факторы. Производство портландцемента, который на данный момент является основным гидравлическим вяжущим, связано с высоким потреблением природных минеральных и энергетических ресурсов и сопровождается высокими объемами выбросов в окружающую среду. Поэтому несомненно необходима разработка и развития производства бесклинкерных гидравлических вяжущих, по техническим характеристикам не уступающих портландцементу.

Одной из разновидностей бесклинкерных гидравлических вяжущих являются так называемые геоцементы, получаемые на основе алюмосиликатов техногенного и природного происхождения путем затворения их щелочными активаторами. Наиболее исследованы по свойствам, составам и структуре из геополлимерных материалов шлакощелочные вяжущие, разработанные В.Д. Глуховским в 1957 г., но по ряду причин не нашедшие широкого применения в строительстве. Различные разработки и развитие производства таких вяжущих и строительных материалов на их основе — актуальная задача в условиях современных мировых тенденций, в рамках концепции устойчивого развития [1, 2].

Несмотря на большое количество исследований влияния состава и структуры активатора на процессы гидратации и твердения шлакощелочного вяжущего, при выборе его вида и количества зачастую используются эмпирические подходы. Традиционный подход к синтезу алюмосиликатных шлакощелочных вяжущих связан с выбором концентрации щелочного активатора исходя

Currently in construction there are a tendency to reduce material and energy intensity of productions, to extend mineral raw material base, to develop Portland cement alternative binders. The main motivations to find this alternative are generally environmental and economic factors. Production of Portland cement, which is the main hydraulic binder currently, is accompanied by a high volume of emissions into the environment due to the high consumption of natural mineral and energy resources. Therefore, the development and expansion of clinkerless hydraulic binders, which are not come short of their technical characteristics to Portland cement, are very actual.

One of the varieties clinkerless hydraulic binders is the so-called «geocements» obtained on the basis of aluminum silicates anthropogenic and natural origin, by mixing them with alkaline activator. Slag-alkaline binders (AAS) are the most investigated variety of geopolymeric materials. They had developed by Glukhovskiy V.D. in 1957, but for various reasons had not found wide application in construction. Continuation of design and development of such binders and building materials based on them is urgent task in up-to-date global trends within the concept of «sustainable development» [1, 2].

Despite the large number of studies about the effect activator's composition and structure on the hydration and hardening processes of slag-alkaline binders, type and quantity of activator are chose by empirical approaches often. The traditional approach to the synthesis of aluminosilicate slag-alkaline binders is related to the choice of concentration of alkali activator judging from the molar alumina content in the raw components and the need to reach a sufficiently high pH of mixing substance for efficient hydrolysis of aluminosilicates [3].

The aim of this work is to analyze the impact of the structure and composition of the mixing liquid for an initial period of hydration and kinetics of structure formation slag-alkaline binders.

Массовая доля, % Mass fraction, %						
SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	SO <sub>3</sub>
35,7	40,1	5,5	14,4	0,9	1	1,2

из молярного содержания глинозема в сырьевом компоненте и необходимости достижения достаточно высокого значения pH среды затворения для эффективного гидролиза алюмосиликатов [3].

Целью данной работы является рассмотрение влияния структуры и состава жидкости затворения на начальный период гидратации и кинетику структурообразования шлакощелочного вяжущего.

Механизм и кинетика гидратообразования в шлакощелочных вяжущих системах определяются химическим составом и структурой шлака, с одной стороны, и природой активизатора – с другой. На каждом этапе твердения искусственного камня роль активизатора неоднозначна и определяется его вещественным составом и количественным содержанием.

В настоящей работе рассмотрено активирующее влияние растворов КОН и NaOH в начальный период гидратации доменного гранулированного шлака с модулем основности  $M_o=0,91$ ; модулем активности  $M_a=0,4$ ; коэффициентом качества  $K_k=1,68$ . Химический состав шлака приведен в таблице.

Помол шлака осуществлялся в мельнице центробежно-ударного действия до удельной поверхности  $470 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

Как известно, по химическому составу доменный гранулированный шлак близок к порландцементному клинкеру, однако имеются значительные различия в их структуре и соотношении компонентов. Структура шлака главным образом стекловидная и представляет собой практически непрерывную сетку кремнекислородных тетраэдров с включениями различных элементов: Ca, Mg, Al, S, Mn. При этом ионы  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  могут выступать не только в качестве ионов-модификаторов, но и в качестве сеткообразователей. Большая степень связности кремнекислородных тетраэдров в структуре шлака по сравнению с таковыми в структуре порландцементного клинкера объясняется пониженным содержанием в нем ионов  $\text{Ca}^{2+}$ , способствующих деполимеризации структуры [4, 5].

В структуре шлаков преобладают ионно-ковалентные связи  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$  и некоторое количество связей  $\text{O}-\text{M}^+$  с высокой долей ионности. В структуре же высокоосновных клинкерных минералов  $\text{C}_3\text{S}$  и  $\text{C}_2\text{S}$  связи по преобладающему характеру ионные:  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Ca}-\text{O}-\text{Ca}-\text{O}-\text{Si}-$ ,  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Ca}-\text{O}-\text{Si}-$ . В таких системах отсутствуют мостиковые кислороды и соответственно связи  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ . При гидратации растворения кремнезема не наблюдается, возможен только выход  $\text{SiO}_4$  из решетки минерала при разрыве связей  $\text{Ca}-\text{O}$ .

Ионная связь  $\text{Ca}-\text{O}$  разрывается за счет протонизации оксидного иона в связи  $\text{Si}-\text{O}-\text{Ca}$ , перераспределения в ней электронной плотности таким образом, что энергия связи  $\text{Si}-\text{O}$  увеличивается, а связи  $\text{Ca}-\text{O}$  уменьшается. В результате поляризующего влияния  $\text{OH}^-$  происходит разрыв связи  $\text{Ca}-\text{O}$ .

В шлаках для образования гидросиликатов необходимо разрушить более прочные силосановые связи  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  и ионно-ковалентные  $-\text{Si}-\text{O}-\text{M}^+$ .

Хорошо известна кластерная структура воды. Нанокластеры воды обладают большим запасом энергии, они атакуют активные центры на поверхности частиц шлакового стекла и отдают им часть своей энергии, вследствие чего колебания атомов усиливаются и происходит разрыв химических связей катионов стеклообразователей с атомами кислорода [6]. Однако поляри-

The mechanism and kinetics of hydrate formation in slag-alkaline cementitious systems are determined by the chemical composition and structure of the slag on the one hand, and the activator nature on the other hand. At each hardening stage of artificial stone role of activator is ambiguous and determined by its material composition and quantitative content.

In this paper activating effect of KOH and NaOH solutions in the initial period of hydration of granulated blast furnace slag was considered. Granulated blast furnace slag with the following features was used: lime factor 0,91,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2=0,4$ , quality coefficient = 1,68. The chemical composition of the slag is shown in Table.

Slag grinding was carried out in a centrifugal impact mill to the specific surface area of  $470 \text{ м}^2/\text{kg}$ .

As you know, in their chemical composition granulated blast furnace slag is close to Portland cement clinker, but there are significant differences in their structure and components ratio. Structure of slag is primarily glassy and represents almost a continuous network of silicon-oxygen tetrahedrons with inclusions of different elements: Ca, Mg, Al, S, Mn. The oxide of Al and Mg can act not only as a modifiers, but also as network-forming oxides. A large degree of connectivity of silicon tetrahedrons in the structure of slag, as compared with those of Portland cement clinker structure, is explained by reduced content of ions  $\text{Ca}^{2+}$ , promoting depolymerization of structure [4, 5].

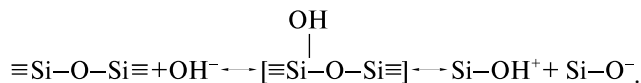
In the structure of slag ion-covalent bonds  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$  and some  $\text{O}-\text{M}^+$  bonds with a high degree of ionicity. In the structure of the highly basic clinker minerals such  $\text{C}_3\text{S}$  and  $\text{C}_2\text{S}$  the bonds have predominantly ionic character:  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Ca}-\text{O}-\text{Ca}-\text{O}-\text{Si}-$ ,  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Ca}-\text{O}-\text{Si}-$ . In such systems, bridging oxygen's are absent and respectively bonds  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$  are absent too. During the hydration silica dissolution is not observed, only emission of  $\text{SiO}_4$  is possible when bonds  $\text{Ca}-\text{O}$  are broken.

Ionic  $\text{Ca}-\text{O}$  bond is broken due to the protonation of an oxide ion in  $\text{Si}-\text{O}-\text{Ca}$  bond, redistribution of electron density in it so that the binding energy of  $\text{Si}-\text{O}$  increases, and the binding energy of  $\text{Ca}-\text{O}$  decreases. In response to the polarizing influence of  $\text{OH}^-$  the break of the  $\text{Ca}-\text{O}$  occurs.

In the slag for the formation of hydrosilicates it is necessary to destroy strong siloxane bonds  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  and ion-covalent  $-\text{Si}-\text{O}-\text{M}^+$ .

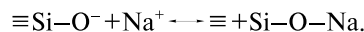
Well-known cluster structure of water. Water nanoclusters have a large amount of energy, they attack the active sites on the slag glass surface and give them some of their energy, so that vibrations of the atoms amplify and break of chemical bonds between glass-forming cations and oxygen atoms occur [6]. However, the polarity of water molecules in this case is insufficient to break said bonds.

Therefore, the mechanism of dissolution of the slag is somewhat different from that of the clinker minerals. Decisive role in the process of destruction is played by  $\text{OH}^-$  anions. The hydroxyl groups of the activator have great polarizing effect, they form a donor-acceptor bond with glass-forming atoms  $-\text{Si}^{4+}, \text{Al}^{3+}, \text{Mg}^{2+}$  and break their links with the oxygen of the scheme:



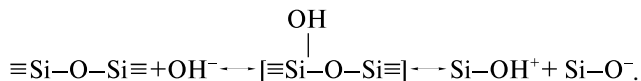
Bonds  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  are broke due to complexation with  $\text{OH}^-$  ions and increasing coordination number  $\text{Si}^{4+}$  to 5–6 at a higher pH [7].

In turn, the alkali metal cations inhibit the reverse siloxane bond formation reaction and contribute to the removal of the reaction products in a solid phase [8]:



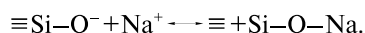
ности молекул воды в этом случае недостаточно для разрыва указанных связей.

Следовательно, механизм растворения шлака несколько отличается от такового для клинкерных минералов. Определяющую роль в процессе деструкции здесь играют анионы  $\text{OH}^-$ . Гидроксильные группы активатора обладают большим поляризующим действием, образуют донорно-акцепторную связь с атомами стеклообразователей  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и разрывают их связи с кислородом по схеме:



Связи  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  рвутся в результате комплексообразования с  $\text{OH}^-$  ионами и повышения координационного числа  $\text{Si}$  до 5–6 при более высоком значении pH [7].

В свою очередь, катионы щелочных металлов препятствуют протеканию обратной реакции образования силоксановой связи и способствуют выводу продуктов реакции в твердую фазу [8]:



Таким образом, для повышения гидравлической активности шлака необходимо введение дополнительного количества  $\text{OH}^-$ , способствующих диспергации твердой фазы.

Одними из традиционных активизаторов в случае ШЩВ являются растворы  $\text{KOH}$  и  $\text{NaOH}$ . Большая часть исследований направлена на выявление оптимальной pH среды затворения [9, 10]. При одинаковой концентрации ионов  $\text{K}^+$  и  $\text{Na}^+$  в растворе его pH и ионная сила имеют одинаковое значение.

Однако эти ионы по-разному влияют на структуру воды и соответственно ее реакционные свойства. Согласно [11] все жидкофазные реакции следует трактовать как реакции в нанореакторах. Более того, сама химическая реакция с участием воды или водных растворов может стимулировать организацию молекул в нанореакторы. В сильнощелочной среде кремниевая кислота существует в виде аквагидроксионов типа  $[\text{H}_2\text{O}-\text{Si}(\text{OH})_5]$ ,  $[\text{Si}(\text{OH})_5]^-$ ,  $[\text{Si}(\text{OH})_6]^{2-}$ . Это существенно повышает скорость образования гидратных фаз.

Во-первых, данные ионы имеют разные числа сольватации, что связано с различием их радиусов. По данным [12], для  $\text{Na}^+$  число молекул воды в первой гидратной оболочке составляет 6, для  $\text{K}^+$  – 8. Число сольватации аниона  $\text{OH}^-$ , по данным [13], равно 3. Таким образом, существует такая концентрация ионов, при которой структура электролита будет состоять только из однослойно гидратированных катионов и анионов, непосредственно соприкасающихся своими гидратными оболочками. Эти характерные концентрации были названы К.П. Мищенко и А.М. Сухотиным границами полной гидратации (ГПГ) [14]. ГПГ служит переходной точкой от разбавленных растворов к насыщенным. При увеличении концентрации электролита выше данной концентрации структуру раствора уже рассматривают как структуру кристаллогидрата, видоизменяемую наличием избыточных молекул воды. Таким образом, увеличение концентрации раствора активатора выше концентрации, соответствующей ГПГ, нецелесообразно.

Исходя из вышеизложенного были рассчитаны концентрации растворов электролитов  $\text{NaOH}$  и  $\text{KOH}$ , соответствующие ГПГ. Для раствора  $\text{NaOH}$  такая концентрация составляет 3,94М, для  $\text{KOH}$  – 4,94М.

На рис. 1 приведена зависимость прочности образцов ШЩК от концентрации раствора активатора.

Приведенные данные указывают на то, что при увеличении концентрации активатора в растворе выше

Thus, to increase the hydraulic activity of slag is necessary to introduce an additional quantity of  $\text{OH}^-$  promoting dispersion of the solid phase.

One of the traditional activator in case AAS is water solution of  $\text{KOH}$  and  $\text{NaOH}$ . Much of the research is aimed at identifying the optimum pH of the medium mixing [9, 10]. At equal concentrations of  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$  in solution its pH and ionic strength have the same value.

However, these ions have different effects on the structure of water and, accordingly, its reactive properties. According to [11] all liquid-phase reactions should be interpreted as a reaction in nanoreactors. Moreover, the chemical reaction with water or water solution can stimulate organization of the molecules in naoreactors. In a strongly alkaline environment, silicic acid exists as a type hydrated ions such as  $[(\text{H}_2\text{O}-\text{Si}(\text{OH})_5)]$ ,  $[\text{Si}(\text{OH})_5]^-$ ,  $[\text{Si}(\text{OH})_6]^{2-}$ . This significantly increases the speed of formation of hydrated phases.

Firstly, these ions have different solvation number that is associated with the difference between their radii. According to [12] the number of water molecules in the first hydration shell of  $\text{Na}^+$  is equal to 6 is, for  $\text{K}^+$  it is 8. The solvation number of  $\text{OH}^-$  anion according to [13] is equal to 3. Thus, there is a concentration of the ions wherein electrolyte structure consist of monolayer-hydrated cations and anions which are in direct contact with each other. These distinctive concentrations were called complete-solvation limit [14]. Complete-solvation limit is transition point from dilute solutions to saturated solutions. When the concentration of the electrolyte is above complete-solvation limit solution structure can be considered as crystalline structure modified by excess water molecules. Thus, increasing of activator solution concentration above complete-solvation limit is not advisable.

Based on the foregoing, concentration of  $\text{NaOH}$  and  $\text{KOH}$  corresponding complete-solvation limit solution were calculated. For  $\text{NaOH}$  solution such a concentration is equal to 3,94M for  $\text{KOH}$  – 4,94M.

Fig. 1 shows the strength of the AAS samples as a function of activator type and solution concentration.

These data indicate that increasing of activator solution concentration above the corresponding complete-solvation limit is lead to considerable strength reduction of AAS stone. The optimum concentration for sodium activator is 2,5 mol/l, for the potassium activator is – 1,76 mol/l. Moreover, strength of the patterns based on the solution with optimum concentration of  $\text{KOH}$  is 27% higher than patterns based on the  $\text{NaOH}$  solution.

This difference may be cause by different effects of  $\text{K}^+$  and  $\text{Na}^+$  on the structure of water. Sodium ion has a strong orienting influence on the molecules of water, i. e. it has a positive hydration. Potassium has a minimal effect on the first sphere of water molecules as compared with sodium, which is

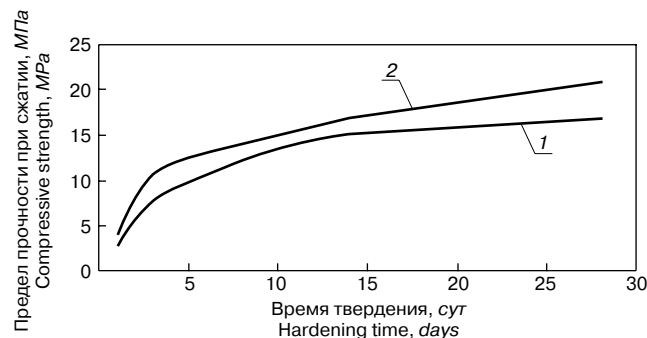


Рис. 1. Прочность шлакощелочного камня в зависимости от вида и количества активатора: 1 –  $\text{NaOH}$ ; 2 –  $\text{KOH}$

Fig. 1. Compressive strength of the AAS samples as a function of activator type and solution concentration: 1 –  $\text{NaOH}$ ; 2 –  $\text{KOH}$

границы полной гидратации прочность шлакощелочного камня значительно уменьшается.

Оптимальная концентрация для натриевого активатора составляет 2,5 моль/л, для калиевого – 1,76 моль/л. Причем прочность образцов на основе раствора КОН при оптимальной концентрации на 27% выше, чем на основе раствора NaOH.

Такое различие может быть вызвано различным влиянием  $K^+$  и  $Na^+$  на структуру воды. Ион натрия обладает сильным ориентирующим действием на молекулы воды, т. е. обладает положительной гидратацией. Калий оказывает меньшее ориентирующее действие на молекулы воды первой сферы по сравнению с натрием, что обусловлено удалением воды от катиона. Большой ион  $K^+$  вызывает увеличение подвижности молекул воды по сравнению с чистой водой. Это явление называется отрицательной гидратацией. В этом случае КОН до определенной концентрации играет по отношению к «свободной» воде как бы роль повышенной температуры, «предразрушая» ее структуру.

Кинетика набора прочности вяжущего представлена на рис. 2, откуда следует, что в течение первых 7 сут скорость набора прочности образцов на калиевом активаторе значительно выше, чем на натриевом. Вероятно, это вызвано более высокой подвижностью молекул воды в растворе КОН и соответственно скоростью перемещения ионов  $K^+$  и  $OH^-$ , играющих определяющую роль на ранних этапах гидратации [8], где исключительно важное значение имеет образование нанодисперсной системы. Именно на этом этапе гидратации образуются частицы надмолекулярного уровня дисперсности (1–5 нм), состоящие не менее чем из трех элементарных ячеек и обладающие свойствами фазы, которые впоследствии превращаются в макроструктурные.

Для получения высокопрочного шлакощелочного камня необходимо, чтобы в начальной стадии взаимодействия с ионами кальция кремниевая кислота находилась в диссоциированном состоянии, а полимеризация кремнекислородных анионов происходила позднее – в период объединения зародышей гидросиликатов кальция. Последующая низкотемпературная полимеризация в системе  $MeO-(Al-Si)O_2$  приводит к образованию цеолитовых фаз с наноразмерной величиной кристаллитов, а наноразмерные частицы гидросиликатов кальция играют роль центров кристаллизации [3].

Более высокая конечная прочность образцов, затворенных раствором КОН, скорее всего является следствием структурных различий в затвердевшем камне. Каждый из щелочных катионов (Na, K) легко растворяется в воде и без труда внедряется в продукты гидратации шлака. При этом изменяется морфология геля гидросиликата кальция (C–S–H) с беспорядочной на пластинчатую. Пластинчатые продукты гидратации блокируют капиллярные поры при значительно более низкой степени гидратации, чем это наблюдается для продуктов гидратации при беспорядочной морфологии, что сопровождается ростом прочности. При этом продукт гидратации с меньшим молярным объемом может обуславливать меньшую прочность, что наблюдается для систем, полученных с использованием NaOH [15].

На основании изложенного можно заключить, что определяющее значение для деструкции алюмосиликатной структуры шлака имеет разрыв ковалентных связей  $-Si-O-Si-$ ,  $-Si-O-Al-$ ,  $-Al-O-Al-$  за счет комплексобразования с  $OH^-$ . Структурные различия жидкости затворения, вызванные ионами  $K^+$  и  $Na^+$ , влияют на скорость вывода продуктов деструкции из реакции и соответственно на кинетику гидратации шлака. При этом использование калиевых активаторов позволяет повысить как скорость набора, так и конечную прочность шлакощелочного камня.

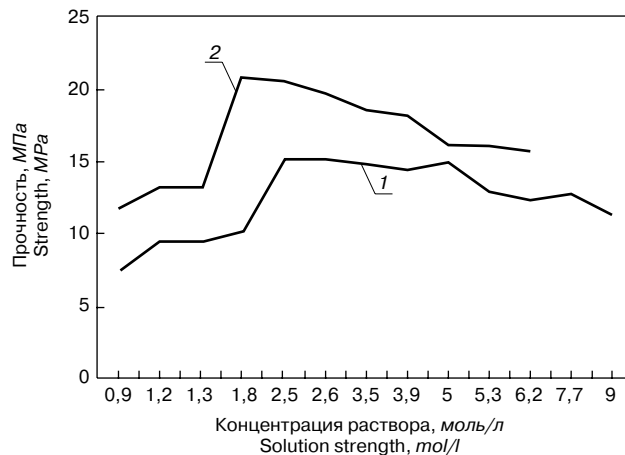


Рис. 2. Кинетика набора прочности вяжущего при твердении в нормально-влажностных условиях: 1 – NaOH; 2 – КОН

Fig. 2. Kinetics of curing the binder hardening in normal humidity conditions: 1 – NaOH; 2 – KOH

caused by the removal of water from the cation. Big  $K^+$  ion causes an increase in the mobility of water molecules in comparison to pure water. This phenomenon is called negative hydration. In this case, relative to «free» water, KOH until defined concentration plays role of elevated temperature and prefractures its structure.

Kinetics of curing the binder is shown in Fig. 2. It can be seen that during the first 7 days strength development rate of the samples on potassium activator is significantly higher than on the sodium activator. Probably this is cause the higher mobility of water molecules in a solution of KOH and thus, the speed of movement of ions  $K^+$  and  $OH^-$ , which play a crucial role in the early stages of hydration [8], when formation of nanosystem is very important. At this stage the particles of supramolecular hydration level of dispersion (1–5 nm) consisting of at least three unit cells and having the properties of the phase are formed. These particles will be convert subsequently in macrostructural.

For obtaining of high-strength AAS stone it is necessary to being of silicic acid in a dissociated state during initial stage of its interaction with calcium, and polymerization of silicon-oxygen anions occurs later during the association of hydrosilicates calcium nucleus. Follow low-temperature polymerization in system  $MeO-(Al-Si)O_2$  leads to the formation of zeolite phase with nanoscale size of the crystallites, and nano-sized particles of calcium hydrosilicates play the role of nucleation [3].

Higher final strength of the patterns on a base of KOH solution is likely a consequence of the structural differences in the hardened stone. Each of the alkaline cations (Na, K) is readily-soluble in water and easily introduced into the slag hydration products. With that morphology of calcium silicate gel (CSH) is change from disordered to laminar. Laminar hydration products block the capillary pores at a substantially lower degree of hydration than that observed if structure is disordered. It contributes to strength increasing. At that hydration products with a smaller molar volume can be responsible for smaller strength that is observed for the systems obtained using NaOH [15].

Based on the above facts it can be concluded that breaking covalent bonds  $-Si-O-Si-$ ,  $-Si-O-Al-$ ,  $-Al-O-Al-$  by complexing with  $OH^-$  is crucial for destruction of the aluminosilicate slag structure. Structural differences of mixing liquid caused by ions  $K^+$  and  $Na^+$  affect the output speed of the destruction products of the reaction and kinetics of slag hydration. The use of potassium as an activator increases the rate of set and final strength AAS stone.



Список литературы

1. Shi C., Krivenko P.V., Roy D.M. Alkaliactivated cements and concretes. London and New York: Taylor & Francis Publisher. 2006. 376 p.
2. Zhang Z., Provis J., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56, pp. 113–127.
3. Жерновский И.В., Осадчая М.С., Череватова А.В., Строкова В.В. Алюмосиликатное наноструктурированное вяжущее на основе гранитного сырья // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 38–41.
4. Школьник Я.Ш. Структура и гидратационная активность сульфидсодержащих шлаков. Дисс... докт. техн. наук. Москва. 1999. 276 с.
5. Панфилов М.И., Школьник Я.Ш., Орининский Н.В. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии. М.: Металлургия, 1987. 238 с.
6. Вернигорова В.Н., Саженко Д.С., Ульянов В.В. О механизме щелочного активирования шлаковых цементов // *Региональная архитектура и строительство*. 2010. № 2. С. 4–8.
7. Сычев М.М. Неорганические клеи. Л.: Химия, 1986. 152 с.
8. Кривенко П.В. Механизм и кинетика процессов структурообразования в низкоосновных щелочных вяжущих системах // *Цемент*. 1993. № 4–5. С. 27–31.
9. Yuan B., Yu Q.L., Brouwers H.J. Investigation on the activating effect of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and  $\text{NaOH}$  on slag. *Non-Traditional Cement & Concrete V Proceedings of the International Symposium*. Brno. 2014, pp. 301–305.
10. Артамонова А.В. Воронин К.М. Шлакощелочные вяжущие на основе доменных шлаков центробежно-ударного измельчения // *Цемент и его применение*. 2011. № 4. С. 108–113.
11. Бучаченко А.Л. Нанохимия – прямой путь к высоким технологиям нового века // *Успехи химии*. 2003. Т. 75. № 5. С. 419–437.
12. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. К.П. Мищенко, А.А. Равделя. Л.: Химия, 1974. 200 с.
13. Золотов Ю.А., Дорохова Б.Н. Фадеева В.И. Основы аналитической химии. М.: Высшая школа, 1996. 383 с.
14. Мищенко К.П., Полторацкий Г.М. Термодинамика и строение водных и неводных растворов электролитов. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Химия, 1976. 328 с.
15. Бенц Д.П. Добавки соединений лития, калия и натрия в цементное тесто // *Цемент и его применение*. 2011. № 4. С. 82–88.

References

1. Shi C., Krivenko P.V., Roy D.M. Alkaliactivated cements and concretes. London and New York: Taylor & Francis Publisher. 2006. 376 p.
2. Zhang Z., Provis J., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56, pp. 113–127.
3. Zhernovski I.V., Osadchaya M.S., Cherevatova A.V., Strokov V.V. Nanostructured aluminosilicate binder based on granite. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 1–2, pp. 38–41. (In Russian).
4. Shkolnik Y.A. Structure and hydration activity sulfide containing slag. Doc. Diss. (Engineering). Moscow. 1999. 276 p. (In Russian).
5. Panfilov M.I. Pererabotka shlakov i bezotходnaya tekhnologiya v metallurgii [Recycling waste and non-waste technology in metallurgy]. Moscow: Metallurgy. 1987. 238 p.
6. Vernigorova V.N., Sadenko D.S., Ulyanov V.V. About the mechanism of alkali activated slag cement. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2010. No. 2, pp. 4–8. (In Russian).
7. Sychev M.M. Neorganicheskie klei [Inorganic adhesives]. Leningrad: Chemistry. 1986. 152 p.
8. Krivenko P.V. The mechanism and kinetics of structure formation in low-basic alkaline cementitious systems. *Cement*. 1993. No. 4–5, pp. 27–31. (In Russian).
9. Yuan B. Investigation on the activating effect of  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  and  $\text{NaOH}$  on slag. *Non-Traditional Cement & Concrete V Proceedings of the International Symposium*. Brno. 2014. Vol. 1, pp. 301–305.
10. Artamonova A.V., Voronin K.M. Slag-alkaline binders based on blast furnace slag centrifugal impact grinding. *Cement i ego primeneniye*. 2011. No. 4, pp. 108–113. (In Russian).
11. Buchachenko A.L. Nanochemistry – a direct path to the high technology of the new century. *Uspekhi khimii*. 2003. Vol. 75. No. 5, pp. 419–437. (In Russian).
12. Mishchenko K.P., Ravdel A. Kratkii spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin [Quick Reference of physico-chemical variables]. Leningrad: Khimiya. 1974. 200 p.
13. Zolotov Y., Dorokhova B.N., Fadeev V.I. Osnovi analiticheskoi khimii [Fundamentals of Analytical Chemistry]. Moscow: Vysshaya shkola. 1996. 383 p.
14. Mishchenko K.P., Poltoratsky G.M. Termodinamika i stroenie vodnih i nevodnih rastvorov elektrolitov [Thermodynamics and structure of water and non-aqueous electrolyte solutions]. Leningrad: Chemistry. 1976. 328 p.
15. Benz D.P. Additives compounds of lithium, potassium and sodium. *Cement i ego primeneniye*. 2011. No. 4, pp. 82–88. (In Russian).

НОВОСТИ

## Оборудование компании «Вселуг» успешно работает при производстве ССС ГК КНАУФ

В 2014 г. на заводе «КНАУФ гипс Капчагай» (Казахстан) проводилась модернизация производственной линии по выпуску сухих строительных смесей на основе гипса. Основным поставщиком оборудования была выбрана российская машиностроительная компания «Вселуг». На заводе ГК КНАУФ в г. Капчагай установлен комплекс оборудования, который позволил увеличить производственную мощность предприятия с 15 до 20 т/ч гипсовых ССС. Смешивание компонентов производится в смесителе Торнадо КК 300 объемом 3 м<sup>3</sup>. Полуавтоматическая линия

упаковки смесей заменена на полностью автоматическую с запаиванием клапанов мешков. Также установлена автоматическая линия компании «Вселуг» для укладки продукции в мешках на поддоны.

Глубокая модернизация также затронула санитарно-гигиенические вопросы: на заводе заменена система обеспыливания, которая позволяет более эффективно улавливать высокодисперсные частицы ССС из воздуха.

По материалам МК «Вселуг»