

## REFERENCES

1. Krupa A. A. *Fiziko-khimicheskie osnovy polucheniya poristyykh materialov iz vulkanicheskikh stekol* [Physical-chemical basis for porous materials of volcanic glasses]. Kiev: Vyshcha shkola, 1978, 136 p (in Russian).
2. Demidovich B. K. *Proizvodstvo i primeneniye penostekla* [Production and use of foam glass]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1972, 304 p (in Russian).
3. Gorlov Yu. P., Merkin A. P., Usenko A. A. *Tekhnologiya teploizolyatsionnykh materialov* [The technology of thermal insulation materials]. Moscow: Stroyizdat, 1980, 399 p (in Russian).
4. Puchka O. V., Min'ko N. I. *Penosteklo. Nauchnye osnovy i tekhnologiya* [Foam glass. Fundamentals and technologies]. Belgorod: Izd-vo BGTU im. V. G. Shukhova, 2009, 162 p (in Russian).
5. Khodakov G. S. *Osnovnye metody dispersionnogo analiza poroshkov* [The basic methods of analysis of variance powders]. Moscow: Stroyizdat, 1968, 200 p (in Russian).

## ФОТО- И РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКОЕ СТИМУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРАТАЦИИ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ

**Ю. С. Саркисов, Н. П. Горленко, О. М. Лоскутов,  
Томский государственный архитектурно-строительный университет**

**Ключевые слова:** оксиды, лазерное излучение, ультрафиолетовое излучение, гамма-излучение, прочность, структура твердения

**Key words:** oxides, laser radiation, ultraviolet radiation, gamma radiation, durability, structure of hardening

Физические методы управления процессами гидратации и структурообразования дисперсных систем включают большой арсенал средств и методов воздействия на вещество с целью направленного изменения его физико-химических, технологических и эксплуатационных характеристик. Известно [1], что к ним относятся лазерные, радиационные, электрофизические, плазменные, механические и другие высокоэффективные способы регулирования свойств синтезируемых материалов.

Несмотря на то, что с момента создания лазера прошло немногим более 50 лет, бурное развитие прикладной электроники сопровождается демонстрацией широких возможностей применения лазеров в информационных системах, вычислительной технике, химии, машиностроении, электронике и других отраслях [2, 3]. В промышленности строительных материалов и строительстве лазеры практически не используются, а в химии и химической технологии вяжущих веществ наши работы были одними из первых [3, 4]. Воздействие ультрафиолетовым и гамма-излучениями известно давно, однако влияние этих видов излучений на процессы гидратации и структурообразования оксидных систем и других вяжущих изучено недостаточно, и механизм такого влияния до конца не выяснен.

В настоящей работе исследовано влияние на кинетику рассматриваемых процессов лазерного, ультрафиолетового и гамма-излучений. Следует особо подчеркнуть, что все эти виды излучений имеют одинаковую физическую природу, но разную частоту волнового движения [5], поэтому сопоставление результатов их взаимодействия с веществом приобретает особый интерес.

Эксперименты проводили на образцах диаметром и высотой  $(15 \times 15) \cdot 10^{-3}$  м с оптимальными показателями содержания воды в исходной массе, степени уплотнения и дисперсности. При изучении влияния импульсного лазерного излучения плотность энергии варьировали от 2 до 12 Дж при длительности импульса 1 мс, а в случае непрерывного излучения – от 99 до 990 Дж при длительности воздействия излучения на образец от 3 до 30 с. Исследование влияния дозы гамма-излучения проводили в интервале времени от 10 до  $10^3$  с при экспозиционной дозе от 1200 до 6200 Кл/кг. Энергию ультрафиолетового излучения изменяли от 500 до 2000 Дж при экспозиции от 2 до 15 мин. О характере изменения прочности структур твердения с увеличением дозы импульсного лазерного излучения можно судить по данным, представленным на рис. 1 и 2, из которых видно, что исследуемые зависимости носят экстремальный характер. На рис. 3 и 4 приведены

результаты изучения влияния на оксидные системы непрерывного лазерного излучения. Характер влияния ультрафиолетового излучения на прочность отражен на рис. 5.

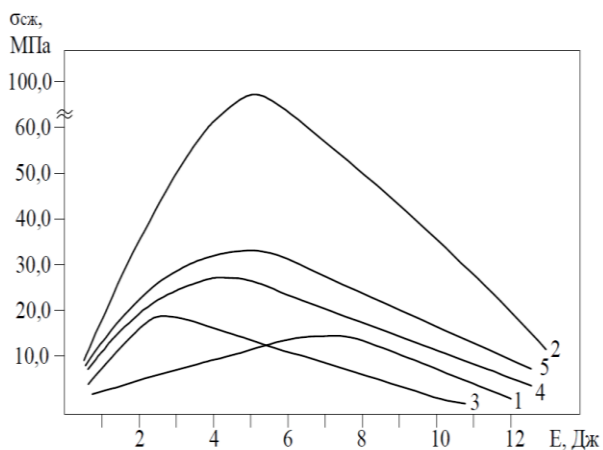


Рис. 1. Влияние импульсного лазерного излучения на прочность структур твердения систем:  
1 –  $\text{BeO-H}_2\text{O}$ ; 2 –  $\text{MgO-H}_2\text{O}$ ; 3 –  $\text{CaO-H}_2\text{O}$ ;  
4 –  $\text{SrO-H}_2\text{O}$ ; 5 –  $\text{BaO-H}_2\text{O}$

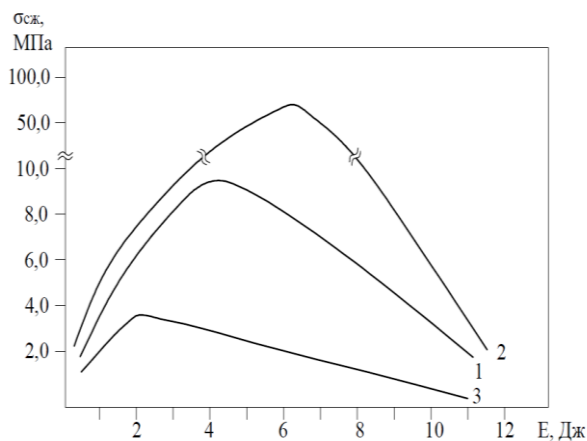


Рис. 2. Влияние импульсного лазерного излучения на прочность структур твердения систем:  
1 –  $\text{ZnO-H}_2\text{O}$ ; 2 –  $\text{CdO-H}_2\text{O}$ ; 3 –  $\text{HgO-H}_2\text{O}$

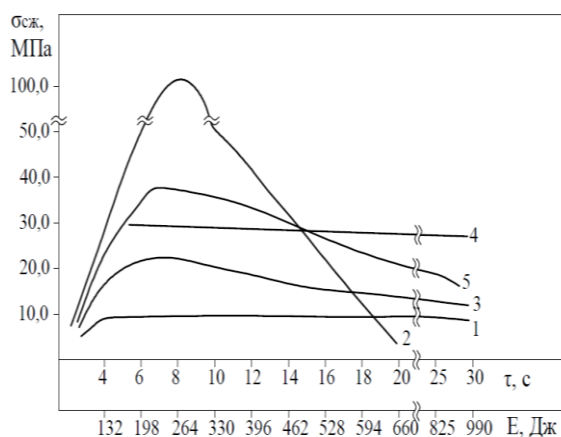


Рис. 3. Влияние непрерывного лазерного излучения на прочность структур твердения систем:  
1 –  $\text{BeO-H}_2\text{O}$ ; 2 –  $\text{MgO-H}_2\text{O}$ ;  
3 –  $\text{CaO-H}_2\text{O}$ ; 4 –  $\text{SrO-H}_2\text{O}$ ; 5 –  $\text{BaO-H}_2\text{O}$

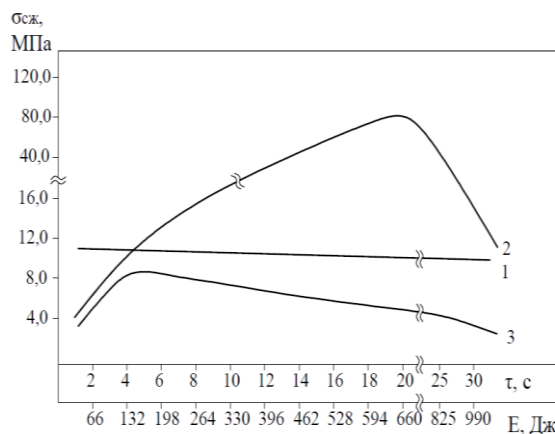


Рис. 4. Влияние непрерывного лазерного излучения на прочность структур твердения систем:  
1 –  $\text{ZnO-H}_2\text{O}$ ; 2 –  $\text{CdO-H}_2\text{O}$ ; 3 –  $\text{HgO-H}_2\text{O}$

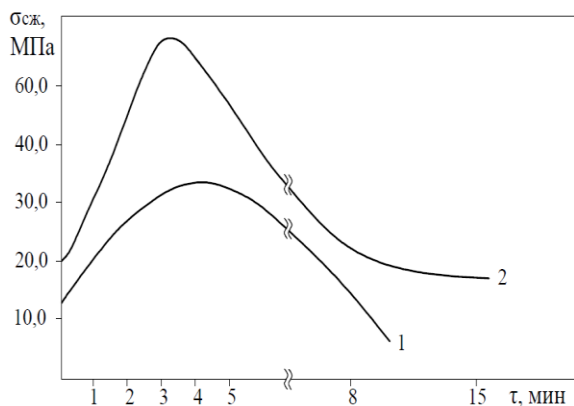


Рис. 5. Влияние на прочность структур твердения системы  $\text{MgO-H}_3\text{BO}_3\text{-H}_2\text{O}$  ультрафиолетового (1) и лазерного (2) излучений

Установлено, что по мере увеличения плотности энергии лазерного излучения прочность образцов либо не изменяется, либо возрастает до некоторого оптимального значения, после чего наблюдается ее спад. Такой характер влияния этого вида воздействия

на указанный параметр объясняется несколькими причинами. Во-первых, около 80% энергии падающего лазерного излучения рассеивается в пространстве за счет отражения белой поверхностью оксидов [2]. Подкрашивание образцов путем введения в смесь «цветных» добавок (например, углерода в виде активированного угля, графита и т. д.) способствует повышению прочности рассматриваемых систем (табл. 1). Во-вторых, существенно сказываются на прочности особенности взаимодействия лазерного излучения с веществом: ионизация, давление, температура и др. По всей вероятности, рост прочности обусловлен повышением реакционной способности смеси, ускорением процессов гидратации на активных центрах поверхности и облегчением диффузии вещества в связи с переносом электрона короткоживущими радикалами и частицами [6–11]. Спад прочности вызван температурной деформацией образца, а в случае импульсного излучения – еще и расклинивающим давлением пучка. Определенную роль в процессе формирования и спада прочности играет частичная «металлизация» оксидных систем под действием лазерного излучения [2]. Большое значение имеет, по-видимому, не только энергия падающего излучения, но и ее мощность. Если при импульсном излучении она составляет (в нашем случае) 5000–6000 Дж/с, то при непрерывном – всего 33 Дж/с. Длительность непрерывного излучения изменяется от 3 до 300 с, в то время как импульсного находится в диапазоне  $(1-3) \cdot 10^{-3}$  с. В связи с этим целесообразно использовать оба вида излучений. Дозы лазерного излучения и время его воздействия на систему, соответствующие максимальной прочности образцов, приняты нами за оптимальные.

Таблица 1

**Влияние хромофоров на прочность облученных образцов**

Система	Прочность, МПа, через 1 сут твердения образцов	
	контрольных (без хромофоров)	подкрашенных (с хромофорами)
ZnO–C–H <sub>2</sub> O	4,5	9,0
MgO–C–H <sub>2</sub> O	22,5	32,5
BaO–Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –H <sub>2</sub> O	15,0	22,5

Результаты исследования влияния гамма-излучения на прочность структур твердения (табл. 2) показывают, что для каждой системы характерна своя оптимальная величина дозы излучения. При этом прирост прочности по сравнению с контрольными образцами составляет от 11,4 до 50%. Повышение прочности объясняется увеличением реакционной способности за счет ионизации поверхностного слоя оксида и изменения его дефектности и стехиометрического состояния.

Таблица 2

**Прочность образцов до и после обработки гамма-излучением**

Система	Оптимальные параметры излучения		Прочность образцов при сжатии через 3 сут твердения, МПа	Прирост прочности по сравнению с контрольными образцами, %
	время, $10^{-3}$ с	доза, Кл/кг		
BeO–H <sub>2</sub> O	8	6200	75	42,9
MgO–H <sub>2</sub> O	4	3100	600	50
CaO–H <sub>2</sub> O	3	2320	150	50
SrO–H <sub>2</sub> O	3,6	2786	195	11,4
BaO–H <sub>2</sub> O	2	1550	300	20,0
ZnO–H <sub>2</sub> O	8	6200	52,5	31,3
CdO–H <sub>2</sub> O	3,6	2786	625	19,0
HgO–H <sub>2</sub> O	1,55	1200	30,0	33,3

По данным работы [12], при гамма-излучении резко повышается количество связанных гидратных новообразований. Следовательно, гамма-излучение существенно влияет на кинетику пересыщений в растворах и скорость химического взаимодействия, что приводит к росту прочности структур твердения.

После определения оптимальных режимов облучения была изучена кинетика структурообразования исследуемых систем по изменению прочности структур твердения во времени.

Исходя из литературных данных [13–17] и результатов наших исследований можно заключить, что действие рассмотренных видов излучений сводится в основном к повышению реакционной способности систем, в частности оксидов и воды. Влияние этих видов внешних воздействий на кинетику структурообразования исследуемых систем оказалось весьма существенным. Как правило, предварительная обработка исходных компонентов обуславливает более высокую конечную прочность по сравнению с контрольными образцами (рис. 6 и 7).

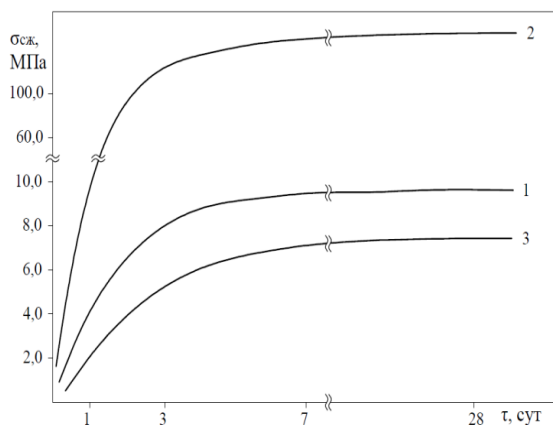


Рис. 6. Кинетика структурообразования системы CdO–H<sub>2</sub>O при обычных условиях (1), после обработки лазерным излучением (2) и гамма-излучением (3)

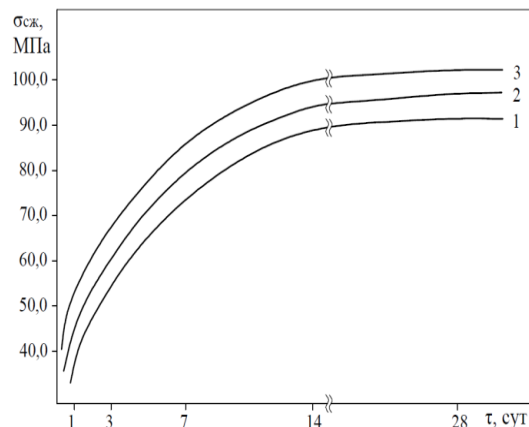


Рис. 7. Кинетика структурообразования систем: 1 – ZnO–H<sub>2</sub>O; 2 – CdO–H<sub>2</sub>O; 3 – HgO–H<sub>2</sub>O после обработки лазерным излучением

На наш взгляд, все исследуемые системы можно разделить на две группы в зависимости от характера влияния на них электромагнитного излучения:

1) дисперсии, в которых значительно ускоряются процессы структурообразования и повышается максимальная прочность структур твердения. К их числу относятся системы BeO–H<sub>2</sub>O, MgO–H<sub>2</sub>O, CdO–H<sub>2</sub>O и HgO–H<sub>2</sub>O. Этот эффект особенно заметен при подкрашивании белых образцов путем введения в исходную смесь активированного угля или других хромофоров;

2) композиции, в которых либо наблюдается спад прочности, либо прочность остается неизменной. Это системы на основе оксидов щелочноземельных металлов.

Характер влияния лазерного излучения на процессы гидратационного твердения и формирования прочности рассматриваемых дисперсий можно объяснить следующим образом. Как известно [18–20], гидратация оксидов щелочноземельных металлов происходит со значительным выделением тепла и изменением их объема. При предварительной обработке оксидов лазерным излучением происходит повышение их реакционной способности по отношению к воде, температура в системе еще более возрастает, начинают появляться внутренние напряжения и отмечается либо спад прочности, либо полное разрушение образовавшейся структуры.

Повышение прочности после предварительной обработки гамма-излучением исходных оксидов и воды можно объяснить увеличением реакционной способности систем за счет появления сольватированных электронов и других короткоживущих частиц.

Влияние электромагнитных излучений усиливается в трехкомпонентных системах, таких как CdO–PbO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O, MgO–H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>–H<sub>2</sub>O, BeO–молочная кислота, BeO–I<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–H<sub>2</sub>O, HgO–NH<sub>4</sub>Cl–H<sub>2</sub>O [4] и др. Некоторые из них рассматриваются ниже.

Так, кинетику структурообразования композиции HgO–NH<sub>4</sub>Cl–H<sub>2</sub>O изучали при обычных условиях и после обработки лазерным и гамма-излучениями. Результаты проведенных исследований (рис. 8) позволяют сделать вывод о том, что при обычных условиях возможно формирование структур твердения сравнительно высокой прочности (кривая 1). Предварительная обработка исходного оксида электромагнитными излучениями (кривые 2 и 3) приводит к значительному улучшению реологических характеристик рассматриваемой дисперсии.

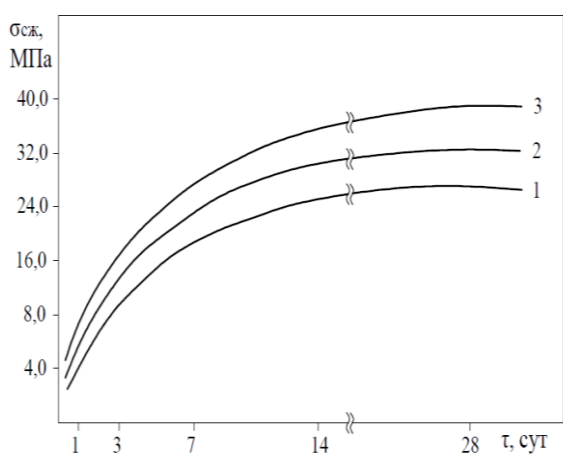


Рис. 8. Кинетика структурообразования системы  $\text{HgO}-\text{NH}_4\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$  при обычных условиях (1), после обработки лазерным излучением (2) и гамма-излучением (3)

Наблюдаемые эффекты объясняются повышением реакционной способности системы и ускорением процессов связывания исходного оксида во времени. Механизм повышения реакционной способности, на наш взгляд, состоит в следующем. При облучении оксида происходит изменение дефектной структуры его поверхностного слоя, формирование области пространственного заряда и, как следствие, повышение растворимости и активности оксида по отношению к воде [21]. При облучении же жидкого компонента возникает масса короткоживущих частиц [14–17], в том числе гидратированных электронов [8], которые вносят весомый вклад в возникновение пересыщений жидкой фазы и выкристаллизовывание из нее новообразований. При обработке гамма-излучением свежееотформованных образцов, очевидно, действуют оба фактора. Эти

предположения подтверждаются рН-метрическими и ИК-спектральными исследованиями рассматриваемой дисперсии до и после обработки электромагнитными излучениями.

После облучения исходных компонентов рН системы несколько повышается. Сопоставление этих данных показывает, что степень пересыщений, которую можно, по-видимому, определить как отношение рН после облучения к рН до облучения, непрерывно возрастает. О химическом связывании ионов ртути можно судить по ИК-спектрам продуктов твердения в различные сроки структурообразования. Методика количественного ИК-спектрального анализа изложена в работах [22, 23]. По мере увеличения периода структурообразования интенсивность линий поглощения непрерывно падает, что указывает на постоянное связывание оксида ртути во времени. Долю непрореагировавшего вещества  $X$ , вероятно, можно вычислить по формуле  $X = JJ_0$ , где  $J$  – интенсивность исчезающей фазы;  $J_0$  – максимальная интенсивность [24].

Как показали проведенные исследования, кинетические кривые носят симбатный характер, что указывает на полное соответствие и взаимосвязь кинетики химических реакций и кинетики структурообразования в рассматриваемой дисперсии.

Особый интерес представляет изучение влияния лазерного излучения на процессы твердения композиций  $\text{MgO}-\text{H}_3\text{BO}_3-\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{MgO}-\text{MgCl}_2-\text{H}_2\text{O}$ . Установлено что управлять структурообразованием в этих системах можно как в ранние, так и в поздние сроки твердения (рис. 9 и 10). Однако эффективность такого управления гораздо выше на начальных стадиях взаимодействия вяжущего с водой, что согласуется с принципом «соответствия» О. П. Мчедлова-Петросяна [25].

По данным электронно-микроскопического исследования поверхностного слоя образцов (рис. 11), происходит лазерная «сшивка» новообразований за счет появления нитевидных кристаллов и столбчатых структур отчасти обезвоженного материала, которые формируют усиленный пространственный каркас.

В результате поглощения энергии лазерного излучения на поверхности в материале образца могут возникать сильные волны сжатия. Один из механизмов, приводящих к возникновению таких волн, связан с микроскопическим испарением материала с поверхности образца, направленным в глубь материала. При оптимальной длительности лазерного импульса или экспозиции непрерывного излучения могут возникнуть сильные внутренние напряжения, которые на ранних стадиях структурообразования играют положительную роль. В случае «передозировки» энергии лазерного излучения формируются такие напряжения, при которых часть материала начинает откалываться, что приводит к разрушению образца.

Если в системе много свободной воды, то мощный и практически мгновенный нагрев образца переводит ее в парообразное состояние, которое создает сильное давление внутри образца и вызывает его откалывание. Однако при оптимальных режимах этот же эффект обеспечивает повышение степени гидратации, равномерное распространение напряжений



и, как следствие, увеличение прочности системы. Кинетика структурообразования системы  $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  после обработки ультрафиолетовым излучением отражена на рис. 12. На основании приведенных данных можно утверждать, что лазерное излучение относится к более эффективному виду внешнего воздействия.

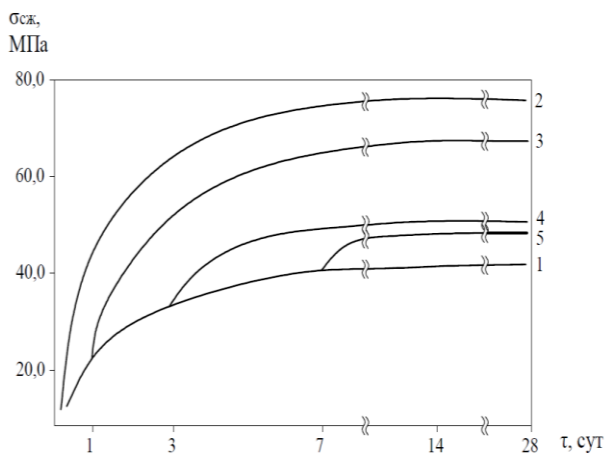


Рис. 9. Кинетика структурообразования системы  $\text{MgO-H}_3\text{BO}_3\text{-H}_2\text{O}$  при обычных условиях (1), после обработки лазерным излучением сразу после формования (2), после обработки лазерным излучением образцов через 1 сут твердения (3), то же через 3 сут твердения (4), то же через 7 сут твердения (5)

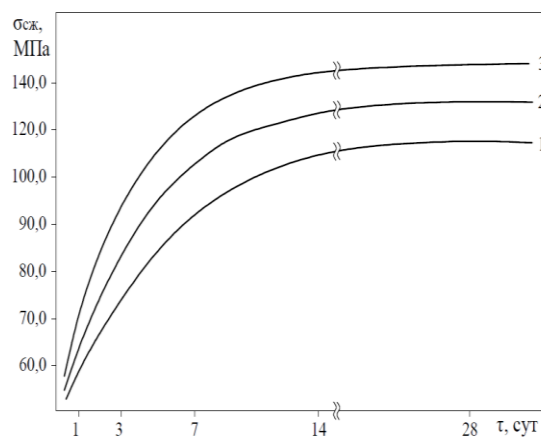


Рис. 10. Кинетика структурообразования системы  $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  при обычных условиях (1), после обработки лазерным излучением (2) и гамма-излучением (3)



Рис. 11. Электронно-микроскопические снимки системы  $\text{MgO-H}_3\text{BO}_3\text{-H}_2\text{O}$  после обработки лазерным излучением

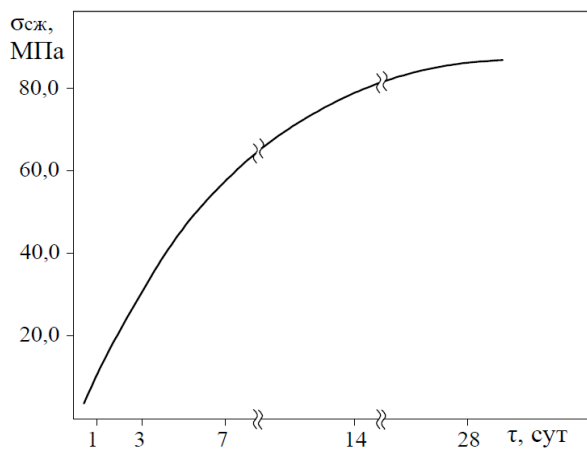


Рис. 12. Кинетика структурообразования системы  $\text{MgO-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  после обработки ультрафиолетовым излучением

Анализ результатов проведенных экспериментов показывает, что рассмотренные виды физических воздействий являются эффективными способами управления структурой и свойствами оксидных систем и могут служить основой новых технологий получения строительных материалов. Если исследуемая система относится к типу медленно твердеющих, то следует применять более интенсивные виды излучений. В самом общем случае выявлена следующая закономерность: чем выше энергия кристаллической решетки оксида, тем медленнее твердеет композиция на его основе и тем более интенсивные виды излучений требуются для ее активации. Методом планирования эксперимента

установлено, что уравнение регрессии, отражающее зависимость прочности структур твердения  $Y$  от энергии кристаллической решетки  $E$ , плотности  $\rho$  и массы  $m$  образца, плотности излучения  $X_1$  и длительности его экспозиции  $X_2$ , имеет вид  $Y = E\rho/m - 4,12X_1 + 2,11X_2 + 0,09X_1X_2$ .

Таким образом, высокие показатели эксплуатационных характеристик вяжущих материалов на основе оксидных систем могут быть обеспечены путем направленного регулирования процессов гидратации и структурообразования посредством внешних фото- и радиационных воздействий [26].

Авторы выражают искреннюю благодарность студентам гр. 112/с1 строительного факультета М. А. Шаховой, Н. С. Компаниец и Н. А. Порохину за помощь в проведении экспериментов и подготовке рукописи к печати.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Саркисов Ю. С. Управление процессами структурообразования дисперсных систем // Известия вузов. Строительство. – 1993. – № 2. – С. 106–109.
2. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения / под. ред. С. И. Анисимова. – М.: Мир, 1974. – 498 с.
3. Применение лазеров в науке и технике: сб. тр. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Л.: Знание, 1980. – 103 с.
4. Чемоданов Д. И., Круглицкий Н. Н., Саркисов Ю. С. Физико-химическая механика оксидных систем. – Томск: Изд-во ТГУ, 1989. – 230 с.
5. Физико-химическая механика дисперсных структур в магнитных полях / Н. Н. Круглицкий, С. П. Ничипоренко, И. Г. Гранковский [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1967. – 193 с.
6. Своллоу А. Радиационная химия / пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1963. – 278 с.
7. Аллен А. О. Радиационная химия воды и водных растворов. – М.: Атомиздат, 1963. – 203 с.
8. Харт Э., Анбар М. Гидратированный электрон / пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1973. – 254 с.
9. Ротенберг З. А. Гидратированный электрон в химии. – М.: Знание, 1979. – 63 с.
10. Багдасарьян Х. С., Кронгауз В. А. Проблемы фотохимии // Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева. – 1973. – Т. 18, вып. 1. – С. 6–15.
11. Formenti M., Yuliet F., Teichner S. Heterogeneous photocatalysis for partial oxidation of parafin's // Chem. Techn. – 1971. – № 11. – P. 30–33.
12. Сосновская Р. И. Исследование химических основ и процессов структурообразования в системах  $\text{Э}_x\text{O}_y\text{-PbO-H}_2\text{O}$ : автореф. дис. ... канд. хим. наук. – Томск, 1981. – 16 с.
13. Пикаев А. К. Современная радиационная химия. Радиолит газы и жидкостей. – М.: Наука, 1986. – 236 с.
14. Пикаев А. К., Кабакин С. А., Макаров И. Б. Высокотемпературный радиолит воды и водных растворов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 136 с.
15. Всесоюзная конференция по теоретической и прикладной радиационной химии (Обнинск, 16–18 октября 1984 г.): тез. докл. – М.: Наука, 1984. – 230 с.
16. Журнал Всесоюзного химического общества им. Д. И. Менделеева. – 1973. – Т. 18, вып. 1. – 119 с.
17. Радиационно-химические процессы в гетерогенных системах на основе дисперсных окислов / под общ. ред. В. В. Стрелко, А. М. Кабакчи. – М.: Энергоиздат, 1981. – 118 с.
18. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика: Избранные труды. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
19. Осин М. М. Негашенная известь. – М.: Промстройиздат, 1954. – 284 с.
20. А. с. 1014816 СССР, СОЧБ 29/02. Вяжущее / Ю. С. Саркисов, Н. С. Чиковани, Н. Н. Круглицкий (СССР). – № 3372500; заявл. 29.12.81; опубл. 30.04.83, Бюл. № 16.
21. Громов В. В. Влияние ионизирующего излучения на кинетику растворения твердых тел. – М.: Атомиздат, 1976. – 126 с.
22. Ахманова Н. В. Инфракрасные спектры поглощения минералов // Успехи химии. – 1959. – Т. 28, вып. 3. – С. 312–335.
23. Солнцева Л. С. Инфракрасная спектроскопия и ее применение для изучения минералов // Современные методы минералогического исследования. – М.: Недра, 1969. – Ч. 1. – С. 196–225.
24. Справочник по химии цемента / под ред. Б. В. Волконского, Л. Г. Судакаса. – Л.: Стройиздат, 1980. – 221 с.

25. Мчедлов-Петросян О. П., Чернявский В. Л. Структурообразование и твердение цементных паст и бетонов при пониженных температурах. – Киев: Будівельник, 1974. – 112 с.
26. Саркисов Ю. С. Вяжущие вещества на основе оксидных систем // Вестник ТГАСУ. – 2013. – № 1. – С. 108–119.

## REFERENCES

1. Sarkisov Yu. S. Management of processes of structure formation of disperse systems. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*, 1993, no. 2, pp. 106–109 (in Russian).
2. Redi Dzh. *Deystvie moshchnogo lazernogo izlucheniya* [The action of powerful laser radiation]. Moscow: Mir, 1974, 498 p (in Russian).
3. *Primenenie lazerov v nauke i tekhnike* [The use of lasers in science and technology]. Leningrad: Znanie, 1980, 103 p (in Russian).
4. Chemozamov D. I., Kruglitskiy N. N., Sarkisov Yu. S. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika oksidnykh sistem* [Physical and chemical mechanics oxide systems]. Tomsk: izd-vo TGU, 1989, 230 p (in Russian).
5. Kruglitskiy N. N., Nichiporenko S. P., Grankovskiy I. G., et al. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur v magnitnykh pokryakh* [Physical and chemical mechanics of disperse structures in magnetic fields]. Kiev: Naukova dumka, 1967, 193 p (in Russian).
6. Svollou A. *Radiatsionnaya khimiya* [Radiation chemistry]. Moscow: Atomizdat, 1963, 278 p (in Russian).
7. Allen A. O. *Radiatsionnaya khimiya vody i vodnykh rastvorov* [Radiation chemistry of water and aqueous solutions]. Moscow: Atomizdat, 1963, 203 p (in Russian).
8. Khart E., Anbar M. *Gidratirovanny elektron* [Hydrated electron]. Moscow: Atomizdat, 1973, 254 p (in Russian).
9. Rotenberg Z. A. *Gidratirovanny elektron v khimii* [Hydrated electron in chemistry]. Moscow: Znanie, 1979, 63 p (in Russian).
10. Bagdasar'yan Kh. S., Krongauz V. A. Problems photochemistry. *Zhurnal Vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva*, 1973, vol. 18, is. 1, pp. 6–15 (in Russian).
11. Formenti M., Yuliet F., Teichner S. Heterogeneous photocatalysis for partial oxidation of parafin's. *Chem. Techn.*, 1971, no. 11, pp. 30–33.
12. Sosnovskaya R. I. *Issledovanie khimicheskikh osnov i protsessov srtukturoobrazovaniya v sistemakh  $\text{Э}_x\text{O}_y\text{-PbO-H}_2\text{O}$*  [The study of chemical principles and processes of structure formation in the systems  $\text{Э}_x\text{O}_y\text{-PbO-H}_2\text{O}$ ]. Author's abstract of Cand. Sc. (Chemistry) thesis. Tomsk, 1981, 16 p (in Russian).
13. Pikaev A. K. *Sovremennaya radiatsionnaya khimiya. Radioliz gazov i zhidkostey* [Modern radiation chemistry. Radiolysis gases and liquids]. Moscow: Nauka, 1986, 236 p (in Russian).
14. Pikaev A. K., Kabakin S. A., Makarov I. B. *Vysokotemperaturnyy radioliz vody i vodnykh rastvorov* [High-temperature radiolysis of water and aqueous solutions]. Moscow: Energoatomizdat, 1988, 136 p (in Russian).
15. *Vsesoyuznaya konferentsiya po teoreticheskoy i prikladnoy radiatsionnoy khimii* [Abstracts All-Union conference on theoretical and applied radiation chemistry]. Moscow: Nauka, 1984, 230 p (in Russian).
16. *Zhurnal Vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva* [Journal of the All-Union Chemical Society D. I. Mendeleev], 1973, vol. 18, is. 1, 119 p (in Russian).
17. *Radiatsionno-khimicheskie protsessy v geterogennykh sistemakh na osnove dispersnykh okislov* [Radiation-chemical processes in heterogeneous systems based on dispersed oxides]. Moscow: Energoizdat, 1981, 118 p (in Russian).
18. Rebinder P. A. *Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika* [Surface phenomena in disperse systems. Physical and chemical mechanics]. Moscow: Nauka, 1979, 384 p (in Russian).
19. Osin M. M. *Negashenaya izvest'* [Quicklime]. Moscow: Promstroyizdat, 1954, 284 p (in Russian).
20. Copyright certificate USSR 1014816. *Vyazhushchee* [Binder]. Yu. S. Sarkisov, N. S. Chikovani, N. N. Kruglitskiy. Declared 29.12.81. Published 30.04.83. Bulletin no. 16 (in Russian).
21. Gromov V. V. *Vliyanie ioniziruyushchego izlucheniya na kinetiku rastvoreniya tverdykh tel* [Effect of ionizing radiation on the kinetics of dissolution of solids]. Moscow: Atomizdat, 1976, 126 p (in Russian).
22. Akhmanova N. V. Infrared absorption spectra of minerals. *Uspekhi khimii*, 1959, vol. 28, is. 3, pp. 312–335 (in Russian).
23. Solntseva L. S. Infrared spectroscopy and its application to the study of minerals. *Sovremennye metody mineralogicheskogo issledovaniya*. Moscow: Nedra, 1969, p. 1, pp. 196–225 (in Russian).



24. *Spravochnik po khimii tsementa* [Handbook on the chemistry of cement]. Leningrad: Stroyizdat, 1980, 221 p (in Russian).
25. Mchedlov-Petrosyan O. P., Chernyavskiy V. L. *Strukturoobrazovanie i tverdenie tsementnykh past i betonov pri ponizhennykh temperaturakh* [Formation and hardening of cement pastes and concretes at low temperatures]. Kiev: Budivel'nik, 1974, 112 p (in Russian).
26. Sarkisov Yu. S. Binders based oxide systems. *Vestnik TGASU*, 2013, no. 1, pp. 108–119 (in Russian).

## ВЫСОКОПРОЧНЫЙ ЯЧЕИСТЫЙ БЕТОН

**М. А. Елесин, Г. И. Бердов\*, Е. В. Умнова,**

**Норильский индустриальный институт**

**\*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)**

**Ключевые слова:** ячеистый бетон, портландцемент, механическая прочность, известково-серный затворитель, гидразин

**Key words:** cellular concrete, Portland cement, mechanical strength, lime and sulfur mixing, hydrazine

Ячеистый бетон отличается низкой плотностью и высокими теплозащитными характеристиками, что обусловлено особенностями пористой структуры. Значительный интерес представляет производство ячеистого бетона по неавтоклавной технологии, характеризующейся малой фондо- и энергоемкостью, безотходностью и экологической чистотой [1–3]. В отличие от ячеистого бетона автоклавного твердения, обладающего повышенными прочностными свойствами за счет вовлечения в реакцию кремнеземной составляющей, из бетона неавтоклавного твердения изготавливают в основном мелкие стеновые блоки для малоэтажного строительства [4, 5]. Получение легкого ячеистого бетона повышенной прочности расширяет сферу его применения в строительстве. Для решения этой актуальной задачи используют комплексный газообразователь, влияющий на макроструктуру поризованного камня, многокомпонентные вяжущие вещества, способствующие образованию сложных по составу и структуре дисперсий, устанавливающих более прочные межзерновые когезионные связи, активированные вяжущие вещества и промышленные отходы [5–9].

В данной работе для получения высокопрочного ячеистого бетона, характеризующегося высоким коэффициентом конструктивного качества (ККК), применен известково-серный затворитель (ИСЗ), представляющий собой высокоминерализованный раствор серы в гидроксиде кальция.

При проведении экспериментов использовали портландцемент М400 Норильского цементного завода следующего минералогического состава (в мас. %):  $C_3S$  58,42,  $C_2S$  17,35,  $C_3A$  7,8,  $C_4AF$  13,25, техническую серу и гидроксид кальция, технический гидроксид железа в виде пылевидного материала, высокодисперсный огарок, полученный прокаливанием гидроксида железа при 1100 °С, молотый доменный шлак, пластификатор С-3, а также алюминиевую пудру ПАП-2. Удельная поверхность портландцемента составляла 3000 см<sup>2</sup>/г. Химический состав цемента и порошкообразных заполнителей представлен в табл. 1. Для приготовления ИСЗ серу растворяли в нагретой до 95 °С механически перемешиваемой известковой суспензии.

Т а б л и ц а 1

**Химический состав используемых компонентов**

Компонент	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	SO <sub>3</sub>
Цемент	21,4	5,9	4,6	62,7	2,7	–	1,9
Огарок	10,0	6,0	80,0	3,0	0,7	–	0,3
Молотый шлак	39,5	16,3	2,9	34,18	3,7	3,02	0,6

В исследуемых образцах ячеистого бетона соотношение цемент:заполнитель варьировали от 2:1 до 1:5. Кроме того, в смесь добавляли газообразователь – алюминиевую пудру (0,2% от массы цемента) или гидразин (0,72% от массы цемента), а также молотую негашеную известь (3,8%).