

УДК 666.974.2

DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-277-284

**В.С. Корзанов, М.П. Красновских**

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА**

*На основании термического анализа бетона М 400, выяснено, что при достижении 700°C происходит разложение кристаллогидратов, составляющих «цементный камень», и, как следствие, потеря прочности бетоном. В качестве компонентов, повышающих устойчивость бетона к высоким температурам, опробованы добавки глины и оксида алюминия с содержанием 5% от массы образца. Установлено, что в сравнении со стандартным бетоном, добавка глины способствует снижению, а оксида алюминия – повышению прочности и устойчивости образцов к нагреванию.*

**Ключевые слова:** термическая устойчивость бетона; цементный камень**V.S. Korzanov, M.P. Krasnovskikh**

Perm State University, Perm, Russia

**THE EFFECT OF THERMAL EXPOSURE ON THE STRENGTH OF CONCRETE**

*Based on the thermal analysis of concrete M 400, it was found that when 700 ° C is reached, the decomposition of the crystallohydrates that make up the "cement stone" occurs, and, as a result, the concrete loses its strength. Additives of clay and aluminum oxide containing 5% of the sample weight were tested as components that increase the resistance of concrete to high temperatures. It was found that in comparison with standard concrete, the addition of clay helps to reduce, and aluminum oxide, increase the strength and resistance of samples to heat.*

**Keywords:** thermal stability of concrete; cement stone

## **ВВЕДЕНИЕ**

Бетоны представляют собой искусственные каменные материалы, получаемые в результате затвердевания тщательно перемешанной и уплотненной смеси из минерального или органического вяжущего вещества с водой, мелкого или крупного заполнителей, взятых в определенных пропорциях [1]. Состав бетонной смеси подбирают таким образом, чтобы при данных условиях твердения бетон обладал заданными свойствами.

Бетон является одним из основных конструктивных материалов. Он применяется в жилищном, промышленном, транспортном, гидротехническом, энергетическом и других видах строительства. Может быть использован в различных эксплуатационных условиях, имеет неограниченную сырьевую базу и довольно низкую стоимость. И что очень важно – имеет доступные технологии изготовления, возможность использования местного сырья и утилизации техногенных отходов при его производстве [2]. При этом требования к компонентам бетона строго регламентированы [3]. Прочность бетона определяется формирующимися в его объеме кристаллогидратами и гидроксидом кальция [4, 5, 6], чувствительными к нагреванию и разрушающимися при достижении определенных температур. Вместе с разложением кристаллогидратов, составляющих «цементный камень», происходит потеря прочности несущей конструкции. Воздействие на бетон высоких температур (например, при пожаре) может привести к потере конструкцией прочности, разрушению сооружения, трагическим последствиям и финансовым потерям. Таким образом, задачи исследования влия-

ния термического воздействия на прочность бетона и проверки возможности повышения устойчивости бетона к нагреванию путем введения в его состав добавок являются важными не только при возведении специальных сооружений, но и в жилищном строительстве.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

### **Термический анализ**

Образцы полученного бетона М 400 были подвергнуты исследованию термического поведения на ТГА/ДСК (термогравиметрический анализ/ дифференциальная сканирующая калориметрия) приборе синхронного термического анализа NETZCH STA 449 F1 Juhiter.

На термограммах бетона с глиной (рис. 1, 2) видно, что на всем протяжении термического воздействия, из образца происходит выделение воды, основная часть которой, как показывает термогравиметрическая зависимость, покидает образец до 900°C.

Наиболее отчетливо выход воды обнаруживается эндотермическим эффектом на начальном этапе до 240°C (минимум при 150,5°C) и незначительным эффектом при 472,4°C.

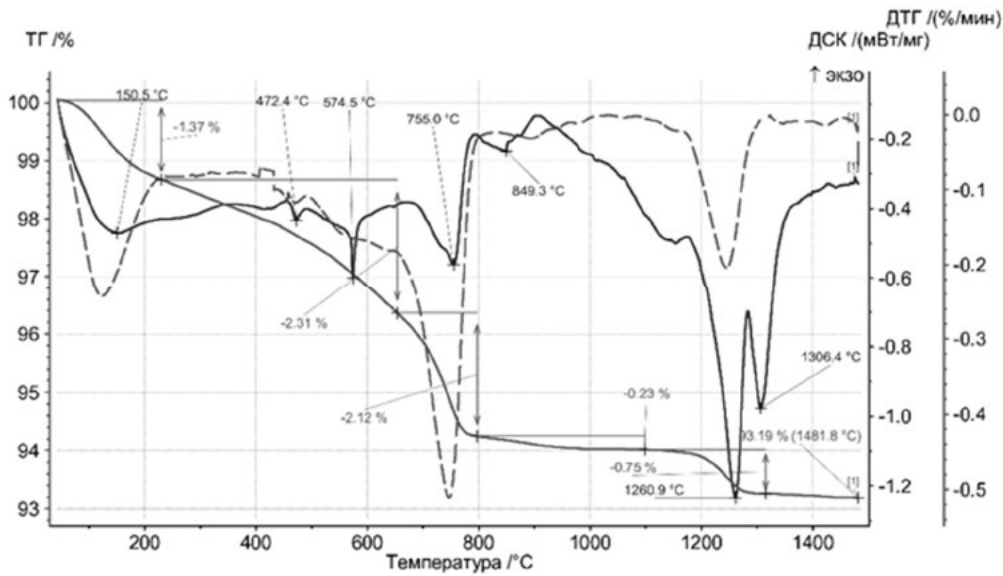


Рис. 1. Термограмма бетона с добавлением глины

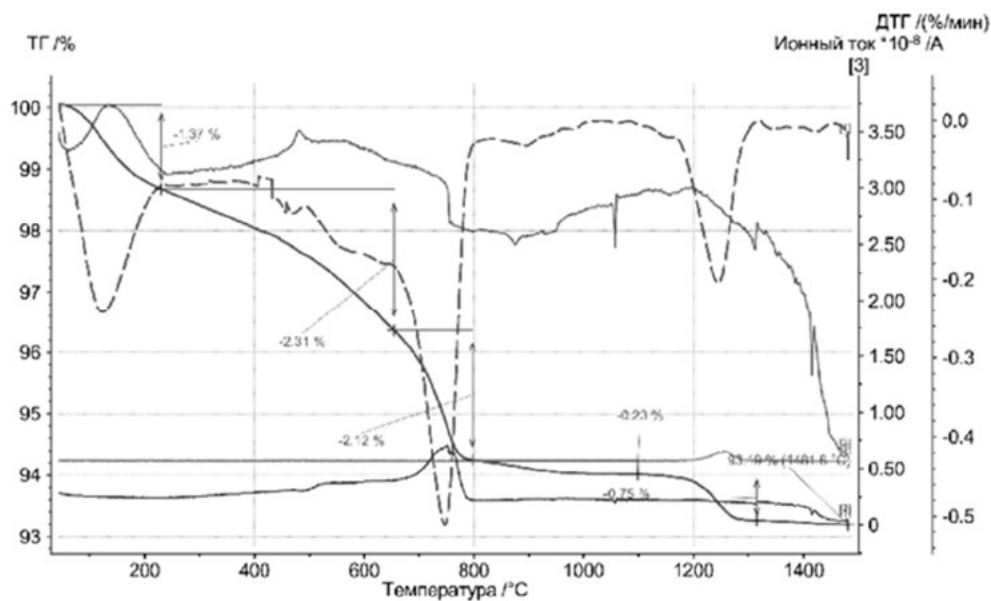


Рис. 2. ТГ- и ДТГ-кривые, совмещенные с данными масс-спектрометрического анализа

В интервале температур 650–800°C (минимум при 755,0°C), регистрируется эндотермический эффект и падение массы, вызванные выходом углекислого газа вследствие разложения карбонатов, а в интервале 1170–1300°C (минимум при 1260,9°C) – сернистого газа, очевидно, при разложении содержащих серу соединений.

Вызывает интерес наличие эндотермических эффектов с минимумами при 574,5, 849,3 и 1306,4°C. Первый эффект хорошо согласуется с переходом кварца из  $\alpha$ - в  $\beta$ -форму ( $t_{\text{перех.}} = 575^\circ\text{C}$ ) [7], но его можно связать и с разложением гидроксида кальция ( $t_{\text{разл.}} = 580^\circ\text{C}$ ). Несмотря на то, что отчетливой масс-спектрометрической регистрации воды нет, дифференциальная термогравиметрическая

кривая указывает на незначительную потерю массы, а это свидетельствует в пользу разложения гидроксида кальция. Второй эффект, с большой долей вероятности, вызван удалением остатков воды после окончательного разрушения кристаллогидратов. Третий, находящийся в области высоких температур, не сопровождается изменением массы и, следовательно, может быть вызван плавлением эвтектики, что косвенно подтверждается диаграммой

состояния тройной системы  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  [9].

Термограммы бетона с добавлением оксида алюминия (рис. 3, 4) повторяют эффекты удаления воды, углекислого и сернистого газов при разложении кристаллогидратов, карбонатов и содержащих серу соединений; некоторое отличие присутствует при финальной регистрации термических эффектов.

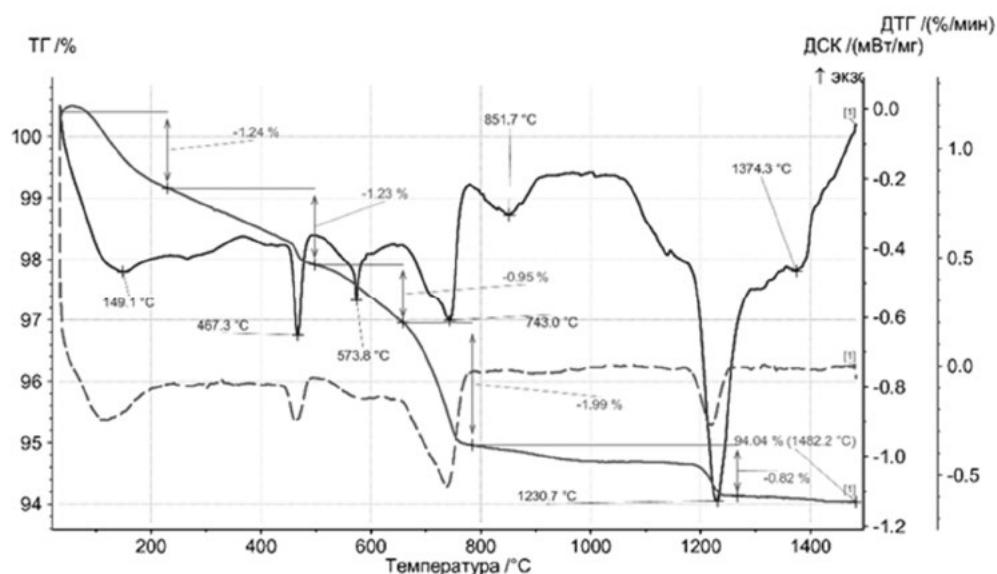


Рис. 3. Термограмма бетона с оксидом алюминия

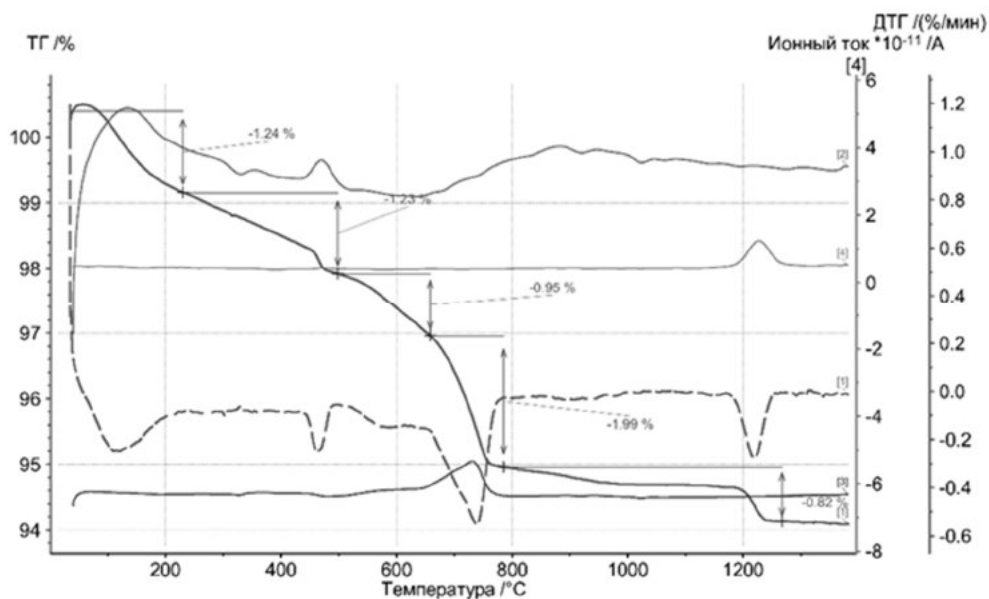


Рис. 4. ТГ- и ДТГ-кривые, совмещенные с данными масс-спектрометрического анализа

Устойчивость оксида алюминия к тепловому воздействию позволяет объяснить регистрируемые явления термическим поведением составных частей бетона. Отличие, проявляемое образцом бетона с добавкой оксида алюминия, связано с изменением характера эндотермического эффекта на заключительном участке диаграммы. Вместо хорошо выраженного минимума при 1306,4°C появляется незначительный провал ДСК-зависимости в эндотермическую сторону при 1374,3°C. Изменения температур и площадей заключительных эффектов обусловлены различием составов исследуемых образцов. Природа же эффектов одна и связана с возникновением жидкой фазы.

Проведенное термическое исследование образцов показало, что основная часть сформированного в бетоне «цементного камня» разрушается до 700°C. Это приводит к потере прочности и способности выполнять несущую функцию. Введенная в бетон глина позволяет

получить закрепляющий эффект только при достижении расплавленного состояния выше 1306,4°C. В составе с оксидом алюминия эта температура еще выше. Следовательно, для сохранения бетоном несущей способности при воздействии высоких температур требуется поиск компонента, способного за счет плавления проявлять склеивающую способность в интервале температур от 500 до 1300°C, то есть до разрушения «цементного камня».

#### Оценка прочности после теплового воздействия

Для подтверждения результатов термического анализа было проведено нагревание образцов до 250, 500, 750 и 1000°C (рис. 5) с выдержкой при указанных температурах в течение 20 мин и последующей проверкой их прочности после остывания. Несмотря на сохранение формы всеми образцами, на снимке заметно, что образцы, выдержанные при высоких температурах, склонны к осыпанию.



Рис. 5. Образцы, подвергшиеся нагреванию до 250, 500, 750 и 1000°C  
1 – бетон М 400, 2 – бетон с 5 мас. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 3 – бетон с 5 мас. % глины

Определение прочности на сжатие показало (см. таблицу), что во всех случаях при повышении температуры выдержки образцов их прочность ожидаемо снижается. Однако устойчивость образцов к термическому воздействию существенно различается. Например, наиболее устойчивым оказался бетон с оксидом алюминия. Быстрее всего (с увеличе-

нием температурного воздействия) падала прочность стандартного бетона М 400; наименее устойчивым оказался бетон, содержащий глину. Изменение прочности бетона М 400 имеет аномальный характер, так как проходит через минимальное значение при 750°С. Причина обнаруженной аномалии не ясна и требует дополнительного исследования.

**Прочность образцов на сжатие**

Температура, °С	М 400	Бетон с 5 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Бетон с 5 % глины
	Сопротивление сжатию, кгс/см <sup>2</sup> (% исходной прочности)		
25	394,8 (100,0 %)	398,2 (100,0 %)	280,3 (100,0 %)
250	351,4 (89,0 %)	392,7 (98,6 %)	241,1 (86,0 %)
500	159,5 (40,4 %)	381,3 (95,8 %)	204,8 (73,1 %)
750	105,0 (26,6 %)	377,0 (94,7 %)	157,7 (56,3 %)
1000	167,2 (42,4 %)	160,5 (40,3 %)	106,5 (38,0 %)

Потеря прочности образцами бетона М 400 идет быстрее, чем образцами, содержащими добавки. Однако по абсолютному значению образцы, содержащие глину, уже на начальном этапе уступают по прочности остальным. Введение оксида алюминия позволяет не только получить образцы с хорошей исходной прочностью, но и существенно замедлить ее потерю при тепловом воздействии.

Полученные характеристики зависимости прочности образцов от температуры хорошо согласуются с литературными данными [10].

В настоящее время жаростойкие бетоны используются промышленностью и относятся к категории специальных строительных материалов. Частые пожары в высотных зданиях, построенных по монолитно-каркасной технологии заставляют обращать внимание на устойчивость железобетона к тепловому воз-

действию. Этим достоинством обладают жаростойкие бетоны, способные длительное время находиться при высоких температурах, сохраняя при этом свои физико-механические свойства. Это качество – сохранять несущую способность при нагревании – делает их востребованными и в жилищном строительстве.

Возведение зданий и сооружений различного характера невозможно без применения как обычных бетонов, так и их жаростойких аналогов, представляющих собой строительные материалы с большими эксплуатационными возможностями. Состав и технология производства жаростойких бетонов продолжают совершенствоваться, приводя к появлению их новых видов, обладающих уникальными свойствами и характеристиками; расширяется сфера применения жаростойких бетонов, возрастает их качество. Это свидетельствует о том,

что жаростойкие бетоны являются востребованными строительными материалами, объемы использования которых будут возрастать.

### ВЫВОДЫ

На основании проведенного исследования были сделаны следующие выводы:

1. термическое воздействие на бетоны приводит к потере прочности, обусловленной разрушением кристаллогидратов, составляющих «цементный камень»;
2. использование глины в качестве модификатора термической устойчивости бетонных изделий малоперспективно, так как ее введение понижает прочность бетона, а между температурой разрушения «цементного камня» и появлением жидкой фазы находится большой температурный интервал;
3. введение термостойких добавок (например, оксида алюминия) позволяет увеличить устойчивость бетона к высоким температурам и существенно снизить скорость потери прочности;
4. повышение термической устойчивости бетонов возможно при добавлении веществ с температурой плавления, уступающей термическому порогу разложения кристаллогидратов, что позволит добиться скрепляющего эффекта и воспрепятствовать потере прочности;
5. еще одним направлением модификации бетона может стать использование в его составе компонентов с низкой теплопроводностью, устраняющих деструктивное воздействие тепла на кристаллогидраты в объеме несущей конструкции.

### Библиографический список

1. Баженов Ю.М. Технология бетона: учеб. пособие для технологических специальностей строительных вузов. М.: Высш. шк., 1987. 415 с.
2. Рояк С.М., Рояк Г.С. Специальные цементы: учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1983. 279 с.
3. ГОСТ 10178-85 Портландцемент и шлакопортландцемент.
4. Шмитко Е.И., Крылова А.В., Шаталова В.В. Химия цемента и вяжущих веществ: учеб. пособие. СПб.: Проспект науки, 2006. 205 с.
5. Андреева Н. А. Химия цемента и вяжущих веществ: учеб. Пособие / СПбГАСУ. СПб., 2011. 67 с.
6. Комар А.Г. Строительные материалы и изделия: учебник для инженерно-экономических специальностей строительных вузов. М.: Высш. шк., 1988. С. 155–161.
7. Лидин, Р.А., Андреева, Л.Л., Молочко, В. А. Константы неорганических веществ: справочник. М.: Дрофа, 2006. С.170.
8. Торопов Н.А., Барзаковский В.П., Латин В.В., Курцева Н.Н. Диаграммы состояния силикатных систем: справочник. Вып. 3. Тройные системы. Л.: Наука, 1972. С. 185–191.
9. Шишков И.А., Айзенберг А.А., Бельский В.И. и др. Сооружение промышленных печей. М.: Стройиздат, 1978. С. 71–85.
10. Ильин Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции. М.: Стройиздат, 1979. С. 17–24.

### References

1. Bazhenov Yu. M. (1987) *Technology of concrete: a Textbook for technological specialties of construction universities*. Higher school. Moscow. 415 p.
2. Rojak S.M., Rojak G.S. (1983) *Special cements: Textbook. The manual for high schools*. Stroizdat. Moscow. 279 p.
3. GOST 10178-85 *Portland Cement and slag Portland cement*.
4. Shmitko E. I., Krylova A.V., Shatalova V. V. (2006) *Chemistry of cement and binders: a textbook*. The Avenue of science. Saint Petersburg. 205 p.

5. Andreeva N. A. (2011) *Chemistry of cement and binders: textbook*. SPbGASU. Saint-Petersburg. 67 p.
6. Komar A. G. (1988) *Construction materials and products: Textbook for engineering and economic specialties of construction universities*. High school. Moscow, Pp. 155-161.
7. Lidin, R. A., Andreeva, L. L., Molochko, V. A. (2006) *Constants of inorganic substances: a reference book*. Drofa, Moscow, P. 170.
8. Toropov N. A., Barzakovsky V. P., Lapin V. V., Kurtseva N. N. (1972) *Diagrams of the state of silicate systems: Handbook. Issue 3. Triple systems*. The science. Leningrad, Pp. 185-191.
9. Shishkov I. A., Aizenberg A. A., Belsky V. I. et al. (1978) *Construction of industrial furnaces*. Stroizdat. Moscow, Pp. 71-85.
10. Ilyin N. A. (1979) *Consequences of fire impact on reinforced concrete structures*. Stroizdat. Moscow, Pp. 17-24.

#### Об авторах

Корзанов Вячеслав Сергеевич,  
кандидат химических наук, доцент кафедры неорганической химии, химической технологии и техносферной безопасности Пермский государственный национальный исследовательский университет  
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.  
KOR494@yandex.ru

Красновских Марина Павловна,  
инженер лаборатории термического анализа неорганической химии, химической технологии и техносферной безопасности Пермский государственный национальный исследовательский университет  
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15.  
krasnovskih@yandex.ru

#### About the authors

Korzanov Vyacheslav Sergeevich,  
Candidate of chemical sciences, associate professor Department of Inorganic Chemistry, Chemical Technology and Technosphere Security  
Perm State National Research University  
614990, Bukireva st., 15, Perm, Russia  
KOR494@yandex.ru

Krasnovsky Marina Pavlovna,  
Engineer of thermal analysis laboratory Department of Inorganic Chemistry, Chemical Technology and Technosphere Security  
Perm State National Research University  
614990, Bukireva st., 15, Perm, Russia  
krasnovskih@yandex.ru

#### Информация для цитирования:

Корзанов В.С., Красновских М.П. Влияние термического воздействия на прочность бетона // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2020. Т. 10, вып. 3. С. 277–284. DOI: 10.17072/2223-1838-2020-3-277-284.

Korzanov V.S., Krasnovskikh M.P. *Vliianie termicheskogo vozdeistviia na prochnost betona* [The effect of thermal exposure on the strength of concrete] // Vestnik Permskogo universiteta. Seriya «Khimiya» = Bulletin of Perm University. Chemistry. 2020. Vol. 10. Issue 2. P. 277–284 (in Russ.). DOI:10.17072/2223-1838-2020-3-277-284.