

вания,  $c$ ;  $Q$  — коэффициент температуропроводности ( $0,316 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ );  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности [ $1,593 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ].

Формирование структуры материала гипсового камня происходит также с образованием кристаллизационных контактов в результате выделения молекул свободной воды из кристаллогидрата при высоких локальных давлениях и растворения части кристалла гипса и его перекристаллизации. Деформационное упрочнение исходных кристаллов двуводного гипса в процессе окускования порошкообразного фосфогипсового отхода способствует и упрочнению гипсового камня.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Раптунович Г.С. К прочности гипсового камня // Массоперенос при получении высокопрочных строительных материалов. — Мн., 1978. — С. 63–67.
2. Устимович А.Б. Особенности формирования структуры высокопрочного гипсового камня // Материалы 11 Всесоюз. конф. по электронной микроскопии. — М., 1979. — Т. 1. — С. 296.
3. Самцов В.П., Ляшкевич И.М., Ратинов В.Б. Окускование фосфогипса термомпрессованием // Строит. материалы. — 1984. — № 9. — С. 25–27.
4. Зеир А., Маурер З., Кронмюллер Г. Деформационное упрочнение // Электронная микроскопия и прочность кристаллов. — М., 1965. — С. 65–69.
5. Смирнов Б.И. Дислокационная структура и упрочнение кристаллов. — М., 1981. — 172 с.
6. Кац М.С., Ригель В.Р. Кинетика внедрения индентора при испытаниях на твердость // Деформирование при действии сосредоточенной нагрузки. — Кишинев, 1978. — С. 87–91.
7. Красулин Ю.Л., Назаров Г.В. Микросварка давлением. — М., 1976. — 81 с.

УДК 666.914

Г.С. РАПТУНОВИЧ, Л.А. МОРСОВА,  
Т.И. АЛЬХОВА, И.В. ЧУДУК

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ ГИПСОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Показатели плотности материалов (истинной и средней) необходимы для расчета пористости и оценки их важнейших эксплуатационных свойств. При определении истинной плотности гипсовых материалов обычно руководствуются методикой ГОСТ 310.2–76 “Цементы. Методы испытаний”. Однако гипсовые материалы имеют особенности. Так, в отличие от цементных материалов они очень чувствительны к условиям сушки. Во избежание возможных потерь конституционной (химически связанной) воды высушивание проб гипсовых материалов осуществляют при невысоких, порядка 50..60 °С, температурах. Однако такие условия сушки не позволяют полностью удалить неконституционную (физически связанную) влагу. Еще большие трудности возникают при работе с фосфогипсом, режим сушки которого в значительной мере определяется содержанием в нем кислых примесей. Поэтому, прежде чем приступить к исследованию плотности гипсовых материалов, необходимо было тщательно отработать режимы их сушки. Кроме того, потребовалось выяснить необходимую степень измельчения гипсовых проб, а также подобрать

жидкость, наиболее подходящую для определения плотности получаемого материала.

Ранее было найдено [1], что наиболее рациональным режимом сушки изделий из природного гипсового камня и строительного гипса на его основе является следующий:  $t = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 0,02 \text{ МПа}$ ,  $\tau = 6 \text{ ч}$ . Результаты микроскопического исследования и рентгенофазового анализа показывают, что такой режим сушки, обеспечивая максимальное удаление физически связанной влаги, не приводит к потере конституционной воды.

В связи с разработкой технологии утилизации фосфогипсовых отходов Гомельского химического завода и изготовлением опытных образцов на их основе необходимо было провести исследования по отработке режима их сушки. Методами химического анализа установлено, что фосфогипс содержит до 2,5 %  $\text{P}_2\text{O}_5$  в составе фосфорной кислоты и фосфатов. Водородный показатель фосфогипсовой водной суспензии с соотношением 1:20 –  $\text{pH} = 1...3$ . Сушку фосфогипса и образцов на его основе проводили в вакуумном шкафу по режимам, в которых варьировались температура, остаточное давление воздуха и продолжительность сушки. Контроль фазового состава проб в процессе сушки проводили рентгенографическим методом на дифрактометре ДРОН-3. Результаты исследований представлены в табл. 1. Полностью высушить фосфогипс и не допустить образования в нем полугидрата сульфата кальция практически не удается. Исходя из того, что даже небольшая дегидратация пробы при сушке может вызвать более значительную погрешность определения плотности, чем незначительная остаточная влажность, которую можно учесть, оптимальным

Табл. 1. Остаточная влажность и фазовый состав фосфогипса\* в зависимости от режима его сушки

температура, $^\circ\text{C}$	Режим сушки		Остаточная влажность пробы, %	Содержание в пробе, %	
	остаточное давление, МПа	продолжительность, ч		$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
40	0,005	6	0	95	5
40	0,01	4,5	0,75	100	0
40	0,01	6	0,5	100	0
40	0,01	8	0,5	100	0
50	0,005	2	0,25	100	0
50	0,005	3	0,1	95	5
50	0,005	5	0	80	20
50	0,01	2	1	100	0
50	0,01	3	0,9	100	0
50	0,01	5	0,9	99	1
60	0,005	3	0,9	45	55
60	0,01	1	7,7	99	1
60	0,001	2	4,65	70	30

\*Исходная влажность 26 %.

признан режим сушки при температуре 50 °С и остаточном давлении 0,01 МПа и течение 3 ч.

Была проведена серия опытов, в которых определялась истинная плотность порошка разных фракций, полученного измельчением гипсового камня, сформованного по фильтр-прессовой технологии при давлении прессования 10 МПа [2]. Испытаны фракции до 0,05 мм; 0,05...0,125; 0,125...0,315; 0,315...1 мм. Получены следующие значения истинной плотности порошка (соответственно): 2,379 г/см<sup>3</sup>; 2,396; 2,389; 2,388 г/см<sup>3</sup>.

Поскольку результаты экспериментов не позволяют выявить какую-либо закономерную зависимость истинной плотности порошка от крупности частиц, целесообразно было исследовать не порошки узких фракций, остающихся на ситах, а полностью проходящие через определенное сито. В последующих опытах были исследованы порошки разной степени измельчения, проходящие полностью через сита с размерами отверстий 0,125 мм; 0,315 и 1 мм. Результаты испытания этих порошков сравнивали с полученными для исходного гипсового вяжущего разной степени измельчения и порошков из литых образцов.

Предпочтение было отдано порошкам средней тонкости измельчения, проходящим полностью через сито с отверстиями 0,315 мм. Для порошков более крупных фракций, частицы которых имеют большое число пор, в том числе и замкнутых, отмечена наименьшая воспроизводимость результатов опытов. Исследование чрезмерно тонких порошков затруднено, в частности, из-за их комкования в процессе засыпки в воронку прибора. Таким образом, для наиболее точного определения истинной плотности гипсовых образцов их следует измельчать до полного прохождения частиц через сито с размером отверстий 0,315 мм.

Согласно ГОСТ 310.2–76, при определении плотности цемента применяется обезвоженный керосин. При определении плотности гипсовых материалов предпочтителен уайт-спирит, характеризующийся более узким интервалом и более высокими абсолютными значениями температур кипения. Он практически нелетуч, химически стабилен, не растворяется в воде.

Для удаления пузырьков захваченного пробой воздуха по методике ГОСТ 310.2–76 рекомендуется покатывание колбы с пробой в наклонном положении в течение 10 мин. Однако этот прием недостаточно эффективен. Поэтому для более полного удаления воздуха из пробы колба подвергалась вибрациям на лабораторной установке. Многократные параллельные опыты с использованием проб разных материалов показали, что результаты определения истинной плотности виброобработанных порошков в среднем на 0,5 % выше, чем для необработанных порошков.

Таким образом, с достаточно высокой точностью и воспроизводимостью определялся объем вытесненной порошком жидкости.

Среднюю плотность гипсовых образцов определяли по общепринятой методике. Образцы высушивались по отработанным режимам, парафинировались и затем подвергались гидростатическому взвешиванию. Для обеспечения большей точности определения объема образцов использовалась деаэрированная (дистиллированная кипяченая) вода, в которой не происходит налипания на взвешиваемый образец воздушных пузырьков.

По отработанным методикам были определены средняя и истинная плотности ряда гипсовых, фосфогипсовых и композиционных материалов. На ос-

нове полученных данных выполнена оценка интегральной пористости материалов, полноты реакции гидратации в них и возможности дальнейшего их упрочнения.

Для серии образцов, изготовленных на основе гипсового вяжущего  $\beta$ -модификации по литьевой и фильтр-прессовой технологии, результаты исследования приведены в табл. 2. Средняя плотность образцов, сформованных по фильтр-прессовой технологии, как и следовало ожидать, с ростом давления прессования увеличивается вначале весьма интенсивно, а затем менее существенно. Относительное увеличение средней плотности образцов при повышении давления на 1 МПа составляет в диапазоне давлений до 3 МПа 14 %, 3...10 МПа – 0,9, 10...30 МПа – 0,45 и 30...40 МПа – 0,2 %. Истинная плотность изделий с повышением давления прессования также увеличивается. Это связано с тем, что в условиях фильтрационного прессования в отформованном изделии некоторая часть исходного вяжущего остается непрогидратировавшей. В условиях дефицита жидкой фазы процесс гидратации вяжущего протекает длительное время, вплоть до одного года. Чем ниже пористость отформованного изделия и чем меньше содержание в нем воды, тем медленнее протекает этот процесс. Поэтому в изделиях, отпрессованных при более высоких давлениях, степень гидратации вяжущего меньше, чем в изделиях того же возраста, но отпрессованных при более низких давлениях. Истинная плотность первых из них более высокая, поскольку плотность полугидрата сульфата кальция больше, чем его дигидрата.

В образцах, изготовленных по литьевой технологии из теста нормальной густоты, степень гидратации вяжущего уже в суточном их возрасте составляет 100 %. Зная истинную плотность исходного гипсового вяжущего и полученного из него дигидрата сульфата кальция (литой образец в возрасте 1 сут и более), а также образцов, сформованных при разных давлениях прессования, можно получить информацию о содержании в них непрогидратировавшего вяжущего и, следовательно, о резервах дальнейшего роста их прочности [3].

Табл. 2. Экспериментальные и расчетные характеристики гипсовых образцов

Образец	Давление прессования, МПа	Возраст образца к моменту испытаний, сут.	Плотность материала, г/см <sup>3</sup>		Пористость, %	Массовая доля непрогидратировавшего вяжущего X
			средняя	истинная		
Литой		28	1,189	2,375	50	0
Прессованный	3	28	1,705	2,381	28,4	0,03
	10	0,25	1,806	2,398	24,7	0,10
	10	28	1,890	2,384	20,7	0,04
	10	672	1,895	2,347	19,3	0
	30	28	1,970	2,398	17,8	0,10
	40	28	2,008	2,4	15,9	0,11

Примечание. Истинная плотность исходного вяжущего – 2,6 г/см<sup>3</sup>.

Массовая доля непрогидратировавшего вяжущего в прессованных образцах рассчитывалась по формуле

$$X = \frac{\rho_{0,5} (\rho - \rho_2)}{\rho (\rho_{0,5} - \rho_2)},$$

где  $\rho_{0,5}$  — истинная плотность полуводного гипса (исходного вяжущего);  $\rho$  — истинная плотность образца;  $\rho_2$  — истинная плотность получающегося на основе полуводного гипса дигидрата сульфата кальция.

Приведенные в табл. 2 значения  $X$  хорошо согласуются с результатами рентгенофазового анализа.

Интегральная пористость образцов уменьшается с увеличением их возраста и давления прессования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Раптунович Г.С. Исследование процесса формирования структуры и свойств высокопрочного материала на основе строительного гипса: Дис. ... канд. техн. наук. — Мн., 1982. — 181 с. 2. Ляшкевич И.М. Технология получения высокопрочного гипсового материала методом фильтрационного прессования // Техника, технология, орг. и экономика стр-ва. — Мн., 1983. — Вып. 9. — С. 125–130. 3. Ляшкевич И.М., Раптунович Г.С. О возможности получения высокопрочных строительных материалов на основе мономинеральных вяжущих веществ // Техника, технология, орг. и экономика стр-ва. — Мн., 1983. — Вып. 9. — С. 24–27.

УДК 691.311

Л.В. СЫЧЕВСКАЯ, В.Г. ПОВИДАЙКО

### ПРИМЕНЕНИЕ ПУЛЬПОВЫХ ОТХОДОВ КАМНЕОБРАБОТКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ ОБЛИЦОВОЧНО-ДЕКОРАТИВНЫХ ГИПСОВЫХ ПЛИТ

В настоящее время на камнеобрабатывающих предприятиях образующиеся при распиле, шлифовке и полировке природного камня пульповые отходы отводятся в шламбассейн и по мере накопления вывозятся на свалку специальными машинами [1].

Пульповые отходы представляют собой многокомпонентную систему, включающую: взвешенные в воде тонкодисперсные частицы природных каменных материалов (мрамора, гранита, лабрадорита, базальта, известняка, ракушечника, туфа и др.) — 75...80 %; частицы абразивного материала (каустического магнезита, чугунной дроби) — 5...15 %; частицы гашеной извести — 1,9,3 %; тонкодисперсные частицы отвержденных органических смол ЭД-20 и IIII 1 — 0,5...3 %. Фракционный состав частиц в этой многокомпонентной системе — от 0,001 до 0,1 мм.

До настоящего времени пульповые отходы не используются в промышленности строительных материалов по двум причинам. Во-первых, они характеризуются значительным содержанием свободной извести, которая является нежелательным компонентом цементных бетонов (ее содержание в портландцементе ограничивается до 1 % [2]). Во-вторых, отходы состоят в основном из мелко-