

# Строительные материалы и изделия

УДК 691.2; 691-4

© Л. Ю. Матвеева, д-р техн. наук, профессор

© А. И. Магомедова, студентка

(Санкт-Петербургский государственный

архитектурно-строительный университет,

Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: lar.ma2011@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-4-67-76

© L. Yu. Matveeva, Dr. Sci. Tech., Professor

© A. I. Magomedova, student

(Saint Petersburg State University

of Architecture and Civil Engineering,

St. Petersburg, Russia)

E-mail: lar.ma2011@yandex.ru

## ВЛИЯНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НАНОАЛМАЗОВ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ГИПСА\*

### INFLUENCE OF HYDRODYNAMIC NANODIAMONDS ON THE CRYSTAL STRUCTURE AND PROPERTIES OF GYPSUM

Рассмотрены различные модификации кристаллической структуры гипса, отмечено их большое разнообразие. Исследовано влияние инновационного углеродного наномодификатора с алмазной структурной решеткой на кристаллическую структуру и свойства гипса. Установлено, что углеродный наномодификатор особой чистоты (99,99 %) в форме жидкофазной системы, состоящей из бидистиллированной воды и частиц нанодIAMONDS, полученных методом гидродинамической кавитации, меняет форму кристаллов гипса. При этом отмечается гетероэпитаксиальный механизм образования и роста кристаллов гипса на частицах нанодIAMONDS в ранее не известной для гипса сферической октаэдрической форме. Показано влияние добавки жидкофазной системы нанодIAMONDS на сроки схватывания и нормальную плотность гипсового теста на основе популярных промышленных вяжущих Г-6 и Г-16. Приведены физико-механические свойства наномодифицированных гипсовых материалов в сравнении с гипсом, полученным на исходных гипсовых вяжущих.

*Ключевые слова:* гипс, гипсовые вяжущие, нанодIAMONDS, наномодификация, кристаллическая структура, характеристики.

Various modifications of the crystal structure of gypsum are considered, their wide variety is noted. The effect of an innovative carbon nanomodifier with a diamond structural lattice on the crystal structure and properties of gypsum has been investigated. It is established that a carbon nanomodifier of high purity (99.99%) in the form of a liquid-phase system consisting of bi-distilled water and nanodiamond particles, obtained by hydrodynamic cavitation, changes the shape of gypsum crystals. Herewith, a heteroepitaxial mechanism of formation and growth of gypsum crystals on nanodiamond particles in a spherical octahedral shape previously unknown for gypsum is noted. The effect of the addition of a liquid-phase nanodiamond system on the setting time and normal density of gypsum dough based on popular industrial binders G-6 and G-16 is shown. The physical and mechanical properties of nanomodified gypsum materials are presented in comparison with gypsum obtained on the original gypsum binders.

*Keywords:* gypsum, gypsum binders, nanodiamonds, nanomodification, crystal structure, characteristics.

#### Введение

Гипс в природе — широко распространенный минерал осадочного происхождения.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГАСУ на 2025 год.

По химическому составу гипс представляет собой малорастворимый в воде дигидрат сульфата кальция:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . В процессе получения вяжущего при умеренных температурах он легко теряет часть молекул воды,

превращаясь в полугидрат одноименной соли  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ , имеющей более высокую растворимость. Кристаллизация гипса при затворении вяжущего водой происходит по классическому механизму, описанному [1–4], с образованием гелевых оболочек вокруг не полностью растворившихся частичек гипса и выпадением из пересыщенного раствора зародышей кристаллов с последующим ростом и скрещиваниями образующихся сростков дигидрата. Растворимость в воде дигидрата сульфата кальция приблизительно в четыре раза меньше, чем полугидрата, и раствор оказывается пересыщенным по отношению к дигидрату. Поэтому гипс в виде зародышей кристаллов  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  выделяется из раствора. По мере накопления дигидрата происходит схватывание, а затем и твердение гипсового теста, обусловленное ростом кристаллов и их срастанием, с образованием кристаллических сростков.

При этом форма новообразований гипсовых кристаллов повторяет форму кристаллов подложки, т. е. исходного гипса. Таким образом происходит гомоэпитаксильная форма кристаллизации гипсового вяжущего.

Различные примеси и изменение рН водной среды могут оказывать влияние на этот процесс [5, 6].

В процессе формирования кристаллов в природе гипс в качестве примесей может захватывать микрочастицы различных веществ, тогда форма его кристаллов может меняться, оставаясь при этом изначально отвечающей условию моноклинной сингонии. Кристалл гипса обладает совершенной спайностью в одном направлении и средней или слабой спайностью — в двух других. Кристаллическое разнообразие гипса включает различные отличающиеся формы кристаллических сростков, которые встречаются как в природе, так и в гипсах, синтезированных искусственно [7, 8].

Природное многообразие кристаллических форм гипса состоит в том, что, кристал-

лизуясь преимущественно в моноклинной сингонии, гипс, тем не менее, имеет ряд весьма сильно отличающихся внешне кристаллических форм.

Известны следующие кристаллические формы гипса: таблитчатые, призматические, кристаллы ромбической формы, игольчатые и пластинчатые кристаллы и некоторые другие [9–10].

Столбчатая разновидность кристаллов гипса встречается довольно часто. В искусственных гипсах и в природе встречаются также раздвоенные кристаллические сростки, напоминающие по форме хвост ласточки, которые так и называются — «ласточкин хвост». Нередки кристаллические сростки гипса в форме игл с разветвлениями и игольчатые структуры, образующие сферические сростки.

Разновидность тонковолокнистого гипса называется селенит. Селениту свойственны нитевидные кристаллы, расположенные строго параллельно. Округленные пластинчатые кристаллы гипса имеют название «гипсовые розы». В природе встречаются скрученные и искривленные формы гипсовых кристаллов, что свидетельствует о высокой податливости процесса кристаллизации гипса различным внешним факторам и влиянию примесей.

Примеры искусственных и природных кристаллических форм гипса представлены на рис. 1, а–к.

С учетом известного многообразия кристаллических форм гипса можно прийти к выводу, что решение задачи получения гипсового строительного материала определенной кристаллической структуры является реальным и вполне осуществимо в будущем.

В последнее время проводится множество научных исследований в области наномодификации гипсовых вяжущих. При этом в ряде работ выявлено, что наномодификаторы оказывают влияние на кристаллическую структуру и морфологию гипсового камня [11–14]. В данных работах отмечается формирование более мелкой равномерной



Рис. 1. Разнообразие кристаллических форм гипса — дигидрата сульфата кальция: *а* — столбчатые и нитевидные кристаллы; *б* — сростки кристаллов гипса «ласточкин хвост»; *в* — столбчатые скрещивающиеся кристаллы; *г* — пластинчатые кристаллы «марьино стекло»; *д* — ромбовидные призматические кристаллы; *е* — расходящиеся столбчатые кристаллы округлой формы — «гипсовые розы»; *ж* — разновидность кристаллов гипса «розы пустыни»; *з* — таблитчатый ромбовидный кристалл; *к* — игольчатые гипсовые кристаллы

кристаллической структуры, также отмечается повышенная спайность кристаллических сростков. Это, в свою очередь, приводит к меньшей пустотности гипсового камня и его упрочнению. Морфологические изменения под действием наномодифицирующих добавок приводят, по мнению авторов, к повышению механической прочности и водостойкости гипса [14–18].

При этом в исследованиях, посвященных наномодификации гипса, не рассматривались процессы формирования и роста гипсовых кристаллов с позиции эпитаксии. Эпитаксией называется закономерное нарастание одного

кристаллического слоя материала на другой, т. е. эпитаксия — явление или процесс ориентированного роста одного кристалла на поверхности другого тела или подложки. Таким образом, рост всех кристаллов в общем можно назвать эпитаксиальным, где каждый последующий слой имеет ту же пространственную ориентацию, что и предыдущий.

В большинстве имеющихся работ, посвященных наномодификации гипса, особенностей кристаллических форм новообразований в виде выявлений каких-либо закономерностей и особенностей формирования кристаллических форм с позиции эпитаксии не обсуж-

далось. Не анализировалась связь с наследованием кристаллической структуры подложки, выводы относительно кристаллической структуры наномодифицированного гипса ограничиваются общим описанием структуры и морфологии гипсового камня [13–18].

Возникновение зародышей кристаллообразования может происходить несколькими путями: рост кристаллов может осуществляться на поверхности неполностью растворившихся частиц сульфата кальция. Центрами кристаллизации могут быть сторонние примеси, например, природного сырья. Также центрами кристаллизации могут являться искусственно внесенные активные частицы. В тех случаях, когда вещества кристаллизующегося слоя и подложки одинаковы, процесс классифицируется как автоэпитаксиальный, или гомоэпитаксия. Если же вещества кристаллического слоя и подложки отличаются, такая форма эпитаксии называется гетероэпитаксией.

Известно, что процесс гидратации гипсового вяжущего зависит от ряда факторов, среди которых водогипсовое отношение; удельная поверхность, от которой зависит скорость растворения частиц; концентрация и рН раствора, окружающего частицы — центры кристаллизации. Также имеет не менее важное значение структура первичного кристаллического слоя, которая оказывает влияние на дальнейшее формирование и эпитаксиальный рост новообразований кристаллов гипса.

В случае гетероэпитаксиальной кристаллизации, когда материалы растущего кристалла и подложки отличаются, возможно формирование различных кристаллических форм в зависимости от электроэнергетических параметров этих материалов.

Таким образом, оказывая влияние на поверхностную энергию в процессе кристаллизации с помощью наночастиц, несущих определенные заряды, можно научиться управлять процессами эпитаксиальной кристаллизации гипса и получать гипсовые ма-

териалы и изделия с заданной кристаллической формой.

#### **Материалы и методы исследования**

Цель данной работы: исследование влияния наноалмазов на кристаллическую структуру и свойства гипса.

Материалы: гипсовые вяжущие Г-6 Пешеланского гипсового завода и Г-16 Самарского гипсового предприятия.

Коллоидная суспензия наноалмазов производства ООО НПК «Наносистемы», г. Ростов-на-Дону представляет собой продукт в виде водной суспензии неоседающих углеродных наночастиц алмазного строения в бидистиллированной воде. Наноалмазы имеют сферическую форму. Доказано, что кристаллическая решетка углеродных наночастиц алмазоподобная, линии соответствуют отражениям (200), (222), что согласуется с базой данных алмазной структуры.

Этот наномодификатор отличается от прочих известных форм наноуглеродов тем, что данные наноалмазы получены инновационным методом — гидродинамической кавитацией. Их особенностью является высокая степень однородности, высокий показатель химической чистоты (99,99 %) и высокая седиментационная устойчивость системы (до 1,5 лет), а также высокий устойчивый отрицательный электрический потенциал системы ( $\zeta$ -потенциал =  $-30$  мВ). Наноалмазы представляют собой углеродные  $sp^3$ -гибридизованные наночастицы с алмазоподобной структурой и размером отдельных частиц в поперечном сечении не более 3 нм. Имеют форму, очень близкую к сферической, и четкое мономодальное распределение по всему фракционному составу. Так было установлено, что наноалмазы, полученные методом гидродинамической кавитации, представляют собой образования, состоящие исключительно из атомов углерода, их сферические агломераты имеют размеры от 30 до 100 нм. Результаты дисперсионного анализа наноалмазов представлены на рис. 2.

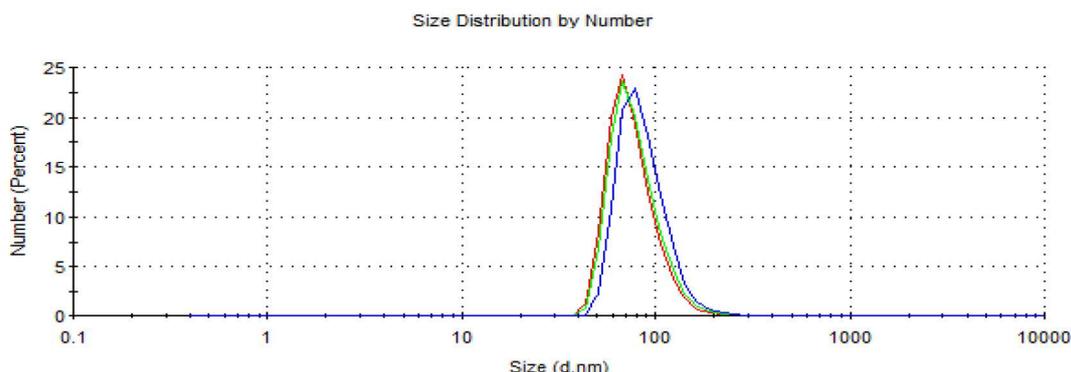


Рис. 2. Результаты дисперсионного анализа наноалмазов, полученных методом гидродинамической кавитации

Наноалмазы состоят из алмазного ядра с  $sp^3$ -гибридизованными атомами углерода и покрыты оболочкой луковичного углерода в состоянии  $sp^2$ -гибридизации. Углеродные наноструктуры  $sp^3$  диаметром менее 3 нм обычно называются алмазоидами, они встречаются в природных условиях, например в нефтяных месторождениях.  $Sp^3$ -гибридизованные поверхностно связанные атомы углерода алмазоидов обычно связаны с водородом или другими атомами. Их свойства напоминают скорее свойства органических молекул, а не объемных алмазов. По мере увеличения диаметра класте-

ра углерода процентное содержание атомов  $sp^3$  углерода, расположенных на поверхности, уменьшается. Нижний предел диаметра наноалмазов не ясен. Около 15 % атомов углерода в таких наноалмазах расположены на поверхности и способствуют стабилизации структуры в целом, образуя связи с водородом или другими атомами. Поверхность наноалмазов может содержать некоторые органические функциональные группы, наличие которых зависит от сопутствующих химических условий. Схематическая структура частицы наноалмаза представлена на рис. 3.

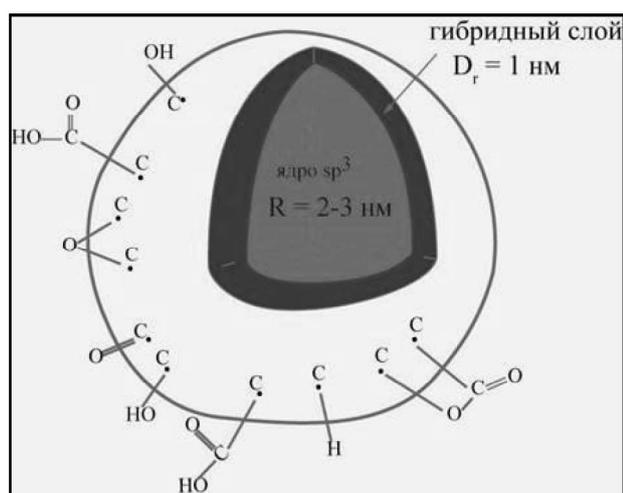


Рис. 3. Схематическое изображение частицы гидродинамических наноалмазов

Размер и форму частиц наноалмазов поставщики анализировали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ). Перед проведением сканирования коллоидный раствор наноалмазов наносили на покровное стекло и высушивали. Как видно из результатов исследования, частицы имеют форму, близкую к сферической, с размером менее 100 нм (рис. 4). Размер частиц до 100 нм может быть обусловлен агломерацией частиц при пробоподготовке для проведения исследований с помощью АСМ.

Структуру частиц наноалмазов, их размеры и размеры конгломератных образований нанокондукторного модификатора исследовали также методом электронной микроскопии. По микрофотографии можно убедиться

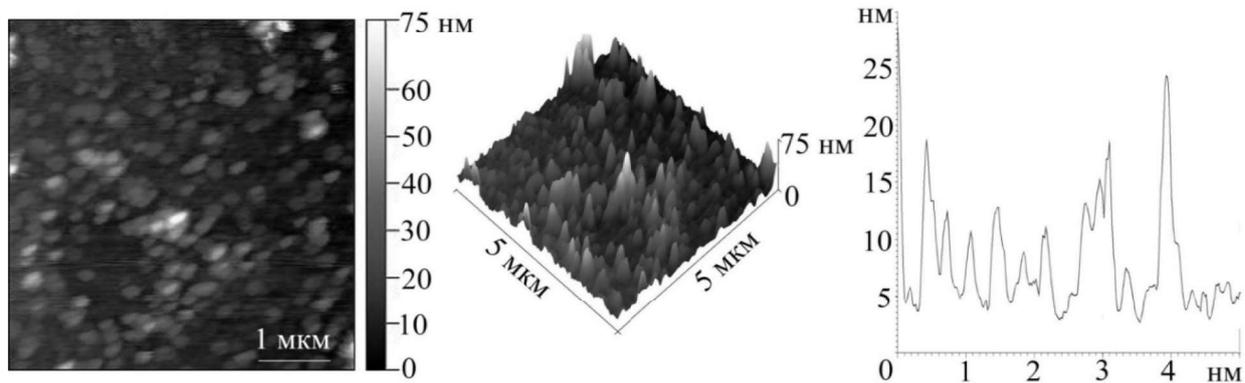


Рис. 4. Результаты исследования наноалмазов методом АСМ

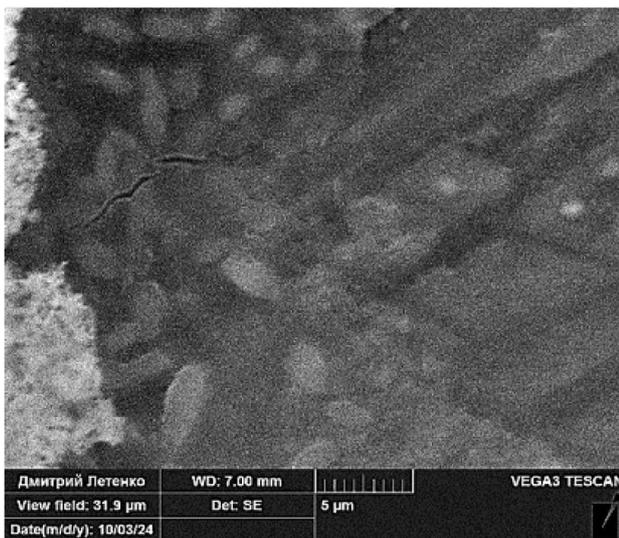


Рис. 5. Электронная микрофотография высушенного остатка коллоидной системы наноалмазов

в их шарообразной или эллипсоидной форме (рис. 5).

Полученные нами данные о наноалмазах полностью совпадают с результатами исследований, предоставленными производителем наномодификатора, ООО НПК «Наносистемы».

#### Результаты исследования и их обсуждение

Микроструктуру образцов гипса в виде сколов, исходного и модифицированного наноалмазами, исследовали с помощью сканирующего растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA 3SEM (Чехия).

На рис. 6, а, б и 7, а, б представлены электронные микрофотографии сколов гипсового камня, полученного на основе вяжущих Г-16 и Г-6, и, соответственно, того же гипса, полученного в присутствии добавки суспензии наноалмазов. Образцы гипса готовили в виде стандартных образцов балочек 40×40×160 мм согласно ГОСТ 23789–2018 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний». Добавку коллоидной суспензии наноалмазов в различных концентрациях вводили в воду затворения, тщательно перемешивали.

Заметно, что форма кристаллов наномодифицированного гипсового камня значительно отличается от исходного гипса.

На рис. 6 изображен гипс, полученный на вяжущем Г-16. Кристаллы немодифицированного гипса Г-16 удлиненные, по форме — игольчато-столбчатые, структура камня имеет множество пустот между сrostками кристаллов.

При использовании наномодификатора морфология гипсового камня изменилась: образовались короткие пластинчатые сrostки кристаллов с вкраплениями зерен сферической формы, при этом спайность кристаллов заметно выше.

Форма кристаллов наномодифицированного гипсового камня на основе вяжущего Г-6 также полностью меняется по сравнению с исходной формой кристаллов (рис. 7). Без модифицирующей нанодобавки в гипсовом

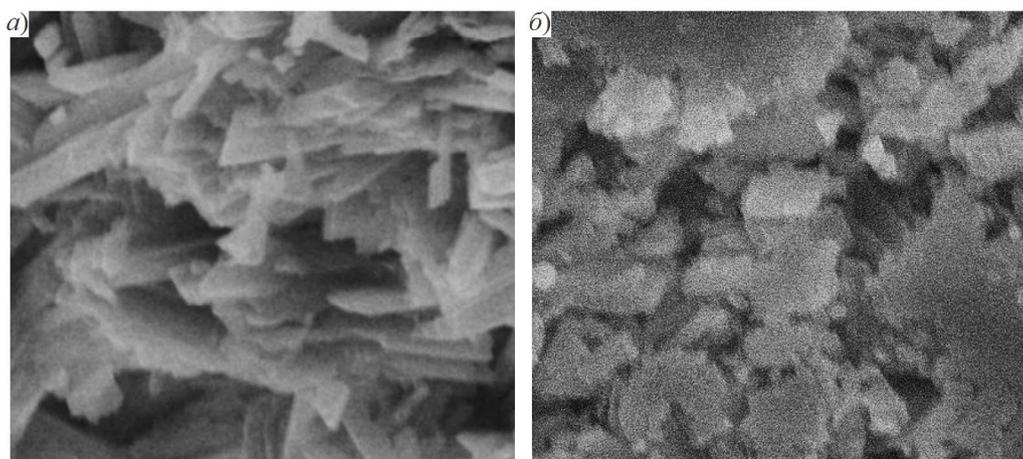


Рис. 6. Электронные микрофотографии. Отличающиеся формы кристаллов и сростков гипса Г-16 исходного (а) и полученного с добавкой наноалмазов (б). Увеличение:  $\times 10\,000$

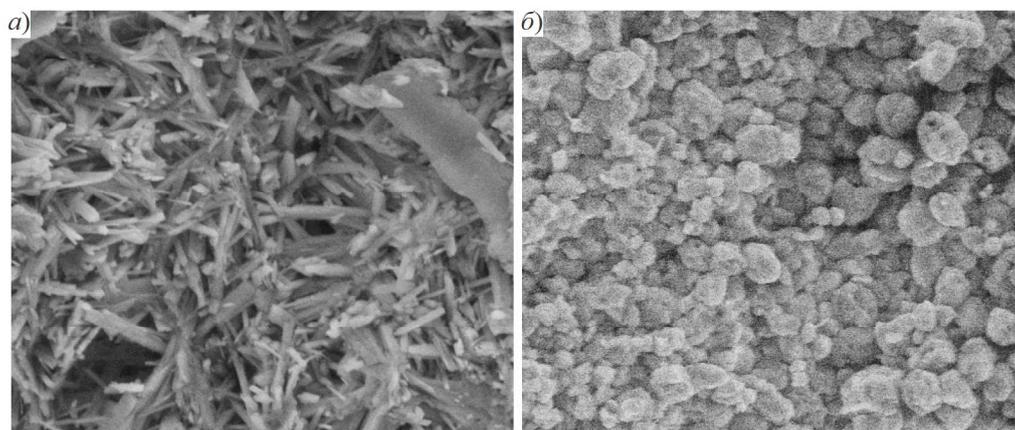


Рис. 7. Электронные микрофотографии. Кристаллическая структура гипса Г-6 исходного (а) и полученного с добавкой наноалмазов (б). Увеличение:  $\times 3000$

камне, полученном на основе вяжущего Г-6, образуется пористая структура, состоящая из удлиненных гипсовых кристаллов игловатой формы со значительным количеством мелких и более крупных пустот (рис. 7, а).

Добавка в воду затворения коллоидной суспензии наноалмазов привела к формированию сферических кристаллических структур с заметной спаянностью, т. е. увеличенной площадью контактов между собой кристаллов новообразований. Спаянность кристаллов является результатом ограничения роста кристаллов из-за возникновения большого числа центров кристаллизации (рис. 7, б).

Очевидные изменения морфологии гипсового камня в результате измененной формы кристаллов объясняют, таким образом, повышение прочностных характеристик наномодифицированного гипса.

Изменение кристаллической структуры гипсового камня можно трактовать следующим образом: наномодификатор в виде отрицательно заряженных частиц наноалмазов создает многочисленные центры кристаллизации дигидрата сульфата кальция. При этом на поверхности наноалмазных частиц происходит гетероэпитаксиальная кристаллизация и рост гипсового камня с наследованием формы зародышеобразова-

**Физико-механические характеристики гипсового камня, модифицированного наноалмазами**

№ п/п	Вяжущее	Добавка, % масс.	В/Г	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Сроки схватывания, мин		Предел прочности, МПа (выдержка 14 сут)	
					начало	конец	при сжатии	при изгибе
1	Г-6	0	0,5	1627	6	10	20,8	8,4
2	Г-6	0,012	0,5	1648	4	7	23,7	9,0
3	Г-6	0,024	0,5	1659	4	7	22,4	7,8
4	Г-6	0,048	0,5	1660	4	7	22,2	8,0
5	Г-6	0,096	0,5	1665	4	7	22,3	8,2
6	Г-16	0	0,38	1738	6,5	11	37,7	10,5
7	Г-16	0,012	0,38	1765	5,5	10	40,0	13,1

теля — наноалмазов. Именно этим объясняется шарообразная и близкая к октаэдрической форма кристаллов, ранее не известная для дигидрата сульфата кальция, т. е. гипс с такой формой кристаллов ранее не был замечен.

Физико-механические характеристики наномодифицированных образцов гипса установлены по стандартной методике согласно ГОСТ 23789–2018 «Вяжущие гипсовые. Методы испытания». Результаты представлены в таблице.

Из представленных в таблице данных следует, что использование наноалмазов позволяет повысить физико-механические характеристики гипсового камня, что и следовало ожидать, учитывая измененную форму кристаллов гипса и морфологию гипсового камня в целом.

Замечено, что увеличение концентрации наномодификатора в количествах от 0,012 до 0,096 % масс. в пересчете на сухой остаток по отношению к вяжущему (для Г-6) не приводит к дополнительному повышению прочности гипса, т. е. увеличение количества нанодобавки оказалось неэффективным. Плотность гипсового камня с увеличением наномодификатора растет, но незначительно, поскольку водогипсовое отношение в опытах оставалось постоянным.

Тем не менее, повышение прочности, вероятно, возможно, и вопрос его достижения может находиться в технологических условиях применения данной нанодобавки, что планируется нами в дальнейшем.

**Выводы**

1. Введение в гипсовое тесто наноалмазных частиц приводит к образованию большого количества новых центров кристаллизации гипса по гетероэпитаксиальному механизму, в результате чего образуется большее количество мелких кристаллов, отличающихся по форме от первоначальных.

2. Получены кристаллы гипса не известной ранее сферической октаэдрической формы и отличающиеся от формы кристаллов вяжущего Г-6. Формирование и рост кристаллических октаэдров происходят с наследованием формы частиц наноалмазов.

3. Увеличение прочностных характеристик гипса объясняется изменениями его кристаллической структуры, поскольку его кристаллы имеют большую сопряженность.

4. Повышение концентрации наномодификатора в количествах от 0,012 до 0,096 % масс. не влияет на увеличение прочностных характеристик.

5. Исследования следует продолжить в части снижения концентрации нанодобавки и более эффективного распределения наноалмазных частиц в растворе затворения.

## Библиографический список

1. Микульский В. Г. и др. Строительные материалы. Материаловедение. Технология конструкционных материалов / под общ. ред. В. Г. Микульского, Г. П. Сахарова. М.: АСВ, 2011. 519 с.
2. Волженский А. В. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат, 1986. 464 с.
3. Байер В. Е. Архитектурное материаловедение. М.: Архитектура-С, 2006. 264 с.
4. Сулименко Л. М. Технология минеральных вяжущих материалов и изделий на их основе. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2005. 334 с.
5. Клименко В. Г., Павленко В. И., Гасанов С. К. Влияние рН жидкости затворения на прочностные свойства гипсовых вяжущих // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2014. № 5. С. 16–20.
6. Устинова Ю. В., Сивков С. П., Алексахин В. М. Изучение кристаллизации двуводного гипса в присутствии полимерных добавок // Вестник МГСУ. 2012. № 7. С. 130–135.
7. Wtorov B., Fischer H.-B., Stark J. Zur Anregung vor Naturanhydrit // Internationale Baustofftagung (14. ibausil) 20.–23. September 2000, Weimar, Bundesrepublik Deutschland, Band 1. Pp. 1069–1082.
8. Fischer H.-B., Gatliemann B., Hill M. Möglichkeiten der Darstellung des Gipskristallhabitus. roiss. Z. Bauhaus- Univ. Weimar. 1996, Vol. 42 (4, 5). Pp. 101–106.
9. Юхименко В. Г. Атлас минералов горных пород. М.; Вологда: Инфра-инженерия, 2023. 168 с.
10. Потапова Е. Н. Его величество ГИПС. А что это такое? URL: <https://design-rctu.ru/departments/binder/75-plaster?showall=1/> (дата обращения: 12.03.2025).
11. Мокрова М. В., Матвеева Л. Ю., Летенко Д. Г., Строгонов Ю. А. Наномодифицированный теплоизоляционный газогипс: состав, свойства, структура // Известия вузов. Строительство. 2022. № 3 (759). С. 25–32.
12. Летенко Д. Г., Мокрова М. В., Матвеева Л. Ю., Тихонов Ю. М. Влияние размерного распределения наномодифицированных частиц латекса на структуру гипсовых материалов // Вестник гражданских инженеров. 2019. № 4 (75). С. 95–101.
13. Изряднова О. В., Гордина А. Ф., Яковлев Г. И., Фишер Х.-Б. Регулирование морфологии кристаллогидратов в структуре гипсовой матрицы ультра- и нанодисперсными добавками // Известия КГАСУ. 2014. № 3. С. 108–112.
14. Чумак А. Г., Деревянко В. Н., Петрунин С. Ю., Попов М. Ю., Ваганов В. Е. Структура и свойства композиционного материала на основе гипсового вяжущего и углеродных нанотрубок // Нанотехнологии в строительстве. 2013. Т. 5, № 2. С. 27–37.

15. Гаркави М. С., Некрасова С. А., Трошкина Е. А. Кинетика формирования контактов в наномодифицированных гипсовых материалах // Строительные материалы. 2013. № 2. С. 38–40.

16. Маева И. С., Яковлев Г. И., Первушин Г. Н., Бурьянов А. Ф., Пустовгар А. П. Структурирование ангидритовой матрицы нанодисперсными модифицирующими добавками // Строительные материалы. 2009. № 6. С. 4–5.

17. Токарев Ю. В., Гинчицкий Е. О., Яковлев Г. И., Бурьянов А. Ф. Эффективность модификации гипсового вяжущего углеродными нанотрубками и добавками различной дисперсности // Строительные материалы. 2015. № 6. С. 84–87.

18. Яковлев Г. И., Полянских (Маева) И. С., Токарев Ю. В., Гордина А. Ф. Оценка влияния ультрадисперсной пыли и углеродных наносистем на структуру и свойства гипсовых вяжущих // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 1 (21). С. 185–188.

## References

1. Mikul'skiy V. G., et al. *Stroitel'nye materialy. Materialovedenie. Tekhnologiya konstruksionnykh materialov* [Building materials. Materials science. Construction materials technology]. Ed. by Mikul'skiy V. G., Sakharov G. P. Moscow, ASV Publ., 2011, 519 p.
2. Volzhenskiy A. V. *Mineral'nye vyazhushchie veshchestva* [Mineral binders]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 464 p.
3. Bayer V. E. *Arkhitekturnoe materialovedenie* [Architectural materials science]. Moscow, Arkhitektura-S Publ., 2006, 264 p.
4. Sulimenko L. M. *Tekhnologiya mineral'nykh vyazhushchikh materialov i izdeliy na ikh osnove* [Technology of mineral binding materials and products based on them]. 4-th ed., revised. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005, 334 p.
5. Klimenko V. G., Pavlenko V. I., Gasanov S. K. *Vliyanie rN zhidkosti zatvoreniya na prochnostnye svoystva gipsovykh vyazhushchikh* [Influence of tempering fluid pH on the strength properties of gypsum binders]. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*, 2014, no. 5, pp. 16–20.
6. Ustinova Yu. V., Sivkov S. P., Aleksashin V. M. *Izuchenie kristallizatsii dvuvodnogo gipsa v prisutstvii polimernykh dobavok* [Study of crystallization of dihydrate gypsum in the presence of polymer additives]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2012, no. 7, pp. 130–135.
7. Wtorov B., Fischer H.-B., Stark J. Zur Anregung vor Naturanhydrit. *Internationale Baustofftagung* (14. ibausil) 20.–23. September 2000, Weimar, Bundesrepublik Deutschland, Band 1, pp. 1069–1082.

8. Fischer H.-B., Gatliemann B., Hill M. *Möglichkeiten der Darstellung des Gipskristallhabitus*. roiss. Z. Bauhaus- Univ. Weimar, 1996, vol. 42 (4, 5), pp. 101–106.

9. Yukhimenko V. G. *Atlas mineralov gornyx porod* [Atlas of rock minerals]. Moscow, Vologda, Infra-inzheneriya Publ., 2023, 168 p.

10. Potapova E. N. *Ego velichestvo GIPS. A chto eto takoe?* [His Majesty GIPSUM. And what is it?]. Available at: <https://design-rctu.ru/departments/binder/75-plaster?showall=1/> (accessed: 12.03.2025).

11. Mokrova M. V., Matveeva L. Yu., Letenko D. G., Stroganov Yu. A. *Nanomodifitsirovanniy teploizolyatsionnyy gazogips: sostav, svoystva, struktura* [Nanomodified heat-insulating gas gypsum: composition, properties, structure]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo – Proceedings of universities. Construction*, 2022, no. 3 (759), pp. 25–32.

12. Letenko D. G., Mokrova M. V., Matveeva L. Yu., Tikhonov Yu. M. *Vliyanie razmernogo raspredeleniya nanomodifitsirovannykh chastits lateksa na strukturu gipsovykh materialov* [Influence of the size distribution of nanomodified latex particles on the structure of gypsum materials]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 4 (75), pp. 95–101.

13. Izryadnova O. V., Gordina A. F., Yakovlev G. I., Fisher Kh.-B. *Regulirovanie morfologii kristallogidratov v strukture gipsovoy matritsy ul'tra- i nanodispersnyimi dobavkami* [Regulation of crystal hydrate morphology in the gypsum matrix structure by ultra- and nanodispersed additives]. *Izvestiya KGASU – Proceedings of KGASU*, 2014, no. 3, pp. 108–112.

14. Chumak A. G., Derevyanko V. N., Petrunin S. Yu., Popov M. Yu., Vaganov V. E. *Struktura i svoystva*

*kompozitsionnogo materiala na osnove gipsovogo vyazhushchego i uglerodnykh nanotrubok* [Structure and properties of a composite material based on gypsum binder and carbon nanotubes]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve – Nanotechnologies in Construction*, 2013, vol. 5, no. 2, pp. 27–37.

15. Garkavi M. S., Nekrasova S. A., Troshkina E. A. *Kinetika formirovaniya kontaktov v nanomodifitsirovannykh gipsovykh materialakh* [Kinetics of contact formation in nanomodified gypsum materials]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2013, no. 2, pp. 38–40.

16. Maeva I. S., Yakovlev G. I., Pervushin G. N., Bur'yanov A. F., Pustovgar A. P. *Strukturirovanie angidritovoy matritsy nanodispersnyimi modifitsiruyushchimi dobavkami* [Structuring of the anhydrite matrix with nanodispersed modifying additives]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2009, no. 6, pp. 4–5.

17. Tokarev Yu. V., Ginchitskiy E. O., Yakovlev G. I., Bur'yanov A. F. *Effektivnost' modifikatsii gipsovogo vyazhushchego uglerodnymi nanotrubkami i dobavkami razlichnoy dispersnosti* [Efficiency of modification of gypsum binder by carbon nanotubes and additives of various dispersibility]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2015, no. 6, pp. 84–87.

18. Yakovlev G. I., Polyanskikh (Maeva) I. S., Tokarev Yu. V., Gordina A. F. *Otsenka vliyaniya ul'tradispersnoy pyli i uglerodnykh nanosistem na strukturu i svoystva gipsovykh vyazhushchikh* [Assessment of the influence of ultrafine dust and carbon nanosystems on the structure and properties of gypsum binders]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve – Intelligent Systems in Production*, 2013, no. 1 (21), pp. 185–188.