

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-83-91

*Головизнина Т.Е., Ерыгина А.О.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: t.goloviznina@mail.ru

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЦЕМЕНТА КАК СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Аннотация. Полученные данные демонстрируют зависимость частоты и амплитуды колебаний предела прочности на сжатие цементного камня от гранулометрического состава цемента. С помощью электронной микроскопии установлено, что новообразования в цементном камне из модельного грубофракционного цемента сложнее срастаются в монолитный конгломерат. Цементный камень из преимущественно грубомолотого цемента по сравнению с камнем из тонкомолотого цемента медленно набирает прочность, но колебания прочностных характеристик происходят с меньшей частотой и амплитудой, при длительном твердении значения прочностных показателей после спада восстанавливаются и увеличиваются. Сравнительным рентгенофазовым анализом подтверждена повышенная скорость гидратационного взаимодействия тонких фракций цемента с образованием мелкокристаллических структур, склонных к перекристаллизации. В результате перекристаллизации, цементный камень из тонкомолотых цементов склонен к циклическим снижениям предела прочности на сжатие без полного восстановления ранних максимальных показателей. В соответствии с полученными данными, для компенсации спадов, восстановления и увеличения прочностных характеристик цементного камня в отдалённые сроки твердения, необходимо комплексное наличие крупных (более 50 мкм), средних (30 до 50 мкм) и мелких фракций в составе цемента.

Ключевые слова: портландцемент, цементный камень, гранулометрический состав, гидратация, структурообразование, колебания прочностных характеристик.

Введение. На строительно-технические свойства цементного камня оказывают влияние все технологические переделы производства [1–5]. Производители цемента, в соответствии с требованиями ГОСТ 31108, определяют и контролируют качество продукции в возрасте до 28 суток твердения. Этим временным промежутком определения свойств и характеристик ограничивается и большая часть исследовательских работ [6–10]. Процессы, происходящие в камне на основе цемента, не завершаются через месяц твердения. Сложная микроструктура камня продолжает меняться все время существования изделия [11, 12]. Процессы, происходящие в цементном камне при длительном твердении, влияют на область их использования потребителями. Свойства цементного камня зависят, в том числе, и от гранулометрического состава вяжущего материала [13–15]. Современное оборудование позволяет регулировать тонкость помола цемента с достаточной точностью, соответственно производитель получает средство управления свойствами продукции. Использование гранулометрического состава цемента как фактора воздействия на качество, будет положительным лишь при условии знания

динамики процесса долговременного твердения. Регулирование свойств цементного камня и предотвращения возможных отрицательных явлений – задача необходимая.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием портландцементного клинкера. В качестве добавки к клинкеру применен природный гипсовый камень. Анализ гранулометрического состава цементов проведен на лазерном анализаторе размеров частиц ANALYSETTE 22 NanoTec plus. Фазовый состав цемента и продуктов гидратации установлен методом рентгеновской дифракции. Микроструктура цементного камня исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA3 TESCAN. Предел прочности на сжатие определен у цементного камня в малых образцах, изготовленных из цементного теста с единым водоцементным отношением.

Получение цементов. Химический состав использованных для исследования промышленного портландцементного клинкера и природного гипсового камня представлен в таблице 1; расчётный фазовый состав и модульные характеристики клинкера – в таблице 2.

Таблица 1

Химический состав клинкера и природного гипсового камня, масс %

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	п.п.п.
Клинкер	21,72	5,26	4,05	66,56	0,75	0,72	0,75	0,18
Гипсовый камень	0,49	0,02	0,03	32,80	0,47	46,65	–	19,55

Таблица 2

Модульные характеристики клинкера и фазовый состав, масс %

КН	n	p	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
0,93	2,33	1,3	64,77	13,41	7,09	12,32

На рисунке 1 представлен фрагмент дифрактограммы промышленного клинкера.

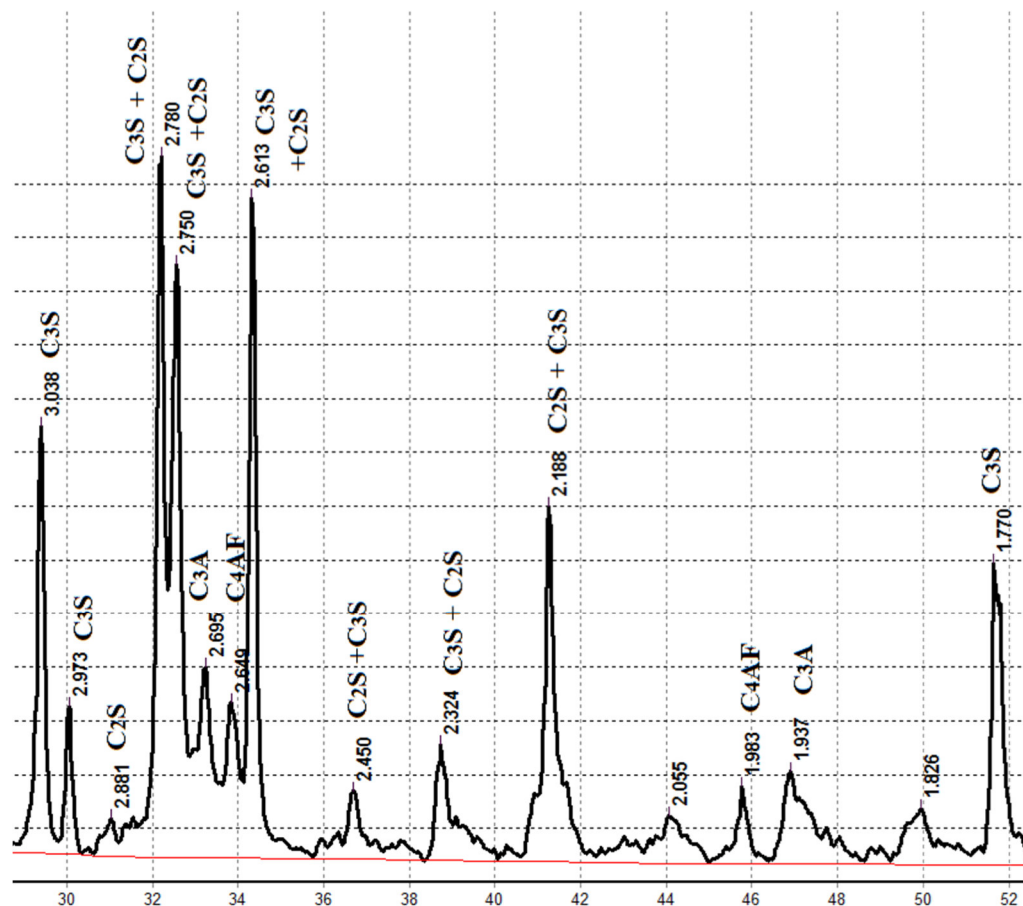


Рис. 1. Фрагмент дифрактограммы промышленного клинкера

По данным рентгенофазового анализа (рис.1) в составе использованного промышленного клинкера идентифицированы четыре основные клинкерные фазы: алит (C₃S) – d = 1,770; 3,038; 2,780; 2,973; 2,750; 2,613; 2,188 Å; белит (C₂S) – d = 2,881; 2,780; 2,750; 2,613 Å, 2,188 Å; C₃A – d = 2,695; 1,983 Å; C₄AF – d = 1,937; 2,649 Å. Таким образом (табл. 1, 2, рис.1), выбранный для исследования материал является типичным представителем рядового портландцементного клинкера.

Для вяжущих порошков частицы принято делить по крупности на: очень мелкие 0,1–5 мкм; мелкие 5–30; средние 30–50 и крупные – свыше 50 мкм. К исследованию приняты экспериментальные модельные цементы, преимущественно представленные тонкой и грубой фракциями. Текущий контроль помола вели по удельной поверхности. Усреднённый по составу клинкер привели в два состояния: грубого (250 м²/кг) и тонкого (550 м²/кг) помола, сохраняя состав

усреднённой пробы клинкера, не отбрасывая и не добавляя материал при измельчении и помоле. Гистограммы распределения частиц клинкера по крупности представлены на рисунке 2, содержание частиц различной крупности в составе грубофракционного и тонкофракционного клинкеров – в таблице 3.

По данным лазерного гранулометрического анализа, основная масса частиц грубофракционного клинкера представлена размером от 40 до 90 мкм, с содержанием частиц средней фракции порядка 20 %. Тонкофракционный клинкер преимущественно состоит из частиц мелкой фракции размером до 16 мкм, с содержанием частиц средней фракции не более 4 %.

Для получения цемента в каждый вид клинкера добавлено 5 % измельчённого до полного прохождения через сито №008 природного гипсового камня. Усреднение цементов проведено без влияния на фракционный состав.

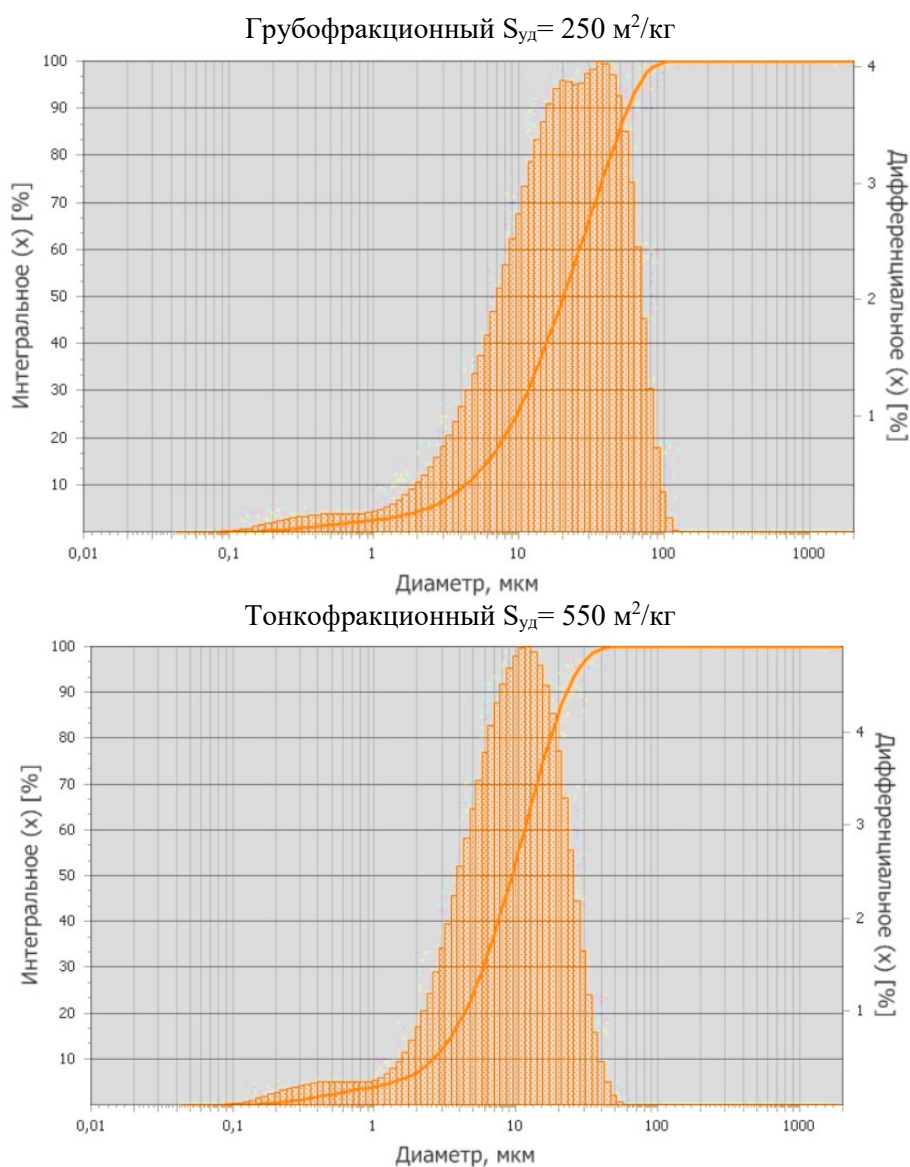


Рис. 2. Гистограммы распределения частиц молотого клинкера по крупности.

Таблица 3

Распределение частиц клинкера по диаметру, %

Персентиль, %	Диаметр, мкм	
	грубофракционный	тонкофракционный
5	2,32	1,38
10	4,31	2,62
25	9,64	5,08
50	20,08	9,32
75	37,8	15,57
90	56,01	22,65
95	66,88	27,47
99	86,31	37,14

Основная часть. Влияние гранулометрического состава на прочностные характеристики цементного камня в ранние и длительные сроки твердения определено в трёх видах цемента: № 1 – из клинкера грубофракционного состава; № 2 –

из клинкера тонкофракционного состава; № 3 – смеси 1:1 тонко- и грубофракционных составов.

Образцы цементного камня формовали и хранили в идентичных условиях. Влияние гранулометрического состава на прочностные характеристики, фазовый состав и структуру цементного

камня определяли в возрасте от 2 суток до 7 месяцев твердения.

Данные сравнительного рентгенофазового анализа продуктов гидратации исследуемых цементов в возрасте 7 суток твердения (рис. 3а) демонстрируют и подтверждают известный факт – чем тоньше помол, тем интенсивнее идут реакции гидратации. В камне из цемента тонкофракционного состава интенсивности пиков основной клинкерной фазы – C_3S , значительно ниже, а скорость образования первичного продукта гидратации $Ca(OH)_2$ – выше. Тенденция относительно повышенной скорости реакций образования про-

дуктов гидратации в камне из тонкофракционного вяжущего сохраняется на всем протяжении эксперимента. На рисунке 3б представлен фрагмент сравнительной дифрактограммы цементного камня в возрасте пяти месяцев твердения. Интенсивность дифракционных максимумов, принадлежащих гидратным образованиям: тобермориту $C_5S_6H_5$ – $d = 3,07; 2,97; 2,8 \text{ \AA}$ и смеси высокоосновных и низкоосновных гидросиликатов $C-S-H$ – $d = 3,11; 3,04; 2,88 \text{ \AA}$, убывают в последовательности: камень из тонкофракционного цемента → камень из смеси 1:1 → камень из грубофракционного цемента.

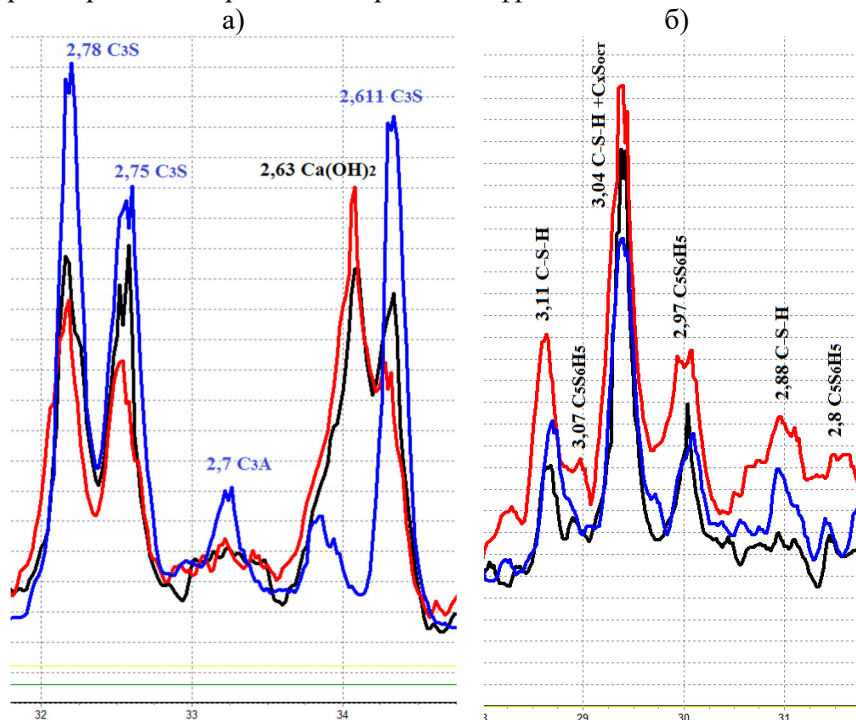


Рис. 3. Фрагменты сравнительного рентгенофазового анализа.

- а) — исходного клинкера и продуктов гидратации в возрасте 7 суток твердения камней из цемента:
 — грубофракционного; — тонкофракционного.
- б) продуктов гидратации в возрасте 5 месяцев твердения камней из цемента:
 — грубофракционного; — тонкофракционного; — смеси 1:1

По данным рентгенофазового анализа (рис. 3б), преимущество в скорости образования гидратных кристаллических фаз сохраняется за камнем из тонкофракционного цемента и при длительном времени твердения – интенсивность ди-

фракционных максимумов гидратных новообразований выше у камня из тонкофракционного цемента (рис. 3б, красная линия). Сопоставив значения полуширины дифракционных максимумов гидратных новообразований (таблица 4), можно судить о степени кристаллизации.

Таблица 4

Влияние гранулометрического состава цемента на характер кристаллизации продуктов гидратации

Продукт гидратации	Межплоскостное расстояние, $d \text{ \AA}$	Полуширина дифракционных максимумов, $\frac{1}{2} h$		
		гранулометрический состав цемента		
		грубофракционный	тонкофракционный	смесь 1:1
C-S-H	3,11	0,24	0,39	0,29
	3,04	0,15	0,29	0,21
	2,88	0,45	0,56	0,49
$C_5S_6H_5$	2,97	0,35	0,63	0,37
	2,8	0,23	0,35	0,29

Чем выше значение полуширины дифракционного максимума (чем шире пик и волнистее линия дифрактограммы), тем мельче и дефектнее кристаллы фазы и дальше кристаллическая структура от параметров идеальной кристаллической решетки. При высокой скорости гидратации тонких фракций цемента образуются неустойчивые мелкокристаллические структуры, склонные к перекристаллизации. На дифрактограмме максимумы фаз мелкой нестабильной кристаллизации выглядят более широкими, менее четкими и менее острыми (рис. 3б, красная линия). Таким образом, рентгенофазовый анализ степени кристаллизации продуктов гидратации подтверждает, что высокая скорость образования кри-

сталлогидратов приводит к формированию неустойчивых мелкокристаллических структур цементного камня.

Влияние гранулометрического состава цемента на прочностные характеристики цементного камня определено в малых образцах из цементного теста. Полученные результаты представлены на рисунке 4. Установлено, что цементный камень из исследованных составов в процессе твердения подвержен циклическому спаду-набору прочности. Колебания показателей предела прочности на сжатие цементного камня являются закономерным процессом механизма твердения и обусловлены перекристаллизацией новообразований из мелкокристаллических в устойчивые структуры [12, 13].

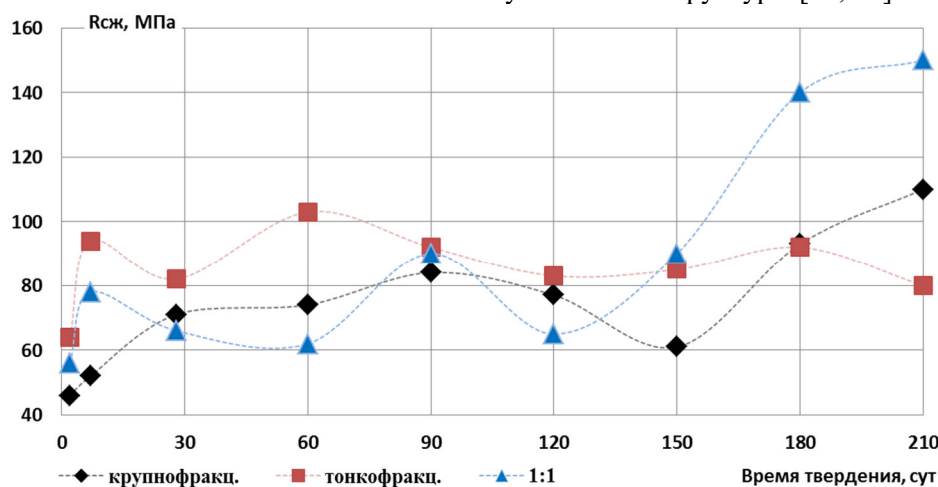


Рис. 4. Влияние гранулометрического состава цемента на прочностные характеристики цементного камня

Анализ колебания прочностных характеристик цементного камня проведён по результатам семи месяцев твердения. По полученным данным установлено, что цементный камень из крупнофракционного цемента демонстрирует минимальные значения прочностных показателей в начальные сроки твердения, стабильный рост прочности до трёх месяцев твердения. Затем два месяца показатели прочности снижаются. За следующий шестой месяц твердения прочность восстанавливается и превосходит ранее достигнутые максимальные значения. Далее набор прочности продолжается.

Цементный камень из тонкофракционного цемента демонстрирует максимальные показатели прочности до 60 суток твердения, затем резкое на 30% и длительное, в течение двух месяцев падение прочности. С четырёх до шести месяцев твердения прочность незначительно увеличивается. В промежутке от шести до семи месяцев твердения наблюдается третий период спада. Максимальные показатели прочности, достигнутые в возрасте двух месяцев твердения, до 7 месяцев твердения не восстанавливаются. Камень

из тонкофракционного цемента характеризуется высокими частотой и амплитудой спада прочности.

У камня из смеси тонкофракционного и грубофракционного цемента характер графика изменения прочности до 28 суток твердения полностью повторяет характер твердения камня из тонкофракционного цемента. Спады прочности также цикличны, но абсолютные показатели прочности после каждого спада восстанавливаются со значительным приростом. К семи месяцам твердения камень из смеси фракций демонстрирует максимальные прочностные показатели.

Сравнительный анализ колебаний прочностных характеристик позволяет предположить, что чем ближе гранулометрический состав к монофракционному и чем выше при этом дисперсность частиц цемента, тем вероятнее долговременный, опасный для конструкций, спад прочностных характеристик цементного камня.

Влияния гранулометрического состава цемента на микроструктуру цементного камня

установлено сравнением микрофотографий поверхности цементного камня в возрасте 5 месяцев твердения. На микрофотографиях поверхностей (рисунок 5) просматриваются слоистые кри-

сталлы гидросиликатов кальция, игольчатые кристаллы АFm-фазы (гидраты C_3A и C_4AF), аморфизированные структуры, характерные для гидросиликатов кальция и светлые слабоструктурированные включения портландита.

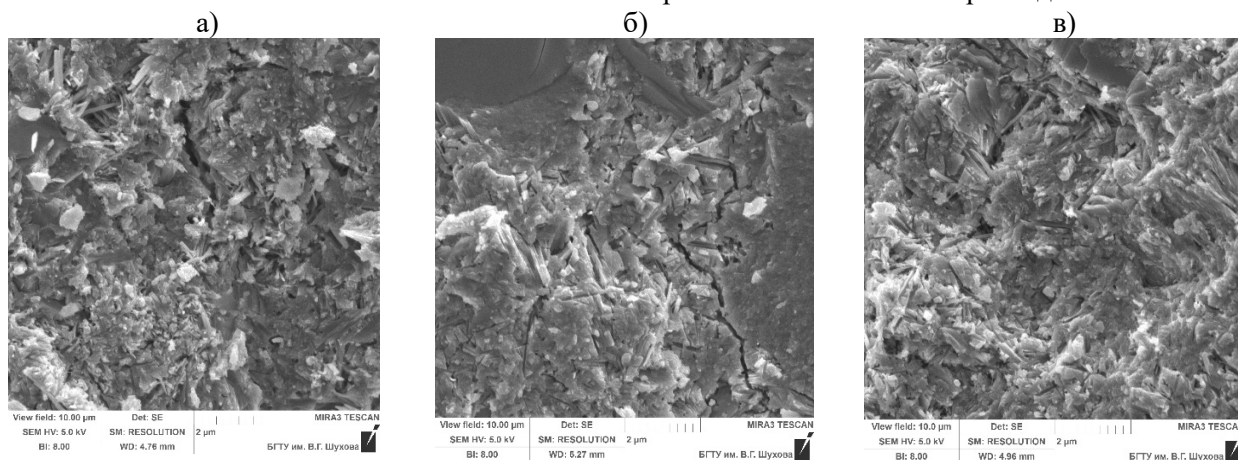


Рис. 5. Микроструктура цементного камня в возрасте 5 месяцев твердения; из цемента: а) крупнофракционного; б) тонкофракционного; в) смеси 1:1

Микроструктурным анализом установлено, что в камне из грубофракционного цемента (рис. 5а) имеются пустоты (условно замкнутые поры) длиной до 30 мкм и шириной до 3 мкм. Пустоты проходят по границам кристаллических фаз. Такое расположение характерно для несросшихся в единый конгломерат крупнокристаллических новообразований. Можно предположить, что причиной является относительно медленная гидратация преимущественно крупных частиц цемента, а, соответственно, и медленный рост кристаллоновообразований и затруднения с организацией единого, плотного каркаса камня из-за ограниченного количества точек-контактов крупных кристаллогидратов.

В камне из мелкофракционного цемента (рис. 5б) зафиксированы протяжённые микротрещины (капилляры) шириной до 1,2 мкм и длиной до 50 мкм. Микротрещины проходят через кристаллы гидратных новообразований, раскалывая уже сформировавшуюся структуру камня. Вероятно, микротрещины являются результатом внутренних напряжений, следствием процесса перекристаллизации новообразований, который сопровождает быстрый рост мелкокристаллических структур при высокой скорости гидратации.

В камне из смеси тонкофракционного и грубофракционного цемента (рис. 5в) зафиксированы пустоты и микротрещины, но оба деструктивных формирования выражены гораздо слабее, чем в камне из только грубой и только мелкой фракций цемента. Размер пустот не более 3 мкм, а длина редких микротрещин до 15 мкм.

Выводы. Установлено, что цементный камень из исследованных модельных составов в процессе твердения подвержен циклическому

спаду-набору прочности. На амплитуду и частоту циклов в существенной мере влияет гранулометрический состав цемента.

Сравнительный рентгенофазовый анализ продуктов гидратации демонстрирует, что тонкий помол способствует увеличению скорости образования кристаллогидратов, который обеспечивает высокие прочностные показатели цементного камня до двух месяцев твердения. Ускоренный рост мелких кристаллических новообразований приводит к формированию неустойчивых структур и к их закономерной перекристаллизации. Следствием одновременной перекристаллизации камня из цемента преимущественно мелкой фракции является нарушение целостности кристаллических структур до образования протяжённых микротрещин-капилляров. Процессы одновременной перекристаллизации приводят к значительным спадам прочности.

В отдалённые сроки твердения наибольшее опасение вызывает спад прочности камня из тонкомолотого цемента. Проявив максимум прочности к двум месяцам твердения, камень её теряет и не восстанавливает показатели до 7 месяцев.

Грубомолотые цементы при пониженных абсолютных показателях прочности в ранние сроки твердения образуют стабильные структуры, обладающие потенциалом увеличения предела прочности на сжатие в отдалённые сроки. Крупная фракция в составе цемента обеспечивает максимальный период (плавный спад) колебаний. С помощью микроструктурного анализа установлено, что при гидратации цемента преимуще-

ственно крупной фракции новообразования сравнительно медленно срастаются в единый конгломерат.

Наличие в цементе одновременно крупной и мелкой фракций нивелирует отрицательные явления, нарушающие целостность кристаллических структур цементного камня. Для гарантированной безопасной эксплуатации изделий необходимо комплексное присутствие в гранулометрическом составе цемента частиц крупной, средней и мелкой фракций.

Регулируя гранулометрический состав, можно частично компенсировать низкую активность клинкера увеличением тонкости помола. Для предотвращения резких, до 30 % спадов прочности в отдалённые сроки твердения в составе цемента необходимо содержание не менее 20% фракции от 30 до 60 мкм, а для снижения частоты циклов спада-набора прочности, цементу требуется фракция крупнее 60 мкм.

По полученным данным, разнообразие гранулометрического состава цемента обеспечивает минимизацию колебаний предела прочности на сжатие цементного камня, как по абсолютным показателям, так и по длительности периодов спада прочностных характеристик. Гранулометрический состав цемента влияет на частоту и амплитуду колебаний прочности на сжатие и, соответственно, может быть одним из способов управления свойствами цементного камня.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет 2030» с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мишин Д.А., Ерыгина А.О. Индивидуальное влияние Na_2O и K_2O на свойства портландцементного клинкера // Цемент и его применение. 2021. № 4. С. 64–66.
2. Мишин Д.А., Ковалев С.В., Чекулаев В.Г. Влияние способа ввода минерализатора на характеристики портландцементного клинкера // Цемент и его применение. 2016. № 4. С. 112–117.
3. Коновалов В.М., Гончаров А.А., Федоров А.С., Мошков И.П., Гостев Н.С. Сжигание RDF-топлива с использованием кислородного дутья // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 10. С. 79–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-79-86
4. Mishin D.A., Erygina A.O., Tarallo Z.V. The Influence of Electric Current on the Water Separation of Cements // Innovations and Technologies in Construction 2022. Vol. 307. Pp. 342–349. DOI: 10.1007/978-3-031-20459-3_43. EDN LWISNH.

5. Erygina A.O., Mishin D.A. Effect of Cubic and Orthorhombic Crystal Systems of Tricalcium Aluminate to Form Ettringite in the Presence of Dihydrate Calcium Sulfate // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 316–321. DOI: 10.1007/978-3-030-68984-1_46. EDN FJSFFH.

6. Самченко С.В., Абрамов М.А., Османов А.Б. Анализ изменения характеристик активированного цемента с использованием дезинтеграторной технологии // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 32–36. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-808-11-32-36

7. Новоселов А. Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Левина Ю.А. Исследование возгонки фтора в процессе обжига клинкера // Техника и технология силикатов. 2024. №. 1. С. 4–13. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-4-13

8. Борисов И.Н., Новоселов А.Г., Никитина М.А., Мануйлов В.Е. Синтез и свойства кальцево-алюмоферритового цемента с использованием техногенных материалов // Техника и технология силикатов. 2024. №. 2. С. 108–117. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-108-117

9. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В., Дергунов С.А., Сериков С.В., Хамидулина Д.Д., Некрасова С.А. Особенности твердения механоактивированных композиционных цементов // Строительные материалы. 2024. №. 12. С. 21–27. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-831-12-21-27

10. Goloviznina T.Y., Konovalov V.M., Morozova I.A. Sulfoaluminate Cement and Low-Temperature Roasting Additive from Low Aluminate Raw Materials with a High Content of Silicon Oxide // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. T. 147. С. 125–130

11. Пшеничный Г.Н. Природа «пилообразного» твердения цемента // Технологии бетонов. 2019. №5-6. С. 24–26. DOI: 2023/01/25/tb-5-6-2019_24-26/

12. Золотых С.В., Сумской Д.А., Загороднюк Л.Х., Канева Е.В. Микроструктура продуктов гидратации вяжущих композиций, полученных в вихревой струйной мельнице // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №. 3. С. 9–18. DOI: 10.12737/article_58e23e09e92025.32814168

13. Дерюгин Л.М. Влияние качества цемента на долговечность бетона. Еще раз об обязательной сертификации и нотификации // Технологии бетонов. 2019. №1-2. С. 49–51. DOI: 2023/01/16/tb-1-2-2019_49-51

14. Загороднюк Л.Х., Махортов Д.С., Рыжих В.Д., Сумской Д.А., Дайронас М.В. Роль гранулометрии смешанных вяжущих в формировании микроструктуры и прочности // Вестник БГТУ

им. В.Г. Шухова. 2021. №. 7. С. 33–43.
DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-33-43

15. Кондращенко В.И., Титов С.П. Активация цемента в мельнице вихревого типа. Ч. 1.

Свойства активированного в вихревой мельнице цемента // Техника и технология силикатов. 2019. № 4. С. 115–119.

Информация об авторах

Головизнина Татьяна Евгеньевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: t.goloviznina@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Ерыгина Алена Олеговна, ассистент кафедры технологии цемента и композиционных материалов. E-mail: erygalyona@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 26.11.2024 г.

© Головизнина Т.Е., Ерыгина А.О., 2025

***Goloviznina T.Y, Erygina A.O.**

Belgorod State Technological University named after V.G.Shukhov

**E-mail:t.goloviznina@mail.ru*

GRANULOMETRIC COMPOSITION OF CEMENT AS A METHOD OF CONTROLLING CEMENT STONE PROPERTIES

Abstract. The obtained data demonstrate the dependence of the frequency and amplitude of fluctuations in the compressive strength of cement stone on the granulometric composition of the cement. Using electron microscopy, it was found that the new formations in cement stone made from model coarse-grained cement have greater difficulty growing together into a monolithic conglomerate. Cement stone derived from predominantly coarsely ground cement, compared to stone from finely ground cement, gains strength more slowly. Strength fluctuations in the former occur with lower frequency and amplitude. At later stages of hardening, the strength values recover and increase after a temporary decline. Comparative X-ray phase analysis confirmed the accelerated hydration of fine cement fractions, leading to the formation of fine-crystalline structures prone to recrystallization. Due to recrystallization, cement stone made from finely ground cements is susceptible to cyclic decreases in compressive strength, without full recovery to its early maximum values. Based on the obtained data, to mitigate strength reductions and enhance the strength characteristics of cement stone at later hardening stages, it is necessary to ensure a balanced granulometric composition. This should include a complex mix of coarse (greater than 50 microns), medium (30–50 microns), and fine fractions in the cement.

Keywords: portland cement, cement stone, granulometric composition, hydration products, structure formation, fluctuations in strength characteristics.

REFERENCES

1. Mishin D.A., Erygina A.O. Individual influence of Na₂O and K₂O on the properties of Portland cement clinker. [Individual'noye vliyaniye Na₂O i K₂O na svoystva portlandtsementnogo klinkera]. Cement and its application. 2021. No. 4. Pp. 64–66. (rus)

2. Mishin D.A., Kovalev S.V., Chekulaev V.G. Influence of the method of introducing a mineralizer on the characteristics of portland cement clinker. [Vliyaniye sposoba vvoda mineralizatora na kharakteristiki portlandtsementnogo klinkera]. Cement and its application. 2016. No. 4. Pp. 112–117. (rus)

3. Konovalov V.M., Goncharov A.A., Fedorov A.S., Moshkov I.P., Gostev N.S. Combustion of RDF fuel using oxygen. [Szhiganiye RDF-topлива s ispol'zovaniyem kislorodnogo dut'ya]. Bulletin of

BSTU named after. V.G. Shukhov. 2022. No. 10. Pp. 79–86. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-10-79-86 (rus)

4. Mishin D.A., Erygina A.O., Tarallo Z.V. The Influence of Electric Current on the Water Separation of Cements. Innovations and Technologies in Construction. 2022. Vol. 307. Pp. 342–349. DOI: 10.1007/978-3-031-20459-3_43.

5. Erygina A.O., Mishin D.A. Effect of Cubic and Orthorhombic Crystal Systems of Tricalcium Aluminate to Form Ettringite in the Presence of Dihydrate Calcium Sulfate. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 316–321. DOI 10.1007/978-3-030-68984-1_46.

6. Samchenko S.V., Abramov M.A., Osmanov A.B. Analysis of changes in the characteristics of activated cement using disintegrator technology. [Ana-

liz izmeneniya kharakteristik aktivirovannogo tsementa s ispol'zovaniyem dezintegratornoy tekhnologii]. Construction Materials. 2022. No. 11. Pp. 32–36. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-808-11-32-36 (rus)

7. Novosyolov A.G., Dreer Y.I., Novoselova I.N., Levina Y.A. Investigation of fluorine sublimation in the clinker burning process [Issledovaniye vozgonki ftora v protsesse obzhiga klinkera] Technique and technology of silicates. 2024. No. 1. Pp. 4–13. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-4-13(rus)

8. Borisov I.N., Novosyolov A.G., Nikitina M.A., Manuilov V.E. Synthesis and properties of calcium-aluminoferrite cement using man-made materials. [Sintez i svoystva kal'tsiyevo-alyumoferritovogo tsementa s ispol'zovaniyem tekhnogen-nykh materialov]. Technique and technology of silicates. 2024. No. 2. Pp. 108–117. DOI: 10.62980/2076-0655-2024-108-117 (rus)

9. Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Dergunov S.A., Serikov S.V., Khamidulina D.D., Nekrasova S.A. Features of hardening of mechanically activated composite cements. [Osobennosti tverdeniya mekhanoaktivirovannykh kompozitsionnykh tsementov]. Construction Materials. 2024. No. 12, Pp. 21–27. (rus). DOI: 10.31659/0585-430X-2024-831-12-21-27

10. Goloviznina T.Y., Konovalov V.M., Morozova I.A. Sulfoaluminate Cement and Low-Temperature Roasting Additive from Low Aluminate Raw Materials with a High Content of Silicon Oxide. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 147. Pp. 125–130.

11. Pshenichny G.N. The nature of "sawtooth" cement hardening. [Priroda «piloobraznogo»

tverdeniya tsementa]. Concrete technologies. 2019. No. 5-6. Pp. 24–26. DOI: 2023/01/25/tb-5-6-2019_24-26 (rus)

12. Zolotykh S., Sumskey D.A., Zagorodnyuk L.H., Kaneva E.V. Microstructure hydration products binding composition obtained in the vortex jet mill. [Mikrostruktura produktov gidratatsii vyazhushchikh kompozitsiy, poluchennykh v vikhrevoy struynoy mel'nitse]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2017. No. 3. Pp. 9–18. DOI: 0.12737/article_58e23e09e92025.32814168 (rus)

13. Deryugin L.M. The influence of cement quality on the durability of concrete. once again about mandatory certification and notification. [Vliyaniye kachestva tsementa na dolgovechnost' betona. Yeshche raz ob obyazatel'noy sertifikatsii i notifikatsii]. Technology of concrete. 2019. No.1-2. Pp. 49–51. DOI: 2023/01/16/tb-1-2-2019_49-51 (rus)

14. Zagorodnyuk L.H., Mahortov D.S., Ryzhikh V.D., Sumskey D.A., Dayronas M.V. Role of granulometry of mixed binders in formation of their microstructure and strength. [Rol' granulometrii smeshannykh vyazhushchikh v formirovanii mikrostruktury i prochnosti]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 7. Pp. 33–43. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-33-43(rus)

15. Kondrashchenko V.I., Titov S.P. Activation of cement in a vortex-type mill. Part 1. Properties of cement activated in a vortex mill. [Aktivatsiya tsementa v mel'nitse vikhrevogo tipa. CH. 1. Svoystva aktivirovannogo v vikhrevoy mel'nitse tsementa]. Technique and technology of silicates. 2019. No. 4. Pp. 115–119. (rus)

Information about the author

Goloviznina, Tatyana Y. PhD, Assistant professor. E-mail: t.goloviznina@mail.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Erygina, Alena O. Assistant. E-mail: erygalyona@yandex.ru Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 26.11.2024

Для цитирования:

Головизнина Т.Е., Ерыгина А.О. Способ управления свойствами цементного камня // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 5. С. 83–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-83-91

For citation:

Goloviznina T.Y., Erygina A.O. Granulometric composition of cement as a method of controlling cement stone properties. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 5. Pp. 83–91. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-83-91