

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-297-305>

УДК 666.972; 693.54

Эффективность в цементе и цементном бетоне диспергированной гранитной породы

А. В. Смоляков¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018
Belarusian National Technical University, 2018

Реферат. Изложены результаты исследований процесса диспергации (помола) в шаровой мельнице и влияния диспергированной гранитной горной породы (гранитных отсевов РУПП «Гранит», Брестская область), применяемой в качестве минеральной добавки, на свойства цемента, кинетику твердения и прочность цементного камня, морфологию продуктов гидратации цемента в ее присутствии. Результатами комплексных исследований, включая данные рентгенофазового и дериватографического анализов, показано, что вещество гранитной породы не изменяет морфологию новообразований – продуктов реакции клинкерной части вяжущего с водой. Они идентичны тем, которые образуются в результате реакций с ней бездобавочного (чистоклинкерного) вяжущего. Одновременно установлено, что при введении в цемент 10–20 % молотого до $S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ ($0,3 \text{ м}^2/\text{г}$) гранитного отсева до 20–25 % возрастает прочность цементного камня и увеличивается на 10–15 % количество химически связываемой воды клинкерной составляющей вяжущего. Обосновывается гипотеза эффекта «центров кристаллизации», который проявляют фракции молотого отсева $\leq 0,3 \text{ мкм}$ ($\leq 3000 \text{ \AA}$), содержащиеся в количестве $\sim 15 \%$ его массы. Эту гипотезу подтверждают приведенные выше данные о росте прочности цементного камня и количества химически связываемой воды в их присутствии при твердении образцов в нормально-влажностных условиях, в воде и после пропаривания, а также очевидный рост прочности цементного камня на вяжущем с этой добавкой (в 2–2,5 раза в 1–3 сут. твердения) в условиях «торожения» реакций гидратации цемента за счет введения в цементное тесто химической добавки – лигносульфоната технического – в повышенной (0,3 % от массы цемента) дозировке.

Ключевые слова: диспергация, диспергированная гранитная порода, цемент, кинетика твердения, прочность цементного камня, морфология новообразований

Для цитирования: Смоляков, А. В. Эффективность в цементе и цементном бетоне диспергированной гранитной породы / А. В. Смоляков // *Наука и техника*. 2018. Т. 17, № 4. С. 297–305. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-297-305>

Efficiency in Cement and Cement Concrete of Dispersed Granitic Rock

A. V. Smolyakov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper presents results of investigations on the dispersion (grinding) process in a ball mill and it also shows an effect of dispersed granitic rock (granite screenings of RUPP “Granit”, Brest region) used as a mineral additive on cement properties, hardening kinetics and cement stone strength, morphology of cement hydration products in the presence of the granitic rock. Complex studies including data of X-ray phase and derivatographic analyses have revealed that granitic rock material does not change morphology of new formations these are reaction products obtained due to reaction of binder clinker portion with water. They are identical to those that are formed due to reactions of a no-dosage (clean-bite) binder with it. At the same time it has been established that when 10–20 % of granite screening grinded up to $S_{ud} \sim 3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ($0.3 \text{ m}^2/\text{g}$) have been added to cement strength of cement stone is increased by 20–25 %, and the amount of chemically bound water in clinker component of the binder is increased by 10–15 %. The paper has substantiated a hypothesis of the “crystallization

Адрес для переписки

Смоляков Алексей Владимирович
Белорусский национальный технический университет
ул. Ф. Скорины, 25,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 369-75-84
niilbism@bntu.by

Address for correspondence

Smolyakov Aleksey V.
Belarusian National Technical University
25 F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 369-75-84
niilbism@bntu.by

centers" effect which is revealed by fractions of grinded screening $\leq 0.3 \mu\text{m}$ ($\leq 3000 \text{ \AA}$). The fractions constitute an amount of $\sim 15\%$ of the screening mass. This hypothesis has been proved by the above-mentioned data on the increase in cement stone strength and amount of chemically bound water in their presence when samples are hardened in normal-humid conditions, in water and after steaming. There is also an obvious increase in strength of cement stone on a binder with this additive (in 2–2.5 times in 1–3 days of hardening) under conditions of "inhibition" in cement hydration reactions due to introduction of a chemical additive that is ligno-sulphonate technical additive in the cement paste with enhanced dosage (0.3 % of the cement mass).

Keywords: dispersion, dispersed granitic rock, cement, hardening kinetics, cement stone strength, morphology of new formations

For citation: Smolyakov A. V. (2018). Efficiency in Cement and Cement Concrete of Dispersed Granitic Rock. *Science and Technique*. 17 (4), 297–305. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-297-305> (in Russian)

Введение

Анализ литературных источников по проблематике применения разнообразных минеральных добавок в цементных бетонах показывает, что в современных условиях этот технологический прием по-прежнему актуален и постоянно совершенствуется. При этом согласно данным современных исследований ряд минеральных веществ (горных пород), которые десятилетиями относили к инертным добавкам, способны влиять на процессы взаимодействия клинкерного цемента с водой. Так, исследованиями В. С. Демьяновой, В. И. Калашникова, Ю. С. Кузнецова и других ученых [1–6] выявлена активная роль предварительно диспергированных отходов дробления ($S_{уд} \sim 3200\text{--}3900 \text{ см}^2/\text{г}$ ($0,32\text{--}0,39 \text{ м}^2/\text{г}$)) горных пород различного происхождения: осадочных (известняк, доломит, песчаник), излившихся (диабаз, порфирит, перлит), глубинных (перидотит, габбро, гранит, базальт). С учетом их целевого назначения – для получения «порошковых» бетонов (высокопрочных (ВПБ) и высококачественных (ВКБ)). Основное внимание указанных и других исследователей сосредоточилось на использовании высокопрочных и твердых горных пород: диабаз, габбро, порфирита, кварцевого песка, обеспечивающих по данным анализировавшихся источников наибольшие результаты в природе прочности цементного камня и порошкового бетона.

Результаты исследований, относящиеся к использованию гранитной породы в качестве минеральной добавки в традиционный цементный бетон, единичны. Эта проблематика системно не рассматривалась и соответствующие данные в технической литературе практически отсутствуют. Вместе с тем для Республики Бе-

ларусь, которая не располагает традиционными материалами – минеральными добавками в цемент и цементный бетон (доменные шлаки, золы уноса, микрокремнезем и др.), но имеет производство гранитного щебня и массовые отходы от него в виде гранитного отсева (до 30–35 % перерабатываемой горной породы) на РУПП «Гранит», успешное решение такой задачи чрезвычайно актуально и своевременно. Тем более что результаты исследований, приведенные в настоящей статье, подтверждают эффективность использования гранитного отсева при производстве портландцемента с минеральной добавкой на его основе.

Помол и свойства продуктов помола

При помоле в шаровой мельнице гранитного отсева, характеризующегося насыпной плотностью $\rho^0 \sim 1550 \text{ кг}/\text{м}^3$, размером зерен фракций от 0 до 5–10 мм (последней содержится $\sim(6\text{--}7)\%$ массы), удельная поверхность продукта помола (определяли по прибору типа «ПСХ») через 30 мин достигла $S_{уд} \sim 3040 \text{ см}^2/\text{г}$ и к 5 ч работы мельницы $S_{уд} \sim 11000 \text{ см}^2/\text{г}$.

Наиболее интенсивно удельная поверхность продукта помола нарастает в первые 0,5 ч работы шаровой мельницы. После разрушения (измельчения) части исходного материала по имевшимся в структуре зерен дефектам он становится более однородным и его «сопротивление» действию мелющих тел возрастает, что и отражается в снижении темпа роста $S_{уд}$ продукта помола. При этом через ~ 30 мин помола сухого отсева достигается $S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/\text{г}$, что соответствует ее значениям для современных цементов общестроительного назначения. Свойства молотого отсева в зависимости от тонкости помола приведены в табл. 1.

Физические характеристики молотого отсева
Physical characteristics of grinded screening

Тонкость помола $S_{уд}$, $см^2/г$	Средняя плотность в насыпном состоянии ρ^0 , $кг/м^3$	Коэффициент нормальной густоты теста $K_{нг}^{МГ}$, доли ед.	Плотность ρ , $кг/м^3$	Содержание* фракций, %			
				$\leq 0,3$ мкм	$\leq 0,5$ мкм	$\leq 1,0$ мкм	$\leq 5,0$ мкм
~3000	0,95	0,250	2,72	15	42	48	57
~6000	0,93	0,270	2,74	15	50	65	78
~9000	0,92	0,290	2,75	15	55	68	86
~11000	0,91	0,305	2,77	–	–	–	–

* Оценивали с помощью лазерного анализатора твердофазных частиц Analysette 22 NanoTec фирмы Fritch.

Данные оценки гранулометрического состава проб молотого отсева до $S_{уд} \sim 3000\text{--}9000$ $см^2/г$, полученные с помощью лазерного анализатора, свидетельствуют, что с ростом (в 2 и 3 раза от $S_{уд} \sim 3000$ $см^2/г$) тонкости помола увеличивается общее количество мелких фракций и уменьшаются количество и размер более крупных фракций (рис. 1). Однако при этом практически неизменно и составляет ~15 % от массы проб содержание ультрадисперсных фракций $\leq 0,3$ мкм (≤ 3000 Å).

Производственный процесс получения вяжущего предполагает совместный помол портландцементного клинкера, природного гипса (~3,0 % по массе) и гранитного отсева, который вводили в количестве 0; 10; 20 и 30 % от массы получаемого вяжущего; изменение

удельной поверхности во времени отражено данными табл. 2, а свойства полученного вяжущего – табл. 3. Очевидно, что $S_{уд} \sim 3000\text{--}3100$ $см^2/г$, характерная для вяжущего общестроительного назначения, обеспечивается за ~30 мин помола, и введение добавки в виде гранитного отсева не вызовет увеличения энергетических и временных затрат при его помолу в производственных условиях.

Из данных табл. 3 о прочностных характеристиках цемента (установлены по ГОСТ 310.4) следует, что рациональная тонкость помола отсева, вводимого в цемент в качестве минеральной добавки, соответствует $S_{уд} = 3000$ $см^2/г$, а ее дозировка не должна превышать 20 % от массы вяжущего.

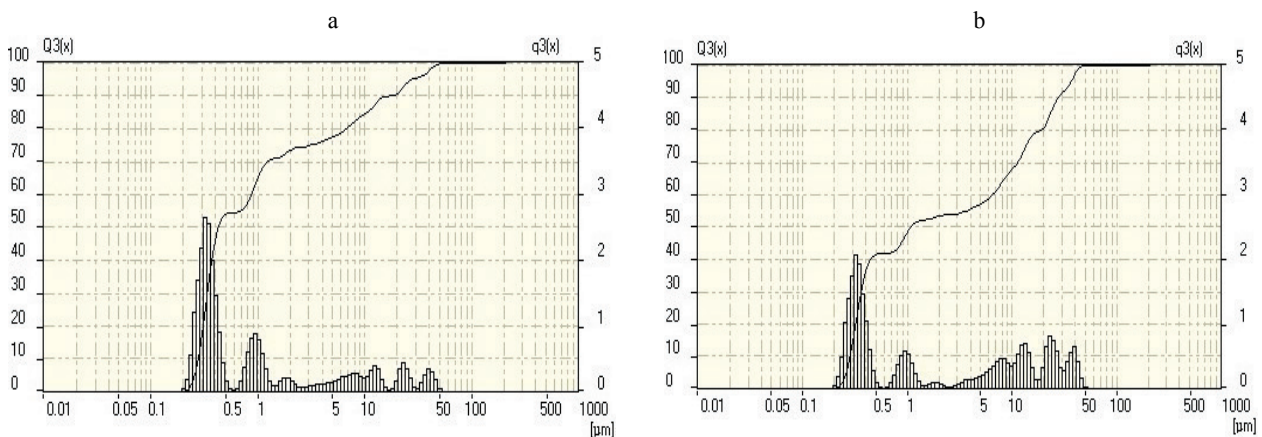


Рис. 1. Гранулометрия твердой фазы молотого гранитного отсева, % с удельной поверхностью $S_{уд}$, $см^2/г$: а – (~3000); б – (~9000)

Fig. 1. Granulometry of solid phase for grinded granite screening, % with specific surface of $S_{уд}$, $см^2/г$: а – (~3000); б – (~9000)

Таблица 2

Кинетика роста удельной поверхности при совместном помоле клинкера, природного гипса и гранитного отсева
Kinetics of specific surface growth in joint grinding of clinker, natural gypsum and granite screening

Измельчаемый материал	Удельная поверхность $S_{уд}$, $см^2/г$, через время помола, мин					
	5	10	15	20	30	40
Гранитный отсев	1630	–	2600	–	3040	3350
Клинкер и природный гипс	1670	2100	2550	2890	3100	3320
То же с 10 % гранитного отсева	1590	2160	2500	2900	3110	3290
То же с 20 % гранитного отсева	1670	2070	2620	2910	3060	3330
То же с 30 % гранитного отсева	1650	2140	2570	2880	3080	3300

Таблица 3

Свойства цемента с минеральной добавкой в зависимости от тонкости ее помола и дозировки
Properties of cement with mineral additive according to fineness of its grinding and dosage

Содержание в вяжущем добавки, %	$S_{уд}$ добавки, $см^2/г$	Коэффициент нормальной густоты $K_{нг}$, доли ед.	Срок схватывания, ч:мин		Прочность (активность) цемента, МПа	
			Начало	Конец	при изгибе	на сжатие
0*	–	0,280	2:40	3:55	6,7	49,5
10	3000	0,270	2:40	4:05	6,8	51,5
15	3000	0,255	2:45	4:15	6,8	52,5
20	3000	0,260	2:52	4:18	6,5	49,0
25	3000	0,260	3:02	4:26	6,1	47,9
30	3000	0,255	3:06	4:30	5,7	46,6
50	3000	0,250	3:19	4:39	–	–
20**	6000	0,275	2:56	4:45	5,8	45,5
20**	9000	0,285	3:05	4:58	5,5	43,7

* Марки М500-Д0, $S_{уд} = 3050 \text{ см}^2/г$.
** Данные приведены частично.

Прочность цементного камня

Результаты исследований кинетики твердения цементного камня (образцы $20 \times 20 \times 20$ мм, изготовленные из теста нормальной густоты; коэффициент вариации прочности не более 14 %), из которого после испытания на прочность отобрали пробы для оценки возможных структурно-морфологических изменений в продуктах гидратации цемента в присутствии молотого отсева и без него, приведены в табл. 4.

Из результатов испытаний следует, что введение добавки с $S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/г$ не только не снижает прочность пропаренного, твердевшего в нормально-влажностных условиях и в воде цементного камня, но в дозировке до 20–25 % от массы цемента способствует ее росту. При этом оптимум приходится примерно на (15–20) % дозировки добавки. Увеличение дозировки до 25 % снижает эффект, а до 30 %

и более – сопровождается снижением прочности цементного камня на вяжущем с добавкой, так же как и увеличение тонкости помола до $S_{уд} \sim 6000\text{--}9000 \text{ см}^2/г$.

Можно предположить, что наличие в добавке и влияние на процесс взаимодействия клинкерной части вяжущего с водой тонкодисперсных частиц твердой фазы, содержащей SiO_2 (в количестве до 65–75 % массы), которое проявляется при дозировке до 20–25 % от массы цемента (МЦ) в росте прочности цементного камня, при «передозировке» минеральной добавки не компенсирует отрицательный эффект от замещения клинкерной составляющей большим количеством химически инертного вещества, а с увеличением тонкости помола – и от роста водопотребности добавки.

Рост прочности цементного камня с добавкой молотого гранитного отсева при $S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/г$

в дозировке вплоть до 25 % от массы цемента может быть связан с активирующим действием тонкодисперсных частиц соединений, содержащих SiO_2 в гранитной породе, на процессы гидратации и твердения вяжущего. Для подтверждения или опровержения этой гипотезы были выполнены комплексные исследова-

ния проб цементного камня с помощью ДТА-анализа (рис. 2а, б), рентгенофазового анализа (рис. 3а, б), а также путем оценки количества химически связываемой цементом воды (табл. 5) и кинетики твердения в усложненных для протекания реакций цемента с водой условиях.

Таблица 4

Кинетика роста прочности на сжатие цементного камня
Kinetics of growth in compressive strength of cement stone

Содержание в вяжущем добавки, %	$S_{\text{уд}}$ добавки, $\text{см}^2/\text{Г}$	Изменение прочности образцов ($20 \times 20 \times 20$ мм) при твердении в нормально-влажностных ($t \sim (20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi \geq 90 \%$) условиях, МПа, в возрасте, сут.				Относительная прочность цементного камня, %	
		1	3	7	28	28 сут	Пропаривание**
0	–	29,2	38,8	50,5	66,5	100,0	100,0
10	3000	38,1/41,0*	43,3/45,1*	54,7/57,3*	70,1/75,0*	105,4	108,0
15	3000	44,1/45,8*	51,7/55,0*	63,4/66,0*	80,8/85,5*	121,5	–
20	3000	43,2/44,0*	49,8/52,2*	60,8/61,4*	79,8/81,3*	120,0	118,0
30	3000	35,0/37,5*	44,0/46,4*	52,8/55,6*	66,6/70,2*	100,2	102,0
50	3000	19,0/20,8*	32,5/35,0*	39,3/41,2*	42,7/46,6*	64,2	94,0
10	6000	34,4	40,1	49,9	66,0	99,2	–
15	6000	34,5	40,9	52,1	67,0	100,8	–
20	6000	30,0	42,5	44,0	67,4	101,3	–
30	6000	28,8	33,8	45,3	59,4	89,3	–
10	9000	33,1	38,0	49,1	65,3	98,2	–
15	9000	32,2	37,7	50,4	65,5	98,5	–
20	9000	32,1	36,5	49,0	65,5	98,5	–
30	9000	27,5	33,1	43,5	55,1	82,9	–

* При твердении образцов в воде.

** В возрасте 24 ч после пропаривания и остывания по режиму: 3 + 3 (до $t \sim (80-85) \text{ }^\circ\text{C}$) + 6 + 3 + 9 ч (остывание после распалубки и испытания).

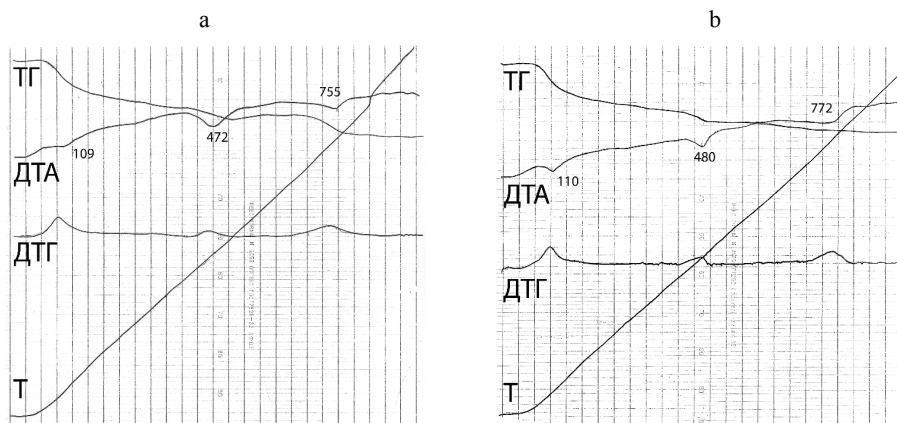


Рис. 2. Дериватограмма пробы цементного камня без добавки (а) и цементного камня с 20 % добавки гранитного отсева (б) (возраст 28 сут., нормально-влажностные условия твердения)

Fig. 2. Derivatogram of sample for cement stone without additive (a) and cement stone with 20 % of granite screening additive (b) (age 28 days, normal-humidity conditions of hardening)

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что дериватогаммы «чистого» цемента и проб с 5–25 % молотого отсева (во всех случаях $S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/\text{г}$) характеризуются наличием общих эндотермических «пииков» на графиках ДТА. Это свидетельствует об идентичности продуктов разложения (новообразований) цементного камня, т. е. об отсутствии дополнительных химических реакций между цементом, продуктами его гидролиза-гидратации и веществом гранитной породы. Можно предположить, что причины роста прочности цементного камня при дозировке добавки до 25 % (а цементно-песчаного раствора – до 15–20 %, табл. 3) связаны с физическо-химическими аспектами активизации процесса твердения вяжущего. Этот вывод подтверждает определение площади эндотермического эффекта при температуре $\geq 600^\circ\text{C}$ между графиками ДТА и касательной к нему, которая для проб с добавкой $\sim(10\text{--}15)\%$ превышает таковую для «чистого» цемента (рис. 2а, б), что связано с большим количеством разлагающихся под действием температуры новообразований в пробах с минеральной добавкой.

Отсутствие новых химических образований в пробах твердевшего в нормально-влажностных условиях и после пропаривания цементного камня (как в процессе его твердения, так и к 28 сут.) подтвердили результаты рентгенофазового анализа проб без и с (5–30) % добавки. Здесь частично представлены данные проб цементного камня в возрасте 28 сут. (нормально-влажностное твердение), приготовленных из теста нормальной густоты на «чистом» цементе (рис. 3а) и с 20 % молотого гранитного отсева (рис. 3б).

Несколько большая плотность рентгенограмм проб с добавкой связана с дополнительным «наложением» рентгенограммы собственно вещества гранитной породы (здесь не приведена). При этом интенсивность отражений клинкерных минералов цемента к 28-суточному возрасту в пробах с добавкой гранитного отсева существенно уменьшилась по сравнению с «чистым» цементом, что свидетельствует об углублении реакций гидратации вяжущего в присутствии добавки.

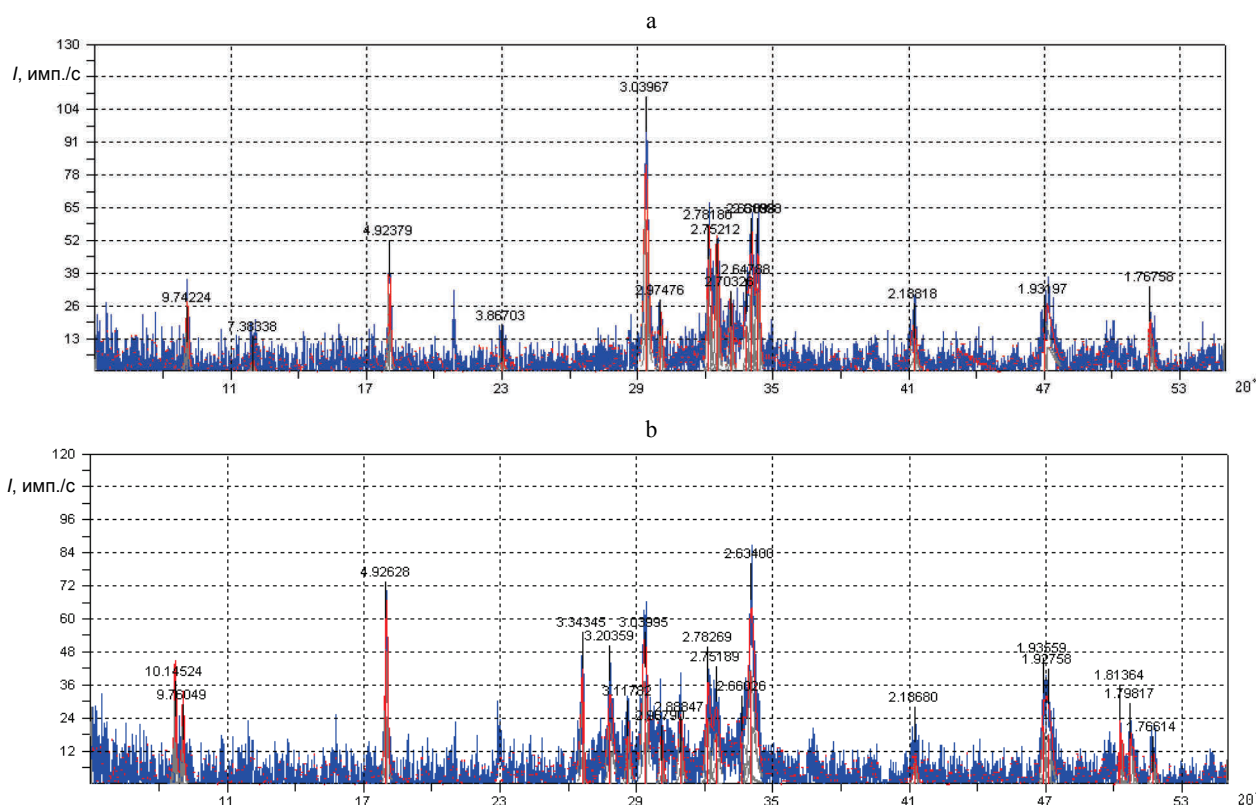


Рис. 3. Диффрактограмма пробы цементного камня без добавки (а) и с 20 % добавки гранитного отсева (б) (28 сут. нормально-влажностного твердения)

Fig. 3. Diffractogram for sample of cement stone without additive (a) and with 20 % of granite screening additive (b) (28 days, normal-humidity hardening)

В целом, по данным рентгенофазового анализа, в составах проб цементного камня на чистом портландцементе и проб с молотым гранитным отсевом в разные сроки твердения (в нормальных условиях и при пропаривании) выявлены только новообразования, характерные для твердения типичного портландцемента.

Факт углубления реакций гидратации клинкерной составляющей цемента и, следовательно, большего количества новообразований в цементном камне, как базы роста прочности, подтверждают данные о количестве химически связанной воды и степени гидратации цемента (табл. 5).

Очевидно, что в пределах 20%-й дозировки минеральная добавка в цемент ($S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/\text{г}$) не вызывает существенных изменений в степени гидратации, определенной для общей массы вяжущего, но при этом значительно возросла фактическая степень гидратации его клинкерной составляющей. Так, для цемента с 20 % добавки она возросла относительно «общей массы вяжущего» с 65,8 до 76,0 %, а по количеству химически связанной клинкерной частью цемента воды – на (17,2–15,1) : 15,1 ~ 0,1391, или на 14 %. По нашему мнению, причины этого явления кроются в углублении реакций гидратации клинкерной части вяжущего, выявленном дериватографическим и рентгенофазовым анализами аналогичных проб.

Обобщая полученные данные о росте прочности цементного камня, приготовленного на вяжущем с добавкой молотого гранитного отсева, а также результаты дериватографического и рентгенофазового анализов и оценки количества химически связанной воды в пробах цементного камня, отобранных из этих серий его образцов, приходим к следующему выводу. Очевидно, что дисперсные частицы гранитной породы размерами (как мы считаем на основе данных анализа гранулометрии (рис. 1а, б) про-

дукта помола) до 0,3 мкм ($\leq 3000 \text{ \AA}$), содержание которых в материале, измельченном до $S_{уд} \sim 3000\text{--}9000 \text{ см}^2/\text{г}$, практически одинаково и составляет до ~15 % по массе, выступают в качестве центров кристаллизации. То есть понижают энергетический порог начала образования кристаллогидратов в реагирующей системе «цемент – вода», чем способствуют ускорению процесса их образования, росту их количества и формированию более плотной и прочной структуры цементного камня с их участием [7–15]. Об этом свидетельствует рост прочности цементного камня с оптимальным количеством (~15–20 %) при рациональной тонкости помола ($S_{уд} \sim 3000 \text{ см}^2/\text{г}$) минеральной добавки, но при отсутствии признаков химического взаимодействия ее вещества с продуктами гидролиза-гидратации клинкерной части вяжущего.

С целью подтверждения гипотезы об «эффekte центров кристаллизации» в цементное тесто вводили добавку-пластификатор IV группы – лигносульфонат технический (ЛСТ), в количестве 0,3 % от массы цемента для замедления процессов его гидратации и твердения, так как молекулы этого вещества «жестко» (до хемосорбции) адсорбируются на зернах цемента. При этом исходили из предположения, что если имеет место эффект центров кристаллизации от тонкодисперсных фракций минеральной добавки, то он во всех случаях проявит себя в темпе роста прочности цементного камня на вяжущем с добавкой молотого гранитного отсева, что подтвердили результаты данного эксперимента (рис. 4).

Таким образом, по совокупности данных, включая результаты дериватографического и рентгенофазового анализов, оценку количества химически связанной воды, кинетику роста прочности цементного камня в нормально-влажностных и водных условиях.

Таблица 5

Данные о количестве химически связанной воды и степени гидратации цемента
Data on amount of chemically-bound water and degree of cement hydration

Вид вяжущего	Количество химически связанной воды, %, относительно		Степень гидратации, %, относительно	
	общей массы вяжущего	клинкерной части вяжущего	общей массы вяжущего	клинкерной части вяжущего
Без минеральной добавки	15,1	15,1	66,5	–
С 10 % минеральной добавки	15,0	16,7	67,0	73,5
С 20 % минеральной добавки	13,8	17,2	65,8	76,0
С 30 % минеральной добавки	12,5	17,9	55,1	78,6

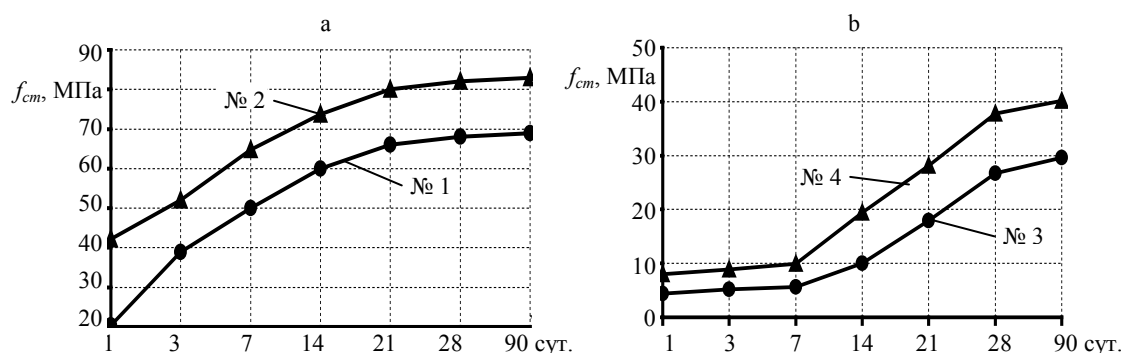


Рис. 4. Кинетика роста прочности цементного камня: а – для образцов без лигносульфоната технического (ЛСТ) (№ 1 – на вяжущем без минеральной добавки; № 2 – с 15 % молотого гранитного отсева); б – для образцов с 0,3 % ЛСТ от массы цемента (№ 3 – на вяжущем без минеральной добавки; № 4 – с 15 % молотого гранитного отсева)

Fig. 4. Kinetics of strength growth for cement stone: a – for samples without technical lignosulfonate (LST) (No 1 – on binder without mineral additive; No 2 – with 15 % of grinded granite screening); б – for samples with 0.3 % LST from cement mass (No 3 – on binder without additives; No 4 – with 15 % of grinded granite screening)

Также в варианте замедления реакций взаимодействия цемента с водой, за счет введения в повышенной дозировке лигносульфоната технического, можно считать обоснованным вывод о наличии и эффективности активных центров кристаллизации, которую проявляет тонкодисперсная составляющая ($\leq 0,3$ мкм (≤ 3000 Å) молотого гранитного отсева в его оптимальной (15–20)%-й дозировке при тонкости помола $S_{уд} \sim 3000$ см²/г.

Анализ приведенных в статье данных, а также материалов, относящихся к оценке физико-механических свойств конструкционного цементного бетона классов $C^{12}/_{15}-C^{32}/_{40}$, приготовленного на цементе с 20 % минеральной добавки молотого гранитного отсева [13–16], позволяет сделать следующие выводы.

ВЫВОДЫ

1. Эффективность добавки диспергированной гранитной породы (молотого совместно с клинкером и гипсом гранитного отсева) в цемент базируется на физико-химическом эффекте «центров кристаллизации», который проявляют ультрадисперсные фракции продукта помола отсева и взаимосвязан с рациональной тонкостью помола вяжущего ($S_{уд} \sim 3000-3100$ см²/г.) и дозировкой минеральной добавки (до 20 % массы цемента).

2. Экспериментальная оценка физико-механических характеристик тяжелого конструкционного бетона, определенных для наиболее широко используемых в строительстве классов $C^{12}/_{15}-C^{32}/_{40}$ (диапазон прочности на сжатие $\sim 20-52$ МПа), показала практическое соответствие прочности на сжатие (кубиковой, призмной), статического модуля упругости, деформативности при изгибе и усадке аналогичным показателям образцов бетона, приго-

товленного на бездобавочном цементе с соблюдением правила «прочих равных условий».

3. Экспериментально определенные эксплуатационные свойства бетона на разрабатываемом вяжущем – водопоглощение и водонепроницаемость, водостойкость (в условиях переменного увлажнения-высушивания), соле- и морозостойкость, защитная способность по отношению к стальной арматуре и другие – подтвердили возможность использования цемента с 20 % минеральной добавки молотой гранитной породы в бетоне и железобетоне общестроительного назначения без ограничений.

4. Согласно данным, представленным ОАО «Кричевцементношифер», которое выпустило 93,8 тыс. т вяжущего с минеральной добавкой молотого гранитного отсева, удельный экономический эффект оценивается примерно в 4,0 руб./т цемента, что подтверждает экономическую выгоду от использования разработки как в производстве вяжущего, так и при производстве изделий и конструкций для строительной отрасли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демьянова, В. С. Рациональное использование отходов камнедробильного производства в технологии смешанных вяжущих / В. С. Демьянова, Н. М. Дубошина, Г. Д. Фадеева // Промышленное и гражданское строительство. 1999. № 10. С. 33–35.
2. Реакционная активность измельченных горных пород в цементных композициях / В. И. Калашников [и др.] // Известия Тульского государственного университета. 2004. № 7. С. 26–33.
3. Демьянова, В. С. Дисперсно-наполненные клинкерные цементы на основе отходов камнедробления / В. С. Демьянова, В. И. Калашников, Г. Н. Казина // Известия вузов. Строительство. 2006. № 5. С. 30–36.
4. Демьянова, В. С. Об использовании дисперсных наполнителей в цементных системах / В. С. Демьянова, В. И. Калашников, А. А. Борисов // Жилищное строительство. 1999. № 1. С. 17–18.

5. Модифицирование высокопрочного бетона комплексными ультрадисперсными наполнителями / В. С. Демьянова [и др.] // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. Ростов на/Д.: Изд-во Рост. гос. строит. ун-та, 2004. Т. 1. С. 160–164.
6. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей / В. И. Калашников [и др.] // Инженерно-строительный журнал. 2012. Т. 34, № 8. С. 47–53.
7. Тейлор, Х. Химия цемента. Пер с англ. / Х. Тейлор М.: Мир, 1996. 560 с.
8. Ратинов, В. Б. Добавки в бетон. / В. Б. Ратинов, Т. И. Розенберг. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.
9. Соломатов, В. И. Пути активации наполнителей композиционных строительных материалов / В. И. Соломатов, Л. И. Дворкин, И. М. Чудновский // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1987. № 1. С. 61–63.
10. Красный, И. М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителя / И. М. Красный // Бетон и железобетон. 1987. № 5. С. 10–11.
11. Роль ультрадисперсных добавок в процессах гидратации / Г. И. Яковлев [и др.] // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI в. 2009. Т. 124, № 5. С. 18.
12. Ушеров-Маршак, А. В. Бетонведение: современные этюды / А. В. Ушеров-Маршак. Харьков: Раритеты Украины, 2016. 135 с.
13. Смоляков, А. В. Технологические свойства бетонных смесей и прочность бетона с добавкой в виде молотого гранитного отсева / А. В. Смоляков, Э. И. Батыновский, А. А. Дрозд // Строительная наука и техника. 2009. № 2. С. 49–57.
14. Смоляков, А. В. Использование гранитного отсева в цементе и конструкционном бетоне / А. В. Смоляков, П. Л. Федорович, Э. И. Батыновский // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III Междунар. симп., 9–11 нояб. 2011 г.: в 2 т. Минск: Минсктипроект, 2011. Т. 2: Технология бетона. С. 438–451.
15. Смоляков, А. В. Свойства бетона на поргланландцементе с гранитным отсевом (ПЦГ) / А. В. Смоляков, Э. И. Батыновский // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов европейского союза в области строительства: сб. науч.-техн. статей: в 2 т. Минск, 2013. Т. 2. С. 173–184.
16. Смоляков, А. В. Эффективная переработка гранитного отсева РУПП «Гранит» / А. В. Смоляков, А. А. Дрозд, Э. И. Батыновский // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства: сб. Междунар. науч.-техн. статей: в 2 т. Минск, 2015. Т. 2. С. 143–149.
17. Поступила 30.03.2018
Подписана в печать 04.06.2018
Опубликована онлайн 27.07.2018
1. Demyanova V. S., Duboshina N. M., Fadeeva G. D. (1999) Rational Usage of Wastes in Stone Breaking Production while Applying Technologies of Mixed Binding Materials. *Promyshlennoye i Grazhdanskoye Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*, (10), 33–35 (in Russian).
2. Kalashnikov V. I., Dem'yanova V. S., Kalashnikov S. V., Kuznetsov Yu. S. (2004) Reaction Activity of Broken Crushed Rock Materials in Cement Compositions. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta = Izvestiya Tula State University*, (7), 26–33 (in Russian).
3. Demyanova V. S., Kalashnikov V. I., Kazina G. N. (2006) Disperse-Filled Clinker Cement on the Basis of Stone Breaking Wastes. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Stroitel'stvo = News of Higher Educational Institutions. Construction*, (5), 30–36 (in Russian).
4. Demyanova V. S., Kalashnikov V. I., Borisov A. A. (1999) On Application of Disperse Fillers in Cement Systems. *Zhishchnoye Stroitel'stvo*, (1), 17–18 (in Russian).
5. Demyanova V. S., Kalashnikov V. I., Minenko E. Yu., Kazina G. N. (2004) Modification of High-Strength Concrete while Using Complex Ultra-Disperse Fillers. *Beton i Zhelezobeton v Tret'em Tysyacheletii: Materialy III Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. T. 2*. [Concrete and Reinforced-Concrete in the III Millennium: Proceedings of the III Scientific and Practical Conference. Vol. 1]. Rostov-on-Don, Publishing House of Rostov State University of Civil Engineering, 160–164 (in Russian).
6. Kalashnikov V. I., Tarakanov O. V., Kuznetsov Yu. S., Volodin V. M., Belyakova E. A. (2012) Next Generation Concrete on the Basis of Fine-Grained Dry Powder Mixes. *Magazine of Civil Engineering*, 34 (8), 47–53. <https://doi.org/10.5862/mce.34.7>.
7. Taylor H. F. W. (1997) *Cement Chemistry*. Thomas Telford. 459. <https://doi.org/10.1680/cc.25929>.
8. Ratinov V. B., Rozenberg T. I. (1989) *Additives for Concrete*. 2nd ed. Moscow, Stroyizdat Publ. 188 (in Russian).
9. Solomатов V. I., Dvorkin L. I., Tchudnovsky I. M. (1987) Recommendations for Activation of Fillers in Composite Construction Materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Stroitel'stvo i Arkhitektura* [News of Higher Education Institutions. Construction and Architecture], (1), 61–63 (in Russian).
10. Krasny I. M. (1987) On Mechanism for Improvement of Concrete Strength while Adding Micro-Filler. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced-Concrete], (5) 10–11 (in Russian).
11. Yakovlev G. I., Pervushin G. N., Tokarev Yu. V., Bur'yakov A. F., Kerene Ya. (2009) Role of Ultra-Disperse Additives in Hydration Processes. *Stroitelnye Materialy, Oborudovanie, Tekhnologii XXI Veka = Construction Materials, the Equipment, Technologies of XXI Century*, 124 (5), 18 (in Russian).
12. Usherov-Marshak A. V. (2016) *Concrete science: Modern Essays*. Kharkov: Publishing House "Rarity Ukraine". 135 (in Russian).
13. Smolyakov A. V., Batorynovsky E. I., Drozd A. A. (2009) Technological Properties of Concrete Mixes and Strength of Concrete with Additive in the Form of Crushed Stone Screening Dust. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], (2), 49–57 (in Russian).
14. Smolyakov A. V., Fedorovich P. L., Batorynovsky E. I. (2011) Usage of Stone Screening Dust in Cement and Constructional Concrete. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: Materialy III Mezhdunar. Simp., 9–11 Noyab. 2011 g. T. 2: Tekhnologiya Betona* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete: Proceedings of the III International Symposium, November 9–11, 2011. Vol. 2: Technology of Concrete]. Minsk, Minsktiproekt Publ., 438–451 (in Russian).
15. Smolyakov A. V., Batorynovsky E. I. Properties of Concrete Based on Portland Cement with Stone Screening Dust / Questions of Introduction for Design Specifications and Standards of European Union in the Field of Construction: Collection of Scientific and Technical Papers. In 2 Volumes. Minsk, 2013. Vol. 2. 173–184.
16. Smolyakov A. V., Drozd A. A., Batorynovsky E. I. (2015) Efficient Processing of Stone Screening Dust by RUME [Republican Unitary Manufacturing Enterprise] "Granit". *Sovremennye Problemy Vnedreniya Evropeiskikh Standartov v Oblasti Stroitel'stva: Sb. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Statei. T. 2* [Modern Problems in Introduction of European Standards in the Field of Construction: Collection of Scientific and Technical Papers. Vol. 2]. Minsk, 143–149 (in Russian).

Received: 30.03.2018

Accepted: 04.06.2018

Published online: 27.07.2018