

ЭФФЕКТИВНОСТЬ НОРМАЛИЗАЦИИ ГРАНУЛОМЕТРИИ МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ БЕТОНА

ФЕДОРОВИЧ П. Л., БАТЯНОВСКИЙ Э. И.

Белорусский национальный технический университет

Введение.

Бетон – конгломератный материал, в котором заполнители занимают до 80 % объема и оказывают существенное влияние на его свойства, эксплуатационную надежность и долговечность, а также стоимость. Жесткий «каркас» из высокопрочного заполнителя способствует росту прочности, уменьшению деформативности и ползучести бетона при «работе» конструкций под нагрузкой. Рационально подобранные заполнители уменьшают деформации усадки бетона, снижая «усадочное» трещинообразование и способствуя получению более долговечного материала.

Существует много предложений по назначению оптимального состава заполнителя. Большинство исследователей [1–5 и др.] считают более эффективным непрерывный зерновой состав заполнителя. В результате уменьшается необходимый на заполнение пустотности и образование «оболочки» на поверхности их зерен объем цементного теста и снижается расход цемента, появляется возможность его экономии. Кроме того, смеси с непрерывным зерновым составом менее склонны к расслоению, что способствует повышению физико-механических характеристик за счет однородности структуры бетона.

Важной характеристикой заполнителя, связанной с его зерновым составом и оказывающей существенное влияние на свойства бетонной смеси и бетона, является площадь и качество (шероховатость) поверхности зерен заполнителя. Площадь поверхности зерен обратно пропорциональна их диаметру и с уменьшением размеров зерен их поверхность возрастает. Как уже отмечалось для получения слитной структуры бетона необходимо, чтобы цементное тесто заполнило пустоты между зёрнами заполнителя с некоторой раздвижкой их прослойкой цементного теста. Соответственно расход це-

мента в бетоне зависит от пустотности смеси заполнителей и удельной поверхности и возрастает с уменьшением размера зерен.

Необходимо констатировать, что эти известные факторы обеспечения высоких качественных характеристик тяжелого конструкционного бетона за счет использования рационального подбора мелкого и крупного заполнителей зачастую не соблюдаются в современных условиях функционирования строительной отрасли Республики Беларусь. Причиной является отсутствие во многих регионах страны качественных природных песков и предприятия вынуждены использовать некачественный материал.

Как следствие, при производстве бетонных и железобетонных изделий и конструкций многие предприятия вынужденно осуществляют доставку более качественного мелкого заполнителя (песка) из других районов и даже областей Беларуси, что удорожает их продукцию. Отсутствие качественного материала вынуждает использовать мелко- и тонкодисперсные речные пески (модуль крупности $M_k < 1,5$ ед., а зачастую $M_k < 1,0$ ед.) или материал местных карьеров с повышенным содержанием загрязняющих примесей (преимущественно – глин), что сопровождается ухудшением качества бетона, несмотря на существенный (10...20 %) перерасход вяжущего. Использование в строительстве такого мелкозернистого заполнителя вынужденная мера, которая сопровождается повышенным расходом цемента (из-за повышенной удельной поверхности и пустотности, а также низкого качества сцепления с цементным камнем) для обеспечения качественных характеристик бетона (раствора).

В этой связи очевидна необходимость корректировки, нормализации гранулометрического состава мелкозернистых природных песков путем введения в них недостающих крупных фракций. С этой целью возможно использование гранитного отсева, массово образующегося на РУПП «Гранит» при производстве щебня. Однако его применение в исходном виде, т. е. в совокупности всех образующихся при дроблении горной породы фракций, оказалось нерациональным. Вместе с тем, если вывести из гранитного отсева фракции менее 0,5 мм, то оставшийся материал (а это 65...75 % от его общей массы) может составить базу для разработки технологии обогащения используемых в строительстве местных мелкозернистых песков и существенного повышения качества бетона (раствора).

ра) при одновременной значительной экономии (как будет показано экспериментально – до 15...20 %) цемента. Этот эффект обеспечивается за счет нормализации гранулометрического состава как мелкого заполнителя, так и его смеси с крупным заполнителем в бетоне.

В результате выполненных в НИИЛ бетонов и строительных материалов БНТУ исследований был разработан вариант обогащения природных мелких песков крупными фракциями гранитного отсева ($\geq 0,5$ мм) для повышения его качества как мелкого заполнителя для бетона.

Методика расчета требуемой (заданной) гранулометрии обогащенного песка.

Методологический подход к расчету и подбору требуемого (заданного) зернового состава песка заключался в определении необходимого содержания недостающих в зерновом составе исходного природного песка крупных фракций, обеспечивающего расчетный модуль крупности, введение их в состав обогащаемого мелкого заполнителя с последующей оценкой его гранулометрии повторным (контрольным) рассевом на стандартном наборе сит и испытаниями в бетонных смесях и бетоне.

Расчетное количество недостающих в природном песке фракций определяется из общей зависимости по ГОСТ 8735-88 [6] и ГОСТ 8736-2014 [7], отражающей взаимосвязь их количественного содержания и расчетного значения модуля крупности песка:

$$M_k = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_i + A_n}{100}, \text{ доли ед.}, \quad (1)$$

и решенной, относительно любой из учитываемых в формуле (1) фракций, т. е. – A_i :

$$A_i = 100M_k - [(A_1 + A_2 + \dots + A_i + A_n) - A_i]. \quad (2)$$

В обеих формулах значения $A_1 \dots A_n$ соответствуют полным остаткам на ситах стандартного набора, выраженным в процентах, за исключением фракций, прошедших через сито № 0,14 (пылевидных фракций). В соответствии с ГОСТ 8735-88 (п. 3.5) [6] при обработке результатов эти формулы конкретизируются (для стандартного набора сит) следующим образом.

По результатам просеивания вычисляют:
– частный остаток на каждом сите (a_i) в процентах по формуле

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100, \quad (3)$$

где m_i – масса остатка на данном сите, г;
 m – масса просеиваемой навески, г;
полный остаток на каждом сите (A_i) в процентах по формуле

$$A_i = a_{2,5} + a_{1,25} + \dots + a_i, \quad (4)$$

где $a_{2,5}$, $a_{1,25}$, a_i – частные остатки на соответствующих ситах.

Технология обогащения мелкозернистых песков переработанным гранитным отсевом практически отработана и ее эффективность подтверждена данными настоящей статьи и ранее опубликованными результатами исследований [8, 9, 10].

Материалы для исследований.

В исследованиях использовали материалы для бетона, характеризующиеся следующими исходными данными.

Вязущее – портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н ОАО «Белорусский цементный завод» с характеристиками, удовлетворяющими ГОСТ 31108-2020 [11].

Крупный заполнитель – щебень гранитный (Микашевичский) с характеристиками, удовлетворяющими ГОСТ 8267-93 [12].

Песок природный и гранитный отсев. В исследованиях использовали природные (речные и карьерные) пески различной крупности, характеризующиеся данными, приведенными в таблице 1, и отобранный в разные периоды времени (пробы №1...№4) гранитный отсев РУПП «Гранит» – таблица 2.

Таблица 1

Гранулометрический (зерновой) состав исходных природных песков

Группа песка	Содержание зерен (г и %) крупностью (фракции):						M _к , доли ед.
	<0,14	0,14 ...0,315	0,315 ...0,63	0,63 ...1,25	1,25 ...2,5	2,5...5	
Тонкий	9,0	90,0	1,0	0	0	0	0,9
Очень мелкий	20,4	63,1	15,0	1,1	0,4	–	1,0
Мелкий	15,9	49,5	18,5	3,8	8,2	4,1	1,5
Средней крупности	11,5	36,6	21,4	7,3	15,5	7,7	2,0

Таблица 2

Гранулометрический (зерновой) состав отсева

№ пробы	Содержание зерен (г и %) крупностью (фракции):							M _к отсева
	<0,14	0,14– 0,315	0,315– 0,63	0,63– 1,25	1,25– 2,5	2,5–5	>5	
1	254 (12,7)	289 (14,5)	202 (10,1)	110 (5,5)	396 (19,8)	657 (32,9)	92 (4,6)	2,95
2	254 (12,7)	259 (13,0)	197 (9,9)	132 (6,6)	431 (21,6)	628 (31,4)	99 (5,0)	2,96
3	228 (11,4)	272 (13,6)	207 (10,4)	128 (6,4)	427 (21,4)	633 (31,7)	105 (5,3)	2,97
4	242 (12,1)	258 (12,9)	200 (10,0)	149 (7,5)	413 (20,7)	623 (31,2)	115 (5,8)	2,94
Среднее	245 (11,9)	269 (17,6)	201 (15,1)	130 (6,5)	417 (15,4)	635 (28,0)	103 (5,5)	2,95

Вода затворения – водопроводная, удовлетворяющая требованиям СТБ 1114-98 [13].

Химическая добавка – пластифицирующая добавка I группы по СТБ 1112-98 [14].

Влияние качества мелкого заполнителя на прочность бетона.

Из результатов исследований, ранее приведенных в публикациях авторов [8, 9, 10], очевидна взаимосвязь прочности бетона с гранулометрическим составом многофракционного песка: чем рациональнее зерновой состав с позиций обеспечения минимальной пустотности и удельной поверхности заполнителя, тем выше количественная характеристика бетона (в данном конкретном случае – прочность на сжатие).

В приросте прочности бетона играет существенную роль также качество поверхности (шероховатости) крупных фракций отсева, способствующее росту сил сцепления цементного камня в бетоне с зёрнами песка. Так, прочность бетона на заполнителе, обогащенном крупными фракциями отсева уже при модуле крупности $M_k \geq 2,0$ практически сравнялась с прочностью образцов на высококачественном (мытом) природном песке с $M_k = 3,2$ и оказалась сопоставимой с ней к проектному возрасту при нормально-влажностных условиях твердения. Сравнение прочности образцов бетона на обогащенном песке и исходном (тонком, очень мелком, среднем) подтверждает устойчивость эффекта ее роста за счет повышения качества обогащенного заполнителя.

Обобщение накопленных результатов исследований, приведенных в публикациях авторов [8, 9, 10], как в части роста прочности бетона при обогащении крупными фракциями гранитного отсева как природных песков с исходным модулем крупности $M_k \leq 1,0 \dots 2,0$ (до $M_k \geq 2,5 \dots 3,5$), так и по изменению эксплуатационных характеристик бетона на обогащенном песке: снижению водопоглощения, росту морозо- и коррозионной (в среде солей хлора) и др., показывает, что данный технологический прием не имеет противопоказаний и может быть применен во всех видах бетона для строительных изделий и конструкций без ограничений.

При этом предложенный вариант технологии нормализации гранулометрии мелкого заполнителя крупными фракциями отсева, предварительно выделенными (сегрегацией в воздушном потоке установки НПО «Центр», г. Минск), весьма прост. Он предполагает раздельное дозирование этих фракций в нужном (расчетном) количестве при приготовлении бетона непосредственно в смеситель. При перемешивании бетонной смеси, оба компонента нормализованного мелкого заполнителя равномерно распределяются в ее

объеме, и, в сочетании с крупным заполнителем, формируют будущий многофракционный «скелет» смеси заполнителей в бетоне. Обеспечение качества бетона, приготовленного по изложенной методике, подтверждено как многолетними лабораторными экспериментами, так и в производственных условиях изготовления бетонных и железобетонных изделий (безнапорных и напорных труб, железобетонных шпал, плит пустотного настила, элементов фундаментов и др.) на ряде заводов сборного железобетона Беларуси. Имеются соответствующие акты внедрения разработки в производства (в статье не приводятся).

Существенным эффектом от нормализации гранулометрии мелкого заполнителя является возможность снижения содержания в бетоне цемента без ущерба для его прочности и других физико-технических свойств.

Оценка возможности экономии цемента.

Возможность экономии цемента следует определять для конкретных пользователей разработки применительно к конкретным условиям изготовления сборных изделий либо производства бетонных работ при устройстве (возведении) монолитных конструкций. В частности, как с учетом качества исходного мелкого заполнителя для бетона, так и режимов приготовления, транспортирования, укладки-уплотнения и твердения бетона, а также предъявляемых к нему требований (механических и эксплуатационных).

В настоящей статье оценка возможной экономии цемента дана в форме сравнения прочности образцов бетона «стандартизированного» состава, применяющегося по ГОСТ 30459-96 [15] при оценке эффективности добавок в бетоне (при Ц = 350 кг; Ш₅₋₂₀ = 1150 кг; мелкого заполнителя = 700 кг; В/Ц₆ ~ 0,5 дол. ед. на 1 м³ бетона) и приготовленного с уменьшением расхода цемента (при соблюдении прочих равных условий) при использовании нормализованного крупными фракциями отсева (обогащенного) песка. Результаты исследований для равноподвижных смесей (марка П1) представлены в таблице 3, в которой изменения гранулометрии обогащаемого песка отражены увеличением его модуля крупности (Мк, доли ед.). Испытания выполнены по ГОСТ 10180-2012 [16] на сериях из 4-х образцов в проектном 28 суточном возрасте нормально-влажностного твердения; масштабный коэффициент α=0,95 учтен, коэффициент вариации составил: V_m ≤ 7 %.

Таблица 3

Изменение прочности бетона

Расход цемента на 1 м ³ бетона, кг	Снижение расхода цемента:		Прочность бетона в проектном возрасте (28 сут.):		
	кг	%	МПа	в %	Δ %
1	2	3	4	5	6
Природный песок, Мк ~ 0,9 д. ед.					
350	–	–	37,5	100	–
Обогащенный песок, Мк ~ 2,5 д. ед.					
350	–	–	46,7	125	+25
315	35	10	40,5	108	+8
280	70	20	38,6	103	+3
Природный песок, Мк ~ 1,0 д. ед.					
350	–	–	44,1	100	–
Обогащенный песок, Мк ~ 2,5 д. ед.					
350	–	–	52,8	120	+20
315	35	10	45,5	103	+3
280	70	20	45,1	102	+2
245	105	30	41,2	93	–7
245*	105	30	46,8	105	+5
Природный песок, Мк ~ 1,5 д. ед.					
350	–	–	48,2	100	–
Обогащенный песок, Мк ~ 3,0 д. ед.					
350	–	–	56,3	117	+17
315	35	10	53,0	110	+10
280	70	20	48,4	100	0
Природный песок, Мк ~ 2,0 д. ед.					
350	–	–	50,4	100	–
Обогащенный песок, Мк ~ 3,25 д. ед.					
350	–	–	58,6	116	+16
315	35	10	53,9	107	+7
280	70	20	51,4	102	+2

* Бетон из равноподвижной смеси (марки П1) с пластифицирующей добавкой (снижение водосодержания на ~ 20 % от исходного)

Анализ результатов экспериментальных (подтвержденных производственной апробацией) данных о взаимосвязи роста прочности тяжелого конструкционного бетона с улучшением качества мелкого

заполнителя, отраженного в росте модуля крупности, позволяет сделать следующие выводы.

Очевиден 15...25 %-ный рост прочности бетона при равенстве содержания цемента в его составах, при большем значении прироста для тонкого и очень мелкого исходного песка ($M_k \leq 0,9$ и $M_k \leq 1,0$).

Возможность снижения содержания цемента на 20 % во всех случаях подтверждена тем, что при этом прочность образцов бетона на обогащенном песке фактически соответствовала уровню прочности при расходе вяжущего в 350 кг/м³ бетона на исходном мелкозернистом песке.

Следует отметить, что при снижении водосодержания бетона равноподвижных смесей на обогащенном песке за счет использования качественного пластификатора, возможно 25...30 %-ое уменьшение содержания вяжущего в бетоне при обеспечении прочности на исходном уровне. Вместе с тем, во всех случаях требуется соответствующий расчет и оценка ситуации строительной (профильной) лабораторией с учетом конкретных условий изготовления сборных изделий или ведения бетонных работ в монолитном строительстве.

Заключение.

Лабораторными исследованиями и производственной апробацией установлено, что, разработанный прием обогащения (нормализации гранулометрического состава) рационален для всех групп мелкозернистых песков согласно ГОСТ 8736-2014 [7] с $M_k \leq 2,0$ и, особенно, характеризующихся $M_k \leq 1,0$, т. е. тонких и очень мелких песков.

При сохранении равной прочности на обогащенном крупными фракциями гранитного отсева песке экономия цемента может составить не менее (10...20) % от его расхода на исходном природном песке. Кроме этого, следует отметить, что прочность образцов бетона на обогащенном песке с $M_k = 2,0...2,5$ соответствует прочности бетона на крупном (мытом) песке стандартного качества с $M_k = 3,2$, а с повышением модуля до 3,0...3,25 и превышает ее. Приведенные данные свидетельствуют о возможности повышения качества бетона при одновременной экономии цемента путем обогащения мелкозернистых песков крупными фракциями гранитного отсева, при сопутствующем экономическом эффекте.

Использование крупных фракций гранитного отсева для обогащения природных мелкозернистых песков позволяет решить проблему повышения качества бетона и снижении расхода цемента для целого ряда районов Беларуси, не располагающих местными запасами качественного мелкого заполнителя для бетона.

Список использованных источников:

1. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона. – М. : Стройиздат, 1981. – 404 с.
2. Ахвердов, И. Н. Высокопрочный бетон. – М. : Стройиздат, 1961. – 106 с.
3. Баженов Ю. М. Технология бетона: учеб. для студентов ВУЗов строит. спец/ Ю. М. Баженов. – 3-е изд., – М. : Изд-во АСВ, 2003. – 500 с: ил. – ISBN 5-93093-138-0
4. Блещик Н. П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и пресс-вакуум бетона. – Минск: Наука и техника, 1977. – 230 с.
5. Барташевич А. Я. Исследование структурно-технических свойств бетонной смеси, уплотненной прессованием и вакуумированием: Автореф. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.05/ИСиА Госстрой БССР. – Минск, 1973. – 37 с.
6. Песок для строительных работ. Методы испытаний: ГОСТ 8735-88. – Введ. 01.07.89.– Минск. Госстандарт, 2018. – 25 с.
7. Песок для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8736-2014. – Введ. 01.04.2017: постановление Госстандарта РБ №27, 2016. – 10 с.
8. Смоляков А. В Научно-технические основы технологии полного использования гранитного отсева в бетонах/ А. В. Смоляков, П. Л. Федорович, Э. И. Батяновский // Строительная наука и техника. Научно-технический журнал – Минск, 2011. – С35 – 41.
9. Федорович П. Л. Теоретические и практические основы минимизации содержания цемента в бетоне путем формирования оптимального зернового состава/ П. Л. Федорович, А. М. Корсун, Д. Л. Титков, Д. О. Гребенек // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов европейского союза в области строительства. Международный научно-методический семинар – Минск, 2012 – С155 – 165.

10. Батяновский Э. И. Эффективность «глубокой» переработки гранитного отсева РУПП «Гранит»/ Э. И. Батяновский, А. А. Дрозд, П. Л. Федорович, А. В. Смоляков// Строительная наука и техника. Научно-технический журнал – Минск, 2012. – С38 – 43.

11. Цементы общестроительные. Технические условия: ГОСТ 31108–2020. – Введ. 01.03.2021.– Минск. Госстандарт, 2020. – 16 с.

12. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия: ГОСТ 8267–93. – Введ. 10.11.93. – Москва – Минск. МНТКС; Министерство архитектуры и строительства РБ, 1995. – 20 с.

13. Вода для бетонов и растворов. Технические условия: СТБ 1114-98. – Введ. 01.01.99. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 98. – 12 с.

14. Добавки для бетонов. Общие технические условия: СТБ 1112-98. – Введ. 01.01.99. – Минск: Министерство архитектуры и строительства РБ, 98. – 17 с.

15. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности: ГОСТ 30459-96. – Введ. 01.07.98 – Москва – Минск. МНТКС; Министерство архитектуры и строительства РБ, 1998. – 39 с.

16. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180-2012. – Введ. 01.02.2016.– Минск. Госстандарт, 2015. – 29 с.