

УДК 691.327

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТСЕВОВ ДРОБЛЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Л. И. Касторных, П. С. Крюков

Донской государственной технической университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Рассмотрены варианты комплексного использования отсевов дробления горных пород Донского региона при производстве железобетонных изделий. Установлено, что для мелкозернистой самоуплотняющейся смеси оптимальная дозировка рядового отсева дробления известняка составляет 20 %, а отсева дробления песчаника — 30 %. При замене 30 % природного очень мелкого песка только крупными фракциями отсева дробления песчаника уменьшается межзерновая пустотность заполнителя, снижается водопотребность бетонной смеси и обеспечивается её высокая текучесть. При этом повышаются физико-механические свойства мелкозернистого бетона за счет увеличения доли прочных зерен.

Ключевые слова: отсева дробления, мелкозернистые самоуплотняющиеся смеси, суперпластификатор на основе эфиров полиарила и поликарбоксилата, модификатор вязкости.

INTEGRATED USE OF CRUSHING SCREENINGS IN THE PRODUCTION OF PRECAST CONCRETE PRODUCTS

L.I. Kastornykh, P.S. Kryukov

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The paper considers the variants of complex use of rock crushing screenings of the Don region in the production of reinforced concrete products. It is established that for a fine-grained self-compacting mixture, the optimal proportion of the ordinary screening of limestone crushing is 20 %, and the screening of sandstone crushing is 30 %. When replacing 30 % of natural fine sand with only large fractions of sandstone crushing screening, the intergranular voidness of the aggregate decreases, the water demand of the concrete mixture decreases, and its high fluidity is ensured. At the same time, the physical and mechanical properties of fine-grained concrete are increased by increasing the proportion of strong grains.

Keywords: crushing screenings, fine-grained self-compacting mixtures, superplasticizer based on polyaryl and polycarboxylate esters, viscosity modifier

Введение. Ростовская область является одним из важнейших поставщиков сельхозпродукции. В ее сельской местности проживает около 2 млн. человек, что составляет 42 % численности ее населения. Благоустройство социальных объектов, общественных пространств и придомовой территории в сельских поселениях является актуальной задачей, направленной на создание эстетического облика станиц и поселков Донского региона, сохранение культурных традиций и развитие этнического туризма. Для формирования комфортной среды проживания требуются различные дизайнерские объекты, среди которых особое место занимают малые архитектурные формы. При изготовлении таких изделий из сборного бетона или железобетона возможно достижение функциональности, эстетической привлекательности и долговечности. Специфической особенностью малых архитектурных форм является их сложная геометрическая

форма и небольшие размеры, что затрудняет применение традиционных способов изготовления изделий на основе бетонных смесей с крупным заполнителем. Поэтому производство изделий рационально организовать из мелкозернистого самоуплотняющегося бетона по безвибрационной технологии.

Мелкозернистые бетоны, традиционно изготавливаемые из природных кварцевых или полевошпатных песков, для производства высокопрочных и долговечных изделий становятся технически неэффективными из-за высокой водопотребности бетонной смеси. Альтернативой природным пескам могут служить мелкие заполнители из отсевов дробления горных пород на щебень [1, 2]. В Российской Федерации ежегодно на предприятиях по производству щебня накапливается большое количество отсевов дробления, общий объем которых составляет около 35 млн. м³, в т. ч. отсевов изверженных пород — 15 млн. м³, отсевов карбонатных пород — 20 млн. м³. Но до настоящего времени востребованность таких отсевов в строительной отрасли невелика из-за пластинчатой и игловатой формы зерен их макроструктуры и высокого содержания пылевидных частиц [3, 4].

Дробильно-сортировочные заводы Донецкого каменноугольного бассейна производят щебень для строительных работ из песчаника и известняка. На территории этих предприятий, находящихся в сельской местности, целесообразно организовать производство бетонных и железобетонных изделий с комплексным использованием отсевов дробления. Их рациональное применение в бетонных и растворных смесях обосновано ГОСТ 31424—2010 «Материалы строительные нерудные из отсевов дробления плотных горных пород при производстве щебня».

Самоуплотняющиеся бетоны, относящиеся к инновационным строительным материалам, требуют обоснованного использования сырьевых компонентов и научного подхода при проектировании состава [5–7]. Для самоуплотняющихся бетонных смесей рациональный расход всех компонентов необходимо определять по результатам оптимизации гранулометрического состава минеральной части, а пластифицирующую добавку выбирать индивидуально для цемента конкретного вида, учитывая её совместимость со всеми составляющими смеси [8, 9]. Высокоэффективные модифицирующие добавки могут обеспечить бетонным смесям требуемую растекаемость при сохранении их связности и нерасслаиваемости [10–12].

Установлено [13], что при использовании отсевов дробления в самоуплотняющихся мелкозернистых смесях возникает технологическое противоречие: увеличение доли прочных зерен отсева способствует повышению прочности бетона, но при этом растекаемость бетонной смеси и её способность к самоуплотнению снижаются. Поэтому целью настоящей работы явилась экспериментальная оценка возможности комплексного использования отсевов дробления различных горных пород в самоуплотняющихся мелкозернистых смесях при производстве сборных железобетонных изделий.

Материалы и методы исследований. В качестве заполнителей мелкозернистых бетонных смесей использованы: природные пески П1 и П2 ГОСТ 8736—2014 и отсева дробления известняка О1 и песчаника О2 ГОСТ 31424—2010. Основные характеристики этих заполнителей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики мелких заполнителей

Показатель	Песок П1	Песок П2	Отсев О1	Отсев О2
Истинная плотность, г/см ³	2,65	2,65	2,65	2,66
Насыпная плотность, кг/м ³	1355	1415	1420	1400
Пустотность, %	48,9	46,6	46,4	47,4
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	1,2	1,1	0,9	1,0
Модуль крупности	1,48	1,22	3,26	2,66
Группа песка	Очень мелкий	Очень мелкий	Повышенной крупности	Крупный

Для проведения исследований использованы бездобавочные портландцементы ЦЕМ I 52,5Н и ЦЕМ I 42,5Н, а также сульфатостойкий портландцемент с минеральными добавками ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС. Технические характеристики портландцементов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики портландцементов

Показатель	ЦЕМ I 52,5Н	ЦЕМ I 42,5Н	ЦЕМ II/A-П 42,5Н СС
Прочность на сжатие в возрасте 28 сут., МПа	59,7	51,1	50,0
Истинная плотность, г/см ³	3,19	3,10	3,15
Насыпная плотность, кг/м ³	1010	1120	1170
Нормальная густота цементного теста, %	29,0	24,75	27,50
Удельная поверхность, см ² /г	4054	3520	4015
Минеральная добавка (опока), %	–	–	10,2
Коэффициент эффективности при тепловой обработке	0,76	0,79	0,77

Для регулирования свойств мелкозернистых самоуплотняющихся смесей использованы суперпластифицирующие и водоудерживающие добавки торговых марок BASF и Sika, подтвердившие высокую эффективность в ранее проведенных исследованиях [11, 12]. Характеристика химических модификаторов приведена в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика химических добавок

Марка	Наименование	Характеристика
BASF	MasterPolyHeed 3545 (MPH3545)	Суперпластифицирующая и высоководоредуцирующая добавка на основе эфиров полиарила и поликарбоксилата
	MasterGlenium ACE430 (MG430)	Суперпластификатор на основе эфира поликарбоксилата с эффектом быстрого набора ранней прочности бетона
	MasterMatrix 100 (MM100)	Модификатор вязкости на основе водного раствора высокомолекулярного синтетического полимера

Марка	Наименование	Характеристика
SIKA	Sika ViskoCrete 20 HE (VC 20HE)	Суперпластификатор на основе водного раствора модифицированного поликарбоксилата
	Sika ViskoCrete 24 HE (VC 24HE)	Суперпластификатор на основе водной композиции модифицированных эфиров поликарбоксилата с быстрым набором ранней прочности бетона
	Sika Stabilizer 4R (ST.4R)	Стабилизирующая добавка на основе крахмала, повышающая стойкость к расслоению

Растекаемость самоуплотняющихся смесей определена по диаметру расплыва конуса бетонной смеси по методике СТО НОСТРОЙ 2.6.54–2011. Диаметр расплыва бетонной смеси D_p , см, определен измерением диаметров расплывшейся смеси d_1 и d_2 рулеткой в двух взаимно перпендикулярных направлениях:

$$D_p = \frac{d_1 + d_2}{2}.$$

Определение средней плотности мелкозернистых самоуплотняющихся смесей проведено по ГОСТ 10181. Изготовление, хранение и испытание кубических образцов бетона с номинальным размером ребра 100 мм выполнены по ГОСТ10180.

Оценка возможности комплексного применения отсевов дробления в мелкозернистых самоуплотняющихся бетонных смесях. Ранее проведенными исследованиями установлено, что природные пески Ростовской области, относящихся к группе очень мелких, характеризуется стабильностью гранулометрического состава. Отсевы камнедробления горных пород Донского региона не отличаются стабильностью состава, особенно для пылевидной фракции, содержание которой может варьироваться от 12 до 17 % [14, 15]. Поэтому на первом этапе исследований в бетонных смесях на основе бездобавочного портландцемента для оценки возможности комплексного применения отсевов дробления использовали рядовые отсевы с пылевидной фракцией, играющей роль минерального наполнителя (табл. 4). На втором этапе для приготовления мелкозернистых самоуплотняющихся смесей на основе сульфатостойкого портландцемента, в состав которого включена минеральная добавка опоки, для обогащения песков использовали только крупные фракции отсева (табл. 5).

В ходе экспериментальных исследований установлено, что при использовании добавок марки BASF в мелкозернистых смесях на природном песке П1 оптимальная дозировка рядового отсева дробления известняка О1 составляет 20 % (состав 2М). При замене очень мелкого песка отсевом, содержащим в основном зерна размером от 0,63 до 5,0 мм и пылевидную фракцию в количестве 9 % массы цемента, водопотребность бетонной смеси снижается на 23 %. По сравнению с составом 1М этот технологический фактор приводит к увеличению прочности бетона до 34,1 МПа, но является недостаточным для обеспечения нормативных показателей долговечности железобетонных изделий при номинальном расходе цемента 400 кг/м³. Поэтому мелкозернистые смеси составов 5М–11М были приготовлены с номинальным расходом цемента 500 кг/м³.

Таблица 4

Характеристика бетонных смесей и бетонов с добавками марки BASF

Состав смеси	Вид песка	Вид и размер зерен отсева, мм	Доля отсева в заполнителе, %	Расход цемента, кг/м ³		Расход добавки, кг/м ³			Диаметр распыляемой смеси Д _р , см	Водоцементное отношение	Объем цементного теста, л	Предел прочности при сжатии, МПа
				ЦЕМ I 52.5Н	ЦЕМ I 42.5Н	МРН3545	MG ACB430	MM100				
1М	П1	-	-	380	-	6,0	-	-	55,0	0,90	461	21,2
2М	П1	O1 (0.0–5.0)	20	397	-	6,4	-	-	56,0	0,66	386	34,1
3М	П1		25	388	-	6,2	-	-	55,0	0,78	423	27,0
4М	П1		30	385	-	6,2	-	-	57,0	0,83	441	24,9
5М	П1	O2 (0.0–5.0)	30	-	507	-	7,6	-	66,0	0,52	426	50,6
6М	П1		30	-	499	-	6,7	1,5	65,0	0,57	445	49,8
7М	П1	-	-	501	-	8,0	-	-	55,0	0,56	437	39,1
8М	П1	O2 (0.63–5.0)	20	510	-	8,3	-	-	55,0	0,52	425	41,7
9М	П2		20	515	-	8,4	-	-	53,0	0,56	449	39,5
10М	П1		30	519	-	8,3	-	-	69,0	0,51	428	44,8
11М	П2		30	512	-	8,2	-	-	54,0	0,55	442	40,2

Таблица 5

Характеристика бетонных смесей и бетонов с добавками марки Sika

Состав смеси	Вид песка	Вид и размер зерен отсева, мм	Доля отсева в заполнителе, %	Расход цемента, кг/м ³		Расход добавки, кг/м ³			Диаметр распыляемой смеси Д _р , см	Водоцементное отношение	Объем цементного теста, л	Предел прочности при сжатии, МПа
				ЦЕМ II/A-II 42.5Н СС	VC 20NE	VC 24NE	ST.4R					
12S	П2	O2 (2.5–5.0)	30	518	10,4	-	-	66,0	0,49	420	51,2	
13S	П2		30	503	10,1	-	2,5	63,0	0,56	442	42,0	
14S	П2		30	505	-	10,0	-	70,0	0,51	421	42,3	
15S	П2		30	494	-	9,9	2,5	68,0	0,54	424	40,4	

Анализ смесей составов 5М и 6М, приготовленных на природном песке П1 и рядовых отсевах дробления песчаника O2, свидетельствует о том, что повышение расхода вяжущего и химических модификаторов обеспечивает высокие показатели растекаемости смесей и прочности

бетона даже при дозировке отсева в количестве 30 %. Это связано, по нашему мнению, с повышением эффективности анионоактивного суперпластификатора MG ACE430 за счет его более низкой адсорбции на тонкодисперсных частицах песчаника, имеющих преимущественно отрицательный заряд поверхности.

Полученные результаты показали, что мелкозернистые смеси 8М и 10М с природным песком П1 и фракционированными отсевами песчаника с размерами зерен 0,63–5,0 мм обладают стабильными свойствами самоуплотнения и обеспечивают получение бетона высокой прочности. При замене 30 % природного песка крупными фракциями отсева в оптимальном соотношении водопотребность смеси снижается, но при этом ее растекаемость увеличивается до 69 см, а повышение доли прочных зерен отсева увеличивает прочность бетона при сжатии на 15 % (состав 10М). Также установлено, что для самоуплотняющихся смесей неэффективно применение отсевов дробления с природным песком П2, содержащим более 12 % тонкодисперсных частиц размерами менее 0,16 мм (составы 9М и 11М). Даже при высоком водосодержании требуемая растекаемость смесей не была достигнута.

Оценка свойств самоуплотняющихся бетонов для железобетонных изделий, эксплуатирующихся в условиях возможной сульфатной коррозии, выполнена для смесей на основе сульфатостойкого портландцемента с минеральной добавкой опоки в количестве 10 % (составы 12S–15S). В качестве мелких заполнителей применяли природный песок П2 и однофракционный отсев песчаника О2 с размерами зерен 2,5–5,0 мм. Исследования показали, что мелкозернистые бетонные смеси приобретают повышенную растекаемость, а бетоны на их основе — высокую прочность, если использовать модифицирующие добавки марки SIKА, а также обеспечить оптимальную дозировку отсева в количестве 30 % и содержание цементного теста в объеме не менее 420 л. Стабилизирующая добавка ST.4R придает смесям высокую однородность и связность (составы 13S и 15S), но увеличивает их водопотребность на 5–10 % и, следовательно, понижает прочность бетона на 10–15 %.

Заключение. В производстве железобетонных изделий из мелкозернистых самоуплотняющихся смесей возможно комплексное использование отсевов дробления горных пород Донского региона. Зерновой состав природных песков и отсевов дробления известняка и песчаника Ростовской области свидетельствует о том, что их использование в самоуплотняющихся смесях возможно только совместно с высоководоредуцирующими и водоудерживающими добавками после обосновывающих испытаний в бетоне. Установлено, что в мелкозернистой самоуплотняющейся смеси оптимальная дозировка рядового отсева дробления известняка составляет 20 %, а отсева дробления песчаника может достигать 30 %. Это объясняется повышением эффекта разжижения анионоактивного суперпластификатора за счет его более низкой адсорбции на тонкодисперсных частицах песчаника, имеющих преимущественно отрицательный заряд поверхности. Производство железобетонных изделий из мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов с комплексным использованием отсевов камнедробления на территории дробильно-сортировочных заводов Ростовской области позволит организовать перспективный бизнес и создать новые рабочие места для жителей сельских поселений.

Библиографический список

1. Лазуткин, А. В. Использование отсевов дробления важный фактор экономического роста предприятий нерудной промышленности / А. В. Лазуткин, В. И. Эйрих, В. П. Жуков // Строительные материалы. — 2003. — № 11. — С. 6–8.

2. Артамонов, В. А. Опыт переработки отсевов дробления / В. А. Артамонов, В. В. Воробьев, В. С. Свитов // Строительные материалы. — 2003. — № 6. — С. 28–29.
3. Использование отходов переработки горных пород при производстве нерудных строительных материалов / О. Е. Харо, Н. С. Левкова, М. И. Лопатников, Т. А. Горностаева // Строительные материалы. — 2003. — № 9. — С. 18–19.
4. Морозов, Н. М. Оптимизация гранулометрического состава песка для получения высокопрочного тонкозернистого бетона / Н. М. Морозов, И. В. Боровских, В. Г. Хозин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2008. — № 2. — С. 121–125.
5. Применение отсевов дробления щебня в самоуплотняющихся бетонах / Н. М. Морозов, В. И. Авксентьев, И. В. Боровских, В. Г. Хозин // Инженерно-строительный журнал. — 2013. — № 7. — С. 26–31.
6. Особенности состава бетонных смесей для бетононасосной технологии / Л. И. Касторных, А. В. Каклюгин, М. А. Гикало, И. В. Трищенко // Строительные материалы. — 2020. — № 3. — С. 4–11. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-4-11>
7. Беднев, Д. С. Применение пылевидной фракции отсевов камнедробления для самоуплотняющихся бетонов / Д. С. Беднев, А. С. Добродеева, А. И. Макеев // Студент и наука. — 2020. — № 1 (12). — С. 99–105.
8. Рауткин, А. В. Выбор химических модификаторов для обеспечения растекаемости самоуплотняющихся бетонных смесей / А. В. Рауткин, Л. И. Касторных // Молодой исследователь Дона. — 2017. — № 4 (7). — С. 118–126. — URL: http://mid-journal.ru/upload/iblock/5a8/20-rautkin-118_126.pdf. (дата обращения: 22.05.2021).
9. Касторных, Л. И. Об эффективности использования модификатора вязкости в самоуплотняющихся бетонах / Л. И. Касторных, В. П. Скиба, А. Е. Елсуфьев // Инженерный вестник Дона. — 2017. — № 3. — URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4346/> (дата обращения: 22.05.2021).
10. Касторных, Л. И. Влияние водоудерживающих добавок на некоторые свойства самоуплотняющихся бетонов. Часть I. Реологические характеристики цементных композиций / Л. И. Касторных, А. В. Рауткин, А. С. Раев // Строительные материалы. — 2017. — № 7. — С. 34–38.
11. Касторных, Л. И. Влияние водоудерживающих добавок на некоторые свойства самоуплотняющихся бетонов. Часть 2. Реологические характеристики бетонных смесей и прочность самоуплотняющихся бетонов / Л. И. Касторных, И. А. Деточенко, Е. С. Арина // Строительные материалы. — 2017. — № 11. — С. 22–27.
12. Касторных, Л. И. Влияние суперпластифицирующей добавки MasterPolyHeed на основные свойства тяжелого и мелкозернистого бетона / Л. И. Касторных, В. В. Хартанович, Д. Р. Шершень // Молодой исследователь Дона. — 2020. — № 4 (25). — С. 46–55. — URL: http://mid-journal.ru/upload/iblock/fcf/9_1157-Kastornykh_46_55.pdf (дата обращения: 22.05.2021).
13. Касторных, Л. И. Влияние отсева камнедробления и минерального наполнителя на характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов / Л. И. Касторных, А. Г. Гароян, Л. М. Усепян // Инженерный вестник Дона. — 2017. — № 3. — URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4340/> (дата обращения: 22.05.2021).

14. Касторных, Л. И. Оптимизация зернового состава заполнителя для мелкозернистого самоуплотняющегося бетона / Л. И. Касторных, В. Д. Черепанов, В. Э. Березовой // Молодой исследователь Дона. — 2020. — № 5 (26). — С. 40–48. — URL: http://mid-journal.ru/upload/iblock/eb6/8_1185-Kastornykh_40_48.pdf (дата обращения: 22.05.2021).

15. Касторных, Л. И. Технологические решения для организации бережливого производства на предприятиях сборного железобетона / Л. И. Касторных, А. В. Каклюгин, В. Д. Черепанов // Инженерный вестник Дона. — 2020. — № 8. — URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2020/6563> (дата обращения: 22.05.2021).

Об авторах:

Касторных Любовь Ивановна, доцент Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8968-2543>, likas9@mail.ru

Крюков Петр Сергеевич, магистрант Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), petya17krukov@gmail.com

Authors:

Kastornykh, Lyubov I., Associate professor, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), Cand.Sci., Associate professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8968-2543>, likas9@mail.ru

Kryukov, Petr S., Master's degree student, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), petya17krukov@gmail.com