

## СТРОИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

УДК 691.322

### ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ИЗ ДРОБЛЕННОГО БЕТОНА

канд. техн. наук М.С. БИБИК, канд. техн. наук И.И. ТУЛУПОВ  
(Завод сборного железобетона № 1, Минск)

*Исследуется проблема расширения области применения отходов бетона и железобетона. Показано, что более эффективным и перспективным направлением использования таких отходов является их применение в качестве заполнителей в бетонах, что позволит обеспечить пополнение запасов дефицитных строительных материалов, стоимость которых намного ниже стоимости природных материалов, а также получить значительную экономию энергоресурсов.*

*Представлены результаты исследования основных физико-механических характеристик заполнителей из дробленых отходов бетона и железобетона. Показано, что заполнители из дробленого бетона характеризуются меньшей плотностью и повышенным водопоглощением по сравнению с природными заполнителями. Подчеркивается необходимость учета особенностей физико-механических характеристик таких заполнителей при использовании их в бетонах и растворах для частичной или полной замены природных заполнителей. Предложены расчетные зависимости для назначения их расхода в этих композициях.*

**Введение.** Характерная особенность работы в современных условиях предприятий строительной отрасли, как и предприятий других отраслей, – конкурентная борьба за заказчика. В этих условиях, усугубленных резким удорожанием топливно-энергетических ресурсов и основных строительных материалов, важнейшим направлением обеспечения конкурентоспособности продукции предприятий стройиндустрии является повышение ее качества и снижение себестоимости на основе внедрения прогрессивных ресурсосберегающих технологий и использования отходов производства, и, в частности, отходов бетона и железобетона. Следует отметить, что наряду с решением проблем природоохранного характера переработка и вовлечение в хозяйственный оборот этих отходов может существенно расширить материально-сырьевую базу и снизить себестоимость продукции.

Проблема переработки и использования в строительстве отходов бетона и железобетона в последние годы приобретает особую актуальность и в зарубежных странах, и в Беларуси в связи с накопившимися и продолжающимися накапливаться многотоннажными запасами таких отходов (технологических отходов бетонной смеси; бракованных и некондиционных изделий и конструкций, образующихся в результате их испытаний; разборки и сноса старых, претерпевших моральный и физический износ зданий и сооружений; разборки дорог, вымощенных плитами и т.п.).

Утилизация и переработка этих отходов может обеспечить существенное пополнение объемов дефицитных строительных материалов, стоимость которых намного ниже стоимости природных материалов. По данным ряда зарубежных и отечественных исследователей, вторичный щебень, полученный из этих отходов, намного дешевле природного, так как энергозатраты на его получение примерно в 8 раз ниже по сравнению с энергозатратами по добыче природного щебня, а себестоимость бетона с применением переработанного щебня снижается на 25 % [1].

В Республике Беларусь работы по утилизации отходов бетона и железобетона впервые были развернуты в 1997 году на заводе СЖБ № 1 (г. Минск). На предприятии была внедрена безотходная технология и введен в эксплуатацию участок по переработке технологических отходов бетонной смеси, бракованных и некондиционных изделий и конструкций на специально созданном комплексе в составе щековой дробилки СМ-11 и ударной установки УК-01 производительностью 50 м<sup>3</sup> щебеночно-песчаной смеси в смену [2]. Благодаря пуску участка по дроблению отходов бетона и железобетона на предприятии появилась возможность переработки бракованных и подвергнутых испытаниям железобетонных изделий на щебеночно-песчаные смеси, реализуемые заказчикам в качестве материала для устройства временных дорог и подъездных путей, а также в качестве подсыпок под основания и фундаменты малоэтажных зданий и сооружений. На основании результатов испытаний продуктов дробления, выполненных в ОНИЛ МБ БГПА совместно с ОАО «Завод СЖБ № 1» в 2000 году, были разработаны технические ус-

ловия ТУ РБ 01277367.244-2000 «Смеси щебеночно-песчаные из бетона и дробленого бетона», в которых была установлена область их применения [3]:

- в дорожном строительстве – для устройства временных дорог и подъездных путей;
- в малозэтажном строительстве – для устройства подсыпок под основания и фундаменты.

За время функционирования этого участка с октября 2000 года было переработано и реализовано заказчиком более 10,5 тыс. м<sup>3</sup> щебеночно-песчаной смеси.

С целью расширения области применения продуктов переработки данных отходов и для повышения эффективности их использования, на предприятии проводятся экспериментальные исследования по оценке физико-механических характеристик щебеночно-песчаных смесей и щебня из этих смесей и учета их влияния на свойства бетонных смесей и бетона при их использовании в качестве заполнителей.

**Используемые материалы и методика исследований.** Для проведения исследования физико-механических характеристик продуктов дробления отходов бетона и железобетона были отобраны и переработаны некондиционные железобетонные конструкции из бетона различной прочности и возраста:

- ферма – класс бетона по прочности В30, возраст бетона 19 лет (серия 1);
- свая – класс бетона по прочности В25, возраст бетона 1 год (серия 2);
- свая – класс бетона по прочности В25, возраст 28 суток (серия 3).

Исследования выполняли на щебеночно-песчаной смеси фракции 0...20 мм, полученной путем переработки этих изделий, и на отсеянных из этой смеси щебне фракции 5...20 мм и песке фракции 0...5 мм.

Для сравнения были также использованы природные заполнители:

- песок природный кварцевый карьера «Крапужино» Логойского района;
- щебень природный гранитный фракции 5...20 мм Микашевичского месторождения производства РУПП «Гранит».

Физико-механические характеристики песка и щебня представлены в таблицах 1 и 2.

Определение физико-механических характеристик щебеночно-песчаной смеси, щебня из дробленого бетона и природного щебня осуществляли в соответствии с ГОСТ 8269, песка из дробленого бетона и природного песка – по ГОСТ 8735.

Таблица 1

Физико-механические характеристики щебеночно-песчаной смеси, щебня из дробленого бетона и природного щебня

Вид заполнителя	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_{\text{пл.}}$ , кг/м <sup>3</sup>	Над чертой – частные остатки, под чертой – полные остатки, %, на ситах с отверстиями, мм					Содержание в щебне, %, фракции, мм		Водопоглощение щебня за 1 ч, %	
			20	15	10	5	< 5	10...20	5...10		
Щебеночно-песчаная смесь из дробленого бетона (фр. 0...20 мм)	Серия 1	2,434	1328	<u>4,21</u> 4,21	<u>7,06</u> 11,27	<u>12,66</u> 23,93	<u>24,93</u> 48,86	<u>51,14</u> 100	48,98	51,02	–
	Серия 2	2,49	1380	<u>6,38</u> 6,38	<u>5,5</u> 11,88	<u>12,5</u> 24,38	<u>22,7</u> 47,08	<u>52,92</u> 100	51,8	48,2	–
	Серия 3	2,51	1427	<u>4,81</u> 4,81	<u>7,96</u> 12,77	<u>15,08</u> 27,85	<u>27,73</u> 55,58	<u>44,42</u> 100	50,1	49,9	–
Щебень из дробленого бетона (фр. 5...20 мм)	Серия 1	2,434	1275	–	–	–	–	–	–	–	6,74
	Серия 2	2,49	1290	–	–	–	–	–	–	–	–
	Серия 3	2,51	1284	–	–	–	–	–	–	–	7,02
Природный гранитный щебень фр. 5...20 мм	2,74	1457	<u>4,5</u> 4,5	<u>30,7</u> 35,2	<u>37,9</u> 73,1	<u>23,3</u> 96,4	<u>3,6</u> 100	73,1	23,3	3,2	

Примечание. Марка природного щебня по дробимости 1400; дробленого щебня фр. 5...10 и 10...20 мм – 1200.

Таблица 2

Физико-механические характеристики песка из дробленого бетона и природного песка

Вид мелкого заполнителя		Истинная плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Насыпная плотность, $\rho_{н.п.}$ , кг/м <sup>3</sup>	Над чертой – частные остатки, под чертой – полные остатки, %, на ситах с отверстиями, мм						Модуль крупности
				2,5	1,25	0,63	0,315	0,15	< 0,15	
Песок, отсеянный из щебеночно-песчаной смеси из дробленого бетона	Серия 1	2,434	1265	<u>37,7</u> 37,7	<u>22,58</u> 60,28	<u>9,53</u> 69,81	<u>14,7</u> 84,51	<u>9,11</u> 93,62	<u>6,39</u> 100	3,46
	Серия 2	2,49	1305	<u>37,1</u> 37,1	<u>21,22</u> 58,32	<u>10,32</u> 68,64	<u>16,46</u> 85,1	<u>9,52</u> 94,62	<u>5,38</u> 100	3,44
	Серия 3	2,51	1346	<u>44,98</u> 44,98	<u>21,3</u> 66,28	<u>8,1</u> 74,38	<u>12,03</u> 86,41	<u>7,71</u> 94,12	<u>5,82</u> 100	3,66
Песок природный кварцевый		2,74	1540	<u>20,0</u> 20,0	<u>27,5</u> 47,5	<u>13,7</u> 61,2	<u>27,6</u> 88,8	<u>9,6</u> 98,4	<u>1,76</u> 100	3,16

**Исследование физико-механических характеристик продуктов переработки отходов бетона и железобетона.** В работах ряда исследователей [4 – 6] отмечается, что заполнители, полученные при переработке отходов бетона и железобетона, существенно отличаются по своим свойствам от заполнителей природного происхождения. Характерной их особенностью является наличие остатков растворенной части на зернах исходных заполнителей, количество и качество которой сказывается на их физико-механических характеристиках и на свойствах бетонной смеси и бетона, в которых они используются. Показано, что заполнители из дробленых отходов бетона и железобетона характеризуются более высокой пористостью, меньшей плотностью и более высоким водопоглощением по сравнению с природными заполнителями (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительные значения основных физико-механических характеристик природных заполнителей и заполнителей из дробленого бетона

Физико-механические характеристики заполнителей	Значения характеристик									
	[4]						[6]			
	Заполнители из дробленого бетона, приготовленного			Природные заполнители			Заполнители из дробленого бетона, приготовленного на гранитном щебне фр., мм		Природные заполнители – гранитный щебень фр., мм	
	на гранитном щебне фр. 5...20 мм	на известковом щебне фр. 5...20 мм	песке	гранитный щебень фр. 5...20 мм	известковый щебень фр. 5...20 мм	песок	5...10	10...20	5...10	10...20
Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,32	2,06	2,17...2,5	2,6	2,42	2,65	2,49	2,57	2,62	2,62
Водопоглощение, %	6,0	7,8	7,5... 9,3	0,86	4,4	–	4,26	3,52	1,12	1,11
Пористость, %	–	–	–	–	–	–	8,69	1,62	Пористость, %	–

Источник: [4, 6].

Необходимо отметить, что использовать в практических целях приведенные в вышеупомянутых источниках данные по физико-механическим характеристикам заполнителей из дробленого бетона и их влиянию на свойства бетонных смесей и бетона не представляется возможным из-за ряда неопределенностей. В частности, в этих данных нет сведений о свойствах дробимых бетонных отходов (марки бетона по прочности, его состава, возраста), неизвестно также производилась ли сортировка бетонных отходов по этим параметрам перед дроблением. Вместе с тем эти данные дают общее представление о различиях в физико-механических характеристиках природных заполнителей и заполнителей из дробленого бетона.

Очевидно, что вышеупомянутые особенности таких заполнителей следует учитывать уже на стадии проектирования состава бетона при назначении их расхода взамен природных заполнителей. В частности, назначенный без учета разности плотностей расход заполнителей из дробленого бетона, равный по массе замещаемому расходу природных заполнителей, не будет равным ему по объему. В результате при равном расходе цемента его количество, идущее на заполнение пустот в рассматриваемых видах заполнителей и обмазку их зерен, будет разным, а более высокое водопоглощение заполнителей из дробленого бетона увеличит водопотребность бетонной смеси, что повлечет за собой изменение свойств смеси и бетона.

Следует ожидать, что свойства заполнителей из дробленого бетона различного класса по прочности и различного возраста будут различаться между собой, что обусловлено различными свойствами остатков налипшей растворной части на зернах крупного заполнителя и частиц измельченной растворной части пополнивших состав мелкого заполнителя.

Особо следует отметить, что влияние возраста дробленого бетона на свойства полученных из него заполнителей в определенной степени будет определяться наличием потенциала непрогидратировавшей и обнаженной в процессе измельчения части зерен цемента.

С учетом вышесказанного цель данной работы – исследование физико-механических характеристик заполнителей из дробленого бетона с предварительной сортировкой исходных бетонных отходов по прочности и возрасту бетона.

Щебеночно-песчаную смесь из этих изделий получали с использованием комплекса оборудования в составе ударной установки УК-01 и щековой дробилки СМ-11 с последующим измельчением ее до фракции 0...20 мм на молотковой дробилке. Щебень фракции 5...20 мм и песок фракции 0...5 мм получали из этой смеси путем ее отсева.

Для проведения экспериментов из продуктов дробления бетона каждой серии отбирали по 2 частных пробы массой 2,75 кг каждая, которые попарно объединяли с перемешиванием в 3 аналитические пробы массой по 5,5 кг и подвергали всем необходимым испытаниям.

В ходе экспериментов определяли следующие физико-механические характеристики заполнителей из дробленого бетона:

- истинную плотность заполнителей;
- насыпную плотность заполнителей;
- гранулометрический состав заполнителей;
- водопоглощение щебня;
- дробимость щебня.

Для сравнения определяли эти же характеристики природных заполнителей (см. табл. 1, 2).

Из приведенных данных видно, что заполнители из дробленого бетона характеризуются меньшими значениями истинной и насыпной плотности по сравнению с природными заполнителями. В частности, их истинная плотность ниже на 8,4...11,2 %, насыпная плотность щебня фракции 5...20 мм из дробленого бетона – на 11,5...12,5 %, насыпная плотность песка из дробленого бетона – на 12,6...17,9 %. При этом наибольшее снижение наблюдается у заполнителей серии 1, полученных из бетона возраста 19 лет, а наименьшее – у заполнителей серии 3 из бетона возраста 28 суток. Объяснением такой закономерности может служить тот факт, что степень гидратации цемента у бетона большего возраста выше, больше содержится в нем рыхлых, пористых, обладающих меньшей плотностью новообразований.

Экспериментами также установлено, что водопоглощение щебня фракции 5...20 мм из дробленого бетона более чем вдвое превышало водопоглощение природного щебня.

Сравнение данных таблицы 1 по гранулометрическому составу щебня фракции 5...20 мм из дробленого бетона с природным щебнем такой же фракции свидетельствует о том, что соотношение фракций 10...20 и 5...10 мм в нем значительно отличается от соотношения этих фракций в природном щебне. В частности, содержание фракции 10...20 мм в 1,61...1,65 раза ниже, а фракции 5...10 мм – в 2,34...2,39 раза выше по сравнению с природным щебнем.

Существенно отличается по своим физико-механическим характеристикам от природного и песок из дробленого бетона. Из таблицы 2 видно, что его насыпная плотность для исследуемых серий находится в пределах 1265...1346 кг/м<sup>3</sup> против 1540 кг/м<sup>3</sup> для природного песка, а модуль крупности составил 3,44...3,66 против 3,16.

Сравнение гранулометрического состава песков показывает, что песок из дробленого бетона характеризуется повышенным содержанием фракций 2,5...5 мм, 0,63...1,25 мм и фракции мельче 0,15 мм. Так, частные остатки на ситах 2,5 и 0,63 мм для песка из дробленого бетона превышают таковые у природного песка в 1,86...2,25 и 1,33...1,69 раз соответственно, а проход сквозь сито 0,15 мм – в 3,06...3,63 раза.

Из таблицы 1 также видно, что водопоглощение щебня из дробленого бетона в 2,1...2,19 раза выше водопоглощения природного щебня.

Пониженное по сравнению с природным значение плотности заполнителей из дробленого бетона обусловлено влиянием налипшего на зерна исходного гранитного щебня раствора, плотность которого ниже плотности исходного гранитного щебня. Этим же влиянием можно объяснить и значительное различие в гранулометрических составах сравниваемых заполнителей, а также повышенное водопоглощение щебня из дробленого бетона. В частности, содержащиеся в растворе новообразования – продукты гидратации цемента – представляют собой пористый материал, прочность которого намного ниже прочности негидратировавших зерен цемента и зерен щебня [7].

В процессе дробления бетонных отходов он наиболее сильно подвержен разрушению и измельчению, а его пористая структура обладает повышенной сорбционной способностью. Вместе с тем проведенные испытания прочности щебня из дробленого бетона по показателю дробимости показали, что по этой характеристике он близок к природному гранитному щебню:

- для фракции 10...20 мм частный остаток на сите 2,5 мм составил 14,26 %;
- для фракции 5...10 мм частный остаток на сите 1,25 мм составил 12,68 %, что соответствует марке 1200 (для природного щебня – 1400).

Учитывая, что при выборе щебня для обеспечения требуемой марки бетона необходимо выполнение условия:

$$D_p \geq 1,5 R_b, \tag{1}$$

где  $D_p$  – показатель прочности щебня по дробимости;  $R_b$  – марка бетона по прочности при сжатии, кГс/см<sup>2</sup>.

Можно сделать вывод, что при величине этого показателя 1200 для щебня из дробленого бетона на нем возможно даже получение бетона марки 800.

Очевидно, что рассмотренные выше специфические особенности заполнителей из дробленого бетона будут оказывать свое влияние на свойства бетонной смеси и бетона. Прежде всего, повышенное водопоглощение таких заполнителей повлечет за собой увеличение водопотребности и водоцементного отношения смеси для обеспечения требуемой подвижности смеси, что в свою очередь приведет к снижению прочности бетона. Кроме этого, изменение гранулометрического состава щебня в сторону увеличения содержания фракции 5...10 мм и повышение содержания в песке фракций с размером зерен менее 0,15 мм приведет наряду с повышением водопотребности и водоцементного отношения смеси к повышенному расходу цементного теста для обеспечения требуемой подвижности смеси.

В этой связи отметим, что одним из важнейших условий обеспечения требуемых характеристик бетонной смеси и бетона, приготовленных с применением заполнителей из дробленого бетона, является учет их специфики уже на стадии проектирования составов бетона. В частности, при полной или частичной замене такими заполнителями природных заполнителей назначение их расходов для обеспечения равенства замещаемого объема природных заполнителей необходимо осуществлять с учетом их плотности, отличной от плотности природных заполнителей, по предложенным нами зависимостям:

$$G_{з.др.} = \varphi \cdot G_{з.др.}^0 \cdot \frac{\rho_{з.др.}}{\rho_{з.пр.}}; \tag{2}$$

$$G'_{з.пр.} = (1 - \varphi) \cdot G_{з.пр.}^0, \tag{3}$$

где  $\varphi$  – объемное содержание в крупном заполнителе заполнителя из дробленого бетона, вводимого для частичной или полной замены природного заполнителя, в долях единицы;  $G_{з.др.}^0$  – расход природного гранитного щебня для бетона, в котором не используется заполнитель из дробленого бетона, кг;  $G_{з.др.}$ ,  $G'_{з.пр.}$  – содержание по массе заполнителя из дробленого бетона и природного заполнителя в крупном заполнителе, кг;  $\rho_{з.др.}$ ,  $\rho_{з.пр.}$  – плотность заполнителя из дробленого бетона и природного заполнителя, кг/м<sup>3</sup>.

Для обеспечения требуемых характеристик бетонной смеси и бетона – подвижности смеси, прочности бетона и других показателей – при использовании заполнителей из дробленого бетона, обладающих повышенным водопоглощением, следует применять пластифицирующие химические добавки, обеспечивающие снижение водопотребности и водоцементного отношения таких смесей.

### Выводы

1. Заполнители из дробленых отходов бетона и железобетона по своим физико-механическим характеристикам существенно отличаются от природных заполнителей. Они обладают пониженной плотностью и повышенным водопоглощением. Их гранулометрический состав значительно отличается от гранулометрического состава природных заполнителей:

- в щебне фракции 5...20 мм содержание фракции 10...20 мм в 1,61...1,65 раз ниже, а фракции 5...10 мм – в 2,34...2,39 раз выше по сравнению с природным;

- песок характеризуется более высоким модулем крупности (3,44...3,66 против 3,16) и повышенным содержанием фракций 2,5...5 мм, 0,63...1,25 мм и фракции мельче 0,15 мм.

Водопоглощение щебня из дробленого бетона в 2,1...2,19 раз выше водопоглощения природного щебня.

2. Особенности заполнителей из дробленого бетона и железобетона следует учитывать уже на стадии проектирования составов бетона, в котором они используются. При назначении расхода таких заполнителей, применяемых в смесях для полной или частичной замены ими природных заполнителей, для обеспечения равенства замещаемых объемов следует учитывать их плотность, отличную от плотности природных заполнителей, по предложенным нами зависимостям. Для обеспечения требуемой подвижности смеси и сохранения проектной прочности бетона при использовании таких заполнителей с повышенным водопоглощением следует применять пластифицирующие химические добавки, обеспечивающие снижение водопотребности и водоцементного отношения бетонной смеси.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бега, Р.И. Применение промышленных отходов для строительства городских дорог / Р.И. Бега, Л.В. Городецкий, С.Е. Шмелев // Технологии бетонов. – 2005. – № 3. – С. 22 – 24.
2. Бибик, М.С. Особенности работы завода в современных условиях / М.С. Бибик // Строительная наука и техника. – 2006. – № 4. – С. 89 – 92.
3. Бибик, М.С. Щебень из дробленого бетона / М.С. Бибик, Н.Л. Полейко, С.Н. Ковшар // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: материалы VI междунар. науч.-метод. семинара. – Минск: Технопринт, 2000. – С. 246 – 249.
4. Липей, О.А. Заполнители из дробленого бетона / О.А. Липей, Б.А. Крылов, А.С. Дмитриев // Бетон и железобетон. – 1981. – № 5. – С. 22 – 24.
5. Наназашвили, И.Х. Строительные материалы, изделия и конструкции: справочник / И.Х. Наназашвили. – М.: Высш. шк., 1990. – С. 100 – 105.
6. Poon, C.S. Effects of steam curing on properties of recycled concrete aggregate / C.S. Poon, S.C. Kon // CPI- Concrete Plant International. – 2006. – № 6. – December. – S. 60 – 67.
7. Ахвердов, И.Н. Железобетонные напорные центрифугированные трубы / И.Н. Ахвердов. – М.: Изд-во литер. по стр-ву, 1967. – С. 43 – 44.

*Поступила 12.05.2008*