

УДК 691.22:669.162.144:006.354

*Б.А. Бондарев, д.т.н., профессор  
Ю.В. Штефан, к.т.н.*

*Липецкий государственный технический университет*

## **НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ КУБОВИДНОГО ЩЕБНЯ ИЗ ЛИТОГО ШЛАКА ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Обосновано получение из литого доменного шлака щебня улучшенной формы по кубовидности для использования в составах щебеночно-мастичных асфальтобетонов. Приведены теоретические предпосылки получения из литого доменного шлака щебня для щебеночно-мастичных асфальтобетонов, а также способы улучшения формы зерна, получаемого на современных конусных дробилках.*

**Ключевые слова:** *литой шлаковый щебень, шлаковый асфальтобетон, конусная дробилка, рассев, фракции, кубовидность.*

УДК 691.22:669.162.144:006.354

*Б.О. Бондарев, д.т.н., професор  
Ю.В. Штефан, к.т.н.*

*Липецкий державний технічний університет*

## **НАУКОВО-ПРАКТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ОТРИМАННЯ КУБОПОДІБНОГО ЩЕБЕНЮ З ЛИТОГО ШЛАКУ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА**

*Обґрунтовано отримання з литого доменного шлаку щебеню полішеної форми з кубоподібності для використання в складі щебенево-мастичних асфальтобетонів. Наведено теоретичні передумови отримання з литого доменного шлаку щебеню для щебенево-мастичних асфальтобетонів, а також способи полішення форми зерна, що одержується на сучасних конусних дробарках.*

**Ключові слова:** *литий шлаковий щебін, шлаковий асфальтобетон, конусна дробарка, розсів, фракції, кубоподібність.*

UDC 691.22:669.162.144:006.354

*B.A. Bondarev, ScD, Professor  
Yu.V. Shtephan, PhD  
Lipetsk State Technical University*

## **SCIENTIFIC AND PRACTICAL SUBSTANTIATION OF RECEPTION OF CUBE-LIKE RUBBLE FROM CAST SLAG OF BLAST FURNACE INDUSTRY**

*This paper is about reception improved cube-like shape rubble from blast furnace slag for using in asphalt concrete mixes. There are resulted theoretical preconditions of reception from cast domain slag rubble for asphalt concrete, and also ways of improvement of the form of the grain received on modern cone crushers.*

**Keywords:** *blast furnace slag; slag asphalt concrete; cone crusher; dispersion; fraction; cube-like.*

**Введение.** Одной из современных технологий, быстро внедряемых в дорожную практику, является щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА, SMA). Дорожное покрытие из ЩМА обладает повышенной устойчивостью к возникновению пластических деформаций и предпочтительно по условию обеспечения сцепления колеса с покрытием в течение всего планируемого срока эксплуатации.

При изготовлении щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси особое внимание обращается на качество щебня. Его количество доходит до 75% от массы инертных материалов в смеси. Щебень должен быть достаточно прочным и характеризоваться устойчивостью к истиранию и полированию, что обеспечивает рекомендованную шероховатость асфальтобетонного покрытия и безопасность дорожного движения. Но самое важное и труднодостижимое – это получение кубовидной формы зерна, позволяющего снижать расход вяжущего при неизменной прочности асфальтобетонов.

Однако горных пород, из которых получается наиболее качественный щебень, очень мало, и это чаще всего породы кислого типа, т.е. такие, которые содержат более 65% кварца ( $\text{SiO}_2$ ). Это приводит к необходимости использования адгезионных добавок в составах ЩМА на природных заполнителях, поскольку по адгезионным характеристикам к битуму кварц занимает предпоследнюю позицию в ряду природных минералов. Многолетний опыт использования в составах асфальтобетонов литого доменного шлакового щебня показывает высокие параметры адгезии, прочности, водостойкости, долговечности и стойкости к колееобразованию. К недостаткам или скорее к особенностям шлаковых асфальтобетонов следует отнести невысокие показатели макрошероховатости верхнего слоя после нескольких лет эксплуатации, слегка увеличенное количество битума в составах асфальтобетонов (оптимально 7% в составах Б-II), а также сравнительно высокое водопоглощение по сравнению с асфальтобетонами на традиционных природных заполнителях. Указанных недостатков, возможно, будет лишен разрабатываемый нами щебеночно-мастичный асфальтобетон, хорошо зарекомендовавший себя в условиях высоких динамических нагрузок от движущегося транспорта.

**Обзор последних источников исследований и публикаций.** Литой шлаковый щебень, применяемый в дорожных покрытиях, получаемый медленным послойным охлаждением огненно-жидких доменных кислых шлаковых расплавов ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК) в шлаковых траншеях, содержит до 90 – 95% кристаллической фазы, является наименее пористым и наиболее прочным по сравнению с другими способами охлаждения шлаковых расплавов [1, 2]. Такие шлаки применяются в качестве крупного заполнителя в составах бетонов и асфальтобетонов крупностью до 20 мм. При введении в

шлаковый расплав модифицирующих добавок марка по прочности при сдавливании в цилиндре достигает 900 – 1000 и выше. Эти шлаки наиболее устойчивы к самораспаду, так как имеют модуль основности не более 1, а содержание оксидов железа не превышает 2%. Это сводит к минимуму возможность известкового и железистого самораспада. Наиболее опасный для таких шлаков силикатный самораспад исключается кристалло-химическим способом стабилизации в составах шлаков  $C_2S$  введением в расплав синтетических апатитов (содержащих преимущественно моноалюминаты кальция). Это приводит к увеличению  $Al_2O_3$ , благоприятно влияющего на структуру и физико-механические показатели литого шлакового щебня. По своему химическому составу литой шлаковый щебень представлен в основном оксидами  $CaO$ ,  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ , приближающими его к кислым и нейтральным шлакам ( $M_o = 0,9-1,0$ ), устойчивым ко всем видам самораспада [1].

Отечественная и зарубежная практика, которая исследует форму кубовидности зерен щебня, позволяет получать на современных установках вторичного и третичного дробления исходной горной породы оптимальную форму, путем оптимизации работы дробильно-сортировочного оборудования. Оптимальным считается получение щебня фракции 5 – 20 мм 1-ой и 2-ой групп по количеству лещадных и игловатых частиц по требованиям нормативного документа [5], в то время как по рекомендациям норм [8] допускается до 15%. Практикой установлено, что изготовление щебня 1-ой группы (количество лещадных и игловатых частиц не более 10%) считается не оправданным по энергетическим затратам и образованию отсева более 50% исходной массы.

Следует отметить, что существуют альтернативные нормативным документам мнения магнитогорских ученых [3] относительно оптимальной формы зерен. Эти исследователи предлагают использовать не устаревшие определения ГОСТа 8269.0-97, что к зернам пластинчатой (лещадной) формы относятся зерна с соотношением толщины к длине более чем 1:3, а исходить из практики его получения на центробежно-ударной дробилке ДЦ-1,6 производительностью 150 т/ч. В работе [3] на основании статистической обработки показано, что максимальное количество зерен кубовидной формы, получаемое при измельчении порфирита фракции 5 – 20, имеет соотношение толщины к длине 1,5:1,65. Поскольку оценка формы зерна только по соотношению их линейных размеров не дает однозначного представления о кубовидности, авторы предлагают использовать так называемый показатель кубовидности ( $\Phi_k$ ), вычисляемый как отношение объема зерна (зерно рассматривается как правильный параллелепипед) к объему куба с ребром, равным толщине ребра. Тогда с учетом «правильности» кубовидного зерна с соотношением длины к толщине менее 2, показатель кубовидности должен быть не более 4.

Однако данная методика, как и многие другие, не позволяет идентифицировать шаровидную форму зерен. Получение такой формы зерна возможно при неправильной регулировке конусной дробилки, когда размеры зерна, подаваемого в рабочую камеру больше разгрузочной щели, подача недостаточная для образования завала, а броня установлена для мелкого дробления. Поэтому крайне важно правильно подбирать режимы дробления, чтобы получить требуемую форму зерна на выходе товарных фракций. Образование завала необходимо для того, чтобы дробление материала шло по материалу, а не броней по материалу, и преимущественно в нижней части конуса, где придается требуемая форма зернам щебня.

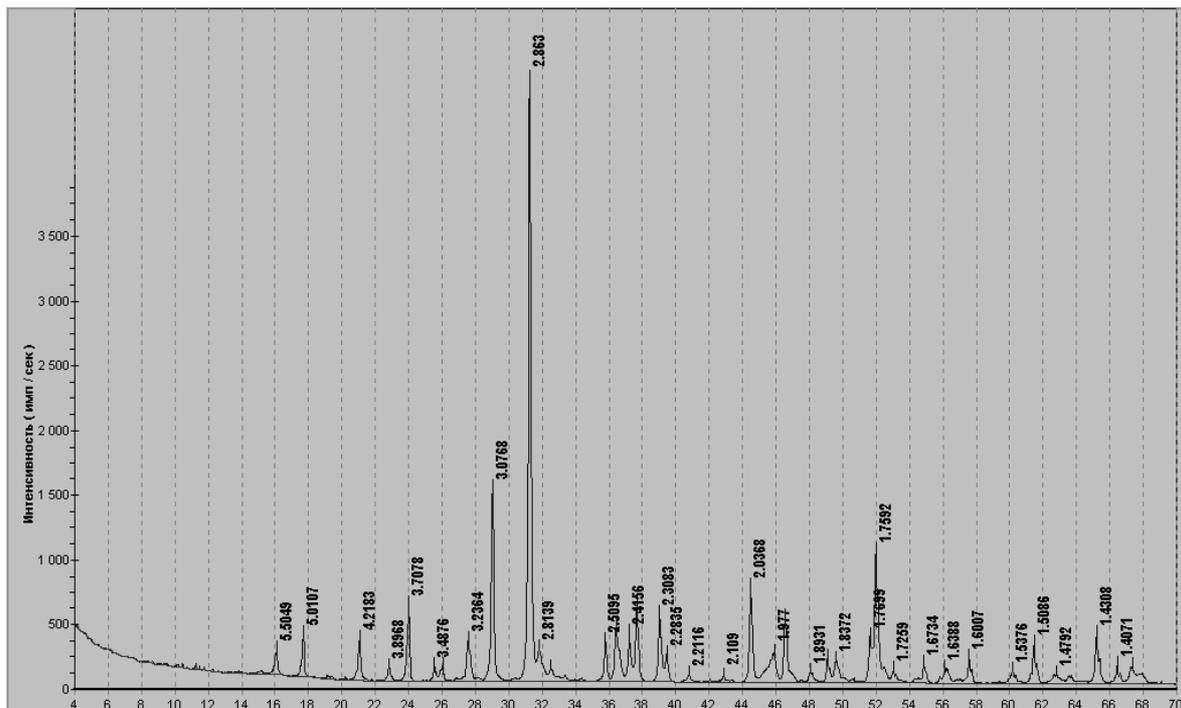
Практика получения щебня дроблением горных пород, даже склонных к лещадообразованию (песчаников), для производства ШМА в настоящее время показала возможность получения востребованной на рынке 2-ой группы по лещадности (не более 15% пластинчатых и игловатых частиц) технологической цепочкой вторичного и третичного дробления из дробилок, как правило, импортного производства щековой на первой стадии дробления и конусной на вторичном и третичном дроблении. До недавнего времени это казалось невозможным на отечественных конусных дробилках старого образца, которые были предназначены прежде всего для максимизации производительности переработки щебня, не заостряя внимание на качестве получаемого щебня и форме зерна. Наибольшей модернизации подверглись установки вторичного дробления для производства щебня с высокой кубовидностью [4]. Совершенствование производилось по следующим направлениям: обеспечение работы под завалом; увеличение частоты колебаний подвижного конуса; увеличение энерговооруженности и автоматизация их управления, а также оптимизация формы камеры дробления с использованием различных форм дробящих накладок. Благодаря этому стало возможным производить дробление под завалом, увеличить время прохождения обработки зерен за счет дробления материала по материалу. При этом на выходе из камеры дробления получается улучшенная форма зерна, низкое содержание лещадных частиц (1-я группа по лещадности) без общего снижения производительности дробильно-сортировочного оборудования.

**Выделение не решенных ранее частей общей проблемы.** Как видно из обзора литературы, нерешенными остаются проблемы получения зерен кубовидной формы шлакового щебня в щековых дробилках. Такая форма зерен, как было отмечено выше, позволяет не только снизить расход дорогостоящего битумного связующего, но и уменьшить колееобразование на дорожных покрытиях. Для получения формы зерен шлакового щебня в щековых или конусных дробилках преимущественно кубовидной формы требуется специальное регулирование режимов и параметров их работы, либо использование дробилок других видов, включая зарубежные.

**Постановка задачи.** Цель работы – повысить содержание в шлаковом щебне зерна кубовидной формы в условиях промышленного дробления литого шлакового щебня для повышения качества асфальтобетонов и получения возможности его применения в составах ЦМА.

**Основной материал и результаты.** Для выполнения поставленной задачи мы вначале исследовали структуру литого шлакового щебня с помощью петрографического и рентгенофазового анализа. Это связано с тем, что за последние годы значительно изменился химический состав доменных шлаков, в связи с углублением выработок железных руд, а также с введением различных легирующих добавок при выплавке чугуна. Так, в конце 70-х годов прошлого столетия исследователями [1], по данным петрографического и рентгеноструктурного анализа, установлено, что шлаковая пемза, получаемая быстрым охлаждением доменного шлака на Новолипецком металлургическом комбинате, включает мелилит, реже встречается псевдоволластонит, сульфиды (ольдгамид), двухкальциевый силикат, ранкинит, еще реже встречается мервинит.

В результате выполненных нами исследований литого шлакового щебня, получаемого медленным охлаждением в шлаковых траншеях кислых доменных шлаков ОАО «НЛМК», методами петрографического и рентгенофазового анализа (см. рис. 1) установлено, что они состоят преимущественно из геленита  $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ , а также возможно присутствие моноалюмината кальция.



**Рис. 1. Рентгенограмма литого щебня из доменного шлака ОАО «НЛМК»**

Такая, практически мономинеральная структура литого шлакового щебня свидетельствует о том, что при медленном охлаждении кислых доменных шлаков неустойчивые структуры типа мелилита и двухкальциевого силиката успевают перекристаллизоваться в устойчивую структуру геленита.

Она не обладает вяжущими свойствами и придает литому шлаковому щебню стабильность. При использовании такого щебня в составах обычных и асфальтовых растворов и бетонов сцепление с вяжущими веществами обеспечивается за счет их затекания в поверхностные поры заполнителей. Поэтому на основе таких заполнителей получают бетоны высокой прочности и стойкости к атмосферному воздействию в дорожных конструкциях и покрытиях.

Кроме того, были исследованы физико-механические свойства этого заполнителя. Установлено, что насыпная плотность шлакового щебня по требованиям норм [6] составляет  $1,19 \text{ г/см}^3$ , а истинная плотность –  $3,1 \text{ г/см}^3$ . Пустотность в насыпном состоянии находится в пределах 58 – 64% (в среднем 61,6%). В уплотненном состоянии она немного снижается, но остается достаточно высокой. По прочности при сдавливании в цилиндре литой шлаковый щебень имеет марки 900 – 1000, а содержание пылевидных частиц после дробления не превышает 4%.

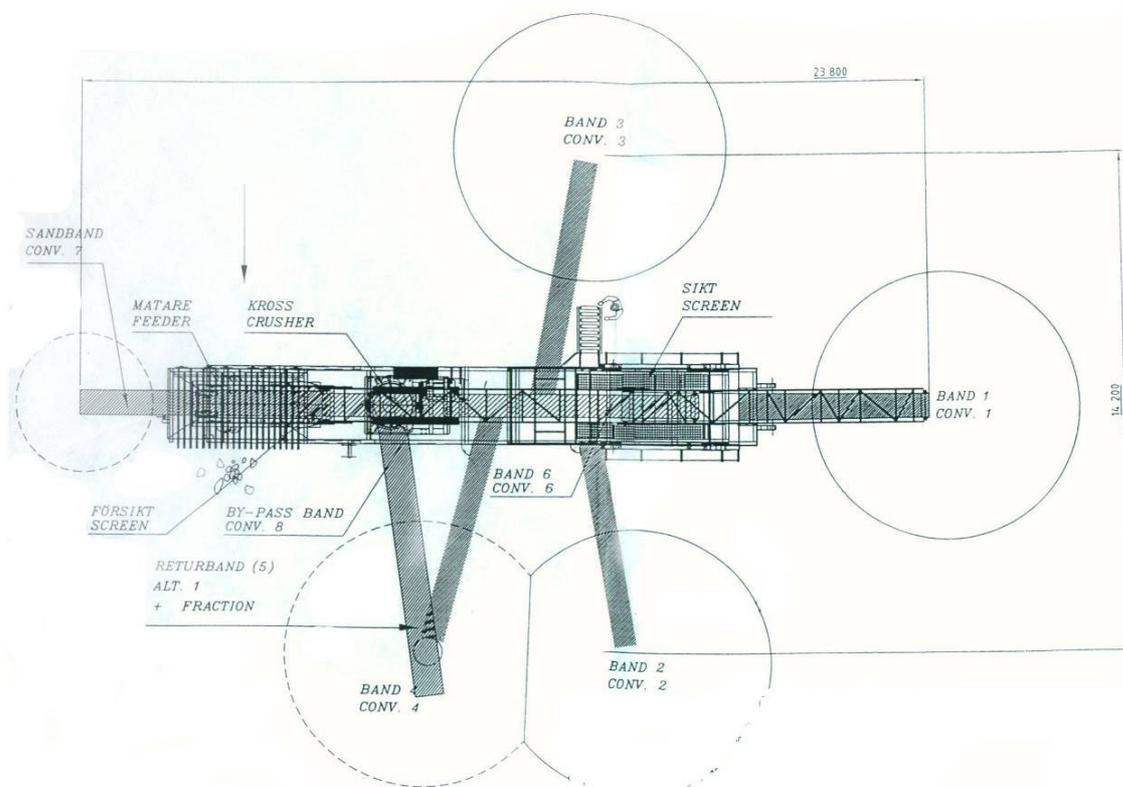
Таким образом, основные показатели свойств шлакового щебня доменного производства удовлетворяют все предъявляемые требования к материалу для получения улучшенной формы зерна после дробления. Поэтому основной задачей данной работы было оптимизировать процесс дробления крупных фракций литого шлакового щебня 40 – 70 мм с целью получения кубовидной формы зерен фракция 5 – 15 мм с минимальным количеством отсева шлакового песка. Размер пробной партии в производственных условиях был ограничен целесообразными пределами при получении опытной партии кубовидного щебня для проведения лабораторных исследований полученного материала и подбора составов ЩМА на шлаковом щебне.

Для оценки качества раздробленного материала по рекомендациям нормативного документа [5] мы приняли следующую классификацию щебня по мере убывания качества и возрастания количества лещадных и игловатых зерен в смеси фракций: 1-я группа по лещадности – до 10% количества зерен лещадной и игловатой формы; 2-я группа – от 10 до 15%; 3-я группа – более 15%. Требования действующего ГОСТа на шлаковый щебень по данному показателю значительно мягче: наивысшим считается качество получаемого кубовидного щебня с содержанием лещадных и игловатых частиц не более 15%; вторая категория допускает 15 – 25% лещадки и третья категория – 25 – 35%. Поэтому в дальнейших исследованиях ориентировка была на более строгие условия по качеству выпускаемого щебня из плотных горных пород, поскольку этого требует рынок

сбыта. По нашему мнению, ориентироваться надо на получение кубовидного щебня из литого доменного шлака более строгих требований к форме зерна, чем указанные границы в нормах [7], тогда материал будет востребован наряду с природными заполнителями при производстве ЩМА.

Выбор дробильно-сортировочного оборудования для наших испытаний был обусловлен возможностью практического получения кубовидного щебня на аналогичных по прочности и истираемости материалах, в частности на граните. Для этого были использованы новые зарубежные дробилки. Современные конусные дробилки Hydrocone производства шведской фирмы Sandvik хорошо зарекомендовали себя у отечественных производителей кубовидного щебня для дорожного строительства, а, как известно, именно дорожные ГОСТы предъявляют повышенные требования по содержанию частиц пластинчатой (лещадной) формы.

Одной из многочисленных особенностей данного оборудования является возможность изменения эксцентриситета, позволяющая регулировать качество готового продукта в зависимости от исходной породы по прочности и гранулометрическому составу. Представленная на рис. 2 схема конусной дробилки Sandvik Roadclassifier RC-3800 была отрегулирована на работу с гранитным щебнем при разгрузочной щели 12 мм, что позволяло получать 2-ю группу по показателю лещадности смеси фракций 5 – 10 и 10 – 15 мм, имея на входе фракцию 15 – 40.



**Рис. 2. Технологическая схема дробления на дробилке Sandvik RC 3800:  
Band 1 – отсев фракции 0 – 5 мм; Band 2 – выход фракции 5 – 10 мм;  
Band 3 – выход фракции 10 – 15 мм**

При этом на входной бункер подают отсев от предыдущей стадии дробления (щековой дробилки) максимальной крупностью не более 70 мм. В рабочую камеру дробления попадает камень фракции крупнее 15 мм для обеспечения максимальной производительности установки вторичного дробления. Отсев мельче 15 мм сразу подается по конвейеру 4 на грохот, минуя камеру дробления, и после грохочения по соответствующим конвейерам на выходы, обозначенные BAND 1, 2, 3 на рис. 2. При этом в рабочую камеру попадает только фракция +15 мм. Поэтому недостатком данной дробилки является возможность попадания в товарные фракции частиц лещадной или игловатой формы размером 5 – 15 мм, имеющих на входе после предыдущих стадий дробления.

Дальнейшего улучшения формы зерна на данной конусной дробилке или аналогичных модернизированных моделях можно добиться подачей сначала материала в рабочую камеру, а затем на рассев по фракциям, поскольку при дроблении материала по материалу исходные лещадные и игловидные частицы подвергаются дроблению, позволяя получить правильную форму зерна. Контрольное грохочение с подачей части раздробленного готового продукта обратно в рабочую камеру также способствует улучшению формы зерна, обеспечивая равномерную загрузку и работу подвижного конуса под завалом.

Для достижения поставленной цели по получению опытной партии кубовидного щебня в производственных условиях был взят щебень, поступающий после первичного дробления щековой дробилкой литого доменного шлака цеха шлакопереработки ОАО «НЛМК» фракция 40 – 70 мм. Как показал эксперимент, материал содержал много крупных зерен. Присутствовали отдельные куски размером 90 мм и более (по требованиям норм [7] содержание таких частиц допускается до 5%), которые сортировались в отвал защитой от негабаритных кусков. Наличие металлических включений вызывало остановку дробилки благодаря чувствительной автоматике. Это требует металлосепарации перед началом процесса дробления, чтобы исключить попадание металла в готовый продукт. По ГОСТ на шлаковый щебень допускается наличие в нем включений металла не более 5% по массе. Результаты определения зернового состава сведены в таблицу 1, откуда видно, что по зерновому составу полученный щебень близок к заявленным фракциям, однако требуется дополнительная регулировка установленного зазора для получения более точного соответствия границам, указанным в ГОСТах.

По содержанию частиц игловатой и лещадной формы полученные фракции относятся соответственно: к 1-й группе – фракция 10 – 15 мм и к 3-ей группе – фракция 5 – 10 мм – среднее значение содержания лещадных частиц 16,81% (близко к границе 2-ой группы). Как видно на рис. 3, пылеобразование при работе дробилки на шлаковом щебне было в пределах нормы, штатной системы пылеулавливания оказалось достаточно.

**Таблица 1. Зерновой состав кубовидного щебня из доменного шлака**

| Наименование показателей                      | Размеры частиц крупнее, мм |               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                                   |
|---|----------------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------------|
|   | 20                         | 17,5          | 15              | 12,5            | 10              | 7,5             | 5               | 2,5             | < 2,5                             |
| Частные/полные остатки фракция 10–15          | 0                          | 0,61<br>/0,61 | 11,51<br>/12,12 | 37,67<br>/49,79 | 38,96<br>/88,75 | 8,35<br>/97,1   | 1,3<br>/98,4    | -               | 1,6<br>/100                       |
| Частные/полные остатки фракция 5–10           | -                          | -             | -               | 0               | 6,17<br>/6,17   | 42,01<br>/48,18 | 37,54<br>/85,72 | 10,86<br>/96,58 | 3,42<br>/100                      |
| Полные остатки * [7]                          | 0 / 0                      | 0-0,5<br>/0   | 0-10<br>/0      | 30-80<br>/0-5   | 90-100<br>/0-10 | - /30-<br>80    | - /90-<br>100   | - / -           | - / -                             |
| Полные остатки * [5]                          | 0 / 0                      | 0-0,5<br>/0   | 0-10<br>/0      | 30-60<br>/0-5   | 90-100<br>/0-10 | - /30-<br>60    | - /90-<br>100   | - / -           | - / -                             |
| Содержание частиц* игловидной и лещадной форм | - / -                      | - / -         | 7,5 / -         | 4,73 /          | 9,5<br>/14,98   | -<br>/17,65     | -<br>/16,17     | - / -           | - / -<br>ср.знач<br>7,2<br>/16,81 |

\* в числителе приведены значения для фракции 10 – 15 мм, в знаменателе – для фракции 5 – 10 мм.



**Рис. 3. Пылеобразование при дроблении шлакового щебня в пределах допустимого**



**Рис. 4. Форма и размер зерен шлакового щебня в центре рисунка идентичны таковым, как на гранитном щебне по краям фото**

Однако на опытной партии добиться работы дробилки под постоянным завалом шлакового щебня пока не удалось из-за сильной закругленности подаваемого на входной бункер материала. Это привело к тому, что дробление шло преимущественно в верхней части конуса, а в нижней, где придается требуемая форма щебню, дробления почти не было, и раздробленный в верхней части конуса щебень сразу проходил через разгрузочную щель.

**Выводы.** Как показали практические исследования, двух стадий дробления в данном виде дробилки для получения кубовидной формы зерна из литого шлакового щебня не достаточно и необходима промежуточная стадия, позволяющая получить фракцию 15 – 40 мм, которая обеспечивала бы работу под завалом на третьей стадии дробления. Это позволит добиться стабильного содержания лещадных частиц не выше 10 – 12% во всех заявленных товарных фракциях крупного заполнителя из литого шлакового щебня для получения зерен преимущественно кубовидной формы.

Таким образом, научно обоснована и апробирована возможность получения кубовидного щебня из литого доменного шлака с полученным усредненным II классом по количеству лещадных зерен. Дальнейшее улучшение формы зерна возможно при промежуточном дроблении.

Авторы выражают глубокую благодарность за помощь в проведении экспериментов техническому директору группы компаний «Рецикл материалов» Семенову С.В. и генеральному директору ЗАО «Тихий Дон» Волосных Н.И. Работы проводились при технической поддержке ОАО «Автобан-Липецк».

#### *Литература*

1. Спиваков, Н.Я. Шлакопемзобетон в индустриальном строительстве. [Текст] / Н.Я. Спиваков, В.С. Грызлов, С.Е. Александров. – Воронеж: ЦЧКИ, 1979. – 115 с.
2. Бондарев, Б.А. Асфальтобетоны на шлаковых заполнителях [Текст] / Б.А. Бондарев, Ю.В. Штефан [и др.]. – Липецк: ЛГТУ, 2007. – 183 с.
3. Оценка истинной формы зерна высококачественного щебня [Текст] / В.Н. Кушка, М.С. Гаркави, С.В. Подифоров, Е.С. Спиридонов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nsp.su> (дата обращения: 15.09.2009).
4. Семенов, С.В. Дробилки раздробленное. Выбор дробильного оборудования для производства кубовидного щебня. [Текст] / С.В. Семенов // Строительная техника и технологии. – 2008 – № 6. – С. 62 – 66.
5. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 36 с.
6. ГОСТ 5578-94. Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 36 с.
7. ГОСТ 3344-83. Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства [Текст]. – М.: Изд-во стандартов России, 1983. – 16 с.
8. ГОСТ 31015-2002. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные [Текст]. – М.: Изд-во стандартов России, 2002. – 16 с.

*Надійшла до редакції 16.09.2013  
© Б.А. Бондарев, Ю.В. Штефан*