

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 622.362-023.814:621.926.34(045)(476)

**ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО КУБОВИДНОГО ЩЕБНЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНОГО ДРОБЛЕНИЯ**

Таболич А.В., Воробьев В.В., Иванов Е.Н., Бондаренко С.Н. (Открытое акционерное общество «НПО Центр», г. Минск, Беларусь)

*В статье приведен анализ результатов практического использования дробилок центробежно-ударного типа по сравнению с дробилками других типов при получении высококачественного кубовидного щебня. Проведены исследования по дроблению гранита и порфирита на центробежно-ударных и конусных дробилках различных производителей. Проведено сравнение полученных технологических параметров их работы и качественных параметров полученных материалов.*

**Введение**

Горное производство, как одно из наиболее энергоемких в народном хозяйстве, существенным образом влияет на энергетический баланс страны. Уровень энергопотребления во времени возрастает, он определяется как увеличением объемов добычи и переработки полезных ископаемых, использованием современных мощных машин и механизмов, так и изменением технологии переработки полезных ископаемых. Одной из важнейших проблем при переработке полезных ископаемых является повышение эффективности работы дробильного оборудования.

Особенно способ дробления важен при получении минеральных материалов, для которых форма частиц является одним из основных параметров качества. Ярким примером такого материала является щебень на основе различного минерального сырья.

Щебень – основной продукт дробления горных пород РБ, широко используется в качестве заполнителей в составе бетона и асфальтобетонных смесей.

Качество щебня, как крупного заполнителя (бетона), определяют такие его показатели, как зерновой состав, пустотность, форма и прочность зерен, содержание зерен слабых пород, истинная, средняя и насыпная плотность, пористость.

В зависимости от целевого применения в строительной отрасли, к гранулометрическому и зерновому составу и прочностным характеристикам (основного) продукта дробления горных пород – щебню – предъявляются требования, которые регламентируются соответствующими нормативными документами (ГОСТы, СТБ, ТУ и др.).

В частности, очень важным нормируемым показателем свойств, определяющим эффективность использования щебня в составе бетона, является его прочность, фракционный состав и соотношение содержания в щебне зерен кубовидной, лещадной и игловатой форм.

Наиболее плотную упаковку (в составе) бетона можно получить при использовании щебня, в котором содержание зерен пластинчатой и игловатой формы не превышает 15-20 %, а массовая доля фракций с содержанием зерен кубовидной формы составляет не менее 50 %. Наличие в щебне зерен пластинчатой и игловатой форм приво-

дит к увеличению межзерновой пустотности в бетонной смеси в силу специфики геометрии строения таких зерен, для которых ширина (толщина) меньше чем длина в 3 и более раз. Для зерен кубообразной формы длина должна превосходить ширину и толщину не больше чем в 2 раза.

Прочность щебня в качестве заполнителя для бетона определяется его маркой и характеризуется таким (нормируемым) показателем, как дробимость. Дробимость, определяющая марку щебня по прочности, отражает сопротивление зерен щебня воздействию раскалывающих усилий, передаваемых смежным зернам в точках их касания, и непосредственным образом связана с наличием в объеме материала микротрещин и слабых зерен (анизотропия структурных элементов).

Дробимость определяется особенностями внутреннего деформирования и механизмами разрушения конкретной горной породы, при этом определяющими факторами являются специфические особенности строения таких неоднородных твердых тел [1].

Прочность щебня, являющаяся одной из основных характеристик для определения его пригодности в качестве заполнителя, должна быть не менее чем в 1,5-2 раза выше прочности (целевого) бетона. Кубовидные зерна обладают прочностью большей, чем зерна пластинчатой и игловатой формы, поэтому использование в составе бетона щебня с высоким содержанием зерен кубовидной формы более предпочтительно.

В щебне, таким образом, лимитируется содержание зерен пластинчатой и игловатой формы.

В настоящее время в ОАО «НПО Центр» накоплен большой экспериментальный материал по исследованию особенностей зернового состава и прочностных характеристик продуктов разрушения различных горных пород (доломита, гранита, порфирита и т.д.) в процессе дробления при различных схемах приложения (воздействия) разрушающих усилий.

Принято считать, что поскольку в процессе дробления разрушаются преимущественно компоненты с большим содержанием слабых зерен и наиболее трещиноватые компоненты, то получаемый щебень будет представлен фракциями с меньшим содержанием трещин и слабых разностей горной породы, т.е. в полученном дискретном материале прочность структурных единиц будет выше.

Прочность щебня зависит от состава, структуры и содержания зерен слабых разностей измельчаемой горной породы. От схемы приложения механических воздействий зависит эффективность управления технологическими характеристиками целевого продукта (щебня), т.к. дробление лещадных зерен также обеспечивает получение щебня с высоким содержанием кубовидных зерен (рисунок 1).

Рост объемов строительства и требований к качеству строительных материалов в настоящее время обусловил повышение спроса на кубовидный щебень, ведь при изготовлении бетонных и асфальтобетонных дорожных покрытий, а также строительных конструкций большое значение имеет прочность и форма частиц наполнителя. Приближение формы частиц к правильной кубовидной, а также уменьшение доли частиц с ослабленной формой увеличивает прочность и долговечность бетонных и асфальтобетонных конструкций. Особенно большое значение имеет форма мелкого щебня размером 3-5, 5-10,

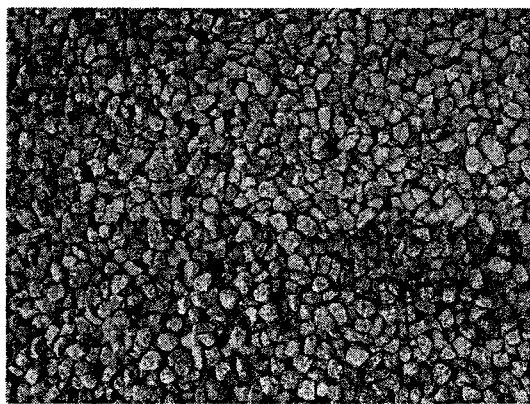


Рисунок 1 – Кубовидный щебень, полученный на дробилке ДЦ-1,6

10-15 мм, применяемого для верхнего упрочняющего слоя дорожного покрытия, определяющего долговечность и качество дорог.

Использование кубовидного щебня при дорожном строительстве позволяет:

- снизить расход щебня на 15-20 % и связующих (битум, цемент) на 30-40 %;
- приблизить коэффициент уплотнения асфальтобетонной смеси к единице, что обеспечивает не только долговечность, но и морозостойкость дорожного покрытия;
- снизить время и трудозатраты по укладке асфальтового покрытия до 50 %;
- увеличить срок службы дорожного покрытия;
- увеличить коэффициент сцепления до 0,65-0,71.

### **Преимущества использования дробилок центробежно-ударного типа**

Для получения щебня фракций, используемых в дорожном строительстве, обычно применяются дробилки конусные, роторные и центробежно-ударные.

Конусные дробилки обеспечивают получение мелкого щебня с содержанием зерен лещадной формы от 15 % и выше (реально выше 20 %). Роторные дробилки обеспечивают получение щебня с содержанием зерен лещадной формы (т.е. частиц с соотношением максимального к минимальному геометрическому размеру 1:3 и более) до 15 % на мягких и средней твердости породах с прочностью ниже 100 МПа. При более прочных породах резко снижается производительность и увеличивается износ рабочих органов роторных дробилок.

Задаче получения щебня мелких фракций с содержанием зерен лещадной формы до 10 % из материалов с прочностью на сжатие до 300 МПа в полной мере соответствуют центробежно-ударные дробилки. В центробежной дробилке разрушение материала происходит за счет удара материала об отбойные элементы при разгоне его в поле центробежных сил во вращающемся ускорителе. Это позволяет:

- значительно увеличить степень дробления и расширить диапазон регулирования содержания фракций в продукте;
- получать стабильный грансостав дробленого продукта не зависящий от износа футеровочных элементов;
- повысить прочность конечного продукта за счет уменьшения количества зерен с ослабленной формой и снижения трещиноватости зерен.

Существует распространенное мнение, что применение ударных дробилок приводит к резкому увеличению выхода отсева. Однако это не подтверждается практикой использования дробильного оборудования. Более того, при подборе оптимальных скоростей вращения ротора на ударных дробилках, выход отсева на них ниже, чем на конусных дробилках. Усредненные гранулометрические составы, полученные при дроблении горных пород на центробежно-ударных и конусных дробилках, представлены на рисунках 2 и 3.

Как видно из приведенных графиков типовых гранулометрических составов, конусная дробилка обеспечивает крупность готового продукта менее 10 мм при размере ширины разгрузочной щели равной 6 мм. При этом соотношение фракций 0-4 мм и 4-10 мм составляет 65 % к 35 %. Для центробежно-ударной дробилки, при переработке твердых руд, соотношение фракций 0-4 мм и 4-10 мм составляет 55 % к 45 %.

Для крупности готового продукта до 20 мм выхода продуктов 0-4 и 4-20 мм составляют 40 % к 60 % для конусной дробилки и 30 % к 70 % для ударной дробилки.

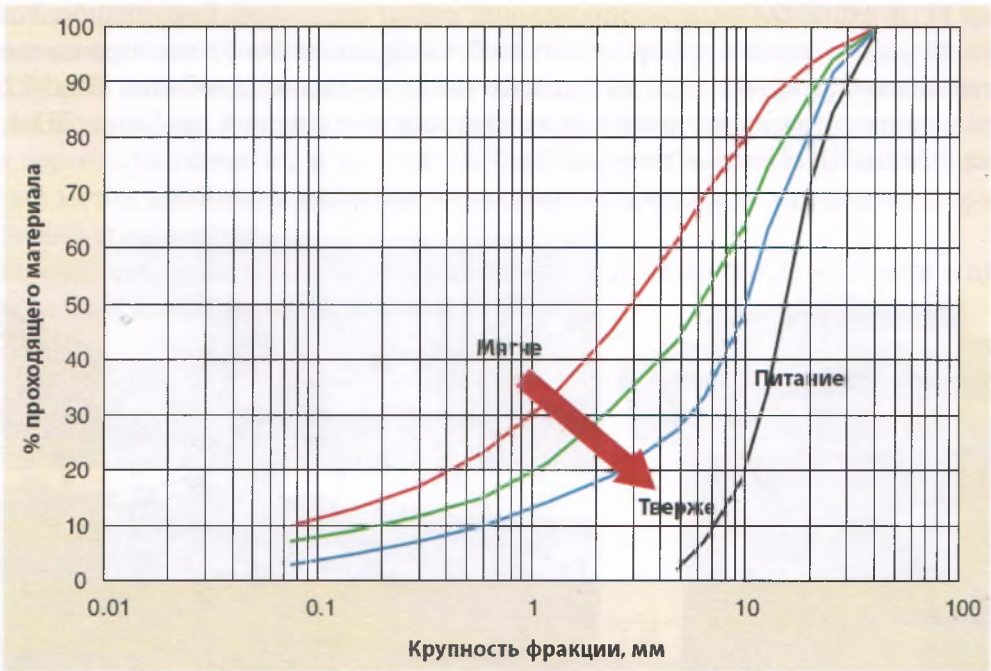


Рисунок 2 – Усредненные гранулометрические составы исходного материала (питания) и продуктов дробления на ударно-центробежной дробилке

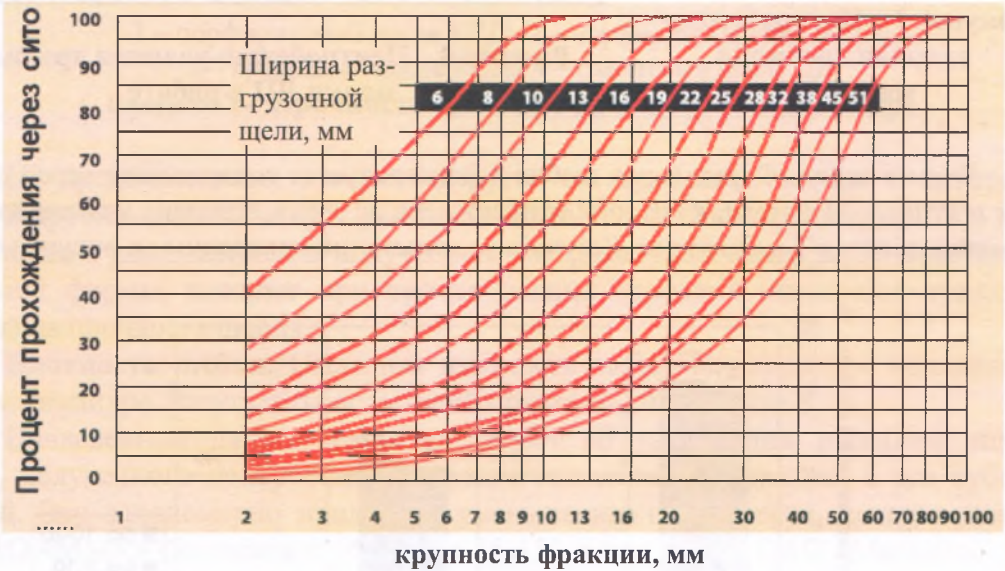


Рисунок 3 – Типовые гранулометрические составы продуктов разгрузки конусных дробилок (Финляндия)

### Исследования

Для подтверждения высокой эффективности применения центробежно-ударных дробилок при производстве кубовидного щебня из различных видов горных пород были проведены исследования влияния центробежно-ударного способа дробления на качество щебня. В качестве исходного материала использован гранитный щебень произ-

водства ГОП АО «ММК», представляющий собой смесь фракций с наибольшей крупностью 40 мм, а также порфириновый щебень фракции 20-40 мм, произведенный на Гранитном карьере ОАО «Магнитострой» после конусной дробилки КСД-2200. Указанный исходный материал дробился на центробежно-ударной дробилке ДЦ-1,6 производства ОАО «НПО Центр» (рисунки 4 и 5).

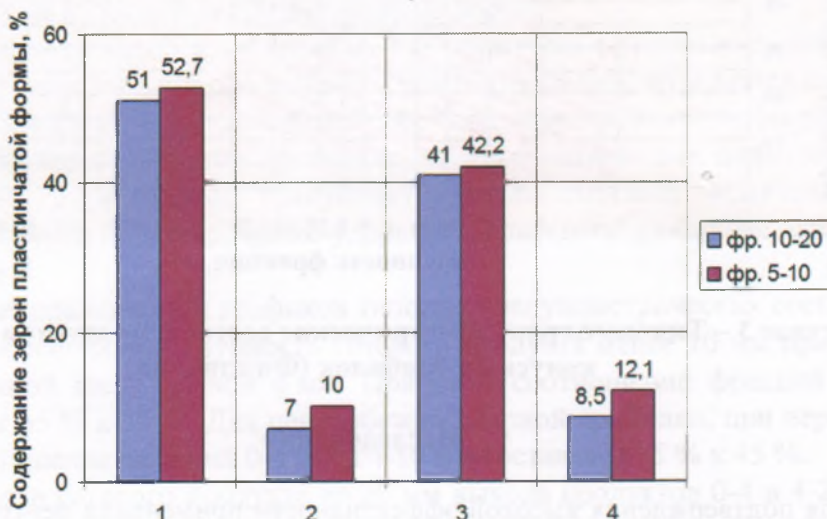


Рисунок 4 – Центробежно-ударная дробилка марки ДЦ



Рисунок 5 – Центробежно-ударная дробилка марки ДЦ в работе

**Форма зерен.** Форма зерен щебня характеризуется содержанием зерен пластинчатой и игловатой формы, к которой относятся такие зерна, толщина или ширина которых менее длины в 3 и более раз. Результаты испытаний приведены на рисунке 6.

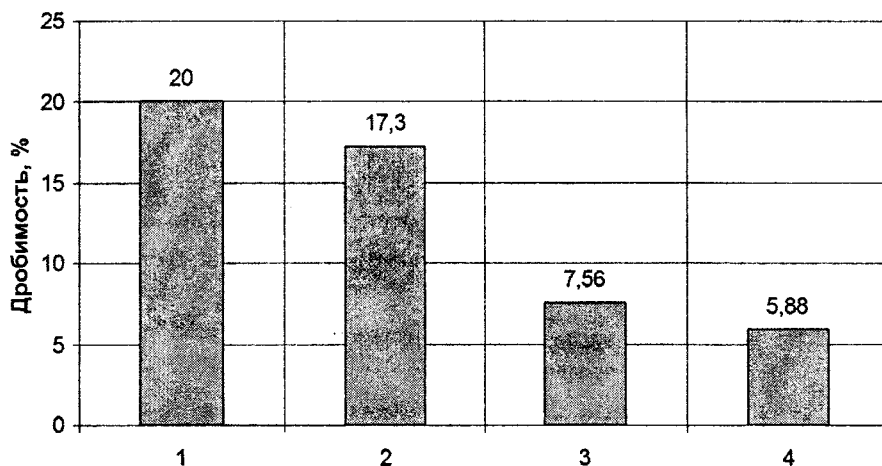


1 – порфириновый после КСД; 2 – порфириновый после ДЦ;  
3 – гранитный после КСД; 4 – гранитный после ДЦ

Рисунок 6 – Влияние способа дробления на содержание зерен пластинчатой формы

Из данных рисунка 6 видно, что исходные материалы по содержанию зерен пластинчатой и игловатой формы не удовлетворяют требованиям стандарта. В дробленом материале содержание указанных зерен свидетельствует о том, что полученный материал по форме относится к кубовидному щебню. Исходя из представленных данных, можно заключить, что в результате центробежно-ударного дробления содержание в материале зерен пластинчатой и игловатой формы уменьшается в среднем в 6 раз, т.е. указанный метод дробления является эффективным средством улучшения формы зерен и повышения его качества.

**Прочность щебня.** Прочность щебня определена по его дробимости в цилиндре. Результаты испытаний представлены на рисунке 7.



1 – порфириновый после КСД; 2 – порфириновый после ДЦ;  
3 – гранитный после КСД; 4 – гранитный после ДЦ

**Рисунок 7 – Прочность щебня по дробимости в цилиндре**

Из представленных данных следует, что дробление щебня в центробежно-ударной дробилке способствует увеличению его прочности в среднем от 16 % до 29 %. Это связано с уменьшением в получаемом материале количества зерен пластинчатой и игловатой формы, которые при прочих равных условиях оказывают существенное влияние на прочность щебня.

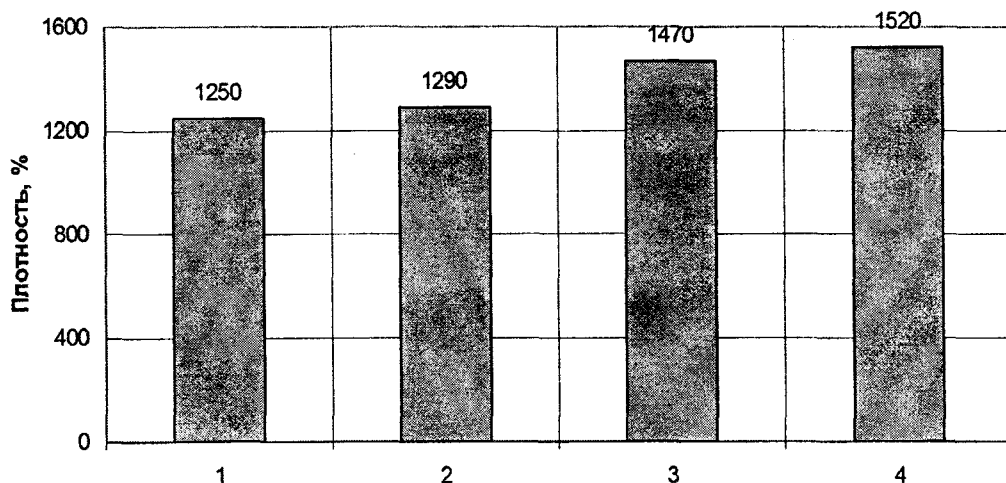
**Плотность щебня.** Насыпная плотность щебня определялась взвешиванием в мерном цилиндре. Результаты испытаний приведены на рисунке 8.

Приведенные данные свидетельствуют об увеличении насыпной плотности щебня, полученного центробежно-ударным способом, что связано с его кубовидной формой. Это закономерно привело к уменьшению пустотности, которая для щебня ГОП АО «ММК» снизилась с 46,8 % до 45,6 %, а для щебня ОАО «Магнитострой» – с 48,1 % до 46,2 %.

**Сравнение технологических показателей дробления.** Кроме сравнения качества готовых продуктов центробежные и конусные дробилки были оценены и по технологическим параметрам их работы и экономической эффективности использования.

В ходе сравнения был выявлен ряд недостатков конусных дробилок:

- высокая материалоемкость;
- высокие капитальные затраты;
- потребность в мощных фундаментах;
- высокие затраты на ремонт;
- высокий показатель лещадности зерен дробленого продукта.

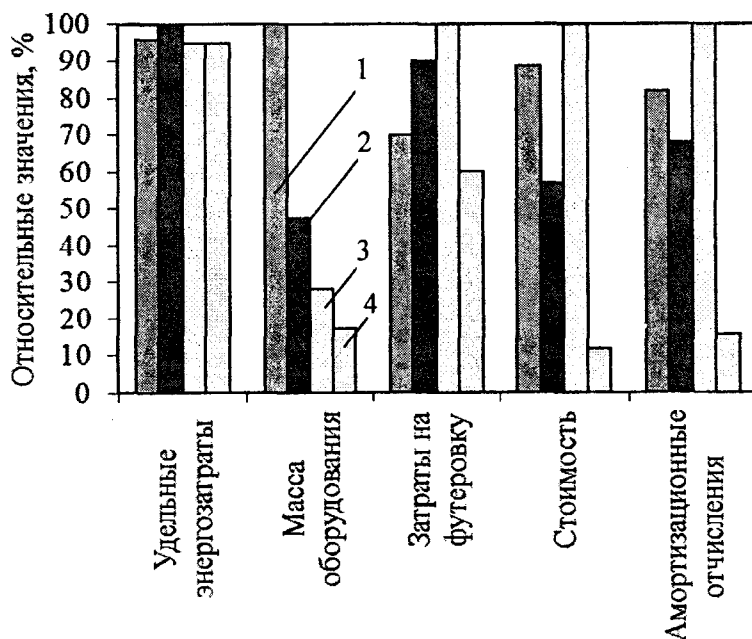


1 – порфиритовый после КСД; 2 – порфиритовый после ДЦ;  
3 – гранитный после КСД; 4 – гранитный после ДЦ

**Рисунок 8 – Насыпная плотность щебня**

Указанных выше недостатков лишены центробежно-ударные дробилки с вертикальным валом. Центробежно-ударные дробилки не требуют для своей установки фундаментов. Использование в этих дробилках принципа самофутеровки наиболее нагруженных элементов позволяет значительно повысить межремонтный ресурс и снизить затраты на ремонт и обслуживание. Усредненные экономические параметры установки и эксплуатации для центробежных и конусных дробилок различных производителей представлены в таблице и на рисунке 9.

Здесь приведены усредненные параметры, полученные с 2009 по 2012 гг. на базе производств различных предприятий России, Беларуси, Украины, Казахстана, Вьетнама и др.



1 – дробилка конусная КМД-2200Т7-Д (Россия); 2 – дробилка конусная МССS1680 (Тайвань);  
3 – дробилка конусная CN660 (Швеция); 4 – дробилка центробежно-ударная ДЦ-1,6 (Беларусь)

**Рисунок 9 – Сравнение затрат дробления на различных дробилках**

Таблица – Сравнительные характеристики дробилок мелкого дробления

Показатели	Дробилки конусные (страны изготовители)			Дробилка центробежно-ударная
	Россия	Тайвань	Швеция	ДЦ-1,6, Беларусь
производительность по продукту 0-20 мм, т/ч	250	180	200	200
мощность электропривода, кВт	400	300	315	315
энергозатраты на тонну продукта, кВт/т	1,6	1,67	1,58	1,58
масса оборудования, т	93	44	26	16
лещадность зерен готового продукта, %	18-22	20-25	18-22	2-10
затраты на футеровку, % отн.	70	90	100	60
нормативный срок службы, лет	13	10	12	9
амортизационные отчисления, \$ США в год	115 385	96 000	140 833	22 222
ориентировочная стоимость, \$ США	1 500 000	960 000	1 690 000	200 000

### Вывод

Представленные в статье результаты исследований и обобщения опыта промышленной эксплуатации оборудования показывают, что использование технологии центробежно-ударного дробления при производстве крупного заполнителя бетона (щебня) обеспечивает получение высококачественного продукта, полностью отвечающего требованиям нормативных документов строительной отрасли. Показано, что при производстве щебня уже при первом интенсивном (ударном) механическом воздействии обеспечивается выделение фракций щебня с максимально высоким содержанием фракций с кубовидными зёрнами, при этом дробление проходит с уменьшением в продукте измельчения содержания фракций породы с пониженной прочностью за счет разрушения слабых зёрен.

Одним из важных преимуществ процесса центробежно-ударного дробления является избирательность (селективность), которая реализуется в процессе ударного воздействия за счет разной степени дробимости компонентов измельчаемой горной породы. Это дает возможность управлять качеством щебня путем подбора режимов работы центробежно-ударной дробилки.

Анизотропия, обусловленная спецификой структуры и текстуры материала в результате присутствия включений слабой породы, отрицательно сказывается на качестве крупного заполнителя бетона. В процессе ударного дробления происходит уничтожение анизотропии путем «упрочнения через разрушение» слабых связей.

Показана возможность с помощью центробежно-ударных дробилок целенаправленного управления и регулировки таких показателей щебня, как прочность зёрен,



фракционный состав, соотношение содержания в щебне зерен кубовидной, лещадной и игловатой формы, содержание зерен слабых пород.

В целом можно сделать вывод, что при задаче получения высококачественного кубовидного щебня эффективно применять именно дробилки центробежно-ударного принципа действия. Анализ приведенных технологических и экономических параметров их использования показывает, что центробежно-ударные дробилки по сравнению с конусными дробилками при сходных показателях по производительности и энергозатратам значительно более выгодны по выходу отсева дробления, по капитальным и эксплуатационным затратам, а так же отличаются высокими показателями качества готового продукта.

Описанный в данной статье положительный опыт применения технологии центробежно-ударного дробления материалов является далеко не единственным. В условиях растущего спроса на качественные строительные материалы внедрение подобных технологий представляется особенно перспективным.

#### Список использованных источников

1. Баклашов, И.В. Деформирование и разрушение породных массивов. Нормативные документы, регламентирующие прочность / И.В. Баклашов. – М.: Недра, 1988. – 271 с.

---

**Tabolich A.V., Vorobyov V.V., Ivanov E.N., Bondarenko S.N.**

#### **Production of high-quality cube-shaped crushed stone by using the technology of impact centrifugal crushing**

*The article gives the analysis of the results of practical application of impact centrifugal crushers in comparison with crushers of other types when producing high-quality cube-shaped crushed stone. The investigations have been carried out on granite and porphyrite crushing by impact centrifugal and conical crushers of different producers. The obtained process-dependent parameters of their operation and qualitative parameters of the obtained materials have been compared.*

Поступила в редакцию 12.03.2014 г.