

УДК 622.734:001.891.53

Павлиненко О. И.,  
к.т.н. Левченко Э. П.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА РАСКАЛЫВАНИЕ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ ПРЯМЫМ СТЕСНЕННЫМ УДАРОМ

*Представлены результаты исследования влияния ударного воздействия при измельчении стальной дроби. Определены минимальные энергозатраты с помощью процесса раскалывания дробинки на экспериментальной установке ударного действия.*

**Ключевые слова:** эксперимент, стальная дробь, раскалывание, энергозатраты, затвердевание, дефекты, прямой стесненный удар.

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

В настоящее время в производственных циклах многих промышленных предприятий используются технологические операции по очистке отливок и заготовок, осуществляемые в дробеметных или дробеструйных камерах с применением чугунной или стальной дроби. Особенно эффективно для выполнения этих операций зарекомендовала себя колотая стальная дробь [1], в связи с чем ежегодная потребность в ней возрастает. Отсюда возникла острая проблема в разработке принципиально новых машин для дробления, обладающих повышенной производительностью по выходу годного продукта и низкими удельными энергозатратами на дробление. Последнее очень важно, т. к. процесс дробления и измельчения является одним из самых энергоемких.

Главным вопросом теории измельчения является установление связи между затратами энергии и размерами конечных и начальных кусков материала, их формой, взаимным расположением, физико-механическими свойствами и т. п. В связи с большим количеством влияющих факторов существующие теории измельчения характеризуют энергозатраты в общем виде с учетом лишь наиболее важных параметров процесса и материала.

Затраты энергии, нагрузки на элементы измельчителей и качество исходного про-

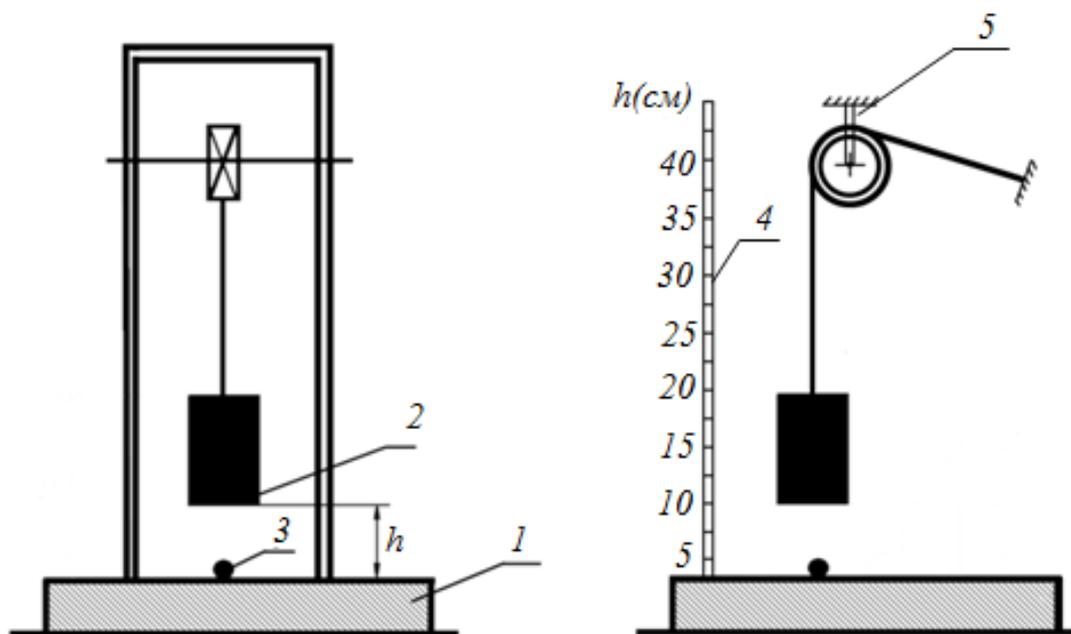
дукта зависят от твердости, прочности, хрупкости, упругости, абразивности и плотности разрушаемых материалов.

**Постановка задачи.** Задачей данной работы является экспериментальное определение энергозатрат при раскалывании стальной дроби.

**Изложение материала и его результаты.** Для проведения эксперимента была разработана и собрана экспериментальная установка, отличающаяся простотой конструкции и эксплуатации, а также малой металлоемкостью (рис. 1).

Испытания основаны на принципе измерения энергии, затраченной на разрушение образца стальной дроби. Сопrotивляемость стальной дроби ударному воздействию характеризует их хрупкость или способность сопротивляться динамическим напряжениям. Сущность метода заключается в определении минимальной высоты падения груза, при которой образец разрушается под действием прямого стесненного удара.

Отобранная по размеру дробь устанавливается в центр падения груза, где подвергается воздействию падающего рабочего органа (груза), массу которого можно увеличивать или уменьшать в зависимости от размера или количества раскалываемых частиц. При этом определяющими являются напряжения сжатия, под действием чего материал дроби подвергается деформации по всему объему.



1 — стальная платформа; 2 — груз; 3 — образец стальной дроби; 4 — мерная линейка; 5 — шкив

Рисунок 1 Экспериментальная установка для ударного воздействия

Когда внутренние напряжения достигают предела прочности на сжатие, частица дроби разрушается. При этом образуются частицы различного размера и формы [2].

Метод предназначен для одиночных и массовых испытаний по разрушению стальной дроби в лабораторных условиях.

В качестве показателя сопротивления стальной дроби ударному воздействию принимается минимальная высота сбрасывания груза, при которой происходит разрушение дроби.

Первый удар производится с минимальной высоты, заранее определяемой для каждого диаметра испытуемого образца дроби, при которой образец еще не разрушается. Каждый последующий удар наносят с постепенным увеличением высоты поднятия груза на 1 см. Испытания проводят до тех пор, пока образец дроби не разрушится. При необходимости увеличивают массу груза.

Если после очередного удара образец дроби не разрушается, а только лишь сминается, то такая дробь заменяется на новую для повышения точности эксперимента.

Сопротивление стальной дроби ударному воздействию вычисляется как среднее арифметическое значение результатов испытаний не менее трех образцов.

Результаты испытаний занесены в таблицу 1.

Энергия удара (энергия, затрачиваемая на разрушение дроби), рассчитывается по формуле [4]:

$$E = m \cdot g \cdot h_{cp}, \text{ Дж}, \quad (1)$$

где  $m$  — масса груза, кг;  $g$  — ускорение свободного падения;  $h_{cp}$  — среднее арифметическое значение высоты сбрасывания груза, м.

Объем сферической дробинки [4]:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3, \text{ мм}^3, \quad (2)$$

где  $d$  — диаметр дробинки, мм.

Удельные энергозатраты:

$$e_v = \frac{E}{V}, \text{ Дж/мм}^3. \quad (3)$$

Таблица 1

Экспериментальные показатели раскалывания дробы

№ п/п	Диаметр дробинки $d$ , мм	Масса груза $m$ , кг	Среднее значение высоты сбрасывания груза $h_{ср}$ , м	Энергия удара, $E$ , Дж	Объем дробинки $V$ , мм <sup>3</sup>	Удельные энергозатраты $e_v$ , Дж/мм <sup>3</sup>
1	1,8	0,93	0,0325	0,30	3,05	0,10
2	2,1	2,55	0,107	2,68	4,85	0,55
3	2,2	2,55	0,205	3,42	5,58	0,61
4	2,3	2,55	0,200	5,00	6,37	0,78
5	2,4	2,55	0,250	6,25	7,24	0,86
6	2,5	3,36	0,200	6,59	8,18	0,81
7	2,6	3,36	0,250	8,24	9,20	0,90
8	2,7	4,15	0,223	9,08	10,31	0,88
9	2,8	4,96	0,190	9,24	11,49	0,80
10	2,9	4,96	0,190	9,24	12,77	0,72
11	3,0	2,53	0,068	1,69	14,14	0,12
12	3,1	2,53	0,050	1,24	15,60	0,08
13	3,2	1,74	0,065	1,11	17,16	0,06
14	3,3	0,93	0,173	1,58	18,82	0,08
15	3,6	4,15	0,230	9,36	24,43	0,38

Как видно из таблицы 1, при увеличении диаметра дробы энергия удара сначала возрастает и достигает максимума при  $d = 2,8 \dots 2,9$  мм. При увеличении диаметра дробы до 3,0 мм происходит резкое падение энергии ударного разрушения, при этом минимум достигается при  $d = 3,1 \dots 3,2$  мм. Дальнейшее увеличение диаметра дробы снова приводит к резкому возрастанию энергии удара.

По мере увеличения диаметра частицы дробы энергозатраты возрастают и достигают своего максимума при  $d = 2,6$  мм. Аналогично происходит резкое снижение энергозатрат при увеличении диаметра дробы до  $d = 3,0$  мм. При  $d = 3,2$  мм удельные энергозатраты достигают минимума. При дальнейшем увеличении диаметра дробинки удельные энергозатраты увеличиваются.

В соответствии с полученными данными, при увеличении диаметра дробинки с 2,9 мм до 3,0 мм, т. е. на 0,1 мм или на 3 %, энергия удара и удельные энергозатраты, требуемые для раскалывания, резко

снизились соответственно в 5,5 и 6,0 раз. При этом диаметры дробинки различаются в 1,4 раза, т. е. на 21 %. При диаметре, превышающем 3,3 мм, значения энергетических параметров процесса разрушения увеличились в 4,4–5,5 раза. Поэтому для проверки адекватности полученных результатов опыта с 10 по 15 были проведены повторно при одинаковой массе груза 2,55 кг. Полученные данные представлены в таблице 2, из которой видна достаточная согласованность проведенных экспериментов при незначительных отклонениях.

Кроме того, был проведен аналогичный эксперимент по определению величины энергии удара от количества одновременно раскалываемых частиц дробы. При этом в центр удара устанавливалось несколько частиц дробы.

В таблице 3 представлены экспериментальные данные по определению влияния количества раскалываемых дробинки на энергию удара.

Таблица 2

Контрольные экспериментальные показатели раскалывания дробы

№ п/п	Диаметр дробинки $d$ , мм	Масса груза $m$ , кг	Среднее значение высоты сбрасывания груза $h_{ср}$ , м	Энергия удара, $E$ , Дж	Объем дробинки $V$ , мм <sup>3</sup>	Удельные энергозатраты $e_v$ , Дж/мм <sup>3</sup>
10	2,9	2,55	0,36	9,00	12,77	0,70
11	3,0	2,55	0,07	1,75	14,14	0,12
12	3,1	2,55	0,06	1,50	15,60	0,10
13	3,2	2,55	0,05	1,25	17,16	0,07
14	3,3	2,55	0,07	1,75	18,82	0,09
15	3,6	2,55	0,37	9,26	24,43	0,38

Таблица 3

Влияние количества одновременно раскалываемых дробин на энергию удара

Диаметр дробинки $d$ , мм	Количество дробин $n$ , шт.	Масса груза $m$ , кг	Среднее значение высоты сбрасывания груза $h_{ср}$ , м	Энергия удара, $E$ , Дж
2,3	1	2,55	0,200	5,00
	2	4,15	0,200	8,14
	3	5,785	0,300	17,03
3,2	1	1,74	0,065	1,11
	2	4,15	0,130	5,29
	3	4,15	0,180	7,33
	4	4,15	0,215	8,75

Для того чтобы объяснить полученные данные, необходимо рассмотреть процесс получения литой дробы, используемой в эксперименте. Данная дробь получается распылением расплава потоками воздуха (рис. 2). Сущность этого способа заключается в том, что струя металла, вытекающая через калибровочное отверстие из металлоприемника 1, диспергируется потоками энергоносителя 6, выходящими из коллектора 4. Распыленные частицы 7 под действием сил поверхностного натяжения сфероизируются, разлетаясь по сложным траекториям, и охлаждаются в воде 9.

Процесс охлаждения капель влияет на форму, структуру частиц и другие важные характеристики дробы.

Экспериментально доказано [3], что частицы размером 0,1...0,5 мм окончательно затвердевают во время свободного полета, а более крупные частицы, как в нашем случае (1,8...3,6 мм), закаляются в водяной ванне из жидкого состояния.

Отсюда следует, что для мелких капель характерно быстрое объемное затвердевание (за 0,01–0,05 с) [3], при котором температура в центре и на поверхности частиц может быть принята одинаковой. Для более крупных частиц затвердевание длится на один-два порядка дольше и носит объемно-последовательный характер: сначала затвердевает сферическая оболочка, а затем — внутренняя часть дробы.

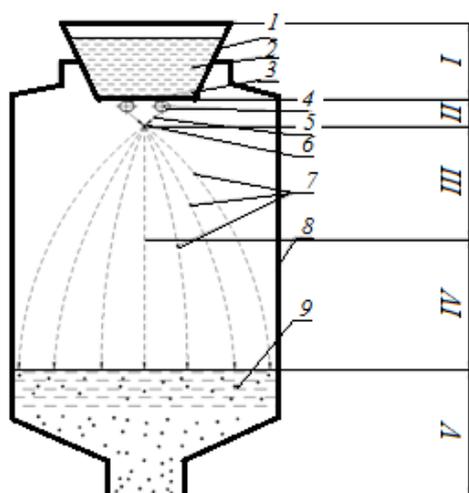
Таким образом, расколота дробь диаметром 1,8...2,9 мм практически не имеет

дефектов и обладает высокой плотностью. Что нельзя сказать о дробе диаметром 3,0...3,3 мм. После затвердевания дробы данной фракции в ней возникают раковины и трещины различной длины (рис. 3), являющиеся концентраторами напряжений и способствующие резкому снижению прочностных свойств дробы.

Так, при контакте груза с дробинкой у её вершины сначала образовывается трещина, после чего происходит ее распространение по дробинке в зону высоких напряжений. Когда трещина достигает об-

разовавшихся при затвердевании пустот, она разрывает металл [5].

Данные трещины, образовавшиеся в процессе затвердевания металла и при последующей закалке дробы, являются источниками концентраторов напряжений, что проявляется при ударном раскалывании круглых частиц. Это объясняет то, что для раскалывания дробы большего диаметра требуется меньшая энергия разрушения в связи с повышенным количеством внутренних дефектов ее структуры по сравнению с дробью малого диаметра, у которой внутренних дефектов значительно меньше.



- 1 — металлоприемник; 2 — расплав металлический; 3 — клапан металлоприемника; 4 — коллектор;  
5 — струя металла; 6 — поток энергоносителя; 7 — частицы металла распыленные; 8 — камера;  
9 — частицы в воде

Зоны: I — ферростатики; II — сплошных струй; III — диспергирования струи и формообразования частиц;  
IV — кристаллизации; V — закалки

Рисунок 2 Схема установки для получения металлической дробы распылением расплава потоками воздуха

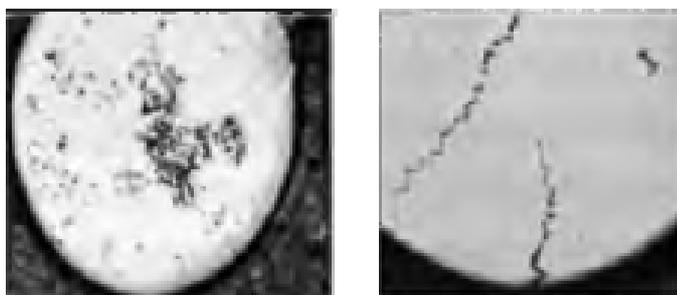


Рисунок 3 Дефекты структуры стальной дробы, изготовленной на ООО «Алчевский завод стальной дробы»

Кроме того, на энергозатраты непосредственно влияет толщина слоя материала между образовавшимися дефектами и наружной поверхностью дробинки. Именно этот фактор является причиной повышения энергозатрат на раскалывание дробинки диаметром свыше 3,6 мм. В них так же, как и в дробинках диаметром 3,0...3,3 мм, образуется большее количество дефектов, но все они значительно меньших размеров и располагаются ближе к центру, тем самым увеличивая толщину слоя материала. Следовательно, при ударе мелкие

дефекты сминаются, а сопротивление разрушению повышается [6].

#### **Выводы и направление дальнейших исследований.**

Проведенные исследования показали, что для достижения наименьшим расходом энергии к раскалыванию рекомендуется дробь диаметром  $d = 3,1 \dots 3,3$  мм.

При этом повышается эффективность процесса разрушения, снижаются энергозатраты, возрастает производительность дробильного оборудования и тем самым увеличивается выход готового продукта.

#### **Библиографический список**

1. Андреев, Е. Е. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению [Текст] / Е. Е. Андреев, О. Н. Тихонов. — СПб : Санкт-Петербургский горный институт, 2007. — 439 с.
2. Борщев, В. Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы : учебное пособие [Текст] / В. Я. Борщев. — Тамбов : Издательство Тамбовского технического университета, 2004. — 75 с.
3. Гурченко, П. С. Производство стальной литой термообработанной дроби в условиях машиностроительных предприятий [Текст] / П. С. Гурченко и др. — Минск : Беларуская Навука, 2014. — 113 с.
4. Механическое разрушение горных пород : учеб. пособие для вузов / Г. Г. Каркашадзе. — М. : Издательство Московского государственного горного университета, 2004. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5741803016.html>.
5. Экспертные исследования причин разрушения материалов : лекции [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.studmed.ru/docs/document30004?view=1>.
6. Павлиненко, О. И. Особенности структурообразования и производства колотой стальной дроби [Текст] / О. И. Павлиненко, М. А. Савицкая, Э. П. Левченко // *Материаловедение : материалы республиканской студенческой научно-практической конференции*. — Донецк : ДонНТУ, 2017. — С. 44–48.

© Павлиненко О. И.

© Левченко Э. П.

*Рекомендована к печати зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ, д.т.н., проф. Еронько С. П., к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.*

*Статья поступила в редакцию 27.09.17.*

**Павлиненко О. І., к.т.н. Левченко Е. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)**

#### **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ НА РОЗКОЛЮВАННЯ СТАЛЕВОГО ДРОБУ ПРЯМИМ СТИСНЕНИЕМ УДАРОМ**

*Подано результати дослідження впливу ударної дії при подрібненні сталевого дроби. Визначені мінімальні енерговитрати за допомогою процесу розколювання дробинки на експериментальній установці ударної дії.*

**Ключові слова:** експеримент, сталевий дріб, розколювання, енерговитрати, затвердіння, дефекти, прямий стиснений удар.

**Pavlinenko O. I., PhD Levchenko E. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**

**EXPERIMENTAL STUDIES OF ENERGY CONSUMPTION ON STEEL SHOT SPLITTING BY DIRECT CONSTRAINED STROKE**

*The research results of the shot impact at steel shot grinding are presented. The minimum energy consumption has been calculated due to the process of pellets cleaving at the experimental impact station.*

**Key words:** *experiment, steel shot, splitting, energy consumption, solidification, defects, direct constrained stroke impact.*