

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПЛОСКИХ СЛИТКОВ ФЕРРОСПЛАВОВ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКИ С УЧЕТОМ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Ж.И. Кузбаков

Актюбинский государственный университет им. К. Жубанова,
г. Актобе, Республика Казахстан
e-mail: flora_karim@mail.ru

Проанализирован процесс разрушения высокопрочного материала в рабочем пространстве щековой дробилки. Отмечено, что растяжение — лучший вид деформирования, при котором обеспечивается минимум нагрузок на основные узлы и элементы машины. Сила разрушения материала в дробильной камере щековой дробилки определена по волновым уравнениям с учетом ударного нагружения и специфики дробимого материала, также рассмотрены как поперечный, так и продольный удары. Решения уравнения волнового типа получены с помощью разрывных функций. Относительная деформация куска материала и скорость этой деформации связаны определенной зависимостью. Деформация куска в момент удара полностью определяется скоростью подвижной щеки дробилки и не зависит от ее массы. Существуют созданные на этой основе ударно-щековые дробилки. Получены упрощенные формулы для определения максимальных ударных нагрузок, при которых произойдет разрушение материала. Для создания в дробильной камере машины преимущественно растягивающих нагрузок предложены новые конструкции дробящих плит, на которые получены патенты Республики Казахстан и Украины.

Ключевые слова: ударное нагружение, дробильная камера, разрушающая деформация, удар, упругая волна, волновое уравнение, плоский слиток, контактная деформация, дробящая плита.

STUDYING THE PROCESS OF RUPTURE OF FLAT FERROALLOY INGOTS IN THE JAW CRUSHER WORKSPACE WITH ALLOWANCE FOR IMPACT LOADING

Zh.I. Kuzbakov

K. Zhubanov Aktobe State University, Aktobe, Kazakhstan
e-mail: flora_karim@mail.ru

The process of high-strength material rupture in the workspace of a jaw crusher is analyzed. It is noted that an optimal variant of deforming a material to fracture is tension which provides a minimum load on the main machine assemblies and parts. A force for material rupture in the crushing chamber of a jaw crusher is determined from wave equations taking into account the impact loading and the specificity of the material to be crushed; both lateral and longitudinal impacts are also considered. Solutions to the wave-type equation are obtained using discontinuous functions. A relative deformation of a material lump is connected with the deformation speed by the certain functional relationship. The lump deformation at the time of impact is fully determined by a speed of the moving jaw of the crusher and does not depend on its mass. There are impact-and-jaw crushers based on the mentioned principles. The simplified formulas are obtained for determination of maximal impact loads, at which the material rupture occurs. For creating predominantly tensile loads in the crushing chamber of a crusher, new constructions of crushing plates are proposed, for which the patents of Kazakhstan and Ukraine are received.

Keywords: impact loading, crushing chamber, breaking strain, impact, elastic wave, wave equation, flat ingot, contact deformation, crushing plate.

Щековые дробилки применяются во многих отраслях промышленности, в частности, в ферросплавной подотрасли черной металлургии для дробления сырья при подготовке его к металлургическому переделу. Такие дробилки также используются для дробления готовой продукции (ферросплавов) в сталеплавильном производстве [1]. Условия эксплуатации, характер нагружения, проблемы развития конструкций щековых дробилок при измельчении прочных материалов рассмотрены в работах [2–4].

Известно, что на силы дробления влияет характер разрушения материала в дробильной камере при его измельчении. Считается, что материал в зеве дробилки разрушается от напряжений сжатия, растяжения, изгиба и удара. При дроблении материала, как правило, имеют место все виды разрушения, но экспериментально установлено, что основным видом является разрушение от напряжений растяжения [5, 6]. Прочность твердого материала на сжатие во много раз выше, чем прочность на изгиб (излом) и растяжение (разрыв).

Очевидно, что для разрушения материала выгоднее применять деформирование растяжением. Следовательно, в рабочей камере дробильной машины, необходимо создать такие условия, при которых материал разрушался бы преимущественно от деформации растяжения.

Рассмотрим ударный вид нагружения. В рабочем пространстве дробильной машины возможен как продольный удар, так и поперечный. Для поперечного удара при дроблении плоского высокопрочного слитка металла схему ударного нагружения представим в виде балки постоянного сечения, опирающейся на две опоры (рисунок, а).

Для большей точности процесс ударного нагружения и максимальную нагрузку определим с помощью волнового уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где x — координата сечения балки; $a = \sqrt{cl/\rho}$ — скорость распространения упругой волны в балке; u — перемещение сечений балки; ρ — плотность материала балки; c — жесткость балки.

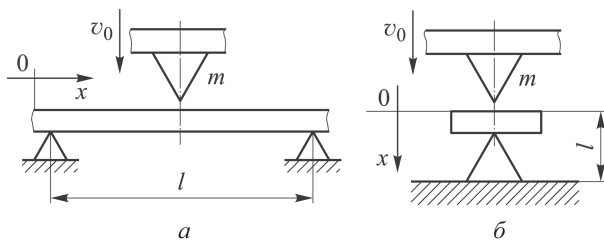


Схема ударного нагружения плоского слитка металла:

a — поперечный удар, b — продольный удар

Общее решение уравнения (1) относительно деформации балки u при воздействии на ее середину возмущающей силы P имеет вид

$$u = \sum_{i=1}^{i=\infty} \frac{2\ell^2}{i^2\pi am_0} \int_0^t F \sin \frac{i^2\pi^2 a (t - t_1) dt_1}{\ell^2}, \quad (2)$$

где m_0 — масса балки (слитка); t_1 — время, для которого определяем u , $i = 1, 2, 3$. При ударном нагружении сила F — параметр, переменный во времени. Если v_0 — скорость соударения дробящей плиты с плоским слитком в начальный момент, m — масса дробящей плиты, то ее скорость после соударения в любой момент $t = t_1$

$$v = v_0 - \frac{1}{m} \int_0^{t_1} F dt. \quad (3)$$

Перемещение дробящей плиты в направлении удара определяется по формуле

$$y_1 = v_0 t - \int_0^t \frac{dt}{m} \int_0^{t_1} F dt. \quad (4)$$

Деформации балки (плоского слитка металла) могут быть соизмеримы с контактными деформациями в месте соударения рифления плиты и слитка.

Известно [3, 4], что контактная деформация

$$y_2 = \alpha F^{2/3}, \quad (5)$$

где α — коэффициент, зависящий от кривизны поверхностей тел в месте контакта и механических свойств материала.

Для нашего случая, т.е. когда рифление плиты имеет сферическую поверхность с радиусом R , а слиток металла — плоскость, то

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{9(1 - \mu^2)^2}{9E^2R}},$$

где μ и E — коэффициент Пуассона и модуль упругости материалов контактирующих тел.

Можно считать, что после удара дробящей плиты своим рифлением она не отделяется от слитка до момента, когда слиток получает максимальную деформацию. Тогда можно записать $y_1 = u + y_2$, т.е.

$$\begin{aligned} v_0 t - \int_0^t \frac{dt_1}{m} \int_0^{t_1} F dt_1 &= \\ &= \sum_{i=1}^{i=\infty} \frac{2\ell^2}{i^2\pi^2 am_0} \int_0^t F \sin \frac{i^2\pi^2 a (t - t_1) dt_1}{\ell^2} + \alpha F^{2/3}. \quad (6) \end{aligned}$$

Чтобы решить уравнение (6), промежуток времени от 0 до t нужно разделить на малые промежутки, подставляя которые, можно получить соответствующие значения F и характер изменения этого параметра во времени.

Рассмотрим теперь продольный удар. Схему ударного нагружения при продольном ударе приближенно представим в виде стержня (кусок слитка металла между рифлениями плит), закрепленного одним концом на рифлении неподвижной плиты (рисунок, б).

Дробящая плита вместе с шатуном и подвижной щекой, масса которой m , движется со скоростью v_0 в направлении оси куска металла. После соударения рифления подвижной плиты с куском металла в месте соударения возникает деформация, которая волнообразно распространяется вдоль куска, отражается от другого конца и движется к свободному концу, затем снова распространяется в сторону конца у неподвижной плиты и т.д.

Движение сечений куска металла можно представить уравнением волнового типа (1). Решение этого уравнения получено с помощью разрывных функций [3]. Перемещение сечений в куске металла находим в виде

$$u(x_1t) = f(at - x) - f(at + x - 2l), \quad (7)$$

где f — произвольная функция, выражающая характер движения деформации. Первый член правой части соответствует движению волны деформации в направлении оси X (от 0 до l), а второй — в обратном направлении. Полагая, что после соударения рифление подвижной плиты движется вместе со свободным концом куска, для сечения, соответствующего $x = 0$, будем иметь

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = E\Omega \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (8)$$

где E — модуль упругости материалов контактирующих тел; Ω — сечение куска металла.

Если выразить $E = \frac{a^2 \rho}{\Omega}$ и обозначить $\frac{\rho \ell}{m} = \beta$, то

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \beta \frac{a^2}{\ell} \cdot \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (9)$$

Подставляя значение u из выражения (7), запишем

$$\ddot{f}a^2(at) - \ddot{f}a^2(at - 2l) = \frac{\beta a^2}{\ell} \left[-\dot{f}(at) - \dot{f}(at - 2l) \right],$$

далее, преобразуя и сокращая, получаем

$$\ddot{f}(at) + \frac{\beta}{\ell} \dot{f}(at) = \ddot{f}(at - 2l) - \frac{\beta}{\ell} \dot{f}(at - 2l). \quad (10)$$

До соударения рифления и куска для всех сечений последнего $u = 0$, следовательно, при $at < 0$ $f(at) = 0$. Для интервала $0 < at < 2l$ правая часть уравнения (10) равна нулю. Тогда

$$\ddot{f}(at) + \frac{\beta}{\ell} \dot{f}(at) = 0. \quad (11)$$

Проинтегрируем выражение при $0 < at < 2l$:

$$\dot{f}(at) = Ae^{-\beta \frac{at}{\ell}}. \quad (12)$$

При $t = 0$ свободный конец куска ($x = 0$) имеет скорость $\frac{\partial u}{\partial t} = v_0$. Введем это условие в уравнение (7):

$$a [\dot{f}(0) - \dot{f}(-2l)] = v_0.$$

Поскольку $\dot{f}(-2l) = 0$, то $a\dot{f}(0) = v_0$. Подставляя $t = 0$, находим $\dot{f}(0) = A$ или $A = \frac{v_0}{a}$. Теперь

$$\dot{f}(at) = \frac{v_0}{a} e^{-\beta \frac{at}{\ell}}. \quad (13)$$

В соответствии с граничными (концевыми) условиями для интервала $at < 2l - x$ функцию $f(at + x - 2l)$ следует принять равной нулю [7]. Тогда выражение (7) будет иметь вид $u = f(at - x)$, а относительная деформация куска $-\frac{\partial u}{\partial x} = -\dot{f}(at - x)$. Подставляя выражение (13), получаем

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{v_0}{a} e^{-\frac{\beta}{\ell}(at - x)} \quad (14)$$

и скорость деформации

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = a\dot{f}(at - x) = v_0 e^{-\frac{\beta}{\ell}(at - x)}. \quad (15)$$

Относительная деформация (куска) и скорость этой деформации в любом сечении [8] при первом прохождении волны деформации связаны зависимостью $v = -a\varepsilon$, (14), (15). Следовательно, деформация куска в момент удара полностью определяется скоростью подвижной щеки v_0 и не зависит от ее массы. Существует ударно-щечковая дробилка фирмы “Крупп”, у которой скорость подвижной щеки 500, 1000, 1500 об/мин для одного и того же типоразмера, что в несколько раз больше, чем у щековых дробилок традиционной конструкции. В нашем случае предельной относительной деформацией считается такая, при которой происходит разрушающая деформация. Если $\varepsilon_{\text{п}}$ — относительная деформация, соответствующая пределу прочности, то максимально необходимая скорость удара

$$v_{\text{max}} = a\varepsilon_{\text{пр}}. \quad (16)$$

Для определения функции $f(at)$ в следующем интервале $2l < at < 4l$ воспользуемся уравнением (10), в правую часть которого подставим значения $\dot{f}(at)$ и $\ddot{f}(at)$ при $0 < at < 2l$.

Тогда

$$\ddot{f}(at) + \frac{\beta}{\ell} \dot{f}(at) = -2 \frac{v_0 \beta}{a \ell} e^{-\frac{\beta}{\ell}(at-2\ell)}. \quad (17)$$

При неразрывном движении плиты (рифления) и свободного конца куска скорость не может изменяться скачкообразно, следовательно, при $x = 0$ выражение $\frac{\partial u}{\partial t} = a \left[\dot{f}(at) - \dot{f}(at - 2\ell) \right]$ должно быть непрерывной функцией. Условие непрерывности удовлетворяется, если разрывы функции $f(at)$ повторяются при каждом изменении at на 2ℓ . При $at = 0$ значение функции $f(at)$ скачкообразно увеличивается на v_0/a , такие же скачки повторяются при $at = 2\ell, 4\ell, 6\ell$ и т.д. При $x = 0$ конец первого интервала определяется равенством $at = 2\ell$, при этом (13) принимает вид $\dot{f}(2\ell) = \frac{v_0}{a} e^{-2\beta}$. В то же время происходит скачкообразное изменение функции $f(at)$, после чего $\dot{f}(2\ell)$ увеличивается на v_0/a :

$$\dot{f}(2\ell) = \frac{v_0}{a} (e^{-2\beta} + 1). \quad (18)$$

Выражение (18) является начальным условием для интегрирования уравнения (17); используя значения (18) для определения постоянной интегрирования при $2l < at < 4l$, получаем

$$\ddot{f}(at) = \frac{v_0}{a} e^{-\beta \frac{at}{\ell}} + \frac{v_0}{a} \left(1 - 2\beta \frac{at - 2\ell}{\ell} \right) e^{-\beta \frac{at - 2\ell}{\ell}}. \quad (19)$$

Для интервала $4l < at < 6l$ аналогично запишем

$$\begin{aligned} \ddot{f}(at) + \frac{\beta}{\ell} \dot{f}(at) = \\ = -2 \frac{v_0}{a} \cdot \frac{\beta}{\ell} \left[e^{-\beta \frac{(at-2\ell)}{\ell}} + 2 \left(1 - \beta \frac{at - 4\ell}{\ell} \right) e^{\beta \frac{(at-4\ell)}{\ell}} \right]; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \dot{f}(at) = \frac{v_0}{a} e^{-\frac{\beta}{\ell} at} + \frac{v_0}{a} \left(1 - 2\beta \frac{at - 2\ell}{\ell} \right) e^{-\frac{\beta}{\ell}(at-2\ell)} + \\ + \frac{v_0}{a} \left[1 - 2\beta \frac{at - 4\ell}{\ell} \left(2 - \beta \frac{at - 4\ell}{\ell} \right) \right] e^{-\frac{\beta}{\ell}(at-4\ell)}. \end{aligned} \quad (21)$$

Таким же образом можно определить значения для последующих интервалов. Из выражения (7) представим относительную деформацию куска в общем виде:

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = - \left[\dot{f}(at - x) + \dot{f}(at + x - 2\ell) \right]. \quad (22)$$

Подставляя функции $\dot{f}(at)$, соответствующие очередным интервалам и определяемые формулами (13), (29) и (21), получаем значения ε для тех же интервалов и любых сечений куска (любых x).

Поскольку $\varepsilon = F/E\Omega$ и линейная жесткость куска $c = E\Omega/l$, то $\varepsilon = F/cl$ или

$$F = \varepsilon cl, \quad (23)$$

где F — сила, действующая в рассматриваемом сечении. При исследовании (4) изложенных решений получены упрощенные формулы для определения максимальных ударных нагрузок куска, при которых произойдут разрушения:

$$F_{\max} \approx cl \frac{v_0}{a} \left(\sqrt{\beta} + 1 \right) \quad (24)$$

при $\beta > 24$;

$$F_{\max} \approx cl \frac{v_0}{a} \left(\sqrt{\beta} + 1,1 \right) \quad (25)$$

при $5 < \beta < 24$;

$$F_{\max} \approx 2cl \frac{v_0}{a} \left(1 + e^{-\frac{2}{\beta}} \right) \quad (26)$$

при $\beta < 5$, дающие достаточно точные для большинства практических расчетов результаты. Для щековой дробилки СМД-109 по формуле (26) ($\beta < 5$) получено, что $F_{\max} \approx 207$ МПа, с учетом коэффициента запаса прочности $F_{\max} \approx 300$ МПа, что позволяет использовать серийно выпускаемые щековые дробилки для дробления высокопрочных слитков феррохрома ($\sigma_{сж} = 2400$ МПа).

Приведенные результаты могут быть использованы для определения растягивающих ударных нагрузок. Следовательно, расположение рифлений дробящих плит должно быть таким, чтобы в дробильной камере создавалась преимущественно раскалывающая нагрузка, обеспечивающая минимум разрушающих сил. Создана щековая дробилка, учитывающая указанный фактор, получены патенты Республики Казахстан и Украины [9, 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Опыт применения виброщековых дробилок для переработки ферросплавов* / Туркин В.Я., Казаков С.В., Арсентьев В.А. и др. // Сталь. 2005. № 11. С. 63–64.
2. *Кузбаков Ж.И.* Процесс разрушения плоских слитков феррохрома в рабочем пространстве щековых дробилок // Проблемы комплексного освоения природных ресурсов Западного Казахстана и Южного Урала: Материалы республ. науч. конф. Актобе, 2003. С.46–48.

3. Кузбаков Ж.И. Условия эксплуатации и характер нагружения щековых дробилок при дроблении особопрочных материалов // Комплексная переработка минерального сырья: Материалы междунар. науч.-практич. конф., ПК “Экожан”, Караганда, 25–26 сентября 2008 г. С. 220–228.
4. Кузбаков Ж.И. Выбор конструкции щековых дробилок для дробления особопрочных материалов // Изв. вузов. Черная металлургия, 2009. № 2. С. 45–48.
5. Клушанцев Б.В., Косарев Ф.И., Музеймек Ю.Ф. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.
6. Брах И. Теоретические проблемы дробления горных пород и развития конструкции дробильных машин // Симпозиум по строительным и дорожным машинам: Тез. док. М., 1965. С. 193–198.
7. Пономарев С.Д. Современные методы расчета на прочность в машиностроении. М.: Машгиз, 1952. 862 с.
8. Комаров М.С. Динамика механизмов и машин. М.: Машиностроение, 1969. 296 с.
9. Щековая дробилка: пат. 2010/071.2 Республика Казахстан: МПК В02С / Ж.И. Кузбаков, В.П. Франчук, В.А. Федоскин; заявитель и патентообладатель Актюбинский государственный университет им. К. Жубанова. Решение № 12–3/4373 о выдаче патента на полезную модель от 08.12.2010.
10. Щокова дробарка: пат. 11201002619 Украина: МПК В02С / В.П. Франчук, Ж.И. Кузбаков, В.А. Федоскин. Решение № 150096/3А/11 о выдаче патента на полезную модель от 14.06.2011.

REFERENCES

- [1] Turkin V.Ya., Kazakov S.V., Arsent'ev V.A. Case record of vibrating jaw crushers for ferroalloys recycling. *Stal'* [Steel], 2005, no. 11, pp. 63–64 (in Russ.).
- [2] Kuzbakov Zh.I. The destruction process of flat ferrochrome ingots in the workspace of jaw crushers. *Mater. Republ. Nauch. Konf. "Problemy kompleksnogo osvoeniya prirodnnykh resursov Zapadnogo Kazakhstana i Yuzhnogo Urala"* [Proc. Republican Sci. Conf. "Problem complex exploration of natural resources of West Kazakhstan and South Urals"], Aktobe, 2003, pp. 46–48 (in Russ.).
- [3] Kuzbakov Zh.I. Operating conditions and the nature of the loading for jaw crushers *Mater. Mezhdunar. Nauchno-Prakt. Konf. "Kompleksnaya pererabotka mineral'nogo syr'ya"* [Proc. Int. Sci. Pract. Conf. "Complex processing of mineral raw material"], Karaganda, PK “Ekozhan”, 25–26 September, 2008, pp. 220–228 (in Russ.).
- [4] Kuzbakov Zh.I. Select design of jaw crusher for crushing of high-strength material. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Chern. Metal.* [Proc. Univ., Ferr. Metallurgy], 2009, no. 2, pp. 45–48 (in Russ.).
- [5] Klushantsev B.V., Kosarev F.I., Muzeymnek Yu.F. Drobilki. Konstruktsiya, raschet, osobennosti ekspluatatsii [Design, calculation, special aspects of operation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 320 p.
- [6] Brakh I. Theoretical problems fragmentation of the rock and construction development of crushers. *Simp. po Stroitel'nyim i Dorozhnym Mashinam. Tez. dokl.* [Proc. Symp. on Road-Building Machinery], Moscow, 1965, pp. 193–198 (in Russ.).
- [7] Ponomarev S.D., Biderman V.L., Likharev K.K.. Osnovy sovremennykh metodov rascheta na prochnost' v mashinostroenii: raschety pri dinamicheskoy nagruzke. Ustoychivost'. Polzuchest' [Foundation of contemporary methods for stressing calculation in mechanical engineering: dynamical load calculations. Rigidity. Creeping]. Moscow, Mashgiz Publ., 1952. 862 p.
- [8] Komarov M.S. Dinamika mekhanizmov i mashin [Dynamics of machines and mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 296 p.

- [9] Kuzbakov Zh.I., Franchuk V.P., Fedoskin V.A. Shchekovaya drobilka [Jaw crusher]. Patent Republic of Kazakhstan, no. 2010/071.2, 2010.
- [10] Franchuk V.P., Kuzbakov Zh.I., Fedoskin V.A. Shchokova drobarka [Jaw crusher]. Patent Ukraine, no. 11201002619, 2011.

Статья поступила в редакцию 29.04.2013

Жанаберген Иманкулович Кузбаков — канд. техн. наук, доцент кафедры “Металлургия” Актюбинского государственного университета им. К. Жубанова. Специалист в области разрушения конструкционных материалов.

АРГУ им. К. Жубанова, Республика Казахстан, 030000, г. Актобе, ул. Бр. Жубановых, д. 263.

Zh.I. Kuzbakov — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Metallurgy” department of the K. Zhubanov Aktobe State University. Specialist in the field of fracture of structural materials

K. Zhubanov Aktobe State University, ul. Bratiev Zhubanovykh 263, Aktobe, 030000 Republic of Kazakhstan.