Е.С.ТКАЧЕНКО
Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники,
Москва, Россия

О НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

Для успешной борьбы с такими газодинамическими явлениями, как внезапные выбросы угля (породы) и газа или горные удары, следует иметь четкое представление о механизме разрушения твердого тела. Изучать такое явление в шахтах достаточно трудоемко по известным причинам, однако для достижения эффективного результата в этой области надо глубже познать хотя бы простейший механизм разрушения образцов угля (пород) при их сжатии на прессе, так как природа разрушения образцов и массива едина. Ранее на основе экспериментов по испытанию угольных образцов на прессе был установлен факт разрушения образцов пластическими волнами и предложен экспериментальный метод определения скорости распространения пластических волн $V_{пл}$ во время разрушения образцов [9].

Пластические волны давно исследуются в механике, но интерпретация их проявления, вследствие недостаточной изученности вопроса, осуществляется по-разному. Рассмотрим процесс распространения деформаций в образце при его нагружении с позиций механики деформируемого твердого тела, учитывая волновой характер передачи энергии от пресса к образцу. Пусть образец сжат на прессе силой до нагрузки, равной, например, 75 % от разрушающей, и процесс нагружения приостановлен. Через несколько минут продолжим дальнейшее нагружение образца. В этот момент к верхнему концу образца внезапно прикладывается сила F, которой соответствует напряжение σ и относительная деформация ε (рис.1). Сила $F = F_0 + F_1$, где F_0 – максимальное значение силы, созданное прессом (от начала нагружения до его остановки); F_1 – значение силы, полученное от первого импульса при повторном включении пресса. В первом приближении для этого примера считаем, что действующая сила является равномерной. Аналогичное рассуждение относится к σ и ε. В указанном примере рассматривается только первый импульс силы.

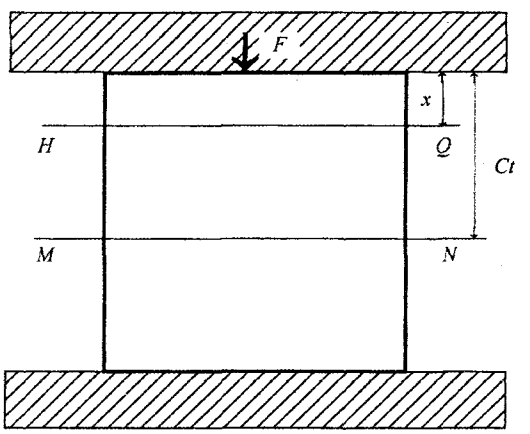


Рис.1. Упрощенная схема распространения фронтов волн по образцу при его нагружении

Упругая деформация будет распространяться по образцу со скоростью C. По истечении времени t после момента приложения силы участок образца длиной Ct будет равномерно сжат силой 1-го импульса, равной σ. Сечение MN служит границей действия этой силы и называется фронтом упругой волны, который движется со скоростью C. Зафиксируем некоторое сечение HQ с координатой x, отсчитываемой от верхнего основания образца. В момент t расстояние от фронта волны есть $(Ct - x)$. Участок $(Ct - x)$ равномерно сжат напряжением σ, его относительная деформация $\varepsilon = \sigma / S$. Следовательно, сечение HQ сместилось из первоначального положения на расстояние

$$u = \varepsilon(Ct - x) = (\sigma / S)(Ct - x),$$

где S – модуль деформации.

Дифференцируя полученное уравнение по времени, найдем скорость движения сечения HQ:

$$V_C = du/dt = (\sigma/S)C = \varepsilon C . \qquad (1)$$

Скорость V_C, определяемая по формуле (1), не зависит от x, лишь бы $x < Ct$. При $x > Ct$ скорость $V_C = 0$. Приведенное нами решение отличается от использованного в работе [7] тем, что вместо модуля Юнга в уравнении (1) используется модуль деформации S, позволяющий анализировать процесс деформации не только в упругой области нагружения. Зависимость (1) можно также получить, используя закон сохранения масс, здесь V – колебательная скорость частиц за фронтом упругой волны, или «массовая скорость».

Исследования показали, что различия между значениями V_C, рассчитанными по формуле (1), и значениями скоростей пластических волн $V_{ПЛ}$, полученными в результате испытаний четырех серий образцов с различными пределами прочности на сжатие, на момент разрушения образцов в среднем составили 26,1 %. В области упругого деформирования равенство значений V_C и $V_{ПЛ}$ следует из вышеприведенных аналитических рассуждений. Поэтому можно сделать выводы, что колебательную скорость движению частиц задает пластическая волна, а смещение пластической волны происходит по тому же закону:

$$u = a_{ПЛ} \sin \omega t \ , \qquad (2)$$

где $a_{ПЛ}$ – амплитуда смещения пластической волны; ω – циклическая частота.

Производная смещения по времени является скоростью пластической волны:

$$V_{ПЛ} = du / dt = a_{ПЛ}\, \omega \cos \omega t \ . \qquad (3)$$

По зависимостям (2), (3) рекомендуется определять смещение и колебательную скорость смещения частиц [5].

Известно, что при воздействии одного тела на другое происходит передача энергии от одного тела к другому, она осуществляется волнами напряжения, независимо от того, статическое это нагружение или динамическое. Различие между статическим и динамическим нагружениями с волновых позиций заключается в разнице значений амплитуд у волн напряжений, распространяющихся по образцу: при статическом нагружении значения амплитуд волн напряжений значительно ниже, чем при динамическом. Базисные частоты волн напряжений при статическом и динамическом нагружении отличаются между собой незначительно. Более подробно этот вопрос рассматривался в работе [9].

Наличие пластических волн в образцах при любых механических нагружениях устанавливается также исходя из следующих рассуждений. Считается доказанным, что скорость, с которой движутся частицы среды, колеблющиеся при прохождении звуковой волны около положения равновесия, по отношению к среде в целом есть колебательная скорость частиц [3, 10]. В указанных работах не рассматривается вопрос о том, каким образом и за счет чего возникает движение частиц в волне, так как не совсем ясен механизм возникновения и передачи обнаруженных волн [6]. Представленная проблема является довольно сложной, и поэтому некоторые ее аспекты требуют детального рассмотрения.

Предварительно нами предлагается следующее определение упругого и неупругого колебания частиц среды. К упругому колебанию отнесем такие отклонения частиц от начального состояния, при которых последние смещаются со скоростью упругой волны. К неупругим колебаниям следует причислить все остальные колебания, при которых отклонения частиц от начального состояния происходят с меньшей скоростью, чем у упругой волны.

При распространении упругой волны частицы, находящиеся в зоне ее влияния, должны упруго сжаться и с той же скоростью $C^2 = dP/d\rho$ вернуться в исходное состояние. После прохождения упругой волны никакого неупругого движения частиц не должно быть, однако после прохождения упругой волны частицы колеблются неупруго, причем скорость их колебания может быть самой различной. В зависимости от интенсивности нагружения частицы колеблются с переменными скоростями, а таких условий упругая волна создать не может. Сами по себе частицы с переменной скоростью двигаться не в состоянии, поэтому естественно предположить, что такое их движение формирует какая-то составляющая упругой волны, т.е. упругая волна нагружения является упругопластической волной (УПВ).

Устройство УПВ является чрезвычайно сложным, но некоторые особенности в структуре волны на основе предлагаемого нами подхода можно распознать. Главная особенность УПВ заключается в том, что в процессе своего распространения она рождает пластическую волну. Это легче представить на примере распространения одиночной УПВ. При распространении такой волны в любой точке среды ее продвижения будет фиксироваться неупругая колебательная скорость частиц (НКСЧ), которая может создаваться только пластической волной. Пластическая волна в твердом теле на сравнительно коротком отрезке пути затухает [4, 8], а НКСЧ наблюдается на всем достаточно длинном пути продвижения УПВ. Следовательно, пластическая составляющая УПВ отделяется периодически на всем пути ее распространения, т.е. УПВ обладает пульсацией. Следует отметить, что отделение пластической составляющей от основной волны происходит с частотой, которой обладает УПВ. Это предположение легко доказать при рассмотрении явления образования стоячей волны, что будет сделано ниже.

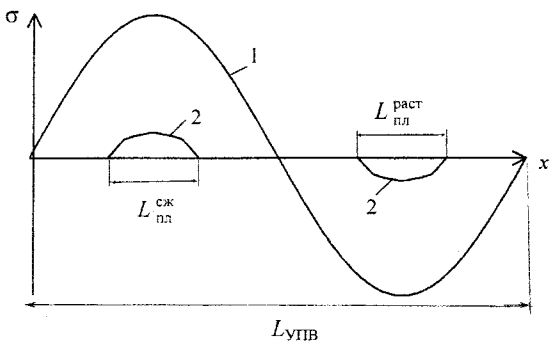


Рис.2. Схематическое изображение упругопластической волны нагружения в момент отделения пластической волны
1 – упругая волна ($L_{УПВ}$ – длина упругопластической волны); 2 – пластическая волна ($L_{пл}^{сж}$ – длина полуволны сжатия, $L_{пл}^{раст}$ – длина полуволны растяжения); σ и x – напряжение и смещение фронта волны

Данные экспериментальных и аналитических исследований позволяют представить УПВ графически (рис.2). Упругая волна изображена в соответствии с общепринятыми представлениями, а пластическую волну проще представить, как показано на рис.2. Прежде чем проанализировать построения на рисунке, рассмотрим экспериментальные данные (см. таблицу) по определению основных характеристик упругих и пластических волн, полученных при испытании четырех серий образцов (угольных брикетов цилиндрической формы высотой 0,05 м и диаметром 0,064 м).

Сравнение параметров упругих и пластических волн

Номер серии образцов	Разрушающая нагрузка, МПа	Скорость волны, м/с		Длина волны, м		Частота собственных колебаний образца, Гц
		упругой	пластической	упругой	пластической	
1	0,4	310	6,5	0,1	0,0021	3100
2	2,2	668	15,3	0,1	0,0023	6680
3	6,5	1003	22,4	0,1	0,0022	10030
4	15,4	1513	46,3	0,1	0,003	15130

Из таблицы видно, что длина упругих волн для всех серий образцов, имеющих одинаковые размеры, – постоянна, хотя скорость распространения упругих волн для каждой серии своя. В данном примере длина упругих волн примерно в 50 раз выше, чем пластических. Определение длин пластических волн производилось по соотношению $C = \lambda f$, которое справедливо для гармонических волн любой природы [10].

В работе [9] рассматривается явление интерференции бегущих пластических волн в образцах. Частным случаем интерференции двух встречных бегущих пластических волн является стоячая волна. Стоячая волна – гармонические свободные колебания ограниченных областей среды, где различные участки среды в стоячей волне колеблются либо синфазно, либо противофазно [10]. При распространении в упругой среде двух или более бегущих упругих волн, амплитуды и частоты которых одинаковы, а направления распространения взаимно противоположны, волны накладываются одна на другую. При этом упругие волны не возмущают друг

друга, но колебания частиц среды будут векторной суммой колебаний, которые совершали бы частицы при распространении каждой из волн в отдельности [2]. Такая интерпретация явления взаимодействия между упругими волнами носит название принцип суперпозиции. В стоячей волне имеются пучности, где происходят наиболее сильные колебания, и узлы, в которых колебания отсутствуют. Расстояние между соседними узлами и пучностями равно половине длины бегущей волны.

На рис.2 схематично показано расположение бегущих упругой и пластической волн относительно друг друга. При лобовой встрече плоских бегущих волн упругие составляющие волн не взаимодействуют друг с другом, что видно из следующих примеров. Во-первых, если бы бегущие упругие волны интерферировали между собой, то в месте их встречи должна была образоваться стоячая волна с двумя пучностями и далее распространение стоячей волны не происходило бы. Однако в экспериментах наблюдается стоячая волна, имеющая несколько или много пучностей. Во-вторых, при интерференции упругих волн под любым углом, кроме прямого, должен измениться хотя бы один параметр в уравнении волны, но такого явления не отметил ни один экспериментатор, следовательно, наши доводы правдоподобны.

В действительности же встречаются между собой бегущие пластические волны, полуволны сжатия которых накладываются друг на друга, изменяют за счет интерференции свои амплитуды и образуют пучность, где частицы колеблются синфазно. При встрече участков, где энергия каждой пластической волны равна нулю, образуется узел стоячей пластической волны. Встреча двух полуволн растяжения приводит к образованию пучности пластической волны, в которой частицы колеблются противофазно. Каждая УПВ следует с определенной частотой и при продвижении на расстояние, равное длине волны, в каждом последующем максимуме и минимуме УПВ зарождается очередная пластическая волна, имеющая соответствующую максимальную и минимальную амплитуды. Встреча последующих пластических волн приводит к образованию новых пучностей и узлов пластической стоячей волны, что соответствует многочисленным экспериментальным наблюдениям [1] и дает возможность объяснить природу образования стоячих волн. Максимальные по значению амплитуд пластические волны (полуволны сжатия) образуют синфазные колебания частиц, а минимальные (полуволны растяжения) – противофазные. Смещения при образовании стоячей пластической волны определяются по известной зависимости

$$u = A_{\text{ПЛ}} \cos kx \cos \omega t , \qquad (4)$$

где $A_{\text{ПЛ}} = 2\, a_{\text{ПЛ}}$; k – волновое число ($k = 2\pi/\lambda$); x – координата; λ – длина волны.

Таким образом, на основании проведенных исследований получены следующие выводы:

- предложена зависимость по оценке средней скорости распространения бегущих пластических волн;
- сделано утверждение, что любая волна нагружения является упругопластической волной;
- дана оценка кинематических параметров пластических волн;
- в общем виде показан механизм образования бегущими пластическими волнами стоячей пластической волны в твердом теле.

Проведенные исследования позволяют представить к рассмотрению графическое изображение упругопластической волны и высказать гипотезу о пульсации упругопластической волны в процессе ее распространения, при этом процесс пульсации сопровождается рождением бегущей пластической волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: ИИЛ, 1957. 727 с.
2. *Иродов И.Е.* Волновые процессы. М.-СПб: Физматлит, 1999. 255 с.
3. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
4. *Кольский Г.* Волны напряжений в твердых телах. М.: ИИЛ, 1955. 192 с.

5. *Матаушек И.* Ультразвуковая техника. М.: ГНТИИЛ по черной металлургии, 1962. 511 с.
6. *Пирс Дж.* Почти все о волнах. М.: Мир, 1976. 176 с.
7. *Работнов Ю.М.* Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 744 с.
8. *Степанов Г.В.* Упругопластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. Киев: Наукова думка, 1991. 288 с.
9. *Ткаченко Е.С.* К вопросу о механизме разрушения угольных образцов (брикетов) из выбросоопасных пластов / Е.С.Ткаченко, О.И.Хмара // Аэрология: Научн. сообщ. / Ин-т горного дела им. А.А.Скочинского. М., 1997. С. 56-66.
10. Ультразвук. М.: Сов. Энциклопедия, 1979. 400 с.