УДК 550.34+539.4

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ПРОЦЕССЫ РАЗРУШЕНИЯ

Мишин С.В.

ФГБПН «Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт» (СВКНИИ ДВО РАН), Магадан, e-mail: mishin@neisri.ru

Процессы разрушения твердой среды рассматриваются в связи с формированием и действием сейсмического излучения. Основой анализа является представление о сейсмическом излучении как о передаче в твердой среде механического импульса.

Ключевые слова: разрушение, сейсмическое излучение, импульс, землетрясение, ньютоновские силы

SEISMIC RADIATION AND DISINTEGRATION

Mishin S.V.

NEISRI FEB RAS, Magadan, e-mail: mishin@neisri.ru

The processes of disintegration of solid areas are discussed in connection with forms and actions of seismic radiation. The base of analysis is an idea that seismic radiation is the propagation of mechanical impulse (momentum & moment-of-momentum).

Keywords: disintegration, seismic radiation, impulse, earthquake, Newtonian forces

В соответствии с развиваемой нами концепцией физики сейсмических процессов [5, 6] ударное разрушение представляется следствием действия сейсмического излучения – ньютоновских сил (производных импульса по времени). Трещина (разлом) – это след сместившейся массы. Сплошная среда разрушается, распадаясь на массивные части под действием сил, действующих внутри этой среды. В качестве простого примера процесса разрушения рассмотрим разбивание камня с помощью молотка и зубила. Камень разбивается, очевидно, не молотком – молоток вообще не касается камня – и не зубилом – трещины появляются в среде вне зоны контакта ее с зубилом. В момент удара молоток отдает зубилу механический импульс. Камень разрушается излучением, сформированным при ударе молотка об обушок зубила и распространившимся вдоль зубила, как проводника этого излучения. Заметим, что перед ударом камень можно считать свободным от напряжений, разрушение формируется немедленно в процессе распространения излучения в его материале, критерии устойчивости следует искать в силе удара и в положении контакта тела с зубилом. Трещины, разделяющие тело после удара, появляются во внутренних областях материала.

В «Физическом энциклопедическом словаре» процесс разрушения определяется так:

«*Согласно механической концепции, разрыв на части рассматривается как результат потери устойчивости твердого тела, находящегося в поле внешних и внутренних напряжений. Считается, что для каждого материала имеется определенное пороговое напряжение, при достижении которого тело теряет устойчивость и разрывается. Ниже порога тело устойчиво и может сохраняться под нагрузкой сколь угодно долго. Это пороговое напряжение принимается за меру прочности тела. Прочность на разрыв определяется величиной разрывного напряжения* σ_p, *а теоретич. задача о прочности сводится к отысканию критерия устойчивости.*

В кинетической концепции основное внимание сосредоточивают на процессе развития разрушения. Разрыв тела рассматривается как конечный этап постепенного развития и накопления субмикроскопических разрушений. Этот процесс развивается в напряженном теле под действием тепловых флуктуаций. Вводится понятие о долговечности под нагрузкой, т.е. о времени τ, необходимом для развития процесса разрушения от момента нагружения тела до его разрыва. Выяснение природы процесса разрушения, установление зависимости долговечности или скорости развития этого процесса от температуры, величины нагрузки, вида напряженного состояния и др. факторов составляют экспериментальную и теоретическую основу физич. учения о прочности» [3, с. 235].

Модель среды

Разрушаться с появлением трещин могут лишь твердые тела, такие тела могут также разрушаться в процессах расплавления или растворения. Существует определенная величина – теплота плавления, которая фиксирует значение энергии, потребной для разрыва всех связей, объединяющих молекулы

вещества в твердое тело. Качество связей, объединяющих частицы разных элементов тела, различается в значительной мере, отчего механическая прочность твердых тел варьирует в широких пределах. Особенно разнообразны связи в больших объемах твердых тел, складывающих верхние ярусы земных недр. «*Термин «трещиноватость» – синоним понятия «совокупность разрывов сплошности горных пород*» [10, с.4]. Систему трещин можно рассматривать как множество границ, разделяющих массивные цельные элементы материала тела [14]. Границы эти нередко не сплошные, массивные элементы материала остаются связанными, но поверхности, связывающие их, уменьшены за счет больших промежутков между атомами вещества. В твердых телах перемещения атомов в среде затруднены, поэтому трещины – границы между отдельностями материала – остаются неизменными в течение значительных промежутков времени.

С точки зрения «модели из частиц» [1, 13] среда представляет собой систему молекул материала, в которой расстояния между атомами весьма разнообразны, причем в трещинах эти расстояния превышают расстояния атомных (молекулярных) взаимодействий. С макроскопической (континуальной) точки зрения среда представляется системой жестких тел, соединенных более или менее сильными связями. В результате теплового движения атомов и молекул материала связи между отдельностями постоянно меняются, что соответствует непрерывному изменению прочности системы [2]. Устойчивость среды определяется скелетом или каркасом наиболее сильных взаимодействий, удерживающих в равновесии массы элементов среды. Для масс горных пород, складывающих земные недра, можно рассматривать систему геологических тел, удерживаемых каркасом, подобно стеллажу, на котором расположены массивные тела.

Модель нагрузки

Сейсмическое излучение представляет собой передачу механического импульса, импульс распространяется в материальных системах по законам удара. Под механическим импульсом мы понимаем важнейшую характеристику движения, описываемую законами сохранения количества движения и момента количества движения. Закон сохранения количества движения определяется однородностью пространства, сохранение момента количества движения связывается с изотропией пространства [4]. Количество движения называют также поступательным импульсом, а момент количества движения – вращательным импульсом. Механическое движение представлено в природе в двух формах – поступательного движения и вращения. Вращение и поступательное движение взаимообратимы, поэтому можно, вообще говоря, оценивать механическое движение одной величиной, имеющей шесть компонент – три вращательных и три поступательных. Внешние воздействия передаются внутрь среды при распространении механического импульса. Импульс распространяется в систему масс через контакты тел, огибая трещины – пустоты и слабые связи. Скорость распространения импульса в среду определяется характером взаимного расположения частиц вещества.

На фронте распространения импульса – сейсмической волны – действуют ньютоновские силы – производные импульса по времени. Характер действия нагрузки зависит от скорости передачи импульса – например, трудно открыть дверь с помощью выстрела из пистолета – пуля вырвет элемент материала из двери, а массивная конструкция может сохранить прежнее положение, несмотря на значительную энергию удара. Результат приложения нагрузки также заметно изменяется от ее направления, т.к. импульс – величина векторная.

Формирование нагрузки при ударе происходит следующим образом: масса M, движущаяся со скоростью V, соприкасаясь с поверхностью неподвижной среды, останавливается и отдает свой импульс P и кинетическую энергию E этой среде. Переданный импульс P распространяется в полупространстве в виде сейсмической волны, имеющей сферический фронт, увеличивающий радиус со скоростью $v_р$. На фронте волны по законам удара действуют ньютоновские силы $F = dP/dt$, связанные с приобретением и передачей импульса частицами среды. Кинетическая энергия E, переданная при ударе, связана с механическим импульсом известным соотношением: $E = MV^2/2 = P^2/2M$. Импульс, таким образом, оценивается величиной $P = sqrt(2ME)$. При распространении импульса в виде волны его величина распределена по поверхности фронта S – плотность импульса G определяется отношением значения импульса к размерам поверхности фронта: $G = P/S$. Каждый элемент волнового фронта создает давление N на связи, удерживающие частицы среды в системе масс. Это давление

соответствует производной плотности импульса по времени: $N = dG/dt$, т.е. зависит не только от значения импульса, но и от формы приложенной нагрузки, времени приложения нагрузки. Медленная передача импульса среде приводит к меньшим значениям создаваемых давлений – падение массивного предмета более опасно для среды, чем аккуратная установка его. Среднее значение давления можно оценить величиной

$$f = P/(S\Delta t),$$

где Δt – длительность передачи импульса среде. Эта длительность при свободном падении определяется размерами ударяющего тела L и скоростью распространения продольной волны в этом теле: $\Delta t = L/v_p$. Таким образом, приложение нагрузки к поверхности среды приводит к формированию давлений внутри ее, что во многих случаях вызывает образование трещин.

Экспериментальные результаты

Основанием для заключения о том, что сейсмическое излучение переносит механический импульс послужили простые опыты с регистрацией сейсмических сигналов от механических ударов и взрывов [5, 6]. Установлено, что сейсмические сигналы при ударах равной энергии, но разных масс, неодинаковы, их интенсивность пропорциональна значениям ударяющих масс. При ударах, передающих системе равные импульсы, сейсмические сигналы оказываются одинаковыми в пределах точности измерений.

Источниками сейсмического излучения служат также взрывы. В известных нам руководствах по взрывному делу [8, 11, 12] понятие механического импульса игнорируется. Мы попытались экспериментально сопоставить сейсмические сигналы, генерируемые ударами и взрывами.

В результате проведения предыдущих экспериментов мы пришли к выводу, что интенсивность сейсмических сигналов при механических ударах пропорциональна переданному среде механическому импульсу. На основании такого предположения попытаемся получить эквивалентные сейсмограммы взрыва и удара. Возьмем навеску дымного охотничьего пороха массой 1 г, поместим этот порох в капроновую трубку вместе с двумя проводками, соединенными тонкой константановой проволочкой. Эти проводки представляют собой запал – при подаче на запал напряжения 200 В с конденсатора тонкая проволочка сгорит и воспламенит окружающий ее порох. Капроновую трубку с зарядом и запалом поместим в углубление стальной болванки и проведем взрыв заряда пороха массой 1 г. Сотрясение от взрыва будем регистрировать сейсмоприемником. Теперь попытаемся получить сейсмограмму удара, которую можно было бы считать эквивалентной сейсмограмме взрыва (т.е. амплитуды сигнала и его частотный состав должны быть сопоставимы).

Энергия химического превращения 1 г дымного пороха – 2500 Дж (взрывное превращение метательных ВВ – порохов – протекает в виде горения). Предположим, что вся химическая энергия взрывной реакции перешла в кинетическую энергию ее продуктов. Связь кинетической энергии с импульсом выражается соотношением $E = P^2/2M$ (будем считать, что продукты взрывной реакции приобретают только поступательное движение). Отсюда

$$P_1 = sqrt(2ME),$$

где P_1 – импульс, переданный среде при взрыве; M – масса заряда, равная массе продуктов взрывного превращения; E – химическая энергия взрыва. Для 1 г пороха значение переданного импульса P_1 составит 2,2 кгм/с.

При ударе потенциальная энергия массы mgh в результате свободного падения переходит в кинетическую, т.е.

$$mgh = \frac{P_2^2}{2m}.$$

Отсюда $P_2 = m{\cdot}sqrt(2gh)$, т.е. импульс, переданный при ударе, равен ударяющей массе, умноженной на квадратный корень из удвоенного произведения ускорения свободного падения на значение высоты падения. Выберем в качестве ударяющего тела полукилограммовую гирю и подсчитаем, с какой высоты она должна упасть, чтобы среда получила 2,2 кгм/с механического импульса. Из предыдущего равенства получим, что

$$h = \frac{P_2^2}{m^2/2g} \approx 1 \text{ м},$$

т.е. для того, чтобы при ударе среда получила 2,2 кгм/с импульса, полукилограммовую гирю следует уронить с высоты 1 м. Сопоставляя полученные сейсмограммы, отметим их подобие и примерное равенство амплитуд, несмотря на удивительное обстоятельство – энергии процессов взрыва и удара различаются в 500 раз (во столько же раз различаются массы). Результаты

таких опытов вместе с законом сохранения импульса позволяют утверждать, что именно сейсмическое излучение переносит механический импульс.

Рассмотрим реакцию материальной системы на удар массивного тела. Возьмем образец стекла толщиной более 5 мм в виде квадрата стороной около 50 мм и массивную металлическую пластину с полированной поверхностью. Капнем на эту поверхность машинного масла и притрем к ней наш образец. Теперь уроним на горизонтальную поверхность притертого стекла стальной шар массой 100 г. Если этот шар упадет с высоты менее 10 см, мы не увидим результатов удара – после отскока шара образец останется прозрачным и однородным. Если шар упадет с высоты 10–20 см, то в результате удара на поверхности стекла останется кольцеобразное повреждение, несколько увеличивающее диаметр в глубине материала. Если шар падает с высоты 20–40 см, то в стекле появляются крупные конические трещины, напоминающие пузыри диаметром 1–3 см, При ударах шара, падающего с высоты более 40 см, образец разбивается вдребезги – возникает система радиальных трещин, распространяющихся от площадки удара к краям образца. Наблюдая появление конических трещин в стекле, отмечаем, что сейсмическое излучение при ударе вырывает из сплошной среды конус – фигуру закономерной формы. Конические трещины в стекле «залечиваются», если образец подогреть, и даже без подогревания через определенное время; разрыв сплошности чрезвычайно тонкий, так что тепловое движение частиц стекла восстанавливает целостность материала.

Радиальные трещины мы интерпретируем как результат интерференции сейсмических волн, отразившихся от границ разбиваемого тела в процессе распространения в нем импульса.

Были проведены опыты по разбиванию стеклянных образцов непредельными нагрузками [7]. На поверхность пластинок с выбранных значений высоты падал стальной шарик. Высота выбиралась так, чтобы образец не разбивался с первого удара. Однако последовательные удары небольшой энергии при многократном повторении все-таки приводили к разрушению стекла, причем число ударов, необходимых для разрушения, оказывалось обратно пропорциональным высоте падения шарика. Отсюда можно сделать вывод о том, что нарушения сплошности внутри материала накапливаются по мере повторения кратковременных непредельных воздействий – история нагружений фиксируется в молекулярной структуре тела. Этот результат согласуется с представлениями о длительной прочности, развиваемыми группой С.Н Журкова [4, 9].

Заключение

Действие сейсмического излучения характеризует давление, создаваемое ньютоновскими силами при передаче импульса от возбужденных частиц к частицам невозбужденным. Мы называем сотрясением процесс движения материальных тел при получении пакета сейсмического излучения. Сотрясение – специфическая форма механического движения материальных систем, однако описывать это движение следует с помощью привычных средств теоретической механики. Главные понятия динамики механических систем – энергия, импульс, момент импульса, сила. Измерения же сотрясений обычно сводятся к кинематическим характеристикам движения материальной системы – смещениям, скоростям и ускорениям. Важнейшей величиной, связывающей динамические параметры движения масс и кинематические параметры движения геометрических точек, является ньютоновская сила $F = dP/dt$. Именно силы, действующие при изменении количества движения, распространяющегося в материальной системе, приводят к ускорению элементов массы.

Элементом массы системы назовем жесткое твердое тело, форма и размеры которого пренебрежимо мало меняются в процессе механического движения. В общем случае, как всякое твердое тело, элемент массы обладает шестью степенями свободы, однако движение элемента в системе ограничено наложенными связями, т.е. взаимодействием между элементами. Схему процесса сотрясения материальной системы можно представить в виде следующих актов взаимодействия элементов:

а) часть элементов системы приобретает механический импульс. Этот процесс протекает по законам удара. Та площадка, на которой импульс приобретается системой, эквивалентна автономному источнику сейсмического излучения;

б)импульс распространяется в системе через связи между элементами. При передаче импульса от элемента к элементу на связи действует ньютоновская сила – производная импульса по времени. Действующая сила пропорциональна переданному

импульсу и обратно пропорциональна времени его передачи;

в) ньютоновские силы, действующие при передаче импульса, обеспечивают движение элементов массы, составляющих систему. Разность между действующей силой и прочностными взаимодействиями приводит к появлению ускорения элемента массы, а в некоторых случаях и к разрыву связей между элементами;

г) если элемент массы обладает ускорением, он неизбежно приобретет и скорость перемещения в пространстве, т.е. при распространении сейсмической волны часть ее энергии может перейти в кинетическую энергию движения элементов массы системы;

д) движение элементов массы приводит к появлению смещений этих элементов относительно исходного положения, к геометрическому изменению системы. Если материальная система представляет собой строительную конструкцию, то изменение формы системы может повлечь за собой включение поля тяготения Земли в качестве нового мощного источника разрушения.

Таким образом, в процессе сотрясения материальной системы прослеживается четкая иерархия физических характеристик процесса: в системе со скоростью сейсмических волн распространяется ИМПУЛЬС, при передаче импульса действует СИЛА, действие силы вызывает появление УСКОРЕНИЯ элемента МАССЫ, ускорение есть причина появления СКОРОСТИ движения этих элементов, наконец, в результате движения элемент СМЕЩАЕТСЯ из исходного равновесного состояния.

В изложенной схеме процессе сотрясения разрушение системы наступает тогда, когда ньютоновские силы, действующие внутри цельного тела, превосходят взаимодействия элементов системы, в результате чего появляются трещины – некоторые элементы системы отделяются от нее. Для строительных конструкций наиболее опасными являются разрушения несущих элементов сооружения, его каркаса. В этих случаях включается сила тяжести, которая приводит к катастрофическим последствиям.

Список литературы

1. Гудьер Дж. Математическая теория равновесных трещин // Разрушение. – Т.2. – С. 13–82.

2. Журков С.Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел. // Физика прочности и пластичности. – Л: Наука, 1986. – С. 5–11.

3. Журков С.Н., Орлов А.Н., Регель В.Р. Прочность // Физический энциклопедический словарь. – т.4. – М.: Советская энциклопедия, 1965. – С. 235–238.

4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 206 с.

5. Мишин С.В. Элементы сейсмологии. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1993. – 166 с.

6. Мишин С.В. Сейсмические процессы и сохранение импульса. – Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. – 115 с.

7. Мишин С.В., Воропаева Е.Н. Эксперименты по разрушению стекла механическими ударами. – Магадан, 1984. – Деп. ВИНИТИ №7012-84 Деп.

8. Разрушение горных пород энергией взрыва / под ред. Э.И. Ефремова. – Киев: Наукова думка, 1987. – 262 с.

9. Регель В.Р., Слуцкер А.И. Кинетическая природа прочности // Физика сегодня и завтра. – Л.: Наука, 1973. – С. 90–175.

10. Сергеев К.Ф. Хрупкое разрушение твердых тел. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. – 241 с.

11. Суханов А.Ф., Кутузов Б.Н. Разрушение горных пород взрывом. – М.: Недра, 1983. – 340 с.

12. Федоренко П.И. Буровзрывные работы. – М.: Недра, 1991. – 272 с.

13. Хеллан К. Введение в механику разрушения. – М.: Мир, 1988. – 364 с.

14. Эрдоган Ф. Теория распространения трещин // Разрушение. – Т. 2. – С. 521–615.