© С.О. Вдовин, П.Ю. Лысенко,
Р.Г. Простяков, Е.Б.Черепецкая,
2012

УДК 622.611.4:620.179.16

С.О. Вдовин, П.Ю. Лысенко, Р.Г. Простяков, Е.Б.Черепецкая

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ[*]

Приведена теоретическая модель, позволяющая по частотным зависимостям фазовой скорости и коэффициента затухания оптико-акустических импульсов, прошедших через образец геоматериала, рассчитать параметр поврежденности.
Ключевые слова: поврежденность геоматериалов, лазерно-ультрозвуковая спектроскопия, анизотрапия.

Безопасное ведения горных работ, устойчивость выработок большого диаметра, задачи нефтяной сейсморазведки – все это приводит к необходимости полной информации о структуре и свойствах горного массива. Наиболее актуальными объектами при решении основных задач данных областей являются среды с трещинами, возникающими в результате напряженно-деформированного состояния массива. Поскольку трещины обусловливаются напряженным состоянием, они обладают преобладающей ориентацией и вследствие этого массив оказывается анизотропным [1,2]. Главными проблемами здесь являются оценка нарушенности массива в результате проходки выработок большого диаметра, а также общей трещиноватости, определяющей возможное вместилище нефти и газа. Следует отметить, что для корректной интерпретации результатов шахтных измерений и геологоразведочных работ предварительно выполняются лабораторные исследования на образцах [2].

В настоящей работе делается попытка на основе приведенной теоретической модели ввести количественную оценку поврежденности образцов геоматериалов, используя лазерно-ультразвуковую спектроскопию.

Начало механики поврежденного состояния материалов было заложено в 60-х годах прошлого века в работах Л.М. Качанова [3] и Ю.Н. Работнова [4], где была применена единая схема описания поврежденности для описания нарушенного состояния упругих и упругопластических сред. В работах [3—5] под поврежденностью понималось уменьшение упругого отклика тела на внешние воздействия, которое было обусловлено появлением и развитием таких микродефектов, как микротрещины в теории упругости, микропоры при ползучести материалов и т.д.

[*] Работа выполнена по результатам доклада на Неделе горняка-2012 и в рамках гранта РФФИ № 11-05-00574.

Таким образом, поврежденность образцов может быть обнаружена в результате исследования реакции тела на различные внешние воздействия. Например, если ультразвуковой сигнал проходит через образец и принимается широкополосным приемником, то по спектру прошедшего сигнала может быть оценена степень нарушенности образца. Так наличие поля повреждений в твердых материалах может быть косвенно обнаружено и отчасти количественно представлено через уменьшение скорости прохождения ультразвукового сигнала и увеличение коэффициента затухания продольных упругих волн [6, 7] уменьшение модуля Юнга [8], и т. д. По данным измерениям представляется возможным лишь ввести эмпирическую количественную характеристику поврежденности геоматериала [6,7], что не позволяет определить предел его прочности. Поэтому в последних работах [7—11], связанных с механикой разрушения, в расчетах за меру поврежденности в процессе деформации принимается параметр, характеризующий относительную плотность равномерно рассеянных в единице объема микродефектов. В геоматериале, как правило, этот параметр всегда отличен от нуля и становится близким к единице в момент разрушения.

Рассмотрим образец горной породы, на поверхности которого возбуждается оптико-акустическим генератором продольная волна. Считаем, что $z = 0$ сформирован однополярный широкополосный импульс продольной упругой волны со смещением частиц

$$u_z(z=0,t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}_z(z=0,\omega)\exp(i\omega t)d\omega \ ,$$

где $\tilde{u}_z(z=0,\omega)$ — амплитудный спектр [7,8]. Пусть $\xi(x,t)$ — скалярный параметр поврежденности, характеризующий относительную плотность равномерно рассеянных в единице объема микродефектов. Этот параметр равен нулю, когда повреждений нет, и близок к единице в момент разрушения образца в результате его нагружения. Эволюция поврежденности $\xi(x,t)$ в общем случае описывается кинетическим уравнением вида [12]:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = f(\sigma_{zz}, \xi) \ , \qquad (1)$$

где σ_{zz} — внешнее действующее напряжение. Функция $f(\sigma_{zz}, \xi)$ чаще всего аппроксимируется линейной зависимостью, иногда – полиномиальной зависимостью. Одномерное волновое уравнение, описывающее распространение продольной упругой волны вдоль оси z, имеет вид

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} - c_0^2 \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = \gamma\, c_0^2 \frac{\partial \xi}{\partial z} \ , \qquad (2)$$

где $c_0^2 = (\lambda + 2\mu)/\rho$, $\lambda + 2\mu$ — коэффициенты Ламе, ρ — плотность среды, u_z – компонента смещения частиц в волне вдоль оси z. Напряжение $\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu)\frac{\partial u_z}{\partial z}$ и, аппроксимируя функцию $f(\sigma_{zz}, u_z)$ линейной зависимостью, получим:

$$f(\sigma_{zz}, u_z) = -\delta\xi + \beta(\lambda + 2\mu)\frac{\partial u_z}{\partial z} \ , \quad (3)$$

где δ, β — константы, характеризующие поврежденность геоматериала и связь между количеством циклических процессов и накоплением поврежденности. С учетом (3), уравнение (1) эволюции поврежденности примет вид

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \delta \xi = \beta \eta \frac{\partial u_z}{\partial z}, \quad (4)$$

где введено обозначение $\eta = \lambda + 2\mu$. Будем искать решение системы (2),(4) в виде разложения в интеграл Фурье

$$u_z(t,z) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{u}_z(z,\omega) \exp(i\omega t)\, d\omega,$$

$$\xi(t,z) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\xi}(z,\omega) \exp(i\omega t) d\omega, \quad (5)$$

где ω — круговая частота. Подставляя (5) в (2), (4), получим

$$(i\omega + \delta)\tilde{\xi} = \beta \eta \frac{\partial \tilde{u}_z}{\partial z} \quad (6)$$

$$\frac{\omega^2}{c_0^2}\tilde{u}_z + \frac{d^2 \tilde{u}_z}{dz^2} = -\gamma \frac{\partial \tilde{\xi}}{\partial z} \quad (7)$$

Будем искать характеристическое уравнение системы (6)-(7) в виде $\tilde{u}_z(z,\omega) = u_0 \exp(-ikz)$, $\tilde{\xi}_z(z,\omega) =$ и, подставляя данные выражения в (6)-(7), придем к дисперсионному соотношению

$$k^2(i\omega + \delta + \beta\gamma\eta) = \frac{\omega^2}{c_0^2}(i\omega + \delta)$$

$$= \xi_0 \exp(-ikz). \quad (8)$$

В дисперсионном уравнении присутствуют как действительная, так и мнимая части. Это означает, что при распространении упругой волны появляется не только дисперсия фазовой скорости, но и наблюдается ее затухание. Представим волновое число в виде $k = k_1 + ik_2$, где k_1 — действительная часть, которая отвечает за фазовую скорость волны $c_\phi = k_1/\omega$, а k_2 - мнимая часть, определяет коэффициент затухания. Поскольку волна распространяется в направлении $z > 0$, ее амплитуда с расстоянием должна убывать, то значения k_1 и k_2 не могут быть отрицательными.

Решая дисперсионное уравнение (8), получим

$$\begin{cases} k_1 = \dfrac{\omega}{c_0}\left(\dfrac{\varepsilon}{\tau}\left(1+\left(1+4\omega^2\beta^2\eta^2/\varepsilon^2\right)^{1/2}\right)\right) \\ k_2 = \dfrac{\omega^2}{c_0}\beta\eta\gamma\sqrt{2}\left(\varepsilon\left(1+\left(1+4\omega^2\beta^2\eta^2/\varepsilon^2\right)^{1/2}\right)\right)^{-1/2} \\ \theta = \delta + \beta\gamma\eta,\ \tau = \theta^2 + \omega^2,\ \ \varepsilon = \delta\theta + \omega^2 \end{cases} \quad (9)$$

Найдем предельные значения фазовой скорости и коэффициента затухания в области низких и высоких частот. При $\omega \to 0$ фазовая скорость принимает значение $c_\phi(\omega \to 0) =$ $= c_0(1 + \beta\eta\gamma/\delta)^{1/2}$, а коэффициент затухания пропорционален квадрату частоты $k_2(\omega \to 0) = \dfrac{\omega^2 \beta\eta\gamma}{c_0\sqrt{\delta(1+\beta\eta\gamma)}}$, его значение достаточно мало. Это означает, что трещины не должны замечаться на низких частотах. В высокочастотном диапазоне при $\omega \to \infty$ фазовая скорость стремится к постоянной величине, равной $c_\phi(\omega \to \infty) = c_0$, а коэффициент затухания пропорционален частоте $k_2(\omega \to \infty) = \dfrac{\omega}{c_0}\beta\eta\gamma$.

Амплитудный спектр оптико-акустического импульса на расстоянии z от поверхности исследуемого образца геоматериала имеет вид:

$$\tilde{u}_z(z,\omega) = \tilde{u}_z(z=0,\omega)\exp(-k_2 z). \quad (10)$$

Таким образом, по частотным зависимостям $c_\phi(\omega)$ и $k_2(\omega)$) можно определить параметры β, γ, δ, характе-

ризующие нарушенность структуры и найти значение параметра поврежденности как функцию толщины образца геоматериала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гольдин С.В.* Сейсмические волны в анизотропных средах.Новосибирск. Изд СО РАН,2008., 374 С.

2. *Schoenberg M., Muir F. A* calculus for finely layered anisotropic media// Geophys. 1989. V.54. P.581-589.

3. *Качанов Л.М.* Основы механики разрушенияю М.:Наука, 1974. 316 с.

4. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. М.:Наука, 1966. 752 с.

5. *Maugin G.A.* The Thermomechenics of Plascity and Fracture. Cambridge University Press, UK.1992. 350 p.

6. *Wang J., Fang Q.F., Zhu Z.G.* Sensitivity of Ultrasonic Attenuation and Velocity Change to Ciclic Deformation in Pure Aluminum// Phys.Stat.Sol.(a)/1998/Vol.169.P.43-48.

7. *Карабутов А.А., Макоров В.А., Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л.* Лазерно-ультразвуковая спектроскопия горных пород. М.: «Горная книга», 2008. 198с.

8. *Лысенко П.Ю., Простяков Р.Г., Вдовин С.О.* Оценка поврежденности геоматериалов методом лазерной ультразвуковой спектроскопии.// ГИАБ. 2012. №6. С.138-142.

9. *Романов А.Н.* Разрушение при малоцикловом нагружении. М.: Наука. 1988. 278 с.

10. *Углов А.Л., ЕрофеевВ.И., Смирнов А.Н.* Акустический контроль оборудования при изготовлении и эксплуатации. М.: Наука. 2009. 424 с.

11. *Мишакин В.В., Наумов М.Ю., Мишакин С.В., Кассина Н.В.* Разработка акустического метода оценки поврежденности металлических сплавов до образования макротрещины// Дефектоскопия. 2007, №10. С.49-57.

12. *Ерофеев В.И., Никитина Е.А.* Самосогласованная динамическая задача оценки поврежденности материала акустическим методом// Акустю ж., 2010.т.56. №4. С.554-557. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Вдовин С.О. – аспирант,
Лысенко П.Ю. — аспирант,
Простяков Р.Г. – студент,
Черепецкая Е.Б. — профессор,
Московский государственный горный университет, e-mail: ftkp@mail.ru.

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ РИСКОВ ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПРИНЯТИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ПЕРЕХОДУ ЗОН ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ (922/10-12 от 01.06.12) 3 с.

Кузнецов Юрий Николаевич, профессор, доктор технических наук,
Киселев Александр Михайлович, аспирант,
Московский государственный горный университет.

MAIN TYPES OF RISKS OF DESIGN DECISIONS ARISING AT ACCEPTANCE ON TRANSITION OF ZONES OF GEOLOGICAL VIOLATIONS OF COAL LAYERS

Kuznetsov Yu.N., Kiselyov A.M.