

## ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ШУНГИТА АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Н.А. Морозов, С.С. Саркисов

Научный руководитель: профессор, д.т.н. Е.Б. Черепецкая  
 Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
 Россия, г. Москва, Ленинский проспект, 4, 119991  
 E-mail: morozov499@yandex.ru; sarkfoil@ya.ru

Шунгитовые породы являются природным наноккомпозитом [1]. Структура шунгита представлена мелкодисперсными кристаллами силикатного состава размером 1 мкм плотно упакованном в аморфной силикатной матрице, а также вкраплениями углерода в виде фуллеренов [2, 3]. Данная особенность наделяет материал высокими прочностными и изоляционными показателями. Благодаря этому, шунгит часто используют в качестве фибры для радиоизоляционных бетонных и конструкций повышенной прочности.

Для того, чтобы правильно выбрать технологическую схему изготовления бетонов, обладающих требуемыми свойствами, необходимо достоверно знать механические параметры фибры. Однако существующие способы измерения упругих механических свойств данной породы с использованием микро- и наноинденторов имеет ряд ограничений, связанных со сложной структурой образца.

В данной работе представлены результаты измерения скоростей продольных и сдвиговых упругих волн в образцах шунгита и восстановления по ним локальных значений модуля Юнга, модуля сдвига и коэффициента Пуассона, на примере использования сертифицированного лазерно-ультразвукового дефектоскопа модели «УДЛ-2». Связь скорости прохождения упругой волны и динамических упругих модулей представлена в таблице 1. Оптико-акустический генератор УДЛ-2 позволяет возбуждать сверхкороткие, длительностью 70 нс, и мощные, амплитудой давления до 1 МПа ультразвуковые импульсы строго контролируемой формы. Точность измерения скоростей упругих волн составляет 3 м/с, что составляет менее 2 % относительной погрешности при восстановлении упругих модулей. Благодаря данным характеристикам, УДЛ-2 применим к высоко поглощающим средам, затухание в которых не позволяет проводить измерения традиционными приборами измерения упругих волн.

Таблица 1 – Связь скорости прохождения упругой волны и упругих модулей

Модуль Юнга	Коэффициент Пуассона	Модуль сдвига
$E = \rho c_s^2 \left( \frac{3c_l^2 - 4c_s^2}{c_l^2 - c_s^2} \right)$	$\nu = \frac{c_l^2 - 2c_s^2}{2(c_l^2 - c_s^2)}$	$G = \rho c_s^2$

Объектом лазерно-ультразвукового контроля являлись образцы шунгита. Один из них представлен в виде пластины с плоскопараллельными стенками размерами 41×31×4,15 мм (рис. 1). Измеренная плотность материала образца составила 2,247 г/см<sup>3</sup>.

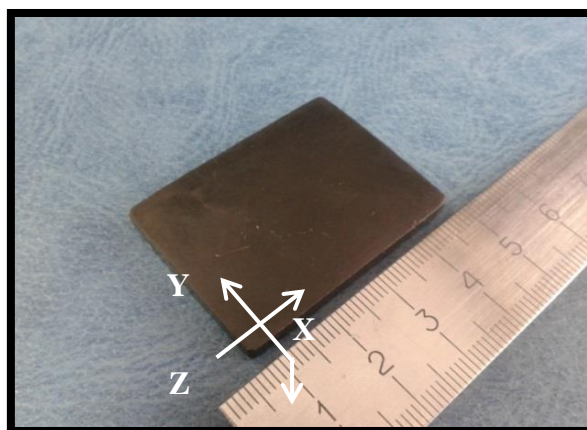


Рис. 1. Фотография исследуемого образца

Измерение динамических упругих модулей на образце проводилось в ручном режиме с использованием плоского широкополосного оптико-акустического преобразователя и программным обеспечением «DSV». Для определения скорости упругой волны, измерялся интервал между временами прохождения ультразвукового сигнала через оптико-акустический генератор и минимума сигнала, отраженного от тыльной поверхности объекта (донного сигнала) с точностью менее 3 нс. Сдвиговая волна определялась по амплитудному всплеску между первым и вторым пиками продольной волны. Рассчитанные значения упругих модулей материала представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Упругие модули по направлению оси Z

№ точки	$Cl_z$ , м/с	$Ct_z$ , м/с	Модуль Юнга E, ГПа	Модуль сдвига $\mu$ , ГПа	Коэффициент Пуассона $\sigma$
Точка 1	3900	2680	28	13	0.05
Точка 2	4010	2740	29	14	0.06
Точка 3	3910	2700	28	13	0.04
Точка 4	3944	2710	37	17	0,12

Таким образом, оптико-акустические измерения позволяют определять модули упругости сильно поглощающих ультразвуком геоматериалов с высокой степенью поглощения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krasnovyd S.V., Konchits A. A., Shanina B.D. Local structure and paramagnetic properties of the nanostructured carbonaceous material shungite. *Nanoscale Res Lett.* 2015; p.10: p.78.doi: 10.1186/s11671-015-0767-9
2. Buseck P.R., Tsipursky S.T., Hettich R. Fullerenes from the geological environment. *Science.*1992; p.257;p.215–7. doi: 10.1126/science.257.5067.215
3. Kholodkevich S.V., Berezkin V.I., Davydov V.Y. Specific structural features and thermal resistance of shungite carbon to graphitization. *Phys Solid State.* 1999; p.41:p.1291–4. doi: 10.1134/1.1130984