

АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 534.86

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СДВИГОВОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ В НЕОДНОРОДНЫХ РЕЗИНОПОДОБНЫХ СРЕДАХ**В. Г. Андреев, А. В. Ведерников***(кафедра акустики)*

E-mail: a_vedernikov@mail.ru

Приведены результаты измерений сдвигового модуля упругости в резиноподобных материалах с помощью сдвиговых волн, возбужденных сфокусированным ультразвуковым пучком. Описана методика определения положения и размера неоднородностей по задержке сдвиговой волны в образцах с неоднородностями в виде плоского слоя и цилиндра. Проведено сравнение значений модуля упругости, полученных из данных по измерению скорости упругих волн, с результатами статических измерений.

Введение

Патологические изменения в мягких биологических тканях приводят к трансформации их упругих свойств. Пальпация является одним из древнейших методов диагностики различного рода опухолей, которые на ощупь воспринимаются более жесткими по сравнению с окружающей здоровой тканью. Субъективное ощущение повышенной жесткости опухолевых образований связано со значительным увеличением (на порядок и более) модуля сдвиговой упругости, в то время как модуль объемной упругости изменяется в пределах нескольких процентов. Стандартная аппаратура ультразвуковой диагностики (УЗИ) детектирует изменения объемной упругости тканей и связанные с ними изменения скорости продольных акустических волн и использует эту информацию для обнаружения опухолей. Однако чувствительность стандартной аппаратуры УЗИ недостаточна для ранней диагностики раковых опухолей в силу слабого контраста скорости продольных волн в здоровых и патологически измененных тканях, поэтому становится актуальной разработка методов измерения сдвигового модуля упругости мягких тканей, который более чувствителен к патологическим изменениям. В настоящей работе рассматривается один из возможных методов измерения распределения сдвиговой упругости в мягких биологических тканях. Эксперименты проводились в резиноподобном полимере, где, как и в мягких тканях, модуль сдвиговой упругости на несколько порядков ниже, чем модуль объемной упругости.

Методы измерения сдвиговой упругости мягких тканей различаются способами создания сдвиговых смещений, а также способами детектирования возникающих при этом внутренних движений. В одном из первых методов детектирования неоднородностей сдвигового модуля использовалось распределение смещений частиц внутри исследуемого объема при приложении к нему статической нагрузки [1]. Рас-

пределение амплитуды установившихся колебаний внутри объема при возбуждении низкочастотных вибраций на поверхности объекта использовалось для восстановления пространственного распределения модуля упругости в работе [2]. При импульсном возбуждении колебаний на поверхности образца в его объеме наблюдалась сдвиговая волна, скорость распространения которой зависит от модуля упругости. По измерению локальной скорости сдвиговых волн определялось распределение сдвигового модуля [3].

Источник сдвиговых волн может создаваться сфокусированным ультразвуковым пучком за счет сил радиационного давления ультразвука [4]. Сдвиговой модуль упругости в фокальной области излучателя может быть измерен по амплитуде сдвиговой волны, возбужденной ультразвуковой волной, промодулированной по гармоническому закону [5]. При использовании импульсной модуляции интенсивности ультразвука в фокальной области пучка возбуждается сдвиговая волна в форме видеоимпульса [6], скорость распространения которой определяется величиной сдвигового модуля. Детектирование профиля возбужденной сдвиговой волны проводилось как с помощью оптической регистрации, так и по рассеянию пробной ультразвуковой волны на частичке, движущейся вместе с волной [7]. В настоящей работе сдвиговая волна, возбужденная сфокусированным ультразвуковым пучком, используется для локализации неоднородностей сдвигового модуля и определения их размеров.

Материалы

Эксперименты проводились с использованием образцов, изготовленных из резиноподобного полимерного материала, сдвиговой модуль которого легко изменяется путем добавления отвердителя или размягчителя в основную композицию. Все изготовленные образцы имели форму кубика со стороной 40 мм

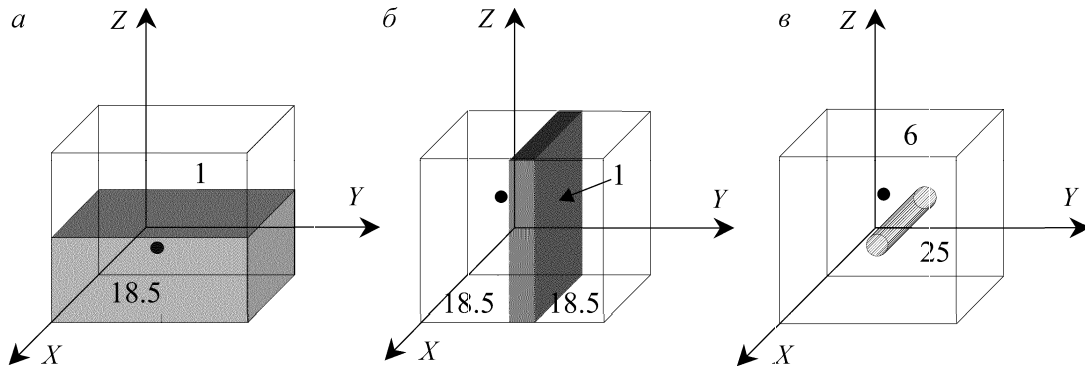


Рис. 1. Геометрия образцов, использованных в экспериментах: двуслойный (а), со вставками в виде плоского слоя толщиной 5 мм (б) и цилиндра диаметром 5 мм (в). Положение непрозрачной частицы показано черной точкой. Цифры соответствуют величинам сдвигового модуля в кПа, определенным из статических измерений

(рис. 1, а, б) и 65 мм (рис. 1, в). Первый образец (рис. 1, а) состоял из двух слоев со значениями сдвигового модуля 1 и 18.5 кПа. Вторым образец (рис. 1, б), изготовленный из материала со сдвиговым модулем 18.5 кПа, содержал в себе мягкую вставку в форме слоя толщиной 5 мм с модулем сдвига 1 кПа. В третий образец, изготовленный из полимера со сдвиговым модулем 25 кПа, была внедрена мягкая вставка в форме цилиндра диаметром 5 мм. Сдвиговые модули материалов, из которых изготавливались кубики и вставки, были измерены методом вдавливания жесткой сферы, который мы будем называть статическим методом. В каждый из образцов в процессе изготовления была помещена легкая непрозрачная частица, играющая роль затвора при оптической регистрации смещений. Относительное положение частицы отмечено на рис. 1 черной точкой.

Экспериментальная установка и методика измерений

Сдвиговая волна внутри исследуемого образца возбуждалась сфокусированным пьезопреобразователем, который работал в импульсно-периодическом режиме и излучал импульсы длительностью 300 мкс с частотой заполнения 3.04 МГц. Пьезопреобразователь имел диаметр 65 мм и фокусное расстояние 70 мм. Полная акустическая мощность ультразвукового (УЗ) пучка варьировалась в пределах 0.5–40 Вт. Излучатель возбуждался электрическим сигналом, подаваемым с выхода генератора электрических сигналов. Прозрачность образцов позволяла использовать оптическую схему регистрации. На непрозрачную частицу, находящуюся внутри образца недалеко от границы раздела неоднородностей с разными значениями модуля сдвига, фокусировался луч гелий-неонового лазера. Фокусировка проводилась таким образом, чтобы при смещении частицы происходило изменение светового потока лазера, интенсивность которого регистрировалась фотодетектором. Чувствительность использованной схемы регистрации составляла 120 мВ/мкм. Сдвиговая волна, возбужденная в фокальной области УЗ-пучка, распространялась в образце и смещала

легкую частицу от ее первоначального положения. При этом световой поток и, как следствие, сигнал фотодетектора изменялись в соответствии с временным профилем сдвиг волн. Сигнал фотодетектора поступал на вход цифрового осциллографа Tektronix 3032, синхронизация которого производилась импульсом генератора. Сигнал с осциллографа через GPIB — интерфейс поступал на компьютер, где записывался для последующей обработки.

Профили сдвиговой волны, зарегистрированные в однородном образце на расстояниях 3 и 5 мм от оси УЗ-пучка, показаны на рис. 2. Вблизи области генерации сдвиговая волна имеет форму однополярного импульса, длительность которого определяется временем пробега сдвиговой волны по перетяжке ультразвукового пучка [6]. По мере распространения длительность импульса увеличивается, а величина максимального смещения уменьшается. Пик смещения распространяется со скоростью сдвиговой волны. Для профилей, приведенных на рис. 2, скорость сдвиговой волны, определенная по перемещению пика импульса, составила 2.0 ± 0.1 м/с, в то время как статические измерения дали значение сдвигового

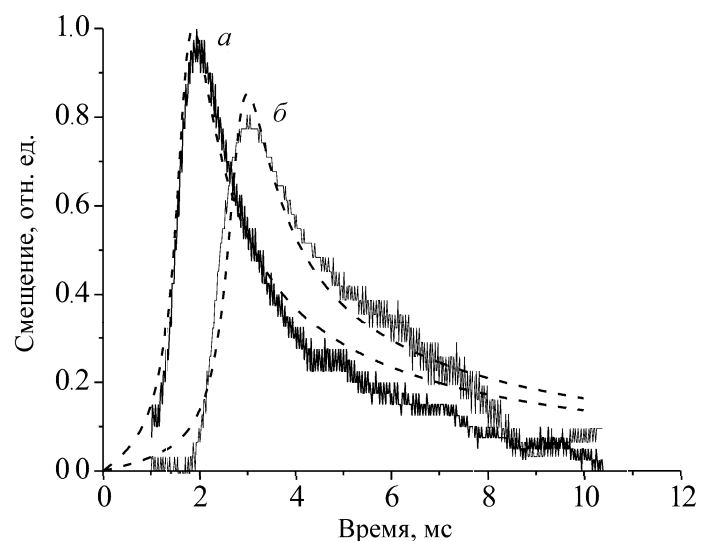


Рис. 2. Профили сдвиговых волн, зарегистрированные на расстояниях 3 мм (а) и 5 мм (б) от области генерации. Пунктирной линией показаны профили, рассчитанные теоретически

модуля в этой же композиции полимера 3.6 ± 0.1 кПа. С учетом этих измерений была определена скорость сдвиговой волны $c_t = \sqrt{\mu/\rho} = (1.9 \pm 0.1)$ м/с, где μ — сдвиговой модуль среды, ρ — плотность. Теоретические профили, полученные с использованием формул в работе [6], показаны на рис. 2 штриховыми линиями. При расчетах использовались следующие параметры: полная мощность УЗ-пучка $W = 5.8$ Вт, длительность импульса $t_0 = 300$ мкс, плотность $\rho = 1000$ кг/м³, скорость и коэффициент поглощения УЗ-волны $c_l = 1380$ м/с и $\alpha = 0.2$ см⁻¹, скорость сдвиговой волны $c_t = 1.9$ м/с. Результаты, показанные на рис. 2, демонстрируют достаточно хорошее соответствие экспериментальных и теоретически рассчитанных профилей сдвиговой волны. Уменьшение смещений в сдвиговой волне с расстоянием вызвано как цилиндрической расходимостью волны, учитываемой в теоретическом расчете, так и ее поглощением в среде. По дополнительному уменьшению с расстоянием пикового значения смещения в экспериментальных профилях по сравнению с теоретическими можно было оценить коэффициент поглощения сдвиговой волны вблизи частоты $f \approx 1/\tau$, соответствующей максимуму спектра импульса длительностью τ . В однородном образце коэффициент поглощения составил 2 см⁻¹ для импульса длительностью 1 мс. Довольно сильное уменьшение энергии сдвиговой волны с расстоянием накладывало определенные ограничения на размеры области, в которой проводились измерения скорости сдвиговой волны. Как правило, волна практически не детектировалась на расстояниях 3–3.5 см от области генерации. Поэтому размеры использованных образцов не превышали 6.5 см.

Результаты измерений в неоднородных образцах

Результаты измерений времени задержки прихода сдвиговой волны по мере удаления от области возбуждения, полученные в неоднородных образцах, представлены на рис. 3. По оси абсцисс на приведенных графиках отложено расстояние, соответствующее перемещению УЗ-излучателя, возбуждающего сдвиговую волну, при этом нуль на оси абсцисс соответствует положению излучателя, когда его фокус находится в точке положения непрозрачной частицы, выполняющей роль оптического затвора. По мере удаления фокуса излучателя от непрозрачной частицы происходит увеличение задержки прихода сдвиговой волны, возбуждаемой в фокальной области УЗ-излучателя. На рис. 3, *a* приведены результаты для двуслойного образца. Положение границы между слоями, определенное визуально, отмечено стрелкой. В обоих слоях задержка прихода сдвиговой волны растет линейно с расстоянием от области возбуждения, но наклон этой зависимости разный. Скорость сдвиговой волны определялась по наклону прямых, проведенных по методу наименьших квад-

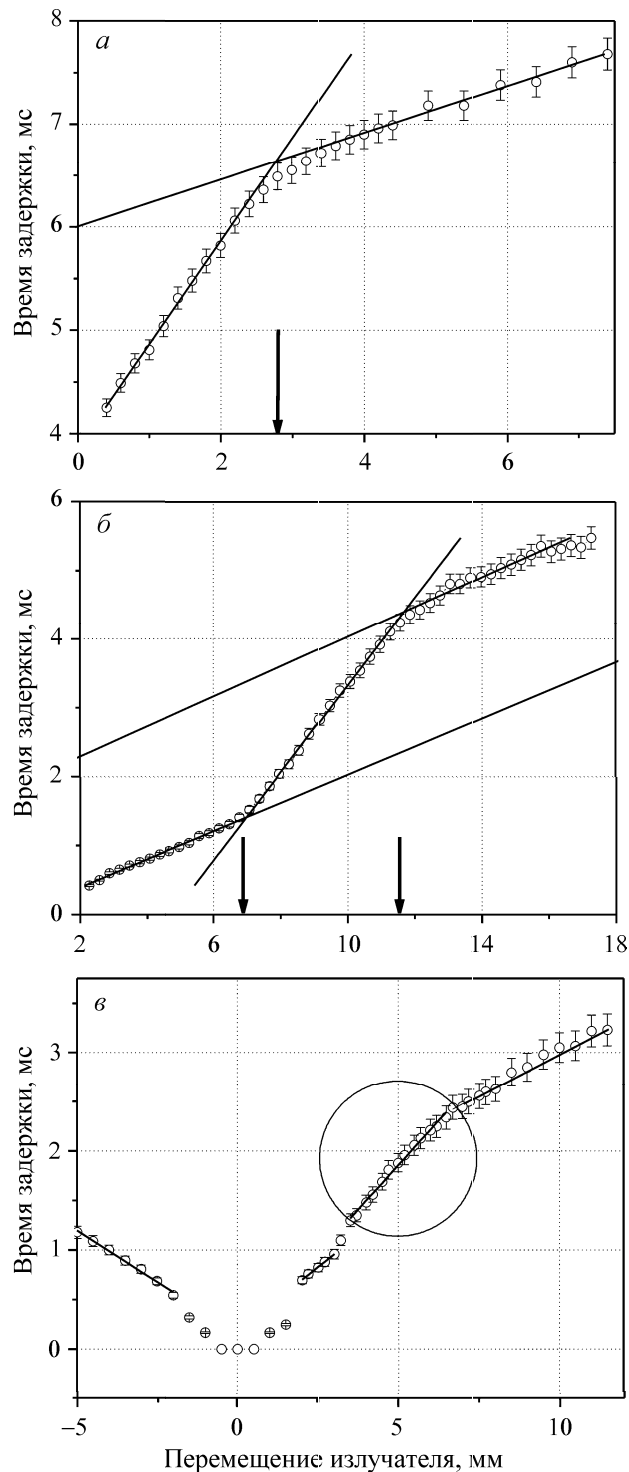


Рис. 3. Зависимость времени задержки прихода сдвиговой волны от перемещения УЗ-излучателя. Результаты, полученные в двуслойном образце (*a*), в образцах со вставками в виде плоского слоя (*б*) и цилиндра (*в*). Нуль на оси абсцисс соответствует положению непрозрачной частицы. Стрелками показаны границы слоев, определенные непосредственными измерениями. Окружность соответствует положению цилиндрической вставки

ратов в областях, соответствующих каждому слою. Модуль сдвига вычислялся по найденным значениям скорости волны, и эти результаты представлены в таблице в колонке, соответствующей динамическим измерениям. Для сравнения в соседней колонке

**Результаты измерений сдвигового модуля
в неоднородных образцах**

Тип образца		μ , кПа	
		динамические измерения	статические измерения
Со вставкой в форме слоя	осн. часть (до вставки)	22 ± 2	18 ± 2
	вставка	2.6 ± 0.5	1.0 ± 0.07
	осн. часть (после вставки)	24 ± 2	18 ± 2
Двуслойный	мягкий слой	1.0 ± 0.2	1.0 ± 0.07
	жесткий слой	18.5 ± 1.3	18 ± 1.5
Со вставкой в форме цилиндра	осн. часть (до вставки)	24 ± 2	25 ± 2
	вставка	2.3 ± 1	1.0 ± 0.07
	осн. часть (после вставки)	28 ± 2	25 ± 2

представлены значения сдвигового модуля, определенные из статических измерений. Положение границы двух слоев определялось как координата точки пересечения двух прямых, показанных на рис. 3, а. С точностью до 0.3 мм вычисленное положение границы соответствовало визуально определенному значению. Аналогичные результаты были получены в образце со вставкой в форме слоя толщиной 5 мм (рис. 3, б). Границы вставки, более мягкой по сравнению с телом образца, показаны стрелками. Толщина вставки, определенная из графика по координатам точек пересечения соответствующих аппроксимирующих прямых (4.6 мм), оказалась на 0.4 мм меньше, чем размер вставки, полученный из непосредственных измерений. Значения модуля сдвига в теле образца, вычисленные по наклону аппроксимирующих прямых в области до вставки (22 кПа) и за ней (24 кПа), немного отличаются друг от друга, но эти отличия находятся в пределах погрешности измерений. На рис. 3, в, где приведены результаты измерений для образца со вставкой в виде цилиндра, положение вставки условно показано окружностью диаметром 5 мм. Модуль сдвига в материале вставки (2.3 кПа), вычисленный по скорости сдвиговой волны оказался, как и в случае со вставкой в виде слоя, более чем в 2 раза выше значения, определенного из статических измерений. Положение и диаметр цилиндра с точностью до 0.3 мм находились в соответствии с результатами непосредственных измерений.

Обсуждение результатов

Результаты измерений сдвигового модуля в неоднородных образцах приведены в таблице. Значения сдвигового модуля, определенные динамическим и статическим методами в объеме образца, оказались довольно близки. Однако надо отметить, что в большинстве случаев величина динамического

сдвигового модуля превышала значения, полученные из статических измерений.

Такой результат может быть обусловлен тем, что модуль сдвига резиноподобных материалов растет с частотой. В работе [8] было обнаружено увеличение скорости сдвиговых волн на 10 % в образцах, изготовленных из желатина при возрастании частоты от 200 до 1000 Гц. В нашем случае, когда сдвиговая волна имеет вид импульса длительностью порядка 1 мс, также возможно проявление дисперсионных эффектов. Фазовая скорость спектральных компонент импульса в области 0.5–1 кГц при наличии аномальной дисперсии превышает скорость низкочастотных компонент, что приводит к дополнительному росту длительности импульса и перемещению максимума импульса с увеличенной скоростью.

Большие отклонения величины модуля сдвига от результатов статических измерений во вставках скорее всего вызваны искажениями формы импульса при его генерации и распространении вблизи границ вставки и образца. Если фокус УЗ-излучателя находится на расстоянии, сравнимом с пространственным размером импульса $c_t \tau$ (τ — длительность импульса), то искажение формы импульса происходит за счет интерференции падающего и отраженного от границы импульсов. Коэффициент отражения растет с увеличением разности сдвиговых модулей вставки и образца, поэтому искажения формы волны становятся особенно заметными при использовании вставок с большим контрастом сдвигового модуля по отношению к образцу. Искажение формы волны приводит к погрешности измерения фазовой скорости волны, поскольку время задержки прихода импульса фиксируется по приходу его пикового значения, положение которого может измениться за счет интерференции с отраженной волной. Чем меньше размер вставки и больше контраст в величине сдвигового модуля вставки и образца, тем больше погрешность в измерении величины сдвигового модуля во вставке. Поэтому предлагаемый метод может быть использован для измерений в неоднородностях, размер которых не менее 4–5 мм.

Заключение

Приведенные результаты демонстрируют возможность измерения модуля сдвига в средах с неоднородным распределением сдвиговой упругости по объему. Эксперименты, проведенные в двуслойном образце, и образцах со вставками различной геометрии, показали, что размер неоднородности и ее положение могут быть определены по измерениям времени задержки сдвиговой волны с погрешностью порядка 0.3 мм. Модули сдвига, рассчитанные по измерениям скорости сдвиговых волн во вставках и образцах, находятся в хорошем качественном соответствии с результатами статических измерений, но несколько завышены, что связано с зависимостью скорости сдвиговых волн от частоты.

Предложенный метод может быть использован при разработке аппаратуры ранней диагностики раковых опухолей. Локальное возбуждение сдвиговых волн в мягких тканях может осуществляться путем сканирования мощного ультразвукового пучка. Детектирование возбужденных сдвиговых волн может быть реализовано с помощью доплеровского измерителя скорости кровотока.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 04-02-16264).

Литература

1. *Ophir J., Céspedes I., Ponnekanti H.* et al. // J. Ultrason. Imag. 1991. **13**. P. 111.
2. *Parker K.J., Huang S.R., Musulin R.A., Lerner R.M.* // Ultrasound in Med. and Biol. 1990. **16**, N 3. P. 241.

3. *Sandrin L., Tanter M., Gennisson J.-L.* et al. // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr. 2002. **49**. P. 436.
4. *Rudenko O.V., Sarvazyan A.P., Emelianov S.Y.* // J. Acoust. Soc. Am. 1995. **99**, N 5, P. 2791.
5. *Sarvazyan A.P., Rudenko O.V., Swanson S.D.* et al. // J. Ultrasound in Med. and Biol. 1998. **24**, N 9. P. 1419.
6. *Андреев В.Г., Дмитриев В.Н., Пицальников Ю.А.* и др. // Акуст. журн. 1997. **43**, № 2. С. 149.
7. *Андреев В.Г., Ведерников А.В.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2001. № 1. С. 34.
8. *Chen S., Fatemi M., Greenleaf J.F.* // J. Acoust. Soc. Am. 2004. **115**, N 6. P. 2781.

Поступила в редакцию
18.10.04