

## Упругие свойства полимерного слоя при одноосном сжатии в цилиндрической геометрии

Т. Б. Крит,\* В. Г. Андреев, А. В. Шанин, И. И. Голубкова

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики, Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Статья поступила 15.11.2014; Подписана в печать 10.12.2014)

Измерены линейные и нелинейные упругие модули полимерного материала пластисола. Слой материала полимеризован между двумя твердотельными соосными цилиндрами, диаметр которых в 6–8 раз превышает толщину слоя. В процессе полимеризации внутри материала возникают механические напряжения. Сравнивая измеренные значения упругих параметров материала, полимеризованного между цилиндрами, со значениями, измеренными при одноосном сжатии этого материала, полимеризованного между плоскими параллельными пластинами, можно оценить эти напряжения. Измерения в плоской и в цилиндрической геометрии были проведены методом статической сдвиговой деформации, значения которой достигали 0,4–0,6 толщины. При таких деформациях проявляются нелинейные эффекты, что позволяет оценить их вклад в проявляемые материалом упругие свойства и измерить нелинейные параметры Ландау. В плоской геометрии к одной из границ, между которыми находится пластисол, прикладывалось известное напряжение, создававшее сдвиговую деформацию. Вторая граница была закреплена и не могла смещаться в направлении сдвиговой деформации. Вместе с тем, крепления позволяли этой границе смещаться в направлении, перпендикулярном направлению сдвиговой деформации. В цилиндрической геометрии сдвиговая деформация создавалась путём поворота одного из цилиндров, по касательной к боковой поверхности которого прикладывалось известное напряжение. Характер зависимости напряжения от деформации и измеренный статический модуль сдвига в цилиндрической геометрии и в плоской геометрии при одинаковой толщине пластисола существенно различаются. Параметр Ландау  $A$ , измеренный в плоской геометрии с приложением одноосного сжатия, равен  $-392$  кПа.

PACS: 62.20De, 43.25.Dc, 43.25.Ba

УДК: 539.32

Ключевые слова: сдвиговая упругость, кубичная нелинейность, одноосное сжатие, гелеобразная среда.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе исследован вклад напряжений, которые возникают внутри материала в процессе полимеризации в плоской и цилиндрической геометрии. Эти напряжения оказывают существенное влияние на упругие характеристики среды [1]. В результате упругие модули материала, измеренные в разных геометриях, различаются по величине в несколько раз, что существенно при разработке и апробации новых высокоточных методов измерения упругости [2]. Возможность управлять свойствами материала принципиально важна при производстве медицинских фантомов и симуляторов. Потребность в медицинских фантомах обусловлена необходимостью отработки отдельных практических навыков и процедур без риска для пациента. По своим механическим и теплофизическим свойствам образцы, используемые в качестве фантомов должны как можно точнее имитировать тот или иной тип ткани [3]. Существенным фактором является сильная нелинейность тканей при динамическом воздействии, воспроизвести которую при создании фантома затруднительно. Поэтому проблема правильного определения упругих свойств материала при наличии начальных и внутренних напряжений в последние годы стала особенно

насушной [4]. Данная проблема актуальна как при создании искусственных аналогов органов и тканей [5], так и при измерении упругих параметров биологических и синтетических материалов [6]. Возможность создавать образцы со свойствами данных конкретных органов и тканей обеспечит одновременно множество узкоспециализированных отраслей хирургии фантомами и симуляторами. Перспективным представляется использование таких фантомов и симуляторов в медицине катастроф. Исследование поведения человеческих органах при ударах и разрывах на примере фантомов позволит разработать новые методы быстрого устранения последствий повреждения тканей и органов и даже предотвратить многие типы повреждений [7].

Для изготовления образцов в настоящей работе использован полимерный материал пластисол, некоторые линейные и нелинейные свойства которого уже были определены ранее с применением высокоточных резонансных методов измерений [8] и численного моделирования [9]. Материал полимеризован между двумя твердотельными соосными цилиндрами. В процессе полимеризации внутри материала создаются механические напряжения. Определить величину этих напряжений можно сравнивая измеренные значения упругих параметров материала, полимеризованного между цилиндрами, со значениями, измеренными при одноосном сжатии этого материала, полимеризованного между плоскими параллельными твердотельными пластинами. Измерения, как в плоской, так и в цилиндри-

\*E-mail: timofey@acs366.phys.msu.ru

ческой геометрии были проведены методом статической деформации. В плоской геометрии к одной из границ, между которыми находится пластисол, прикладывалось известное напряжение, создававшее в пластисоле сдвиговую деформацию. В то же время вторая граница была закреплена таким образом, чтобы она не могла смещаться в направлении сдвиговой деформации. Вместе с тем, крепления позволяли этой границе смещаться в направлении, перпендикулярном направлению сдвиговой деформации пластисола. Сдвиговая деформация, возникающая при различных величинах одноосного сжатия и различных значениях сдвигового напряжения, измерялась при помощи микрометрического индикатора. Второй микрометрический индикатор служил для измерения толщины пластисола, соответствующей различным значениям одноосного напряжения. В цилиндрической геометрии сдвиговая деформация создавалась путём поворота одного из двух соосных цилиндров, к которому по касательной к боковой поверхности прикладывалось известное напряжение. Сдвиговая деформация, как в случае измерений в плоской геометрии, так и при измерениях в цилиндрической геометрии, достигала 0,4–0,6 толщины. При таких деформациях проявляются нелинейные эффекты, как в отсутствие одноосного сжатия, так и при его наличии, что позволяет оценить вклад нелинейности в проявляемые материалом упругие свойства и оценить нелинейные параметры Ландау. Одновременно при указанных деформациях угол поворота одного цилиндра относительно другого не превышает  $20^\circ$ , а угол сдвиговой деформации слоя не превышает  $70^\circ$ . Диаметры цилиндров 30 мм и 40 мм в несколько раз больше толщины слоя 5 мм. Характер зависимости напряжения от деформации и измеренный статический модуль сдвига в цилиндрической геометрии и в плоской геометрии при одинаковой толщине пластисола существенно различаются. Параметр Ландау  $A$ , измеренный в плоской геометрии с приложением одноосного сжатия, равен  $-392$  кПа.

## 1. СДВИГОВАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ

Рассмотрим цилиндрический слой высотой  $H$  и толщиной  $h$ , закреплённый без проскальзывания между двумя твердотельными соосными цилиндрами с высотой  $H$  и радиусами  $R$  и  $r$ , такими, что  $R - r = h$ . При повороте внутреннего цилиндра на угол  $\theta$  относительно внешнего цилиндрический слой деформируется на угол  $\gamma$  (Рис. 1а). Поскольку при повороте деформация цилиндрического слоя происходит без изменения его объёма, то такая деформация является сдвиговой. Введём цилиндрические координаты. Ось  $z$  совместим с осью цилиндров. В соответствии с законом Гука для чисто сдвиговой деформации вдоль направления  $\varphi$  перпендикулярно направлению  $r$  [10, с. 93]:

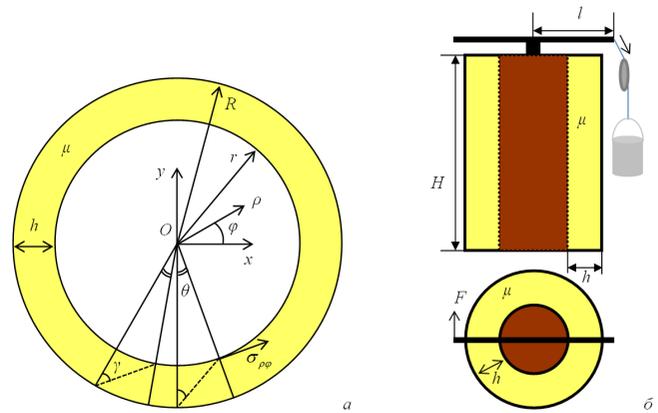


Рис. 1: Сдвиговая деформация цилиндрического слоя (а). Схема экспериментальной установки (б)

$$\sigma_{r\varphi} = \mu \gamma_{r\varphi}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{r\varphi}$  — сдвиговое напряжение, возникающее в слое при смещении цилиндров друг относительно друга,  $\gamma_{r\varphi}$  — угол сдвига слоя,  $\mu$  — модуль сдвига материала, из которого изготовлен цилиндрический слой.

Измерения зависимости сдвигового напряжения от угла сдвига цилиндрического слоя проводились с помощью экспериментальной установки, схема которой приведена на рис. 1б. В пространство толщиной 5,4 мм между парой деревянных соосных цилиндров высотой 54,5 мм был залит нагретый до жидкого состояния полимерный материал пластисол. Внешний радиус малого цилиндра 14,5 мм, внутренний радиус большого цилиндра 19,9 мм. При остывании пластисол затвердел, а благодаря хорошей адгезии к дереву оказался закреплённым без проскальзывания за поверхности цилиндров. Большой (внешний) цилиндр был неподвижно закреплён. Деформация в пластисоле создавалась за счёт поворота малого (внутреннего) цилиндра вокруг оси. Для этого на оси цилиндров закреплялся металлический стержень длиной 109 мм, при этом середина стержня находилась на оси цилиндра. На одном конце стержня, удалённом от точки крепления на расстояние  $l = 54,5$  мм, крепилась тонкая нить, перекинутая через блок. За эту нить подвешивались грузы известных масс, по которым вычислялось сдвиговое напряжение  $\sigma_{r\varphi}$  в пластисоле.

Сила  $F = mg$ , приложенная к концу стержня и направленная перпендикулярно оси цилиндров, развивает вокруг оси цилиндров момент

$$M = F \cdot l = m \cdot g \cdot l. \quad (2)$$

Момент в (2) вызывает напряжение на границе цилиндрического слоя и внутреннего цилиндра

$$\sigma_{r\varphi} = \frac{M}{S \cdot r} = \frac{F \cdot l}{2\pi \cdot H \cdot r^2}, \quad (3)$$

учитывая, что площадь соприкосновения внутреннего цилиндра со слоем  $S = 2\pi rH$ . При повороте внутреннего цилиндра на угол  $\theta$ , в соответствии с [11], получаем:

$$\theta = \frac{\sigma_{\rho\varphi}}{2\mu} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right). \quad (4)$$

Из (4) можно выразить сдвиговое напряжение на границе внутреннего цилиндра и гелеобразного слоя:

$$\sigma_{\rho\varphi} = \mu \cdot \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \theta. \quad (5)$$

Сравнивая выражения (1) и (5), можно установить связь между углом поворота внутреннего цилиндра и сдвиговой деформацией гелеобразного слоя между цилиндрами:

$$\gamma = \frac{2R^2}{R^2 - r^2} \theta. \quad (6)$$

Подстановка выражений (2) и (3) в выражение (5) даёт:

$$\mu = \frac{m \cdot g \cdot l \cdot (R^2 - r^2)}{4\pi \cdot H \cdot r^2 \cdot R^2 \cdot \theta}. \quad (7)$$

Из (9) можно получить связь между  $F$  и  $\theta$  через сдвиговой модуль  $\mu$  и геометрические параметры экспериментальной установки. Таким образом, измеряя силу  $F$ , входящую в выражение (2), и угол  $\theta$ , на который смещаются цилиндры друг относительно друга, можно измерить сдвиговой модуль  $\mu$ .

## 2. ЗАВИСИМОСТЬ СДВИГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОТ УГЛА ДЕФОРМАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СЛОЯ

Измеренная зависимость сдвигового напряжения от угла деформации цилиндрического слоя приведена на рис. 2. квадратиками. Эта зависимость имеет линейный участок при значениях угла деформации  $\gamma$  до 0,5 рад, что приблизительно соответствует  $30^\circ$ . При дальнейшей деформации напряжение начинает возрастать значительно сильнее по нелинейному закону. Материал цилиндрического слоя демонстрирует существенное ужесточение сдвигового модуля.

Линейная часть измеренной зависимости напряжения от угла деформации методом наименьших квадратов аппроксимирована прямой, по наклону которой определено значение модуля сдвига  $\mu_{\text{lin}} = 14,6 \pm 0,8$  кПа. Методом вдавливания [12] для материала, из которого изготовлен цилиндрический слой, было получено значение модуля сдвига 11,2 кПа.

Измеренная зависимость напряжения от деформации цилиндрического слоя аппроксимирована кубической параболой (сплошная линия) вида:  $\sigma = \mu_{\text{lin}} \cdot \gamma \cdot (1 + \beta\gamma^2)$ , в которой значение  $\mu_{\text{lin}}$  взято по результатам линейных измерений. В результате аппроксимации определено значение  $\beta = 0,92 \pm 0,04$ .

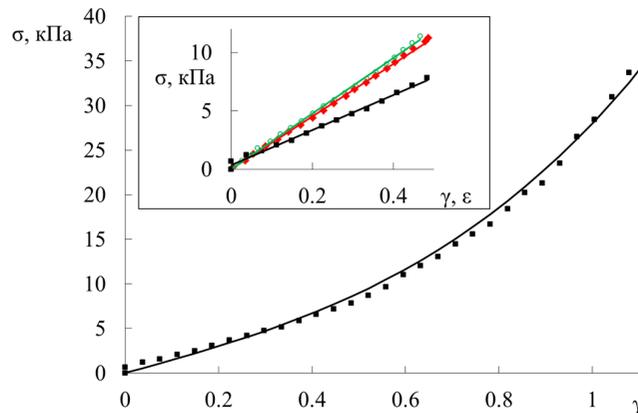


Рис. 2: Измеренная зависимость сдвигового напряжения в цилиндрическом слое от угла деформации пластисола (точки), аппроксимированная кубической параболой (сплошная линия). На вставке показаны зависимости в плоском слое без одноосного сжатия (ромбиками) и при одноосном сжатии 2,7 кПа (кружками). Квадратиками на вставке показан фрагмент зависимости в цилиндрическом слое

## 3. СТАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛАНДАУ ГЕЛЕОБРАЗНОЙ СРЕДЫ

В [13] предложен метод определения параметров Ландау, основанный на измерении волновых скоростей. Плотность энергии упругой деформации зависит от тензора деформации по закону:

$$w = \mu \varepsilon_{ik}^2 + \frac{\lambda}{2} \varepsilon_{il}^2 + \frac{A}{2} \varepsilon_{ik} \varepsilon_{il} \varepsilon_{kl} + B \varepsilon_{ik}^2 \varepsilon_{il} + \frac{C}{3} \varepsilon_{il}^3, \quad (8)$$

в который входят параметры Ламе  $\mu$  и  $\lambda$  и нелинейные параметры Ландау  $A$ ,  $B$  и  $C$ . Параметры  $\mu$  и  $A$  одинакового порядка. В гелеобразной среде их значения составляют от десятков до сотен кПа. Параметры  $\lambda$  и  $B$  также одного порядка и на несколько порядков превосходят  $\mu$  и  $A$  в гелеобразных средах. Если перейти от волновых скоростей к значениям модуля сдвига  $\mu$ , измеренным по зависимостям сдвигового напряжения от деформации плоского слоя при различных значениях одноосного сжатия  $\sigma_{22}$ , можно распространить метод, предложенный в работе [13], на статический случай [8]. Одноосное сжатие прикладывается к верхней границе и действует в направлении, перпендикулярном направлению действия сдвигового напряжения. Сдвиговой модуль  $\mu_0$  вычисляется по зависимости напряжения от деформации плоского слоя, измеренной без приложения одноосного сжатия. По аналогии с [13] в работе [8] получена формула для нелинейного параметра Ландау  $A$ :

$$A = -\frac{12\mu_0}{\sigma_{22}} (\mu - \mu_0 + \sigma_{22}). \quad (9)$$

В [8] для измерения сдвигового модуля и нелинейного параметра Ландау  $A$  был использован метод стати-

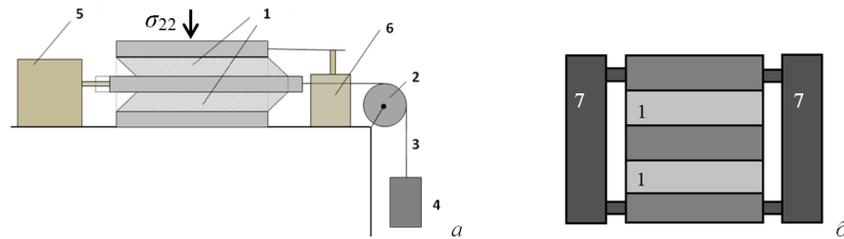


Рис. 3: Схема экспериментальной установки для измерения нелинейных параметров резиноподобного слоя методом статической деформации при различных вертикальных нагрузках на слой. Вид сбоку (а) и вид спереди (б). 1 — слои пластисола толщиной  $h = 7$  мм, 2 — блок, 3 — нить, 4 — ёмкость с водой, 5 и 6 — микрометрические индикаторы, 7 — дополнительные крепления

ческой деформации плоского слоя при различных величинах одноосного сжатия. Схема данного метода приведена на рис. 3. Два тонких слоя гелеобразного полимера (1) располагались между тремя плоскопараллельными жёсткими пластинами. Наличие пары плоскопараллельных слоёв при взаимодействии обеспечивает чисто сдвиговую деформацию, поскольку в такой системе изгибные деформации обоих слоёв компенсируют друг друга. К пластинам, изготовленным из дюралюминия, были приклеены тонкие слои дерева, адгезия пластисола к которому была достаточно хорошей. Слои пластисола имели толщину  $h = 7$  мм в недеформированном состоянии и горизонтальные размеры  $89 \times 89$  мм. Верхняя и нижняя пластины неподвижно закреплялись так, чтобы в процессе сдвиговой деформации слоёв они не могли смещаться в горизонтальном направлении. Нижняя пластина жёстко крепилась к столу. Верхняя пластина могла двигаться в вертикальном направлении. Средняя пластина не была закреплена и могла перемещаться в горизонтальном и вертикальном направлениях. Деформация сдвига получалась при приложении силы, действующей в горизонтальном направлении, к средней пластине. Для этого к средней пластине крепилась нить (3), перекинутая через блок (2). К свободному концу нити крепилась пластиковая ёмкость (4), которая в ходе эксперимента наполнялась водой. Отношение силы, действующей на слои со стороны ёмкости, к площади соприкосновения слоёв со средней пластиной есть напряжение  $\sigma$ , возникающее при сдвиге образца. Смещение средней пластины  $x$  измерялось с помощью микрометрического индикатора (5). Для определения относительной деформации  $\varepsilon$  вычислялось отношение смещения  $x$  к толщине слоя  $h$ . Для создания одноосного сжатия [14] на верхней пластине устанавливались грузы известной массы. Под действием этих грузов происходило сжатие слоёв, которое измерялось микрометром (6). Таким образом, при вычислении  $\varepsilon$  учитывался тот факт, что толщина слоя варьируется в зависимости от приложенного одноосного сжатия. Толщина каждого слоя, измеренная с помощью микрометра (6) при каждом значении одноосного сжатия, приведена в табл. 3. После того как толщина нагруженных слоёв была измерена, верхняя и нижняя пластины неподвижно

фиксируются при помощи дополнительных креплений (7), чтобы приложенная к слоям сдвиговая деформация не привела к изменению их толщины. Слои нагружались так, чтобы максимальная сдвиговая деформация не превышала 60% от измеренной микрометром (6) толщины. При такой деформации можно наблюдать нелинейные эффекты [12], а разгрузочная кривая строго соответствует нагрузочной.

Таблица I: Измеренная толщина плоского слоя гелеобразного материала в зависимости от величины одноосного сжатия (массы нагрузки)

$\sigma_{22}$ , кПа	$m$ , кг	$h$ , мм
0	0	7,0
2,7	2,2	6,9

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРА ЛАНДАУ В ПЛОСКОМ СЛОЕ ПЛАСТИСОЛА

На рис. 2 зависимость сдвигового напряжения от деформации плоского слоя, измеренная без приложения одноосного сжатия, изображена ромбиками. Зависимость, линейная в области деформаций до 0,3, аппроксимирована прямой. Определённое методом наименьших квадратов значение линейного сдвигового модуля  $\mu_0 = 22,6 \pm 1,8$  кПа. Кружками на рис. 2 показана зависимость, измеренная при одноосном сжатии  $\sigma_{22} = 2,7 \pm 0,3$  кПа. Эта зависимость также линейна в области деформаций до 0,3. Определённое методом наименьших квадратов значение сдвигового модуля при одноосном сжатии  $\mu = 23,8 \pm 2,2$  кПа. В результате значение  $A = -392 \pm 4$  кПа.

Материал, закреплённый между плоскими пластинами, имеет большее значение сдвигового модуля, чем тот же самый материал со свободными границами, к которому в методе вдавливания в небольшой по сравнению с площадью его поверхности областью прикладывается сферический штамп из жёсткого материала. Это находится в соответствии с предположением о том, что при приложении к гелеобразной среде напряжений

дополнительно к сдвиговому в этой среде происходит изменение сдвиговых упругих характеристик.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение зависимости сдвигового напряжения от деформации, измеренной в цилиндрическом слое с зависимостями, измеренными в плоском слое, позволяет отметить, что нелинейность материала в зависимости от геометрии проявляется по-разному. Так, вплоть до деформаций 0,3 в плоском слое зависимости линейны как в отсутствие одноосного сжатия, так и при его приложении к материалу. В цилиндрическом слое зависимость также линейна в указанном диапазоне деформаций. В этом диапазоне модуль сдвига в цилиндрической геометрии выше измеренного методом вдавливания сферического штампа. Внутренние напряжения, которые возникают в цилиндрическом слое дополнительно к приложенным сдвиговым напряжениям, при деформациях до 0,4 меньше, чем напряжения, существующие в плоском слое при тех же деформациях. Поэтому измеренный эффективный сдвиговой модуль в плоском слое оказался выше, чем в цилиндрическом. В то же время, в цилиндрическом слое гелеобразной среды при деформациях свыше 0,4 (вплоть до 1 и выше) возникает эффект упрочения слоя. Подобный результат наблюдался в работе [12], где большим деформациям подвергался плоский слой. Данный результат приводит к важному заключению: приложение одноосного сжатия к плоскопараллельному слою пластисола принципиально приводит к его ужесточению и сопровождается увеличением модуля сдвига.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое в работе сравнение зависимостей сдвигового напряжения от деформации в двух разных кон-

фигурациях: плоской и цилиндрической, показало, что в случае, когда плоскопараллельные границы исследуемого гелеобразного материала закреплены, в материале возникают внутренние напряжения, связанные с полимеризацией в ограниченном объёме. Внутренними напряжениями можно также управлять путём приложения одноосного сжатия. Показано, что в этом случае упругость гелеобразного материала увеличивается. По результатам измерения модуля сдвига, который увеличивается с увеличением нагрузки на материал, в работе было получено значение параметра Ландау  $A$  пластисола. Также было показано, что одноосное сжатие плоского слоя слабо влияет на увеличение модуля сдвига. Однако зависимость сдвигового модуля от одноосного сжатия слабая в сравнении с его зависимостью от деформации сдвига. Следовательно, внутренние напряжения, возникающие в плоском слое пластисола за счёт полимеризации, настолько велики, что влияние одноосного сжатия по сравнению с ними несущественно.

Измеренный модуль сдвига в цилиндрической геометрии больше измеренного методом вдавливания. Это означает наличие в цилиндрическом слое внутренних напряжений. При этом зависимость сдвигового напряжения от деформации, измеренная в цилиндрическом слое пластисола, точно аппроксимируется кубичной параболой с малым квадратичным членом. Значение нелинейного коэффициента  $\beta$  составило 0,9, что типично для пластисола [12].

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (грант 11.G34.31.0066), РФФИ (грант 12-02-00114) и Программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-283.2014.2).

- 
- [1] *Man C.-S., Lu W.Y.* Journal of Elasticity. **17**(2). P. 159. (1987).
- [2] *Browne J.E., KV Ramnarine K.V., AJ Watson A.J., Hoskins P.R.* Ultrasound Med. Biol. **29**(7). P. 1053. (2003).
- [3] *D'Souza W.D., Madsen E.L., Unal O., Vigen K.K., Frank G.R., Thomadsen B.R.* Med. Phys. **28**(4). P. 688. (2001).
- [4] *Shams M., Destrade M., Ogden R.W.* Wave Motion. **48**. P. 552. (2011).
- [5] *Chmarra M.K., Hansen R., Mårvik R., Langø T.* PLoS ONE. **8**(5). e64180. P 1. (2013).
- [6] *Zell K., Sperl J. I., Vogel M. W., Niessner R., Haisch C.* Phys. Med. Biol. **52**. P. 475. (2007).
- [7] *Berett O., Josephson E.* Annals of Emergency Medicine. **60**(5). P. S186. (2012).
- [8] *Krit T.* Proc. of Meetings on Acoustics. **20**. P. 0750031-37. (2014).
- [9] *Андреев В.Г., Крит Т.Б., Костиков В.В., Шанин А.В., Шиндерук С.И.* Акуст. журн. **57**, №. 1. С. 3. (2011).
- [10] *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. Перев. с англ. (М. 1975).
- [11] *Kanner L.M., Horgan C.O.* Int. J. Solids Struct. **45**. P. 5464. (2008).
- [12] *Андреев В.Г., Крит Т.Б., Сапожников О.А.* Акуст. журн. **57**, №. 5. С. 763. (2011).
- [13] *Gennisson J.-L., Rénier M., Catheline S., Barrière C., Bercoff J., Tanter M., Fink M.* J. Acoust. Soc. Am. **122**(6). P. 3211. (2007).
- [14] *Erkamp R.Q., Skovoroda A.R., Emelianov S.Y., O'Donnell M.* IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. **51**(4). P. 410. (2004).

## Elastic Properties of Polymer Layer under Uniaxial Compression in Cylindrical Geometry

T. B. Krit<sup>a</sup>, V. G. Andreev<sup>b</sup>, A. V. Shanin<sup>c</sup>, I. I. Golubkova<sup>d</sup>

*Department of Acoustics, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

*E-mail: <sup>a</sup>timofey@acs366.phys.msu.ru, <sup>b</sup>andreev@acs366.phys.msu.ru, <sup>c</sup>a.v.shanin@gmail.com, <sup>d</sup>ii.golubkova@physics.msu.ru*

We measured the linear and nonlinear elastic moduli of polymer material plastisol. The layer of material was polymerized between two coaxial solid cylinders with diameters 6–8 times greater than the thickness of the layer. During the polymerization process mechanical stresses arose within the material. Comparing the measured values of the elastic parameters of the material, polymerized between the cylinders, to the values measured in the material, polymerized between flat parallel plates, under uniaxial compression it became possible to evaluate these stresses. Measurements in the flat and cylindrical geometry have been carried out by the method of static shear deformations up to 0.4–0.6 of the layer thickness. Nonlinear effects are well pronounced under such deformations, which allows to estimate their contribution to the elastic properties exhibited by the material and measure the nonlinear Landau parameters. Shear strain was created by certain tension applied to one of the plastisol boundaries in plane geometry. The second boundary was fixed and could not move in the direction of shear deformation. However, bindings allowed this boundary to move in the direction perpendicular to the direction of shear deformation. The shear strain in a cylindrical geometry was created by the rotation of one of the cylinders applying a certain stress tangentially to the lateral surface. The pattern of stress-strain curves and the measured values of static shear modulus appeared to be significantly different in cylindrical geometry and planar geometry, whereas the thickness of plastisol was the same. Landau parameter  $A$ , measured in plane geometry with the uniaxial compression applied, was equal to  $-392$  kPa.

PACS: 62.20De, 43.25.Dc, 43.25.Ba

Keywords: shear elasticity, cubic nonlinearity, uniaxial load, gel-like medium.

Received 15.11.2014.

### Сведения об авторах

1. Крит Тимофей Борисович — канд. физ.мат. наук, научный сотрудник; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: timofey@acs366.phys.msu.ru.
2. Андреев Валерий Георгиевич — канд. физ.мат. наук, доцент, доцент; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: andreev@acs366.phys.msu.ru.
3. Шанин Андрей Владимирович — доктор физ.-мат. наук, доцент, доцент; тел.: (495) 939-30-81, e-mail: a.v.shanin@gmail.com.
4. Голубкова Ирина Ильинична — студент; тел.: (495) 939-29-52, e-mail: ii.golubkova@physics.msu.ru.