

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СФЕРОПЛАСТИКОВ

© 2023 г. В.А. Быченко<sup>1,2,\*</sup>, П.В. Серый<sup>3,\*\*</sup>, Д.Р. Фирюлин<sup>2,\*\*\*</sup>,  
И.Ю. Кинжагулов<sup>2,\*\*\*\*</sup>, И.В. Беркутов<sup>2,\*\*\*\*\*</sup>, И.Е. Алифанова<sup>2,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Учреждение науки ИКЦ СЭКТ, Россия 197343 Санкт-Петербург, ул. Матроса Железняка, 57

<sup>2</sup>Университет ИТМО, Россия 197101 Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

<sup>3</sup>НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей», Россия 191015 Россия, Санкт-Петербург, Шпалерная ул., 49

E-mail: \*bychenok-vladimr@mail.ru; \*\*seryipv@yandex.ru; \*\*\*danil.firyulin18@mail.ru;  
\*\*\*\*kinzhiki@mail.ru; \*\*\*\*\*chigivara56712@mail.ru; \*\*\*\*\*sherbairina@mail.ru

Поступила в редакцию 19.05.2023; после доработки 03.07.2023

Принята к публикации 04.07.2023

Разработка методик неразрушающего контроля водопоглощения изделий из сферопластиков без необходимости их демонтажа является актуальной задачей. Ультразвуковой метод акустического вида для решения данной задачи может стать альтернативой применяемым в настоящее время радиографическому методу, гидростатическому взвешиванию и механическим испытаниям. Целью настоящей работы является исследование связи акустических характеристик сферопластиков и их водопоглощением. Задачами настоящей работы является оценка скорости распространения ультразвуковой волны в сферопластике на разных этапах исследований: в исходном состоянии образцов, после механической обработки, после водопоглощения и после высыхания. Водопоглощение косвенно оценивалось в результате взвешивания образцов. Установлена взаимосвязь между акустическими характеристиками сферопластиков и их водопоглощением, что подчеркивает научную новизну проводимых исследований. Полученные результаты согласуются с теоретическими предпосылками и дают основания для проведения дальнейших экспериментальных исследований по разработке методики неразрушающего контроля изделий из сферопластиков.

**Ключевые слова:** сферопластик, акустические характеристики, внутренние напряжения, водопоглощение, ультразвуковой контроль.

## EXPERIMENTAL STUDIES OF CHANGES IN THE ACOUSTIC PROPERTIES OF SPHEROPLASTICS

V.A. Bychenok<sup>1,2,\*</sup>, P.V. Seryi<sup>3,\*\*</sup>, D.R. Firyulin<sup>2,\*\*\*</sup>, I.Yu. Kinzhagulov<sup>2,\*\*\*\*</sup>,  
I.V. Berkutov<sup>2,\*\*\*\*\*</sup>, I.E. Alifanova<sup>2,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Institution of Science ICC EKT, Russia 197343, St. Petersburg, st. Matrosa Zheleznyak, 57

<sup>2</sup>ITMO University, Russia 197101, St. Petersburg, Kronverksky pr., 49

<sup>3</sup>National Research Center «Kurchatov Institute» — Central Research Institute of KM «Prometey», Russia 191015, Russia, St. Petersburg, Shpalernaya st., 49

E-mail: \*bychenok-vladimr@mail.ru; \*\*seryipv@yandex.ru; \*\*\*danil.firyulin18@mail.ru;  
\*\*\*\*kinzhiki@mail.ru; \*\*\*\*\*chigivara56712@mail.ru; \*\*\*\*\*sherbairina@mail.ru

The development of methods for non-destructive testing of water absorption of products from spheroplastics without the need to dismantle them is an urgent task. The ultrasonic method of the acoustic type for solving this problem can become an alternative to the currently used radiographic methods, hydrostatic weighing and mechanical testing. The purpose of this work is to study the relationship between the acoustic characteristics of spheroplasts and their water absorption. The objectives of this work are to estimate the propagation velocity of an ultrasonic wave in spheroplastics at different stages of research: in the initial state of the samples, after mechanical treatment, after water absorption, and after drying. Water absorption was indirectly estimated by weighing the samples. A relationship has been established between the acoustic characteristics of spheroplasts and their water absorption, which emphasizes the scientific novelty of the ongoing research. The results obtained are consistent with the theoretical prerequisites and provide grounds for further experimental studies to develop a technique for non-destructive testing of products made of spheroplasts.

**Keywords:** spheroplastic, acoustic characteristics, internal stresses, water absorption, ultrasonic testing.

DOI: 10.31857/S0130308223110040, EDN: XAYLBB

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве материалов, предающих современным глубоководным аппаратам свойство дополнительной плавучести, широко применяются сферопластики — полимерные

композиционные материалы на основе полимерных связующих, основным наполнителем которых являются полые микросферы [1, 2]. Применение сферопластика в судостроении обусловлено такими характеристиками, как низкая плотность и практически нулевое водопоглощение [3, 4]. Сферопластик представляет собой материал, состоящий из полимерной матрицы, в которой с высокой степенью наполнения размещены, как правило, стеклянные микросферы диаметром в среднем 20—150 мкм [5]. В процессе эксплуатации на блоки сферопластика воздействуют циклические механические воздействия, в результате чего в материале происходят деформации и дефектообразование, что приводит к увеличению водопоглощения материала. В настоящий момент для контроля дефектов типа поры и непрочности в блоках плавучести из сферопластиков применяется ультразвуковой метод контроля [6, 7], контроль водопоглощения производится на демонтированных блоках плавучести путем гидростатического взвешивания или с помощью радиационных методов контроля [5]. Однако демонтаж и монтаж блоков плавучести является достаточно трудоемким и не всегда осуществимым. Таким образом, **актуальной** задачей является разработка методики оценки водопоглощения сферопластика с помощью неразрушающих методов контроля. С этой целью в работе предложено использовать ультразвуковой метод акустического вида контроля. **Целью работы** является исследование взаимосвязи между акустическими свойствами сферопластика и его водопоглощением.

### ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены 5 образцов из сферопластика размерами 40×40×40 мм.

В образцах сферопластиков с помощью ультразвукового дефектоскопа УСД-60Н и прямого совмещенного пьезоэлектрического преобразователя с центральной частотой 1 МГц проводились двадцатикратные измерения скорости распространения продольной УЗВ эхо-импульсным методом. Измерения проводились в одном и том же направлении относительно образца в 4 этапа:

1. В исходном состоянии образцов.

2. После механического воздействия на образцы. Механическое воздействие осуществлялось с помощью испытательного пресса (рис. 1) путем одноосного сжатия до начала видимого трещинообразования. Измерение скорости распространения УЗВ проводилось в направлении, перпендикулярном направлению одноосного сжатия.

3. После водопоглощения. Образцы после механического воздействия были погружены на весь объем в воду на 24 ч при комнатной температуре.

4. После просушивания образцов. Просушивание образцов осуществлялось в комнатных условиях без специальных технических средств.

Для оценки водопоглощения на этапах 1, 3, 4 проводилось измерение массы образцов с помощью лабораторных весов OHAUS Explorer (точность — 0,0001 г).

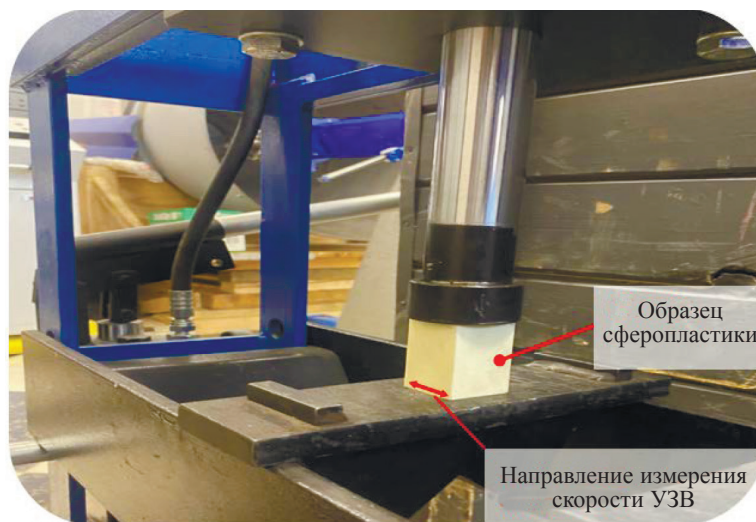


Рис. 1. Общий вид установки образца сферопластика на испытательном прессе.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В табл. 1 представлены средние значения двадцатикратных результатов измерений скорости распространения УЗВ на разных этапах экспериментальных исследований, в табл. 2 — результаты измерений массы образцов.

Таблица 1

### Результаты изменений скорости распространения УЗВ

№ образца	Скорость распространения УЗВ, измеренная на разных этапах исследований, м/с			
	1. Исходное состояние	2. После механического воздействия	3. После водопоглощения	4. После просушивания
1	2620	2572	2599	2577
2	2627	2574	2600	2572
3	2622	2567	2601	2576
4	2627	2572	2602	2573
5	2628	2570	2600	2572
Среднее по 5 образцам	2625	2571	2600	2574

Таблица 2

### Результаты измерений массы образцов

№ образца	Масса образцов, г			
	1. Исходное состояние	2. После механического воздействия	3. После водопоглощения	4. После просушивания
1	40,218	–	40,230	40,220
2	40,225	–	40,238	40,222
3	40,222	–	40,235	40,221
4	40,215	–	40,230	40,217
5	40,214	–	40,228	40,215
Среднее по 5 образцам	40,218	–	40,233	40,219

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Средняя скорость распространения продольных УЗВ в исходном состоянии образцов составляла 2625 м/с, а средняя масса образцов — 40,218 г.

При механическом воздействии путем одноосного сжатия видимое трещинообразование на всех образцах было зафиксировано при нагрузке 430 Бар (механические напряжения в материале образцов 68,5 МПа). Следует отметить, что видимых деформаций образцов при этом не произошло. Далее нагружение не проводилось. После механического воздействия средняя скорость распространения УЗВ уменьшилась на 54 м/с. Данное явление объясняется эффектом акустоупругости, основанным на нелинейно-упругой модели твердой среды, в соответствии с которым при действии сжимающих напряжений скорость волны, поляризованной вдоль действия напряжений растет, а поперек — уменьшается [9, 10]. Масса образцов на этом этапе не измерялась.

После погружения в воду средняя масса образцов увеличилась на 0,015 г, что свидетельствует о водопоглощении сферопластика, которое происходит в результате проникновения воды через наружную поверхность образца и образованные в результате механического воздействия микротрещины на поверхности образца, а также в результате диффузии воды через полимерную матрицу капиллярным процессом [11]. Средняя скорость распространения УЗВ в материале образцов после водопоглощения выросла на 29 м/с.

Оценим изменение плотности и модуля Юнга образцов по результатам измерений, приведенным в табл. 1, 2, принимая допущение о том, что объем образцов не изменился.

Как известно, скорость распространения УЗВ связана с плотностью и модулем Юнга следующим уравнением:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1)$$

где  $c$  — скорость распространения продольной УЗВ (см. табл. 1);  $E$  — модуль Юнга;  $\rho$  — плотность [12].

Из формулы (1) получим выражение для определения модуля Юнга:

$$E = c^2 \cdot \rho. \quad (2)$$

Плотность вычисляется по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3)$$

где  $m$  — измеренная масса образцов (см. табл. 2);  $V$  — объем образца ( $125 \cdot 10^{-3}$  м при размере кубического образца 0,05 м).

Как видно из табл. 3, в результате водопоглощения плотность увеличилась менее, чем на 1 %, а модуль Юнга увеличился на 2,3 %. То есть, изменение модуля Юнга (числитель в формуле (1)) в большей степени оказывает влияние на изменение скорости распространения УЗВ, чем изменение плотности (знаменатель в формуле (1)).

Увеличение модуля Юнга объясняется уменьшением пористости в результате водопоглощения. Величина модуля упругости пористого тела при коэффициенте Пуассона, равного 0,3, в случае наличия замкнутых пор в непрерывной среде может быть определена по следующему эмпирическому уравнению:

$$E = E_0(1 - 1,9\Pi + 0,9\Pi^2), \quad (4)$$

где  $E$  и  $E_0$  — модули упругости пористого и абсолютно плотного тела;  $\Pi$  — относительная пористость [13].

Подставляя в уравнение (4) значения модуля упругости пористого тела  $E$ , рассчитанное для образца после механического воздействия, а плотного тела  $E_0$  — для образца после водопоглощения (см. п. 2, 3 табл. 3), можем оценить, что изменение пористости в результате водопоглощения  $\Pi$  составило около 1 %.

Таблица 3

Результаты оценки плотности и модуля Юнга образцов

Свойство образца	Единица измерений	1. Исходное состояние	2. После механического воздействия	3. После водопоглощения	4. После просушивания	Относительное изменение в результате водопоглощения, %
Плотность	кг/м <sup>3</sup>	321,74	321,74*	321,86	321,75	0,04
Модуль упругости	ГПа	2,22	2,13*	2,18	2,13	2,3

\* для расчета использовались значения массы образцов, измеренные в исходном состоянии, считаем, что масса образца в результате механического воздействия не изменилась. Объем образцов после механического воздействия не изменился.

Таким образом, в результате ориентировочных расчетов показано, что увеличение скорости распространения УЗВ в сферопластике в результате водопоглощения является закономерным явлением, несмотря на одновременное увеличение плотности образцов.

После просушивания и масса образцов (уменьшилась на 0,014 г), и скорость распространения УЗВ (уменьшилась на 26 м/с) практически вернулись к значениям, измеренным до водопоглощения.



Рис. 2. Результаты изменений скорости распространения УЗВ.

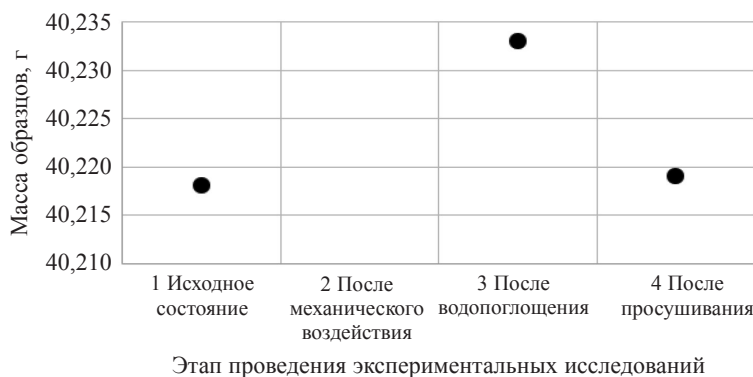


Рис. 3. Результаты измерений массы образцов.

Для иллюстрации результаты экспериментальных исследований также приведены на графиках (рис. 2, 3).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки водопоглощения сферопластиков предложено использовать ультразвуковой метод контроля. При проведении экспериментальных исследований установлено, что существует связь между акустическими свойствами и техническим состоянием материала: в материале образцов, имеющих микродефекты и избыточное водопоглощение, скорость распространения УЗВ составляет 2600 м/с и менее, что на 25 м/с меньше скорости распространения УЗВ в бездефектном образце. Таким образом, для контроля технического состояния блоков плавучести, находящихся в эксплуатации, может быть достаточно измерить скорость распространения УЗВ без их демонтажа с изделия и сравнить со скоростью УЗВ в образцах-свидетелях, хранящихся в лабораторных условиях. В дальнейшем при разработке методики контроля в качестве критерия браковки можно использовать уменьшение скорости распространения УЗВ в объекте контроля по сравнению со скоростью УЗВ в образцах-свидетелях меньше допустимого уровня (в настоящем примере — менее 2625 м/с). Установление браковочного порога — предмет для дальнейших исследований.

Полученные результаты дают основания для проведения более углубленных экспериментальных исследований в различных направлениях, таких как: исследование связи водопоглощения сферопластиков и других акустических свойств (затухание, спектр и т.д.); установление корреляционной зависимости между акустическими свойствами сферопластиков и их техническим состоянием.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федонюк Н.Н., Додонов П.А. Структурная модель деформирования и разрушения гетерогенных материалов типа сферопластика при действии гидростатического давления // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № 2. С. 37—51.

2. Лебедев В.Л., Косильников В.Ю., Серый П.В., Трошкин С.Н., Анисимов А.В. Прогнозирование гидростатической прочности сферопластиков. // Вопросы материаловедения. 2021. № 4 (108). С. 149—164.
3. Яковенко Т.В., Яруллина Г.К., Гарустович И.В., Шишилов О.Н., Мельников Н.О. Сферопластики как термоизолирующие защитные материалы промышленного назначения // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. XXX. № 8.
4. Додонов П.А., Федонюк Н.Н. Исследование влияния свойств и состава микросфер на характеристики сферопластика при действии гидростатического давления (моделирование и эксперимент) // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. № 4 (402). С. 65—74.
5. Федонюк Н.Н. Прочность и долговечность элементов плавучести из сферопластика подводной техники // Крыловский государственный научный центр. 2022. С. 272—280. ISBN 978-5-604629-26-0.
6. Соколов И.И. Сферопластики на основе терморезистивных связующих для изделий авиационной техники / Дис. ... канд. тех. наук. 05.16.09. М., 2013. 120 с.
7. Долматовский М.Г., Соколов И.И. Разрушение и контроль сотовых конструкций со сферопластиками // Конструкции из композиционных материалов. 2009. № 2. С. 97—103.
8. Гузь А. Н., Махорт Ф. Г., Гуца О. И. Основы ультразвукового неразрушающего метода определения напряжений в твердых телах. Киев: Наукова думка, 1974. 106 с.
9. Вода в полимерах / Сб. под редакцией С. Роуланда. Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 555 с.
10. Федонюк Н.Н., Федоров Ю.П. Водопоглощение и долговечность сферопластиков при длительном действии гидростатического давления // Вопросы материаловедения. 1995. Вып. 3. С. 74—82.
11. Кретов Е.Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / 2-е изд., переработка и доп. СПб.: Издательство «СВЕН», 2007. 296 с.
12. Клюев В.В. Неразрушающий контроль. Т. 3. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
13. Инженерно-строительный институт СФУ. Пористость и модуль Юнга: [Электронный ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/7759388/> (дата обращения 02.06.2023).