

УДК 534.222.2:539.216

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ НИТЕВИДНЫХ СТРУКТУР И СВОЙСТВ СФЕРОПЛАСТИКА ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Д. Н. Садовничий<sup>1</sup>, Ю. М. Милёхин<sup>1</sup>, С. А. Малинин<sup>1</sup>, А. И. Потапенко<sup>2</sup>,  
А. А. Чепрунов<sup>2</sup>, Р. В. Ульяненок<sup>2</sup>, К. Ю. Шереметьев<sup>1</sup>, Н. В. Перцев<sup>1</sup>,  
М. Б. Марков<sup>3</sup>, Е. Б. Савенков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральный центр двойных технологий «Союз», 140090 Дзержинский, [soyuz@fcdt.ru](mailto:soyuz@fcdt.ru)

<sup>2</sup>12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации  
141307 Сергиев Посад-7

<sup>3</sup>Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, 125047 Москва

Методом растровой электронной микроскопии обнаружено, что воздействие ударно-волнового импульса микросекундной длительности вызывает в сферопластиках на основе кремнийорганического эластомера формирование нитевидных структур длиной до 10 мкм. Нитевидные структуры образуются на поверхности разрушенных микросфер. Их образованию способствует металлизация поверхности стеклосфер. Представлены результаты экспериментального изучения изменений диэлектрических и механических характеристик металлизированного сферопластика, вызванных ударно-волновым воздействием. Обсуждаются возможные причины образования нитевидных структур при ударно-волновом воздействии на сферопластики.

Ключевые слова: ударная волна, сферопластик, микросферы, стеклосферы, нановискеры, диэлектрические свойства, механические свойства.

DOI 10.15372/FGV20210213

### ВВЕДЕНИЕ

Сферопластики или синтактические пены представляют собой композиционные материалы, в которых микросферы случайным образом распределены в полимерном связующем. Благодаря низкой плотности и диэлектрической проницаемости сферопластики находят широкое применение в различных областях техники [1, 2].

В недавно выполненной работе [3] обнаружено образование нитевидных структур (нановискеров) при воздействии на сферопластик, модифицированный вольфрамом, наносекундного потока релятивистских электронов плотностью  $230 \text{ Дж/см}^2$ . Как известно, воздействие наносекундных потоков электронов создает в мишени мощные электрические поля и ударно-волновое нагружение, что затрудняет выяснение однозначной причины образования наноструктур.

В обзорах [4, 5] дан анализ путей получения различных наноструктур. Известно, что при детонации взрывчатых веществ [6, 7] или газовой смеси ацетилена с кислородом [8] можно получить наночастицы углерода. При электрическом взрыве проводников образуются наночастицы металлов или их оксидов [5]. Лазерная абляция наносекундными импульсами (частота следования импульсов 10 Гц) позволяет формировать нитевидные наноструктуры по механизму пар — жидкость — кристалл [9]. При лазерной абляции (частота следования импульсов 4 кГц) в сверхтекучем гелии (He II) образуются нанопроволоки по механизму коагуляции примесей в квантованных вихрях сверхтекучего гелия [10]. В результате ударно-волнового воздействия на карбоксилаты металлов образуются наночастицы алмаза и наночастицы металлов характерного размера  $3 \div 20 \text{ нм}$  [11].

Вопросы деформирования сферопластиков при ударно-волновом, динамическом и статическом сжатии достаточно подробно изучены и связаны с особенностями пластического деформирования сферопластиков при схлопыва-

нии пористости, сформированной микросферами [12–19]. Однако образование нитевидных наноструктур (нановискеров) при ударном воздействии на сферопластики ранее не отмечалось.

Воздействие ударно-волнового импульса, сформированного подрывом эквидистантно-поверхностного заряда из эластичного взрывчатого вещества, позволяет создавать ударно-волновые нагрузки, близкие к возникающим в результате воздействия потоков релятивистских электронов ускорителя «Кальмар» [3]. При этом сильные электрические поля не образуются.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение возможности образования нитевидных структур в сферопластике, а также изменения его диэлектрических и механических характеристик после ударно-волнового сжатия, сформированного подрывом эквидистантно-поверхностного заряда из эластичного взрывчатого вещества.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

В экспериментах использовали плоские образцы сферопластика, состоящего из полимерного связующего на основе кремнийорганического эластомера (полифенилсилсесквиоксанополидиметилсилоксановый блок-сополимер) и стеклянных или модифицированных вольфрамом микросфер диаметром  $30 \div 130$  мкм. Массовая доля микросфер марки МС-9А составляла 28 %. Толщина стеклянной стенки микросфер  $2 \div 2.5$  мкм, а толщина вольфрамового покрытия  $0.1 \div 0.15$  мкм. Нанесение металлического слоя на микросферы выполнено путем химического осаждения из газовой фазы. Для удобства будем использовать обозначение SF-1 для сферопластика, у которого на поверхность стеклянных микросфер нанесено металлическое покрытие из вольфрама, а сферопластик с теми же параметрами микросфер (диаметр, толщина стенки и химический состав) без модификации вольфрамом будем обозначать SF-2.

Ударно-волновое нагружение осуществлялось подрывом эквидистантно-поверхностного заряда из эластичного взрывчатого вещества (ВВ) марки ЭВВ-34 (плотность  $1.6$  г/см<sup>3</sup>, скорость детонации  $7600$  м/с). Амплитуду и длительность ударно-волнового импульса задавали выбором приведенной массы заряда ВВ и

расстояния до образца. Для обеспечения одновременности приложения нагрузки заряд изготавливали в виде нескольких лент, а подрыв осуществляли многоточечной лучевой системой инициирования с торцов лент ВВ [20].

Во всех опытах ширина детонационной ленты составляла 2 мм при толщине ВВ 0.5 мм. Для регистрации прохождения волны давления по толщине образца на лицевой и тыльной сторонах нагружаемого сферопластика устанавливались пьезопленочные датчики.

Образцы сферопластика размерами  $35 \times 35$  мм, толщиной  $\approx 8.5$  мм закрепляли на грузе баллистического маятника. Импульс давления, передаваемый преграде подрывом заряда ВВ, регистрировался по углу отклонения груза маятника [21]. Максимальная погрешность измерений удельного импульса давления  $I_{sh}$  не превышала 4 %.

После нагружения из центральной части пластин сферопластика SF-1 в направлении приложения импульса давления вырезали цилиндрические образцы диаметром 5 мм и высотой 8 мм. Определение механических характеристик проводили на универсальной испытательной машине Instron 5565 при скорости перемещения подвижной траверсы 5 мм/мин. Эффективный модуль упругости определяли на начальном участке диаграммы сжатия (до 10 %). Результаты измерений модуля упругости и прочности на сжатие осредняли по результатам испытаний не менее пяти цилиндрических образцов.

Комплексную диэлектрическую проницаемость сферопластика SF-1 определяли на образцах толщиной  $h = 2 \div 2.5$  мм, вырезанных из центральной части исходных и подвергшихся нагружению пластин сферопластика. Измеряли емкость  $C$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$ .

Для частот электрического поля  $f = 1 \div 1000$  МГц измерения выполнены методом коаксиальной линии с использованием RF-анализатора E4991A и радиочастотной ячейки BDS2200 с измерительными электродами BDS2214 (диаметр измерительного электрода  $d = 10$  мм). Амплитуда подаваемого на образец синусоидального электрического поля 0.5 В.

В области частот электрического поля от 40 до  $5 \cdot 10^6$  Гц использовали прецизионный анализатор импеданса Agilent HP 4294A. Амплитуда подаваемого синусоидального напряжения составляла 1 В. Измерения амплитуды

Параметры нагружения образцов из сферопластика эквидистантно-поверхностным зарядом из эластичного ВВ

Номер опыта	Расстояние до преграды, мм	Приведенная масса заряда, г/см <sup>2</sup>	Импульс давления, Па·с	Длительность импульса, мкс
S1_1	15	0.031	300	5
S1_2	30	0.031	150	10
S1_3	30	0.037	203	10
S1_4	30	0.048	251	10
S1_5	30	0.06	300	10
S2_5	30	0.06	300	10

и сдвига фаз протекающего через образец тока выполняли по двухэлектродной схеме. Диаметр измерительного электрода  $d = 10$  мм. При расчете емкости образца учитывали краевую емкость и емкость измерительной ячейки относительно земли, согласно ГОСТ 22372-77.

Измерения диэлектрической проницаемости в каждом из диапазонов частот проведены не менее чем при 80 значениях частоты электрического поля  $f$  с равномерным логарифмическим шагом. Действительную часть комплексной диэлектрической проницаемости рассчитывали по формуле  $\epsilon' = 4C \cdot h / (\epsilon_0 \pi d^2)$  ( $\epsilon_0$  — электрическая постоянная). Все эксперименты выполнены при комнатной температуре.

Для изучения структурных изменений в сферопластике использовали растровый электронный микроскоп JSM-6490. Для исключения возможной методической ошибки антистатическое напыление на образцы сферопластиков не наносили.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ АНАЛИЗ

В таблице приведены параметры ударно-волнового нагружения сферопластиков, достигнутые в экспериментах при подрыве эквидистантно-поверхностного заряда из эластичного ВВ с удельным импульсом давления  $I_{sh} = 150 \div 300$  Па·с.

В опытах S1\_1 и S1\_5 ( $I_{sh} \approx 300$  Па·с) образцы сферопластика SF-1 разрушены на фрагменты. В опыте S1\_4 ( $I_{sh} \approx 250$  Па·с) от центра образца SF-1 к его периферии образовалась сквозная трещина. В опыте S1\_3 ( $I_{sh} \approx 200$  Па·с) по краям образца SF-1 наблюдались разрушения в форме отколов поверхности. В опыте S1\_2 ( $I_{sh} \approx 150$  Па·с) в образце SF-1 видимые разрушения отсутствовали. Отметим,

что толщина разрушенных образцов сферопластика практически не отличалась от исходных. В опыте S2\_5 при максимальном значении  $I_{sh} \approx 300$  Па·с образец сферопластика SF-2 видимых изменений не получил.

Типичные микрофотографии разломов сферопластиков SF-1 после ударно-волнового нагружения представлены на рис. 1. Видно, что разрушение микросфер сопровождается образованием множества мелких осколков, что обычно объясняется действием одновременно как осевой силы, так и сдвиговых напряжений [17]. Поскольку толщина стенки микросферы много меньше ее диаметра, разрушение микросферы сопровождается образованием полости в сферопластике. Во всех опытах на внутренней стороне разрушенных металлизированных микросфер обнаруживаются нитевидные образования длиной до 10 мкм и диаметром от 0.03 до 0.3 мкм. Вискеры диаметром 0.1 мкм можно квалифицировать как нановискеры. Количество нитевидных структур в опытах S1\_1 и S1\_5 заметно больше, чем в опытах S1\_2 и S1\_3. То есть увеличение удельного импульса давления  $I_{sh}$  создает условия для более эффективного образования нитевидных структур.

Типичные микрофотографии разломов сферопластика SF-2 после ударно-волнового нагружения (опыт S2\_5) представлены на рис. 2. Так же как в экспериментах с SF-1, происходит разрушение стеклосфер, однако нитевидные структуры на разрушенных стеклосферах наблюдаются достаточно редко (рис. 2, а). В подавляющем большинстве случаев, в отличие от SF-1, образующиеся на внутренней поверхности стеклосфер структуры ориентированы вдоль поверхности стеклосферы и имеют значительно больший

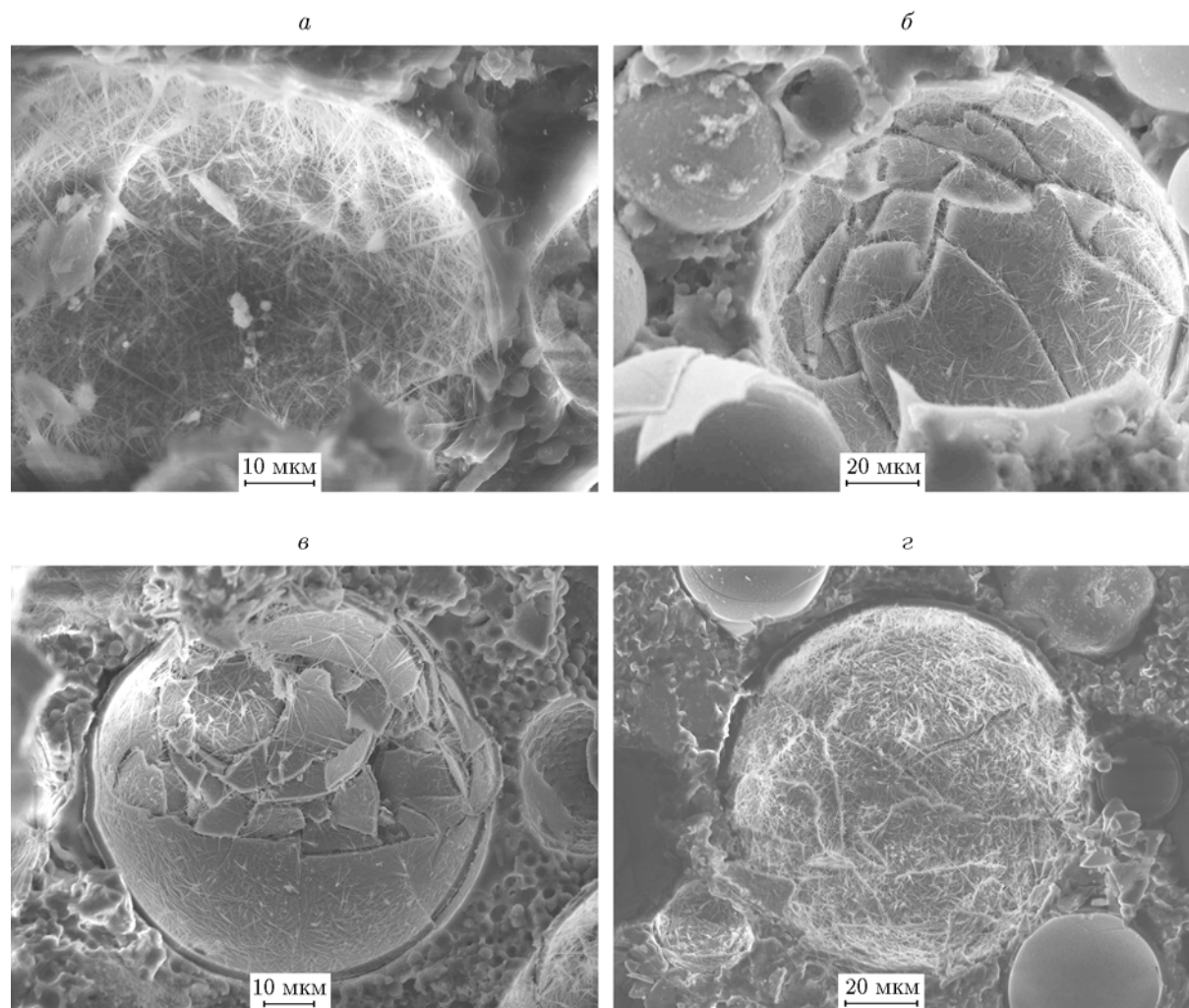


Рис. 1. Типичные микрофотографии микросфер в сферопластике SF-1 на глубине  $1 \div 7.2$  мм от поверхности, подвергаемой воздействию продуктов детонации эквидистантно-поверхностного заряда из эластичного ВВ:

*a* — опыт S1\_1, *б* — опыт S1\_2, *в* — опыт S1\_3, *г* — опыт S1\_5

диаметр. Отмечено появление нитевидных образований, ориентированных по нормали к наружной поверхности стеклосфер (рис. 2, *б*), такого типа образований в подвергнутых ударно-волновому импульсу образцах SF-1 не найдено. Как видно из рис. 2, *б*, внутри разрушенных стеклосфер иногда присутствуют структуры, напоминающие «застывшие» струи полимерного связующего.

На рис. 3 представлены диаграммы деформирования цилиндрических образцов из исходного сферопластика SF-1 и после ударно-волнового воздействия. Формоизменение цилиндрических образцов при сжатии происходило по классической схеме. Образец приобретал форму бочки, а разрушение сопровождалось обра-

зованием трещины, ориентированной под углом  $\approx 45^\circ$  к оси нагружения. Видно, что ударно-волновое нагружение понижает модуль упругости сферопластика тем сильнее, чем выше импульс давления  $I_{sh}$ . Однако прочность сферопластиков после ударно-волнового нагружения превышает прочность на сжатие исходных образцов. Причиной повышения прочности может быть появление отслоений и воздушной пористости в объеме сферопластика, что препятствует распространению трещин по образцу. Отметим, что надежно регистрировать прочность образцов в опытах S1\_1 и S1\_4 затруднительно из-за сильного изменения формы цилиндрических образцов в процессе сжатия на установке Instron 5565.

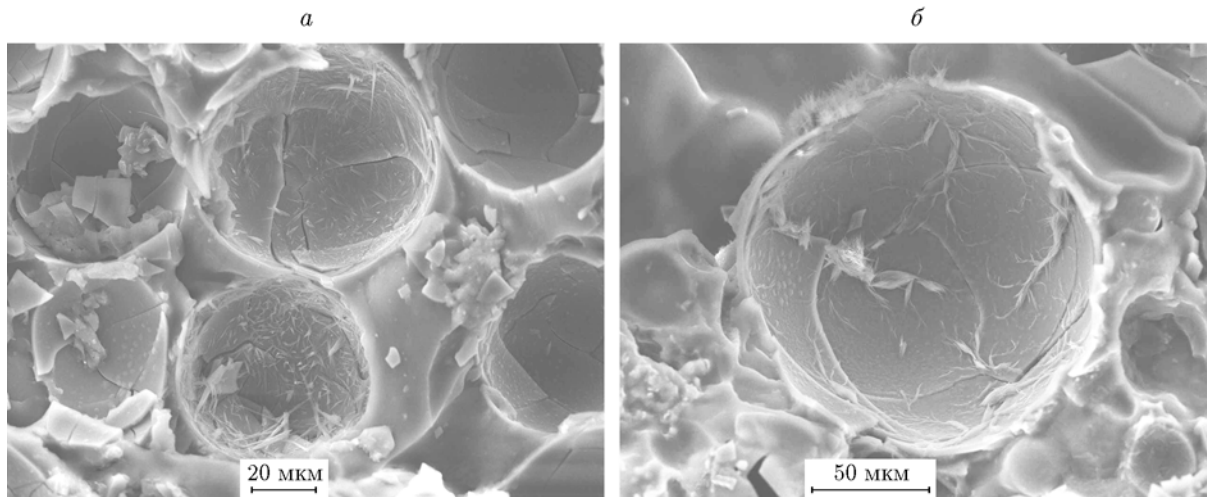


Рис. 2. Типичные микрофотографии стеклосфер в сферопластике SF-2 на глубине 2 (а) и 7 мм (б) от поверхности, подвергаемой воздействию продуктов детонации эквидистантно-поверхностного заряда из эластичного ВВ (опыт S2\_5)

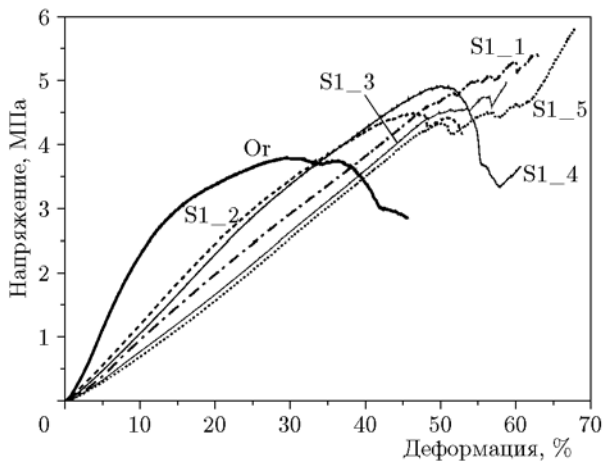


Рис. 3. Диаграммы сжатия цилиндрических образцов сферопластика SF-1. Исходный сферопластик (Or) и после ударно-волнового нагружения эквидистантно-поверхностным зарядом из эластичного ВВ:

номер опыта на кривой соответствует номеру в таблице

Частотные зависимости действительной части комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь исходного сферопластика и подвергнутого ударно-волновому воздействию представлены на рис. 4. Видно, что с увеличением частоты поля происходит снижение  $\epsilon'$ . Ударно-волновое нагружение в опытах S1\_1 и S1\_5 вызывает понижение  $\epsilon'$  во всем диапазоне частот, тогда как в опытах S1\_2 и S1\_3 с меньшим

импульсом давления  $I_{sh}$  изменения  $\epsilon'$  незначительны. Полученный результат указывает на существенное увеличение размера воздушных пор после ударно-волнового нагружения в опытах S1\_1 и S1\_5.

Характер зависимости  $\text{tg } \delta(f)$  в исходном сферопластике обнаруживает две области частотной дисперсии комплексной диэлектрической проницаемости: низкочастотная — в области 20 кГц, высокочастотная — в области более 300 МГц. Из рис. 4 видно, что повышение амплитуды импульса давления ударной волны вызывает смещение максимума пика низкочастотной релаксации в область более низких частот и исчезновение в сферопластике области высокочастотной релаксации. Характерная частота низкочастотной релаксации соответствует поляризации Максвелла — Вагнера на металлизированных стеклосферах [22]. Высокочастотная релаксация определяется взаимодействием электромагнитной волны с металлизированными микросферами. Подобный эффект неоднократно отмечали в полимерных композитах, наполненных частицами металлов, ферромагнетиков и многослойных углеродных нанотрубок [23–25]. Разрушение металлизированных стеклосфер сопровождается изменением рассеяния электромагнитных волн, которое с увеличением импульса давления все больше происходит с участием осколков микросфер, остающихся в полостях сферопластика. Кроме того, в опытах S1\_1 и S1\_4 нельзя исключить некоторое снижение доли металла за счет его

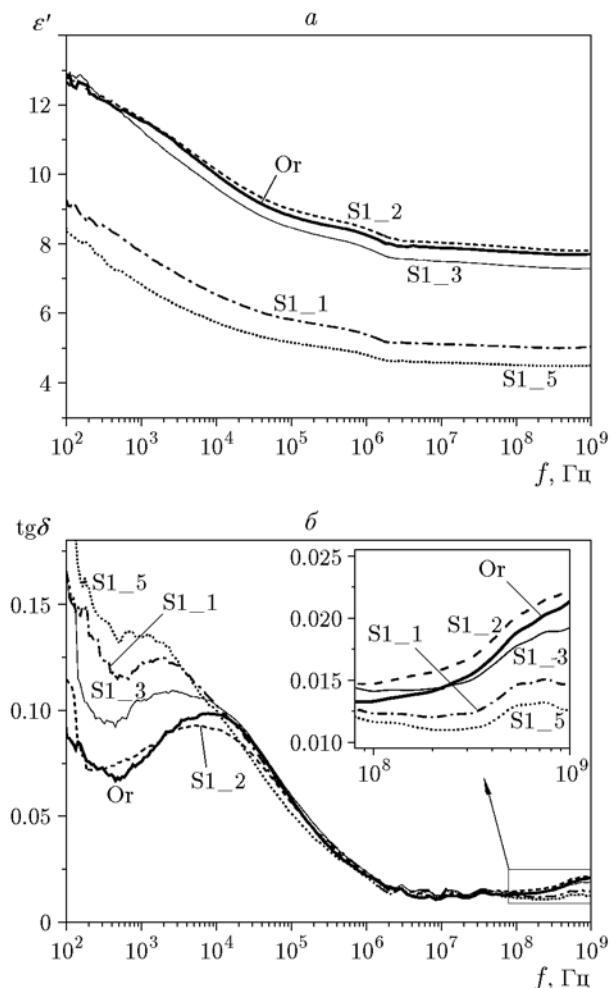


Рис. 4. Частотная зависимость относительной диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) сферопластика SF-1. Исходный сферопластик (Or) и после ударно-волнового нагружения эквидистантно-поверхностным зарядом из эластичного ВВ:

номер опыта на кривой соответствует номеру в таблице

выброса из образца при разрушении.

Таким образом, изменение диэлектрических и механических характеристик сферопластика SF-1 определяется степенью разрушения микросфер, что согласуется с результатами, полученными методами растровой электронной микроскопии. Проведенные эксперименты подтвердили возможность образования нановискеров при разрушении микросфер в сферопластике от воздействия ударно-волнового импульса микросекундной длительности.

Относительная диэлектрическая проница-

емость сферопластика SF-2 в основном определяется большим содержанием полых стеклянных микросфер и составляет  $\approx 1.7$  в изученном диапазоне частот, а тангенс диэлектрических потерь  $\approx 10^{-2}$ . После механического нагружения в опыте S2\_5 изменение относительной диэлектрической проницаемости не превышало 30 % и в целом малозначимо.

## ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время сложно однозначно указать механизм формирования нитевидных структур при разрушении стеклосфер в сферопластике от воздействия ударно-волнового импульса давления микросекундной длительности.

Наиболее распространенным методом получения нитевидных полупроводниковых наноструктур является осаждение на затравку из газовой фазы по механизму пар — жидкость — кристалл [26]. Для этого необходимо добиться испарения вещества сферопластика, в нашем случае вольфрама, продуктов деструкции полимерного связующего или стекла, а также иметь на поверхности жидкую «затравку» для начала роста вискера.

В проведенных опытах давление ударной волны в образцах достигало  $15 \div 60$  МПа, а длительность  $5 \div 10$  мкс. Прочность стеклянных микросфер, определенная по величине гидростатического давления в воде, вызывающей разрушение 50 % (по объему) микросфер, составляла 12.4 МПа [27]. Модуль упругости кремнийорганического эластомера много меньше, чем у стенки микросферы, поэтому после разрушения микросферы происходит смещение полимерного связующего в образовавшуюся полость. То есть под действием ударной волны полость в полимерном связующем сферопластика может выступать в роли «микрореактора» для роста нановискеров. Эластические свойства полимерного связующего позволяют обеспечить отсутствие остаточной деформации сферопластиков после ударно-волнового нагружения.

Теоретические оценки повышения средней температуры при быстропротекающих пластических деформациях пористых материалов в рамках нелинейной модели Максвелла получены в работе [28]. Показано, что повышение температуры подвергнутого быстрому деформированию пористого материала в основном связано с изменением плотности при сжатии. Исходная

плотность сферопластика в наших экспериментах достигала  $700 \text{ кг/м}^3$ , а плотность в сжатом состоянии близка к плотности сферопластика без пор  $<2000 \text{ кг/м}^3$ . Консервативная оценка показывает, что повышение температуры в среднем по образцу не превышает  $100 \text{ К}$ . Этого недостаточно для термического разложения кремнийорганического связующего. Действительно, в экспериментах следы углерода наблюдались только на поверхности сферопластика и были вызваны продуктами взрыва эластичного ВВ.

Проведенный в [29] анализ показал, что локальное повышение температуры в образующихся горячих точках при ударно-волновом коллапсе стеклянных микросфер в конденсированной среде значительно выше средней по объему температуры. Имеется несколько механизмов такого нагрева — гидродинамическое течение, адиабатический нагрев газа, пластическая и вязкопластическая деформация при высоких скоростях сдвига. Температура образующихся горячих точек при коллапсе стеклосфер зависит от интенсивности ударной волны и вязкости материала, окружающего пору. Показано, что в полимерном связующем из эпоксидной смолы температура достигает  $1600 \text{ К}$  при давлении  $\approx 2 \text{ ГПа}$  и времени формирования горячей точки  $\approx 300 \text{ нс}$  [29]. При столь высокой температуре может снижаться доля металлических частиц за счет частичного превращения вольфрама в диэлектрические соединения, например в оксиды. Снижение содержания металлических частиц будет вызывать понижение максимальной частоты низкочастотной дисперсии диэлектрической проницаемости, что и наблюдалось в проведенных экспериментах (см. рис. 4).

Таким образом, температура в «микрореакторе», образованном локально сжатой порой (диаметром до  $100 \text{ мкм}$ ), значительно превышает среднюю по объему температуру сферопластика и требует специального теоретического анализа. В качестве «затравки» для последующего роста нитевидных структур могут выступать как продукты конденсации испаренных в «микрореакторе» веществ, так и дефекты структуры стекла на внутренней поверхности стеклосферы.

Отметим, что нитевидные структуры формируются при ударно-волновом воздействии с амплитудой, несколько превышающей статическую прочность металлизирован-

ных стеклосфер (опыт S1.2). Поэтому определенную роль в формировании вискеро́в в проведенных экспериментах могут играть течения стенок и изменение структуры металлизированных стеклосфер при высокоскоростном сдвиге, вызывающем разрушение микросфер. Как известно, интенсивные деформации кручения изменяют микроструктуру вольфрама за счет измельчения субзерен с  $4 \text{ мкм}$  до  $500 \text{ нм}$  [30]. Из-за плотной упаковки микросфер важно также учитывать особенности разрушения микросфер, вызванные их столкновением с близко расположенными соседними микросферами.

При анализе образования наноструктур важно учитывать релаксацию температурных и внутренних напряжений в микросферах, обусловленную ударно-волновым воздействием. Как показано в [31], при гетерогенной релаксации температурных напряжений, вызванных воздействием мощного лазерного излучения, в условиях, исключающих испарение и плавление твердого тела, на его поверхности могут формироваться периодические наноструктурированные объекты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показано, что при ударно-волновом воздействии, сформированном подрывом эквидистантно-поверхностного заряда из эластичного взрывчатого вещества, при его длительности  $5 \div 10 \text{ мкс}$  и импульсах давления в диапазоне  $150 \div 300 \text{ Па} \cdot \text{с}$  в сферопластиках толщиной  $\approx 8.5 \text{ мм}$  наблюдается разрушение металлизированных стеклосфер с образованием нитевидных структур длиной  $\approx 10 \text{ мкм}$  и диаметром от  $0.03$  до  $0.3 \text{ мкм}$ . Образующиеся наноструктуры ориентированы преимущественно по нормали к внутренней поверхности разрушенных микросфер. Установлено, что увеличение импульса ударно-волнового воздействия на сферопластик способствует процессу формирования нановискеро́в.

При воздействии ударно-волнового импульса давления отсутствие металлизации поверхности стеклосфер способствует снижению способности к формированию нитевидных структур (вискеро́в) в объеме разрушенных стеклосфер. Наблюдается увеличение диаметра образующихся удлинённых частиц, которые расположены преимущественно вдоль поверхности стеклосферы.

Изменения диэлектрических и механических свойств сферопластиков, подвергнутых ударно-волновому воздействию эквидистантно-поверхностного заряда взрывчатого вещества, связаны с разрушением микросфер. Анализ диаграмм деформирования показал, что снижение модуля упругости сферопластика наблюдается при величине импульса ударно-волнового воздействия  $\approx 150$  Па·с, когда диэлектрические характеристики практически не меняются.

Отметим, что в условиях ударно-волнового воздействия на полимерные сферопластики эквидистантно-поверхностным зарядом взрывчатого вещества образование нитевидных структур ранее не отмечалось.

Практическое значение обнаруженного эффекта заключается в демонстрации возможности синтезировать нитевидные наноструктуры при коллапсе микросфер в эластичной среде от микросекундного ударно-волнового воздействия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Берлин А. А., Шутов Ф. А. Упрочненные газонаполненные пластмассы. — М.: Химия, 1980.
2. Гуртовник И. Г., Соколов В. И., Трофимов Н. Н., Шалгунов С. И. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков. — М.: Мир, 2002.
3. Милехин Ю. М., Садовничий Д. Н., Шереметьев К. Ю., Калинин Ю. Г., Казаков Е. Д., Марков М. Б. Формирование нановискеров наносекундным потоком релятивистских электронов в сферопластике, содержащем вольфрам // Докл. АН. — 2019. — Т. 487, № 2. — С. 159–163.
4. Третьяков Ю. Д., Гудилин Е. А. Основные направления фундаментальных и ориентированных исследований в области наноматериалов // Успехи химии. — 2009. — Т. 78, № 9. — С. 867–887.
5. Ремпель А. А. Нанотехнологии, свойства и применение наноструктурированных материалов // Успехи химии. — 2007. — Т. 76, № 5. — С. 474–500.
6. Сакович Г. В., Жарков А. С., Петров Е. А. Результаты исследований физико-химических процессов детонационного синтеза и применения наноалмазов // Рос. нанотехнологии. — 2013. — Т. 8, № 9-10. — С. 11–20.
7. Аульченко В. М., Жуланов В. В., Кулипанов Г. Н., Тен К. А., Толочко Б. П., Шехтман Л. И. Исследование быстропротекающих процессов рентгенодифракционными методами в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения // Успехи физ. наук. — 2018. — Т. 188, № 6. — С. 577–594.
8. Штерцер А. А., Ульяницкий В. Ю., Батраев И. С., Громилов С. А., Окотруб А. В., Сапрыкин А. И. Диагностика структуры и состава ультрадисперсного углерода, полученного детонационным способом // Журн. структур. химии. — 2014. — Т. 55, № 5. — С. 1031–1034.
9. Wang K., Chung S. Y., Kim D. Morphology of Si nanowires fabricated by laser ablation using gold catalysts // Appl. Phys. A. — 2004. — V. 79. — P. 895–897.
10. Гордон Е. Б., Карабулин А. В., Краснокутский С. А., Матюшенко В. И., Ходес И. И. Образование наноструктур при коагуляции полупроводников в сверхтекучем гелии // Химия высоких энергий. — 2017. — Т. 51, № 4. — С. 261–265.
11. Толочко Б. П., Чернышев А. П., Тен К. А., Прууэл Э. Р., Жогин И. Л., Зубков П. И., Ляхов Н. З., Лукьянчиков Л. А., Шеромов М. А. Физико-химическая модель детонационного синтеза наночастиц из карбоксилатов металлов // Физика металлов и металловедение. — 2008. — Т. 105, № 2. — С. 145–151.
12. Бодренко С. И., Крысанов Ю. А., Новиков С. А. Исследование распространения ударных волн в пенополистироле // ПМТФ. — 1979. — Т. 20, № 6. — С. 140–144.
13. Мержиевский Л. А., Реснянский А. Д. О моделировании динамического деформирования сферопластика // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28, № 3. — С. 119–121.
14. Мержиевский Л. А. Моделирование динамического сжатия пористого  $Al_2O_3$  // Физика горения и взрыва. — 1999. — Т. 35, № 6. — С. 105–111.
15. Зубарева А. Н., Уткин А. В., Ефремов В. П. Ударно-волновые свойства сферопластиков // Конструкции из композиционных материалов. — 2016. — № 3. — С. 45–50.
16. Gupta N., Priya S. J., Islam R. A., Ricci W. Characterization of mechanical and electrical properties of epoxy-glass microballoon syntactic composites // Ferroelectrics. — 2006. — V. 345. — P. 1–12.
17. Gupta N., Woldesenbet E. Microballoon wall thickness effect on properties of syntactic foams // J. Cell. Plastics. — 2004. — V. 40. — P. 461–480.
18. Viot P., Shankar K., Bernard D. Effect of strain rate and density on dynamic behaviour of syntactic foam // Composite Struct. — 2008. — V. 86, N 4. — P. 314–327.
19. Димитриенко Ю. И., Сборщиков С. В., Соколов А. П., Гафаров Б. Р., Садовничий Д. Н. Численное и экспериментальное моделирование прочностных характеристик сферопластиков // Композиты и наноструктуры. — 2013. — № 3. — С. 35–51.



20. **Чепрунов А. А., Острик А. В., Николаев Д. Н.** Взрывные технологии для прочностных испытаний тонкостенных композитных конструкций на действие боковых нестационарных нагрузок различной физической природы // Конструкции из композиционных материалов. — 2019. — Вып. 3. — С. 55–63.
21. **Бакулин В. Н., Грибанов В. М., Острик А. В., Ромадина Е. А., Чепрунов А. А.** Методы оптимального проектирования и расчета композиционных конструкций. — М.: Физматлит, 2008. — Т. 2.
22. **Трофимов Н. Н., Канович М. З., Карташов Э. М., Натрусов В. И., Пономаренко А. Т., Шевченко В. Г., Соколов В. И., Симонов-Емельянов И. Д.** Физика композиционных материалов. — М.: Мир, 2005. — Т. 2.
23. **Saini P., Choudhary V., Vijayan N., Kotnala R. K.** Improved electromagnetic interference shielding response of poly(aniline)-coated fabrics containing dielectric and magnetic nanoparticles // J. Phys. Chem. C. — 2012. — V. 116, N 13. — P. 13403–13412.
24. **Pawar S. P., Gandi M., Saraf C., Bose S.** Exception microwave absorption in soft polymeric nanocomposites facilitated by engineered nanostructures // J. Mater. Chem. C. — 2016. — V. 4, N 22. — P. 4954–4966.
25. **De Rosa I. M., Dinescu A., Sarasini F., Sarto M. S., Tamburrano A.** Effect of short carbon fibers and MWCNTs on microwave absorbing properties of polyester composites containing nickel-coated carbon fiber // Compos. Sci. Technol. — 2010. — V. 70, N 1. — P. 102–109.
26. **Дубровский В. Г., Цырлин Г. Э., Устинов В. М.** Полупроводниковые нитевидные нанокристаллы: синтез, свойства, применение: обзор // Физика и техника полупроводников. — 2009. — Т. 43, вып. 12. — С. 1586–1628.
27. **Будов В. В., Лукавова Р. В.** Сравнительная оценка прочности стеклянных микросфер // Тугоплавкие волокна и мелкодисперсные наполнители: сб. науч. тр. / под ред. В. Е. Хазанова. — М.: НПО «Стеклопластик», 1990. — С. 27–30.
28. **Роменский Е. И.** Релаксационная модель для описания деформирования пористых материалов // ПМТФ. — 1998. — Т. 39, № 5. — С. 145–149.
29. **Караханов С. М., Пластинин А. В., Бордзиловский Д. С., Бордзиловский С. А.** Время формирования горячих точек при ударном сжатии микробаллонов в конденсированной среде // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 105–113. — DOI: 10.15372/FGV20160315.
30. **Ганеев А. В., Исламгалиев Р. К., Валиев Р. З.** Особенности измельчения микроструктуры вольфрама в процессе интенсивной пластической деформации // Физика металлов и металловедение. — 2014. — Т. 115, № 2. — С. 149–155.
31. **Хомич В. Ю., Шмаков В. А.** Образование периодических наноразмерных структур на поверхности твердых тел при фазовых и структурных превращениях // Докл. АН. — 2012. — Т. 446, № 3. — С. 276 – 278.

*Поступила в редакцию 25.03.2020.*

*После доработки 27.05.2020.*

*Принята к публикации 01.06.2020.*

---