

МИНИСТЕРСТВО  
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный  
исследовательский ядерный  
университет «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)»**

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409  
Тел. (499) 324-77-77, факс (499) 324-21-11  
<http://www.mephi.ru>

13.12.2021 № 501/347

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



**УТВЕРЖДАЮ**

И.о. ректора НИЯУ МИФИ, д. ф.-м. н.

Шевченко В.И.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**  
на диссертационную работу Ростилова Тимофея Андреевича  
«Экспериментальное исследование особенностей распространения ударных волн в средах с  
заданной пористостью», представленную на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

**Вводная часть.**

Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию ударной сжимаемости сред, содержащих полые микросферы, в диапазоне давлений от десятых долей до единиц ГПа. Объектами изучения являлись: два вида эпоксидных сферопластиков, отличающихся концентрацией стеклянных микросфер, ненаполненная эпоксидная матрица, а также смесь стеклянные микросферы – вода. На основе анализа полученных данных удалось выявить влияние концентрации наполнителя и типа матрицы на ударно-волновые свойства таких сред в исследованном диапазоне давлений.

Отдельно проведено исследование структуры ударной волны в прессованном порошке наночастиц никеля. Рассматривая переотражения волны-предвестника в образце получилось адекватно описать наблюдаемые профили ударных волн.

**Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа Ростилова Т.А. состоит из введения, четырех глав, заключения, списков используемых сокращений, использованной литературы и публикаций автора по теме работы. Текст работы изложен на 123 страницах, использовано 110 литературных источников.

*Во введении* изложены основные сведения о работе: постановка задачи, обоснование её актуальности, вклад автора в её решение, положения, выносимые на защиту; представлен литературный обзор.

*В первой главе* рассмотрены постановки экспериментов по одноосному ударному нагружению конденсированных сред, изложены методы измерений и расчетов параметров ударного сжатия. Отдельное внимание уделено рассмотрению методов регистрации

профилей ударных волн и параметров, которые могут быть определены по ним. Описаны принципы работы метательной установки Стрела-2М и интерферометра ВИЗАР (VISAR) – ключевых инструментов, использованных в экспериментах.

*Во второй главе* кратко рассмотрены особенности распространения ударных волн в гетерогенных средах и приведены результаты экспериментов по одноосному ударному нагружению образцов сферопластиков и полимеризованной эпоксидной смолы. Для каждого из материалов приведено несколько групп данных: параметры ударного сжатия (скорость ударной волны, массовая скорость, давление) и описывающие их ударные адиабаты; профили ударных волн; параметры, характеризующие фронты ударных волн и ряд эмпирических соотношений, связывающих их между собой. Показано, как концентрация стеклянных микросфер в сферопластике влияет на указанные параметры и соотношения.

Изложена методика расчета параметров ударного сжатия в случае формирования двухволновой конфигурации, которая наблюдалась в экспериментах со сферопластиками.

Отдельно рассмотрено отклонение данных для эпоксидной смолы от закона четвертой степени (закона Суигла-Греди). Оказалось, что у этого вещества максимальная скорость продольной деформации во фронте ударной волны пропорциональна давлению в степени 5.5, а не 4. Оценены условия достижения ударными волнами стационарного режима распространения для этого материала и высоконаполненного сферопластика.

Показано, что в исследованном диапазоне давлений поведение сферопластиков при одноосном ударном сжатии сложное и связано с формированием волны-предвестника, повышенным разогревом пористого вещества в ударной волне и гетерогенной структурой образца.

*В третьей главе* приведены экспериментальные данные по ударной сжимаемости смеси микросферы – вода: параметры ударного сжатия и профили ударных волн. На основе сравнения всех полученных по микросферическим средам данных было показано, как свойства матрицы влияют на параметры распространения волн-предвестников. Проведено сравнение времени нарастания фронта ударной волны в сферопластиках и смеси микросфер с водой с временами формирования горячих точек в аналогичных средах.

*В четвертой главе* представлены результаты экспериментов с прессованным порошком наночастиц никеля. Показана сложная структура фронтальной части профиля ударной волны в этом веществе при давлениях 1.7 и 4.1 ГПа. Наблюдаемая картина объяснена с помощью рассмотрения переотражений волны-предвестника между исследуемой тыльной поверхностью образца и фронтом пластической ударной волны.

*В заключении* сформулированы основные результаты диссертации.

### **Актуальность диссертационной работы.**

Понимание поведения пористых сред при ударном сжатии необходимо для подробного описания и моделирования этого процесса. Экспериментальные исследования являются важнейшим источником первичной информации об ударной сжимаемости конденсированного вещества. В том числе эти исследования необходимы для поиска новых свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках.

Актуальность исследования конкретных веществ – микросферических сред, в том числе сферопластиков, и порошков из наночастиц металлов обусловлена тем, что разработка и внедрение на практике подобных материалов ведется непрерывно. Сферопластики, например, применяются во множестве отраслей – авиации, космической и глубоководной

технике, промышленности. В том числе они напрямую используются в качестве материалов, защищающих от разрушительного воздействия ударных волн. Полученные в работе данные могут быть вполне применимы для анализа отклика исследованных веществ на ударную нагрузку, которая на практике, например, может быть вызвана аварийной ситуацией.

### **Научная новизна.**

Ростиловым Т.А. был получен и обработан значительный объем надежных экспериментальных данных, полученных с помощью передовых средств измерения. Рассматривая новизну работы, стоит упомянуть следующие результаты:

Впервые было показано, что ударная адиабата высоконаполненного сферопластика аномальный вид в области пластического сжатия. Также продемонстрировано понижение динамического предела упругости при одноосном ударном сжатии с ростом концентрации микросфер.

Для сферопластиков и полимеризованной эпоксидной смолы были получены зависимости максимальной скорости продольной деформации от давления ударного сжатия в форме степенного соотношения Суигла-Греди и ряд других степенных соотношений, связывающих параметры фронта ударной волны.

Представлены данные по ударной сжимаемости и профили ударных волн для смеси стеклянных микросфер с водой. Совокупность полученных результатов для микросферических сред позволила сделать выводы о влиянии материала матрицы на параметры распространения волн-предвестников.

Проведено сравнение времен нарастания фронтов ударных волн в высоконаполненном сферопластике и смеси микросферы – вода с представленными в литературе данными по временам формирования горячих точек в монослоях аналогичных веществ. Показано, что при давлениях больше 0.5 ГПа время формирования горячих точек превышает время нарастания фронта волны, что является свидетельством их образования уже за фронтом.

Структура фронта ударной волны в нанопористом никеле была успешно объяснена с помощью рассмотрения последовательных отражений волны-предвестника.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Совокупность всех полученных в работе результатов, которые упоминались выше, может быть включена в базы данных, использоваться для проведения расчетов и верификации моделей. Отдельно стоит отметить сведения по никелю с наноразмерными порами, поскольку литературных данных по ударной сжимаемости подобных сред значительно меньше, чем по веществам с микроразмерными порами.

Результаты по микросферическим средам являются вкладом не только в общий процесс изучения конкретных материалов, используемых на практике – сферопластиков и, в меньшей степени, эмульсионных взрывчатых веществ, но и закладывают основу для рассмотрения этих сред как модельных при исследованиях связи параметров пористости вещества и его ударно-волновых свойств.

Полученные зависимости в форме соотношения Суигла-Греди могут позволить упростить оценки максимальной скорости деформации, которая реализуется во фронтах ударных волн в эпоксидных сферопластиках. Кроме того, результат, полученный для

эпоксидной смолы, может послужить основой для дальнейшего теоретического и экспериментального изучения пластической деформации этого материала в ударных волнах.

Данные по ударной сжимаемости сферопластиков могут быть рекомендованы для использования в организациях, занимающихся разработками этих материалов – ФГУП ВИАМ, НПО Стеклопластик, РФЯЦ-ВНИИЭФ.

### **Публикации и апробация работы.**

По теме диссертационной работы Ростилковым Т.А. опубликовано 3 статьи в журналах перечня ВАК, 2 из которых опубликованы в изданиях, индексируемых в базе Web of Science (включая Q1 журнал).

Основные результаты работы в достаточном объеме представлены на российских и международных конференциях.

### **Личный вклад автора.**

Как следует из текста диссертационной работы, автором лично получены все представленные экспериментальные данные и проведена их обработка. Непосредственно автором был собран и отлажен интерферометр ВИЗАР (VISAR), который затем успешно применялся в экспериментах на пушке Стрела-2М.

### **Замечания.**

1. Не проведено сравнения полученных в опытах с ударными волнами параметров упругого предвестника с их значениями при статическом нагружении.
2. Полученные в работе экспериментальные ударные адиабаты сложных неоднородных сред не сопоставлены с математическими моделями.
3. В работе присутствует объективный недостаток математической сложности: не приведены математические модели, описывающие процессы в релаксационных зонах ударных волн, не используется математический аппарат дифференциальных уравнений.

Тем не менее, отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку рассматриваемой диссертации Ростилова Т.А. «Экспериментальное исследование особенностей распространения ударных волн в средах с заданной пористостью».

### **Заключение.**

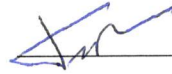
Диссертация Ростилова Т.А. «Экспериментальное исследование особенностей распространения ударных волн в средах с заданной пористостью» представляет собой законченную научно-квалификационную работу. Тема диссертации актуальна, результаты и выводы обоснованы. Материалы по теме диссертации опубликованы в научных журналах, докладывались на научных международных и всероссийских конференциях. Автореферат достаточно полно и ясно отражает содержание диссертации. Выводы полностью соответствуют поставленным цели и задачам диссертационной работы, следуют из результатов проведенной автором работы и имеют важное научно-практическое значение.

Диссертационная работа Ростилова Т.А. «Экспериментальное исследование особенностей распространения ударных волн в средах с заданной пористостью» соответствует всем критериям, установленным Постановлением Правительства РФ от

24.09.2013 г. № 842 «Положение о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Ростиллов Тимофей Андреевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 - теплофизика и теоретическая теплотехника.

Диссертация соискателя рассмотрена на научном семинаре института лазерных и плазменных технологий (ЛаПлаз) НИЯУ МИФИ 23.11.2021 г. Отзыв был одобрен по результатам голосования: «за» – 12 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

Отзыв подготовил заведующий Кафедрой химической физики Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ д. ф.–м. н., профессор  
+7 495 788-5699, доб. 9035



С.А. Губин

Директор института лазерных и плазменных технологий (ЛаПлаз) НИЯУ МИФИ д. ф. –м. н., профессор



А.П. Кузнецов

Председатель совета по аттестации и подготовке научно-педагогических кадров НИЯУ МИФИ, д. ф. –м. н., профессор



Н.А. Кудряшов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31  
+7 495 788-5699, доб. 8785