

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, доцента
Карабутова Александра Алексеевича о диссертационной работе
Володарского Александра Борисовича «Упругие свойства
термопластического полимера акрилонитрил-бутадиен-стирола
и амплитудно-частотные характеристики фононных кристаллов
на его основе», представленной на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика

Диссертационная работа А. Б. Володарского посвящена комплексному экспериментальному исследованию линейных и нелинейных упругих свойств термопластического полимера ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол), широко применяемого в аддитивных технологиях, а также изучению акустических характеристик фононных кристаллов, созданных на его основе. Актуальность темы обусловлена стремительным развитием 3D-печати в современном материаловедении и акустике, а также растущим интересом к фононным кристаллам как перспективной платформе для разработки функциональных акустических устройств — полосовых и поляризационных фильтров, поглотителей, акустических линз и метаматериалов с заданными волновыми свойствами.

Диссертация структурирована логично и последовательно: она включает введение, три содержательные главы и заключение. Общий объём составляет 117 страниц машинописного текста, содержит 37 рисунков и 9 таблиц, а список литературы включает 88 источников, отражающих как классические, так и современные достижения в области акустики полимеров и фононных кристаллов.

Во **введении** обоснована научная и прикладная актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены её научная новизна и практическая значимость. Приведены сведения об апробации результатов на ведущих российских и международных конференциях и публикациях по теме диссертации.

Первая глава посвящена фундаментальному исследованию линейных и нелинейных упругих характеристик ABS-полимера в форме тонких цилиндрических образцов. Для этого были разработаны и применены статические и квазистатические методики, включая модифицированный метод Терстона–Браггера, позволяющий одновременно измерять механическую деформацию и скорость ультразвука в нагруженном образце. Экспериментально установлено, что увеличение скорости деформации не оказывает существенного влияния на линейный модуль Юнга, однако приводит к росту нелинейного акустического параметра и модуля упругости третьего порядка, что свидетельствует об усилении структурной нелинейности при более высоких скоростях нагружения. С использованием высокочастотной акустической микроскопии впервые

визуализированы локальные микроразмерные области (~60 мкм) с пониженными упругими характеристиками, возникающие при переходе материала из упругой в пластическую область деформации. Показано, что локальное снижение скорости продольных ультразвуковых волн с 2320 м/с до 2230 м/с коррелирует с формированием зон разупорядочения надмолекулярной структуры полимера. Кроме того, проведено сравнение свойств исходного и 3D-напечатанного ABS: установлено, что аддитивное формование незначительно влияет на линейные упругие параметры, но повышает уровень нелинейности, особенно при циклическом нагружении.

Во **второй главе** впервые для полимера ABS экспериментально исследован эффект быстрой динамики — нелинейное изменение скорости и амплитуды упругой волны в зависимости от амплитуды посылаемой волны. Установлено, что относительное изменение скорости продольных и поперечных волн описывается логарифмической зависимостью, что указывает на наличие структурной нелинейности, обусловленной мезомасштабной неоднородностью, возникающей при послойной печати. Одновременно выявлена степенная зависимость амплитуды прошедших поперечных волн от амплитуды возбуждения, причём характер зависимости зависит от поляризации волны. Подтверждена изотропность материала по быстрой динамике во всех трёх ортогональных направлениях, что свидетельствует о высоком качестве 3D-печати и отсутствии системных дефектов межслоевой адгезии.

Третья глава представляет собой систематическое исследование акустических свойств фоновых кристаллов, изготовленных методом 3D-печати из ABS. Рассмотрены две принципиально разные конфигурации: твердотельные кристаллы с ABS-матрицей и цилиндрическими включениями (воздух или сталь), а также жидкостные и вязкоупругие кристаллы, в которых ABS служит периодическим препятствием в водной или агаровой среде. На основе измерений амплитудно-частотных характеристик (в диапазоне 0,2–3,0 МГц) выявлены запрещённые зоны и полосы пропускания. Показано, что положение запрещённых зон при распространении продольных волн определяется преимущественно геометрией периодической структуры и слабо зависит от материала заполнения. В то же время для поперечных волн обнаружена выраженная зависимость амплитуды прошедшей волны от угла поляризации: максимумы наблюдаются при ориентации вектора поляризации перпендикулярно оси симметрии кристалла. Это открывает возможность использования таких структур в качестве акустических поляризационных фильтров. В случае жидкостных кристаллов продемонстрирована возможность настройки полос пропускания путём изменения числа слоёв и периода решётки, что подтверждает перспективность подобных систем для создания управляемых акустических фильтров.

В **заключении** обобщены ключевые результаты работы, подтверждающие её научную новизну и практическую ценность. Все основные положения диссертации подкреплены экспериментальными данными, согласуются с

теоретическими оценками и численным моделированием, а также опубликованы в научных статьях, включая работы в международных журналах.

Диссертационная работа выполнена на достойном научном уровне, апробирована в достаточной степени публикациями в соответствующих исследовательской области научных журналах. Основными достоинствами работы можно назвать следующее:

- Комплексный подход, сочетающий механическое нагружение, ультразвуковую диагностику и высокоразрешающую акустическую микроскопию, что позволило установить прямую связь между макроскопическими упругими параметрами и микроструктурными изменениями в объёме полимера.
- Оригинальные результаты по локализации и визуализации микро-размерных областей с пониженной упругостью при пластической деформации аморфного полимера, что вносит вклад в понимание механизмов деформирования полимерных материалов.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

- Раздел 1.4.1 озаглавлен “Влияние скорости нагружения на упругие свойства полимера ABS”, но при этом в нем речь идет не о скорости нагружения, а о скорости деформации.
- В разделе 1.4.2 для областей с разреженной структурой не приведено прямое измерение плотности — только косвенная интерпретация через скорость.
- Положение №3, выносимое на защиту, сформулировано недостаточно ясно. Непонятно, что имеется в виду под словами «описывается нелинейной (логарифмической) зависимостью с коэффициентом $1.5 \cdot 10^{-3}$ »?

Сделанные замечания не снижают, однако, в целом высокой оценки проделанной соискателем работы. Получено достаточно большое количество важных и новых результатов, что способствовало пониманию процессов в области нелинейной акустики полимеров.

Считаю, что диссертация «Упругие свойства термопластического полимера акрилонитрил-бутадиен-стирола и амплитудно-частотные характеристики фононных кристаллов на его основе» соответствует специальности 1.3.7. Акустика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского

государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Володарский Александр Борисович — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика.

Официальный оппонент:

Карабутов Александр Алексеевич,
доктор физико-математических наук, доцент

Место работы и должность:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Научный центр волновых исследований (НЦВИ ИОФ РАН), лаборатория лазерного ультразвука, ведущий научный сотрудник

_____ А.А. Карабутов
«5» ноября 2025 года

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ГСП-1, ул. Вавилова, д. 38
Телефон: +7 (499) 503-87-77 (доб. 1-91)
E-mail: aak@optoacoustic.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.21 — «Лазерная физика»

Подпись Карабутова Александра Алексеевича ЗАВЕРЯЮ:

Зам. директора НЦВИ ИОФ РАН (филиал) _____ Абрашин М.Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Телефон: +7 (499) 503-87-34

E-mail: office@gpi.ru