

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Пожара Витольда Эдуардовича
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 посвящена экспериментальному исследованию нелинейных упругих свойств полимера ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол), широко используемого в аддитивных технологиях, а также акустических характеристик создаваемых на его основе периодических упорядоченных структур (фононных кристаллов). Учитывая возрастающее значение 3D-печати в материаловедении, а также перспективность фононных кристаллов для создания на их основе функциональных структурных элементов, работа является безусловно актуальной.

Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения. Объём диссертации составляет 117 страниц и включает в себя 37 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 88 библиографических ссылок.

Во **Введении** обоснованы актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, применяемые методы, выделены элементы новизны и проведена оценка практической значимости работы, сформулированы выносимые на защиту положения, обоснована достоверность полученных результатов, приведены сведения об апробации результатов исследования и о личном вкладе соискателя, представлена структура диссертационной работы..

В **первой главе** исследованы линейные и нелинейные упругие характеристики образцов полимеров ABS в виде тонких цилиндров (натянутых нитей). Описаны использованные статические и квазистатические методы исследования, включая модифицированный метод Терстона–Браггера. Экспериментально показано, что увеличение скорости растяжения образца приводит к изменению нелинейных характеристик, выражающемся в уменьшении скорости продольных акустических волн. Методы акустической микроскопии позволили визуализировать участки пластической деформации, характеризующиеся локальные изменения упругости, оценить их вклад и рассчитать скорости распространения ультразвука в материале полимера.

Во **второй главе** продемонстрировано проявление нелинейности упругих свойств исследованных образцов ABS, напечатанных на 3D принтере. Показано, что относительное уменьшение скорости звука имеет логарифмическую зависимость от амплитуды акустической волны. Обнаружено, что коэффициент пропускания для поперечных волн имеет отклонение от линейного закона и описывается степенной зависимостью с показателем примерно 0,9, т.е. наблюдается нелинейная экстинкция. При этом оказалось, что нелинейность не сказывается на коэффициенте прохождения продольных волн, также как и на изотропности характеристик образца.

Третья глава посвящена исследованиям перспективных, более сложных структур на основе полимеров ABS: 1) в виде полимерной матрицы с упорядоченными цилиндрическими воздушными полостями или с упорядоченными цилиндрическими стальными включениями; 2) в виде жидкой среды (или вязкоупругой матрицы из агара), в которой располагалась, выполненные из пластика решетки. Исследованы амплитудно-частотные характеристики распространения в этих структурах продольных акустических волн, показано существование полос пропускания и сильного ослабления, Исследованы зависимости от числа периодов решетки и от угла падения ультразвуковой волны на решетку в плоскости, перпендикулярной выделенному направлению («оси») структур, определяемом ориентацией неоднородных включений. Сделан вывод о возможности путем поворота структур управлять коэффициентом пропускания акустических волн разной поляризации.

В **Заключении** подведены итоги исследования, отражены основные результаты и приведены публикации автора по теме диссертации, а также список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне, написана хорошим языком, апробирована в достаточной степени публикациями в соответствующих исследовательской области научных журналах и выступлениями на конференциях. Можно отметить следующие привлекательные черты работы.

- Работа находится на стыке акустики, материаловедения и аддитивных технологий — трёх важных и быстро развивающихся областей. Это делает её результаты значимыми как для фундаментальной науке (для понимания особенностей сложных структур), так и в прикладных отраслях (например, при разработке ультразвуковых устройств, фильтров и сенсоров).

- В диссертации выявлены микроскопические области пониженной упругости (размером, не превышающим фокальное пятно акустического микроскопа 60 мкм), возникающие в результате перехода от упругой деформации к пластической, что иллюстрирует механизмы разрушения аморфных полимеров.

К недостаткам диссертационной работы можно отнести неточности формулировки положений, выносимых на защиту.

1. В Положении 1 утверждается, что нелинейный модуль Юнга изменяется при росте скорости механического растяжения, однако не указано ни абсолютных, ни относительных значений этой скорости.
2. В Положении 3 описана логарифмическая зависимость относительного изменения скорости звука от «амплитуды накачки сигнала» с экспериментально определенным коэффициентом $1,5 \cdot 10^{-3}$. Однако поскольку указанный термин нигде в тексте диссертации не разъяснен, он может трактоваться и как зависимость от амплитуды возбуждаемой акустической волны, и как зависимость от ее интенсивности. Так как в этих вариантах коэффициент в формуле различается вдвое, требуется уточнение.
3. Не дано какого-либо, хотя бы качественного описания объяснения полученным экспериментально зависимостям: логарифмической для изменения скорости звука и степенной для коэффициента пропускания. Поэтому не ясна степень общности полученных результатов: ограничивается ли она только полимером ABS или описывает качественно поведение и иных термопластов (например, PLA, PETG, PC), которые также широко используются в 3D-печати.

При этом указанные замечания не являются принципиальными, а направлены на более четкую формулировку полученных результатов и понимание области их применимости. по отношению к проведённым исследованиям, а призваны помочь автору грамотнее и точнее излагать материал. Соискателем было получены новые, практически важные и результаты, а диссертация заслуживает высокой оценки.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

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 предъявляемым к кандидатским диссертациям критериям, определённым пп. 2.1-2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова».

Она 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». Считаю, что автор работы, Володарский Александр Борисович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика.

Официальный оппонент:

Пожар Витольд Эдуардович,
доктор физико-математических наук

Место работы и должность:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Научно-технологический центр уникального приборостроения
Российской академии наук» (НТЦ УП РАН),
отдел акустооптических информационных систем, заведующий отделом

_____ В.Э. Пожар
«5» ноября 2025 года

Адрес места работы:

117342, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 15
Телефон: +7 (495) 334-83-30
E-mail: vitold@ntcup.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.01 — «Приборы и методы экспериментальной физики»

Подпись Пожара Витольда Эдуардовича ЗАВЕРЯЮ

Зам. директора НТЦ УП РАН

_____ Чуриков Д.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Научно-технологический центр уникального приборостроения
Российской академии наук» (НТЦ УП РАН)

Телефон: +7 (495) 333-61-02

E-mail: np@ntcup.ru