

### **Отзыв официального оппонента**

на диссертационную работу Черепанова Ивана Александровича «Влияние температуры на откольную прочность и ударную сжимаемость полимеров в слабых ударных волнах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Диссертационная работа Черепанова Ивана Александровича посвящена **актуальной** проблеме физики экстремальных состояний вещества – исследованию поведения полимерных материалов при высокоскоростном ударно-волновом нагружении в широком диапазоне температур. Полимеры с каждым годом все интенсивнее используются в конструкционных элементах авиационной и космической техники, элементах бронезащиты, изготавливаемых в том числе с применением аддитивных технологий. Изделия из полимерных материалов могут подвергаться интенсивным динамическим воздействиям при различных температурах, включая отрицательные и близкие к температурам стеклования или плавления. Несмотря на практическую востребованность, систематические экспериментальные данные о влиянии температуры на ударную сжимаемость и откольную прочность таких распространённых полимеров, как поликарбонат, акрилонитрил бутадиен стирол (АБС-пластик) и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), до настоящего времени были крайне ограничены. Диссертация восполняет этот пробел, что определяет её высокую актуальность как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

**Научная новизна** работы не вызывает сомнений. Автором впервые предложены и отработаны оригинальные экспериментальные методики ударно-волнового нагружения образцов из полимерных материалов при нагреве и охлаждении с одновременной регистрацией профилей скорости свободной поверхности в диапазоне от  $-120^{\circ}\text{C}$  до  $+185^{\circ}\text{C}$ . Получены новые данные об ударной сжимаемости и откольной прочности поликарбоната, АБС-пластика и СВМПЭ при напряжениях сжатия до 1,3 ГПа. Определено качественное и количественное влияние температуры, при которой производились эксперименты как при повышенных, так и при пониженных температурах. Установлены общие закономерности и особенности влияния стеклования в поликарбонате и плавления в СВМПЭ на снижение откольной прочности, а также выявлена связь характера откольного разрушения с внутренней структурой исследуемых полимеров. В АБС-пластике значительного снижения откольной прочности выше температуры стеклования выявлено не было.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что полученные экспериментальные зависимости могут быть непосредственно использованы для калибровки и верификации математических моделей деформирования и разрушения полимерных материалов

при высокоскоростных воздействиях, а также при проектировании конструкционных изделий, работающих в условиях динамических нагрузок в широком диапазоне изменения температур.

### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа объемом 121 страниц состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 109 наименований. Работа хорошо структурирована, изложена логично и последовательно.

**Первая глава** содержит обзор литературы по физике ударных волн, механизмам откольного разрушения и особенностям поведения полимеров при динамическом нагружении. Проанализировано влияние температуры на свойства материалов, что позволило автору четко сформулировать цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена описанию экспериментальных методик. Подробно представлены методы генерации ударных волн (пневматическая пушка, взрывные устройства), метод регистрации профиля свободной поверхности на основе лазерной доплеровской интерферометрии VISAR, а также оригинальные разработки автора по нагреву и охлаждению образцов в условиях ударного эксперимента. Особого внимания заслуживает методика регистрации ударных адиабат с использованием пластины-свидетеля из натриево-известкового стекла.

**Третья, четвертая и пятая главы** содержат основные экспериментальные результаты для поликарбоната, АБС-пластика и СВМПЭ, соответственно. В каждой главе последовательно представлены анализ волновых профилей, построение ударных адиабат, расчет откольной прочности и скоростей деформирования, а также обсуждение влияния температуры. Результаты проиллюстрированы качественными рисунками.

В **заключении** сформулированы основные выводы, которые полностью соответствуют поставленным задачам и положениям, выносимым на защиту.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обеспечивается применением апробированных методов (пневматическая пушка, взрывные генераторы, интерферометрия высокого разрешения VISAR), воспроизводимостью экспериментальных данных, использованием независимых методик контроля (ДСК, рентгеноструктурный анализ, оптическая микроскопия), а также хорошим согласием полученных при комнатной температуре ударных адиабат с литературными данными.

**Личный вклад** автора в проведении экспериментов и анализе данных является определяющим. Основные результаты диссертационной работы получены автором, опубликованы в 3 статьях в рецензируемом журнале, рекомендованном ВАК («Журнал технической физики»), и апробированы на российских и международных конференциях.

### **Замечания и вопросы по содержанию автореферата и диссертации:**

1. Исследуемые полимеры являются вязкоупругими материалами и проявляют нелинейные свойства, выраженные в зависимости физико-механических характеристик, в том числе модулей упругости, не только от амплитуды нагружающего импульса, но и от скорости деформирования. Поэтому представление фронта нагрузки в виде ударной волны не совсем корректно, так как фронт не является конечным скачком, а является "размазанным" по времени профилем для вязкоупругого материала. В свою очередь это вызывает необходимость учета влияния скорости деформации в формуле для уравнения адиабаты (1.11). На стр. 22 диссертации отмечается, что инструментальное определение объемной скорости звука получается ниже значения "нулевой" скорости в (1.11), которая в свою очередь превышает продольную скорость звука. Связано ли это с неучетом влияния скорости деформации в инструментальном методе измерения скорости звука?
2. В работе используется акустическое приближение для определения откольной прочности различных полимерных материалов. Однако для подобных материалов, проявляющих вязкоупругие свойства в волне разгрузки, также возникают искажения профиля скорости, связанные с дисперсией скорости звука или релаксационными явлениями. Насколько обоснованно применение данного приближения для всех исследованных полимеров, особенно для АБС-пластика и СВМПЭ, где откольный импульс выражен слабо или отсутствует?
3. Проводилась ли оценка погрешности измерения волновых профилей методом доплеровской интерферометрии, связанная с использованием тонкого отражающего слоя из фольги с учетом слоя эпоксидного клея?
4. Для поликарбоната с целью построения адиабат Гюгонио проводилась серия экспериментов с электроконтактным методом измерения скорости волны ударно-сжатого материала, а для АБС-пластика и СВМПЭ использовался метод на основе измерения скорости свободной поверхности пластины-свидетеля. Было бы интересно сравнить оба подхода по определению адиабат Гюгонио на одном материале.
5. Давление  $P$ , внутренняя энергия  $E$  и единичный объем  $V$  не конкретизированы в списке обозначений.
6. Уравнения 1.1-1.3 содержат незначительные опечатки, а сами уравнения следовало бы записать в лагранжевой формулировке, например, как в работе [15].
7. В тексте автореферата на стр. 7 (рис. 1) и в тексте диссертации на стр. 48 (рис. 16) нумерация элементов сборки не полностью соответствует. Также в автореферате отсутствует описание разницы схем экспериментов с нагревом и охлаждением.
8. Оптическая схема на рис. 12а слишком упрощенная и искажает действительное распространение лучей.

9. На рис. 21 необходимо было привести вторую ось для значений первой производной теплового потока, также присутствует опечатка в размерности теплового потока.

10. К описанию рис. 27 диссертации (рис. 3 автореферата) необходимо было привести расшифровку для черных и цветных линий.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы в целом. Диссертационная работа Черепанова Ивана Александровича «Влияние температуры на откольную прочность и ударную сжимаемость полимеров в слабых ударных волнах» является законченным научно-квалификационным исследованием, содержащим решение актуальной задачи – экспериментального определения динамических характеристик полимерных материалов в широком температурном диапазоне. По содержанию, объему выполненных исследований, актуальности, новизне, научной и практической значимости, достоверности полученных результатов работа полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения научных степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. №842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Черепанов Иван Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Официальный оппонент

старший научный сотрудник лаборатории физических основ прочности,

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки

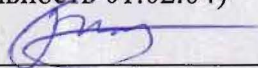
Пермского федерального исследовательского центра

Уральского отделения Российской академии наук

(адрес 614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королёва, 1

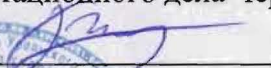
Телефон: +7(342)237-83-12 E-mail: [buv@icmm.ru](mailto:buv@icmm.ru), <https://www.icmm.ru/>),

кандидат физико-математических наук (специальность 01.02.04)

 /Баяндин Юрий Витальевич/

«25» мая 2026 г.

Я, Баяндин Ю.В., даю согласие на обработку моих персональных данных, связанную с защитой диссертационной работы и оформлением аттестационного дела Черепанова И.А.

 /Баяндин Юрий Витальевич/

Подпись кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника

Ю.В. Баяндина подтверждаю

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН  /Юрлова Наталия Алексеевна/

