

На правах рукописи



Черепанов Иван Александрович

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОТКОЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ
И УДАРНУЮ СЖИМАЕМОСТЬ ПОЛИМЕРОВ
В СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ**

1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Черноголовка-2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН)

**Научный
руководитель:**

Савиных Андрей Сергеевич
кандидат физико-математических наук

**Официальные
оппоненты:**

Атрошенко Светлана Алексеевна
доктор физико-математических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения Российской академии наук,
ведущий научный сотрудник

Баяндин Юрий Витальевич
кандидат физико-математических наук
Институт механики сплошных сред Уральского отделения
Российской академии наук - филиал Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Пермского
федерального исследовательского центра Уральского отделения
Российской академии наук, старший научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Защита состоится «30» июня 2026 г. в 10 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.108.02 по адресу: 142432, г. Черноголовка, проспект Академика Семенова, д. 7, зал заседаний корпуса 1/2, тел./факс: +7(496)5224476.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИЦ ПХФ и МХ РАН по адресу: 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Проспект академика Семёнова д.1, и на сайте ФИЦ ПХФ и МХ РАН

https://icp-ras.ru/wp-content/uploads/DISS/Cherepanov/Disser_Cherepanov.pdf

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.х.н.



Золотухина Екатерина Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Благодаря относительной простоте получения, а также присущим эксплуатационным характеристикам полимеры повсеместно заменяют многие привычные материалы. Сочетание различных свойств полимеров (в зависимости от их природы), в особенности: низкой плотности, высокой механической прочности и химической стойкости, в некоторых случаях – прозрачности, дают конкурентное преимущество перед металлами или керамиками. По этой причине различные полимерные материалы на сегодняшний день активно используются в авиационной технике, космических аппаратах, а также в качестве конструкционных материалов, в тех областях, где могут быть подвержены высокоскоростным ударам. Среди ряда ударопрочных полимерных материалов отдельно можно выделить поликарбонат и сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), которые часто применяются в качестве бронезащиты, а также АБС-пластик (сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола), адаптированный к 3D-печати многих конструкционных изделий.

Одной из ключевых особенностей полимерных материалов является их высокая чувствительность к температуре, что существенно влияет на прочностные характеристики и, как следствие, на эксплуатационные свойства изделий из полимеров. Поэтому важной фундаментальной проблемой является вопрос о влиянии температуры, в том числе в области перехода из стеклообразного в высокоэластичное состояние (температуры стеклования) или плавления на прочностные характеристики полимерных материалов при высокоскоростном нагружении¹. В связи с этим задачи изучения свойств полимеров при интенсивных динамических нагрузках, необходимых для построения адекватных моделей их поведения при высоких скоростях деформирования в широком диапазоне температур, являются на сегодняшний день важными и актуальными.

Еще одна причина исследования температурных зависимостей для полимеров заключается в схожести их поведения выше температуры стеклования с теоретическими моделями при высоких скоростях деформации неньютоновских жидкостей. Использование при высокоскоростном ударе таких материалов в качестве жидких бронежилетов повышают актуальность работы².

Степень разработанности темы исследования. Влияние температуры на характеристики материалов при динамическом нагружении в основном изучено для металлов и сплавов. Известно³, что для некоторых металлов рост температуры приводит к т.н. атермическому упрочнению, связанному с увеличением тепловых колебаний атомов, приводящих к торможению распространения дислокаций и, как следствие, к аномальному росту предела упругости. С другой стороны, температура влияет на величину откольной прочности, снижая сопротивляемость растягивающим напряжениям при откольном разрушении².

Влиянию температуры на прочностные характеристики полимерных материалов при высокоскоростном деформировании посвящено относительно небольшое количество работ. Отмечается, что рост температуры, как правило, приводит к снижению значений величин различных механических характеристик полимеров, таких как, например, предел прочности⁴,

¹ Канель Г. И. и др. Ударно-волновые явления в конденсированных средах / М.: Янус-К., 1996. 408 с.

² Канель Г. И. // Теплофизика высоких температур. 2020. Т 58. № 4. с. 596.

³ Канель Г. И. и др. // Успехи физических наук. 2017. Т. 187. №. 5. с. 525.

⁴ Fuina S, et al. // Polymer Testing. 2019. Vol. 76. p. 344.

предел текучести^{5,6,7} и модуль Юнга^{6,7}. Рост температуры влияет также на уменьшение скорости деформирования⁸ и на коэффициенты ударной адиабаты⁹. При этом большинство из существующих работ относятся к статическим или квазистатическим условиям нагружения, при скоростях деформирования меньше 10^2 с^{-1} .

Особое внимание из-за недостаточности экспериментальных данных стоит уделить оценке сопротивляемости полимерных материалов высокоскоростному удару при температуре, близкой к температуре стеклования полимера и выше после его перехода из стеклообразного состояния в высокоэластичное. Такое исследование было проведено для полиметилметакрилата¹⁰, где были построены ударные адиабаты, а также исследована сопротивляемость сжимающим и растягивающим напряжениям при различных начальных температурах.

Цель работы: определить влияние температуры, процессов стеклования и плавления на прочностные свойства ударопрочных полимерных материалов: поликарбоната, АБС-пластика и сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

Задачи работы:

1. Отработать методику ударно-волнового нагружения полимерных материалов для определения ударной сжимаемости при различных начальных температурах.
2. Отработать методику ударно-волнового нагружения полимерных материалов для измерения критических растягивающих напряжений в условиях откольного разрушения при различных начальных температурах.
3. Провести измерения ударных адиабат в виде U_S-u_p в широком начальном температурном диапазоне образцов поликарбоната, АБС-пластика и СВМПЭ.
4. Провести эксперименты по динамическому нагружению образцов поликарбоната, АБС-пластика и СВМПЭ с целью измерения величины откольной прочности при различных начальных температурах.
5. Провести анализ полученных экспериментальных данных и оценить влияние температуры на динамические характеристики изученных полимерных материалов.

Научная новизна основных результатов:

Предложены и отработаны экспериментальные схемы нагрева и охлаждения при высокоскоростном деформировании полимеров с одновременной регистрацией профилей скорости свободной поверхности полимерных материалов в широком температурном диапазоне.

Впервые получены данные об ударной сжимаемости и откольной прочности поликарбоната, АБС-пластика и СВМПЭ при напряжениях сжатия до 1.3 ГПа в области повышенных и отрицательных температур, в которых реализуются различные состояния полимеров.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы. Полученные в работе экспериментальные данные по ударной сжимаемости и откольной прочности исследованных полимеров в широком диапазоне давлений и температур могут быть

⁵ Bauwens-Crowet C. // Journal of Materials Science. 1973. Vol. 8. p. 968.

⁶ Richeton J. et al // International journal of solids and structures. 2006. Vol. 43. №. 7-8. p. 2318.

⁷ Majzoobi G. H. et al. // Journal of Composite Materials. 2019. Vol. 53. №. 25. p. 3567.

⁸ Sharma S. et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1248. №. 1. p. 012009

⁹ Urtiew P. A. et al. // AIP Conference Proceedings., 2007. Vol. 955. №. 1. p. 109.

¹⁰ Zaretsky E. B. et al. // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 126. №. 8. p. 085902.

использованы для построения моделей деформирования и разрушения полимерных материалов, а также для расчетов сопротивления растягивающим напряжениям в конструкционных изделиях.

Методология и методы, использованные в диссертационной работе.

Метод исследований основан на регистрации и последующем анализе полных волновых профилей скорости свободной поверхности исследуемых образцов при различных начальных температурах и максимальных напряжениях сжатия в процессе высокоскоростного удара. Физико-химические свойства исследуемых образцов определяли с использованием ДСК, рентгеноструктурного анализа, оптической микроскопии, гидростатического взвешивания и акустического анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика измерения растягивающих напряжений для полимерных материалов при ударно-волновом нагружении в широком температурном диапазоне, включая отрицательные температуры.
2. Снижение откольной прочности полимеров с ростом температуры с ключевым влиянием переходов через области стеклования и плавления.
3. Отсутствие однозначной корреляции наклона ударных адиабат (в виде зависимости скорости ударной волны от массовой скорости) с ростом температуры при снижении свободного члена адиабаты, определяемого скоростью звука при нулевом давлении.
4. Неоднородность откольного разрушения термопластов: характер разрушения и крутизна откольного импульса зависят от внутренней структуры и физического состояния, в котором находится полимер.

Личный вклад автора. Экспериментальные исследования, в том числе, постановка задач, проведение измерений, регистрация и анализ волновых профилей, создание и модернизация экспериментальных «сборок» проведены автором лично или при его непосредственном участии. Записи кривых дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) выполнены в лаборатории инженерного материаловедения ФФФХИ МГУ имени Ломоносова Комовым Е.В. и Маряевской А.В., а также в лаборатории полимерных резистов ФИЦ ПХФ и МХ РАН Черняевым Д.А. Рентгеновская дифрактометрия выполнена руководителем группы химии импульсных воздействий ФИЦ ПХФ и МХ РАН Жуковым А.Н. Образцы АБС-пластика были подготовлены в научно-исследовательском центре СИБУР ПолиЛаб, образцы СВМПЭ подготовлены в лаборатории механики полимерных композиционных материалов ИФПМ СО РАН Алексеенко В.О.

Степень достоверности и апробация результатов. По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ, из них 3 статьи в рецензируемом научном издании, рекомендованном ВАК, 3 тезисов докладов.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (г. Москва, 2025), Школе молодых ученых «Закономерности критичности при многомасштабной фрагментации керамик в широком диапазоне интенсивностей нагружения» (г. Пермь, 2024, online), I Всероссийской школе по газодинамике и физике взрыва Национального центра физики и математики (г. Саров, 2023); LXIV Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (г. Екатеринбург, 4 – 8 апреля 2022).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 121 странице. Содержит 53 рисунка и 3 таблицы. Список литературы включает 109 библиографических наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** рассмотрены основные принципы физики ударных волн, описаны особенности откольного разрушения, а также проанализировано влияние температуры на свойства материалов при ударно-волновом нагружении. Изложены основные физико-химические свойства, поведение при ударном воздействии, а также область практического применения поликарбоната, АБС-пластика и СВМПЭ.

Во **второй главе** приведено описание основных экспериментальных методик, используемых для определения прочностных характеристик при динамическом нагружении. Представлены методы генерации ударных волн и метод регистрации профилей скорости свободной поверхности при различных температурах, а также описание основных характеристик, определяемых в данных экспериментах.

Основной метод возбуждения ударной волны в исследуемом образце в данной работе основывался на использовании пневматической ствольной установки диаметром 50 мм. В качестве дополнительного метода использовался генератор ударных волн на основе взрывчатых веществ¹.

Основой измерений является тот факт, что при прохождении ударной волны по материалу в зависимости от его состояния, она изменяет свою форму. Регистрируя эволюцию ударной волны по мере ее распространения, можно получить информацию о свойствах материала образца. Лучшими в отношении пространственно-временного разрешения и точности измерений считаются лазерные интерферометрические методы регистрации свободных поверхностей, поэтому в данной работе профили скорости свободной поверхности измерялись с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR¹¹.

В ходе работы из анализа профилей скорости свободной поверхности строились адиабаты Гюгонио ударного-сжатого материала в виде $U_S = c_0 + b u_p$, где скорость звука при нулевом давлении, b – коэффициент, определяющий наклон адиабаты и степень сжатия материала с изменением давления. Для этого определялись параметры U_S – скорости ударной волны и u_p – массовой скорости¹² как с использованием метода на основе электроконтактных датчиков, так и в экспериментах с пластиной-свидетелем.

В ходе работы рассчитывалась величина откольной прочности с использованием соотношения¹ $\sigma_{sp} = \frac{\rho_0 c_b \Delta u_{fs}}{2}$, где ρ_0 – начальная плотность материала, c_b – объемная скорость звука, определяемая с использованием ударных адиабат и Δu_{fs} – декремент скорости, определяемый непосредственно из волнового профиля. При этом точность измерений не зависит от абсолютных значений измеряемых скоростей и составляет 3–5 м/с.

Эксперименты по ударно-волновому нагружению полимерных материалов при различных начальных температурах требовали учета дополнительных особенностей, связанных с низкой теплопроводностью, зависимостью процесса стеклования от скорости нагрева, а также отсутствием отражающих свойств.

¹¹ Barker L. M. et al. // Journal of Applied Physics. 1972. Vol. 43. №. 11. p. 4669.

¹² Жерноклетов М. В. и др. Экспериментальные методы и средства в физике экстремальных состояний вещества / М.: РАН. 2021. 484 с

Нагрев образцов осуществлялся с помощью керамического нагревателя с нихромовой спиралью. Охлаждение осуществлялось с использованием камеры из низкопористого пенопласта, полость которой заполнялась жидким азотом (рис. 1).

Контроль температуры осуществлялся двумя хромель-алюмелевыми термопарами. Использование двух термопар позволяло однозначно контролировать начало процесса стеклования, а также равномерность прогрева образца. Значение температуры, при которой проводился эксперимент, фиксировалось непосредственно перед ударом.



Рис. 1 – Фотография экспериментальной сборки для проведения ударного нагружения и регистрации профилей скорости свободной поверхности при отрицательных температурах.

Из-за отсутствия возможности отражения лазерного луча напрямую от поверхности образца во всех экспериментах в качестве отражателя зондирующего лазерного излучения использовалась алюминиевая фольга толщиной 7 мкм, которая приклеивалась к образцу при помощи эпоксидного клея, рабочий диапазон которого был достаточным для проведения экспериментов с повышенной температурой.

Третья, четвертая и пятая главы содержат основные экспериментальные результаты работы. Третья глава посвящена исследованию сопротивления высокоскоростному разрушению поликарбоната в широком температурном диапазоне. Эксперименты проведены с образцами поликарбоната марки BORREX толщиной 1.8 ± 0.1 мм и 3.4 ± 0.1 мм, диаметром 50 мм, вырезанными из одного листа соответствующей толщины. Температура стеклования поликарбоната, определенная методом ДСК¹³, находится в диапазоне $142^\circ\text{C} - 152^\circ\text{C}$. Измеренная плотность поликарбоната составила $\rho_0 = 1.194$ г/см³, измеренная продольная скорость звука равна $c_l = 2.242$ км/с.

В первой серии экспериментов определялась зависимость величины откольной прочности от температуры. Измерение откольной прочности проводилось при нагружении образцов толщиной 1.8 мм алюминиевым ударником толщиной 0.7 мм, разогнанного до скорости 360 ± 10 м/с в диапазоне начальных температур от 20°C до 185°C . Для предотвращения формирования ступенчатой разгрузки в поликарбонате, возникающей из-за разницы динамических импедансов образца и ударника, образец располагался на медном экране толщиной 3.6 мм. Максимальное напряжение сжатия в поликарбонате при такой постановке экспериментов составляло 0.56 ГПа.

На волновых профилях на рисунке 2 регистрируется выход на поверхность пластической волны сжатия. Каких-либо признаков упругопластического перехода на фронте

¹³ Brown M. E. et al. Handbook of thermal analysis and calorimetry: recent advances, techniques and applications / Elsevier. 2011. 756 p.

волны сжатия зарегистрировано не было. После отражения ударной волны от свободной поверхности в виде волны разрежения и взаимодействия последней с падающей волной разрежения, приходящей от тыльной стороны ударника, внутри образца создаются растягивающие напряжения, приводящие к его откольному разрушению. До достижения образцами температуры стеклования декремент скорости практически не изменяется, а с началом процесса стеклования резко падает. При температурах выше температуры окончания стеклования наблюдается незначительное увеличение Δu_{fs} , а также отсутствие откольного импульса. Можно отметить, что при комнатной температуре интенсивность ударного сжатия (0.42 ГПа и 0.56 ГПа) не влияет на величину декремента скорости в волне разгрузки.

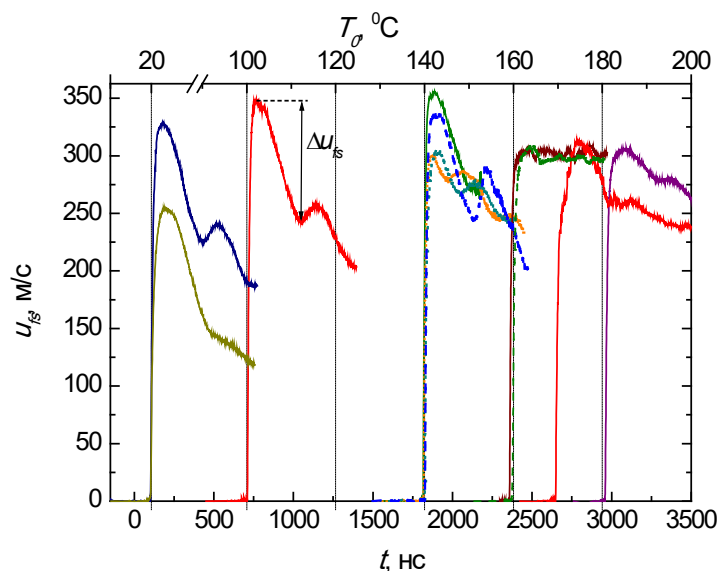


Рис. 2 – Профили скорости свободной поверхности образцов поликарбоната толщиной 1.8 мм при ударе алюминиевой пластиной толщиной 0.7 мм со скоростью 360 ± 10 м/с в диапазоне температур от 20°C до 185°C . Заштрихованная область температур соответствует диапазону стеклования поликарбоната.

Для построения зависимости скорости ударной волны U_S от массовой скорости u_p была выполнена вторая серия экспериментов по нагружению образцов толщиной 3.4 мм алюминиевым ударником толщиной 4 мм. Скорости ударников составляли 130 ± 10 м/с, 280 ± 10 м/с и 316 ± 10 м/с, что соответствует максимальным напряжениям сжатия 0.23, 0.59 и 0.74 ГПа при комнатной температуре. С целью уточнения измеренных зависимостей U_S-u_p в особенности при высоких температурах в работе была проведена третья серия экспериментов по ступенчатому ударному сжатию образцов с помощью ударника, составленного из алюминиевой пластины толщиной 7 мм и со стороны образца – пластины ПММА толщиной 1.2 ± 0.1 мм. В результате его соударения с образцом в плексигласовой пластине между образцом и алюминием происходили многократные переотражения ударной волны. Скорость составного ударника в этих экспериментах составляла 338 ± 10 м/с.

На рисунке 3 суммированы полученные зависимости U_S-u_p для поликарбоната при начальных температурах 20, 100, 138 и 170°C . Видно, что при комнатной температуре полученная ударная адиабата хорошо согласуется с данными, приведенными в работах^{14,15}. С ростом температуры полученные зависимости U_S-u_p лежат ниже, чем адиабаты при более низкой температуре. Существенного влияния начальной температуры образцов на коэффициент b выявлено не было.

¹⁴ Trunin R. F. et al. Experimental data on shock compressibility and adiabatic expansion of condensed substances. / RFNC. Sarov. 2001. 446 p.

¹⁵ Marsh S. P. LASL shock Hugoniot data. / University of California Press. 1980. Vol. 5.

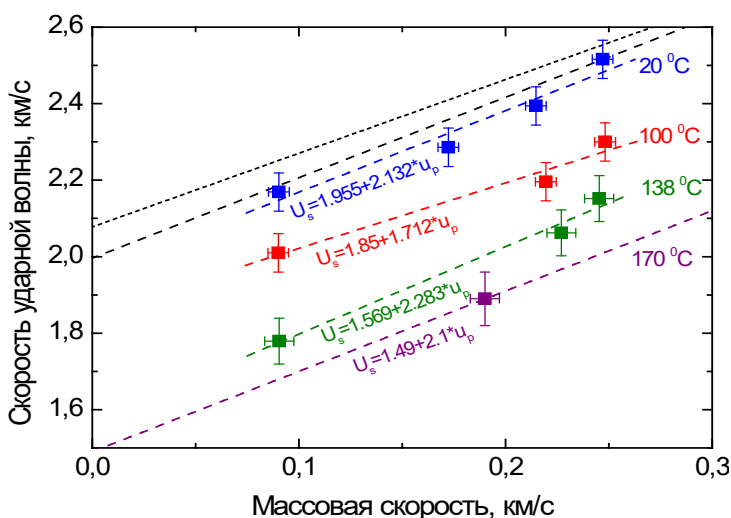


Рис. 3 – Результаты измерений ударной адиабаты поликарбоната в диапазоне температур 20°C–170°C. Пунктирная линия¹⁴, точки¹⁵.

На рисунке 4 представлены полученные значения откольной прочности поликарбоната в диапазоне температур 20°C – 185°C. Для расчета откольной прочности при 160°C и 185°C использовалось значение объемной скорости звука, полученное из эксперимента по ступенчатому нагружению при 170°C. Для расчета изменения плотности с ростом температуры использовались данные¹⁶.

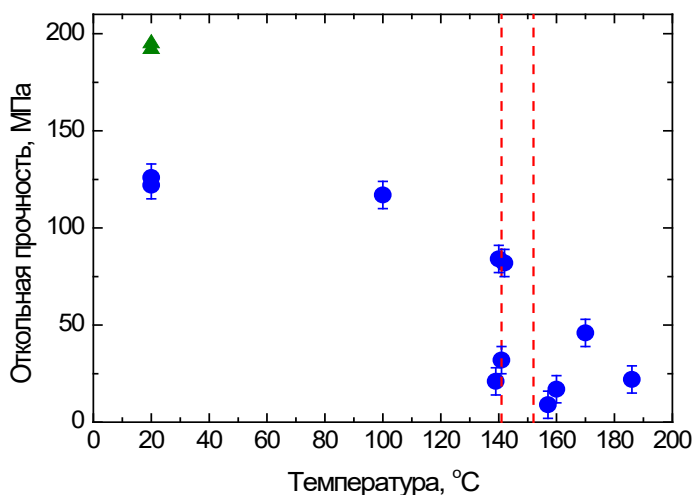


Рис. 4 – Зависимость откольной прочности поликарбоната от начальной температуры. Треугольники¹⁷

Увеличение температуры образцов до температуры стеклования приводит к плавному снижению величины откольной прочности. Начало стеклования и дальнейший нагрев приводит к относительно резкому падению всех параметров (плотности, декремента скорости Δu_{fs} , объемной скорости звука), и, как следствие, снижению величины откольной прочности поликарбоната.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния температуры на прочностные характеристики АБС-пластика при высокоскоростном деформировании. Эксперименты проведены с образцами АБС-пластика марки 2332 компании СИБУР толщиной 2 ± 0.1 мм и 4 ± 0.1 мм, диаметром 30 мм, вырезанными из одного листа соответствующей толщины. Начальная температура образцов варьировалась в диапазоне от 20°C до 115°C. Температура стеклования T_g АБС-пластика была определена с использованием ДСК и

¹⁶ Wang X. et al. // Polymers. 2017. Vol. 9. №. 3. p. 85.

¹⁷ Ye S. J. et al. // Journal of Applied Physics. 2019. Vol. 126. №. 8. p. 085105.

составила $T_g = 105^\circ\text{C}$. Плотность АБС-пластика составила $\rho_0 = 1.040 \text{ г/см}^3$, продольная скорость звука - $c_1 = 2.199 \text{ км/с}$.

Откольная прочность измерялась при нагружении образцов толщиной 2 мм алюминиевыми ударниками толщиной 1 мм, которые разгонялись до скорости 250 м/с. Максимальное напряжение сжатия в АБС-пластике при такой постановке составляло 0.58 ГПа. Кроме того, при комнатной температуре были проведены эксперименты по измерению откольной прочности АБС-пластика при нагружении алюминиевыми ударниками толщиной 2 и 0.9 мм, разогнанных до скорости 360 м/с и 190 м/с, что соответствует максимальным напряжениям сжатия 0.86 ГПа и 0.43 ГПа.

На рисунке 5а представлены соответствующие профили скорости свободной поверхности образцов АБС-пластика при комнатной температуре. На волновых профилях отсутствуют признаки упругого деформирования в виде выхода на свободную поверхность упругого предвестника, регистрируется выход на свободную поверхность только пластической волны сжатия. После достижения максимальной скорости поверхности регистрируется выход части волны разрежения, предшествующей откольному разрушению. На профилях поверхности не регистрируется откольный импульс в виде слабой волны сжатия. Вместо него наблюдается уменьшение градиента скорости поверхности в волне разгрузки. Увеличение максимального напряжения сжатия приводит к росту скорости ударной волны и соответственно волны разрежения, что приводит к уменьшению времени выхода на свободную поверхность момента откольного разрушения (пунктирная линия).

На рисунке 5б представлены профили скорости свободной поверхности образцов АБС-пластика толщиной 2 мм, полученные в диапазоне начальных температур от 20°C до 115°C при нагружении алюминиевым ударником толщиной 1 мм, разогнанного до скорости 250 м/с. С ростом температуры скорость свободной поверхности меняется незначительно, немного снижаясь при превышении температуры стеклования. Время выхода на поверхность откольного импульса, отмеченное стрелками, для всех экспериментов совпадает.

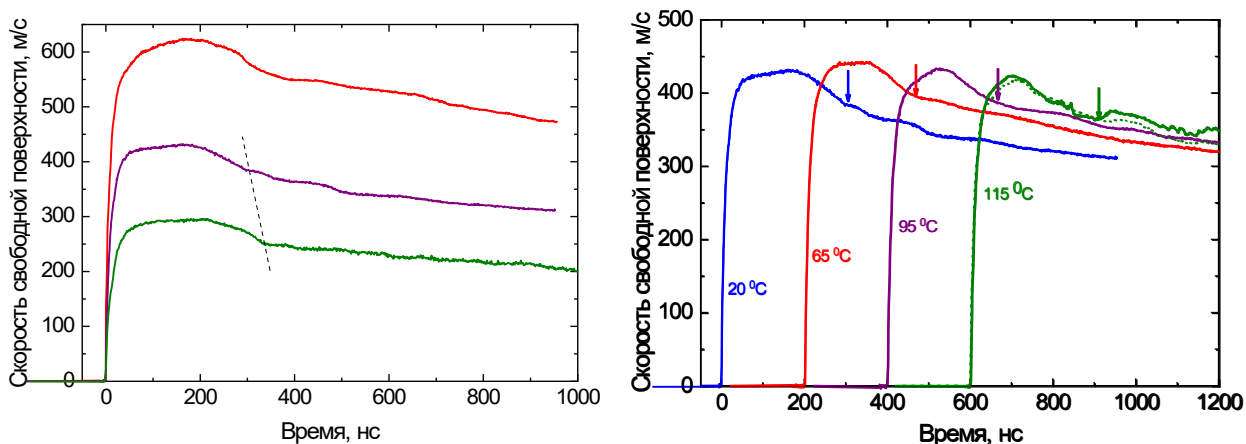


Рис. 5 – Профили скорости свободной поверхности образцов АБС-пластика толщиной 2 мм а) при 20°C с реализуемыми максимальными напряжениями сжатия 0.43 ГПа, 0.58 ГПа и 0.86 ГПа б) при различных начальных температурах

Из волновых профилей видно, что характер откольного разрушения АБС-пластика при температурах ниже температуры стеклования больше напоминает процесс динамического

разрушения в эластомерах¹⁸, чем в термопластах, таких как полиметилметакрилат¹⁰ и поликарбонат. После выхода на поверхность части волны разрежения при растяжении откольный импульс не регистрируется: в течение длительного времени происходит торможение отрывающегося поверхностного слоя, который сохраняет связь с основной частью образца. Таким образом, как и в резине¹⁸, измеренное значение откольной прочности может характеризовать условия зарождения микронесплошностей, но не условия ее полного разрыва. Затянутое уменьшение скорости свободной поверхности после начала откольного разрушения определяется сопротивлением растяжению АБС-пластика.

При температуре 115°C откольный импульс становится более выраженным. Основываясь на данных работы¹⁹, можно предположить, что объяснение данного явления может лежать в механизмах разрушения материала. Авторы отмечают, что в отличие от низкотемпературных экспериментов, где четко выражена слоистость, при достижении температуры в 100°C материал начинает гомогенизироваться.

Для построения ударной адиабаты в виде зависимости скорости ударной волны U_S от массовой скорости u_p была выполнена вторая серия экспериментов. Ударно-волновое нагружение осуществлялось алюминиевым ударником толщиной 7 мм, разогнанным до скоростей 210 ± 10 м/с или 260 ± 10 м/с. Нагружение образца осуществлялось через алюминиевый экран толщиной 5 мм, на котором размещались исследуемый образец толщиной 4 мм с неизвестной ударной адиабатой и натриево-известковое стекло толщиной 1.2 мм.

На рисунке 6 представлены полученные с помощью метода пластины-свидетеля зависимости U_S-u_p для АБС-пластика в исследуемом температурном диапазоне. С ростом температуры полученные зависимости U_S-u_p лежат ниже, чем адиабаты при более низкой температуре, как следствие с ростом температуры снижается объемная скорость звука. Наклон ударных адиабат, характеризуемых коэффициентом b , остается приблизительно одинаков до температуры стеклования, при ее превышении наблюдается значительное снижение этой величины. Следует отметить, что измеренное значение продольной скорости звука в АБС-пластике при комнатной температуре равно 2.199 км/с значительно ниже $c_0=2.371$ км/с, поэтому выход упругого предвестника на свободную поверхность невозможен.

На рисунке 7 представлены полученные значения откольной прочности АБС-пластика в диапазоне температур 20°C – 115°C. Можно отметить, что увеличение температуры образцов до температуры стеклования приводит к плавному снижению величины откольной прочности. Начало стеклования и дальнейший нагрев приводит к резкому падению таких параметров материала, как плотность и объемная скорость звука, но при этом происходит рост декремента скорости Δu_{fb} . Видно, что величина откольной прочности при превышении температуры стеклования не падает резко, как это происходит для поликарбоната или ПММА¹⁰, а лишь незначительно снижается. Причем, по сравнению с откольной прочностью АБС-пластика при температуре 95°C – температуре чуть ниже температуры стеклования, она даже несколько возрастает.

¹⁸ Калмыков Ю. Б. и др // Прикладная механика и техническая физика. 1990. Т. 31. №. 1. с. 126-130.

¹⁹ Атрошенко С. А. и др. // Физика твердого тела. 2019. Т. 61. №. 11. С. 2103.

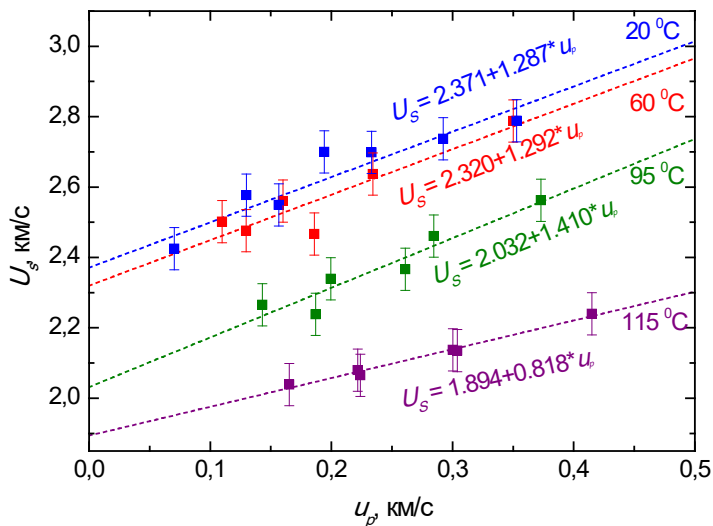


Рис. 6 – Результаты измерений ударной адиабаты АБС-пластика в диапазоне температур 20°C–115°C.

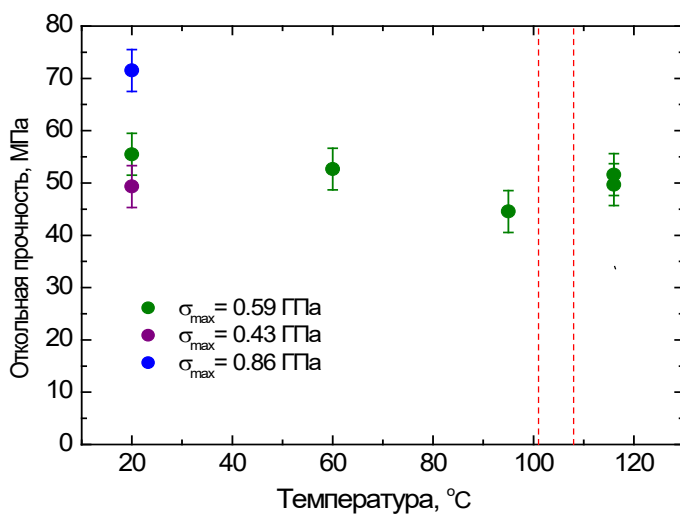


Рис.7 – Зависимость откольной прочности АБС-пластика от начальной температуры, пунктирами показаны температуры начала и окончания стеклования.

Причину этого явления можно объяснить влиянием конкурирующих факторов. С одной стороны, при стекловании должна повышаться подвижность цепочек полимера, увеличиваться его пористость и, как следствие, должна снижаться его сопротивляемость растягивающим напряжениям. С другой стороны, увеличение температуры образцов, как показано в работе¹⁹, приводит к увеличению гомогенности материала. Вероятно, что именно этот факт является причиной невысокой откольной прочности при низких температурах.

В пятой главе описаны результаты по исследованию ударной сжимаемости и откольной прочности СВМПЭ при температуре от -120°C до 145°C. Эксперименты проведены с образцами, спеченными из порошка марки GUR-2122 (Ticona, Германия) молекулярной массой 4.5 млн и размером частиц 5–15 мкм с использованием гидравлического пресса. Плотность составила $\rho_0=0.938$ г/см³, продольная скорость звука равна $c_l=2.268\pm 0.010$ км/с. Исходя из кривой ДСК, был зафиксирован тепловой эффект, отвечающий процессу плавления: $T_1=122^\circ\text{C}$ – температура начала плавления, $T_2=150^\circ\text{C}$ – температура окончания процесса плавления, а также определена энтальпия плавления образца $H_m=171$ Дж/г, при этом температуру стеклования T_g установить не удалось. Согласно работе²⁰ ее значение составляет

²⁰ Kurtz S. M. (ed.). UHMWPE biomaterials handbook: ultra high molecular weight polyethylene in total joint replacement and medical devices / Academic press, 2009. 840 p.

-160°C. Степень кристалличности, определенная методом ДСК составила $\chi=59.1\%$, с помощью рентгеновской дифрактометрии: $\chi=64\%$.

В первой серии экспериментов определялась зависимость скорости ударной волны U_S от массовой скорости u_p СВМПЭ в диапазоне начальных температур -95°C – 95°C и максимальных напряжений сжатия σ_{max} до 1.3 ГПа. Ударно-волновое нагружение осуществлялось алюминиевым ударником толщиной 7 мм, разогнанного до скоростей 210 ± 10 м/с, 260 ± 10 м/с и 315 м/с. Нагружение образца осуществлялось через алюминиевый экран толщиной 4 мм, на котором размещался составной образец, состоящий из СВМПЭ толщиной 6 мм и натриево-известкового стекла толщиной 1.2 мм.

На рисунке 8 представлены полученные зависимости скорости в исследуемом температурном диапазоне. С ростом температуры полученные зависимости U_S-u_p лежат ниже, чем адиабаты при более низкой температуре, как следствие с ростом температуры снижается объемная скорость звука.

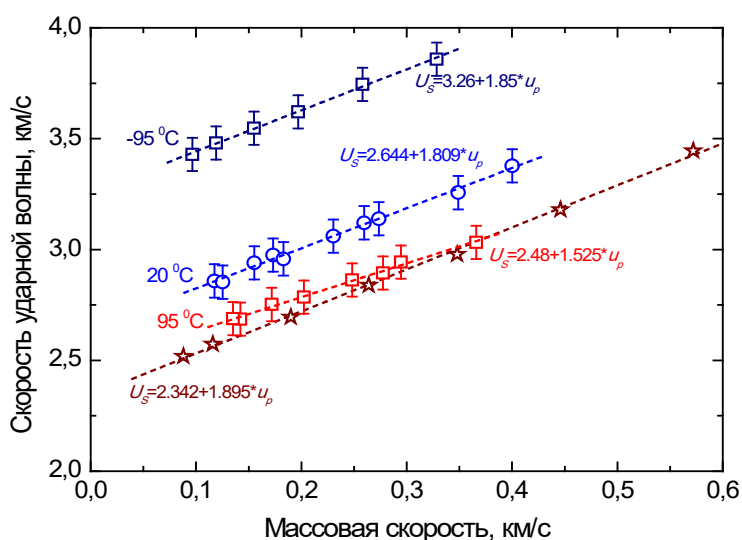


Рис. 8 – Результаты измерений ударной адиабаты СВМПЭ в диапазоне температур -95°C – 95°C . Звезды²¹.

Наклон ударных адиабат, характеризуемых коэффициентом b , при комнатной температуре и при температуре -95°C остается практически одинаковым, при температуре 95°C , приближающейся к температуре плавления, снижается значительно. Разницу величины c_b при комнатной температуре от этой величины, полученной в работе²¹, можно объяснить различием в образцах СВМПЭ, отличающихся как степенью кристалличности, так и молекулярной массой. При этом наклон ударных адиабат с хорошей точностью можно считать одинаковым. Следует отметить, что измеренное значение $c_1=2.268$ км/с в СВМПЭ при комнатной температуре значительно ниже $c_0=2.644$ км/с, поэтому выхода упругого предвестника на свободную поверхность не регистрируется.

Во второй серии определялась зависимость величины откольной прочности от максимального напряжения сжатия при начальных температурах 20°C и -54°C . Образцы СВМПЭ толщиной 2 мм нагружались алюминиевыми ударниками толщиной 0.4, 0.7 и 0.9 мм и скоростями 360 и 660 м/с. В качестве экрана использовались алюминиевые пластины толщиной 2 или 3 мм. Нагружение образцов ударниками разогнанных со скоростью 360 ± 10 м/с осуществлялось с помощью пневматической пушки, со скоростью 660 ± 20 м/с – с использованием взрывных устройств. На рисунке 9 представлены соответствующие профили

²¹ Han P. F. et al. // International Journal of Mechanical Sciences. 2024. Vol. 267. p. 108984.

скорости свободной поверхности образцов СВМПЭ. Максимальные напряжения сжатия на свободной поверхности, реализуемые в этих экспериментах, не превышали 1.6 ГПа. На профилях регистрируется выход на свободную поверхность только пластической волны сжатия, признаки упругого деформирования отсутствуют. Скорость свободной поверхности оказалась ниже расчетной, что связано со значительным затуханием ударной волны при ее распространении по образцу вследствие того, что скорость волны разгрузки со стороны ударника значительно превышает скорость ударной волны.

В связи с тем, что на профилях поверхности, показанных на рисунке 9, откольные импульсы не регистрируются, то декремент скорости в волне разгрузки определялся по изменению крутизны наклона скорости в волне разгрузки¹⁸. Появление излома можно было бы объяснить частичным разрывом материала под действием растягивающих напряжений – медленный спад скорости является результатом переотражения волны разрежения от поверхности разрушения.

После ударно-волнового нагружения проводился осмотр с помощью оптического микроскопа среза центральной части сохраненных образцов. Признаков откольного разрушения в виде полости или группы малых полостей, сосредоточенных в одной плоскости, не обнаружено. Поэтому наблюдаемый излом в волне разгрузки можно объяснить уменьшением скорости звука в растянутом материале.

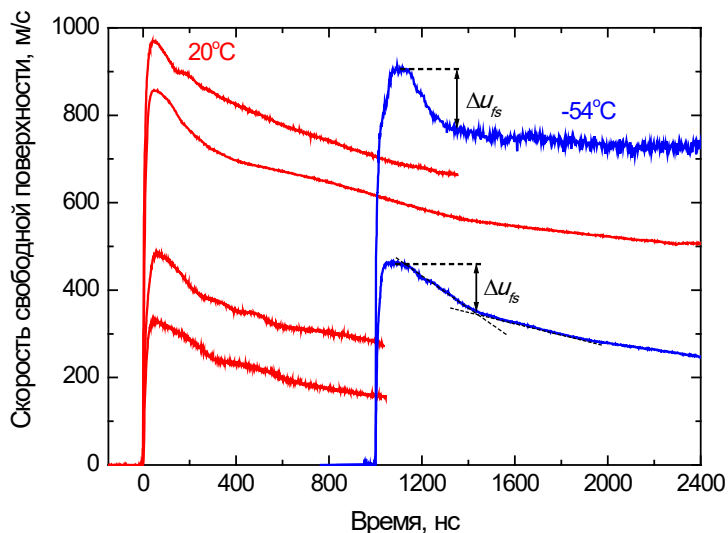


Рис. 9– Профили скорости свободной поверхности образцов СВМПЭ толщиной 2 мм при 20°C и -54°C при различных σ_{max} .

Зависимость откольной прочности от начальной температуры образцов СВМПЭ исследовалась в третьей серии экспериментов, в которой нагружение образцов толщиной 2 мм осуществлялось алюминиевыми ударниками толщиной 0.7 мм разогнанными до скорости 360 м/с в диапазоне начальных температур от -120°C до 145°C. На рисунке 10 представлены соответствующие профили скорости свободной поверхности. С увеличением начальной температуры образцов максимальные значения скорости свободной поверхности растут, значительно снижаясь лишь на волновых профилях, полученных при температурах 134°C и 145°C. Это изменение обусловлено началом процесса плавления при ~122°C, приводящим к изменениям внутренней структуры материала, и появлению значительных осцилляций на волновых профилях.

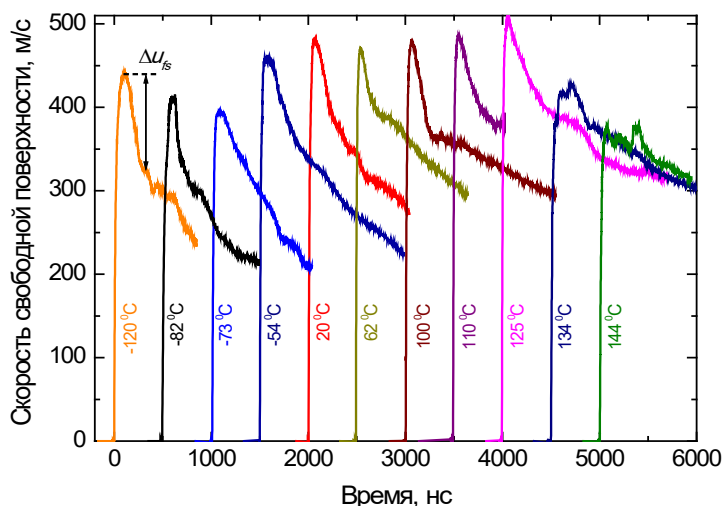


Рис. 10 – Профили скорости свободной поверхности образцов СВМПЭ в диапазоне температур от -120 до 145°C.

Во всем исследованном температурном диапазоне откольный импульс на профилях $u_{fs}(t)$ зарегистрирован не был. Влияние начальной температуры образцов СВМПЭ на откольное разрушения согласуется с разрушением в других термопластах, таких как полиметилметакрилат¹⁰ и поликарбонат в диапазоне температур выше температуры стеклования. Зависимость декремента скорости свободной поверхности от температуры остается почти неизменной при температурах ниже температуры плавления, сильно снижаясь при ее достижении.

При расчете откольной прочности из измеренных профилей скорости свободной поверхности в виду отсутствия литературных данных по зависимости $\rho(T)$ для СВМПЭ, а также из-за схожести структуры и состава ПЭВП и СВМПЭ плотность для каждой температуры рассчитывалась на основании работы²². В связи с соответствующим характером разрушения, как и в случае с АБС-пластиком откольная прочность в СВМПЭ – это величина, характеризующая зарождение несплошностей в материале, а не его разрыв.

На рисунке 11 представлены рассчитанные значения откольной прочности СВМПЭ из измеренных профилей скорости свободной поверхности, показанных на рисунке 50 в диапазоне температур -120°C–145°C. Видно, что рост температуры образцов до температуры плавления приводит к плавному снижению величины откольной прочности, что связано с увеличением межмолекулярного расстояния, а также возросшей подвижности макромолекул аморфной фазы. Начало процесса плавления приводит к значительному падению всех параметров, определяющих откольную прочность, что определяет характер резкого снижения величины в целом.

При комнатной температуре предел прочности на растяжение СВМПЭ при статических условиях деформирования составляет 43 МПа²³, что в 2–3 раза ниже откольной прочности реализуемой при $\sigma_{max} \sim 0.4\text{--}1.6$ ГПа и соответствующих скоростях деформирования, полученных в данной работе. Можно отметить, что СВМПЭ демонстрирует наибольшую величину откольной прочности среди исследованных полимерных материалов при превышении температуры стеклования, при этом как и в случае с другими полимерными материалами сохраняется общий тренд на падение откольной прочности от температуры.

²² Allahverdiyeva K. V. et al. // Heliyon. 2023. Vol. 9. №. 4. p. 14829

²³ Panin S. V. et al. // Materials. 2020. Vol. 13. №. 7. p. 1602.

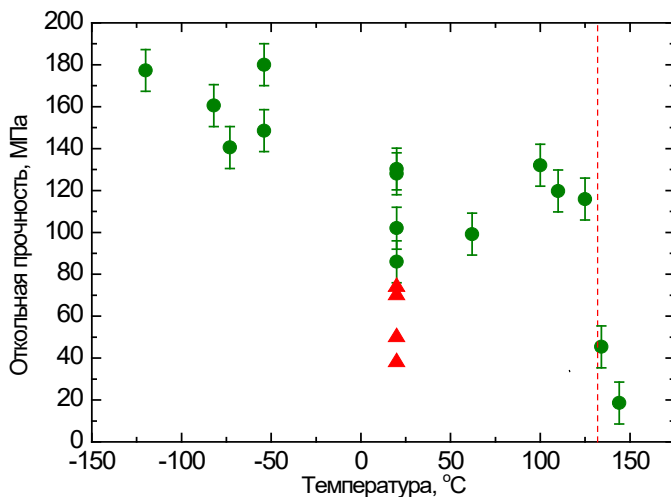


Рис.11 – Зависимость откольной прочности СВМПЭ, рассчитанная из профилей поверхности показанных на рисунке 50, от начальной температуры. Пунктиром показана температура начала процесса плавления. Красными треугольниками обозначены результаты измерений откольной прочности СВМПЭ в работе²¹.

При комнатной температуре увеличение максимального напряжения сжатия приводит к снижению величины откольной прочности, что согласуется с результатами работы²¹. Однако при температуре -54°C величина откольной прочности растет. Это можно объяснить тем, что при уменьшении температуры одновременно снижается подвижность макромолекул, и возрастает роль межмолекулярных сил. Поэтому, несмотря на увеличение максимального напряжения сжатия, сопротивляемость растягивающим напряжениям остается на прежнем уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа посвящена анализу поведения полимерных материалов при высокоскоростном деформировании на примере поликарбоната, АБС-пластика и сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Было определено влияние температуры на прочностные свойства полимеров, а также внутренней структуры полимеров на характер откольного разрушения. В ходе работы были определены ударные адиабаты и величина откольной прочности исследуемых материалов в широком температурном диапазоне. Полученные экспериментальные результаты могут быть использованы для построения теоретических моделей поведения полимерных материалов при высоких скоростях деформации в широком температурном диапазоне.

По результатам работы можно сделать следующие основные выводы:

1) На основании предложенной и отработанной в работе методики ударно-волнового нагружения образцов полимерных материалов в диапазоне температур от -120°C до 185°C , впервые включающем отрицательные значения, определены ударная сжимаемость и величины откольной прочности ряда ударопрочных термопластов, отличающихся внутренней структурой и физическим состоянием.

2) Показано, что в диапазоне давлений до 1.3 ГПа с ростом начальной температуры значение скорости звука при нулевом давлении, первого члена линейной зависимости скорости ударной волны от массовой скорости, падает, а коэффициент, определяющий наклон ударных адиабат меняется незначительно. Установленные экспериментальные зависимости могут использоваться для калибровки теоретических моделей, описывающих высокоскоростное соударение, включающих переходы между физическими состояниями.

3) Установлено, что зависимость откольной прочности от температуры схожа для всех исследованных полимеров. Показано, что рост температуры приводит к снижению

величины откольной прочности, однако в представленном в работе температурном диапазоне каждый из материалов продемонстрировал ряд особенностей:

- переход через температуру стеклования в поликарбонате и плавления в СВМПЭ влияет на снижение сопротивления растягивающим напряжениям сильнее, чем обычный рост температуры внутри стеклообразного или высокоэластичного состояния, соответственно.

- в АБС-пластике значительного снижения величины откольной прочности за пределами области стеклования зарегистрировано не было.

4) Показано, что характер откольного разрушения исследованных полимеров сильно зависит от структуры материала и от физического состояния, в котором он находится:

- откольное разрушение АБС-пластика в стеклообразном состоянии подобно откольному разрушению в эластомерах: на профилях регистрируется длительное торможение отрывающегося слоя. При превышении температуры стеклования характер разрушения меняется, откольный импульс становится более выраженным.

- найдено, что при переходе поликарбоната из стеклообразного в высокоэластичное состояние откольный импульс пропадает.

- на волновых профилях СВМПЭ отсутствуют признаки откольного разрушения, на сохранённых образцах отсутствует откольная полость. Как и в случае с АБС-пластиком откольная прочность СВМПЭ – это величина, характеризующая зарождение несплошностей в материале, а не его разрыв.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Черепанов И. А., Савиных А. С. Гаркушин Г. В., Разоренов С.В. Откольная прочность поликарбоната при температурах 20-185°C // Журнал технической физики. 2023. Т. 93. № 5. с. 666.

2. Черепанов И. А., Савиных А. С. Гаркушин Г. В., Разоренов С. В. Влияние температуры на ударную сжимаемость и откольную прочность АБС-пластика в слабых ударных волнах // Журнал технической физики. 2024. Т. 94. № 1. с. 125.

3. Черепанов И. А., Савиных А. С., Гаркушин Г. В., Разоренов С.В., Жуков А.Н., Черняев Д.А., Панин С.В., Алексенко В.О. Ударная сжимаемость и откольная прочность сверхвысокомолекулярного полиэтилена в широком диапазоне температур // Журнал технической физики. 2026. Т. 96. № 4 с 729.