

06

## Ударная сжимаемость и откольная прочность сверхвысокомолекулярного полиэтилена в широком диапазоне температур

© И.А. Черепанов,<sup>1</sup> А.С. Савиных,<sup>1</sup> Г.В. Гаркушин,<sup>1</sup> С.В. Разоренов,<sup>1</sup> А.Н. Жуков,<sup>1</sup>  
Д.А. Черняев,<sup>1</sup> С.В. Панин,<sup>2</sup> В.О. Алексенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,  
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

<sup>2</sup> Институт проблем прочности и материаловедения СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: i.cherepanov95@yandex.ru

Поступило в Редакцию 2 июля 2025 г.

В окончательной редакции 4 декабря 2025 г.

Принято к публикации 10 декабря 2025 г.

На основе анализа полных волновых профилей образцов сверхвысокомолекулярного полиэтилена определены зависимости скорости ударной волны  $U_s$  от массовой скорости  $u_p$  (ударные адиабаты) в диапазоне максимальных напряжений ударного сжатия от 0.3 до 1.3 ГПа при начальных температурах  $-95^\circ\text{C}$ – $95^\circ\text{C}$ , и проведены измерения откольной прочности в широком диапазоне начальных температур ( $-120^\circ\text{C}$ – $145^\circ\text{C}$ ) при максимальном напряжении ударного сжатия 0.8 ГПа. Нагружение образцов осуществлялось ударом алюминиевых пластин, разогнанных до скоростей 210–660 м/с с помощью специальных взрывных устройств либо пневматической пушки. Регистрация волновых профилей проведена с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR. Показано, что рост температуры привел к снижению величины откольной прочности.

**Ключевые слова:** сверхвысокомолекулярный полиэтилен, ударные волны, деформация, температура, откольная прочность, ударная адиабата.

DOI: 10.61011/JTF.2026.04.62659.167-25

### Введение

Повышенная прочность, износостойкость, а также коррозионная устойчивость позволяют рассматривать сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) как наилучший по сумме характеристик материал, в том числе для его использования в аэрокосмической, военной или медицинской сферах в экстремальных условиях эксплуатации [1–3]. Использование изделий из СВМПЭ при высоких скоростях деформирования в широком температурном диапазоне ставит актуальным вопрос о влиянии температуры на характер разрушения материала и его прочностные характеристики.

Отличие СВМПЭ от других типов полиэтилена выражается в первую очередь в величине молекулярной массы (свыше  $10^6$  г/мол) [4]. Влияние внутренней структуры и молекулярной массы на прочностные характеристики рассматривалось в работах [5–7]. В работе [5] с использованием метода молекулярной динамики было показано, что при динамическом растяжении прочность кристаллов полиэтилена, содержащих короткие цепочки (120 атомов), возрастает при увеличении скорости деформации с  $10^{10}$  до  $10^{13}$  с<sup>-1</sup> больше чем в 7 раз. Авторы предполагают, что это может быть связано с изменением механизма разрушения: от скопления по концам цепи к непосредственному разрыву вдоль цепи.

С увеличением молекулярной массы влияние скорости деформации на прочность происходит при более низких ее значениях. Результаты показывают, что прочность полиэтилена при растяжении может превосходить прочность, определенную при низких скоростях деформации. Например, в работе [6] с использованием сервогидравлической машины производилось квазистатическое сжатие образцов полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) и СВМПЭ. Было показано, что образцы ПЭВП демонстрируют значительно более высокий предел текучести (так, при комнатной температуре и скорости деформирования  $0.1$  с<sup>-1</sup> значение для ПЭВП превышало на 72 % значение для СВМПЭ) за счет равномерного течения. В свою очередь, образцы СВМПЭ демонстрируют значительное деформационное упрочнение при превышении его предела текучести. При динамических нагрузках и высоких значениях максимального напряжения ударного сжатия существенных различий между двумя типами полиэтилена с различной молекулярной массой СВМПЭ и ПЭВП не наблюдается. Информацию об ударной сжимаемости материала можно получить исходя из ударных адиабат — совокупности всех возможных состояний, которые возникают при сжатии вещества ударными волнами различной интенсивности и которые в диапазоне умеренных сжатий сред могут описываться линейным соотношением вида  $U_s = c_0 + bu_p$  [8]. Так,

при ударном сжатии при давлениях свыше 33 ГПа соотношения для ударных адиабат СВМПЭ и ПЭВП одинаковы в пределах погрешности [7]. Однако показано, что при более низких давлениях [9], несмотря на разницу в плотности всего 3%, ударные адиабаты отличаются:  $U_S = 2.50 + 1.49u_p$  [km/s] для ПЭВП и  $U_S = 2.33 + 1.56u_p$  [km/s] для СВМПЭ.

Измерения откольной прочности СВМПЭ проводились в работе [10]. Показано, что до определенного уровня она не зависит от величины максимального напряжения ударного сжатия и остается постоянной  $\sim 70$  МПа, при превышении максимального давления ударного сжатия значения 0.9 ГПа величина откольной прочности снижается. Это явление объясняется авторами двумя конкурирующими факторами: ростом скорости деформации при растяжении и ударным нагревом, а как следствие размягчением материала. Там же были получены значения ударной адиабаты СВМПЭ в диапазоне до 2 ГПа в виде зависимости  $U_S = 2.34 + 1.895u_p$ . Данные о зависимости  $U_S - u_p$  при более высоких давлениях представлены в работе [7].

Исследования полимерных материалов при динамических нагрузках, как правило, ограничиваются лишь комнатной температурой. При этом для построения моделей поведения полимеров в этих условиях необходимы экспериментальные данные в широком диапазоне температур, включающим в том числе процессы плавления и стеклования [11]. Такие работы по изучению прочности на откол были проведены для ПММА, поликарбоната и АБС-пластика [12–14]. Общая тенденция для исследованных полимерных материалов выражается в снижении величины откольной прочности при увеличении температуры. При превышении температуры стеклования в зависимости от внутренней структуры такое падение может быть либо незначительным [14], либо существенным, и величина откольной прочности приближается к нулевому значению [12,13]. Целью настоящей работы является определение параметров ударной адиабаты СВМПЭ и исследование влияния температуры на его сопротивление растягивающим напряжениям (откольную прочность) в диапазоне температур от  $-120$  °С до  $145$  °С.

## 1. Материал и постановка экспериментов

Эксперименты проведены с образцами СВМПЭ, спеченными из порошка марки GUR-2122 (Тисона, Германия) молекулярной массой  $4.5 \cdot 10^6$  g/mol и размером частиц  $5 - 15 \mu\text{m}$  с использованием гидравлического пресса. Образцы представляли собой пластины с линейными размерами  $40 \times 40$  mm и толщиной 2 или 6 mm. Плотность СВМПЭ, измеренная методом гидростатического взвешивания с помощью аналитических весов ME204T, составила  $\rho_0 = 0.938$  g/cm<sup>3</sup>, продольная скорость звука,

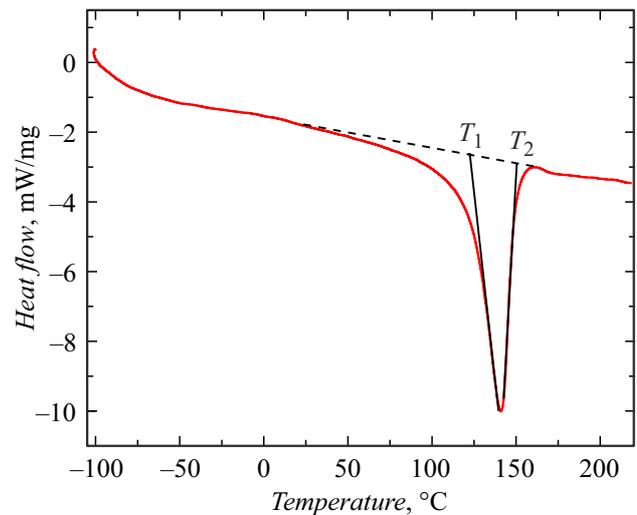


Рис. 1. Кривая ДСК образца СВМПЭ. Скорость нагрева  $V = 10$  °C/min.

измеренная с помощью установки для измерения скорости распространения акустических волн (МГНИВП „Акустика“), равна  $c_l = (2.268 \pm 0.010)$  km/s. С помощью дифференциального сканирующего калориметра DSC200L были проведены тепловые измерения образцов СВМПЭ [15]. На рис. 1 представлена кривая ДСК, полученная при температуре образцов в диапазоне  $-100$  °С– $220$  °С. Скорость нагрева  $V$  составила  $10$  °C/min. На кривой зафиксирован тепловой эффект, отвечающий процессу плавления:  $T_1 = 122$  °С — температура начала плавления,  $T_2 = 150$  °С — температура окончания процесса плавления. Исходя из кривой ДСК, была определена энтальпия плавления образца  $H_m = 171$  J/g, при этом температуру стеклования  $T_g$ , которая, согласно литературным данным [16], составляет  $-160$  °С, установить не удалось. С помощью соотношения

$$\chi_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \cdot 100\%$$

и энтальпии плавления совершенного кристалла  $H_m^0 = 293$  J/g [17] была определена степень кристалличности  $\chi = 59.1\%$ .

Степень кристалличности образцов СВМПЭ была также определена с помощью рентгеновской дифрактометрии (рис. 2). Съемка рентгенограмм проводилась в геометрии Брегга–Брентано с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-4, излучение генерировалось на медном аноде при напряжении 33 kV и токе 15 mA. Для выделения линии  $K_\alpha$  меди использовался Ni-фильтр. Дифракционная картина сканировалась в пошаговом режиме с шагом  $\Delta 2\theta = 0.05^\circ$  и временем набора  $\tau = 2$  s. Дифракционные пики СВМПЭ  $2\theta = 21.5^\circ$  и  $23.8^\circ$  обусловлены отражениями (110) и (200) [18]. Степень кристалличности определялась как отношение площади пиков кристаллической фазы к общей площади кристал-

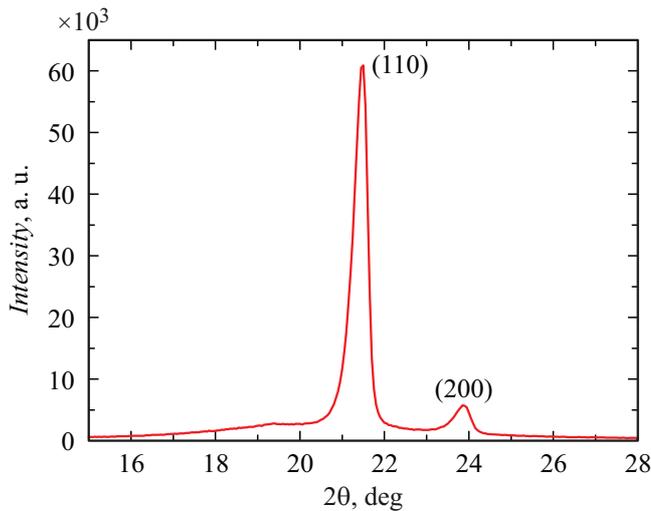


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма СВМПЭ.

лической и аморфной фаз [19]:

$$\chi_c = \frac{A_{cr}}{A_{cr} + A_a} \cdot 100\%$$

и составила  $\chi = 64\%$ , что незначительно отличается от результата, полученного с помощью метода ДСК.

В настоящей работе проведено три серии экспериментов. В первой серии определялась зависимость скорости ударной волны  $U_S$  от массовой скорости  $u_p$  (ударная адиабата) в диапазоне от  $-95^\circ\text{C}$  до  $+95^\circ\text{C}$  и при максимальных напряжениях сжатия  $\sigma_{\max}$  до 1.3 ГПа. Схема экспериментов первой серии показана на рис. 3, а. Ударно-волновое нагружение осуществлялось алюминиевым ударником толщиной 7 мм, разогнанного до скоростей  $(210 \pm 10)$  м/с,  $(260 \pm 10)$  м/с и  $(315 \pm 10)$  м/с с помощью пневматической ствольной установки диаметром 50 мм. 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. При прохождении ударной волны из СВМПЭ в натриево-известковое стекло в последнем реализуются максимальные напряжения сжатия  $\sigma_{\max}$ , равные 0.8, 1.0 и 1.3 ГПа соответственно, что существенно ниже динамического предела упругости ( $\sigma_{HEL} = 3.5\text{--}7$  ГПа) используемого стекла [20]. В экспериментах регистрировались упругие переотражения в стекле между свободной поверхностью стекла и контактной поверхностью с образцом СВМПЭ. Высокое значение скорости звука в стекле ( $c_l = 5.720$  км/с) в сравнении с исследуемым образцом позволяет получить несколько переотражений упругой волны в стекле до выхода на границу СВМПЭ–стекло отраженной волны сжатия от экрана.

Во второй серии определялась зависимость величины откольной прочности ( $\sigma_{sp}$ ) от максимального напряжения сжатия при начальных температурах  $20^\circ\text{C}$

Условия экспериментов и результаты измерений откольной прочности  $\sigma_{sp}$  в зависимости от максимального напряжения сжатия  $\sigma_{\max}$

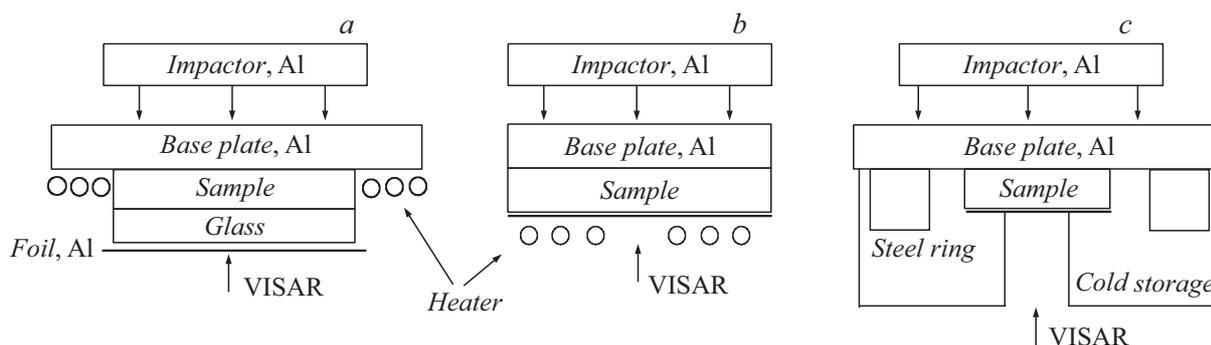
№	$T_0$ , $^\circ\text{C}$	$h_{bp}$ , mm	$h_{imp}$ , mm	$u_{imp}$ , m/s	$\sigma_{\max}$ , GPa	$\dot{\epsilon}_x$ , $10^5 \text{ s}^{-1}$	$\sigma_{sp}$ , MPa
1	20	1.970	0.383	$360 \pm 10$	0.45	0.6	128
2	20	3.001	0.731	$360 \pm 10$	0.69	1.1	130
3	20	2.998	0.734	$660 \pm 20$	1.36	1.2	82
4	20	2.975	0.945	$660 \pm 20$	1.57	1.5	69
5	$-54$	2.996	0.738	$360 \pm 10$	0.75	0.6	148
6	$-54$	2.980	0.950	$660 \pm 20$	1.44	1.7	179

Примечание.  $h_{bp}$  — толщина экрана,  $h_{imp}$  — толщина ударника,  $u_{imp}$  — скорость ударника,  $\dot{\epsilon}_x$  — скорость деформирования в волне разрежения.

и  $-54^\circ\text{C}$ . На рис. 3, с показана используемая схема ударного нагружения образцов при отрицательных температурах. Для измерений при комнатной температуре использовалась схема нагружения, показанная на рис. 3, б, без нагревательного элемента. 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. Подробная информация об исходных параметрах экспериментов, а также значения максимального напряжения сжатия, реализуемого в образцах, представлены в таблице. Нагружение образцов ударником со скоростью  $(360 \pm 10)$  м/с осуществлялось с помощью пневматической пушки, со скоростью  $(660 \pm 20)$  м/с — с использованием взрывных устройств [21].

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  $-120^\circ\text{C}$  до  $145^\circ\text{C}$ . Данная постановка была выбрана на основании результатов второй серии экспериментов.

Во всех экспериментах с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR [22] с временным разрешением  $\sim 1$  нс регистрировалась скорость свободной поверхности образцов как функция времени  $u_{fs}(t)$ . Зондирующий лазерный луч интерферометра отражался от алюминиевой фольги толщиной  $7 \mu\text{m}$ , приклеенной к образцу с помощью двухкомпонентного эпоксидного клея, рабочий диапазон температур которого включает достигаемые в экспериментах. Нагрев образцов осуществлялся с помощью керамического нагревателя с нихромовой спиралью, который размещался на алюминиевом экране (рис. 3, б). Охлаждение осуществлялось с использованием камеры из низкопористого пенопласта, полость которой заполнялась жидким азотом (рис. 3, с).



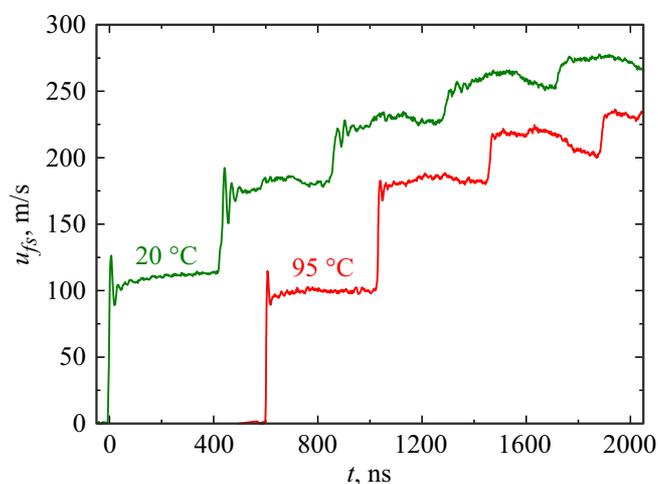
**Рис. 3.** Схемы ударного нагружения и регистрации профилей скорости свободной поверхности натриево-известкового стекла (а) и образцов СВМПЭ при повышенных (b) при криогенных (c) температурах. а — построение зависимостей  $U_S-u_p$ ; b,c — измерение откольной прочности.

Для поддержания длительного времени (15–20 min), криогенной температуры, использовался „накопитель холода“ в виде массивного стального кольца, прикрепленного к экрану. Контроль температуры осуществлялся двумя хромель-алюмелевыми термопарами. Одна термопара вклеивалась с торца образца, другая — в образец на удалении  $\sim 6-7$  mm от места регистрации скорости свободной поверхности в случае определения откольной прочности или на границу стекло–образец в серии экспериментов по измерению зависимости  $U_S-u_p$ . Разница между показаниями термопар не превышала  $2^\circ\text{C}$ . Использование двух термопар позволяло с большей точностью контролировать температуру внутри образца. Средняя скорость нагрева образцов составляла  $\sim 0.1^\circ\text{C/s}$ , средняя скорость охлаждения образцов составляла  $\sim 0.5^\circ\text{C/s}$ .

## 2. Результаты измерений

Для определения зависимостей  $U_S-u_p$  в диапазоне начальных температур от  $-95^\circ\text{C}$  до  $95^\circ\text{C}$  была проведена регистрация профилей скорости свободной поверхности натриево-известкового стекла, наклеенного на образец СВМПЭ толщиной 6.3 mm. Нагружение проводилось алюминиевым ударником толщиной 7 mm, диапазон скоростей ударника составил 210–315 m/s. На рис. 4 представлены профили скорости свободной поверхности натриево-известкового стекла при максимальном напряжении сжатия 0.8 GPa. Регистрируемые „ступеньки“ скорости на профилях скорости являются результатом преотражения упругой волны в стекле в виде волны разрежения от свободной поверхности и волны сжатия от поверхности образца СВМПЭ, обладающего меньшим динамическим импедансом (произведением плотности и скорости звука).

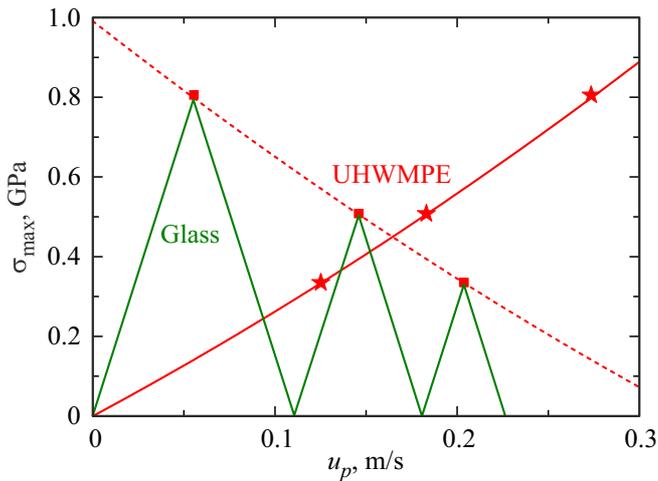
При изменении температуры амплитуда упругой волны (рис. 4), соответствующая амплитуде первой ступени, меняется незначительно. При этом измерения скорости свободной поверхности корректны для первых двух–трех ступенек, так как впоследствии возника-



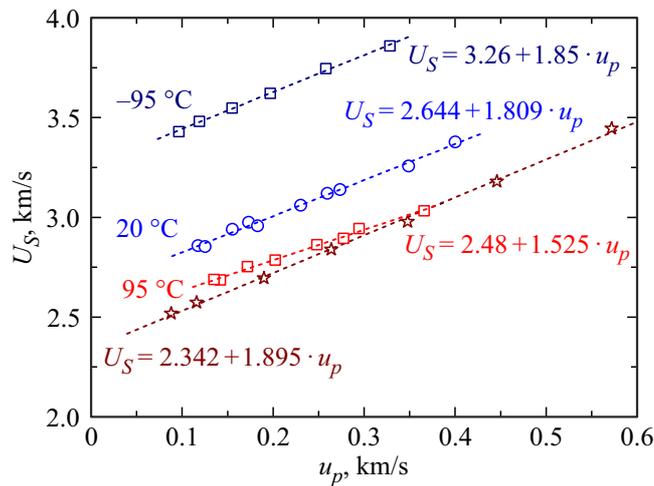
**Рис. 4.** Профили скорости свободной поверхности образцов натриево-известкового стекла при нагружении алюминиевым ударником толщиной 7 mm, разогнанного до скорости 210 m/s при  $20^\circ\text{C}$  и  $95^\circ\text{C}$ .

ют значительные искажения регистрируемой скорости поверхности из-за боковой разгрузки. Регистрируемое время выхода очередной „ступеньки“ на свободную поверхность стекла определяется отношением удвоенной толщины стекла к измеренной продольной скорости звука и хорошо согласуется с расчетным для комнатной температуры. В исследуемом диапазоне температур продольная скорость звука стекла по данным работы [23] меняется незначительно.

Значения массовой скорости и максимального напряжения сжатия в СВМПЭ при „реверберации“ упругой волны в стекле находились с использованием алгоритма, подробно описанного в статье [14]. Основываясь на зависимостях продольной скорости звука и плотности натриево-известкового стекла от температуры [23–25] и измеренного профиля скорости свободной поверхности, с помощью построения диаграмм ударно-волновых взаимодействий определялись зависимости  $\sigma_{\max}-u_p$  (рис. 5). Значения  $u_p$  из измеренного профиля скорости стекла



**Рис. 5.**  $\sigma_{\max}$ – $u_p$ -диаграмма ударно-волновых взаимодействий, построенная из профиля скорости поверхности при 20 °С, показанного на рис. 4.



**Рис. 6.** Результаты измерений ударной адиабаты СВМПЭ в диапазоне температур –95 °С–95 °С. Звездой обозначены данные работы [10].

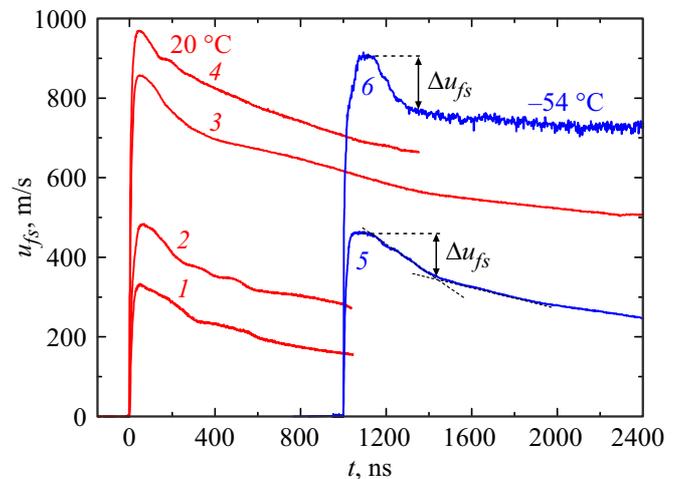
брались на первых 2–3 ступенях, отличающихся отсутствием значительных осцилляций. Используя соотношение  $\sigma_{\max} = \rho_0 U_s u_p$ , определялась зависимость  $U_s - u_p$ .

На рис. 6 представлены полученные зависимости скорости ударной волны  $U_s$  от массовой скорости  $u_p$  для СВМПЭ в исследуемом температурном диапазоне. Зависимость определена в виде  $U_s = c_0 + b u_p$ , где  $c_0$  — константа, принимающая значение объемной скорости звука,  $b$  — коэффициент, определяемый из наклона линейной зависимости. 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  $b$ , при комнатной температуре и при температуре –95 °С оста-

ется практически одинаковым, при температуре 95 °С, приближающейся к температуре плавления, снижается значительно. Разницу величины объемной скорости звука  $c_b$  при комнатной температуре от этой величины, полученной в работе [10], 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  $c_l = 2.268$  km/s в СВМПЭ при комнатной температуре значительно ниже  $c_0 = 2.644$  km/s, поэтому выхода упругого предвестника на свободную поверхность не регистрируется.

На рис. 7 представлены профили скорости свободной поверхности образцов СВМПЭ толщиной 2 mm, полученные при комнатной температуре и температуре –54 °С при нагружении алюминиевыми ударниками толщиной 0.4, 0.7 и 0.9 mm со скоростями 360 и 660 m/s соответственно. Максимальные напряжения сжатия на свободной поверхности, реализуемые в этих экспериментах, рассчитывались с помощью соотношения  $\sigma_{\max} = \rho_0 U_s u_p$  и не превышали 1.6 GPa (см. таблицу). 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 догона волной разгрузки со стороны ударника. После достижения максимальной скорости поверхности регистрируется выход части волны разрежения, предшествующей откольному разрушению, после которого откольный импульс, наблюдаемый в других термопластах при схожей температуре [12,13], отсутствует.

Скорость деформирования в волне разгрузки определялась с использованием соотношения  $\dot{\epsilon} = \dot{u}_{fs}/2c_b$ ,



**Рис. 7.** Профили скорости свободной поверхности образцов СВМПЭ толщиной 2 mm при 20 °С и –54 °С при различных  $\sigma_{\max}$ . Профили пронумерованы в соответствии с данными таблицы.

полученные значения представлены в таблице. В экспериментах, проведенных при одной начальной температуре, с увеличением максимального напряжения сжатия скорость деформирования в волне разгрузки растет.

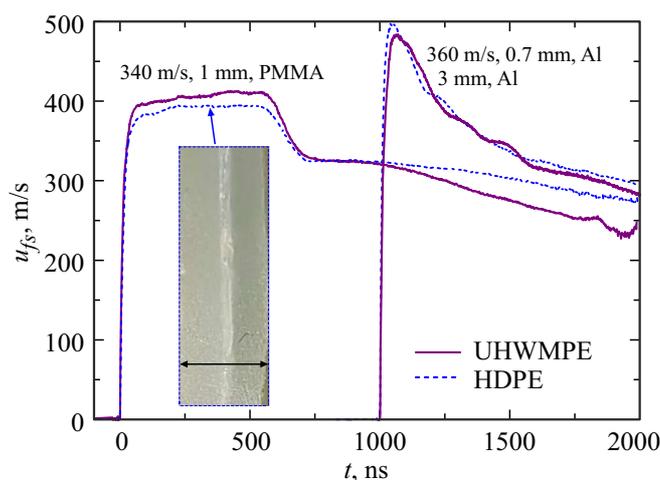
При комнатной температуре рост максимального напряжения сжатия приводит к уменьшению декремента скорости  $\Delta u_{fs}$  — разнице между максимальным значением скорости свободной поверхности и минимальным в волне разгрузки, что согласуется с литературными данными [10]. Однако при температуре  $-54^\circ\text{C}$  уменьшение декремента скорости не наблюдается. 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.

В связи с тем, что на профилях скорости свободной поверхности, показанных на рис. 7, откольные импульсы не регистрируются, то декремент скорости в волне разгрузки определялся по изменению крутизны наклона [26]. 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 под оптическим микроскопом среза центральной части сохраненных образцов. Образец разрезался перпендикулярно поверхности удара. Предполагаемых 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.

Проведенный анализ ударно-волновых взаимодействий ударника и образца показал, что перегиб в волне разгрузки не является следствием ступенчатой разгрузки ударника, так как ударник имеет более высокий динамический импеданс чем исследуемый образец. Для полного исключения возможной регистрации ступенчатой разгрузки от более жесткого ударника был проведен эксперимент, в котором нагружение осуществлялось ударником, изготовленным из ПММА. В этой же постановке был проведен дополнительный эксперимент с материалом схожей структурой и одинаковым составом — ПЭВП.

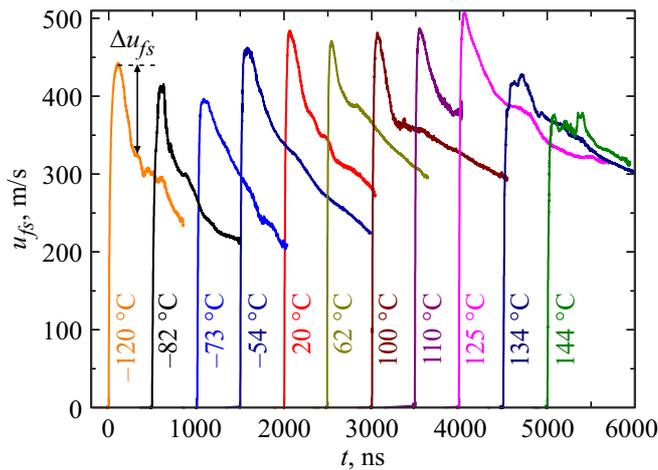
На рис. 8 представлены профили скорости свободной поверхности образцов ПЭВП и СВМПЭ, полученные при нагружении ударником ПММА толщиной 1 mm и алюминиевым ударником толщиной 0.7 mm со скоростями 340 и 360 m/s соответственно. При нагружении ударником из ПММА откольный импульс как у СВМПЭ, так и ПЭВП не регистрируется, вместо этого наблюдается плавное уменьшение скорости свободной поверхности. Декремент скорости  $\Delta u_{fs}$  при нагружении ПММА ударником составил 84 m/s в эксперименте с



**Рис. 8.** Профили скорости свободной поверхности образцов ПЭВП и СВМПЭ толщиной 2 mm при  $20^\circ\text{C}$ . На профилях указаны скорость, толщина и материал ударников, толщина и материал экрана. На вставке показан срез центральной части сохраненного образца ПЭВП после ударно-волнового нагружения с использованием ударника из ПММА, разогнанного до скорости 340 m/s. Масштабная линейка соответствует 2 mm.

СВМПЭ и 70 m/s у ПЭВП. При нагружении алюминиевым ударником образца ПЭВП качественно регистрируется подобный профиль скорости, как и в эксперименте с СВМПЭ. При этом наблюдается увеличение декремента скорости в волне разгрузки до 88 m/s в эксперименте с ПЭВП и до 103 m/s — у СВМПЭ. Это связано с тем, что растягивающие напряжения в экспериментах достигают максимальных значений в середине образца при нагружении ударником из ПММА, а при нагружении алюминиевым ударником — вблизи свободной поверхности [27].

С помощью оптической микроскопии образцов ПЭВП после нагружения были обнаружены трещины, расположенные параллельно плоскости образца, являющиеся результатом откольного разрушения (рис. 8, вставка). При этом в образцах СВМПЭ каких-либо признаков разрушения не обнаружено. Степень кристалличности ПЭВП по литературным данным составляет 65%–90% [28] в отличие от СВМПЭ, обладающего большей долей аморфной части  $\sim 40\%$ , основу которой составляют проходные цепи, соединяющие кристаллические ламели. Поэтому специфичное поведение СВМПЭ и отсутствие видимых признаков откольного разрушения при ударно-волновом нагружении может быть связано с высокоскоростной деформацией аморфной части полимера. При этом в течение длительного времени происходит торжение отрывающегося поверхностного слоя, который сохраняет связь с основной частью образца. Таким образом, в настоящей работе откольная прочность СВМПЭ рассматривается как величина, характеризующая зарождение несплошностей, а также может характеризовать переориентацию и деформацию макромолекул внутри



**Рис. 9.** Профили скорости свободной поверхности образцов СВМПЭ в диапазоне температур от  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Смещение каждого профиля  $u_{fs}(t)$  относительно предыдущего на  $500\text{ ns}$ .

аморфной части полимера в материале, а не его полный разрыв.

Откольная прочность СВМПЭ и ПЭВП определялась с использованием соотношения [27]:

$$\sigma_{sp} = 1/2 \rho_0 c_b \Delta u_{fs}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — начальная плотность. Значение объемной скорости звука  $c_b$  для расчета откольной прочности принималось равной  $c_0$  в зависимости скорости ударной волны  $U_S$  от массовой скорости  $u_p$ ,  $U_S = c_0 + b u_p$ . Для СВМПЭ  $c_b = 2.644\text{ km/s}$ , для ПЭВП  $c_b = 2.50\text{ km/s}$ ,  $\rho_0 = 0.961\text{ g/cm}^3$  [9]. Величина откольной прочности при нагружении ударниками из ПММА и Al составила для ПЭВП 84 и 105 МПа, для СВМПЭ 104 и 130 МПа соответственно.

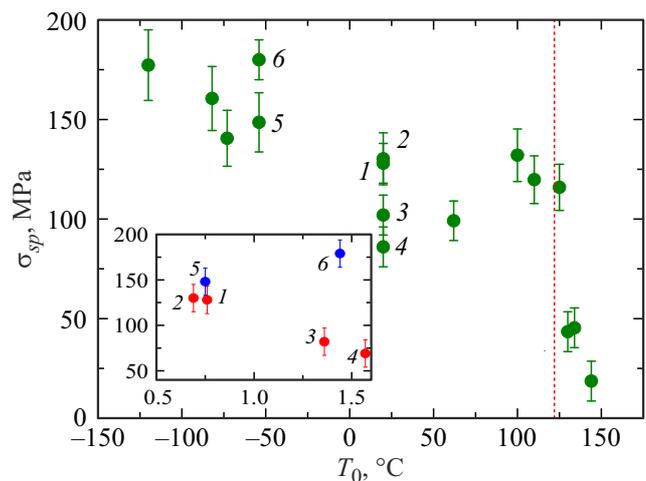
На рис. 9 представлены профили скорости свободной поверхности образцов СВМПЭ толщиной  $2\text{ mm}$ , полученные в диапазоне начальных температур от  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $145\text{ }^{\circ}\text{C}$  при нагружении алюминиевым ударником толщиной  $0.7\text{ mm}$ , разогнанного до скорости  $360\text{ m/s}$ , что соответствует  $\sigma_{\max} \sim 0.7\text{ GPa}$  при комнатной температуре. С увеличением начальной температуры образцов максимальные значения скорости свободной поверхности растут, значительно снижаясь лишь на волновых профилях, полученных при температурах  $134\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Это изменение обусловлено началом процесса плавления при  $\sim 122\text{ }^{\circ}\text{C}$ , приводящем к изменениям внутренней структуры материала и появлению значительных осцилляций на волновых профилях. Скорость деформирования перед откольным разрушением не зависит от температуры и находится в диапазоне  $0.6\text{--}1.3 \cdot 10^5\text{ s}^{-1}$ .

Во всем исследованном температурном диапазоне откольный импульс на профилях  $u_{fs}(t)$  зарегистрирован не был. Влияние начальной температуры образцов

СВМПЭ на откольное разрушение согласуется с разрушением в других термопластах, таких как полиметилметакрилат и поликарбонат [12,13] 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.

Расчет откольной прочности на основе измеренных профилей скорости свободной поверхности, показанных на рис. 9, проводился с помощью соотношения (1). Объемная скорость звука  $c_b$  определялась из линейной экстраполяции зависимости  $c_0(T)$ , построенной с помощью значений  $c_0$  из зависимостей  $U_S - u_p$  при начальных температурах  $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При комнатной температуре полученное значение  $c_0$ , определенное таким образом, оказалось выше, чем измеренная продольная скорость звука, что не противоречит данным работы [10] и является характеристической особенностью некоторых полимеров [29]. 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 работы [30]. Суммарная погрешность при определении величины откольной прочности включала в себя как описанные выше предположения, так и инструментальную погрешность при измерении декремента скорости в размере  $\pm 5\text{ m/s}$ .

На рис. 10 представлены рассчитанные значения откольной прочности СВМПЭ на основе измеренных профилей скорости свободной поверхности, показанных на рис. 7, 9, с использованием соотношения (1), в диапазоне температур  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Видно, что рост температуры образцов до температуры плавления приводит



**Рис. 10.** Зависимость откольной прочности СВМПЭ, рассчитанная на основе волновых профилей, показанных на рис. 7, 9, от начальной температуры. Пунктиром показана температура начала процесса плавления. На вставке показана зависимость откольной прочности от максимального напряжения сжатия. Номера у экспериментальных точек соответствуют таблице.

к плавному снижению величины откольной прочности, что связано с увеличением межмолекулярного расстояния, а также возросшей подвижностью 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 МПа [31], что в 2–3 раза ниже откольной прочности реализуемой при  $\sigma_{\max} \sim 0.4\text{--}1.6$  ГПа и соответствующих скоростях деформирования  $0.6\text{--}1.5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$ , полученных в настоящей работе. Можно отметить, что в СВМПЭ, как и в случае с другими полимерными материалами, сохраняется общая тенденция падения откольной прочности с температурой [12–14].

### Заключение

Проведены эксперименты по ударно-волновому нагружению образцов СВМПЭ амплитудой ударного сжатия до 0.8 ГПа в диапазоне температур  $-120^\circ\text{C}\text{--}145^\circ\text{C}$  и до  $\sigma_{\max} \sim 1.6$  ГПа при  $-54^\circ\text{C}$  и  $20^\circ\text{C}$  с регистрацией профилей скорости свободной поверхности лазерным интерферометром VISAR. Разработана методика ударно-волнового нагружения и регистрации профилей скорости свободной поверхности полимеров при начальных температурах, близких к криогенным. Для расчета откольной прочности измерены ударные адиабаты СВМПЭ при максимальных напряжениях ударного сжатия до 1.3 ГПа и в диапазоне температур  $-95^\circ\text{C}\text{--}95^\circ\text{C}$ . Показано, что с ростом температуры объемная скорость звука — первый член линейной зависимости  $U_S = c_0 + b u_p$  — падает, а коэффициент  $b$  снижается при приближении к температуре плавления. Из анализа волновых профилей, полученных при  $\sigma_{\max} \sim 0.8$  ГПа, установлена обратная зависимость величины откольной прочности от температуры, при этом в начале процесса плавления меняется характер зависимости: плавное снижение  $\sigma_{sp}$  сменяется резким падением в три раза. Откольная прочность СВМПЭ рассматривается как величина, характеризующая зарождение несплошностей в материале, а не его полный разрыв. Предложен механизм откола внутри образцов СВМПЭ, основанный на предположении о деформации и переориентации проходных цепей внутри аморфной части полимера. С ростом максимального напряжения сжатия до  $\sim 1.6$  ГПа при комнатной температуре регистрируется двукратное уменьшение откольной прочности, в то время как при начальной температуре  $-54^\circ\text{C}$  наблюдается ее незначительный рост.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Госзаданий Минобрнауки России № 124020600049-8, № 124020800013-7 и Госзадания ИФПМ СО РАН, № темы FWRW-2021-0010. Ра-

бота выполнена с использованием оборудования Центр коллективного пользования „Перспективные взрывные технологии“.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] J.H. Cha, Y. Kim, S.K.S. Kumar, C. Choi, C.G. Kim. *Acta Astronautica*, **168**, 182 (2020). DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.12.008
- [2] T.G. Zhang, S.S. Satapathy, L.R. Vargas-Gonzalez, S.M. Walsh. *Composite Structures*, **133**, 191 (2015). DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.06.081
- [3] C.A. Jacobs, C.P. Christensen, A.S. Greenwald, H. McKellop. *JBJJS*, **89** (12), 2779 (2007). DOI: 10.2106/JBJJS.G.00043
- [4] J.M. Kelly. *J. Macromolecular Sci., Part C*, **42** (3), 355 (2002). DOI: 10.1081/MC-120006452
- [5] M.A.N. Dewapriya, S.C. Chowdhury, J.M. Deitzel, J.W. Gillespie Jr. *Polymer*, **295**, 126779 (2024). DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127564
- [6] E.N. Brown, R.B. Willms, G.T. Gray III, P.J. Rae, C.M. Cady, K.S. Vecchio, J. Flowers, M.Y. Martinez. *Experimental Mechanics*, **47**, 381 (2007). DOI: 10.1007/s11340-007-9045-9
- [7] D.E. Hooks, J.M. Lang, J.D. Coe, D.M. Dattelbaum. *AIP Conf. Proceed.*, **1979**, 030004 (2018). DOI: 10.1063/1.5044774
- [8] Л.В. Альтшулер. *УФН*, **85** (2), 199 (1965). DOI: 10.3367/UFNr.0085.196502a.0199
- [9] D.M. Dattelbaum, B.F. Schilling, B.E. Clements, J.L. Jordan, C.F. Welch, J.A. Stull. *J. Dynamic Behavior Mater.*, (2024). DOI: 10.1007/s40870-024-00411-3
- [10] P.F. Han, D. Fan, Y. Cai, L.Z. Chen, H.L. Xie, H.W. Chai, B.X. Bie, S.N. Luo. *Intern. J. Mechan. Sci.*, **267**, 108984 (2024). DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2024.108984
- [11] G.I. Kanel. *High Temperature*, **58**, 550 (2020). DOI: 10.1134/S0018151X20040057
- [12] E.B. Zaretsky, G.I. Kanel. *J. Appl. Phys.*, **126**, 085902 (2019). DOI: 10.1063/1.5116075
- [13] И.А. Черепанов, А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин С.В. Разоренов. *ЖТФ*, **93** (5), 666 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.05.55461.10-23 [I.A. Cherepanov, A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov. *Tech. Phys.*, **68** (5), 622 (2023). DOI: 10.21883/TP.2023.05.56068.10-23]
- [14] И.А. Черепанов, А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов. *ЖТФ*, **94** (1), 125 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56910.247-23 [I.A. Cherepanov, A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov. *Tech. Phys.*, **69** (1), 119 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56910.247-23]
- [15] M.E. Brown, P.K. Gallagher. *Handbook of thermal analysis and calorimetry: recent advances, techniques and applications* (Elsevier, 2011)
- [16] S.M. Kurtz. *UHMWPE biomaterials handbook* (Academic Press, 2009)
- [17] S. Hu, Y. Feng, X. Yin, X. Zou, J. Qu. *Polymer*, **229**, 124026 (2021). DOI: 10.1016/j.polymer.2021.124026
- [18] Y.L. Joo, O.H. Han, H.K. Lee, J.K. Song. *Polymer*, **41**, 1355 (2000). DOI: 10.1016/S0032-3861(99)00272-4
- [19] L. Segal, J. Creely, A. Martin, C. Conrad. *Textile Res. J.*, **29**, 786 (1959). DOI: 10.1177/004051755902901003

- [20] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.S. Savinykh, A. Rajendran, Z. Chen. *AIP Conf. Proceed.*, **845**, 876 (2006). DOI: 10.1063/1.2263461
- [21] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, V.E. Fortov. *Shock-Wave Phenomena and the Properties of Condensed Matter* (Springer, 2004)
- [22] L.M. Barker, R.E. Hollenbach. *J. Appl. Phys.*, **43** (11), 4669 (1972). DOI: 10.1063/1.1660986
- [23] A.K. Varshneya, J.C. Mauro. *Fundamentals of Inorganic glasses* (Elsevier, 2019)
- [24] J.L. Jordan, D.T. Casem, J. Robinette. *J. Appl. Phys.*, **131** (16), 165903 (2022). DOI: 10.1063/5.0082477
- [25] E. Symoens, R. Van Coile, J. Belis. *Glass Structures Eng.*, **7** (3), 457 (2022). DOI: 10.1007/s40940-022-00197-7
- [26] Yu.B. Kalmykov, G.I. Kanel, I.P. Parkhomenko, A.V. Utkin, V.E. Fortov. *J. Appl. Mechan. Tech. Phys.*, **31**, 116 (1990). DOI: 10.1007/BF00852759
- [27] G.I. Kanel. *J. Appl. Mechan. Tech. Phys.*, **42**, 358 (2001). DOI: 10.1023/A:1018804709273
- [28] F.J. Stadler, T. Takahashi, K. Yonetake. *e-Polymers*, **40** (2009). DOI: 10.1515/epoly.2009.9.1.479
- [29] R.G. McQueen, S.P. Marsh, J.W. Taylor, J.N. Fritz, W.J. Carter. In: *High velocity impact phenomena*. ed by R. Kinslow (Academic Press, NY., 1970), p. 294.
- [31] K.V. Allahverdiyeva, N.T. Kakhramanov, G.S. Martynova, F.A. Mustafayeva, Y.N. Gahramanli, A.G. Habibova, R.V. Gurbanova. *Heliyon*, **9**, 14829 (2023). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e14829 External Link
- [31] S.V. Panin, L.A. Kornienko, Q. Huang, D.G. Buslovich, S.A. Bochkareva, V.O. Alexenko, I.L. Panov, F. Berto. *Materials*, **13** (7), 1602 (2020). DOI: 10.3390/ma13071602