

06

Влияние температуры на ударную сжимаемость и откольную прочность АБС-пластика в слабых ударных волнах

© И.А. Черепанов, А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов

Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН,
142432 Черногловка, Московская обл., Россия
email: i.cherepanov95@yandex.ru

Поступило в Редакцию 26 сентября 2023 г.

В окончательной редакции 2 ноября 2023 г.

Принято к публикации 10 ноября 2023 г.

Исследовано влияние температуры на прочностные характеристики АБС-пластика (сополимер акрилонитрила, бутадиена и стирола) при высокоскоростном деформировании. Измерена его откольная прочность при максимальном напряжении ударного сжатия 0.6 ГПа в диапазоне начальных температур образцов 20–115°C. Предложено объяснение аномальному росту величины откольной прочности при превышении температуры стеклования на основе анализа возможного изменения внутренней структуры. Построены зависимости скорости ударной волны от массовой скорости (ударные адиабаты) в диапазоне максимальных напряжений ударного сжатия от 0.1 до 1.0 ГПа при различных температурах.

Ключевые слова: АБС-пластик, ударные волны, деформация, температура, откольная прочность, ударная адиабата.

DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56910.247-23

Введение

АБС-пластик — сополимер трех мономеров: акрилонитрила, бутадиена и стирола — сегодня является одним из самых перспективных конструкционных полимерных материалов. Активное применение АБС-пластика в качестве продукта для 3D-печати вместе с его механическими свойствами предполагает его широкое использование в различных областях промышленности. В связи с возможной эксплуатацией изделий из АБС-пластика в том числе при повышенных температурах и импульсных нагрузках остается актуальным вопрос о его свойствах при высоких скоростях деформирования в широком диапазоне температур. В первую очередь это связано с тем, что большинство теоретических и математических моделей, описывающих разрушение полимерных материалов при высоких скоростях деформирования, обычно опираются на экспериментальные данные преимущественно по поликарбонату, либо полиметилметакрилату [1–5].

Сопrotивление АБС-пластика растягивающим напряжениям в квазистатических условиях нагружения исследовалось в работах [6,7]. Было отмечено, что при комнатной температуре предел текучести, модуль Юнга и скорость деформационного упрочнения увеличиваются с ростом скорости деформации, а также предложена феноменологическая модель, описывающая поведение деформации АБС-пластика при динамических растягивающих напряжениях. В работе [7] была отмечена схожесть между экспериментальными данными, полученными для исходного материала и для образцов, прошедших процедуру 3D-печати.

Влияние температуры и скорости деформирования при сжатии на характер разрушения АБС-пластика в диапазоне скоростей деформации $1000\text{--}4000\text{ s}^{-1}$ рассмотрено в работе [8]. Было показано, что из-за смягчения материала с ростом температуры снижается скорость деформирования, а также была отмечена прямая зависимость между скоростью деформирования и приложенной нагрузкой. Рост скорости деформирования вплоть до значения 4000 s^{-1} приводит к полному разрушению образцов.

Особое внимание стоит уделить влиянию температуры и перехода из кристаллического состояния в стеклообразное на прочностные характеристики АБС-пластика. Так, в работе [9] была показана зависимость механических свойств от скорости деформации при температурах ниже температуры стеклования, хорошо описывающая поведение материала в рамках временного подхода, как это происходит в металлах. Также в работе подробно изложен характер разрушения и проанализирован характер зарождения и распространения трещин по материалу.

Сопrotивление растягивающим напряжениям при ударных нагрузках в широком диапазоне температур, включающим температуру стеклования, было исследовано для полиметилметакрилата и поликарбоната в [10,11]. Показано, что при превышении температуры стеклования величина откольной прочности значительно снижается, также уменьшаются значения объемной скорости звука, при этом наклон ударных адиабат остается практически неизменным.

Исследования полимерных материалов в диапазоне температур, включающем температуру стеклования полимеров, начаты лишь в самое последнее время. Анализ экспериментальных данных осложнен, в частности,

недостатком информации об объемной сжимаемости в диапазоне низких и умеренных давлений [12]. Целью настоящей работы является исследование влияния температуры на ударную сжимаемость и прочностные характеристики АБС-пластика в диапазоне температур от 20 до 115°C, включающего в себя его переход в стеклообразное состояние.

1. Материал и постановка экспериментов

Эксперименты проведены с образцами АБС-пластика марки 2332 компании СИБУР толщиной 2 ± 0.1 mm и 4 ± 0.1 mm, диаметром 30 mm, вырезанными из одного листа соответствующей толщины. Начальная температура образцов варьировалась в диапазоне от 20 до 115°C. Для определения температуры стеклования T_g АБС-пластика использовался метод дифференциальной сканирующей калориметрии [13], и было установлено, что $T_g = 105^\circ\text{C}$. Измеренная методом гидростатического взвешивания плотность АБС-пластика составила $\rho_0 = 1.040$ g/cm³, измеренная продольная скорость звука равна $c_l = 2.199$ km/s.

Ударно-волновое нагружение исследуемых образцов проводилось с использованием пневматической ствольной установки диаметром 50 mm. Перед экспериментами приемная камера и ствол пневматической установки вакуумировались. Откольная прочность измерялась при нагружении образцов толщиной 2 mm алюминиевыми ударниками толщиной 1 mm, которые разогнались до скорости 250 m/s. Схема экспериментов по определению откольной прочности АБС-пластика показана на рис. 1, *a*. Максимальное напряжение сжатия в АБС-пластике при такой постановке составляло 0.58 GPa. Кроме того, при комнатной температуре были проведены эксперименты по измерению откольной прочности АБС-пластика при нагружении алюминиевыми ударниками толщиной 2 и 0.9 mm, разогнанных до скорости 360 и 190 m/s, что соответствует максимальным напряжениям сжатия 0.86 и 0.43 GPa.

Для построения зависимости скорости ударной волны U_s от массовой скорости u_p (ударной адиабаты) была выполнена вторая серия экспериментов. Схема нагружения показана на рис. 1, *b*. Ударно-волновое нагружение осуществлялось алюминиевым ударником толщиной 7 mm, разогнанного до скоростей 210 ± 10 m/s или 260 ± 10 m/s. Нагружение образца осуществлялось через алюминиевый экран толщиной 5 mm, на котором размещались исследуемый образец толщиной 4 mm с неизвестной ударной адиабатой и натриево-известковое стекло толщиной 1.2 mm. Суть данного метода заключается в том, что после прохождения ударной волны через образец происходит многократная реверберация волн в стеклянной пластине—свидетеле. Максимальные напряжения сжатия (σ_{max}) при первом

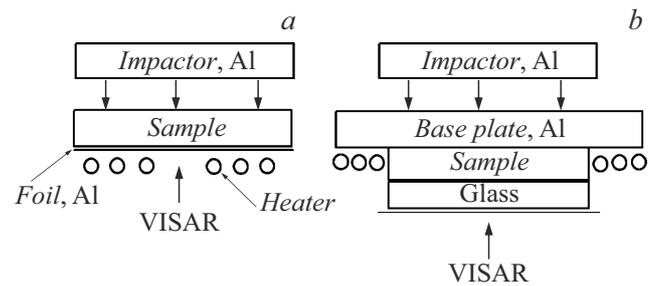


Рис. 1. Схема экспериментов по ударному нагружению и регистрации профилей скорости свободной поверхности образцов АБС-пластика при комнатной и повышенной температурах. *a* — измерение откольной прочности, *b* — построения зависимостей $U_s - u_p$.

переотражении волны в натриево-известковом стекле составили 0.82 или 1.02 GPa соответственно, что значительно ниже динамического предела упругости (σ_{HEL}) данного стекла. Значения (σ_{HEL}) для натриево-известкового стекла по данным работы [14] составляют от 3.5 до 7 GPa, т.е. реверберация волн в натриево-известковом стекле в этих экспериментах происходит в упругой области. Используемая толщина стекла при более высоком значении скорости звука (в стекле $c_l = 5.720$ km/s) позволяет получить несколько переотражений волн в стекле без взаимодействия с волной сжатия отраженной от экрана. Такая постановка дает возможность определить сразу несколько точек на ударной адиабате в одном эксперименте.

Во всех экспериментах с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR [15] с разрешением ~ 1 ns регистрировалась скорость свободной поверхности образцов как функция от времени $u_{fs}(t)$. Отражение лазерного излучения происходило от алюминиевой фольги толщиной $7 \mu\text{m}$, приклеенной к образцу с помощью двухкомпонентного эпоксидного клея, рабочий диапазон температур которого включает достигаемые в экспериментах температуры образцов. Нагрев образцов осуществлялся с помощью керамического нагревателя с нихромовой спиралью, который размещался либо у тыльной поверхности образца (рис. 1, *a*), либо располагался на алюминиевом экране (рис. 1, *b*). Контроль температуры осуществлялся двумя хромель-алюмелевыми термопарами. Одна термопара клеивалась с торца образца, другая — в образец на удалении $\sim 6-7$ mm от места регистрации скорости свободной поверхности в случае определения откольной прочности или в место контакта стекло—образец в серии экспериментов по измерению зависимости $U_s - u_p$. Разница между показаниями термопар не превышала $2-3^\circ\text{C}$. Использование двух термопар позволяло однозначно контролировать процесс стеклования. Средняя скорость нагрева образцов составляла $\sim 0.05^\circ\text{C/s}$.

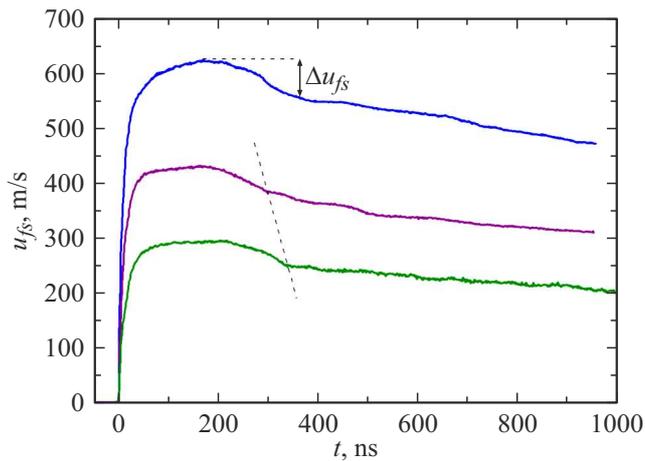


Рис. 2. Профили скорости свободной поверхности образцов АБС-пластика толщиной 2 мм при 20°C при нагружении алюминиевыми ударниками толщиной 0,9, 1 и 2 мм со скоростями 190, 250 и 360 м/с соответственно.

2. Результаты измерений

На рис. 2 представлены профили скорости свободной поверхности образцов АБС-пластика толщиной 2 мм, полученные при комнатной температуре при нагружении алюминиевыми ударниками толщиной 0,9, 1 и 2 мм со скоростями 190, 250 и 360 м/с соответственно. Максимальные напряжения сжатия, реализуемые в этих экспериментах, составили 0,43, 0,58 и 0,86 ГПа. На 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 откольный импульс не регистрируется. 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 (штриховая линия).

На рис. 3 представлены профили скорости свободной поверхности образцов АБС-пластика толщиной 2 мм, полученные в диапазоне начальных температур от 20 до 115°C при нагружении алюминиевым ударником толщиной 1 мм, разогнанным 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.

Из волновых профилей видно, что характер откольного разрушения АБС-пластика при температу-

рах ниже температуры стеклования (20, 60 и 95°C) больше напоминает процесс динамического разрушения в эластомерах [16], чем в термопластах, таких как полиметилметакрилат и поликарбонат [10,11]. 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 резине, измеренное значение откольной прочности может характеризовать условия зарождения микронесплошностей, но не условия полного разрыва. Затянутое уменьшение скорости свободной поверхности после выхода на нее откольного импульса определяется сопротивлением АБС-пластика растяжению.

При температуре 115°C откольный импульс становится более выраженным. Основываясь на данных работы [9], можно предположить, что объяснение данного явления может лежать в механизмах разрушения материала. Авторы отмечают, что в отличие от низкотемпературных экспериментов, где четко выражена слоистость, возникшая в результате способа изготовления образцов, при достижении температуры в 100°C материал начинает гомогенизироваться.

Откольная прочность АБС-пластика определялась с использованием соотношения $\sigma_{sp} = 1/2\rho_0 c_b \times (\Delta u_{fs} + \delta)$ [17,18], где ρ_0 — начальная плотность, c_b — объемная скорость звука, δ — поправка на искажение профиля скорости вследствие различия скоростей упругого фронта откольного импульса и скорости пластической части падающей волны разгрузки перед ним. Так как при ударном сжатии АБС-пластик не проявляет упругих свойств, величина поправки δ при расчете откольной прочности принималась равной

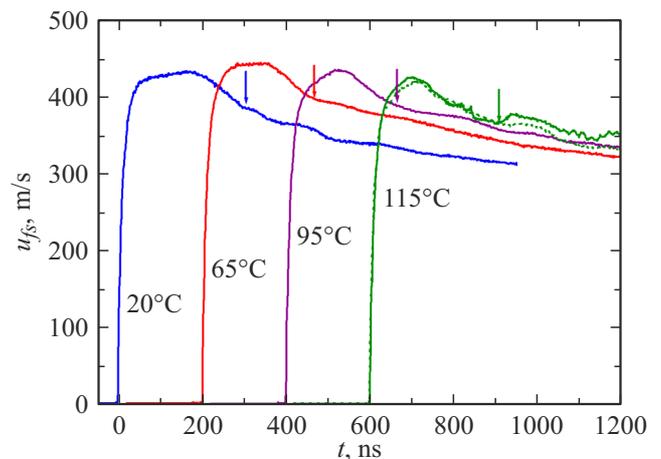


Рис. 3. Профили скорости свободной поверхности образцов АБС-пластика в диапазоне температур от 20 до 115°C при нагружении алюминиевым ударником толщиной 1 мм со скоростью 250 м/с. Стрелками указаны моменты времени откольного разрушения.

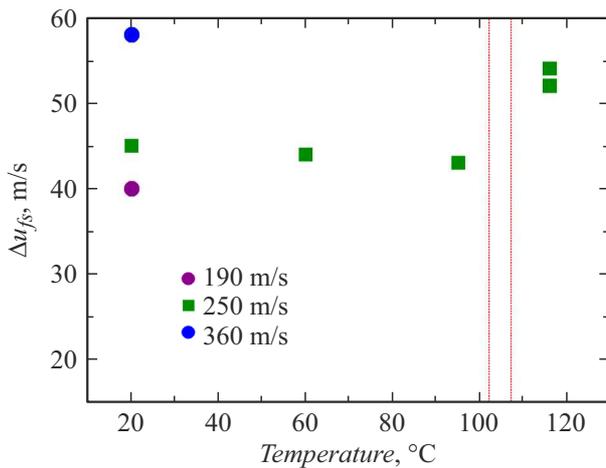


Рис. 4. Зависимость величины декремента скорости АБС-пластика от температуры при различных скоростях удара. Пунктирами показаны температуры начала и окончания стеклования.

нулю. Δu_{fs} — декремент скорости, разница между максимальным значением скорости свободной поверхности и минимальным в волне разгрузки (рис. 2). Зависимость плотности АБС-пластика от начальной температуры была взята из работы [19]. На рис. 4 приведены декременты скорости свободной поверхности, взятые из профилей скорости свободной поверхности, представленных на рис. 2 и 3. При комнатной температуре в отличие от поликарбоната [11] увеличение интенсивности ударного сжатия приводит к увеличению величины Δu_{fs} в исследуемом диапазоне давлений. При росте температуры образцов до температуры стеклования декремент скорости снижается незначительно, а после завершения процесса стеклования — резко возрастает.

Значения объемной скорости звука определялись во второй серии экспериментов при реверберации упругой волны в натриево-известковом стекле с использованием толстого образца АБС-пластика (рис. 1, *b*). Измеренные профили скорости свободной поверхности стеклянной пластины-свидетеля в диапазоне начальных температур 20–115°C при нагружении алюминиевым ударником толщиной 7 мм, разогнанного до скоростей 210 и 260 м/с, представлены на рис. 5. На профилях скорости свободной поверхности регистрируются скачки скорости, являющиеся результатом многократного преотражения упругой волны в виде волн сжатия при отражении от АБС-пластика, обладающего меньшей динамической жесткостью, и волн разрежения при отражении от свободной поверхности стекла. Для анализа полученных результатов брались первые 2–4 ступени в каждом эксперименте, отличающиеся гладким фронтом и отсутствием значительных осцилляций. По мере роста температуры скорость свободной поверхности после выхода первой и последующих волн сжатия незначительно уменьшается. Время выхода на свободную поверхность преотраженных упругих волн определяется толщиной

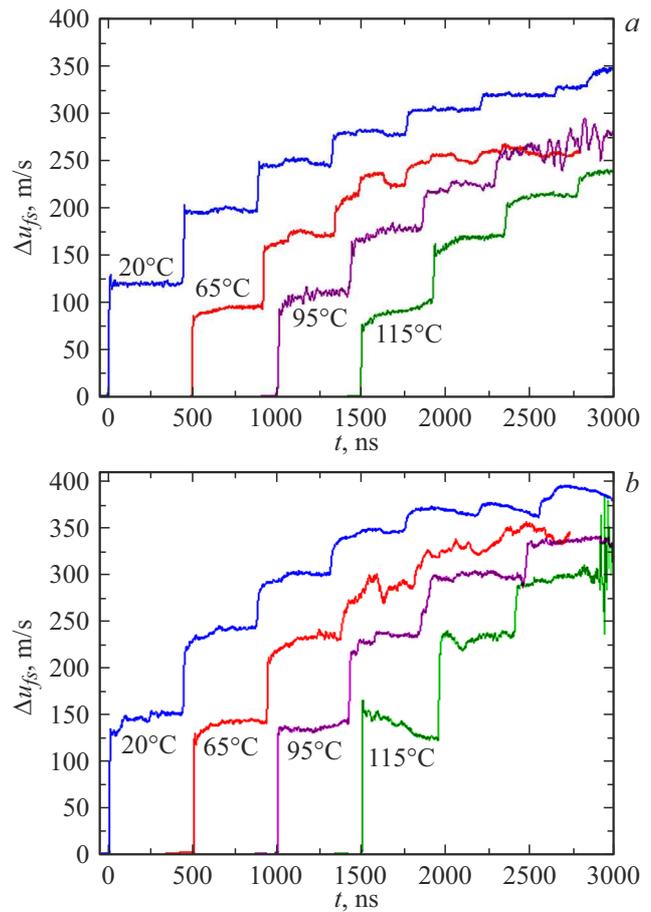


Рис. 5. Профили скорости свободной поверхности образцов натриево-известкового стекла в диапазоне температур 20–115°C при нагружении алюминиевым ударником толщиной 7 мм, разогнанного до скорости 210 (*a*) и 260 м/с (*b*).

стеклянной пластины и толщиной фольги. Результаты измерений с хорошей точностью демонстрируют равенство времен для каждой ступени внутри каждого эксперимента. Отношение толщины стеклянной пластины с учетом наклеенной фольги к разнице времени между выходами на свободную поверхность ступеней с хорошей точностью определяет измеренное значение продольной скорости звука натриево-известкового стекла.

На рис. 6 представлен пример восстановленных значений давления и массовой скорости на каждой „ступеньке“ при реверберации волны в стекле одного из профилей скорости свободной поверхности, показанных на рис. 5. При выходе ударной волны из АБС-пластика в стекло оба материала приобретают одинаковую массовую скорость и давление. Соответствующая точка на P – u диаграмме определяется как пересечение ударной адиабаты стекла, построенной из значения скорости свободной поверхности, равной нулю, и изэнтропы разгрузки, построенной из значения скорости свободной поверхности, равной скорости свободной поверхности

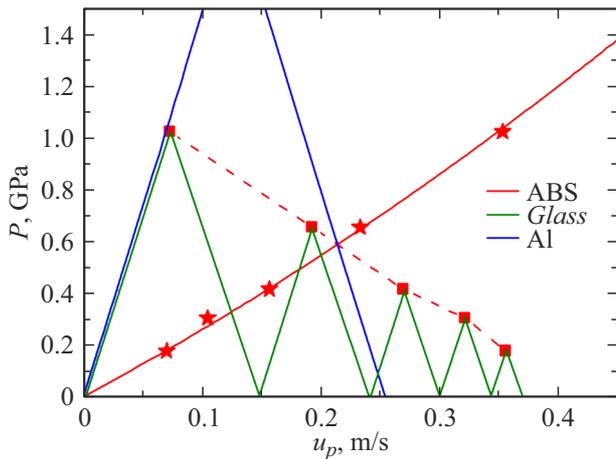


Рис. 6. $P-u_p$ диаграмма ударно-волновых взаимодействий в экспериментах по измерению ударной адиабаты.

на первой ступеньке. В области упругого деформирования стекла зеркально отраженная адиабата относительно точки пересечения должна полностью совпадать с изэнтропой разгрузки. После следующего отражения волны разгрузки от АБС-пластика в виде волны сжатия алгоритм определения дальнейших точек равенства давлений и массовых скоростей аналогичен определению первой. При этом ударная адиабата стекла выходит из точки со значением скорости свободной поверхности предыдущей ступени, а адиабата, описывающая волну разгрузки, из точки со значением скорости свободной поверхности следующей ступени. Каждая такая точка на границе АБС-пластик–стекло на рис. 6 отмечена красным квадратом. Точки на рис. 6, отмеченные красной звездой, являются искомыми значениями давление–массовая скорость для АБС-пластика, полученными с помощью зеркального отражения относительно пересечения с адиабатой торможения алюминия, совпадающей со значением скорости ударника. Схожая постановка экспериментов для определения ударной адиабаты в полимочевине была предложена в работе [20]. Данные об изменении скорости звука и плотности натриево-известкового стекла в зависимости от температуры взяты из работ [21–23]. Из полученных зависимостей $P-u_p$ для АБС-пластика с использованием соотношения $P = \rho_0 \cdot U_S \cdot u_p$ определялась зависимость U_S-u_p .

На рис. 7 представлены полученные зависимости U_S-u_p для АБС-пластика в исследуемом температурном диапазоне. 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 , $U_S = c_0 + bu_p$, где коэффициент b определяется наклоном линейной зависимости. С ростом температуры полученные зависимости U_S-u_p лежат ниже, чем адиабаты при более низкой температуре, как следствие — с ростом темпе-

ратуры снижается объемная скорость звука. Наклон ударных адиабат, характеризуемых коэффициентом b , остается приблизительно одинаковым 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 km/s , значительно ниже $c_0 = 2.371 \text{ km/s}$, поэтому выход упругого предвестника на свободную поверхность невозможен.

На рис. 8 представлены полученные из анализа волновых профилей значения откольной прочности АБС-пластика в диапазоне температур $20-115^\circ\text{C}$. Видно, 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, как плотность и объемная скорость звука, но при этом происходит рост декремента скорости

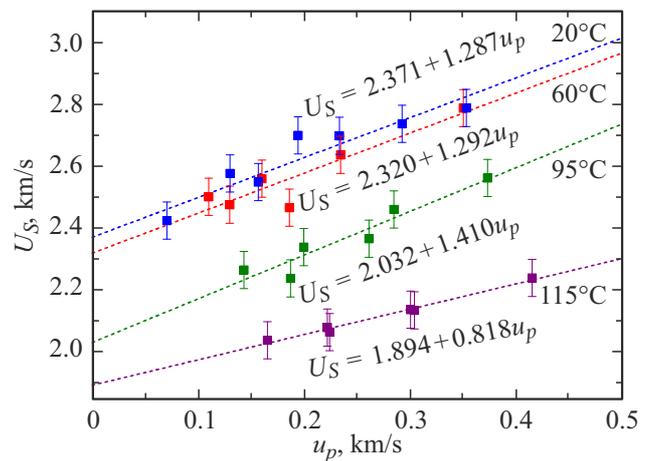


Рис. 7. Результаты измерений ударной адиабаты АБС-пластика в диапазоне температур $20-115^\circ\text{C}$.

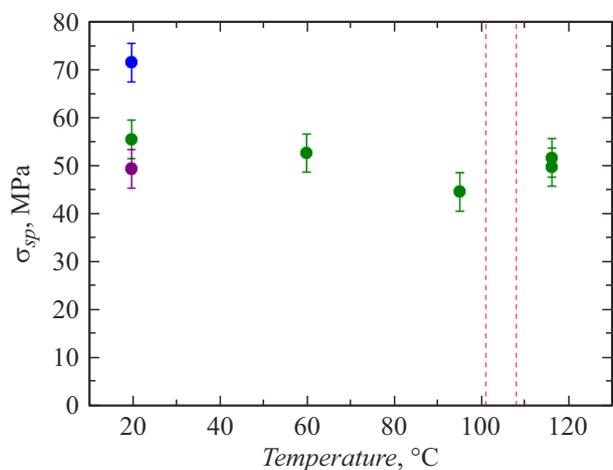


Рис. 8. Зависимость откольной прочности АБС-пластика от начальной температуры; пунктирами показаны температуры начала и окончания стеклования.

Δu_{fs} . Величина откольной прочности при превышении температуры стеклования не падает резко, как это происходит для поликарбоната [12] или ПММА [11], а лишь незначительно снижается. Причем, по сравнению с откольной прочностью АБС-пластика, непосредственно перед процессом стеклования она даже несколько возрастает. Причину этого явления можно попробовать 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 работе [9], приводит к увеличению гомогенности материала. Вполне вероятно, что именно неоднородность АБС-пластика является причиной невысокой откольной прочности при низких температурах. Оценка скоростей деформирования в волне разгрузки перед откольным разрушением показала, что при росте температур от 20 до 95°C регистрируется незначительное увеличение скорости деформирования от $9.3 \cdot 10^4$ до $11.2 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ соответственно. При 115°C скорость деформирования перед откольным разрушением уменьшилась и составила $5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$.

Заключение

Проведены эксперименты по ударно-волновому нагружению образцов АБС-пластика амплитудой до 0.86 ГПа в диапазоне температур 20–115°C с регистрацией профилей скорости свободной поверхности лазерным интерферометром VISAR. Из анализа волновых профилей установлена зависимость величины откольной прочности от температуры при максимальном напряжении сжатия 0.6 ГПа. Зарегистрирован незначительный рост величины откольной прочности при переходе из стеклообразного состояния в высокоэластичное, предложено объяснение этого явления вследствие изменения внутренней структуры материала. Для расчета откольной прочности АБС-пластика в исследуемом температурном диапазоне проведены измерения массовой скорости и скорости ударной волны. По полученным экспериментальным данным с использованием известных характеристик натриево-известкового стекла построены ударные адиабаты АБС-пластика в диапазоне максимальных напряжений ударного сжатия до 1 ГПа в диапазоне температур 20–115°C. С ростом температуры объемная скорость звука — первый член линейной зависимости $U_S = c_0 + bu_p$ — падает, а коэффициент b меняется незначительно до температуры стеклования и резко снижается при ее превышении.

Финансирование работы

Работа выполнена с использованием оборудования Московского регионального взрывного центра коллективного пользования РАН по теме Государственного задания № АААА-А19-119071190040-5.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T.J. Holmquist, J. Bradley, A. Dwivedi, D. Casem. *The Europ. Phys. J. Special Topics*, **225**, 343 (2016). DOI: 10.1140/epjst/e2016-02636-5
- [2] N.K. Bourne. *J. Dynamic Behavior Mater.*, **2**, 33 (2016). DOI: 10.1007/s40870-016-0055-5
- [3] J. Richeton, S. Ahzi, K.S. Vecchio, F.C. Jiang, R.R. Adharapurapu. *Intern. J. Solids Structures*, **43**, 7 (2006). DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.06.040
- [4] L.M. Barker, R.E. Hollenbach. *J. Appl. Phys.*, **41** (10), 4208 (1970). DOI: 10.1063/1.1658439
- [5] B.E. Clements. *AIP Conf. Proceed.*, **1195** (1), 1223 (2009). DOI: 10.1063/1.3295025
- [6] Z.N. Yin, T.J. Wang. *Mater. Sci. Eng.: A*, **527** (6), 1461 (2010). DOI: 10.1016/j.msea.2009.11.025
- [7] A.A. Chevrychkina, G.A. Volkov, A.D. Estifeev. *Proced. Structural Integrity*, **6**, 283 (2017). DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.043
- [8] S. Sharma, S. Chandra, V.M. Chavan, A.K. Nayak. *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.*, **1248** (1), 012009 (2022). DOI: 10.1088/1757-899X/1248/1/012009
- [9] С.А. Атрошенко, А.А. Чеврычкина, А.Д. Евстифеев, Г.А. Волков. *ФТТ*, **61** (11), 2103 (2019). DOI: 10.21883/FTT.2019.11.48414.364 [S.A. Atroshenko, A.A. Chevrychkina, A.D. Evstifeev, G.A. Volkov. *Phys. Solid State*, **61** (11), 2075 (2019). DOI: 10.1134/S1063783419110052]
- [10] E.B. Zaretsky, G.I. Kanel. *J. Appl. Phys.*, **126** (8), 085902 (2019). DOI: 10.1063/1.5116075
- [11] И.А. Черепанов, А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов. *ЖТФ*, **65** (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]
- [12] Г.И. Канель. *ТВТ*, **58** (4), 596 (2020). DOI: 10.1134/S0018151X20040057
- [13] M.E. Brown, P.K. Gallagher. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry: Recent Advances, Techniques and Applications* (Elsevier, 2011)
- [14] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.S. Savinykh, A. Rajendran, Z. Chen. *AIP Conf. Proceed.*, **845**, 876 (2006). DOI: 10.1063/1.2263461
- [15] L.M. Barker, R.E. Hollenbach. *J. Appl. Phys.*, **43** (11), 4669 (1972). DOI: 10.1063/1.1660986
- [16] Ю.Б. Калмыков, Г.И. Канель, И.П. Пархоменко, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. *ПМТФ*, **1**, 126 (1990).
- [17] G.I. Kanel. *Intern. J. Fracture*, **163**, 173 (2010). DOI: 10.1007/s10704-009-9438-0

- [18] Г.И. Канель. ПМТФ, **42** (2), 194 (2001).
- [19] D.O. Kazmer, A.R. Colon, A.M. Peterson, S.K. Kim. Additive Manufacturing, **46**, 102106 (2021).
DOI: 10.1016/j.addma.2021.102106
- [20] H. Carré, L. Daudeville. J. Physique IV, **6** (1), 175 (1996).
DOI: 10.1051/jp4:1996117
- [21] J.L. Jordan, D.T. Casem, J. Robinette. J. Appl. Phys., **131** (16), 165903 (2022). DOI: 10.1063/5.0082477
- [22] A.K. Varshneya, J.C. Mauro. *Fundamentals of Inorganic Glasses* (Elsevier, 2019)
- [23] E. Symoens, R. Van Coile, J. Belis. Glass Structures Eng., **7** (3), 457 (2022). DOI: 10.1007/s40940-022-00197-7