

07,14

## Разрушение АБС-пластика в стеклообразном состоянии при динамическом нагружении

© С.А. Атрошенко<sup>1,2</sup>, А.А. Чеврычкина<sup>1,2,¶</sup>, А.Д. Евстифеев<sup>1</sup>, Г.А. Волков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем машиноведения РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: Anastasiia.Che@gmail.com

Поступила в Редакцию 24 января 2019 г.

В окончательной редакции 24 января 2019 г.

Принята к публикации 6 июня 2019 г.

Статья посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию механизмов разрушения АБС-пластика в интервале скоростей деформации  $10^{-4}$ – $10^3$  1/s при разной температуре испытаний (от комнатной температуры — 23 до 100°C). Анализируется смена вида разрушения в зависимости от скорости деформации и температуры. На основе структурно-временного подхода предложена модель температурно-скоростной суперпозиции.

**Ключевые слова:** АБС-пластик, динамическое нагружение, стеклообразное состояние, критерий прочности, фрактографический анализ.

DOI: 10.21883/FTT.2019.11.48414.364

### 1. Введение

Полимеры являются основой класса конструкционных материалов, наряду с металлами и керамикой, на их основе производят новые материалы. К примеру, ударопрочный АБС-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол) широко используется в аддитивном производстве благодаря своей температуре стеклования, достаточно высокой для формирования и сохранения формы и достаточно безопасной для экструзии. В последнее время уделяется все больше внимания к 3D-печати, как к производству конструкционного материала. Распространение применения 3D-печати требует исследования свойств аддитивного материала в различных температурно-скоростных условиях нагружения. Для АБС-пластика, как для конструкционного материала, наиболее важно изучение прочностных свойств при температурах ниже температуры стеклования.

Для многих твердых тел выполняется принцип температурно-скоростной суперпозиции прочности материала, то есть повышение температуры влияет на поведение материала также как понижение скорости деформирования. Исследование температурно-скоростной суперпозиции проводится во многих работах [1–8].

Состояние полимера в зависимости от температуры может быть стеклообразным, высокоэластичным или вязкотекучим. В каждом из состояний подтверждается принцип температурно-скоростной суперпозиции. Исследование температурно-скоростной зависимости обычно проводится отдельно для каждого состояния полимера, например, в работе [1–3] изложено исследование прочности полимера в области температур выше температуры стеклования, в работах [4–6] показана зависимость прочности от температуры и скорости нагружения в области температур ниже температуры стеклования.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментального исследования прочности АБС-пластика в стеклообразном состоянии в диапазоне температур от 23 до 100°C и в диапазоне скоростей деформации  $10^{-4}$ – $10^3$  1/s. Статья посвящена фрактографическому исследованию АБС-пластика и согласованию полученных экспериментальных данных по температурно-скоростной зависимости прочности с позиций структурно-временного подхода [9,10].

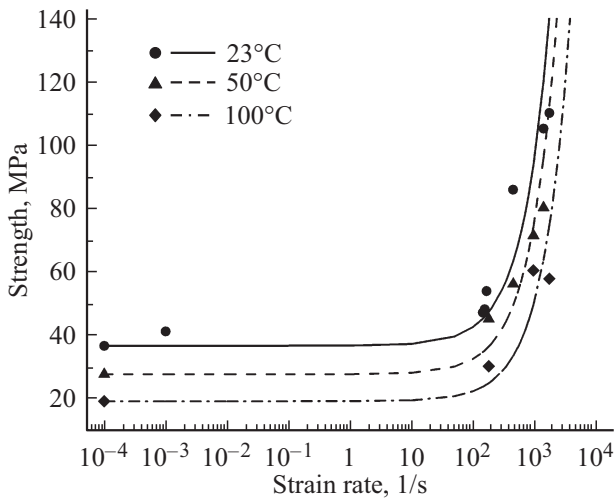
### 2. Материал и методика исследований

Испытания по определению прочностных свойств АБС-пластика проводились на башенном копре Instron Ceast 9350 с ускорителем на стандартных образцах ISO 8256, полученных методом аддитивной печати. Методика испытаний приведена в работе [11]. Микроструктурные исследования поверхности разрушения после ударных испытаний выполнялись с использованием микроскопа Axio Observer Z1-M в темном поле.

Полученные результаты позволили выявить скоростную зависимость прочности при увеличении скорости деформации, см. рис. 1, при температурах 23, 50, 100°C. Также с ростом температуры было отмечено температурное разупрочнение, а именно с увеличением температуры предельное значение прочности падает.

### 3. Расчет температурно-скоростной зависимости с позиции структурно-временного подхода

Как уже было отмечено ранее, с ростом скорости деформации был выявлен эффект повышения предельных



**Рис. 1.** Зависимость прочности от скорости деформации для разных температур. Точки соответствуют экспериментальным данным, линии — расчетным. Кривые построены по критерию (2)–(4) и значению параметров из таблицы.

значений прочности, с увеличением температуры наблюдается снижение предельных значений. Скоростная зависимость прочности хорошо описывается с позиции структурно временного подхода, где в качестве критерия разрушения выступает критерий инкубационного времени [9,10]. В основе критерия лежат принципы структурной макромеханики разрушения и понятия инкубационного времени разрушения.

В случае разрушения критерий инкубационного времени имеет вид

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \frac{\sigma(s)}{\sigma_c} ds \leq 1, \tag{1}$$

где  $\sigma(s)$  — приложенное растягивающее напряжение, линейно возрастающее со временем,  $\sigma_c$  — статическая прочность разрушения, зависящая от температуры,  $\tau$  — инкубационное время разрушения, зависящее от температуры, которое может служить мерой динамической прочности. Влияние температуры учитывается в следующих температурных зависимостях

$$\sigma_c(T) = \sigma_0 \exp\left(-a \frac{T - T_g}{T_g}\right), \tag{2}$$

$$\tau(T) = \tau_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right), \tag{3}$$

где  $T$  — температура,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_g$  — температура стеклования,  $\sigma_0, \tau_0, a, U$  — постоянные материала.

Параметры критерия (2)–(4) для АБС-пластика

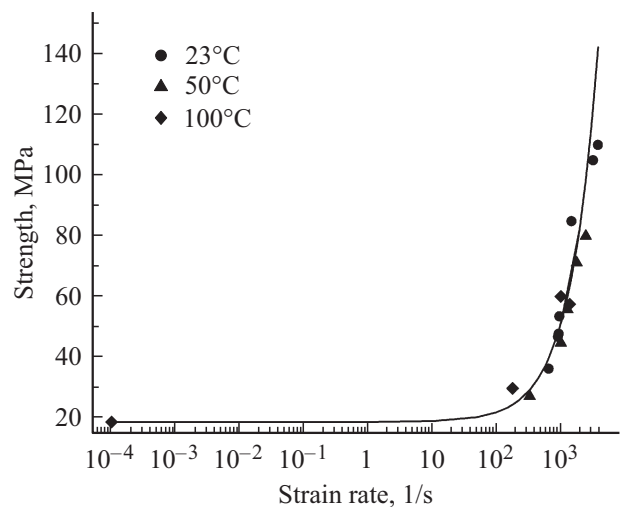
$\sigma_0$ , МПа	$E\tau_0$ , МПа · с	$U/k$ , К	$a$	$T_g$ , К
16.7	15671.4	543.7	3.1	383

В работах [8,9] показано, что критерий (1) с температурными зависимостями (2), (3) применим для металлов в широком диапазоне изменения температуры и скорости деформации.

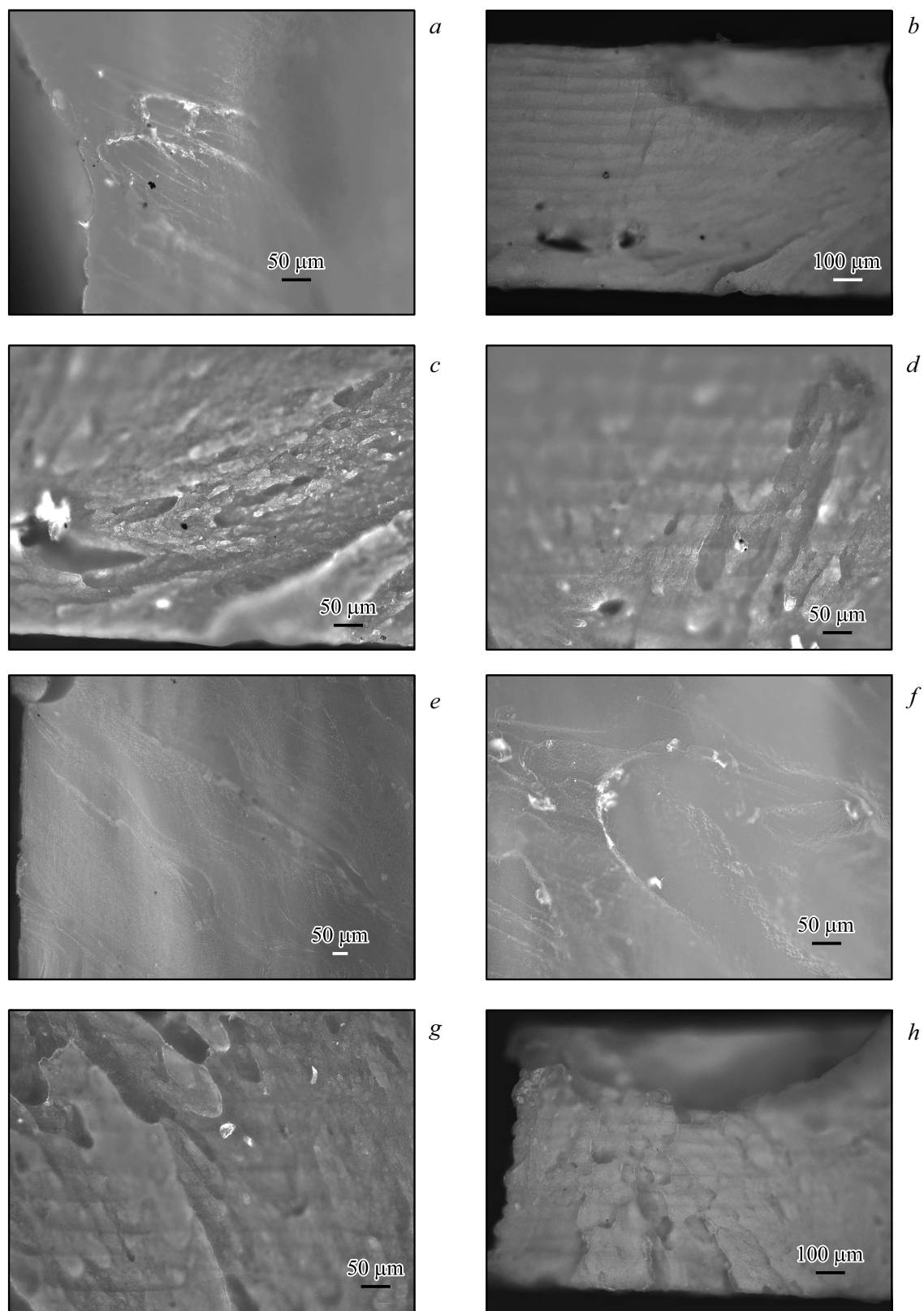
На рис. 1 приведены результаты экспериментов и расчетные кривые для АБС-пластика в квазистатическом и динамическом режимах при температурах 23, 50, 100°С, кривые соответствуют расчетам по формулам (1)–(3) с параметрами, приведенными в таблице. Представленные данные демонстрируют зависимость, которая довольно хорошо описывается критерием разрушения (1). Применимость критерия (1) для металлов и полимеров ниже температуры стеклования с одинаковыми зависимостями статической прочности (2) и инкубационного времени разрушения (3) можно объяснить тем, что механизм разрушения в обоих случаях одинаков — за счет образования микротрещин.

На основе принципа температурно-скоростной суперпозиции можно рассчитать зависимость механических свойств от скорости деформации в широком диапазоне температур. С использованием предложенного подхода можно получить данные о поведении материала в широком диапазоне изменения параметров внешнего воздействия при наличии экспериментальных данных лишь в относительно узком диапазоне. В работе наглядно продемонстрирован принцип эквивалентного действия при изменении скорости деформации и температуры. Полученные прочностные зависимости при вариации скорости приложения нагрузки и температур рассчитаны в рамках одного подхода в соответствии с моделью принципа температурно-скоростного соответствия.

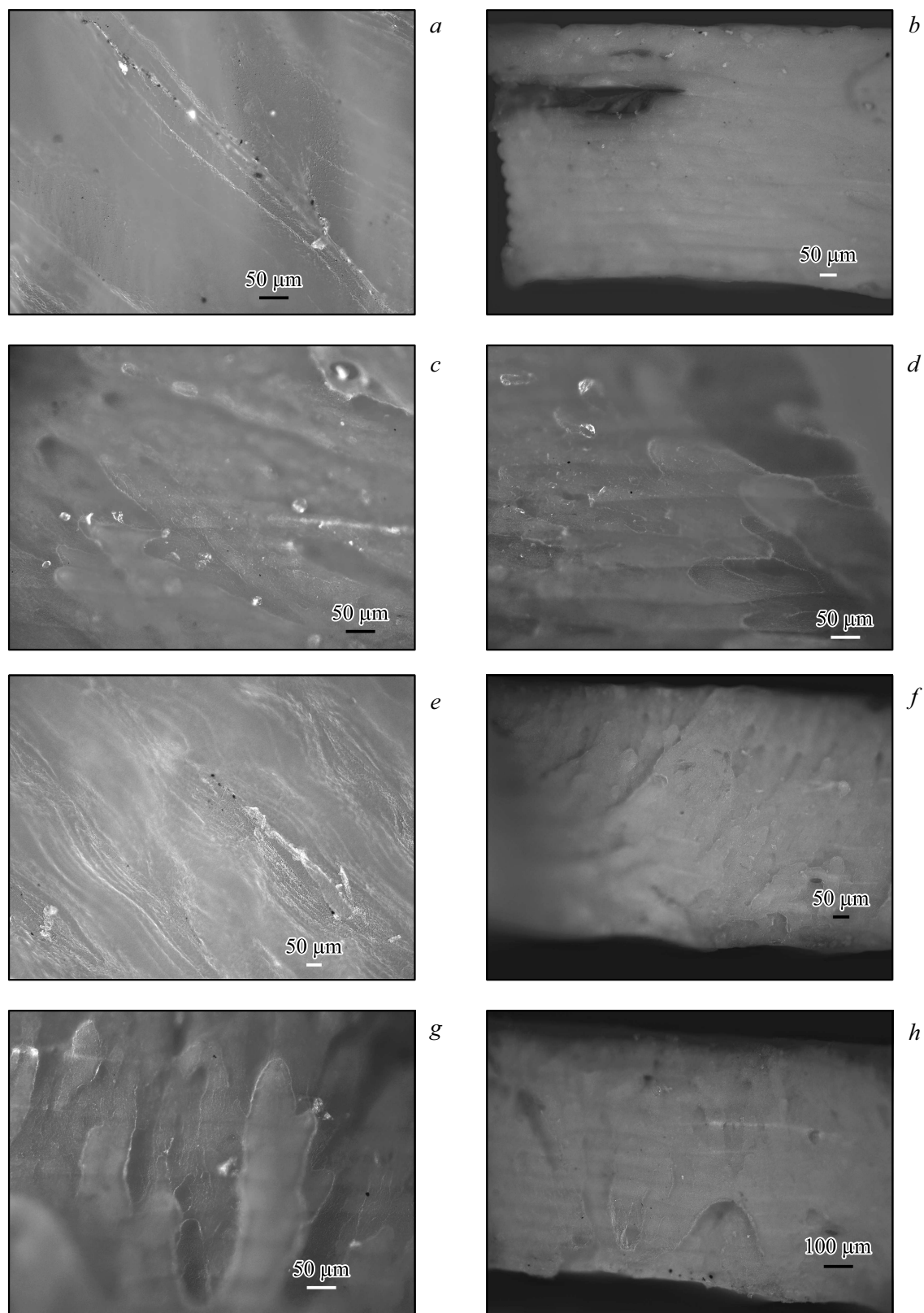
Принцип температурно-скоростной суперпозиции неоднократно подвергался проверке при исследовании поведения многих полимеров, и во многих случаях он хорошо подтверждается. К числу этих исследований относится работа [3], где рассматривается метод Вильяма–Лэндела–Ферри (ВЛФ), который строит теоретическую



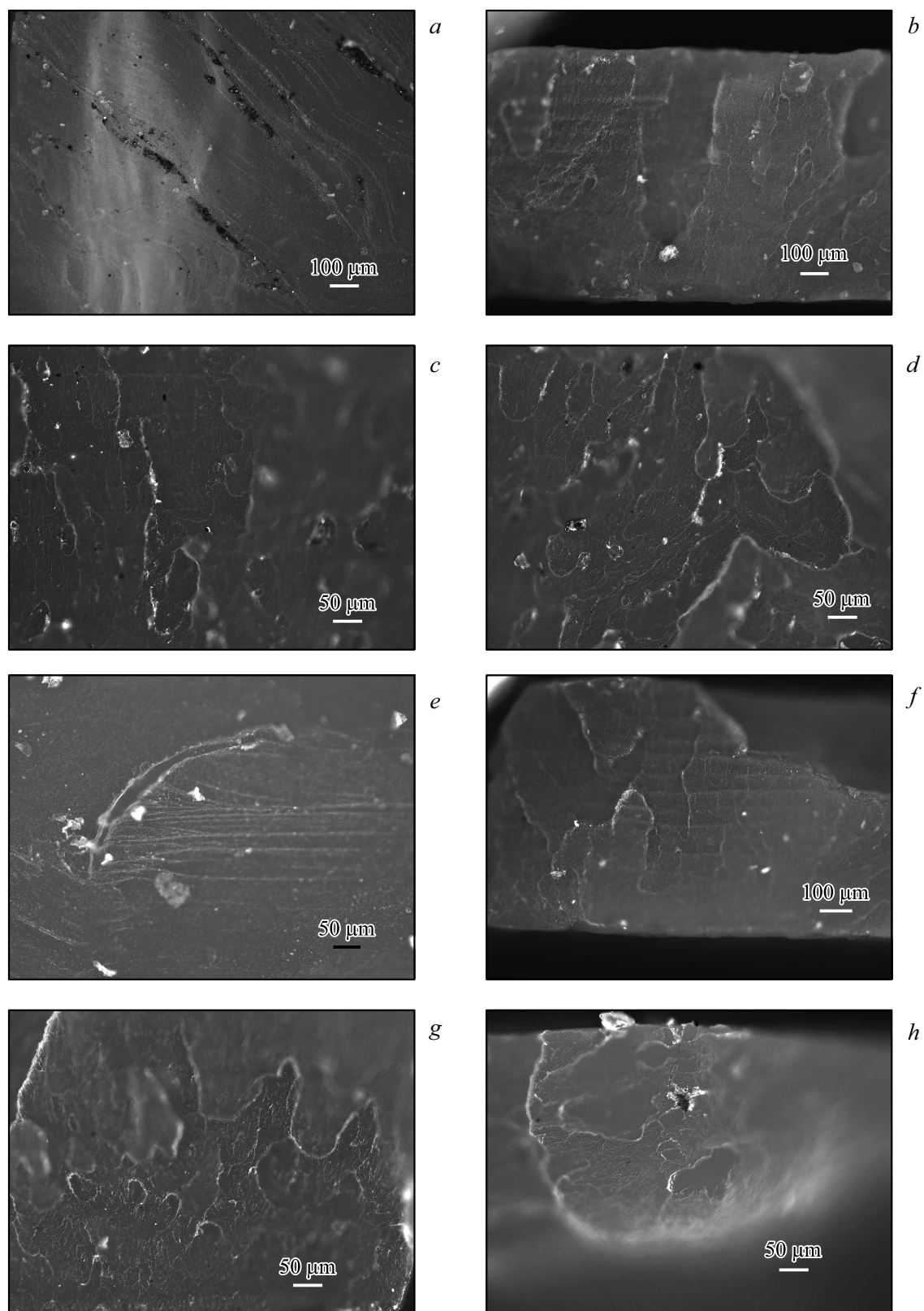
**Рис. 2.** Единая обобщенная кривая для температуры 100°С с приведенными экспериментальными данными.



**Рис. 3.** Поверхность разрушения АБС-пластика, испытанного при комнатной температуре при скорости деформации 180 1/s (*a–d*), при скорости деформации 456 1/s (*e–h*) в темном поле. Увеличение рисунков *a, c, d, e, f, g* (200 к 1); увеличение рисунков *b, h* (100 к 1).



**Рис. 4.** Поверхность разрушения АБС-пластика, испытанного при температуре 50°C при скорости деформации 456 1/s (*a-d*), при скорости деформации 987 1/s (*e-h*) в темном поле. Увеличение рисунков *a, b, c, d, e, f, g* (200 к 1); увеличение рисунка *h* (100 к 1).



**Рис. 5.** Поверхность разрушения АБС-пластика, испытанного при температуре 100°С при скорости деформации 180 1/с (*a-d*), при скорости деформации 978 1/с (*e-h*), при скорости деформации 1745 1/с (*i-l*) в темном поле. Увеличение рисунков *c, d, e, g, h, i, j, k* (200 к 1); увеличение рисунков *a, b, f, l* (100 к 1).

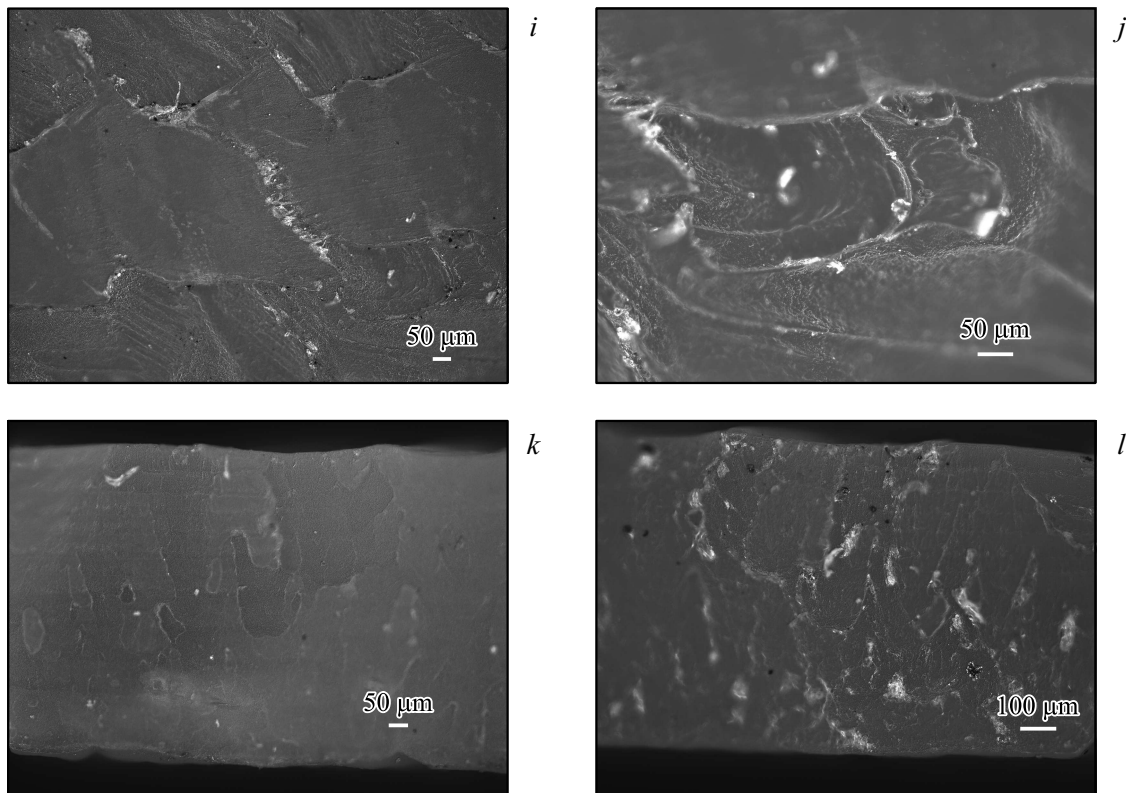


Рис. 5 (продолжение).

кривую с помощью температурного коэффициента релаксации (отношение времен релаксации при двух температурах). Метод ВЛФ работает только выше температуры стеклования, ниже температуры стеклования зависимость прочностных свойств от скорости деформации и температуры обычно строится на основе теории вязкого течения Эйринга [4–6].

Применение критерия инкубационного времени позволяет описывать поведение материала и построить единую теоретическую кривую температур для температур ниже температуры стеклования. Значение прочности  $\sigma_i$  при температуре  $T_i$  и скорости деформации  $\dot{\epsilon}_i$  соответствует значению прочности  $\sigma_j$  при температуре  $T_j$  и новой соответствующей скорости деформации  $\dot{\epsilon}_{new}$ , вычисленной по простой формуле (4). В качестве температуры отсчета удобно выбрать температуру чуть ниже температуры стеклования по аналогии с методом ВЛФ, для которого советуют выбрать температуру отсчета чуть выше температуры стеклования

$$\dot{\epsilon}_{new} = 2 \frac{\sigma_i - \sigma_c(T_j)}{E\tau(T_j)}. \quad (4)$$

На рис. 2 приведена единая обобщенная кривая для температуры 100°C, построенная на основе критерия (1)–(3) и значениях параметров из таблицы. Экспериментальные данные для температур 23, 50°C отнесены к температуре 100°C с помощью формулы (4). Структурно временной подход позволяет построить еди-

ную теоретическую кривую, не используя теорию вязкого течения Эйринга.

#### 4. Характер разрушения

АБС-пластик — термопластичный аморфный тройной сополимер трех мономеров — акрилонитрила, бутадиена и стирола и представляет собой двухфазную систему. Статистический сополимер стирола и акрилонитрила с молекулярной массой 120–180 тысяч образует непрерывную фазу — жесткую матрицу, в которой распределены частицы бутадиенстирольного каучука размером 0.5–2 μm, образующие дисперсную фазу. Доля дисперсной фазы составляет от 15 до 30% от общей массы пластика.

Структура АБС-пластика при комнатной температуре (23°C) после испытаний с различными параметрами представлена на рис. 3. При температуре 23°C после испытаний наблюдается слоистость материала при всех скоростях нагружения (рис. 3, b, d, g, h).

Трещины располагаются вдоль слоев при меньшей скорости деформации (180 1/s) (рис. 3, b) и поперек слоев, пересекая их, при скорости деформации 456 1/s. (рис. 3, g). Трещина зарождается и распространяется вдоль мест скопления включений второй фазы — бутадиенстирольного каучука при всех скоростях деформации. Параболическая область [12,13] менее ярко выражена при меньшей скорости деформации (рис. 3, a), а

область повышенной шероховатости — наоборот, более развита в образце, испытанном со скоростью 180 1/s (рис. 3, *c*). Течение материала при увеличении скорости деформации с величины 180 до 456 1/s происходит под большим углом к направлению слоев.

На рис. 4 представлена структура АБС-пластика при температуре (50°C) после испытаний с различными параметрами. При нагружении при повышенной до 50°C температуре также наблюдается слоистость материала при всех испытанных скоростях нагружения (рис. 4, *b, d, g, h*).

Трещины располагаются вдоль слоев по их границе. Трещина зарождается и распространяется вдоль мест скопления включений второй фазы — бутадиенстирольного каучука как при скорости 456 1/s (рис. 4, *a*), так и при скорости 987 1/s (рис. 4, *e*). Параболическая область в образцах со скоростями деформации 456 и 987 1/s довольно хорошо выражена, как и область повышенной шероховатости (рис. 4, *c, d, g, f*). Течение материала при обоих режимах происходит примерно под одним и тем же углом к направлению слоев.

Структура АБС-пластика при температуре (100°C) после испытаний с различными скоростями представлена на рис. 5. При росте температуры испытаний до 100°C слоистость материала становится менее заметной — происходит гомогенизация пластика при всех испытанных режимах.

Трещины располагаются под углом к слоям при скорости 987 1/s (рис. 5, *i*). Трещина зарождается и распространяется вдоль мест скопления включений второй фазы — бутадиенстирольного каучука при всех скоростях нагружения (рис. 5, *a, i*). Параболическая область во всех образцах выражена слабо, как и область повышенной шероховатости, зато появляется зеркальная область (рис. 5, *h, i*) при повышенных скоростях деформации 987 и 1745 1/s. Течение материала в образце, испытанном при малой скорости деформации 180 1/s, происходит примерно под углом 45° к направлению слоев (рис. 5, *a*), то есть по плоскостям максимальных касательных напряжений. В образце с большей скоростью деформации 987 1/s — вдоль слоев (рис. 5, *e*), а в образце с максимальной скоростью деформации 1745 1/s носит сдвиговый характер (рис. 5, *i*) и происходит по скоплениям второй фазы.

## 5. Заключение

Показано, что температурно-скоростная зависимость хорошо описывается в рамках структурно-временного подхода (1)–(3) не только в металлах, но и в полимерах, на примере АБС-пластика. Предложено построение единой теоретической кривой зависимости прочности АБС-пластика от скорости деформации на основе структурно-временного подхода.

Показано с помощью микроструктурных исследований, что трещина зарождается и распространяется вдоль мест скопления включений второй фазы — бутадиенстирольного каучука при всех скоростях деформации. При

минимальной скорости испытаний 180 1/s более развита область повышенной шероховатости, а параболическая область — менее ярко выражена. При скоростях деформации 456 и 987 1/s довольно хорошо выражена область повышенной шероховатости, как и параболическая область, что говорит о значительном поглощении энергии при распространении трещины. При повышенных скоростях деформации 987 1/s и 1745 1/s и температуре 100°C появляется зеркальная область с медленным развитием трещины, что связано с гомогенизацией структуры и повышением пластичности материала. Течение материала при температуре 100°C при испытании с малой скоростью деформации (180 1/s) происходит примерно под углом 45° к направлению слоев, то есть по плоскостям максимальных касательных напряжений. С ростом скорости деформации до 987 1/s — вдоль слоев, а в образце с максимальной испытанной скоростью деформации 1745 1/s носит сдвиговый характер и происходит по скоплениям второй фазы.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 17-11-01053. Экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ „Исследование экстремальных состояний материалов и конструкций“.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] А.П. Александров, Ю.С. Лазуркин. ЖТФ 9, 14, 1250 (1939).
- [2] А.М. Молодец. ФТТ 55, 11, 2090 (2013).
- [3] T.L. Smith. Rubber Chem. Technology 51, 2, 225 (1978).
- [4] O. Ishai. J. Appl. Polymer Sci. 11, 963 (1967).
- [5] F. Povolò, E.B. Hermida. J. Appl. Polymer Sci. 58, 1, 55 (1995).
- [6] C. Bauwens-Crowet. J. Mater. Sci. 8, 7, 968 (1973).
- [7] А.Д. Евстифеев, А.А. Груздков, Ю.В. Петров. ЖТФ 83, 7, 59 (2013).
- [8] Ю.В. Петров, Е.В. Ситникова. ЖТФ 75, 8, 71 (2005).
- [9] Y.V. Petrov, A.A. Utkin. Mater. Sci. 25, 2, 153 (1989).
- [10] Y.V. Petrov. AN USSR 321, 66 (1991).
- [11] А.Д. Евстифеев, Г.А. Волков, А.А. Чеврычкина, Ю.В. Петров. ЖТФ 4, 567 (2019).
- [12] Fracture processes in polymeric solids / Ed. B. Rousen. International Publishers, N.Y.–London–Sydney (1970). 523 p.
- [13] С.А. Атрошенко, С.И. Кривошеев, А.Ю. Петров. ЖТФ 72, 2, 52 (2002).

Редактор Т.Н. Василевская