

06

Исследование влияния размеров образцов на скорость деформации при определении прочностных динамических характеристик материала

© А.Д. Евстифеев,¹ Г.А. Волков,^{1,2} А.А. Чеврычкина,^{1,2} Ю.В. Петров^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия

² Институт проблем машиноведения РАН,
199178 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: Anastasiia.Che@gmail.com

(Поступило в Редакцию 23 января 2018 г.)

Представлены результаты тестирования аддитивного материала, изготовленного из акрилонитрил-бутадиен-стирола на 3D-принтере. Эксперименты на динамическое растяжение выполнялись с использованием башенного копра с ускорителем. Полученные на образцах разных размеров результаты продемонстрировали возможность выполнения экспериментов с высокими скоростями деформации при растяжении за счет уменьшения рабочей части образца. Теоретический анализ полученных данных с использованием критерия инкубационного времени также показал хорошее соответствие экспериментальных данных аналитическим кривым.

DOI: 10.21883/JTF.2019.04.47313.43-18

Введение

Технологии 3D-печати в последнее время находят все большее применение в повседневной жизни. И если лет десять назад они только развивались и в основном использовались для создания небольших трехмерных моделей, то сейчас они все больше внедряются в реальные производственные процессы, где производится „печать“ элементов конструкций, которые могут испытывать достаточно большие динамические нагрузки в процессе эксплуатации. Так, например, существуют проекты создания отдельных деталей автомобиля или модулей, из которых впоследствии собираются целые здания или конструкции [1]. Быстрый рост различных практических применений аддитивных технологий приводит к необходимости дополнительного изучения изменения прочностных свойств материала после этапа печати. Многие работы посвящены исследованию влияния толщины слоя [2,3], ориентации [2–4] и температуры печати [5] на механические свойства аддитивного материала. При этом с учетом потенциальных эксплуатационных условий требуется проведение экспериментальных исследований не только в случае квазистатических, но и при динамических воздействиях.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований акрилонитрил-бутадиен-стирола (ABS-пластика) в условиях статических и динамических растягивающих нагрузок. Образцы изготавливались на 3D-принтере двух размеров с целью оценки возможности повышения скорости деформации за счет уменьшения рабочей части. Дополнительно проведено сравнение полученных результатов с прочностными данными исходного материала [6]. Полученные экспериментальные данные были описаны с использованием структурно-временного подхода.

Материал

Испытанные образцы изготавливались из акрилонитрил-бутадиен-стирола (ABS), это ударопрочный технический термопласт, нетоксичный, устойчивый к агрессивным воздействиям. Минусом данного материала является его невысокая устойчивость к воздействию ультрафиолетовых солнечных лучей. ABS-пластик является одним из наиболее широко используемых полимерных материалов для производства различных пластиковых изделий в разных сферах: автомобилестроение, производство крупной и мелкой бытовой техники и др. Также ABS-пластик является популярным экструзионным материалом, так как его температура стеклования достаточно высокая, чтобы не возникало деформаций при небольшом нагреве, но достаточно низкая для безопасной экструзии с помощью стандартных установок.

В настоящей работе исследовались образцы, напечатанные из ABS-пластика на 3D-принтере. Механические характеристики образцов при скорости деформации $\dot{\epsilon}$ 0.001 1/s были определены на установке ShimadzuAG-50kNX. Было получено, что модуль Юнга E равен 1700 МПа, прочность на растяжение σ_c – 40 МПа.

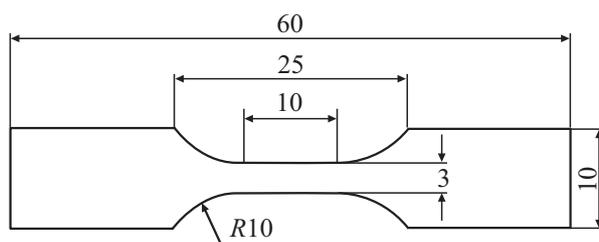


Рис. 1. Геометрические размеры образца № 1 в соответствии с ISO 8256, размеры — в миллиметрах.

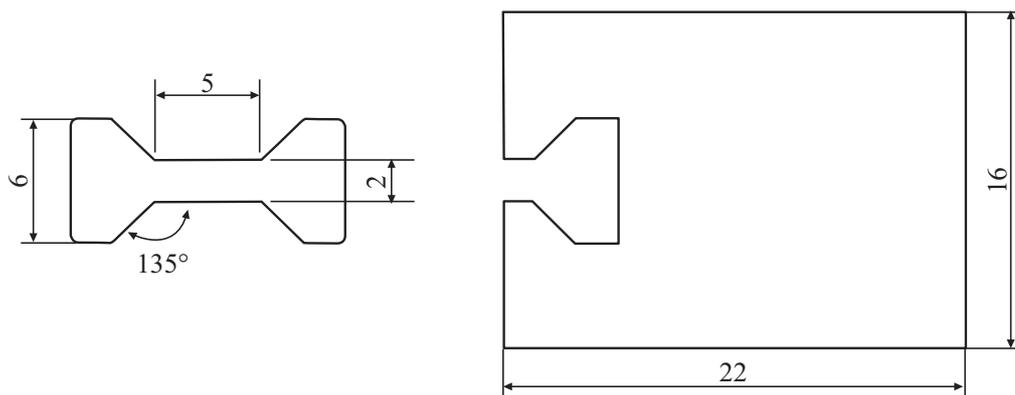


Рис. 2. Геометрические размеры образца № 2 и дополнительного захвата, размеры — в миллиметрах.

Методика динамических испытаний на растяжение

Работы по исследованию прочностных характеристик материала в условиях динамического растяжения ведутся, начиная со второй половины 20-го столетия. Наиболее распространенными экспериментальными схемами являются метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) [7–9], динамические испытания по отколу [10,11], сервогидравлической машины [12] и башенные копры [13]. Необходимо отметить, что в экспериментах по схеме Кольского фиксация сигналов при разрушении и их последующая интерпретация являются довольно сложной задачей. Также при обработке результатов по откольному разрушению наблюдаются достаточно большие трудности в интерпретации сигналов, полученных методами интерферометрии. Также работа на вышеупомянутых установках требует большого опыта и серьезных навыков со стороны экспериментатора. Обычно высокие скорости деформации реализуются на установках РСГ, малые и средние скорости деформации на сервогидравлических машинах и башенных копрах. В связи с этим была предпринята попытка провести высокоскоростные испытания по растяжению на наиболее простом в использовании, стандартном оборудовании, позволяющем получать скоростные зависимости прочности, для различных материалов.

В настоящей работе представлены данные высокоскоростной зависимости прочности для двух типов образцов № 1 и № 2 (рис. 1,2), которые были получены на сертифицированном оборудовании — башенном копре Instron CEAST 9350. Испытательная машина позволяет реализовать скорости деформации порядка 10^2 – 10^3 1/s для образцов № 1.

Скорость деформации определяется, как $\dot{\epsilon} = v/l$, где v — скорость перемещения, l — длина рабочей части образца. Скорость перемещения в испытаниях на растяжение на установке Instron Ceast 9350 определяется

по формуле

$$v(t) = v_0 - \int_0^t \frac{F(s) - mg}{m} ds, \quad (1)$$

где v_0 — скорость падающего груза перед ударом, которая зависит от массы падающего груза и высоты падения, $F(t)$ — регистрируемое датчиком усилие в образце в момент времени t , m — масса падающего груза, g — ускорение свободного падения. Правая часть в формуле (1) состоит из двух слагаемых — начальной скорости v_0 и интеграла $\int_0^t \frac{F(s) - mg}{m} ds$. Значение интеграла находится в рамках 2% от v для образцов двух типов при рассмотренных режимах нагружения. Таким образом, можно принять, что скорость перемещения практически постоянна и не зависит от длины рабочей части образца. Следовательно, можно увеличить скорость деформации за счет уменьшения длины рабочей части образца при тех же внешних условиях, что и было реализовано в последующих испытаниях.

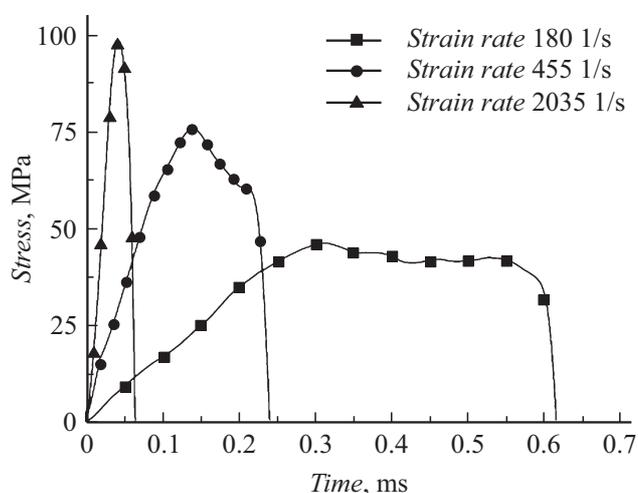


Рис. 3. Временная зависимость напряжения при растяжении образцов при различных скоростях деформирования.

Первая серия экспериментов включала проведение испытаний на статическое и динамическое растяжение образцов № 1, размеры которых соответствовали стандарту ISO 8256 (рис. 1) [14]. В целях увеличения скорости деформации были изготовлены образцы № 2 с длиной рабочей части в 2 раза меньшей (рис. 2). Для образцов № 2 были изготовлены специальные захваты (рис. 2), использование которых позволило снизить деформацию, получаемую образцами при их фиксации.

Запись данных при растяжении на копке происходит в автоматизированном режиме. На рис. 3 представлены хронограммы усилий для трех скоростей деформации. Эти данные иллюстрируют хорошее качество сигнала. Видно, что с ростом скорости приложения нагрузки увеличиваются предельные нагрузки, которые может выдержать материал. Далее будет показано, что эта зависимость между прочностью и скоростью деформации образца носит нелинейный характер и вполне закономерна.

Результаты и обсуждение

Испытания образцов из ABS-пластика выполнялись при квазистатических и динамических растягивающих нагрузках. Как уже было отмечено ранее, с ростом скорости деформации был выявлен эффект повышения предельных значений прочности. Эта особенность поведения материала хорошо описывается с использованием структурно-временного подхода, где в качестве критерия разрушения выступает критерий инкубационного времени [15,16]:

$$\frac{1}{\tau_c} \int_{t-\tau_c}^t \frac{\sigma(s)}{\sigma_c} ds \leq 1, \quad (2)$$

где σ — приложенное растягивающее напряжение, линейно возрастающее со временем, σ_c — статический

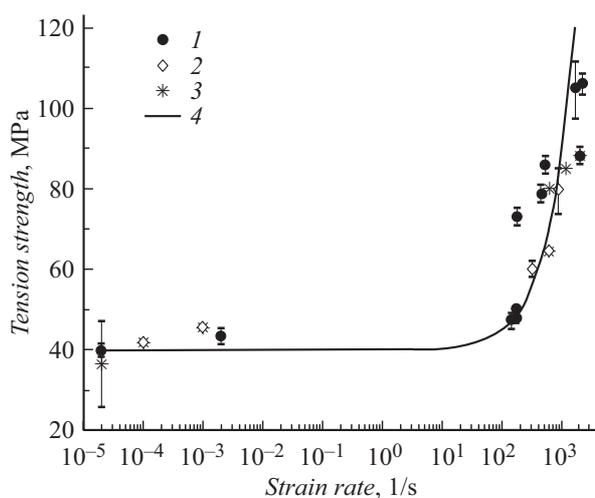


Рис. 4. Зависимость прочности на растяжение от скорости деформации для ABS-пластика: 1 — образцы по ISO 8256, 2 — уменьшенные образцы, 3 — исходный филамент [6], 4 — теоретическая кривая, построенная по критерию (2) с параметрами материала $E = 1700$ ГПа, $\tau_c = 57 \mu\text{s}$, $\sigma_c = 40$ МПа.

предел прочности при растяжении, τ_c — инкубационное время разрушения, отвечающее за прочность материала в условиях динамических нагрузок.

На рис. 4 представлены экспериментальные данные по двум типам образцов, напечатанным на 3D-принтере, и исходному материалу [6], не подвергнутому экструзии. В работе [6] изучалось поведение ABS-пластика при динамическом растяжении, экспериментальное исследование проводилось на установке РСГ. Хорошее совпадение прочности аддитивного и исходного материалов обусловлено тем, что толщина слоя печати равна 0.06 mm и печать проводилась перекрестно под 45° к продольной оси. Согласно [3], это один из способов печати, при котором прочность при растяжении получается наибольшей. Получено хорошее соответствие экспериментальных данных теоретической кривой, построенной с использованием критерия инкубационного времени (2). Определены параметры материала $E = 1700$ МПа, $\tau_c = 57 \mu\text{s}$, $\sigma_c = 40$ МПа.

Заключение

Для определения прочностных свойств ABS-материала в условиях растягивающих нагрузок были использованы разрывная машина Shimadzu AG-50kNX и башенный копер Instron CEAST 9350. Квазистатические испытания показали полное совпадение прочностных и упругих характеристик материала для двух типов образцов. При этом сравнительные динамические испытания показали, что уменьшение рабочей части образца позволяют проводить испытания при высоких скоростях деформации без использования ускорителя. Скорости порядка 10^3 1/s на „больших“ образцах стандарта ISO 8256 достигались только при близких к предельным значениям высоты около 25 m, в то время как для уменьшенных образцов было достаточно одного метра. Это показывает принципиальную возможность увеличения скоростного диапазона испытаний на данном копке до скоростей деформаций $\sim 10^5$ 1/s.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-51-80008. Раздел 3 выполнен А.А. Чеврычкиной при поддержке РНФ 17-11-01053. Экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ „Исследование экстремальных состояний материалов и конструкций“.

Список литературы

- [1] *Lim S., Buswell R.A. et al. // Automation in Construction. 2012. Vol. 21. P. 262–268.*
- [2] *Hart K.R., Wetzel E.D. // Engineer. Fracture Mech. 2017. Vol. 177. P. 1–13.*
- [3] *Ziemian S., Okwara M., Ziemian C.W. // Rapid Prototyp. Journ. 2015. Vol. 21. N 3. P. 270–278.*
- [4] *Sood A.K., Ohdar R.K., Mahapatra S.S. // Mater. Design. 2010. Vol. 31. N 1. P. 287–295.*

- [5] *Rodríguez J.F., Thomas J.P., Renaud J.E.* // Rapid Prototyp. Journ. 2001. Vol. 7. N 3. P. 148–158.
- [6] *Yin Z.N., Wang T.J.* // Mater. Sci. Engineer. 2010. Vol. 527. P. 1461–1468.
- [7] *Owolabi G. et al.* // Intern. J. Mechan. Mater. Engineer. 2016. Vol. 11. N 1. P. 3.
- [8] *Bragov A.M., Lomunov A.K.* // Int. J. Impact Eng. 1995. Vol. 16. P. 321–330.
- [9] *Lindholm U.S.* // J. Mechan. Phys. Sol. 1964. Vol. 12. N 5. P. 317–335.
- [10] *Златин Н.А., Мочалов С.М., Пугачев Г.С., Брагов А.М.* // ФТТ. 1974. Т. 16. Вып. 6. С. 1752–1755.
- [11] *Shiro Kubota, Yuji Ogata, Yuji Wada, Ganda Simangunsong, Hideki Shimada, Kikuo Matsui* // Intern. J. Rock Mechan. Mining Sci. 2008. N 45. P. 397–406.
- [12] *Xiao X.* // Polymer Testing. 2008. Vol. 27. N 2. P. 164–178.
- [13] *Dean G., Read B.* // Polymer Testing. 2001. Vol. 20. N 6. P. 677–683.
- [14] *Чеврычкина А.А., Евстифеев А.Д., Волков Г.А.* // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 3. С. 392–395.
- [15] *Петров Ю.В.* // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321. № 1. С. 66–68.
- [16] *Petrov Y.V., Utkin A.A.* // Mater. Sci. 1989. Vol. 25. N 2. P. 153–156.