

05

Исследование прочностных характеристик акрилонитрилбутадиенстирол пластика при динамических нагрузках

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

¹ Институт проблем машиноведения РАН,
199178 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: anastasiia.che@gmail.com

(Поступило в Редакцию 12 июля 2017 г.)

Проведены экспериментальные исследования по определению механических свойств аддитивного материала, изготовленного из акрилонитрилбутадиенстирол пластика на 3D принтере, в квазистатическом и динамическом режимах. С помощью критерия инкубационного времени построена прочностная кривая, описывающая нелинейную зависимость критического напряжения от скорости деформации. Определено значение характерного инкубационного времени τ сопоставлением теоретической кривой с экспериментальными данными.

DOI: 10.21883/JTF.2018.03.45596.2430

Введение

В настоящее время все большее внимание уделяется методам 3D печати [1]. Хотя эти методы уже много лет применяются в промышленности, разработка относительно дешевых потребительских 3D принтеров придала аддитивным технологиям производства новый импульс. Сегодня многие люди ожидают отличного будущего для 3D печати. Некоторые эксперты считают, что эти методы могут привести к новой промышленной революции и в будущем наши здания будут напечатаны на строительной площадке.

Несмотря на весь потенциал 3D печати вообще и 3D печати в строительной отрасли, в частности, еще необходимо исследовать свойства напечатанного материала, чтобы его можно было бы применить в строительной индустрии. Важно знать, как себя поведет материал в различных условиях эксплуатации. Критическое напряжение, при котором материал разрушается, является одной из основных характеристик материала. Известно, что для многих материалов, например бетона и горных пород, при увеличении скорости деформации критическое напряжение растет [2–4]. В 1974 г. Н.А. Златиным и его коллегами [5] экспериментально был получен эффект наличия „динамической ветви“ при динамических разрушениях. А именно была зафиксирована возможность выдерживать материалами кратковременные нагрузки, многократно превосходящие их статический предел прочности, данный эффект хорошо описывается критерием инкубационного времени [6–8].

Основными целями настоящей работы являются определение прочностных характеристик продуктов 3D печати в условиях экстремальных нагрузок и анализ полученных эффектов с использованием структурно-временного подхода.

1. Развитие динамических методов исследования материалов

Хорошо известно, что многие материалы при динамических и квазистатических нагрузках ведут себя по-разному. Ранние работы в этой области принадлежат В. Норкисону [9] и W. Мансону [10], они использовали падающий наконечник для получения импульса растяжения. Гинс (Ginns) [11], используя пружинный механизм для приложения внезапной нагрузки и тензодатчика для измерения напряжения, был одним из первых, кто попытался напрямую записать динамическую кривую напряжения — деформации. Позже Brouw и Vincent [12] с помощью маятниковой ударной машины и пьезоэлектрических кристаллов для измерения напряжений получили кривые напряжения — деформации непосредственно на экране осциллографа.

До 1940 г. измерение напряжения всегда включало один из двух методов. Напряжение вычислялось из соотношений теории распространения упругих волн и поэтому было ограничено упругой областью или использовался метод с полумеханической измерительной головкой напряжения, что почти всегда сопровождалось большими колебаниями напряжения. Однако в 1940 г. Fanning и Bassett [13] разработали методику измерения ударных деформаций с помощью тензорезисторов с электрическим сопротивлением, а в 1948 г. Brown и Edmonds [14] применили ударную маятниковую машину типа Брауна и Винсента. Это позволило фиксировать импульсы напряжения растяжения во времени, которые не искажали колебания напряжения, возникающие в измерительной головке.

Большинство исследователей, помимо Норкинсона и Мансона, игнорировали влияние распространения волны напряжения в образце, считая, что напряжение, измеренное на конце образца, эквивалентно напряжению во всем

образце. Гэст (Guest) [15] в 1930 г. пришел к выводу, что, когда скорость удара достаточно высока, распространение и отражение волн напряжения в испытательной установке, если их игнорировать, могут привести к значительным ошибкам в результатах. Это было показано в 1948 г. в работах Clark и Duwez [16], в которых применена теория распространения пластических волн к испытаниям на растяжение.

Clark и Wood [17] в работе 1949 г. описали устройство нового типа растягивающей машины, в которой сила приложена пневматически и достигает максимального значения в течении $5 \mu\text{s}$. Такой тип нагружения они называли „быстрым“, под которым они подразумевали динамическое нагружение со скоростями, при которых эффект распространения волны напряжения в аппарате пренебрежимо мал. Это отличается от ударного нагружения, когда волновые эффекты должны быть приняты во внимание.

Campbell and Duby [18] в 1956 г. были первыми, кто выполнил ударную нагрузку на аппарате, спроектированном специально для анализа результатов в терминах волнового распространения. Они смогли получить значение предела текучести мягкой стали, когда время воздействия $25 \mu\text{s}$ и максимальная скорость деформации порядка 1000 s^{-1} .

В настоящее время наиболее востребованной экспериментальной методикой в мире для исследования динамического поведения материалов при скоростях деформаций порядка $10^2 - 10^4 \text{ s}^{-1}$ является метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) или его модификации. Изначально этот метод был предназначен только для испытания на одноосное сжатие, метод постоянно совершенствовался и на сегодняшний день существуют сжимающий, растягивающий, крутильный, сдвиговой и двусосный варианты метода РСГ.

В настоящей работе исследования динамических характеристик аддитивного материала проводились на башенном копре Instron CEAST 9350 при скорости деформации порядка $10^2 - 10^3 \text{ s}^{-1}$.

2. Материал и методика исследования

В настоящей работе рассматривается аддитивный материал, изготовленный из акрилонитрилбутадиенстирол (ABS) пластика на 3D принтере. Образцы соответствуют стандарту ISO 8256 методу А, внешний вид и геометрия образцов приведены на рис. 1. Печать образцов проводилась послойно, толщина слоя 0.06 mm .

Испытания проведены для 10 различных скоростей деформации от $2 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$. Для каждой скорости деформации было проведено 5 испытаний.

2.1. Квазистатические свойства

Квазистатические исследования проводились на установке Shimadzu AG-50kNXD, оборудованной экстензометром, при скорости деформации $2 \cdot 10^{-3}$ и $2 \cdot 10^{-5}$.

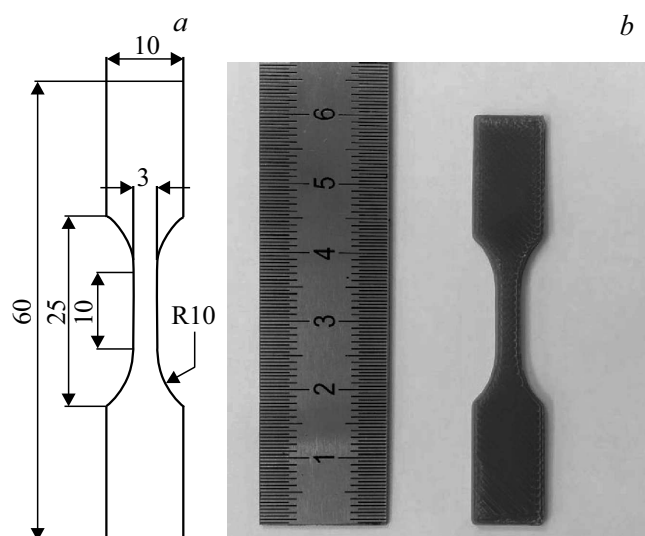


Рис. 1. *a* — геометрия и размеры образца (толщина образца 1 mm), *b* — внешний вид испытуемых образцов.

Свойства материалов

Свойства	Образец	Филамент
E , МПа	1700	1700–2930
σ_c , МПа	36.5	26–47

Значение модуля Юнга определялось как угол наклона линейно-упругой части кривой напряжение — деформации, т. е. $E = d\sigma/d\varepsilon$. Предел прочности определялся как максимальная сила к площади сечения образца. Значения модуля упругости и предела прочности приведены в таблице. Стоит отметить, что полученные в опытах величины модуля Юнга и предела прочности для напечатанных образцов находятся в интервале значений, указанных производителем, для исходного материала.

2.2. Динамические свойства

Динамические исследования производились на башенном копре Instron Ceast 9350 с функцией дополнительной энергии, скорость ударника от 0.77 до 24 m/s .

Образец помещается таким образом, что нижний конец помещен в захваты, по которым приходится удар с заданной скоростью ударника. Верхняя часть закреплена на неподвижной стойке, на которой находится пьезоэлектрический датчик силы. Типичный профиль силы от времени для трех разных скоростей деформации 180 , 455 и 2035 1/s для проведенных испытаний приведен на рис. 2. Напряжение линейно возрастает до своего максимального значения, затем значение силы немного уменьшается и держится постоянным некоторое время, в это время в образце развиваются процессы, которые ведут к разрушению. За значение динамического предела прочности бралось отношение максимального значения

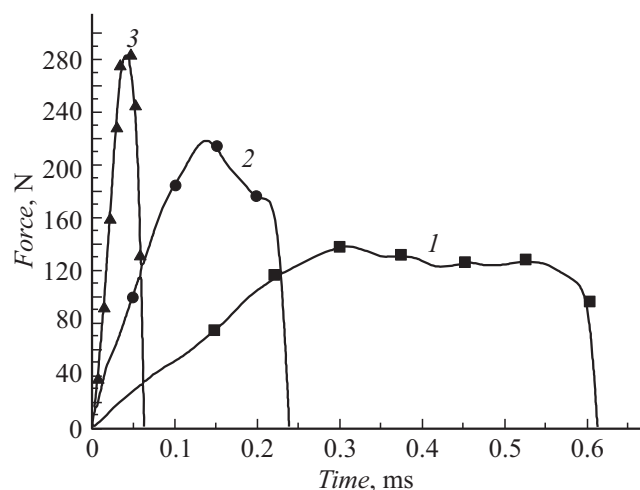


Рис. 2. Типичный профиль силы от времени для трех разных скоростей деформации: 1 — 180, 2 — 455, 3 — 2035 1/s.

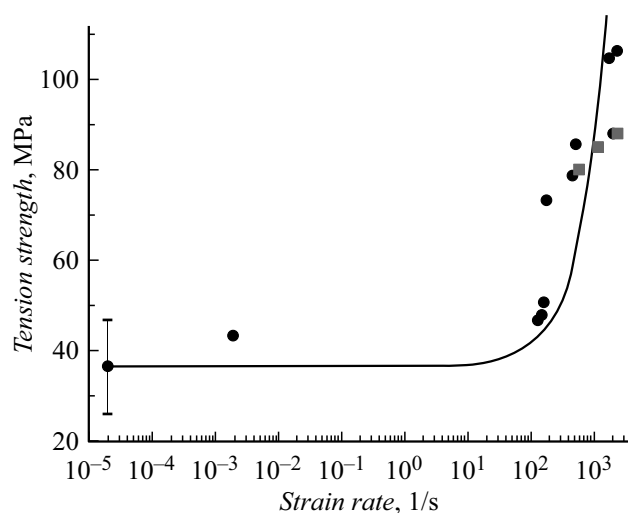


Рис. 3. Зависимость критического напряжения от скорости деформации. Кривая построена по критерию (1) при $\sigma_c = 36.5$ МПа, $\tau = 57 \mu\text{s}$, черные круглые точки — экспериментальные данные для аддитивного материала, серые квадраты — экспериментальные данные для филамента из работы [19].

силы к начальной площади сечения образца. На рис. 3 приведены усредненные результаты испытаний для каждого режима, также приведены данные из работы [19] для исходного ABS-пластика, из которого печатались образцы. Как в случае статического нагружения, так и для динамического нагружения значение предельного напряжения для напечатанного материала мало отличается от исходного материала. Сравнение данных для напечатанного и исходного материалов позволяют считать, что при высоком качестве печати прочностные свойства меняются слабо. Выполненные испытания показали, что предел прочности напечатанных образцов из ABS-пластика существенно зависит от скорости дефор-

мации, значения критического напряжения нелинейно возрастают с увеличением скорости деформации.

3. Критерий инкубационного времени

Критическое напряжение принято считать постоянной материала при статическом нагружении. В динамических испытаниях, как было отмечено выше, критическое напряжение зависит от скорости деформаций, способа приложения нагрузки и не является константой. В связи с этим возникает проблема, что же считать динамической прочностью материала, и как предсказывать предельные прочностные характеристики для динамических воздействий произвольной формы. Ключом к решению данной задачи может служить структурно-временной подход с использованием инкубационного времени [6–8]. В рамках этого подхода считается, что разрушение наступает тогда, когда текущее напряжение превышает статический предел прочности на протяжении некоторого временного промежутка, длительность которого определяется формой разрушающего импульса и значением инкубационного времени.

Критерий инкубационного времени можно выразить следующей формулой [6,7]:

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

где σ_c — статическая прочность на растяжение, τ — инкубационное время материала, $\sigma(s)$ — временной профиль нагружающего импульса.

Результаты проведенных испытаний показывают, что напряжения возрастают линейно до своего максимального значения (рис. 2), потому зависимость напряжений в образце от времени вплоть до момента разрушения может быть описана следующей функцией:

$$\sigma(t) = E \dot{\epsilon} t H(t), \quad (2)$$

где $H(t)$ — функция Хэвисайда, E — модуль упругости материала, $\dot{\epsilon}$ — скорость деформации. Другими словами, в данной экспериментальной схеме было реализовано жесткое нагружение образца, т.е. $\dot{\epsilon} = \text{const}$. Подстановка выражения для временного профиля напряжений (2) в критерий (1) позволяет определить уровень критических напряжений для определенного значения $\dot{\epsilon}$. Таким образом, кривая скоростной зависимости прочности может быть рассчитана аналитически для любого диапазона скоростей деформации образца.

Критерий разрушения (1), используемый в структурно-временном подходе, содержит два определяющих параметра: статическую прочность и инкубационное время материала, которое можно условно считать динамическим параметром прочности, поскольку в динамике именно от его значения в первую очередь зависит величина критических напряжений в момент разрушения.

Инкубационное время можно интерпретировать, как характерное время, необходимое для подготовки изучаемого процесса разрушения в образце. В настоящее время нет стандартных экспериментальных методов для прямого измерения значений τ , так как для этого требуется высокоточная техника. Некоторое оптимальное значение инкубационного времени может быть определено сопоставлением аналитической кривой, рассчитанной по критерию (1) с экспериментальными данными. В качестве условия наилучшего совпадения можно использовать, например, метод наименьших квадратов.

На рис. 3 приведены результаты экспериментов и расчетная кривая для ABS-пластика в квазистатических и динамических режимах работы. Кривая соответствует расчетам по формуле (1) при $\sigma_c = 36.5$ МПа, $\tau = 57 \mu\text{s}$.

Результаты расчетов показывают, что кривая, полученная с помощью критерия инкубационного времени, не только довольно точно описывает экспериментальные данные во всем диапазоне скоростей нагружения, реализованных в ходе испытаний, но и предсказывает возможные значения прочности материалов в неисследованных областях по шкале скорости деформации. Используя данный подход, можно на качественном уровне подбирать материалы под индивидуальные условия эксплуатации.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования по измерению критического напряжения аддитивного материала, изготовленного из ABS-пластика на 3D принтере, в квазистатическом и динамическом режимах показали, что статическая прочность и модуль Юнга напечатанных образцов соответствует значениям, указанным производителем исходного филамента. В ходе динамических испытаний была измерена величина критического напряжения в материале для скоростей деформации в диапазоне 10^{-5} до 10^3 s^{-1} , и полученная скоростная зависимость прочности была описана с помощью критерия инкубационного времени. В ходе расчетов было определено значение характерного инкубационного времени $\tau = 57 \mu\text{s}$, которое также может быть использовано для предсказания разрушения напечатанного материала в случае динамических ударных импульсов произвольной формы.

Также стоит отметить, что проведенная в настоящей работе серия статических динамических испытаний, с последующей обработкой результатов с помощью критерия инкубационного времени, может рассматриваться, как некая стандартизированная методика, позволяющая определить скоростную зависимость критических напряжений в любом диапазоне скоростей деформации. Для этого необходимо определить параметры материала в квазистатическом режиме нагружения и сделать контрольные замеры в динамическом режиме. Используемый башенный копер позволяет определить критическое

напряжение для исследуемых образцов при скоростях деформации порядка $10^2 - 10^3 \text{ s}^{-1}$, для более высоких скоростей деформации значения критического напряжения предсказываются по критерию инкубационного времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке: Волков Г.А. и Чеврычкина А.А. выполнили разд. 1,2 — гранта РФ (17-11-01053), Естифеев А.Д. выполнил разд. 3 — гранта РФФИ (16-31-60003 мол_а_дк). Исследования проведены с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ „Исследование экстремальных состояний материалов и конструкций/Scientific research were performed at the Research park of St.Petersburg State University The study of extreme states of materials and constructions“.

Список литературы

- [1] *Campbell T.* et al. Could 3D Printing Change the World? 2011.
- [2] *Goldsmith W.* et al. // *Rock. Mech. Min. Sci. Geomech.* 1976. Vol. 13. P. 303.
- [3] *Howe S., Goldsmith W., Sackman J.* // *Experimental Mechanics.* 1974. Vol. 14. P. 337.
- [4] *Petrov Y.V., Smirnov I.V., Utkin A.A.* // *Mech. Solids.* 2010. Vol. 45. N 1. P. 476.
- [5] *Златин Н.А., Мочалов С.М., Пугачев Г.С., Брагов А.М.* // *ФТТ.* 1974. Т. 16. Вып. 6. С. 1752.
- [6] *Petrov Y.V., Utkin A.A.* // *Mater Sci.* 1989. Vol. 25. N 2. P. 153.
- [7] *Petrov Y.V.* On „quantum“ nature of dynamic fracture of brittle solids. *Dokl Akad Nauk USSR.* 1991. Vol. 321. P. 66.
- [8] *Петров Ю.В., Ситникова Е.В.* // *ЖТФ.* 2004. Т. 74. Вып. 1. С. 58–61. (*Petrov Yu.V., Sitnikova E.V.* // *Technical Physics.* 2004. Vol. 49. N 1. P. 57.)
- [9] *Hopkinson B.* // *Proc. Roy. Soc.* 1905. Vol. 74. Series A. P. 498.
- [10] *Manson W.* // *Proc. Instn. Mech. Engrs.* 1934. Vol. W. 128. P. 409.
- [11] *Ginns D.W.* // *J. Inst. Met.* 1937. Vol. 61. P. 61.
- [12] *Brown A.F.C., Vincent N.D.G.* // *Proc. Instn. Mech. Engrs.* 1941. Vol. 145. P. 126.
- [13] *Fanning R., Bassett W.* // *J. Appl. Mech.* 1940. Vol. 7. P. 24.
- [14] *Brown A.F.C., Edmonds R.* // *Proc. Instn. Mech. Engrs.* 1948. Vol. 159. P. 11.
- [15] *Guest J.J.* // *Proc. Instn. Mech. Engrs.* 1930. P. 1273.
- [16] *Clark D.S., Duwez P.E.* // *J. Appl. Mech.* 1948. Vol. 15. P. 243.
- [17] *Clark D.S., Wood D.S.* // *Proc. Amer. Soc. Test. Mater.* 1949. Vol. 49. P. 717.
- [18] *Campbell J.D., DUBY J.* // *Proc. Roy. Soc.* 1956. Series A. Vol. 236. P. 24.
- [19] *Yin Z.N., Wang T.J.* // *Mater. Sci. Engineer. A.* 2010. Vol. 527. N 6. P. 1461.