

Методики и экспериментальные установки НИИЯФ МГУ для определения ударной вязкости полимерных нанокомпозитов

В.А. Кобзев^{1,2,*}, Н.Г. Чеченин^{1,2,†}, С.С. Авторин^{1,2}, Н.Б. Акимов¹, С.А. Бедняков¹, А.В. Макунин¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 19.10.2023; подписана в печать 13.11.2023)

Описано экспериментальное оборудование для определения ударной стойкости композитных материалов методом ударного маятникового копра и низкоскоростным баллистическим методом. Исследованы два типа полимерных нанокомпозитов: целиком состоящих из эпоксидной смолы, армированной углеродными нанотрубками, и слоистых композитов из стеклоткани и базальтовой ткани, пропитанной эпоксидной смолой, армированной углеродными нанотрубками. Предложены методики проведения измерений.

PACS: 62.20.-x, 62.25.+g, 68.90.+g

УДК: 53.08, 531/534

Ключевые слова: полимерные нанокомпозиты, углеродные нанотрубки, ударная вязкость, маятниковый копер.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одними из наиболее перспективных конструкционных материалов являются полимерные нанокомпозиты. Нанокомпозиты способны реализовать высокий уровень как специальных свойств материалов, (электропроводность, магнитная проницаемость, теплопроводность) так и механических свойств (прочность, ударная вязкость, твердость) [1, 2]. Одними из самых перспективных наполнителей для изготовления нанокомпозитов являются углеродные нанотрубки. Использование их в качестве армирующей составляющей полимера позволяет создавать материалы, существенно более устойчивые к воздействию скоростных воздействий. Синтез и испытание подобных материалов требует создания специализированных установок и методик.

В основе экспериментов на ударную прочность композитов лежит измерение такого параметра как «ударная вязкость». Ударная вязкость (a , Дж/мм²) — это свойство тел сопротивляться кратковременным ударным воздействиям. Определяется как отношение работы (A , Дж), затрачиваемой на деформацию и разрушение образца, к площади поверхности (S , мм²), образовавшейся в результате разрушения (площади воздействия):

$$a = \frac{A}{S}.$$

Ударная вязкость является наиболее удачной величиной для оценки эффективности композитов, так как при стандартных испытаниях, например, испытаниях на растяжение и изгиб, энергия механического воздействия на образец возрастает сравнительно медленно,

но, напряжение распределяется по образцу до достижения критических значений, соответствующих разрушению в области концентрации напряжений. На практике воздействие часто реализуется ударным образом, материалы быстро поглощают энергию приложенного усилия, например, ударов от падающих предметов, столкновений и т.д. Целью испытаний на ударную вязкость является имитация таких воздействий. Предлагаемые в данной работе экспериментальные стенды направлены на исследование ударных воздействий, путем измерения ударной вязкости. Основной проблемой при использовании ударной вязкости, как критерия, является сложность определения работы, затраченной на разрушение образца [3].

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

В данной работе приводится описание созданных нами стендов и разработанных методик для определения ударной вязкости нанокомпозитных материалов.

В качестве экспериментальных образцов рассматривались два типа композитов, синтезируемых в лабораторных условиях:

1. однородные полимерные образцы, армированные углеродными нанотрубками;
2. слоистые композиты из стеклоткани и базальтовой ткани, пропитанные полимером на основе эпоксидных смол, армированных наноуглеродами.

Для первого типа композитов разработана методика и установка с маятниковым копром, а работа, затраченная на разрушение образца, определяется из разницы потенциальной энергии массивной ударной части маятникового копра [4]. При помощи видео фиксируется разность высот маятника до и после воздействия на образец и определяется количество энергии, потраченной на разрушение.

* va.kobzev@physics.msu.ru

† chechenin@sinp.msu.ru

Для второго типа образцов используется пневматическая ускоряющая установка, позволяющая достигать скоростей пробного тела (ПТ) порядка 100 м в секунду. Основным измеряемым показателем в эксперименте является скорость ПТ на входе в мишень и на вылете из нее. Работа, затраченная на разрушение, определяется как разность кинетической энергии ПТ до и после взаимодействия с образцом.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТЕНДЫ

Маятниковый стенд для измерения ударной вязкости

Для определения ударной вязкости применяется ударный маятниковый копер (рис. 1). Копер представляет собой маятник с длиной плеча 1 м и грузом, в виде тяжелого молота весом 1 кг. Также на окончание груза расположен «нож», с помощью которого происходит разрушение образца.

Высота начального подъема молота определяет запас энергии E_0 (начальную потенциальную энергию $E_0 = mgh_0$, где m — масса ударника, g — ускорение свободного падения, h_0 — начальная высота подъема ударника). После удара и затраты энергии A на деформацию и разрушение образца, энергия молота уменьшается, молот поднимается на меньшую высоту h_1 , соответствующую потенциальной энергии $E_1 = mgh_1$. Установка имеет шкалы высот отклонения ударника, по которым можно непосредственно определить E_0 и E_1 . Работа ударника на деформацию и разрушение образца определяется как $A = E_0 - E_1$. Значение ударной вязкости (a , Дж/мм²) рассчитывается как отношение работы разрушения, отнесенной к площади сечения образца в месте разрушения:

$$a = \frac{A}{bx},$$

где b и x — ширина и толщина (в случае образца с надрезом — толщина вместе надреза) образца соответственно.

Для расчета $E_0 - E_1$, разработана следующая методика:

1. Траектория копра после разрушения экспериментального образца фиксируется на видеокамеру с частотой 120 кадров в секунду.
2. На вертикальную поверхность, которая располагается за траекторией копра, нанесена шкала высот с ценой деления 0.5 см.
3. Полученные видеозаписи анализируются покадрово, фиксируется высшая точка подъема копра и определяется высота подъема копра, откуда вычисляется разность $E_0 - E_1$.
4. Перед каждой серией экспериментов фиксируется траектория копра без разрушения образца («холостой ход»), чтобы определить E_0 .

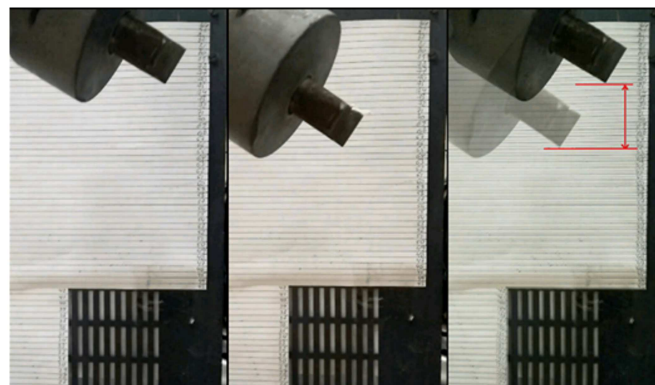


Рис. 1. Фото ударника в верхней мертвой точке. Вычисление $E_0 - E_1$

Таким образом, финальная формула для расчета ударной вязкости: $a = \frac{mg(h_0 - h_1)}{bx}$.

3. УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ПРОЧНОСТИ

Для определения баллистической ударной прочности нанокompозитных образцов был разработан стенд, состоящий из пневматического ускорителя пробного тела, держателя образцов и устройств определения скорости ПТ до попадания и на вылете из образца. На рис. 2 представлена блок-схема эксперимента.

В качестве ускорителя пробного тела использовался пневматический пистолет, разгоняющий ПТ до скоростей 90–110 м/с и с энергией воздействия до 3 Дж. ПТ представляет из себя омедненный стальной шар радиусом $r = (2.25 \pm 0.05)$ мм и весом $m = (0.355 \pm 0.005)$ г. Скорость шара измеряется до и после взаимодействия с образцом при помощи двух хронографов. В данной установке используются оптические хронографы АСС-0022, фиксирующие скорость любого тела, прошедшего через чувствительную зону прибора (рис. 3). Высокочувствительные оптические датчики, находящиеся в двух точках на расстоянии друг от друга, считывают тень (преломление света) пролетающего между ними тела и выдают на дисплей значение скорости по формуле: скорость = дистанция/время. Начальная скорость шара определяет запас энергии K_0 (начальную кинетическую энергию $K_0 = mv_0^2/2$). После удара и затраты энергии на деформацию и разрушение образца, энергия ПТ уменьшается до величины $K_1 = mv_1^2/2$. Работа ПТ на деформацию и разрушение образца определяется как $A = K_0 - K_1$.

Значение ударной вязкости (a , Дж/мм²) рассчитывается как отношение работы разрушения на площадь сечения шара:

$$a = \frac{A}{\pi r^2},$$

где r — радиус шара в мм.

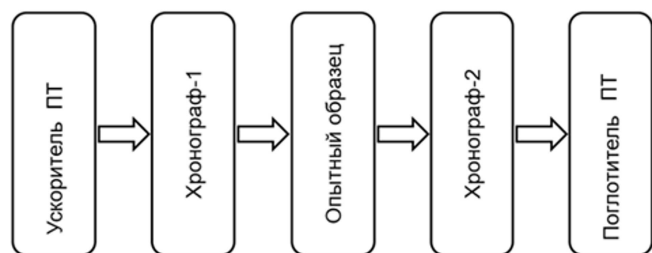


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки



Рис. 3. Экспериментальный стенд. 1 — Пневматический ускоритель ПТ (не показан на рисунке); 2 — Хронограф-1 для определения входной скорости; 3 — Держатель образца; 4 — Хронограф-2 для определения выходной скорости; 5 — Поглотитель ПТ (не показан на рисунке)

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На установке с ударным маятниковым копром были получены зависимости ударной вязкости для многослойных образцов из разных типов стеклоткани и базальтовой ткани, пропитанной эпоксидной смолой (рис. 4). В результате экспериментов произведено сравнение разных типов тканей по параметру ударной вязкости и выбрана наиболее эффективная ткань.

При помощи установки для измерения баллистической ударной прочности были получены зависимости потерь энергии ПТ от концентрации УНТ в матрице эпоксидной смолы. Результаты экспериментов позволили установить, что увеличение концентрации нанотрубок в матрице полимера ведет к улучшению стойкости к возникновению трещин композитного материала, т.е. снижает хрупкость и увеличивает пластичность. Кроме того, образцы с 7%-ой концентрацией углеродных нанотрубок показывают пиковые значения погло-

щения энергии ПТ при высокоскоростных воздействиях, рис. 5). Увеличение концентрации выше 7% ведет к ухудшению ударной стойкости.

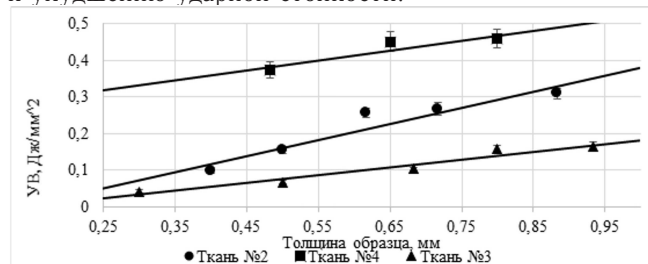
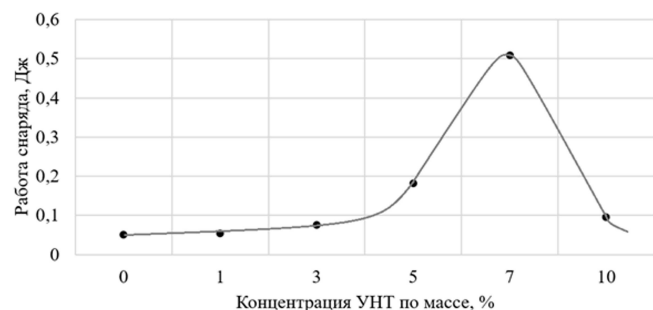
Рис. 4. Зависимость ударной вязкости от толщины образца для различных тканей. Ткань №2 (Стеклоткань, плотность 80 г/м², плетение твилл, волокна размером 0.5 мм); Ткань №3 (Стеклоткань, плотность 105 г/м², плетение сатин, волокна размером 1 мм); Ткань №4 (Базальтовая ткань, плотность: 200 г/м², плетение плейн, волокна размером 1 мм)

Рис. 5. Зависимость потерь энергии ПТ от концентрации УНТ в матрице полимера

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, описанные установки и методики позволяют определять ударную вязкость различных образцов композитных материалов. Получаемые значения дают численную оценку эффективности композитных материалов при сопротивлении скоростным ударам. Разработанные установки применяются при разработке перспективных ударостойких нанокомпозитов, ведущейся в НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова. Совмещенные результаты, полученные на данных установках, позволили найти наиболее эффективную комбинацию параметров композитного материала: подобрать самую прочную ткань и оптимальную концентрацию армирующих добавок (углеродных нанотрубок) в матрице полимера.

- [1] Раков Э.Г. Нанотрубки и фуллерены. Учебное пособие. Университетская книга. М., 2006.
 [2] Макунин А.В., Чеченин Н.Г. Полимер-нанотрубочные композиты для космических технологий. Университет-

ская книга. М., 2011.

- [3] Kobzev V.A., Chechenin N.G., Bukunov K.A. et al. // *Materials Today: Proceedings*, 5, N 12. 26096. (2018).

- [4] ГОСТ 10708-82 «Маятниковые копры. Технические условия».
- [5] Кудрявцев О.А. Расчетно-экспериментальное исследование деформирования и разрушения слоистых керамокомпозитных пластин при локальном ударе. Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук. Южно-Уральский государственный университет, 2016.
- [6] Белов Н.Н., Югов Н.Т., Афанасьева С.А. et al. // Механика композиционных материалов и конструкций. **7**, № 2. 131. (2001).
- [7] Hou J. P., Petrinic N., Ruiz, C., Hallett S. R. // *Composites Science and Technology*. **60**, N 2. 273 (2000).

**Methods and Experimental installations
Lomonosov Moscow State University–Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics
for determining the impact strength of polymer nanocomposites**

V.A. Kobzev^{1,2,a}, N.G. Chechenin^{1,2,b}, S.S. Avtorin^{1,2}, N.B. Akimov¹, S.A. Bednyakov¹, A.V. Makunin¹

¹ Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119191, Russia

E-mail: ^ava.kobzev@physics.msu.ru, ^bchechenin@sinp.msu.ru

Experimental equipment for determining the impact resistance of composite materials by the method of impact pendulum copra and low-speed ballistic method is described. Two types of polymer nanocomposites have been studied: consisting entirely of epoxy resin reinforced with carbon nanotubes and layered composites of fiber glass and basalt fabric impregnated with epoxy resin reinforced with carbon nanotubes. Measurement methods are proposed.

PACS: 62.20.-x, 62.25.+g, 68.90.+g.

Keywords: polymer nanocomposites, carbon nanotubes, impact toughness, pendulum hammer

Received 19 October 2023.

Сведения об авторах

1. Кобзев Виталий Андреевич — аспирант, программист, e-mail: va.kobzev@physics.msu.ru.
2. Чеченин Николай Гаврилович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. отделом, тел.: (495) 939-23-48, e-mail: chechenin@sinp.msu.ru.
3. Авторин Семен Сергеевич — студент, e-mail: avtorin.ss17@physics.msu.ru.
4. Акимов Николай Борисович — вед. электроник, тел.: (4950) 939-24-75.
5. Бедняков Сергей Александрович — вед. инженер, тел.: (495) 939-55-58, e-mail: bedny_02@mail.ru.
6. Макунин Алексей Владимирович — канд. тех. наук, ст. науч. сотрудник, тел.: (495) 939-36-05, e-mail: avmtchem@mail.ru.