

ВЛИЯНИЕ МАТРИЦЫ НА СВОЙСТВА УГЛЕПЛАСТИКОВ

© 2019 г. Н. В. Корнеева^{1*}, В. В. Кудинов², И. К. Крылов², В. И. Мамонов²

¹Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: natakorneeva@mail.ru

Поступила в редакцию 15.03.2019;

после доработки 15.03.2019;

принята в печать 22.04.2019

Влияние жесткой и пластичной матриц на свойства углепластиков исследовано методом “разрыв ударом” при различных скоростях нагружения композиционного материала (КМ). Установлено, что при статическом нагружении деформация КМ протекает плавно и является в основном деформацией растяжения. Поэтому КМ с пластичной матрицей при статическом нагружении имеет наиболее высокие свойства, такие как максимальная удельная работа разрушения $\alpha = 154$ Дж/см² и максимальная прочность $\sigma = 524$ МПа при большой относительной деформации $\epsilon = 6\%$. Удар резко изменяет механизм разрушения углепластиков. Разрушение КМ инициируется ударом в первый момент его действия. Вся деформация КМ вплоть до его разрушения сопровождается разрывами филаментов волокна. Колебания нагрузки происходят из-за разрыва филаментов и отражаются на кривых деформации в виде пиков. Разрывающиеся и дробящиеся филаменты накладываются на общий процесс многоступенчатой деформации растяжения КМ на более высоком уровне. Накопление дробления и разрывов волокон понижает прочность КМ. Это приводит к его быстрому разрушению при меньшей деформации, чем при статическом нагружении. При ударе удельная работа разрушения α углепластиков с пластичной матрицей снижается в 3.4 раза – с 154 до 45 Дж/см² по сравнению с работой разрушения КМ в статике; материал разрушается при меньшей относительной деформации $\epsilon = 1.7\%$ и меньшей прочности $\sigma = 496$ МПа.

Ключевые слова: метод “разрыв ударом”, пластичная матрица, жесткая матрица, удельная работа разрушения, деформация, предел прочности при растяжении, сдвиговая прочность, углеродное волокно, углепластик.

DOI: 10.1134/S0207401X19090036

ВВЕДЕНИЕ

Матрица распределяет нагрузку между армирующими волокнами и соединяет их в монолитный композиционный материал (КМ). Наиболее высокие свойства будут у КМ, если матрица обеспечит совместную деформацию его компонентов на всех этапах нагружения композита без разрушения волокон и сдвигов между ними и матрицей.

Особенно большое значение матрица приобретает при ударе по КМ. Кратковременность воздействия удара снижает или исключает возможность перераспределения его энергии в результате релаксации напряжений и диссипации энергии разрывов волокон при деформации КМ. Материал разрушается в местах наибольшей концентрации напряжений.

В ИХФ РАН совместно с ИМЕТ РАН разработан метод “разрыв ударом” (РУ или IB (Impact Break)) для исследования и анализа свойств анизотропных КМ при статическом нагружении и ударе. Метод основан на построении зависимости на-

грузки–прогиб образцов КМ и анализе их деформации и разрушения на различных стадиях нагружения [1–6]. Методика и образец дают возможность сопоставлять свойства КМ при различных скоростях и условиях деформации и анализировать механизмы их разрушения.

Достоинство метода РУ состоит в том, что для удара и статических испытаний используется один и тот же образец, что дает возможность получать достоверные данные при сопоставлении свойств КМ при ударе и статическом нагружении. Метод позволяет анализировать пять ключевых характеристик КМ: удельную работу разрушения α , продольную, X , и относительную, ϵ , деформации, предельное разрушающее напряжение σ при растяжении, сдвиговую прочность τ , а также другие характеристики эксперимента, такие как воздействие нагружающей силы P (в статике и при ударе), скорость v и время t нагружения, прогиб Δ образца КМ в месте удара или приложения нагрузки в статике.



Рис. 1. Фотография образца для исследования КМ методом “разрыв ударом”.

Образец для испытаний по методу РУ представляет собой композит в виде стержня с однонаправленным расположением волокон и заделанными в матрицу законцовками для его крепления в копре. Испытания методом РУ стержней КМ с заделанными концами в матрицу проводят путем нанесения удара в середину стержня. Статическую нагрузку также прикладывают в середину стержня.

В настоящее время широкое распространение в создании конструкций получили углепластики. Поэтому актуальной является задача исследования и получения объективных данных об их свойствах в различных условиях применения.

Цель работы состояла в исследовании влияния матрицы на свойства и разрушение углепластиков при различных условиях и скоростях нагружения методом РУ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы КМ изготавливали из жесткоцепных углеродных волокон торговой марки Tenax®-J HTA40E13 3K 200 tex (Teijin Limited, Япония), которые имели следующие свойства: плотность $\rho = 1.77 \text{ г/см}^3$, прочность $\sigma = 4.18 \text{ ГПа}$, модуль упругости $E = 236 \text{ ГПа}$, относительное удлинение при разрыве $\epsilon = 1.77\%$. Для изготовления образцов углепластиков использовали два типа матриц: жесткую и пластичную. Жесткую матрицу (ЖМ) получали из эпоксидной смолы марки HT2 (Rohu-Systems, торговая марка R&G, Германия), используя отвердитель HT2; соотношение смолы к отвердителю составляло 100 : 48. Пластичная матрица (ПМ) представляла собой полимерную компози-

Таблица 1. Свойства углепластиков на основе ПМ и ЖМ при статическом нагружении и ударе

Воздействие	Матрица	ϵ , %	σ , МПа	α , Дж/см ²
Удар	ПМ	1.7	496	45
Статика	ЖМ	2.1	472	48
Статика	ПМ	6.0	524	154

цию, состоящую из смолы HT2 с добавлением до 37% пластификатора ДЭГ-1 с отвердителем HT2.

Образцы КМ изготавливали путем пропитки жидкой матрицей (время гелеобразования ~45–60 мин) пучка однонаправленных непрерывных многофиламентных углеродных волокон с последующим отверждением по заданному оптимальному режиму.

Образец имел форму стержня диаметром $d = 2.3 \text{ мм}$ и длиной деформируемой части $L = 68 \text{ мм}$ со специальными законцовками размером $l = 24 \text{ мм}$, изготовленными из материала матрицы, которые необходимы для крепления образца в испытательной машине (рис. 1). Образец состоял из 50% волокна и 50% матрицы по объему.

Испытания КМ при ударе проводили на маятниковом копре Roell Amsler RKP-450 с компьютерным управлением и записью динамической кривой “нагрузка–прогиб” при скорости удара $v = 5.25 \text{ м/с}$. Концы образцов закрепляли в зажимах маятникового копра и наносили удар в середину образца поперек волокон головкой ударника радиусом $R = 3 \text{ мм}$.

Для статического нагружения использовали универсальную испытательную машину Инстрон 3382. Нагружали середину образца так же, как и при ударе, но с меньшей скоростью $v = 5 \text{ мм/мин}$.

Образец КМ разрывался в месте нанесения удара или приложения статической нагрузки. В месте нанесения удара образец растягивался и прогибался на некоторую величину Δ , при достижении которой он разрушался. Схема нагружения и деформации образца методом РУ при ударе и статическом нагружении приведена в работе [1]. Результаты испытаний образцов КМ при статических и ударных нагрузках приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Исходя из экспериментальных данных, рассчитывали продольную, X , и относительную, ϵ , деформацию растяжения КМ соответственно по уравнениям

$$X = 2 \left\{ \left[\left(\frac{L}{2} \right)^2 + \Delta^2 \right]^{1/2} - \frac{L}{2} \right\}, \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{X}{L}, \quad (2)$$

где Δ – прогиб образца в месте удара или приложения нагрузки в статике.

Растягивающую и разрывающую образец силу P' находили по уравнению

$$P' = \frac{P}{2 \cos \gamma}, \quad (3)$$

где P – сила удара или деформирующая сила в статике, γ – угол между направлением действия сил P и P' .

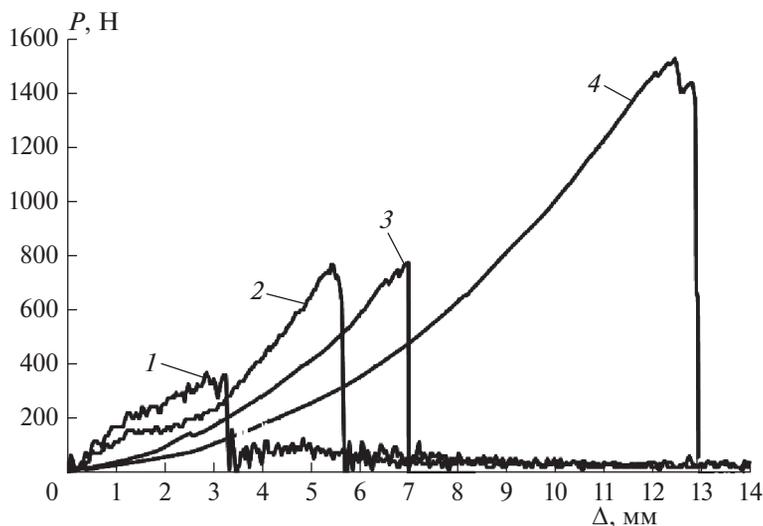


Рис. 2. Диаграммы деформации нагрузка P – прогиб Δ образцов углепластика при ударе с ЖМ (1) и ПМ (2) и при статическом нагружении с ЖМ – (3) и ПМ (4).

Разрушающее напряжение σ рассчитывали по формуле

$$\sigma = \frac{P'}{S}, \quad (4)$$

где S – площадь поперечного сечения образца.

Удельную работу разрушения α определяли по формуле

$$\alpha = \frac{W}{S'}, \quad (5)$$

где W – работа разрушения; площадь S' под кривой деформации рассчитывается испытательной машиной.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Относительная деформация ϵ зависит от состава матрицы и скорости нагружения образца КМ. При статическом нагружении пластичная матрица дает возможность деформироваться КМ до величины $\epsilon = 6\%$ (табл. 1, кривая 4 рис. 2), в то время как жесткая матрица приводит к разрушению КМ при $\epsilon = 2.1\%$. Оба эти значения превышают величину деформации углеродного волокна, составляющую $\epsilon = 1.77\%$: первое – в ~ 3.4 раза и второе – в ~ 1.2 раза для ПМ и ЖМ соответственно. При статическом нагружении деформация протекает плавно: кривые 4 и 3 гладкие, и только перед разрушением КМ появляются небольшие пики от разрывов волокна, что хорошо согласуется с данными работы [7]. Наибольшие затраты энергии наблюдали при статическом разрушении КМ с матрицей ПМ, которые достигают величины $\alpha = 154 \text{ Дж/см}^2$, что превосходит в

3.2 раза удельную работу разрушения углепластиков с ЖМ, составляющую $\alpha = 48 \text{ Дж/см}^2$.

Удар разрушает КМ с первого момента его действия (см. рис. 2, кривые 1 и 2). На кривой деформации появляются пики выделения энергии от разрыва наиболее нагруженных филаментов волокна. Усилие разрыва достигает на начальном участке 100–120 Н. Происходят разрыв и дробление филаментов вплоть до полного разрушения и разрыва КМ. Высокая скорость нагружения (в 10^4 раз выше, чем в статике) и деформации при ударе затрудняет или делает невозможным диссипацию энергии и релаксацию напряжений в КМ.

На кривой деформации (рис. 2, кривые 1 и 2) пики разрывов чередуются с деформацией при постоянной нагрузке (силе удара). Этот процесс деформации характеризует включение в работу все новых филаментов волокна. Прогиб, составляющий от 1 до 2 мм, увеличивается при постоянной нагрузке $\sim 150 \text{ Н}$. Деформация вызывает вибрацию и колебания нагрузки и происходит в результате сдвига филаментов волокна в матрице. Затем нагруженные филаменты разрываются и нагрузка увеличивается за счет включения в деформацию новых филаментов. Процесс повторяется при увеличенной деформации. В композиционном материале накапливаются разрушения филаментов, и при прогибе $\sim 6 \text{ мм}$ происходит громкий разрыв образца. Выделяется большое количество энергии, которая вызывает вибрацию установок. Энергия, необходимая для разрушения КМ при ударе, в ~ 3.4 раза меньше, чем при статической деформации: удельная работа разрушения α углепластиков с ПМ составляет 45 и 154 Дж/см² при ударе и в статике соответственно (табл. 1).

Углепластики с ЖМ при статическом нагружении разрушаются при параметрах, близких к разрушению углепластиков с ПМ при ударе (табл. 1). Величины удельной работы разрушения α углепластиков с ЖМ и ПМ составляют 48 и 45 Дж/см² в статике и при ударе соответственно. Однако механизмы разрушения у них разные. Кривая деформации при статическом нагружении имеет плавный характер, и механизм разрушения отличается от разрушения КМ при ударе. Разрушение происходит при близких значениях относительной деформации (табл. 1): $\epsilon = 2.1\%$ в статике и $\epsilon = 1.7\%$ при ударе. Оба эти значения близки к величине максимальной относительной деформации углеродных волокон при разрыве, составляющей $\epsilon = 1.77\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Матрица определяет свойства и механизмы деформации и разрушения углепластиков. При статическом нагружении деформация протекает плавно и КМ с пластичной матрицей имеет как максимальную удельную работу разрушения $\alpha = 154$ Дж/см², так и максимальную прочность $\sigma = 524$ МПа при большой относительной деформации $\epsilon = 6\%$.

Удар изменяет механизм разрушения углепластиков и их свойства с первого момента действия. Разрушение происходит в результате разрыва и дробления филаментов волокон, а также при сдвиге волокна в матрице. Удельная работа разрушения α углепластиков с пластичной матрицей при ударе составляет 45 Дж/см², что в ~ 3.4 раза

меньше по сравнению с разрушением КМ при статическом нагружении; этот материал разрушается при меньшей деформации $\epsilon = 1.7\%$ и меньшей прочности $\sigma = 496$ МПа. Выбор конструктивных углепластиков на основании только статических испытаний не гарантирует их ударопрочность и ударостойкость при ударе.

Работа выполнена в рамках госзадания по темам 0082-2014-0009 (ИХФ РАН) и 007-00129-18-00 (ИМЕТ РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов В.В., Крылов И.К., Мамонов В.И., Корнеева Н.В. // Физика и химия обраб. материалов. 2018. № 1. С. 42; <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2018-1-42-49>
2. Кудинов В.В., Крылов И.К., Мамонов В.И., Корнеева Н.В. // Там же. № 3. С. 66; <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2018-3-66-71>
3. Korneeva N.V., Kudinov V.V., Krylov I.K., Mamonov V.I. // Polym. Eng. Sci. 2017. V. 57. P. 693; <https://doi.org/10.1002/pen.24607>
4. Korneeva N.V., Kudinov V.V. // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1736. Issue 1, 020178. P. 4; <https://doi.org/10.1063/1.4950937>
5. Кудинов В.В., Крылов И.К., Мамонов В.И., Корнеева Н.В. // Физика и химия обраб. материалов. 2016. № 1. С. 64.
6. Кудинов В.В., Крылов И.К., Корнеева Н.В., Мамонов В.И. // Там же. 2014. № 6. С. 63.
7. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технология. Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2010. С. 61.