

12. Бехтерев П. В. Определяющие коэффициенты упругости и деформаций с приложением к изотропии // ЖЭТФ.— 1934.— Т. 4, вып. 9.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике.— М.: Наука, 1968.

г. Новосибирск

Поступила 14/III 1991 г.

УДК 624.074.4 + 539.3

А. В. Асеев, Г. Е. Макаров, С. В. Степаненко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРЕДЕЛЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

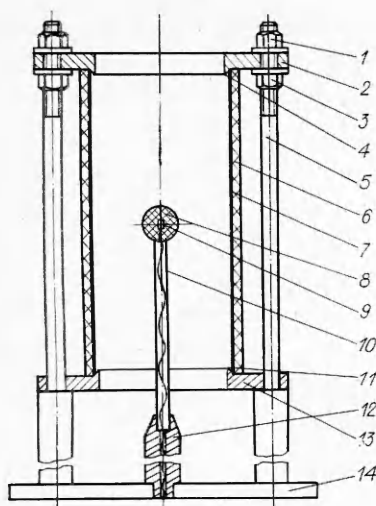
В настоящее время происходит расширение сферы применения волокнистых композиционных материалов (ВКМ), причем наряду с традиционной областью применения (элементы конструкций и узлы, работающие в условиях статического и квазистатического нагружения) ВКМ все чаще используются для изготовления конструктивных элементов, подверженных действию высокоинтенсивной динамической нагрузки. Интенсивное импульсное нагружение создает в материале конструкции напряженно-деформированное состояние (НДС), характеризующееся высокой степенью изменчивости во времени. В связи с этим для классификации процесса следует ввести норму тензора скоростей деформации. В экспериментальной работе удобно применять аналог интегральной нормы — среднюю скорость деформирования на монотонном участке зависимости $\epsilon = \epsilon(t)$ — и в дальнейшем понимать эту величину как характерную для данного эксперимента скорость деформации.

В ряде работ (см., например, [1, 2]) указывается на зависимость упругих и прочностных свойств некоторых типов ВКМ от характерной скорости деформирования при $\dot{\epsilon} \sim 10^2 \text{ с}^{-1}$. Изучение такой зависимости и особенностей динамического поведения различных ВКМ на пределе несущей способности может способствовать снижению материалоемкости изделий, работающих в условиях высокоинтенсивного динамического нагружения. Однако получение числовых значений, характеризующих свойства ВКМ при высоких скоростях деформирования ($\dot{\epsilon} \sim 10^3 \text{ с}^{-1}$), затруднено рядом причин, в частности необходимостью измерения воздействия динамического давления на образец как функции времени. В связи с этим представляет интерес развитие экспериментальных методов изучения поведения ВКМ на пределе его несущей способности — типа методик исследований, изложенных в [3—8].

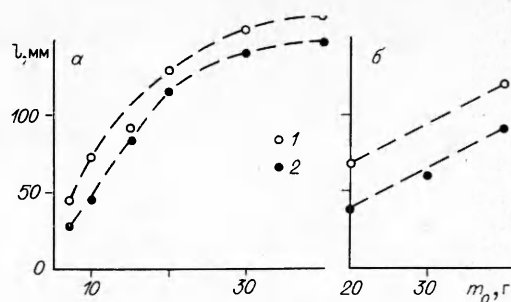
1. Эксперименты по внутреннему импульсному нагружению проводились на круговых цилиндрических оболочках, изготовленных кольцевой намоткой из материалов двух типов: стеклоэпоксида на основе стекловолокна ВМ и эпоксидного связующего ЭДТ-10 и органоэластика на основе органоэластика СВМ и связующего ЭДТ-10.

Результаты статических испытаний кольцевых образцов с помощью жестких полудисков по методике [9] показали, что модуль упругости и предел прочности в окружном направлении стеклоэпоксиды $E_{\text{ст}} = 65,0 \pm 5 \text{ ГПа}$ и $\sigma_{\text{ст}} = 1,54 \text{ ГПа}$, органоэластика $E_{\text{ор}} = 116,0 \pm 5 \text{ ГПа}$ и $\sigma_{\text{ор}} = 2,01 \text{ ГПа}$. Плотность стеклоэпоксиды $2,03 \text{ г/см}^3$, органоэластика $1,32 \text{ г/см}^3$.

Схема постановки экспериментов приведена на рис. 1. Импульсное нагружение создавалось путем подрыва в геометрическом центре трубчатого образца *б* сферического заряда взрывчатого вещества (ВВ) *в* из сплава тротила с гексогеном ТГ 50/50. Иницирование заряда ВВ осуществлялось в его центре с помощью малогабаритного электродетонатора *г*.



Р и с. 1



Р и с. 2

Заряд ВВ с детонатором крепился на бумажной трубке 10, которая вставлялась в центрирующую втулку 12, а она, в свою очередь, вместе с четырьмя шпильками 5 вваривалась в основание 14. Испытываемые трубчатые образцы имели внутренний диаметр 100 мм. Длина образца (250—300 мм) выбиралась таким образом, что-

бы свободные торцы во время регистрации процесса деформирования не влияли на характер НДС в центральной части образца. Толщина стенок образцов h варьировалась от 1,7 до 5 мм.

Основным условием, определяющим использование данной схемы эксперимента, являлось требование оставить, насколько возможно, свободными торцы образца. Это достигалось фиксацией верхнего фланца 2 гайками 1 и 3 таким образом, чтобы образец мог свободно расширяться в радиальном направлении, одновременно исключалась возможность его перемещения как жесткого целого. Центрирование образца обеспечивалось специальными выступами 4 и 11 треугольной формы высотой 3 мм на фланцах 2 и 13. Образцы изнутри оклеивались отожженной медной фольгой 7 марки М1 толщиной 0,1 мм в один или несколько слоев. В процессе экспериментов производилась регистрация окружной деформации в центральном и отстоящих от центрального сечениях образца. Запись процесса деформирования осуществлялась с помощью тензорезисторов, аналогичных описанным в [10, 11], наклеенных на наружную поверхность образца.

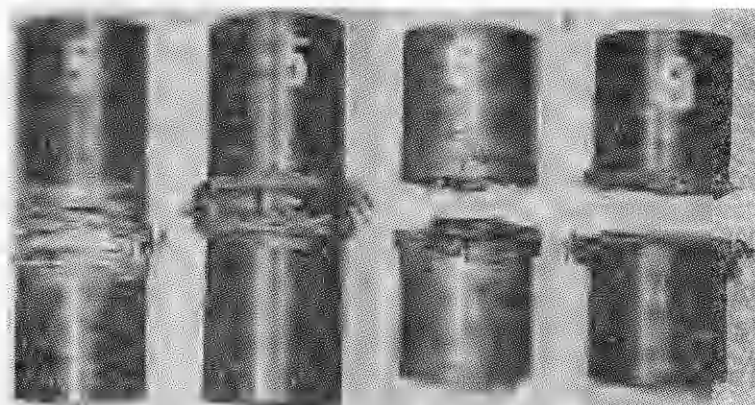
В табл. 1 приведены результаты экспериментов по импульсному нагружению образцов с толщиной стенок 5 мм. Все образцы подвергались только однократному нагружению. Здесь m_1 — масса 1 см длины образца (с учетом фольги), m_0 — масса заряда ВВ, $\epsilon_{\max}$ — максимальная окружная деформация, $t_{\max}$ — время достижения максимальной деформации, $\epsilon_{\text{ср}}$ — средняя скорость деформации, l — величина кольцевой зоны разрушения. Характерные результаты испытаний приведены также на рис. 2—4. На рис. 2 представлены зависимости размера зоны разрушения l образца от массы заряда ВВ: a и b для $h = 2,5$ и 5 мм, точки 1 и 2 — стеклоэпоксид и органопластик. На рис. 3 показан внешний вид образцов с $h = 5$ мм после испытаний (стеклоэпоксид слева, а органопластик справа), a , b — вес заряда ВВ 20, 40 г.

На рис. 4 приведены типичные экспериментальные зависимости $\epsilon = \epsilon(t)$ при $h = 5$ мм: a — органопластик 5; b — органопластик 8, 6 — линии 1, 4, стеклоэпоксид 5, 6, 4 — линии 2, 3, 5.

2. В первую очередь представляет интерес посмотреть на полученные результаты, часть которых изложена в [12—14], с точки зрения выводов [8]. Если понимать под потерей несущей способности образца возникновение глобальных дефектов (от образования сквозных трещин до разделения на части), то несущая способность образцов из стеклоэпоксида и органопластика примерно одинакова. Вместе с тем заслуживает внимания следующий факт. В серии экспериментов на образцах с толщи-

Материал образца	Номер образца	m_1 , г	m_0 , г	$\varepsilon_{\max}$, %	$t_{\max}$, мкс	$\dot{\varepsilon}_{cp}$, с ⁻¹	l , мм
Органопластик (СВМ + ЭДТ-10)	1	23,8	40	4,37	9	4850	90
	2	— —	20	3,84	17	2260	35
	3	— —	10	1,42	20	710	—
	4	— —	30	4,62	13	3550	60...85
	5	29,3	20	3,58	19	1880	35
	6	— —	10	1,16	21	550	—
	7	— —	30	—	—	—	—
	8	— —	40	4,56	11	4140	65
Стеклоэпоксид (ВМ + ЭДТ-10)	1	34,1	10	—	—	—	—
	2	— —	20	—	—	—	60
	3	— —	40	4,25	20	2120	120
	4	39,6	10	1,77	29	610	—
	5	— —	20	3,58	26	1370	65
	6	— —	40	4,45	22	2020	120

ной стенок 5 мм при увеличении массы заряда ВВ от образца к образцу с 10 до 40 г разрушение образцов из стеклоэпоксида при меньших массах зарядов ВВ происходит в результате динамической потери устойчивости радиальных осесимметричных колебаний и резкого нарастания изгибных форм, что также отмечено в [5, 8], а при больших массах зарядов ВВ — в результате достижения предела прочности на растяжение в стекловолокне. Потеря устойчивости осесимметричной формы движения зарегистрирована на осциллограммах (линии 2 и 5 на рис. 4, б) и по остаточной деформации медной фольги. Ни в одном из опытов аналогичных серий на образцах с различной толщиной стенок из органопластика не обнаружено эффектов, которые бы свидетельствовали о явлении потери устойчивости осесимметричной формы движений образца. Разрушение образцов из органопластика происходило в первой фазе движения стенок образца от центра (рис. 4, а) и характеризовалось наличием сплошной кольцевой зоны разрушения. Если в этой фазе образец не разрушался и сохранял несущую способность, то затем он совершал быстрозатухающие колебательные движения, в которых полупериод уменьшался вместе с полуразмахом колебаний (линия 4 на рис. 4, б). Радиальные колебания, что также отмечено в [8], гораздо быстрее затухают в оболочке из органопластика,



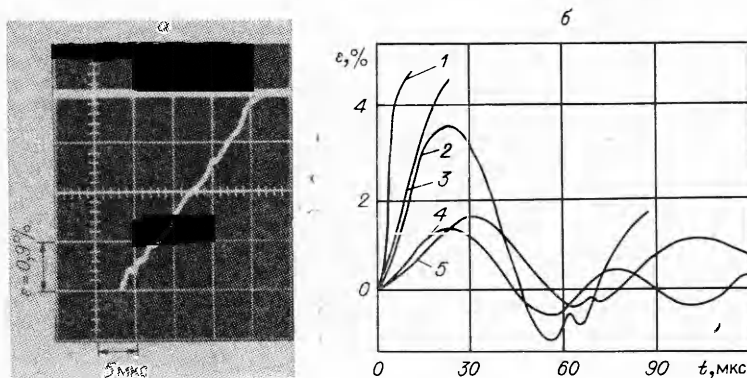
Р и с. 3

Т а б л и ц а 1

Внешний вид образца после эксперимента
Разрушился с образованием кольцевой зоны разрушения « « Остался целым, фольга опрессована на внутреннюю поверхность образца Разрушился с образованием несимметричной кольцевой зоны разрушения Представляет собой единое целое за счет фольги, которая выдавлена наружу через зону разрушения Остался целым, на фольге слабый осевой гофр Неполная детонация заряда ВВ. В центральной части образца фольга отслоилась и вогнута вовнутрь с осевым гофром Разрушился с образованием кольцевой зоны разрушения
Разделился на две части кольцевой трещиной, несколько осевых трещин, края фольги вогнуты вовнутрь Представляет собой единое целое за счет фольги, которая сильно вогнута вовнутрь. Выделяется семь осевых трещин Разрушился с образованием кольцевой зоны разрушения Остался целым. В центральной части две диаметрально противоположные сквозные осевые трещины длиной около 20 мм Повторяет картину, наблюдаемую на образце № 2 (стеклоэпоксид). Отличается наличием пяти вместо семи осевых трещин Разрушился с образованием кольцевой зоны разрушения

однако объяснять этот эффект растрескиванием связующего в начале колебаний было бы неправильно, так как такое же растрескивание происходит и в оболочках из стеклоэпоксид, но не приводит к столь быстрому затуханию колебаний. Здесь проявляется, видимо, различие диссипативных свойств силового наполнителя, а также то, что коэффициент Пуассона $\nu_{\alpha\beta}$ (α — меридиональная, β — окружная координаты) в однонаправленном органопластике в 1,5 раза выше соответствующего значения для однонаправленного стеклопластика [15]. Величина $\nu_{\alpha\beta}$ характеризует взаимосвязь радиальных и осевых движений в цилиндрической оболочке. Чем больше $\nu_{\alpha\beta}$, тем большая доля энергии радиальных колебаний переходит в осевое движение и «оттекает» из наиболее нагруженной зоны образца. Это в совокупности с диссипативными свойствами СВМ приводит к существенно более быстрому затуханию колебаний центрального сечения образцов из органопластика.

3. Как было отмечено выше, нахождение числовых значений, характеризующих динамические величины модуля упругости и предела прочности исследуемого материала, сопряжено с регистрацией давления, действующего на образец, как функции времени. Однако, когда динамическое напряженное состояние в образце создается действием высокоинтенсивной кратковременной (импульсной) нагрузки, оценочные значения упругих и прочностных характеристик материала образца можно полу-



Р и с. 4

(на рис. 4, а изображение перевернуто).

чить, используя приближенные уравнения движения и баланса энергии.

После окончания действия давления до достижения первого максимума деформации радиальное движение стенок образца приближенно описывается уравнением [13]

$$Eh_c\epsilon(t) + (h_c\rho_c + h_m\rho_m)R^2\ddot{\epsilon}(t) = 0,$$

где h_c , ρ_c и h_m , ρ_m — толщина и плотность стеклоэпоксида и меди; R — внутренний радиус образца. Теперь, выбирая на восходящем интервале осциллограммы $\epsilon = \epsilon(t)$ гладкий участок, фиксируем точку t , соответствующую середине этого участка. Вторая производная $\ddot{\epsilon}(t)$ приближенно заменяется соотношением $\ddot{\epsilon}(t) \simeq [\epsilon(t - \tau) - 2\epsilon(t) + \epsilon(t + \tau)]/\tau^2$, и после подстановки в уравнение движения вычисляется значение E . Описанные вычисления проведены по осциллограммам пяти опытов, в которых различались величины h_c , h_m и масса заряда ВВ, кроме того, при обсчете каждого опыта варьировалось значение τ . В результате среднее значение $E_{\text{дин}}$ при разбросе до 20 % получилось на 5 % меньше статического модуля упругости. Этот результат, так же как и выводы [3—5, 8], не позволяет говорить о существовании зависимости модуля упругости стеклоэпоксида от скорости деформирования. Величина абсолютной погрешности не обсуждается, так как вычисления носили оценочный характер.

Для оценки динамических пределов прочности стеклоэпоксида и органоэластика воспользуемся приближенным уравнением баланса энергии. Продукты взрыва (ПВ) сферического заряда ВВ, инициированного в геометрическом центре трубчатого образца, создают в оболочке осесимметричное НДС, переменное вдоль оси. Во временном интервале, соизмеримом с периодом собственных колебаний кольца, процесс переноса упругой энергии вдоль оси в силу специфики свойств ВКМ слабо влияет на пропорциональность НДС форме зависимости величины импульса давления от осевой координаты [6]. Кольцевой элемент оболочки получает импульс (количество движения), приближенно равный импульсу силы, действующей на элемент оболочки в результате давления ПВ. Кинетическая энергия кольцевого элемента оболочки, приобретенная за счет работы ПВ, в не разрушенном при растяжении элементе практически полностью переходит в потенциальную энергию деформирования. Таким образом, на границе зоны разрушения образца, когда разрушение наступило в фазе растяжения, в линейном приближении имеем

$$\Delta V \frac{\sigma \epsilon}{2} - \frac{\Delta m v_0^2}{2} = \frac{(\Delta m v_0)^2}{2\Delta m} - \frac{(i\Delta S)^2}{2\Delta m}.$$

Из равенства крайних после элементарных преобразований получаем

$$(3.1) \quad \frac{N}{c} = \frac{i}{1 + h/2R},$$

где ΔV , Δm , ΔS — объем, масса, площадь элементарного кольца; R — внутренний радиус образца; h — толщина пакета; c — скорость звука в акустически подобном материале, плотность которого равна обобщенной плотности образца с учетом внутреннего металлического слоя, а упругие свойства определяются модулем упругости материала образца. Тогда, если i — величина удельного импульса, соответствующая границе зоны разрушения, то N — предельное динамическое усилие для данного образца. В приближении теории точечного взрыва [16] для величины удельного импульса i получим

$$(3.2) \quad i = \frac{2m_0 D}{27\pi R^2 [1 + (l/2R)^2]^2} \sqrt{1 + \frac{\rho_1 R^3}{\rho_0 r_0^3} \left[1 + \left(\frac{l}{2R}\right)^2\right]^{3/2}}.$$

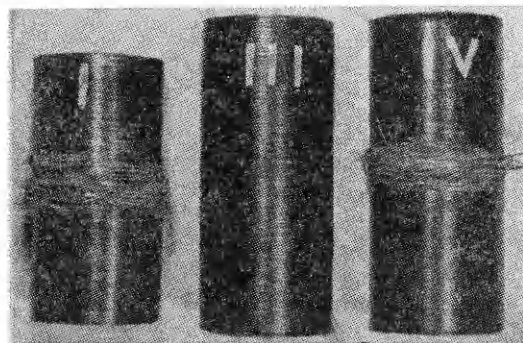
Здесь r_0 и m_0 — радиус и масса заряда ВВ; D — скорость детонации в ВВ; ρ_1 и ρ_0 — плотности воздуха и ВВ; l — размер (по оси) зоны разрушения,

образовавшейся в образце в первой фазе движения стенок образца от центра. Подставляя в качестве l результаты серии экспериментов на образцах с $h = 2,5$ мм (рис. 2, а) и данные табл. 1 для образцов с $h = 5$ мм при $m_0 = 40$ и 20 г (принимая $l = 0$ для образца из стеклоэпоксида) в (3.2) и затем в (3.1), находим значения удельного импульса, приложенного на границе зоны разрушения и предельных динамических усилий для оболочек из стеклоэпоксида $N_{ст}$ и органоэластика $N_{ор}$. В силу оценочного характера полученных величин сформулируем только качественные выводы. Замечено, что на границе зоны разрушения i уменьшается в пределах 10 % при увеличении массы заряда ВВ. Для образцов из органоэластика i превосходит соответствующее значение для образцов из стеклоэпоксиды примерно на 15 %. С точностью до 20 % $N_{ор}/N_{ст} = 1,8$, это несколько выше, чем косвенная оценка отношения предельных динамических усилий органоэластика и стеклоэпоксиды, которую можно найти по данным работы [8], где приведены приближенная оценка отношения динамических модулей упругости волокон СВМ и стекла ($\sim 1,4$) и значения предельных деформаций $\epsilon_{ст} = 5,4$ % и $\epsilon_{ор} = 4$ %. Разница может объясняться тем, что оценки [8] относятся к силовой основе и могут быть применены к композиту только с поправкой на ее концентрацию.

4. При внешнем осмотре образцов из стеклоэпоксиды с $h = 5$ мм, потерявших несущую способность в результате нарастания изгибных форм движения, видно, что развитие трещин начиналось с внешней поверхности образца. С учетом регулярного по окружности расположения меридиональных трещин это позволяет утверждать, что число трещин совпадает с номером (числом волн) изгибной формы движения. Из результатов, приведенных в табл. 1 и на рис. 4, б, следует, что число образующихся трещин зависит от максимальной скорости движения стенок образца к центру, а на это, в свою очередь, влияют запасенная при растяжении упругая энергия и обобщенная плотность материала образца.

Сравнение результатов экспериментов на образцах с $h = 5$ мм из различных материалов позволяет говорить о существенных различиях в характере деформирования и разрушения оболочек из стеклоэпоксиды и органоэластика. При нагружении зарядом ВВ массой 10 г образцы из органоэластика остались целыми, а из стеклоэпоксиды потеряли несущую способность. С другой стороны, при нагружении зарядом ВВ массой 20 г образцы из стеклоэластика при растяжении не потеряли целостность, а разрушились из-за нарастания изгибных форм, образцы же из органоэластика разрушились при растяжении, причем уровень напряжений лишь немного превысил предельное значение для данного материала (образец 5 за счет наличия фольги даже сохранился как единое целое).

5. Из публикаций (см., например, [1, 2]) известно об использовании в практике комбинированных ВКМ (КВКМ). Небольшая добавка более жестких, но более дорогих волокон к основному силовому наполнителю применяется для получения рационального соотношения между жесткостью и ценой получаемого КВКМ. Однако, помимо жесткости, существует еще целый ряд факторов, отмеченных, например, в [1, 8, 12—14] и данной работе, влияющих на несущую способность конструкций из ВКМ. В частности, при сравнении стеклоэпоксиды и органоэластика видно, что каждый из этих материалов имеет свои преимущества при использовании в конструкциях, предназначенных для эксплуатации в условиях, допускающих возникновение высокоинтенсивного импульсного воздействия.



Р и с. 5

Т а б л и ц а 2

$\xi \cdot 10^2$	Стеклоэпоксид		Органопластик		Тип КВКМ	
	h , мм		h , мм		I	II
	5	2,1÷2,5	5	1,7÷2,5	$\gamma = 0,67$	$\gamma = 0,25$
10—11				●	⊗	
9—10			●			
8—9	●					
7—8				⊗	⊙	□
6—7	□	●				
5—6		□			○	⊗
4—5			○			
3—4	△	⊙				
2—3	○					

Примечание. Образцы после эксперимента: ○ — целые, без видимых последствий испытания, ⊙ — обрывы отдельных волокон, ⊗ — множественные обрывы волокон, △ — сквозные порывы и трещины (без разделения на части), □ — разрушение от изгиба, ● — разрушение при растяжении.

У стеклоэпоксида это более высокая плотность и деформативность в направлении силовой основы, а у органопластика — наличие диссипативных свойств и более высокая прочность на разрыв.

В [14] на основе приближенного анализа динамики деформирования наиболее нагруженной части образца с учетом ряда факторов, влияющих на несущую способность при импульсном нагружении, даются рекомендации по выбору рациональной концентрации волокон различных типов в КВКМ. Для экспериментальной проверки рекомендаций была изготовлена серия трубчатых образцов из стеклоэпоксида с $h = 2,1$ мм, органо-пластика с $h = 1,7$ мм и двух типов КВКМ с относительным объемным содержанием волокон СВМ $\gamma = 0,67$ и $\rho = 1,55$ г/см³ для типа I с $h = 2,8$ мм и $\gamma = 0,25$, $\rho = 1,87$ г/см³ и $h = 1,7$ мм для типа II. Последовательным увеличением от эксперимента к эксперименту массы заряда ВВ была определена величина заряда 7,5 г, при которой на образцах из стеклоэпоксида и органопластика при однократном нагружении повторяется картина, аналогичная рис. 3, а. Поскольку максимальные напряжения при импульсном нагружении обратно пропорциональны толщине образца и пропорциональны величине распределенного импульса давления (который пропорционален массе ВВ [16]), эквивалентным зарядом для КВКМ типа I при $h = 2,8$ мм является заряд ВВ массой 10 г.

На рис. 5 приведены образцы из КВКМ, подвергнутые однократному воздействию ПВ зарядов ВВ массой 10 и 15 г (типа I, образцы III и IV) и 7,5 г (типа II, образец I). Образец из КВКМ типа II выдержал фазу растяжения при частичном разрушении волокон СВМ (на осциллограмме отмечено скачкообразное уменьшение скорости деформации), по потере несущую способность из-за нарастания изгибной формы движения, причиной чему была большая величина запасенной упругой энергии. Образцы же из КВКМ типа I не получили глобальных дефектов. Эквивалентная картина имеет место при наличии одного или двух слоев медной фольги. Из образца КВКМ типа I, подвергнутого воздействию ПВ заряда ВВ массой 10 г, был вырезан кольцевой образец и испытан на остаточный предел прочности, который составил 0,58 ГПа, что на 14 % выше, нежели у стеклоэпоксида с объемной концентрацией волокон стекла, как у КВКМ типа I.

Таким образом, несущая способность по абсолютной массе заряда ВВ образцов из КВКМ с $\gamma = 0,67$ по меньшей мере в 1,5 раза выше, чем у образцов из исходных материалов, а если воспользоваться способом сравнения из [3—8] (отношение массы разрушающего заряда ВВ к массе образца), то получается почти двукратное повышение несущей способности. В табл. 2 обобщены и классифицированы по параметру $\xi = m_0/M$ (m_0 — масса заряда ВВ в опыте, M — масса части образца длиной $2R$ с учетом массы медной фольги) результаты всех экспериментов.

Проведенное исследование показывает, что учет особенностей динамики деформирования и разрушения на пределе несущей способности материалов, имеющих в качестве силовой основы различные типы волокон, и синтез преимуществ каждого из них позволяют создавать КВКМ, предназначенные для конструкций, эксплуатируемых в экстремальных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чамис К. К., Смит Г. Т. Влияние воздействия внешней среды и высокой скорости деформирования на композиты, применяемые в конструкциях двигателей // Аэрокосмич. техніка. — 1984. — № 9.
2. Daniel I. M., Libard R. H., Liber T. New method for testing composites at very high strain rates // Exper. Mech. — 1981. — V. 11, N 2.
3. Рыжанский В. А., Минеев В. И., Иванов А. Г. и др. Разрушение цилиндрических стеклоэпоксидных оболочек, заполненных водой, при внутреннем импульсном нагружении // Механика полимеров. — 1978. — № 2.
4. Цыпкин В. И., Русак В. И., Шитов А. Т., Иванов А. Г. Деформация и разрушение цилиндрических оболочек из стеклоэпоксида при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. — 1981. — № 2.
5. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Иванов А. Г. и др. Особенности динамического деформирования и разрушения цилиндрических стеклопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. — 1983. — № 1.
6. Иванов А. Г., Цыпкин В. И. Деформация и разрушение стеклопластиковых оболочек при экстремальных импульсных нагрузках // Механика композит. материалов. — 1987. — № 3.
7. Цыпкин В. И., Русак В. И., Иванов А. Г. и др. Деформация и разрушение двухслойных металлопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. — 1987. — № 5.
8. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Сырунин М. А. и др. Поведение композитных оболочек с высокоэластичным связующим при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. — 1988. — № 2.
9. Тарнопольский Ю. М., Киндиг Т. Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. — М.: Химия, 1975.
10. Dewhurst P., Hawkyard J. B., Johnson W. A theoretical and experimental investigations of dynamic circular cylindrical expansions in metals // J. Mech. Phys. Solids. — 1974. — V. 22, N 4.
11. Шитов А. Т., Минеев В. И., Клецевников О. А. и др. Проволочный датчик для непрерывной регистрации больших деформаций при динамическом нагружении конструкций // ФГВ. — 1976. — № 2.
12. Степаненко С. В., Асеев А. В., Макаров Г. Е. Исследование поведения образцов из композиционных материалов под действием импульсной нагрузки // Сибирская шк. по современным проблемам механики деформируемого твердого тела: Тез. докл. — Якутск, 1990.
13. Степаненко С. В., Асеев А. В., Макаров Г. Е. Динамика разрушения и трещинообразование в образцах из композиционных материалов с различной силовой основой // III Всесоюз. симпозиум по механике разрушения: Тез. докл. — Киев, 1990. — Ч. 3.
14. Степаненко С. В., Асеев А. В., Макаров Г. Е. Опыт синтеза комбинированного волокнистого материала, ориентированного на использование в конструкциях, предназначенных для локализации высокоинтенсивного импульса давления // Респ. семина. «Прочность и формоизменение элементов конструкций при воздействии динамических физико-механических полей»: Тез. докл. — Киев, 1990.
15. Амбарцумян С. А. Теория анизотропных пластин. — М.: Наука, 1987.
16. Физика взрыва/Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. — М.: Наука, 1975.

г. Новосибирск

Поступила 8/1 1991 г.,
в окончательном варианте — 19/III 1991 г.