

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА ПРИ МНОГОКРАТНОМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

УДК 624.074.4:678

М. А. Сырунин, А. Г. Федоренко, А. Г. Иванов

ВНИИ экспериментальной физики, 607200 Саров

Экспериментально показано, что для цилиндрических оболочек из ориентированного стеклопластика существует критический уровень деформаций, при котором конструкция выдерживает заданное число взрывов изнутри. Величина критической деформации линейно зависит от логарифма числа нагружений до разрушения. Для данного типа стеклопластика имеет место граничный уровень взрывного воздействия, при котором число нагружений, не приводящих к разрушению, может быть достаточно большим (более $\sim 10^2$). Этот уровень достигается при нагрузках примерно на порядок ниже предельных при однократном взрывном воздействии.

К материалам, позволяющим создавать конструкции с новыми, зачастую уникальными свойствами, относятся композиты на основе высокопрочных волокон малого диаметра, и в том числе ориентированные стеклопластики. В работах [1–7] достаточно широко исследованы несущая способность и разрушение оболочек из стеклопластика при взрывном нагружении. Показано, что на основе этих материалов возможно создание взрывостойких контейнеров (взрывных камер) с уникальными параметрами: отношение массы заряда взрывчатого вещества в тротиловом эквиваленте, взрыв которого локализуется в объеме контейнера, к массе его силовой оболочки может составлять $\sim 0,05$ [7, 8]. Однако для расширения диапазона применимости стеклопластиков в защитных оболочечных конструкциях еще не в полной мере исследован вопрос об их усталостной прочности при взрывном нагружении, хотя ранее он уже затрагивался в [1, 3, 9]. Было установлено, что динамическая прочность и деформируемость оболочек из стеклоэпоксида (стеклоткань, пропитанная эпоксидным связующим) существенно зависят от уровня взрывной нагрузки и числа нагружений N [1]. Так, при $N = 1, 3-4$ и 23 сквозные трещины появляются при максимальной окружной деформации оболочки $\varepsilon_y = 2,5, 2$ и $1 \div 1,2\%$ соответственно. При исследовании волокнистых намоточных стеклопластиков также было замечено снижение предельной (разрушающей) деформации в случае повторного нагружения [5]. Однако данные эффекты, связанные с количеством нагружений, для класса волокнистых стеклопластиков изучались только в узком интервале нагрузок, близких к предельным значениям, когда исходные компоненты (силовые волокна и связующее) получали сильные повреждения при первоначальном нагружении. Последующее нагружение сразу же приводило к разрушению всего слоистого пакета композита.

В данной работе более подробно исследуется влияние количества нагружений разных уровней на предельную разрушающую деформацию цилиндрических оболочек из намоточного волокнистого стеклопластика в широком интервале взрывных нагрузок. Объек-

Результаты опытов по взрывному нагружению оболочек из стеклопластика

Номер образца	$\delta/R, \%$	N	$m_{ВВ}, г$	$\xi \cdot 10^{-3}$	$V, м/с$	$\dot{\epsilon}_y, 1/с$	$\epsilon_y, \%$	Состояние оболочки
1	6,7	1	303	28,6	110	686	4,7	Разрушилась в фазе растяжения
2	5,8	1	205	21,3	78	490	3,2	Разрушилась в 1-м периоде колебаний в фазе сжатия
3	6,5	1	209	20,0	76	475	3,3	Разрушилась в 6-м периоде колебаний в фазе сжатия
4	4,8	1	169	19,3	80	509	3,1	Не разрушилась, имеет повреждения
		2	169	19,3	—	—	—	Разрушилась
5	6,6	1	171	14,2	71	444	2,5	Не разрушилась, имеет повреждения
		2	167	13,8	—	—	—	Разрушилась
6	6,2	1	137	12,6	62	387	2,0	Не разрушилась, имеет повреждения
		3*	137	12,6	—	—	—	Разрушилась
7	6,2	1	110	10,1	52	324	1,8	Не разрушилась
		5*	110	10,1	64	400	2,15	Разрушилась
8	6,8	1	64,8	5,3	39	244	1,15	Не разрушилась
		2	63,3	5,2	31	194	1,1	» »
		9*	63,5	5,2	28	175	0,9	Не разрушилась, имеет повреждения
		15*	62,5	5,1	—	—	—	Разрушилась
9	4,9	1	21	2,4	17	108	0,45	Не разрушилась
		2	29,9	3,4	19	127	0,73	» »
		3	29	3,3	18	112	0,63	» »
		44*	29	3,3	16	102	0,65	Не разрушилась, имеет повреждения
		81*	29	3,3	20	127	0,55	»

Примечание. * Результаты остальных (аналогичных предыдущим) опытов по взрывному нагружению оболочек не приводятся.

тами испытаний являлись цилиндрические круговые оболочки из стеклопластика, которые изготавливали методом мокрой намотки лент из ровинга РВМН10-1260-80 (на основе волокна ВМ-1), пропитанных эпоксидным связующим ЭДТ-10. Оболочки имели комбинированную схему армирования с чередованием двойных спиральных (угол армирования слоев $\varphi = 45^\circ$) и кольцевых ($\varphi = 90^\circ$) слоев при соотношении их толщин 1 : 1. Внутренний радиус оболочки $R = 150$ мм, длина $4R$, толщина стенки δ , относительная толщина стенок $\delta/R = 4,8 \div 6,7\%$, масса оболочки M . Образцы после изготовления обмеряли и взвешивали, и методом гидростатического взвешивания определяли среднюю плотность стеклопластика ρ . Подобные оболочки уже исследовали в [5, 7].

Нагружение открытой с торцов оболочки осуществлялось путем подрыва заряда взрывчатого вещества сферической формы из сплава ТГ 5/5 массой m , расположенного в геометрическом центре ее полости. Методами скоростной фоторегистрации и тензометрии

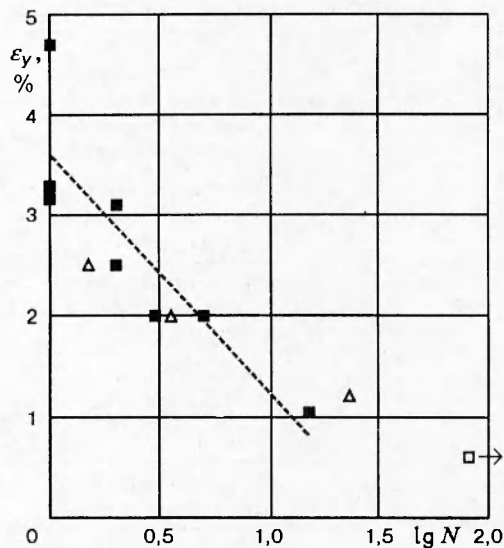


Рис. 1. Зависимость окружной деформации ε_y от $\lg N$:

△ — данные [1], ■ — разрушение, □ — нет разрушения, штриховая линия — линейная аппроксимация

в экспериментах измеряли деформацию оболочки во времени $\varepsilon(t)$ в наиболее нагруженном центральном сечении. По результатам измерений определяли максимальную окружную деформацию ε_y , максимальную скорость радиального смещения V , по которой вычисляли максимальную скорость деформации $\dot{\varepsilon} = V/R_H$, где $R_H = R + \delta$. Погрешность определения указанных величин не превышала 10%. Разрушением оболочки в эксперименте считалось образование в ней хотя бы одной сквозной макротрещины. Появление других дефектов типа отслоений, обрывов отдельных нитей, растрескивания связующего рассматривалось как повреждение оболочки, не препятствующее проведению последующих нагружений. За условную характеристику удельной взрывной нагрузки оболочки, как и ранее [1–7], принималась величина $\xi = m/M$. Некоторые исходные данные и основные результаты экспериментов приведены в таблице. На рис. 1 показана экспериментальная зависимость разрушающей окружной деформации ε_y от $\lg N$. Там же представлены результаты работы [1].

Анализ полученных данных показал, что в интервале $0 < \lg N < 1,18$ все экспериментальные точки описываются линейной функцией $\varepsilon_y = 0,0361 - 0,02361 \lg N$. Далее, при $\varepsilon_y \rightarrow \text{const} = 0,6\%$ наблюдается явное отклонение от линейной зависимости. Качественно характер кривой соответствует кривым усталости стеклоэпоксида при циклических испытаниях [10, 11] и близок к данным [1]. Следует отметить, что высокоскоростное взрывное нагружение оболочки вызывает периодические колебания ее стенок с примерно постоянной частотой основного тона свободных радиальных колебаний (рис. 2). Эта частота (~ 5 кГц) существенно превышает частоту изменения нагрузки при циклических квазистатических испытаниях (не более единиц герц). Кроме того, указанные колебания имеют характер биеений из-за близких частот возбужденных форм собственных колебаний оболочки и носят слабо затухающий характер [2, 5]. Поэтому нельзя провести прямое количественное сравнение известных результатов циклических испытаний с полученными данными взрывных экспериментов. Для конструкций из стеклопластиков многоразового применения, подверженных взрывным нагрузкам, требуется проведение специальных опытов.

Оболочки из стеклопластика, заполненные воздушной средой, деформируются упруго вплоть до начала разрушения, что согласуется с данными предыдущих работ [1–7]. При динамической реакции их стенки испытывают радиальные и изгибно-меридиональные ко-

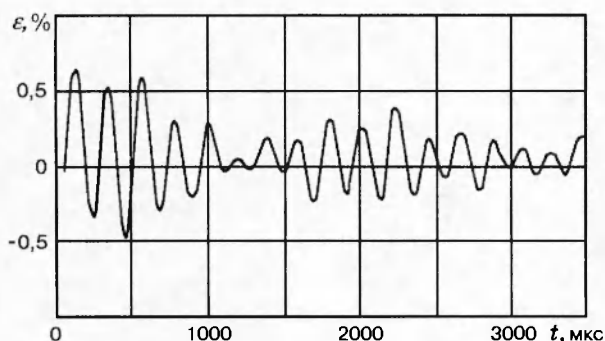


Рис. 2. Оциллограмма окружной деформации центрального сечения оболочки

лебания с периодами основного тона $T_y = 215 \div 245$ мкс и $T_x = 450 \div 495$ мкс соответственно [5, 7].

Разрушение оболочек при удельной нагрузке $\xi > 28,6 \cdot 10^{-3}$ происходит в первой фазе растяжения при максимальной окружной деформации $\varepsilon_y > 4,7\%$, что согласуется с результатами работ [5–7], где $\varepsilon_y = (4,8 \pm 0,4)\%$. Нагрузки в интервале значений $19,3 \cdot 10^{-3} < \xi < 21,3 \cdot 10^{-3}$ вызывали разрушение оболочек при первом нагружении после одного или нескольких радиальных колебаний с максимальной начальной деформацией в пределах $3,1 < \varepsilon_y < 3,3\%$, что существенно ниже предельной величины деформации ε_y материала (см. выше). Здесь разрушение оболочки наступало за счет динамической потери устойчивости радиальных осесимметричных колебаний и развития их изгибных форм (по аналогии с [2, 5, 7]). Для удельных нагрузок $\xi = 14 \cdot 10^{-3} \div 19,3 \cdot 10^{-3}$ разрушение оболочек при первом нагружении не происходило. Однако повторное нагружение того же уровня уже вызывало разрушение оболочки при $\varepsilon_y = 2,5 \div 3,1\%$. В работе [5] для однотипной по структуре и размерам оболочки также было замечено, что ее разрушение от повторного взрывного воздействия наступало при $\xi = 18,5 \cdot 10^{-3}$ и $\varepsilon_y = 2,9\%$ (первое нагружение: $\xi = 7 \cdot 10^{-3}$, $\varepsilon_y = 1\%$), т. е. явно сказывается влияние повреждений от первого воздействия. Дальнейшее уменьшение уровней ξ приводит к увеличению числа нагружений, которые оболочка выдерживает до разрушения. При $\xi = 3,3 \cdot 10^{-3}$ ($\varepsilon_y = 0,6\%$) оболочку не удалось довести до полного разрушения более чем 80 нагружениями. Причем после этого характер повреждений оболочки свидетельствовал об имеющемся у нее значительном резерве прочности. Не исключено, что при указанном уровне деформаций не достигается предел усталости материала и число циклических взрывных нагружений может существенно возрасти. На такую возможность указывают также данные [10], где для стеклоэпоксида при циклическом пульсирующем растяжении с частотой $1000 \div 2000$ цикл/мин при максимальном напряжении цикла ~ 12 кгс/мм² ($\varepsilon \approx 0,5\%$) происходит стабилизация кривой усталости, т. е. число циклов резко возрастает и превышает 10^5 . Однако такое предположение для взрывного нагружения должно проверяться экспериментально, поскольку импульсное давление отражения ударной волны, прикладываемое к внутренней стенке оболочки по нормали к ней, дополнительно нагружает материал и также может приводить к повреждениям.

Слоистый пакет исследуемого композита состоит из силовых армирующих нитей из волокон, сформированных в слои, и из скрепляющего их полимерного эпоксидного связующего. Характер разрушения оболочек из стеклопластика комбинированной структуры после многократного нагружения соответствует ранее полученным результатам при однократном нагружении [4–7]. В материале сначала растрескивается связующее, проч-



Рис. 3. Вид разрушенного образца 8 (см. таблицу) после 15-го нагружения

ностные и деформационные характеристики которого ниже, чем у стеклянных волокон, образуются области засветлений [5, 12]; далее отслаиваются и разрушаются отдельные нити из волокон, затем повреждаются отдельные слои, и в конечном итоге образуется сквозная трещина с рыхлыми краями (рис. 3). Близость характера разрушения оболочек из стеклопластика при однократном и многократном нагружениях указывает на то, что возникающие в композите повреждения слабо зависят от скорости деформации и даже, по-видимому, от уровня нагружения. Но кинетика их накопления и достижения критического (разрушающего) уровня поврежденности существенно зависит от этих факторов, а также от длительности фаз нагрузки — разгрузки.

Таким образом, проведенные исследования показали, что для оболочек из ориентированного стеклопластика существует критический уровень деформаций, при которых материал выдерживает заданное число взрывных воздействий; весьма вероятно наличие граничного уровня взрывного нагружения, для которого число нагружений может быть более 10^2 . Для данного типа стеклопластика этот уровень достигается при нагрузках примерно на порядок ниже предельных при однократном взрывном воздействии.

Полученные данные можно использовать в качестве оценок при разработке композитных оболочек защитных камер и сооружений, предназначенных для многократного восприятия взрывных нагрузок.

Работа завершена при поддержке Международного научно-технического центра (МНТЦ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыпкин В. И., Русак В. Н., Шитов А. Т., Иванов А. Г. Деформация и разрушение цилиндрических оболочек из стеклоэпоксида при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. 1981. № 2. С. 249–255.
2. 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. С. 90–94.

3. **Иванов А. Г., Цыпкин В. И.** Деформация и разрушение стеклопластиковых оболочек при экстремальных импульсных нагрузках // *Механика композит. материалов.* 1987. № 3. С. 472–480.
4. **Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г.** Динамическая прочность оболочек из ориентированных волокнистых композитов при взрывном нагружении (обзор) // *ПМТФ.* 1993. № 1. С. 126–132.
5. **Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г.** Влияние структуры армирования ориентированных стеклопластиков на прочность круговых цилиндрических оболочек при взрывном нагружении изнутри // *Механика композит. материалов.* 1991. № 4. С. 631–640.
6. **Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Иванов А. Г.** Предельные деформации оболочек из ориентированного стеклопластика при внутреннем нагружении // *Физика горения и взрыва.* 1992. Т. 28, № 2. С. 87–93.
7. **Иванов А. Г., Сырунин М. А., Федоренко А. Г.** Влияние структуры армирования на предельную деформируемость и прочность оболочек из ориентированного стеклопластика при взрывном нагружении изнутри // *ПМТФ.* 1992. № 4. С. 130–135.
8. **Пат. 2009387 РФ.** Способ изготовления устройства для локализации продуктов взрыва / **Иванов А. Г., Сырунин М. А., Федоренко А. Г.** // *БИ.* 1994. № 5.
9. **Серенсен С. В., Зайцев Г. П.** Несущая способность тонкостенных конструкций из армированных пластиков с дефектами. Киев: Наук. думка, 1982.
10. **Фудзии Т., Дзак М.** Механика разрушения композиционных материалов. М.: Мир, 1982.
11. **Ратнер С. Б., Ярцев В. П.** Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? М.: Химия, 1992.
12. **Иванов А. Г., Сырунин М. А., Федоренко А. Г.** Откольная прочность намоточного стеклопластика в трех главных направлениях // *Проблемы прочности.* 1993. № 1. С. 82–88.

*Поступила в редакцию 23/V 1996 г.,
в окончательном варианте — 22/I 1997 г.*
