

КРИТЕРИИ ВЫБОРА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЛОКАЛИЗУЮЩИХ ВЗРЫВ (ОБЗОР)

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

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, root@gdd.vniief.ru

На основе обобщения экспериментальных данных по динамической реакции и прочности простейших оболочек из волокнистых композитов обоснован выбор этих материалов для силовых оболочек взрывозащитных конструкций. Показаны преимущества использования композитов в таких конструкциях для исключения сильного масштабного эффекта энергетической природы, проявления которого ограничивают применение однородных металлических сплавов — конструкционных сталей.

Предложен и экспериментально обоснован критерий выбора типа волокон, установлены схемы армирования для обеспечения оптимальных по отношению «прочность — масса» композиций для оболочек силовых корпусов взрывозащитных контейнеров и камер.

Ключевые слова: взрыв, защита, оболочки, критерии, выбор, композит.

ВВЕДЕНИЕ

Для современного промышленного и транспортного оборудования характерны повышенная энергоемкость, крупные габариты, высокоинтенсивный, зачастую динамический и взрывной, характер нагружения (взрывозащитные сооружения, камеры и контейнеры, защитные оболочки атомных электростанций и т. п.). В этой связи актуальна задача поиска эффективных и надежных материалов силовых элементов оболочечных конструкций, обеспечивающих локализацию в своем объеме поражающих факторов взрыва.

Для обоснованного выбора материала, расчета напряженно-деформированного состояния и предельной несущей способности конструкции из этого материала необходимо знание его упругих и прочностных характеристик. Вопрос влияния масштаба на динамическую прочность конструкций является принципиальным, в особенности для крупногабаритных конструкций. Поэтому применение моделирования для удешевления отработки ответственных конструкций повышенной надежности и обоснование корректности использования результатов такого моделирования для натурных конструкций из сталей требовали подтверждения в прямых экспериментах.

Результаты экспериментальных исследований [1–4] разномасштабных, геометрически подобных оболочечных корпусов сферической и цилиндрической геометрии из конструкци-

онных сталей при внутреннем взрывном нагружении (при заполнении полости водой и воздухом) однозначно указывают на возможность проявления сильного масштабного эффекта энергетической природы (МЭЭП) [5], что обуславливает снижение предельной величины удельной несущей способности ξ (отношение предельной массы ВВ, взрыв которого выдерживает оболочка, к ее массе) и деформируемости с геометрически подобным увеличением размеров оболочки. Проявления МЭЭП для стальных конструкций особенно усугубляются при переходе от цилиндрической формы оболочки к сферической [1, 2], что вызвано снижением пластичности и деформируемости оболочки при увеличении двухосности напряженного состояния и удельного запаса энергии упругой деформации. МЭЭП обусловлен тем, что при одинаковом упругом напряженном состоянии модели и натуре запас энергии упругой деформации пропорционален нагруженному объему, т. е. кубу множителя масштаба, а площадь поверхности трещины (или трещин), образующейся при разрыве, пропорциональна квадрату множителя масштаба. Данное обстоятельство не только затрудняет надежную отработку крупногабаритных конструкций на уменьшенных моделях, но и резко ограничивает их удельную несущую способность при увеличении габаритов сверх определенной величины (индивидуальной для каждого материала и зависящей от упругих свойств и коэффициента трещиностойкости). В случае взрывно-

го нагружения возможность проявления МЭЭП существенно повышается за счет роста запаса удельной упругой энергии, а также вследствие более высокой вероятности наличия исходных дефектов структуры и их образования в процессе интенсивного нагружения оболочки ударной волной взрыва и динамического деформирования.

Разработка и применение новых конструкционных материалов, в частности волокнистых композитов, позволяет разрешить проблему исключения МЭЭП.

Эффективность композитов на основе высокопрочных волокон малого диаметра заключается в том, что им, как будет показано ниже, присуще важное свойство, отличающее их от однородных материалов, а именно отсутствие проявления МЭЭП, что заметно повышает надежность отработки таких конструкций на более дешевых, уменьшенных моделях и снижает материалоемкость крупногабаритных взрывостойких конструкций.

Таким образом, необходимость экспериментального исследования реакции и закономерностей разрушения оболочек из волокнистых композитных материалов при взрывном нагружении продиктована запросами практики и, в частности, стремлением повысить удельную прочность с тем, чтобы снизить массогабаритные параметры разрабатываемых взрывостойких камер и контейнеров. На возможность решения данной задачи указывают многочисленные примеры успешного и эффективного применения новейших композитных материалов в авиации, ракетной и космической технике, т. е. там, где массовая и геометрическая эффективность конструкций стоит на первом месте.

Несмотря на обилие исследований разнообразных композитных материалов при динамическом нагружении, нет достаточно полных данных по динамической прочности и рекомендаций по выбору проектных параметров конкретных материалов, их свойств и критериев разрушения для простейших оболочечных конструкций при внутреннем взрывном нагружении. Например, существует много работ по исследованию поведения оболочек при импульсных нагрузках (см., например, достаточно подробный обзор [6]), однако в них практически отсутствуют данные, касающиеся критериев выбора параметров композитных оболочек и их поведения в условиях импульсного нагружения.

Обзор основных результатов по динамической реакции и прочности простейших оболочек из волокнистых композитов приведен в работах [7, 8], где анализируются основные особенности поведения композитных оболочечных конструкций и показана возможность эффективного использования волокнистых композитов в качестве силового материала в ответственных взрывозащитных конструкциях. Наиболее полное освещение данной проблемы и пути ее успешного разрешения вплоть до создания надежно работающих взрывозащитных конструкций представлены в монографии [9]. Практическая реализация данного подхода изложена в работах [10–12].

Здесь рассмотрим основные работы, посвященные обоснованию критериев выбора композитных материалов для взрывозащитных оболочечных конструкций.

В [13] представлены результаты испытаний цилиндрических оболочек на взрывное нагружение изнутри. Внутренний радиус оболочек $R = 150$ мм, отношение толщины к радиусу $\delta/R = 8.5 \div 11.9$ %. Оболочки выполнены из ориентированного волокнистого композита с одинаковой схемой армирования мокрой намоткой лент из нитей стекловолокна (типа ВМ-1) и органоволокна СВМ с чередованием спиральных (угол намотки относительно образующей $\varphi_1 = \pm 45 \div 60^\circ$) и кольцевых ($\varphi_2 \approx 90^\circ$) слоев при отношении их толщин $1:1^*$. Показано, что повышение эластичности эпоксидного связующего (методом добавки в него каучука)

*Намотка проводится на станке с программным управлением лентами из стеклонитей или жгутов, пропитанных жидким связующим при прохождении соответствующей емкости с ним. Толщина слоев управляется шириной укладки заданного количества лент на оболочке. При намотке лент с одинаковой шириной трубчатые (цилиндрические) оболочки изготавливаются намоткой на достаточно длинную, слабо коническую стальную оправку (чтобы обеспечить снятие изделия с оправки) с углом $+\varphi$ в одном направлении прохода оправки и с возвратом вблизи конца оправки и намоткой в обратном проходе с углом $-\varphi$. Этот тип намотки спиральных слоев обеспечивает перекрестное переплетение лент. Для получения соотношения толщин спиральных и окружных слоев $1:1$ (с углом $\varphi \approx 90^\circ$, отличие этого угла от 90° определяется отношением ширины ленты к радиусу оболочки) требуется два прохода в прямом и обратном направлениях с углами $+\varphi$ и $-\varphi$ и два прохода с приблизительно кольцевой намоткой и такой же плотностью укладки лент и нитей в них. Для получения соотношения $1:2.5$ необходимы два прохода в прямом и обратном направлениях с углами $+\varphi$ и $-\varphi$ и пять проходов с приблизительно кольцевой намоткой и такой же плотностью укладки лент и нитей в них.

с повышением на порядок его предельной деформации растяжения ε (приблизительно с 4 до 40 %) слабо влияет на динамическое поведение и прочность композита. В дополнение к работе [14] показана основная роль высококомодульных волокон (как стеклянных, так и органических) в создании сопротивления композитной оболочки динамическому деформированию и разрушению.

Отметим, что динамическое и, в частности, импульсное нагружение, реализуемое при взрыве, когда время действия нагрузки существенно меньше длительности периода основного тона осесимметричной (или центрально-симметричной) реакции оболочки на нагрузку, вносит особенности в определение критерия выбора материала для минимизации материалоемкости конструкции.

Анализ работы импульсно нагруженной конструкции в [13] показал, что в данном случае критерием снижения материалоемкости для выбора линейно упругого волокна может служить не его удельная прочность, а произведение скорости звука в нем на предельную деформацию в динамических условиях растяжения (равное максимальной начальной радиальной скорости расширения кольцевого элемента, способного удержать себя от разрыва). Действительно, следуя [13] и принимая для оценок гипотезу «короткого удара» [15], получаем, что при воздействии центрально-симметричного импульса I на кольцевой элемент оболочки массой M его начальная кинетическая энергия $I^2/2M$ в конце фазы расширения переходит в потенциальную энергию упругой деформации элемента, т. е.

$$\frac{I^2}{2M} = \frac{E\varepsilon^2}{2} \frac{M}{\rho}, \quad (1)$$

где ε — предельная окружная деформация материала, ρ — плотность материала оболочки, E — окружной модуль упругости (для оболочки в зависимости от характера ее деформации в условиях взрывного нагружения необходимо брать приведенный окружной модуль E' , зависящий от E и коэффициентов Пуассона анизотропного материала заданной схемы армирования).

Приложенная удельная взрывная нагрузка характеризуется параметром $\xi \sim m_{\text{ВВ}}/M$ ($m_{\text{ВВ}}$ — масса взрывчатого вещества). Учитывая, что $I \sim m_{\text{ВВ}}$ [15], из (1) имеем

$$\xi \sim \sqrt{\frac{E}{\rho}} \varepsilon = c\varepsilon,$$

где c — окружная скорость звука. Из приведенных данных опытов следует, что предельная несущая способность композита в основном пропорциональна параметру $w = c\varepsilon$ волокон силовой основы.

Этот критерий позволяет объяснить результаты испытаний оболочек из композитных материалов на основе различных волокон, полученные в работах [14] (сравнение характеристик тканевых композитов на основе стекло- и углеволокон) и [13] (сравнение волокна СВМ, имеющего существенно более высокую удельную статическую прочность σ_p/ρ при вдвое большем диаметре, со стекловолокном; оказалось, что они близки как по величине удельной взрывной прочности, так и по значениям параметра w , равного 348 и 321 м/с соответственно; причем эти оценки были сделаны по известным статическим свойствам элементарного волокна).

Дополнительное подтверждение работоспособности этого критерия дано в [16] при исследовании оболочек одинаковых схем армирования и размеров из гибридных композитов, т. е. с комбинированием стекловолокна, органоволокон и углеволокон, в том числе в одном пакете от одного до трех типов волокна. В [16] получено, что добавление в слои из стекло- или органоволоконных нитей высококомодульного углеволокон (с меньшими значениями ε и $c\varepsilon$) не позволяет повысить их удельную несущую способность по сравнению с материалами с армирующей основой только из стеклянных или органических волокон.

В работе [17] проведено изучение динамической реакции и несущей способности при внутреннем взрывном нагружении оболочек из ориентированного стеклопластика, армированных по одинаковой схеме лентами из ровингов на основе волокон марки ВМ-1, ВМП, Р и Х (ВМ-1, ВМП — волокна широкого применения, Р и Х — волокна экспериментальные). Для сравнения в [17] приведены результаты аналогичных испытаний оболочек из органоластика на основе волокна СВМ. Цилиндрические оболочки формировались комбинированной намоткой лент, пропитанных эпоксидным связующим ЭДТ-10, с чередованием двойных спиральных ($\varphi = \pm 45^\circ$) и кольцевых ($\varphi = 90^\circ$) слоев при соотношении их толщин 1:1. В опы-