

## **Методы и результаты анализа напряженно-деформированного состояния и прочности многослойных толстостенных анизотропных цилиндров при динамическом нагружении (обзор). Сообщение 1. Экспериментальные исследования**

**П. П. Лепихин, В. А. Ромащенко, Е. В. Бахтина**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Приведен анализ известных из литературных источников методов и результатов экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния и прочности многослойных толстостенных анизотропных цилиндров при динамическом нагружении.*

**Ключевые слова:** многослойные толстостенные анизотропные цилиндры, динамическое нагружение, напряженно-деформированное состояние, прочность, методы и результаты экспериментальных исследований.

Развитие машиностроения, авиации, ракетостроения и других отраслей народного хозяйства повысило интерес к динамическим процессам в различных конструкциях, в частности в толстостенных цилиндрических оболочках. К ним относятся сосуды, корпуса и защитные сооружения, предназначенные для удержания значительных гидро-, газодинамических нагрузок и экологически опасных продуктов взрыва, в том числе аварийного, того или иного объекта (авиационное и космическое оборудование, контейнеры для хранения и транспортировки взрывоопасных грузов, токсичных веществ, камеры для энергетики взрывного термоядерного синтеза и т.д.). Для изготовления таких конструктивных элементов все чаще используются композиционные материалы (КМ), в том числе со спиральной намоткой слоев, а также металлокомпозиты, состоящие из внутреннего металлического слоя и наружного многослойного композита.

Целью данной работы является анализ известных из литературных источников методов и результатов экспериментального изучения напряженно-деформированного состояния (НДС) и прочности многослойных, в первую очередь толстостенных, анизотропных цилиндров при внутреннем динамическом нагружении.

Экспериментальному исследованию поведения композиционных оболочек при внутреннем импульсном (взрывном) нагружении посвящено большое количество работ.

В [1] экспериментально изучалось деформирование и разрушение цилиндрических стеклоэпоксидных оболочек, заполненных водой, при внутреннем импульсном нагружении. Оболочки изготовлены намоткой стеклоткани марки Т1, предварительно пропитанной связующим из эпоксидной смолы марки ИФ-ЭД-6КГ. Импульсное нагружение оболочки проводили взрывом в ее центре заряда взрывчатого вещества (ВВ) в форме шара из сплава тротила с гексогеном. Исследовали разрушение геометрически подобных оболочек с

отношением толщины  $\delta$  к наружному радиусу  $R_0$ , равным 3,7%, и  $R_0 = 103,8; 155,8$  и  $457$  мм, а также оболочек с постоянным внутренним радиусом  $100$  мм и  $\delta/R_0 = 3,7; 9,1; 16,7$  и  $21,3\%$ . Методами высокоскоростной кинофотографии и тензометрирования в центральном сечении оболочек регистрировали изменение наружного радиуса и окружной деформации во времени. На основе измеренных величин определяли максимальные скорости радиального расширения, деформации, период собственных радиальных колебаний оболочки и максимальную окружную деформацию перед разрушением. В ряде опытов с помощью манганинового датчика регистрировали импульсное давление. В качестве критерия разрушения оболочки принимали возникновение в ней сквозной трещины, что определяли по прорыву продуктов взрыва ВВ в опыте и при внешнем осмотре после опыта. Установлено, что при взрывном нагружении заполненных водой геометрически подобных оболочек из стеклоэпоксида, размеры которых увеличивались в  $1,5-4,4$  раза, масштабный эффект энергетической природы не наблюдался; окружная деформация оболочек перед разрушением составляла величину порядка  $4\%$  и не зависела от толщины стенки, размеров геометрически подобных оболочек и начальной скорости деформации в пределах  $(0,21...1,2) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ; разрушение тонкостенных оболочек начиналось с наружной поверхности, толстостенных – изнутри; модуль упругости стеклоэпоксида в окружном направлении не зависел от скорости деформации в диапазоне  $(1,0...1,5) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ; материал деформировался упруго вплоть до разрушения; разрушение являлось безосколочным.

В [2] экспериментально изучалось деформирование, разрушение и чувствительность к дефектам цилиндрических оболочек из стеклоэпоксида с наружным радиусом  $R_0$  и толщиной стенки  $\delta$  (длина оболочек  $4R_0$ ) при внутреннем импульсном нагружении, а также выполнено сравнение их прочности с прочностью стальных оболочек в аналогичных условиях. Исследовались цилиндрические оболочки из стеклоэпоксида и стали 20 в воздушной среде. В центре оболочек подрывались сферические заряды ВВ из сплава тротила с гексогеном. Торцы стеклоэпоксидных оболочек были свободными, а стальных закрывались массивными стальными заглушками. Оболочки из стеклоэпоксида имели одинаковые размеры (внутренний радиус –  $116$  мм,  $\delta = 16$  мм) и были получены намоткой стеклоткани марки ТС-8/3-Т, предварительно пропитанной связующим из эпоксидных смол марки ИФ-ЭД-6КГ.

Размеры геометрически подобных стальных оболочек, изготовленных из цельнотянутых труб, различались в четыре раза. Стальные оболочки подвергались только однократному нагружению, оболочки из стеклоэпоксида – одно- и многократному. В эксперименте методами фоторегистрации и тензометрирования изучалось изменение деформации в центральном поперечном сечении оболочек. Разрушение оболочки определялось так же, как и в работе [1]. Анализ [2] показал, что оболочки из стеклоэпоксида деформировались упруго вплоть до разрушения, что согласуется с данными работы [1]; образование сквозных трещин в стеклоэпоксидных оболочках при однократном нагружении наблюдалось при окружных деформациях, больших или равных  $2,5\%$ , причем разрушение происходило в фазе сжатия; разрушение оболочек в фазе растяжения (в первом полупериоде), как и в [1], имело место при

деформациях, близких к 4%. Следует отметить, что при импульсном нагружении стеклоэпоксидных оболочек [1] динамические деформации сжатия вследствие наличия воды в их полости не превышали 1%. В целом эксперименты [1, 2] свидетельствуют о существенном преимуществе использования стеклоэпоксида для цилиндрических конструкций, в том числе и крупногабаритных, работающих в условиях импульсного нагружения.

Исследованию причин, ограничивающих несущую способность цилиндрических стеклопластиковых оболочек при однократном внутреннем импульсном нагружении, посвящена работа [3]. Экспериментально исследовались деформация и разрушение оболочек со свободными торцами. Постановка эксперимента и методы регистрации подробно описаны в [2]. В опытах использовались два типа оболочек, изготовленных из стеклопластика на основе ткани, аналогичного изученному в [2]. Внутренний радиус оболочек составлял 100 мм, оболочки I типа имели толщину 16 мм, длину 400 мм, оболочки II типа – соответственно 5 и 240 мм. Исследования показали, что снижение несущей способности стеклопластиковых оболочек в воздушной среде при внутреннем однократном импульсном нагружении обусловлено динамической потерей устойчивости радиальных колебаний, а их относительная толщина является существенным параметром, влияющим на динамическую прочность. При этом основная импульсная нагрузка сосредоточена в зоне протяженностью не более диаметра оболочки.

В работе [4] изучалось поведение тканей на основе угле- и стекловолокна при высокоскоростном растяжении в области скоростей деформаций  $\sim 10^3 \dots 10^4 \text{ с}^{-1}$ . Использовался широко известный способ оценки несущей способности материалов при высокоскоростном растяжении – взрыв заряда ВВ внутри полой цилиндрической оболочки [2]. Исследовалась стеклоткань марки ТС-8/3-250 и углеродная ткань марки УУТ-2. Во избежание нежелательных краевых эффектов при нагружении эксперименты проводились на цилиндрических оболочках длиной, равной двум диаметрам, при взрыве внутри сферического заряда ВВ из сплава тротила с гексогеном. Оболочки с внутренним радиусом  $R$ , длиной  $4R$  и толщиной  $\delta$  изготавливались намоткой ткани с ориентацией ее основы в окружном направлении. Схема постановки опытов идентична приведенной в работе [2]. Каждая оболочка подвергалась нагружению только один раз. Полученные результаты подтверждают сделанный в [2] вывод, что основным силовым элементом стеклопластика в условиях экстремальных импульсных нагрузок является его армирующая основа.

В [5] исследовалось влияние масштаба на несущую способность и параметры деформации цилиндрических стеклопластиковых оболочек при однократном внутреннем импульсном нагружении. Эксперименты проводились в более широком диапазоне изменений масштаба (в 9,3 раза), чем в работе [1] (в 4,4 раза). Изучались деформация и разрушение геометрически подобных цилиндрических стеклопластиковых оболочек со свободными торцами. Постановка эксперимента и методы регистрации подробно описаны в [2]. Разрушение и его характер (количество трещин и их предвестников) определялись так же, как и в [1, 2]. В опытах использовались оболочки из стеклопластика

на основе ткани, аналогичной описанной в [2]. Длина оболочек была равна четырем внутренним радиусам  $R$ , относительная толщина стенки  $\delta/R$  составляла 6%. Исследовались оболочки двух характерных размеров: с внутренним радиусом 75 (I тип) и 700 мм (II тип). Установлено, что масштабный эффект энергетической природы, при котором возможно многократное снижение прочности, в экспериментах со стеклопластиковыми цилиндрическими оболочками при внутреннем взрывном нагружении в воздушной среде, не наблюдался. Подтверждено, как и в [3], что причиной разрушения являются потеря устойчивости осесимметричных колебаний оболочки и переход энергии их колебаний в изгибную форму, вследствие чего в локальных объемах оболочки достигается разрушающая деформация.

В работе [6] анализируются и обобщаются основные результаты экспериментальных исследований [1–5], отмечаются факторы и параметры, определяющие несущую способность оболочек при экстремальных импульсных нагрузках. С единых позиций рассмотрены особенности динамического разрушения стальных и стеклопластиковых оболочек, а также физическая природа масштабного эффекта. Показаны существенные преимущества стеклопластиковых оболочек перед стальными при экстремальных импульсных нагрузках.

Оценка коэффициентов вариации предельной нагрузки и предельной деформации стеклопластиковых цилиндрических оболочек при внутреннем импульсном нагружении является целью работы [7]. Постановка эксперимента и методы регистрации аналогичны тем, которые описаны в [2]. Объектом испытаний служили цилиндрические стеклопластиковые оболочки, в которые без зазора вставлялись стальные оболочки (сталь 20). Стеклопластиковые оболочки были изготовлены методом “мокрой” намотки ровинга РВНМ10-1260-80, пропитанного связующим ЭДТ-10, с чередующимися кольцевыми и спиральными ( $\varphi = \pm 35^\circ$ ) слоями. Здесь и далее  $\varphi$  – угол армирования (намотки) относительно образующей. Исследования показали, что стеклопластиковые оболочки в условиях экстремальных импульсных нагрузок обладают более высокой, чем при статическом нагружении, прочностью по критерию предельной деформации и достаточной его стабильностью.

Возможность более полного использования резервов прочности стеклопластика в оболочечной конструкции при внутреннем импульсном нагружении исследовалась в [8]. Были изучены деформирование и разрушение цилиндрических двухслойных металлопластиковых оболочек (внутрь стеклопластиковой без зазора вставлялась оболочка из стали 20) при внутреннем взрывном нагружении. Постановка эксперимента и методы регистрации подробно описаны в работе [2]. Оболочки, не разрушившиеся при первом испытании, подвергались последующим нагружениям. Разрушение и его предвестники (“засветления” на стеклопластиковой оболочке) устанавливались так же, как и в работе [1]. Использовались два типа оболочек из стеклопластика на основе ткани ТС-8/3-Т (аналогичного описанному в [2]) с одинаковым внутренним радиусом 100 мм и толщиной 16 (I тип) и 7 мм (II тип). Масса равнотолщинного слоя стали в металлопластиковых оболочках варьировалась и составляла 1,7; 3,42 и 8,14 кг. Выполненные исследования с учетом данных [2, 3] свидетельствуют о существенных преимуществах использования

комбинированных металлопластиковых оболочек в тонкостенных конструкциях, работающих в условиях экстремальных импульсных нагрузок.

Целью работы [9] было исследование влияния существенного увеличения эластичности связующего композитной оболочки на ее динамическую реакцию и прочность при внутреннем импульсном нагружении при скоростях деформации до  $10^3 \text{ с}^{-1}$ . Оболочки изготавливались из стекловолокна (нить марки ВМПС) и органоволокна СВМ. Постановка эксперимента и методы регистрации подробно описаны в [2]. Оболочки, не разрушившиеся в первом испытании, подвергались последующим нагружениям (до трех раз). Использовались четыре типа оболочек из стеклопластика (тип I и II) и органо-пластика (тип III и IV) с одинаковым внутренним радиусом  $R = 150 \text{ мм}$ , длиной  $4R$  и относительной толщиной стенок  $\delta/R = 8,5...11,9\%$ , которые имели одинаковую схему армирования и различались эластичностью связующего. Оболочки формировались комбинированной намоткой лент из нитей с чередованием спиральных ( $\varphi = \pm 45...60^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi = \pm 90^\circ$ ) слоев при отношении их толщин 1:1. Для оболочек типа I и III использовалось эпоксидное связующее ЭДТ-10, для II и IV – высокоэластичное эпоксидное связующее с относительным удлинением  $\sim 30\%$ . Было установлено следующее: все исследованные оболочки деформируются упруго вплоть до разрушения, что согласуется с данными работ [1–5]; изменение эластичности связующего влияет на демпфирующие свойства – затухание колебаний оболочек с высокоэластичным связующим происходит несколько быстрее, чем с эпоксидным ЭДТ-10; прочность и деформативность цилиндрических оболочек, изготовленных мокрой намоткой нитей из стекло- и органоволокна при внутреннем взрывном нагружении и скоростях деформаций до  $700 \text{ с}^{-1}$ , определяются типом и свойствами волокна, от степени эластичности эпоксидного связующего они практически не зависят.

В [10] экспериментально исследовалось влияние структуры и материала стеклоткани на динамическую реакцию и прочность оболочек, имеющих различную относительную толщину. Испытывались круговые цилиндрические оболочки, изготовленные намоткой стеклоткани марки Т-25 полотняного переплетения, пропитанной эпоксидным связующим. Внутренний радиус оболочек  $R = 100 \text{ мм}$ , длина  $2R$ , относительная толщина  $\delta/R = 2,5; 5; 10; 15; 20\%$ . Динамическое нагружение оболочки проводилось взрывом размещенного в ее центре сферического заряда ВВ. Постановка эксперимента и методы регистрации подробно описаны в [1, 3]. Оболочки, не разрушившиеся при первом испытании, подвергались последующим нагружениям (до трех раз). Эксперименты при внутреннем взрывном нагружении в воздушной среде при скоростях деформации до  $\approx 600 \text{ с}^{-1}$  показали существенное влияние исходных свойств, структуры материала и относительной толщины круговых цилиндрических оболочек из стеклопластика на их динамическую реакцию, механизм разрушения и несущую способность.

В [11] выполнено экспериментальное сравнение влияния нескольких различных схем армирования (намотки) стеклопластиковых цилиндрических оболочек на их динамическую реакцию и прочность при внутреннем взрывном нагружении. Испытывались оболочки, изготовленные путем намотки на технологическую оправку лент из стеклянных нитей марки ВМПС, пропи-

танных эпоксидным связующим ЭДТ-10, под определенным углом  $\varphi$  к образующей оболочки. Изучались четыре типа цилиндров с внутренним радиусом  $R = 155 \pm 5$  мм, длиной  $4R$  и относительной толщиной стенок  $\delta/R = 9,3...10,9\%$  при следующих схемах армирования: 1 – чередование спиральных слоев с углом  $\varphi = \pm 30^\circ$ ; 2 – чередование спиральных ( $\varphi = \pm 60^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi = \pm 90^\circ$ ) слоев при отношении толщин 1:1; 3 – чередование спиральных ( $\varphi = \pm 60^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi = \pm 90^\circ$ ) слоев при отношении толщин 1:2,5; 4 – кольцевая намотка слоев ( $\varphi = \pm 90^\circ$ ). Исследования показали существенное влияние схемы армирования намоточного стеклопластика на напряженно-деформированное состояние, несущую способность и характер разрушения оболочек при взрывном нагружении. Наиболее высокой удельной несущей способностью обладает материал с чередованием двойных спиральных и кольцевых слоев равной толщины.

Работа [12] посвящена экспериментальному изучению влияния схемы многослойной намотки лентами из нитей или ровингов на основе высокомодульного стекловолокна на напряженно-деформированное состояние и удельную несущую способность круговых цилиндрических оболочек при взрывном нагружении в воздушной среде от размещенного в центре полости сферического заряда ВВ. Испытывались трубчатые образцы с внутренним диаметром  $2R = 300...320$  мм, длиной 600 мм и относительной толщиной стенок  $\delta/R = 8 \pm 2,9\%$ . Рассматривались следующие схемы армирования: 1 – чередование спиральных слоев с углом армирования относительно образующей  $\varphi = \pm 30^\circ$ ; 2 – чередование спиральных ( $\varphi = \pm 60^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi = \pm 90^\circ$ ) слоев армирования с отношением толщин 1:1; 3 – чередование спиральных ( $\varphi = \pm 60^\circ$ ) и кольцевых слоев с отношением толщин 1:2,5; 4, 11 – кольцевая намотка; 5–8 – спиральное армирование ( $\varphi = \pm 30, \pm 45, \pm 50, \pm 60^\circ$  соответственно); 9, 10 – спирально-кольцевая намотка слоев ( $\varphi = \pm 90, \pm 45, \pm 60^\circ$ ) с отношением толщин 1:1. Результаты испытаний образцов со схемой армирования 1–4 представлены в [11]. Эти образцы выполнены на основе нити ВМПС, 5–11 – на основе ровинга РВМН. Во всех схемах армирования использовалось связующее ЭДТ-10. Образцы нагружались от одного до трех раз до их разрушения.

Как и в работах [1–7, 9–11], в центральном сечении скоростной фоторегистрацией фиксировалась зависимость радиального расширения оболочек от времени, в том же сечении и на некоторых образцах в сечениях на расстоянии по образующей 50, 100 и 200 мм от центрального проводились тензоизмерения деформаций в кольцевом и меридиональном направлениях. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод о предпочтительности комбинированных схем армирования с чередованием кольцевых и спиральных слоев, примерно равных по толщине, для обеспечения наиболее высоких значений удельной несущей способности круговых стеклопластиковых оболочек при внутреннем взрывном нагружении в воздушной среде.

В [13] экспериментально определена предельная окружная деформация намоточного стеклопластика в условиях внутреннего центрально-симметричного взрывного нагружения с реализацией различных уровней двухосности деформирования посредством заполнения оболочек воздушной или водной средой. Испытывались цилиндрические оболочки из стеклопластика, изго-

товленные методом мокрой намотки лент из ровинга на основе волокон ВМ-1, пропитанных эпоксидным связующим. Внутренний радиус оболочек  $R = 77,5$  мм, длина  $4R$  и относительная толщина стенок  $\delta/R = 4,6...7,7\%$ . Применялась комбинированная схема армирования с чередованием двойных спиральных ( $\varphi = \pm 45^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi = \pm 90^\circ$ ) слоев с отношением толщин 2:1. В ряде опытов для более полного использования несущей способности внутрь стеклопластиковой вставлялась с минимальным зазором (не более 0,25 мм) оболочка из стали 20 с внутренним радиусом  $R_1 = 76,5$  мм и относительной толщиной  $\delta_1/R_1 = 1,3\%$  ( $\delta_1$  – толщина стальной оболочки). Оболочка подвергалась однократному взрывному нагружению. Постановка эксперимента и методы регистрации подробно описаны в [1–6, 9–11].

Исследования показали, что в условиях динамического нагружения намоточного стеклопластика при спирально-кольцевом армировании предельная деформация определяется деформацией разрыва элементарных волокон, испытывающих наибольшее растяжение в кольцевых слоях. Как и для стеклопластиков на тканевой основе [2–6, 10], она может служить критерием прочности при исчерпании несущей способности материала при высокоскоростном нагружении.

Работа [14] посвящена экспериментальному изучению влияния схемы армирования на предельную деформацию цилиндрических оболочек из стеклопластика при внутреннем радиально-симметричном нагружении и условия их разрушения в первой фазе растяжения. Испытывались цилиндрические оболочки из стеклопластика, изготовленные намоткой на технологическую оправку лент из ровинга на основе волокон ВМ-1, пропитанных эпоксидным связующим. Исследовались три типа оболочек с внутренним радиусом  $R = 150$  мм, длиной  $4R$  и относительной толщиной стенок  $\delta/R = 4,8...7\%$ . При этом использовались три схемы армирования: 1 – кольцевая намотка слоев; 2 – чередование спиральных ( $\varphi = \pm 45^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi = \pm 90^\circ$ ) слоев с отношением толщин 1:1; 3 – чередование спиральных ( $\varphi = \pm 65^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi = \pm 90^\circ$ ) слоев с отношением толщин 1:1. В опытах с оболочками (1 и 2) для подавления механизма разрушения от изгиба в процессе колебаний и более полного использования несущей способности [7, 8] внутрь стеклопластиковой с минимальным зазором (не более 0,5 мм) вставлялась стальная (сталь 20) оболочка с внутренним радиусом  $R_1 = 147,5$  мм и относительной толщиной  $\delta_1/R_1 = 1,35\%$ . Оболочка подвергалась однократному внутреннему взрывному нагружению, для чего в ее центре подрывался сферический заряд ВВ. Постановка эксперимента и методы регистрации подробно описаны в [6–9, 11].

Из экспериментов следует, что для намоточного ориентированного стеклопластика с комбинированной спирально-кольцевой схемой армирования предельная окружная деформация динамического растяжения не зависит от угла намотки спиральных слоев в исследованном интервале ( $\varphi = 35...65^\circ$ ). Ее величина составляет  $4,8 \pm 0,4\%$  и определяется деформацией разрыва элементарных волокон, испытывающих при таком виде нагружения наибольшее растяжение в кольцевых слоях. Как и для стеклопластиков на основе стеклоткани [6], предельная деформация может служить критерием прочности материала при динамическом нагружении. Данный вывод справедлив для композитов,

структура которых позволяет реализовать предельную прочность силовых волокон при их растяжении. Если структура и вид нагружения допускают наличие предельных сдвиговых напряжений или разрыв связующего раньше, чем напряжения растяжения в волокнах достигнут разрушающей величины, прочностные и деформационные характеристики силовой основы полностью не используются. Например, в [11] такой эффект наблюдался для оболочек, выполненных спиральной намоткой с  $\varphi = \pm 30^\circ$  (без намотки кольцевых слоев). Таким образом, стеклянное волокно, являясь несущим силовым элементом стеклопластика [6], определяет его предельные динамические деформационные характеристики независимо от угла армирования менее нагруженных слоев, однако при условии наличия слоев с ориентацией волокон, совпадающих с ведущей компонентой растягивающих напряжений.

Краткому обзору экспериментальных исследований [1–5, 7–14] посвящена работа [15], в которой отмечены основные особенности поведения оболочек из композитов при внутреннем взрывном нагружении и преимущества этих материалов перед сталями.

В [16] исследуется динамическая реакция и несущая способность 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. Приведены также результаты аналогичных испытаний оболочек из органопластика на основе волокон СВМ.

Для сравнительных расчетных оценок способности волокон сопротивляться импульсному воздействию использовался предложенный в [9] критерий. Исследовались цилиндрические оболочки, которые формировались комбинированной намоткой лент, пропитанных эпоксидным связующим, с чередованием двойных спиральных ( $\varphi = \pm 45^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi = \pm 90^\circ$ ) слоев с отношением толщин 1:1. В опытах использовались оболочки с внутренним радиусом  $R = 150$  мм, длиной  $4R$  и относительной толщиной стенок  $\delta/R = 4,18...6,0\%$  (для стеклопластиковых оболочек на основе волокон Х имеем  $\delta/R = 2,45...2,7\%$ , органопластиковых –  $\delta/R = 8,2...8,6\%$ ). Стеклопластиковые оболочки армировались лентами из ровинга, органопластиковые – из жгута: 1 – стеклянное волокно ВМ-1, ровинг РВМН 10-1260-80; 2 – стеклянное волокно ВМП, ровинг РВМПН 10-1200-78; 3 – стеклянное волокно Р, ровинг РРН 10-1400-78; 4 – стеклянное волокно Х, ровинг РХН 9-925-78; 5 – органическое волокно СВМ, жгут ЖСВМ 3-300-58,8x17-1000. Во всех типах оболочек использовалось эпоксидное связующее марки ЭДТ-10. Динамическое нагружение проводилось взрывом в центре сферического заряда ВВ из сплава тротила с гексогеном. Было проведено две серии экспериментов: на стеклопластиковых цилиндрических оболочках всех типов и цилиндрических стеклопластиковых оболочках, в которые с зазором не более 0,2 мм вставлялись стальные (сталь 20) с внутренним диаметром  $2R_1 = 295$  мм, длиной  $4R$  и относительной толщиной стенок  $\delta_1/R_1 = 1,35\%$ , причем отношение толщин оболочек  $\delta_1/\delta = 0,2...0,3$ . Эксперименты показали, что предельная деформируемость силового элемента композитов – волокон в условиях динамического растяжения в сочетании с упругомассовыми характеристиками композита является определяющим критерием для удельной прочности оболочечных конструкций при импульсном нагружении.



В [17] более подробно, чем в [2, 6, 12], исследовалось влияние количества нагружений разных уровней на предельную разрушающую деформацию цилиндрических оболочек из намоточного волокнистого стеклопластика в широком диапазоне взрывных нагрузок. Оболочки из стеклопластика изготавливались методом мокрой намотки лент из ровинга РВМГН10-1260-80 (на основе волокна ВМ-1), пропитанных эпоксидным связующим ЭДТ-10. Они имели комбинированную схему армирования с чередованием двойных спиральных ( $\varphi = \pm 45^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi = \pm 90^\circ$ ) слоев с отношением толщин 1:1. Внутренний радиус оболочки  $R = 150$  мм, длина  $4R$  и относительная толщина стенок  $\delta/R = 4,8...6,7\%$ . Подобные оболочки исследовались в [12, 14].

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

В [18] рассмотрено нагружение цилиндрической оболочки (однослойной – стеклопластик и двухслойной – металлопластик) взрывом расположенного в ее центре сферического заряда ВВ из сплава тротила с гексогеном. Металлические слои изготавливались из стали 20 и титанового сплава ПТ-3В. Приведенные экспериментальные результаты (максимальные широтные деформации оболочек) получены при деформировании без разрушения или в самом его начале, когда возникали незначительные разрывы стеклонитей на наружной поверхности слоя. Для стеклопластиковых оболочек относительная толщина изменялась в диапазоне  $\delta/R = 2,5...20\%$ , для металлопластиковых –  $\delta/R = 5,3...16\%$ ,  $\delta_1/\delta = 0,062...0,47$ . На основе анализа полученных экспериментальных данных разработан способ априорной оценки взрывостойкости оболочек. Приведены полуэмпирические формулы, рекомендуемые к использованию при проектировании взрывозащитных камер с несущими оболочками из указанных материалов.

В [19] сформулирован интегральный подход к проблеме разрушения, согласно которому возможно проявление сильных масштабных эффектов энергетической природы (МЭЭП). Проанализированы результаты многолетних экспериментальных исследований поведения цилиндрических оболочек при взрывном нагружении (в частности, из стеклопластиков) [1–5, 7–14, 16–18 и др.]. Отмечено свойство волокнистых композитов разрушаться без проявления МЭЭП. Показаны преимущества таких материалов перед сталями, особенности их деформирования и разрушения в зависимости от схемы армирования, геометрических размеров, состава композиции, скорости деформации, предложено несколько типов конструкций взрывостойких контейнеров и сформулирована концепция создания высоконадежных локализирующих камер для энергетики взрывного термоядерного синтеза.

В [20] выполнено экспериментальное исследование основных характеристик динамической деформируемости и прочности трубчатых оболочек из базальтопластика при внутреннем взрывном нагружении. Испытывались оболочки с однонаправленным армированием на основе связующего ЭДТ-10 и ровинга из базальтовых комплексных нитей РБ9-1200 с замасливателем 4С, имеющие следующие геометрические размеры и параметры армирования: 1 – внутренний диаметр  $D = 150$  мм, длина  $L = 300$  мм, толщина  $\delta = 6,6 \pm 0,2$  мм, углы армирования  $\varphi \approx \pm 90$  и  $\pm 35^\circ$  относительно образующей с чередованием семи двойных кольцевых слоев и семи двойных спиральных слоев, средняя массовая доля связующего ( $16,3 \pm 0,6\%$ ); 2 –  $D = 295$  мм,  $L = 600$  мм,  $\delta = 13,5 \pm 0,5$  мм,  $\varphi \approx \pm 90$  и  $\pm 35^\circ$  относительно образующей с чередованием 14,5 двойных кольцевых слоев и 10 двойных спиральных слоев, средняя массовая доля связующего ( $21,3 \pm 0,6\%$ ). Схема армирования в основном соответствует таковой, обеспечивающей высокую удельную прочность цилиндрических оболочек из композита на основе высокомодульного стекловолокна [12] при аналогичных условиях взрывного нагружения.

Оболочки изготовлялись мокрой намоткой на цилиндрическую технологическую оправку с последующей термообработкой. В большинство оболочек 1- и 2-го типа перед испытанием вставлялась стальная оболочка толщиной  $\delta_1 = 1$  и 2 мм соответственно. Выбранный наружный диаметр стальной оболочки обеспечивал минимальный зазор относительно внутреннего диаметра базальтопластиковой оболочки. При регистрации окружной деформации оболочки в сечении, в котором расположен заряд ВВ, применялись тензодатчики из нихромовой проволоки с бифилярной намоткой по всей длине окружности [21].

Радиальное расширение оболочки в центральном сечении измерялось скоростной щелевой фоторегистрацией [22]. Каждый образец подвергался взрывному нагружению один раз (лишь в одном случае для неповрежденной оболочки проводилось повторное нагружение). Эксперименты позволили сделать следующие выводы: динамическая реакция базальтопластиковых оболочек при неразрушающей нагрузке подобна реакции оболочек из стеклопластика с близкой схемой армирования и сохранением при динамическом нагружении упругих свойств материала, определенных в статических условиях; предельная динамическая деформируемость и удельная прочность базальтопластиковых оболочек при внутреннем взрывном нагружении не изменяются с увеличением их размера в два раза и их величины не меньше, чем для стеклопластиковых оболочек.

В [23] обобщением экспериментальных данных по динамической реакции и прочности цилиндрических и сферических оболочек из волокнистых композитов [1–5, 7–14, 16–18, 20 и др.] обоснован выбор таких материалов для силовых элементов взрывозащитных конструкций, отмечены преимущества использования композитов в оболочках перед конструкционными сталями, предложен и экспериментально обоснован критерий выбора типа волокон; установлены схемы армирования с целью обеспечения оптимальных по отношению “прочность–масса” композиций для оболочек силовых корпусов взрывозащитных контейнеров и камер.

Согласно данным [24], оболочка считается толстостенной, если отношение толщины к внутреннему радиусу больше  $1/10$ . Практически во всех

экспериментах [1–5, 7–14, 16–18, 20] изучались как тонкостенные, так и толстостенные оболочки.

Кроме вышеуказанных литературных источников отметим работы, в которых экспериментально изучались характеристики жесткости, прочности, влияние скорости деформации на механические свойства композиционных материалов и другие факторы [25–27 и др.].

В [25] экспериментально исследовались характеристики статической жесткости и прочности органо- и углепластика. Показано, что характер деформирования трубчатых образцов из композиционных материалов существенно зависит от вида нагружения и угла намотки. Установлены зависимости модулей упругости и предельных напряжений от угла армирования.

В работе [26] приведены результаты экспериментального исследования прочности анизотропных стеклопластиков разных марок при скоростях деформации  $10^{-4} \dots 62,5 \text{ с}^{-1}$ . Установлено, что по сравнению со статической прочностью характеристики динамической прочности материала с увеличением скорости роста напряжений при растяжении, сжатии и чистом сдвиге повышаются. Показано, что области безопасных напряженных состояний, ограниченные предельными эллипсами, увеличиваются с ростом скорости деформации, при этом предельные эллипсы не только расширяются, но и деформируются.

В [27] экспериментально изучалось влияние скорости деформации на механические характеристики однонаправленных композитных материалов на эпоксидной основе: стекло- и органопластик в виде трубчатых образцов с углом намотки  $\varphi = \pm 90^\circ$ . Испытания проводились по нескольким методикам, охватывающим диапазон скоростей деформации  $\dot{\epsilon} \cong 10^{-4} \dots 2,5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ . Изучались стеклопластики на основе стекловолокна ВМ и связующего ЭДТ-10 и органопластик на основе органоволокна СВМ и связующего ЭДТ-10. Установлено, что исследованные материалы в диапазоне скоростей деформации  $\dot{\epsilon} \cong 30 \dots 250 \text{ с}^{-1}$  деформируются упруго вплоть до разрушения. Предельная деформация растет с увеличением скорости деформации для стеклопластика от 2 (при  $\dot{\epsilon} = 50 \text{ с}^{-1}$ ) до 4% (при  $\dot{\epsilon} \cong 250 \text{ с}^{-1}$ ), для органопластика – от 1,3 (при  $\dot{\epsilon} = 30 \text{ с}^{-1}$ ) до 2,3% (при  $\dot{\epsilon} \cong 150 \text{ с}^{-1}$ ).

Сравнение результатов статических и динамических испытаний композиционных материалов обоих типов позволяет утверждать, что во всей области скоростей деформации для них характерны линейные диаграммы деформирования; в пределах точности определения статического и динамического модуля упругости его величина не зависит от скорости деформации; предельная деформация для обоих типов мотаных композитов в исследованном диапазоне изменения скорости увеличивается в 1,7...2,3 раза.

Экспериментальному определению особенностей реакции на нагружение и предельных характеристик прочности основных силовых элементов и конструкции взрывозащитного контейнера (ВЗК) цилиндрической формы с силовым корпусом из ориентированного стеклопластика при взрыве в его полости заряда ВВ посвящена работа [28]. Полученные данные использовались для разработки металлокомпозиционного ВЗК диаметром 2,5 м, длиной 9,5 м,

массой 25 т, способного выдержать взрыв мощностью до 150...200 кг тринитротолуола.

В [29, 30] отмечено широкое применение взрывозащитных контейнеров в различных областях промышленности. В [29] дан исторический обзор работ по созданию таких конструкций в США, бывшем СССР, Великобритании, Китае и других странах. Из [29] следует, что экспериментальные исследования [1–3, 6–8, 11, 13–15, 17, 20, 23] на композитных оболочках выполнены в России, там же предложены методики проектирования изготовленных из композитов ВЗК. Приведена классификация ВЗК и наиболее широко применяемые методы их конструирования, в том числе с использованием цилиндрических и сферических оболочек из композиционных материалов. Авторы [29] считают перспективным использование композиционных материалов при создании ВЗК и важным дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования прочности конструкций из таких материалов. В [30] дан обзор теоретических и экспериментальных исследований явления раскочки колебаний в цилиндрических и сферических сосудах при внутреннем взрывном нагружении.

В обзоре [31] указана только одна работа, посвященная экспериментальному исследованию динамики (собственных колебаний) композитной цилиндрической оболочки.

Результаты некоторых экспериментов по определению характеристик собственных, вынужденных и параметрических колебаний многослойных композитных оболочек вращения, в том числе цилиндрических, можно найти в монографии [32].

Анализ рассмотренных работ показывает.

1. Практически все известные экспериментальные исследования композитных и металлокомпозитных оболочек при внутреннем взрывном нагружении выполнены в России (Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики).

2. В экспериментах на полых цилиндрах (как тонкостенные, так и толстостенные) из композиционных материалов, нагруженных внутренним давлением от взрыва заряда ВВ, намоточные стеклопластики и базальтопластики имеют существенные преимущества перед сталью и титановыми сплавами по ряду основных свойств, важных для взрывостойкости:

отсутствие масштабных эффектов снижения прочности при геометрически подобном увеличении размеров и сохранении при этом диаметра и материала силового волокна;

большая, чем у вышеуказанных металлов, удельная прочность;

нечувствительность к влиянию мелких дефектов;

некатастрофический и безосколочный характер разрушения;

возможность оптимального, с точки зрения прочности, подбора анизотропии;

повышение прочностных свойств и предельных деформаций с увеличением скорости деформации.

3. Независимо от скорости деформации композиты деформируются упруго вплоть до разрушения, наступающего при деформациях, когда металлы находятся в пластическом состоянии. Модуль упругости стеклоэпоксида в

окружном направлении в исследованном диапазоне деформаций не зависит от скорости деформации.

4. Прочность и деформативность цилиндрических оболочек из стеклопластика и органопластика при внутреннем взрывном нагружении практически не зависят от степени эластичности связующего.

5. Характер разрушения оболочек при внутреннем взрывном нагружении зависит от их толщины. В тонкостенных оболочках разрушение начинается с наружной поверхности, в толстостенных – изнутри.

6. Изученные в экспериментах композиты имеют низкую термостойкость матрицы, малую циклическую прочность и динамическую устойчивость радиальных колебаний импульсно нагруженных оболочек. Это снижает надежность конструкций и сужает возможность самостоятельного применения такого композита для защиты от взрыва.

7. Подкрепление несущей композиционной оболочки тонким слоем стали устраняет указанные недостатки, кроме малой циклической прочности. Поэтому оболочки данного типа целесообразно использовать при однократном нагружении. Дополнительное повышение удельной несущей способности и предельной деформации оболочки достигается введением демпфирующего подкрепляющего слоя стали толщиной  $\geq 1/8$  от толщины стеклопластика, что предотвращает параметрическую потерю устойчивости и разрушение упругой композитной оболочки при более низкой нагрузке. Составная оболочка по сравнению с металлической является более энергоемкой при меньшей массе, а внутренний металлический слой защищает композит от осколков при взрыве.

8. Эксперименты показали существенное влияние схемы армирования материала и относительной толщины круговых цилиндрических оболочек из стеклопластика на их динамическую реакцию, механизм и характер разрушения, а также несущую способность при внутреннем взрывном нагружении в воздушной среде. Наиболее высокой удельной несущей способностью при центрально-симметричном внутреннем взрывном нагружении обладают цилиндрические композитные оболочки на основе стекловолокна при чередовании спиральных слоев с углами армирования  $\varphi = \pm 30 \dots \pm 65^\circ$  и кольцевых слоев равной толщины.

9. В условиях динамического нагружения намоточного стеклопластика со спирально-кольцевой схемой армирования предельная деформация определяется деформацией разрыва элементарных волокон, испытывающих наибольшее растяжение в кольцевых слоях. Эта деформация может служить критерием прочности при исчерпании несущей способности материала при высокоскоростном нагружении. Установлена нечувствительность предельной величины деформации кольцевых слоев (4,8...5,0%) оболочки при взрывном нагружении к варьированию углов армирования соседних спиральных слоев и к степени их нагружения.

10. Экспериментально малоизучен вопрос оптимального конструирования композиционных цилиндрических оболочек при внутреннем взрывном нагружении.

11. В связи с дороговизной экспериментальных исследований, большим количеством слоев, разнообразием их механических характеристик, арми-

рующих элементов, схем армирования и др., следует отметить ограниченные возможности экспериментальных исследований по сравнению с теоретическими по широкомасштабному изучению деформирования, разрушения и оптимального конструирования композиционных оболочек.

12. Приведенные в обзоре исследования позволили разработать целый ряд ВЗК как в России, так и в других странах.

## Резюме

Виконано аналіз відомих із літературних джерел методів і результатів експериментального дослідження напружено-деформованого стану та міцності багатопшарових товстостінних анізотропних циліндрів під час динамічного навантаження.

1. Рыжанский В. А., Минеев В. Н., Иванов А. Г. и др. Разрушение цилиндрических стеклоэпоксидных оболочек, заполненных водой, при внутреннем импульсном нагружении // Механика полимеров. – 1978. – № 2. – С. 283 – 289.
2. Цыпкин В. И., Русак В. Н., Шитов А. Т., Иванов А. Г. Деформация и разрушение цилиндрических оболочек из стеклоэпоксида при внутреннем импульсном нагружении // Механика композитных материалов. – 1981. – № 2. – С. 249 – 255.
3. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Иванов А. Г. и др. Особенности динамического деформирования и разрушения цилиндрических стеклопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Там же. – 1983. – № 1. – С. 90 – 94.
4. Цыпкин В. И., Русак В. Н., Иванов А. Г. Высокоскоростное растяжение тканей из неорганического волокна // Там же. – 1986. – № 1. – С. 161 – 163.
5. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Иванов А. Г. и др. Деформация и разрушение разномасштабных цилиндрических стеклопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Там же. – 1986. – № 4. – С. 658 – 664.
6. Иванов А. Г., Цыпкин В. И. Деформация и разрушение стеклопластиковых оболочек при экстремальных импульсных нагрузках // Там же. – 1987. – № 3. – С. 472 – 480.
7. Воронцова О. С., Сырунин М. А., Федоренко А. Г. и др. Экспериментальное исследование коэффициентов вариации прочностных характеристик стеклопластиковых цилиндрических оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Там же. – 1987. – № 4. – С. 642 – 646.
8. Цыпкин В. И., Русак В. Н., Иванов А. Г. и др. Деформация и разрушение двухслойных металлопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Там же. – № 5. – С. 833 – 838.
9. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Сырунин М. А. и др. Поведение композитных оболочек с высокоэластичным связующим при внутреннем импульсном нагружении // Там же. – 1988. – № 2. – С. 306 – 314.

10. Федоренко А. Г., Иванов А. Г., Сырунин М. А. Динамическая прочность оболочек из стеклопластика // Там же. – 1989. – № 3. – С. 425 – 430.
11. Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Шитов А. Т. Прочность цилиндрических оболочек из стеклопластика различной структуры при нагружении взрывом // Физика горения и взрыва. – 1989. – № 4. – С. 108 – 115.
12. Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г. Влияние структуры армирования ориентированных стеклопластиков на прочность круговых цилиндрических // Механика композитных материалов. – 1991. – № 4. – С. 631 – 640.
13. Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г. Предельные деформации оболочек из ориентированного стеклопластика при внутреннем взрывном нагружении // Физика горения и взрыва. – 1992. – № 2. – С. 87 – 93.
14. Иванов А. Г., Федоренко А. Г., Сырунин М. А. Влияние структуры армирования на предельную деформируемость и прочность оболочек из ориентированного стеклопластика при взрывном нагружении изнутри // Прикл. механика и теорет. физика. – 1992. – № 4. – С. 130 – 135.
15. Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г. Динамическая прочность оболочек из ориентированных волокнистых композитов при взрывном нагружении (обзор) // Там же. – 1993. – № 1. – С. 126 – 132.
16. Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Иванов А. Г. Динамическая прочность оболочек из ориентированных композитов на основе волокон различного состава // Там же. – 1995. – № 3. – С. 141 – 145.
17. Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Иванов А. Г. Динамическая прочность цилиндрических оболочек из стеклопластика при многократном взрывном нагружении // Физика горения и взрыва. – 1997. – № 6. – С. 102 – 107.
18. Рыжанский В. А., Русак В. Н., Иванов А. Г. Оценка взрывостойкости цилиндрических композитных оболочек // Там же. – 1999. – № 1. – С. 115 – 121.
19. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве. Монография / Под ред. А. Г. Иванова. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001. – 472 с.
20. Русак В. Н., Федоренко А. Г., Сырунин М. А. и др. Предельная деформируемость и прочность базальтопластиковых оболочек при внутреннем взрывном нагружении // Прикл. механика и техн. физика. – 2002. – № 1. – С. 186 – 195.
21. Шитов А. Т., Минеев В. Н., Клещевников О. А. и др. Проволочный датчик для непрерывной регистрации больших деформаций при динамическом нагружении конструкции // Физика горения и взрыва. – 1976. – № 2. – С. 304 – 307.
22. Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов, 2-е изд., перераб. – М.: Наука, 1975. – 456 с.
23. Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г. Критерии выбора композитных материалов для оболочечных конструкций, локализирующих взрыв (обзор) // Физика горения и взрыва. – 2005. – № 5. – С. 3 – 13.

24. *Onder A., Saytan O., Dogan T., and Tarakcioglu N.* Burst failure load of composite pressure vessels // *Compos. Struct.* – 2009. – **89**. – P. 159 – 166.
25. *Алексеев К. П., Каюмов Р. А., Терезулов И. Г, Фахрутдинов И. Х.* Механические характеристики органо- и углепластиковых труб, изготовленных методом перекрестной намотки // *Механика композиционных материалов и конструкций.* – 1998. – № 4. – С. 51 – 61.
26. *Копнов В. А., Колотилов В. А.* Прочность анизотропных стеклопластиков при сложном напряженном состоянии и повышенной скорости нагружения // *Пробл. прочности.* – 1989. – № 3. – С. 12 – 16.
27. *Асеев А. В., Горшков Н. Н., Демешкин А. Г. и др.* Экспериментальное исследование деформативности стекло- и органопластика в зависимости от скорости деформирования // *Механика композитных материалов.* – 1992. – № 2. – С. 183 – 195.
28. *Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Иванов А. Г.* Реакция на нагружение и прочность стеклопластикового контейнера при внутреннем взрывном нагружении // *Физика горения и взрыва.* – 2002. – № 3. – С. 127 – 136.
29. *Zheng J., Chen Y., Deng G., et al.* Recent progress of explosion containment vessels. Pt. I: Methods for design of explosion containment vessels // *J. Press. Equip. Syst.* – 2008. – No. 6. – P. 185 – 198.
30. *Zheng J., Dong Q., and Li Q.* Recent progress of explosion containment vessels. Pt. II: Strain growth in explosion containment vessels // *Ibid.* – P. 199 – 207.
31. *Qatu M. S., Sullivan R. W., and Wang W.* Recent research advances on the dynamic analysis of composite shells: 2000–2009 // *Compos. Struct.* – 2010. – No. 93. – P. 14 – 31.
32. *Механика композитов: В 12 т.* – Киев: Наук. думка, 1999. – Т. 9: Динамика элементов конструкций. – 379 с.

Поступила 10. 05. 2012