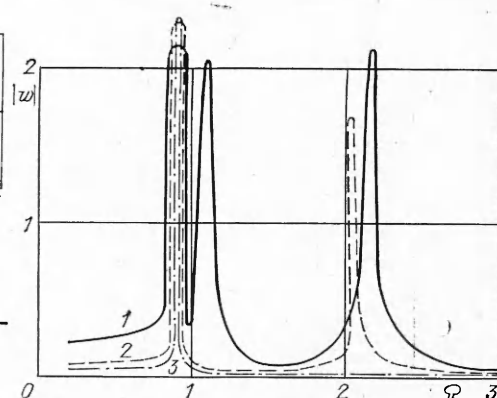


Р и с. 3



Р и с. 4

при фиксированных геометрических размерах плиты также ведет к увеличению числа резонансов. При этом значение первой резонансной частоты не меняется при изменении  $M$  ( $a$ ,  $H$  фиксированы) и отвечает резонансу для абсолютно жесткого штампа (рис. 4, кривые 1—3 соответствуют  $M = 4 \cdot 10^{-3}$ ,  $4 \cdot 10^{-4}$ ,  $4 \cdot 10^{-7}$ ,  $p(r) = \delta(r - 0,1)$ ,  $a = 7$ ,  $R = 3,5$ ,  $H = 0,8$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $\nu_0 = 0,3$ ,  $\gamma = 0,1$ ).

Отметим, что выводы по изучению пределов применимости гипотезы Винклера, полученные в [5], остаются справедливыми и для осесимметричной задачи.

Авторы благодарят И. И. Воровича за обсуждение работы и замечания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ворович Е. И., Пряхина О. Д. Об одном эффективном методе решения задачи о колебаниях упругой балки на упругом основании // Изв. АН СССР. МТТ.— 1989.— № 4.
2. Сорокин Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем.— М.: Госстройиздат, 1960.
3. Ворович И. И., Бабешко В. А. Динамические смешанные задачи теории упругости для неклассических областей.— М.: Наука, 1979.
4. Бабешко В. А., Пряхина О. Д. Об одном методе в теории динамических контактных задач для круглых штампов // Изв. АН СССР. МТТ.— 1981.— № 2.
5. Ворович Е. И., Пряхина О. Д., Тукодова О. М. Динамические свойства упругой полуограниченной среды, контактирующей с упругим инерционным элементом // Изв. АН СССР. МТТ.— 1986.— № 2.
6. Ведерников А. И., Уринцев А. Л. Пакет программ для вычисления комплексных корней алгебраических и трансцендентных уравнений вида  $f(z) = 0$ .— Ростов-на-Дону, 1979.— Деп. в ВИНТИ 21.12.79, № 99—80.

г. Ростов-на-Дону

Поступила 4/X 1991 г.,  
в окончательном варианте — 17/XII 1991 г.

УДК 624.074.4 : 678.067

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

### ДИНАМИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ОБОЛОЧЕК ИЗ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ (ОБЗОР)

Применение композитов в современной технике часто является необходимым для достижения требуемых высоких технико-экономических показателей, а в ряде случаев и качественно новых, уникальных свойств разрабатываемых конструкций. К конструкциям, которым свойственны повышенные требования к используемому материалу силовой оболочки

© А. Г. Федоренко, М. А. Сырунин, А. Г. Иванов, 1993

корпуса, относятся сосуды (камеры) или защитные сооружения, предназначенные для удержания в своей полости разрушительных газодинамических нагрузок и экологически опасных продуктов аварийного взрыва того или иного взрывоопасного объекта (заряд ВВ, активная зона ядерного реактора и т. п.).

В данной работе делается краткий обзор основных результатов экспериментов последних лет, которые посвящены проблеме анализа эффективности ориентированных композитов применительно к указанной области техники. В обзоре [1], посвященном динамике оболочечных конструкций, эти вопросы затронуты лишь частично. В [2] на основе выводов [3, 4] утверждается перспективность применения волокнистых композитов в нагружаемых взрывом конструкциях. В [5] проведен сравнительный анализ и обзор полученных до 1986 г. экспериментальных данных по динамическому разрушению оболочек и сосудов из стеклопластика и традиционного конструкционного материала — стали, на основе чего подтвержден вывод о существенных преимуществах стеклопластика в оболочках, подвергающихся воздействию экстремальных импульсных нагрузок.

Какие же основные особенности поведения оболочек из композитов при внутреннем импульсном (взрывном) нагружении и в чем заключаются существенные преимущества этих материалов по сравнению с традиционными?

В [3, 4] изучались динамическая реакция и разрушение стеклоэпоксидных круговых цилиндрических оболочек, изготовленных мокрой намоткой на оправку стеклоткани, пропитанной отверждаемым эпоксидным связующим, с внутренним радиусом  $R = 100, 150, 440$  мм, относительной толщиной  $\bar{\delta} = \delta / (R + \delta) = 3,7 \cdot 10^{-2}, 9,1 \cdot 10^{-2}, 16,7 \cdot 10^{-2}$  и  $21,3 \cdot 10^{-2}$  и длиной  $L = 4(R + \delta)$  при взрыве в центре их полости заряда взрывчатого вещества сферической формы, инициируемого из центра. Полость оболочки заполнялась в одном случае водой [3], в другом — воздухом [4] при нормальном атмосферном давлении. В подобной постановке проведены также и опыты других рассматриваемых в настоящем обзоре работ.

Основными результатами [3, 4] является следующее.

1. Практически упругое (с постоянным модулем Юнга) поведение материала вплоть до разрушения при окружных деформациях первой фазы расширения  $\approx 4\%$ , не зависящих от относительной толщины, размеров геометрически подобных оболочек и начальной скорости деформации в пределах  $0,21 \cdot 10^3 - 1,2 \cdot 10^3$  м/с [3].

Отсутствие влияния на прочность и деформируемость изменения масштаба в 1,5 и 4,4 раза обусловлено сохранением диаметра основного силового элемента — стекловолокна, вследствие чего нет условий для проявления сильного масштабного эффекта энергетической природы [2, 3, 5].

2. Предельная относительная масса взрывчатого вещества  $\bar{\xi}$  ( $\bar{\xi} = m_{\text{ВВ}}/M$ ,  $m_{\text{ВВ}}$  — масса заряда ВВ,  $M$  — масса оболочки длиной  $4R$ ) в случае заполнения водой составляла  $\sim 0,4\%$  и оболочки разрушались в фазе первого расширения при окружных деформациях  $\sim 4\%$  [3]. При заполнении воздухом, согласно [4], предельная деформация для однократно нагруженных оболочек находится в интервале  $2,1-2,5\%$ , а  $1,15\% < \bar{\xi} < 1,42\%$ . Увеличение  $\bar{\xi}$  при переходе от малосжимаемой среды (воды) к воздуху объяснимо снижением коэффициента отбора энергии взрыва, т. е. части энергии, расходуемой на деформацию оболочки. Однако в данном случае разрушение при достижении деформации  $\geq 2,5\%$  происходило не в первой фазе расширения, а через один или несколько периодов радиальных колебаний. С увеличением нагрузки до заведомо разрушающей разрушение происходило (как и с водой) в первой фазе расширения при деформации  $\sim 4\%$ , т. е. в данном случае резервы деформируемости и прочности материала используются не полностью.



Рис. 1

3. Обнаружена чувствительность прочности стеклоэпоксидных оболочек в зависимости от числа нагружений взрывом в воздухе [4]. Так, если оболочка способна выдержать деформацию до 4 % при однократном взрывном нагружении, то при деформации 2 % она способна выдержать 3 нагружения, а при деформации 1 % — до 23 нагружений. Однако в целом стеклоэпоксидные оболочки с образовавшимися в первом нагружении сквозными трещинами не теряют общей конструкционной целостности при последующем нагружении взрывом такого же заряда, что показывает слабую чувствительность материала к такого рода макродефектам.

4. В сравнении со стальными [4] стеклоэпоксидные оболочки обладают рядом преимуществ, что связано с различным уровнем и характером энергопоглощения этих материалов при деформировании и разрушении. Так, при упругих деформациях стеклопластика  $\geq 2,5$  % стальная оболочка (сталь с  $\sigma_s = 250$  МПа) при аналогичной относительной массе заряда  $\xi$  испытывает пластические окружные деформации  $\geq 15$  %. При переходе к крупногабаритным конструкциям стальные оболочки ввиду возможных дефектов (как внутренних, так и внешних) могут снизить пластичность и из-за проявления сильного масштабного эффекта энергетической природы [6] их катастрофическое хрупкое или квазихрупкое разрушение нельзя исключить. Согласно п. 1, волокнистые стеклопластики могут обладать по сравнению со сталью многократным преимуществом по величине  $\xi$  [4]. Характер разрушения стеклоэпоксидных оболочек также более благоприятен. На нижнем пороге прочности, т. е. образования сквозных трещин, практически не появляется опасных осколков, оболочка не разделяется на части и трещины имеют ограниченную длину  $\sim R$  (рис. 1).

Такой характер разрушения определен особенностью нагружения и динамической реакции цилиндрической оболочки, а именно: при отражении ударной волны и потока продуктов взрыва от стенки оболочки действующей на нее радиальный импульс распределен по длине образующей пропорционально проекции на нормаль к внутренней поверхности оболочки газодинамического импульса взрыва [7]. При этом возбуждаются такие осесимметричные формы колебаний, что возникшие в первой фазе расширения максимальные окружные деформации в зоне шириной  $\sim R$  остаются максимальными за все время реакции, если устойчивость осесимметричных форм не нарушается. Меридиональные деформации изгиба и растяжения были вдвое меньше максимальных окружных.

В последующих работах был подтвержден вывод об отсутствии сильных масштабных эффектов у стеклоэпоксидных цилиндрических оболочек с геометрически подобным изменением размеров в 9,3 раза ( $R = 75$  и 700 мм,  $\delta/R = 4,6$  %,  $L/R = 4$ ) при взрывном нагружении в воздухе [8]. Анализ особенностей динамической реакции таких оболочек в [7, 8] показал, что основной причиной снижения начальной окружной деформации, при достижении которой возможно разрушение оболочки после одной или нескольких фаз растяжения — сжатия, являются параметрическая неустойчивость осесимметричных форм колебаний и переход их в изгибную. Это приводит к локальным повышениям напряжений и образованию меридиональных трещин, расположенных с определенной зависящей от относительной толщины оболочки периодичностью по длине окружности в центральной наиболее нагруженной зоне оболочки шириной  $\sim R$ .

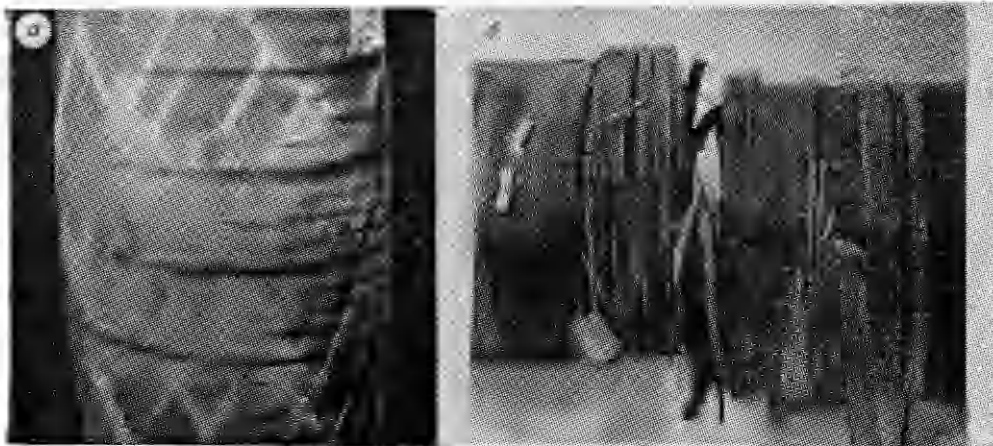
Данный механизм разрушения обусловлен низким демпфированием колебаний оболочки в воздухе (в отличие от реакции на взрыв в воде, заполняющей оболочку), наличием начальных несовершенств формы и свойств материала, а также неидеальной симметричностью нагружения. В связи с таким механизмом разрушения предельная деформация первого радиального расширения оказывается чувствительной к относительной толщине, что обнаружено в [7] и подтверждено в [9] ( $\delta/R$  изменяли от 2,5 до 20 %). Также существенным фактором становится модуль упругости стеклопластика в окружном направлении — в [9] испытаны образцы цилиндрических оболочек с  $R = 100$  мм,  $L/R = 2$  с повышенным окружным модулем упругости (вместо  $E_y = 2,4 \cdot 10^4 - 3,3 \cdot 10^4$  МПа для ранее испытанных образцов из [3, 4, 7, 8] использован материал с  $E_y = 3,85 \cdot 10^4 - 4,8 \cdot 10^4$  МПа) и получено снижение предельной деформации от 2,1—2,5 до 1,5—1,7 % для оболочек с  $\delta/R \approx 15$  %. В то же время разрушающая взрывная нагрузка при таком переходе возросла от 1,15—1,45 до 1,4—1,6 %. Очевидно, что обилие типов волокон и возможных структур слоистого армирования оболочек предопределяет сложность проблемы оптимального их выбора для обеспечения максимальной удельной прочности оболочки при взрывном нагружении.

Как оказалось, значительного повышения  $\xi$  удается добиться подкреплением слоя стеклопластика слоем стали [10]. При этом пластически деформируемый слой стали при ее достаточной толщине ( $\geq 1/8$  от толщины стеклопластика, испытанного в [3, 4]) хорошо демпфирует радиальные колебания, чем предотвращает потерю устойчивости этих колебаний и повышает предельную деформацию до  $\sim 4$  %. Поскольку динамические свойства двухслойной оболочки слабо изменились (не более чем на 20—30 % увеличился наклон зависимости  $\epsilon(\xi)$ ), то получается также и выигрыш в удельной несущей способности по сравнению с чисто стеклопластиковой оболочкой (при  $\delta/R = 16$  %  $\xi$  возросло от 1,15—1,4 до 1,7—1,9 %, а для  $\delta/R = 5$  % — от 0,47—0,77 до  $> 1,88$  %).

Интересный результат получен в [11], где исследованы реакция и прочность при внутреннем взрыве цилиндрических оболочек, образованных сухой намоткой на оправку стеклоткани (I тип) и углеткани (II тип). Показано, что динамическая прочность оболочек I типа практически вдвое превышает прочность оболочек II типа (по параметру  $\xi$ ) при деформируемости до  $\sim 5$  и 4 % соответственно. Сделан вывод, что определяющим элементом для прочности композитов в условиях импульсных нагрузок является силовая волокнистая основа.

Роль типа волокна и эластичности связующего исследована в [12], где испытаны оболочки с  $R = 150$  мм,  $\delta/R = 8,5-11,9$  %, имеющие одинаковую схему армирования мокрой намоткой лент, из нитей стекловолокна (типа ВМ-1) и органоволокна СВМ с чередованием спиральных ( $\varphi_1 = \pm 45-60^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi_2 = 90^\circ$ ) слоев при отношении их толщин 1 : 1. Показано, что повышение эластичности связующего слабо влияет на динамическое поведение и прочность композита, а критерием для выбора упругого волокна для импульсно-нагруженных конструкций может служить вместо удельной прочности произведение скорости звука  $c$  в нем на предельную деформацию  $\epsilon$  в динамических условиях растяжения (численно оно равно начальной предельной скорости расширения кольцевого элемента, способного удержать еще себя от разрыва). Этот критерий позволяет объяснить результаты [11] (сравнение стекло- и углеволокон) и [12] (волокна СВМ, имеющие существенно более высокую удельную статическую прочность, чем стекловолокна, оказались близки к ним по динамической прочности так же, как и величины  $c\epsilon$ , равные 348 и 321 м/с соответственно, правда, они оценены по известным статическим свойствам).

Дополнительное подтверждение работоспособности этого критерия дано в [13] при исследовании оболочек аналогичной схемы армирования и размеров, но с комбинированием стекловолокна, органоволокна и угле-



Р и с. 2

волокна, в том числе в одном пакете от одного до трех типов волокна, т. е. гибридных композитов. В [13] получено, что добавление высокомодульного углеволокна (с меньшей предельной деформацией и меньшим произведением  $\sigma\epsilon$ ) в слой, образованные намоткой стекло- или органических нитей, не позволяет повысить удельную несущую способность такого композита по сравнению с чисто стекло- или органическими оболочками на эпоксидном связующем.

Таким образом, стекловолокна с учетом установленного физического критерия и стоимости их производства оказываются наиболее предпочтительным материалом для импульсно-нагруженных композитных оболочек.

Очевидно, что в стеклопластике на основе стеклоткани из-за частого переплетения нитей волокна изогнуты и поэтому в ненагруженном состоянии оболочки имеют предварительные напряжения (помимо напряжений от натяга при намотке и усадочных напряжений при отверждении связующего). Это снижает несущую способность такого материала. Кроме того, намоткой ткани трудно сформировать оболочку двойной кривизны (например, для образования плавных обводов днищ при намотке сферических или эллипсоидальных оболочек и т. п.).

Большая свобода в выборе схемы армирования появляется у конструктора при переходе к намотке оболочек типа «кокон» нитями или достаточно узкими лентами, сформированными из нитей или жгутов, причем освобождаются резервы прочности волокна путем спрямления и снижения поврежденности его поверхности вследствие уменьшения числа технологических операций в процессе изготовления изделия.

В [14] сделаны первые шаги для ответа на вопрос об оптимизации схемы армирования стеклопластиковых оболочек, образованных намоткой нитями (или лентами из нитей). Исследовались в основном оболочки с  $R = 150$  мм,  $\delta/R = 9,3-10,9$  %, длиной  $4R$  при армировании спиральной и кольцевой намоткой и чередованием слоев с отношением толщин 1 : 1 и 1 : 2,5. Образцы со спиральной намоткой имели  $\varphi = \pm 30^\circ$ , спирально-кольцевой —  $\varphi_1 = +60^\circ$  и  $\varphi_2 = 90^\circ$ . Сделан вывод о наиболее предпочтительной схеме армирования чередованием намотки  $\varphi_1 = \pm 60^\circ$  и  $\varphi_2 = 90^\circ$  с отношением толщин слоев 1 : 1. На них достигнута удельная прочность при взрывном нагружении в воздухе  $\bar{\xi} \approx 2,3 \cdot 10^{-2}$  при максимальной окружной деформации  $\bar{\epsilon} \approx 3$  %. Обнаружены существенные отличия в реакции и характере разрушения образцов различной структуры. Так, чисто спиральная намотка с  $\varphi = \pm 30^\circ$  приводит к возможности остаточных деформаций оболочки за счет взаимных сдвигов лент и образования фиксирующейся бочкообразности при разрушении связующего (рис. 2, а). Чисто кольцевая намотка предопределяет преимущественно кольцевые трещины из-за высокой прочности связующего (рис. 2, б). Наи-

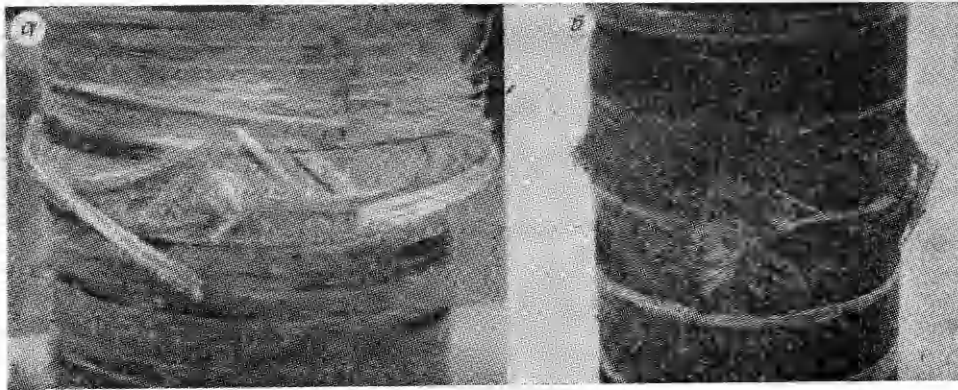


Рис. 3

более прочный тип армирования разрушается подобно образцам оболочек на основе стеклоткани, однако меридиональные трещины менее выражены, а образуются периодически расположенные выпучины разрыхленного материала (рис. 3, а, б), причем разрушение также наступает не в первой фазе расширения, а в процессе колебаний. Эти выводы подтверждены в [15], где рассмотрен более широкий спектр структур армирования. Кроме того, выявлено, что однородные схемы армирования (только спиральными слоями или кольцевыми) обладают пониженной в 1,5—2 раза динамической несущей способностью по сравнению с наиболее предпочтительной комбинированной структурой с чередованием кольцевых и спиральных слоев при одинаковой их расчетной статической прочности в кольцевом направлении.

В [16] получено, что при обеспечении разрушения оболочки в первой фазе радиального расширения \* предельная деформация постоянна и составляет  $\approx 4,8-5,0\%$ , что соответствует предельной деформации статического растяжения используемого магний-алюмосиликатного высокомодульного стекловолокна. Испытывались аналогичные оболочки с комбинированным спирально-кольцевым армированием при варьировании угла спиральной намотки  $\varphi_1 = \pm 35-65^\circ$ . Тем самым показана нечувствительность предельной деформации при динамическом разрушении наиболее напряженных кольцевых слоев от изменения в указанном диапазоне угла армирования соседних спиральных.

Кроме того, первые эксперименты со сферическими металлокомпозитными оболочками, армированными спиральной намоткой с чередованием слоев в диапазоне углов армирования  $\varphi = \pm 15-75^\circ$  (рис. 4), в которых в отличие от цилиндрических оболочек, где растяжение материала близко к одноосному, показали, что при изотропном растяжении волокон во всех слоях предельная деформация разрушения оболочки также не изменяется (при достижении деформации  $\leq 4,6\%$  разрушения не произошло, а при  $\geq 5,2\%$  произошло). Это позволяет использовать предельную деформацию волокон как универсальный критерий динамической прочности ориентированных композитов. На основе данных результатов была разработана взрывная камера с цилиндрической несущей сталь-стеклопластиковой оболочкой, способ-

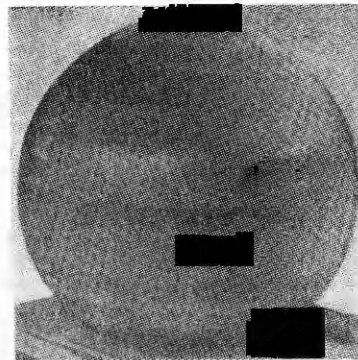


Рис. 4

\* Как повышением взрывной нагрузки (при заполнении воздухом), так и заполнением полости водой или подкреплением слоем стали.

пая герметично удержат однократный взрыв заряда химического ВВ, масса которого составляет до  $\approx 1\%$  от массы камеры. При переходе к сферической геометрии оболочки возможно не менее чем трехкратное улучшение показателя весового совершенства такой камеры. Это подтверждено экспериментальными исследованиями модели камеры  $\varnothing 500$  мм.

В [17] получен необходимый для расчета надежности композитных взрывных камер коэффициент вариации динамической прочности и деформируемости намоточных стеклопластиковых труб при внутреннем взрывном нагружении, составивший  $\approx 11-13\%$ , что близко к известным данным для традиционных конструкционных материалов и позволяет обеспечивать требуемую надежность.

Таким образом, в результате проведенного обзора работ можно сделать следующие выводы.

1. Композитные оболочки на основе ориентированных волокон не подвержены сильным масштабным эффектам снижения прочности при геометрически подобном увеличении размеров и сохранении при этом диаметра силового волокна.

2. Наиболее высокие показатели по удельной несущей способности при центрально-симметричном внутреннем взрывном нагружении имеют цилиндрические композитные оболочки на основе стекловолокна при чередовании спиральных слоев с углами армирования  $\varphi = \pm 30-65^\circ$  и кольцевых слоев равной толщины.

3. 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.

4. Установлена нечувствительность предельной величины деформации кольцевых слоев ( $\varepsilon \approx 4,8-5,0\%$ ) оболочки при взрывном нагружении по отношению к варьированию углов армирования соседних спиральных слоев, а также и к степени их нагружения. Определен коэффициент вариации динамической прочности и деформируемости цилиндрических стеклопластиковых оболочек.

Полученные результаты позволили разработать конструкцию взрывной камеры, состоящей из металлокомпозитной оболочки цилиндрической геометрии с отношением предельной массы заряда ВВ, взрыв которого удерживается в камере, к массе камеры  $\sim 0,01$  и  $\sim 0,03$  (при переходе к сферической геометрии камеры). Эти разработки являются перспективными для обеспечения безопасности при аварийном взрывном энерговыделении в химических и энергетических реакторах, транспортировке взрывчатых веществ, нефти и газа в магистральных трубопроводах и т. п.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Луговой П. З. Динамика оболочечных конструкций при импульсных нагрузках // ИМ.— 1990.— Т. 26, № 5.
2. Иванов А. Г., Повиков С. А., Синицын В. А., Цыпкин В. П. Прочность и разрушение материалов и простейших конструкций при интенсивных импульсных нагрузках // Прикладные проблемы прочности и пластичности/Горьк. гос. ун-т, 1985.— Вып. 29.
3. Рыжаницкий В. А., Минсеев В. Н., Иванов А. Г. и др. Разрушение цилиндрических стеклоэпоксидных оболочек, заполненных водой, при внутреннем импульсном нагружении // Механика полимеров.— 1978.— № 2.
4. Цыпкин В. П., 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.
5. Иванов А. Г., Цыпкин В. П. Деформация и разрушение стеклопластиковых оболочек при экстремальных импульсных нагрузках // Механика композит. материалов.— 1987.— № 3.
6. Иванов А. Г. Две возможные причины хрупких разрушений // ДАН СССР.— 1988.— Т. 300, № 2.
7. Федоренко А. Г., Цыпкин В. П., Иванов А. Г. и др. Особенности динамического деформирования и разрушения цилиндрических стеклопластиковых оболочек

- при внутреннем импульсном нагружении // *Механика композит. материалов.*— 1983.— № 1.
8. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Иванов А. Г. и др. Деформация и разрушение разномасштабных цилиндрических стеклопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // *Механика композит. материалов.*— 1986.— № 4.
  9. Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г. Динамическая прочность оболочек из стеклопластика // *Механика композит. материалов.*— 1989.— № 3.
  10. 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.
  11. Цыпкин В. И., Русак В. И., Иванов А. Г. Высокоскоростное растяжение тканей из неорганического волокна // *Механика композит. материалов.*— 1986.— № 1.
  12. 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.
  13. Сырунин М. А., Федоренко А. Г. Динамическая прочность комбинированных композитных материалов // I Всесоюз. совещ. «Динамические материалы в экстремальных условиях», Суздаль, янв. 1990: Докл.— М.: ГИИТ АН СССР, 1990.— Т. 2.
  14. Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Шитов А. Т. Прочность цилиндрических оболочек из стеклопластика различной структуры при нагружении взрывом // *ФГБ.*— 1989.— № 4.
  15. 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.
  16. 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.
  17. Воронцова О. С., Сырунин М. А., Федоренко А. Г. и др. Экспериментальное исследование коэффициентов вариации прочностных характеристик стеклопластиковых цилиндрических оболочек при внутреннем импульсном нагружении // *Механика композит. материалов.*— 1987.— № 4.

г. Арзамас

Поступила 21/1 1992 г.

УДК 532.598 : 678.01

*А. В. Острик, В. П. Петровский*

### ОСОБЕННОСТИ ОТКОЛЬНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ НЕОСЕСИММЕТРИЧНОМ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Полимерные материалы широко используются в различных областях техники. В процессе эксплуатации элементы конструкций из высоконаполненных резиноподобных материалов работают в самых разнообразных режимах, допускающих деформирование деталей в широком диапазоне скоростей, включая и область скоростей, характерных для ударно-волнового нагружения.

Влияние скорости деформирования на прочностные свойства полимерного материала, состоящего в основном из целлюлозы, описаны в [1]. Особенности поведения наполненных эластомеров на примере резины при интенсивных импульсных воздействиях рассмотрены в [2]. В [3] исследованы условия откольного разрушения смесового топлива на основе полиуретанового каучука. В [2, 3] изучены откольные явления, обусловленные отражением волн напряжений от плоских границ, причем в основном рассмотрены разрушения, связанные с растягивающими напряжениями, возникающими либо при отражении одного фронта волны, либо в результате взаимодействия двух и более отраженных фронтов волн. В то же время практически отсутствуют работы по изучению разрушения эластомеров, связанных с интерференцией волн напряжений, происходящей в результате отражения от искривленной поверхности. Представляет практический интерес вопрос, в какой мере специфика свойств