

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бурыченко В. А. Корреляционная функция полей напряжений в матричных композитах // Изв. АН СССР. МТТ. — 1987. — № 3.
2. Партон В. З., Бурыченко В. А. Флуктуация напряжений в упругих композитах // ДАН СССР. — 1990. — Т. 310, № 5.
3. Бурыченко В. А., Липанов А. М. Уравнения механики газонасыщенных пористых сред // ПМТФ. — 1986. — № 4.
4. Бурыченко В. А., Липанов А. М. Метод эффективного поля в теории идеальной пластичности композитных материалов // ПМТФ. — 1989. — № 3.
5. Швидлер М. И. Статистическая гидродинамика пористых сред. — М.: Недра, 1985.
6. Хорошун Л. П., Маслов Б. П., Леценко П. В. Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов. — Киев: Наук. думка, 1989.
7. Фудзи Т., Дзако М. Механика разрушения композитных материалов. — М.: Мир, 1982.
8. Малмейстер А. К., Тамуж В. П., Тетере Г. А. Сопротивление полимерных и композитных материалов. — Рига: Зинатне, 1980.
9. Mura T. Micromechanics of defects in solids. — Dordrecht: M. Nijhoff Publ., 1987.
10. Hill R. Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles // J. Mech. Phys. Sol. — 1963. — V. 11, N 3.
11. Бурыченко В. А., Партон В. З. Эффективные параметры статических сопряженных физико-механических полей в матричных композитах // IV Всесоюз. симпоз. «Теоретические вопросы магнитоупругости». — Ереван: ЕГУ, 1989.
12. Milgrom M. Linear-response of general composite systems to many coupled fields // Phys. Rev. B. — 1990. — V. 41, N 18.
13. Garson A. L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth. Pt 1. Yield criteria and flow rules for porous ductile media // Trans. ASME. J. Engin. Mater. Technol. — 1977. — V. 99, N 1.
14. Tvergaard V. On localization in ductile materials containing spherical void // Intern. J. of Fracture. — 1982. — V. 18, N 4.

г. Москва

Поступила 5/VI 1990 г.,  
в окончательном варианте — 14/III 1991 г.

УДК 624.074.4 : 678.067

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

### ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ АРМИРОВАНИЯ НА ПРЕДЕЛЬНУЮ ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ ОБОЛОЧЕК ИЗ ОРИЕНТИРОВАННОГО СТЕКЛОПЛАСТИКА ПРИ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ ИЗНУТРИ

В настоящее время показана перспективность использования намоточных стеклопластиков в качестве силовых элементов крупногабаритных оболочечных конструкций, локализирующих аварийное однократное взрывное выделение энергии [1—5]. Применение этих композитных материалов существенно повышает надежность устройств за счет предотвращения катастрофических хрупких разрушений вследствие проявления возможных для однородных материалов сильных масштабных эффектов энергетической природы [6]. Критериальными параметрами для сравнения деформируемости и прочности оболочек служат предельная (на пороге разрушения) деформация и верхнее значение удельной взрывной нагрузки (отношение массы заряда взрывчатого вещества к массе оболочки), которую конструкция способна надежно локализовать [1—5]. Одной из основных задач, возникающих при разработке высокопрочных оболочек из указанных материалов и защитных конструкций на их основе, является определение оптимальной схемы армирования в зависимости от реализуемого нагружения. Экспериментально установлено, что наиболее высокой удельной несущей способностью среди цилиндрических оболочек при радиально-симметричном взрыве изнутри обладает оболочка из ориентированного стеклопластика с чередованием двойных спиральных и кольцевых слоев [3]. Для любого типа намоточных стеклопластиков характерно прак-

тически упругое поведение вплоть до разрушения с не зависящими от скорости деформации упругими константами [1, 3, 5]. Однако в сложном слоистом пакете силовые слои с различной ориентацией нитей, связанных в единое целое полимерной матрицей, за счет отличающихся жесткостей при растяжении в заданном направлении испытывают неодинаковые локальные напряжения и деформации. Превышение предельных значений напряжений и деформаций в наиболее нагруженных нитях может привести к их разрыву, что влечет за собой ослабление или разрушение всего слоя. В то же время для более эффективного применения одноразовых устройств требуется наиболее полное использование резервов прочности материала, т. е. работа конструкции на пороге разрушения. Для намоточных композитов важно знать, насколько полно реализуется прочность силовых волокон на уровне слоя и какие предельные характеристики компонентов и в целом материала определяют прочность конструкции.

Цель данной работы — экспериментальное изучение влияния структуры армирования на предельную деформацию открытых с торцов цилиндрических оболочек из стеклопластика при внутреннем радиально-симметричном нагружении и условия их разрушения в первой фазе растяжения. Объект испытаний — цилиндрические оболочки из стеклопластика, которые изготавливались 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  $4R$ , относительной толщиной стенок  $\delta/R = 4,8 - 7\%$  и следующими схемами армирования: тип 1 — кольцевая намотка слоев; тип 2 — чередование спиральных ( $\varphi = \pm 45^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi = 90^\circ$ ) слоев при соотношении толщин 1 : 1; тип 3 — чередование спиральных ( $\varphi = \pm 65^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi = 90^\circ$ ) слоев при соотношении толщин 1 : 1.

В опытах с оболочками типов 1 и 2 для подавления механизма разрушения от изгиба в процессе колебаний и более полного использования несущей способности [2, 4] в стеклопластиковую оболочку вставлялась изнутри с минимальным зазором (не более 0,5 мм) стальная (сталь 20) оболочка с внутренним радиусом  $R_1 = 147,5$  мм и относительной толщиной  $\delta_1/R_1 = 1,35\%$ . Образцы после изготовления обмерялись и взвешивались, находилась средняя плотность  $\rho$  стеклопластика.

Оболочка подвергалась однократному взрывному нагружению изнутри, для чего в ее геометрическом центре подрывался сферический заряд взрывчатого вещества (ВВ) ТГ 5/5 массой  $m$ . Постановка эксперимента и методы регистрации подробно описаны в [1—5]. В экспериментах методом скоростной фоторегистрации определялось смещение наружной поверхности оболочки в наиболее нагруженном центральном сечении во времени  $\Delta R(t)$ . По результатам измерений с погрешностью, не превышающей 10%, находили максимальную окружную деформацию  $\varepsilon_y$  и соответствующее время  $t_y$  ее достижения (отсчет от начала смещения стенки), максимальную скорость радиального смещения  $v_m$ , которая позволяет вычислить максимальную скорость деформации  $\dot{\varepsilon} = v_m/R_n$  ( $R_n = R + \delta$ ). За условную характеристику удельной взрывной нагрузки принималась величина  $\xi = m/M$  [1—5], где  $M$  — масса однослойной (стеклопластиковой) или двухслойной (стеклопластик, подкрепленный сталью) оболочек. Основные результаты экспериментов приведены в табл. 1, 2. Типичные фотохронограммы и вид оболочек после опытов иллюстрируют рис. 1, 2.

Из проведенных экспериментов получено, что предельная (разрушающая) окружная деформация в первой фазе растяжения стеклопластиковых оболочек (со стальной вставкой и без нее) составляет  $\varepsilon_y^* = (4,8 \pm \pm 0,4)\%$  (среднее значение по опытам, отмеченным звездочкой в табл. 1, 2) и не зависит от угла намотки спиральных слоев.

Так, для оболочек, выполненных комбинированной намоткой (типа 2 и 3),  $\varepsilon_y^* = 4,7 - 5,2\%$  (опыты 6, 7 табл. 2), что удовлетворительно

Таблица 1

Тип оболочки	Номер опыта	$\delta/R, \%$	$\delta/R, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$m, \text{г}$	$\xi \cdot 10^3$	$\epsilon_y, \%$	$t_y, \text{мкс}$	$v_m, \text{м/с}$	$\epsilon, 1/\text{с}$	Состояние оболочки
1 (90°)	1	21,7	6,16	2057	300,2	15,55	2,2	62	82,5	518	Разрушилась на 3-м периоде колебаний в фазе сжатия
	2	21,7	6,16	2057	409,3	21,2	3,0	75	90	565	Разрушилась на 1-м периоде колебаний в фазе сжатия
	3	23,5	5,94	1897	484	25,2	3,4	79	109	682	То же
	4*	24,5	5,87	2077	766,7	39,4	4,4	7,5	120	753	Разрушилась в фазе растяжения
	5*	24,7	5,46	2032	925	48,5	4,9	55	178	1123	То же
2 (±45; 90°)	1	22,2	6,02	1945	276,7	14,05	2,75	100	66	414	Не разрушилась
	2	23,2	5,99	1933	296,6	16,0	3,15	95	81	510	»
	3	21,3	5,96	1940	334,5	18,9	3,9	95	88	555	Не разрушилась (повреждения СТО)
	4	19,6	7,03	1920	432	22,7	5,0	110	105	653	Разрушилась на 1-м периоде колебаний в фазе сжатия
	5*	21,8	6,45	2008	573	28,6	5,2	80	134	840	Разрушилась в фазе растяжения (рис. 1, в, 2, в)

Таблица 2

Тип оболочки	Номер опыта	$\delta/R, \%$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$m, \text{г}$	$\xi \cdot 10^3$	$v_m, \text{м/с}$	$\epsilon, 1/\text{с}$	$\epsilon_y, \%$	$t_y, \text{мкс}$	$T_y, \text{мкс}$	Состояние оболочки после опыта
2 (+45; 90°)	1	5,95	1953	169	16,9	72	453	2,75		245	Не разрушилась, имеет повреждения
	2	5,85	1870	169	17,6	82	515	2,7	80	235	Не разрушилась
	3	5,64	2025	168,5	17,8	65	410	2,6	80	215	Не разрушилась, имеет повреждения
	4	4,8	2120	169	19,3	80	509	3,1	70	235	То же
	5	6,52	1925	209	20,0	76	475	3,3	85	235	Разрушилась на 6-м периоде колебаний в фазе сжатия (рис. 1, а, 2, а)
	6	5,77	2030	205	21,25	78	490	3,2	80	—	Разрушилась на 1-м периоде колебаний в фазе сжатия
	7*	6,7	1940	303	28,6	110	686	4,7	75	—	Разрушилась в фазе растяжения
3 (±65; 90°)	1	6,2	1948	164,5	15,6	62	388	1,6	67	190	Не разрушилась, имеет повреждения
	2	6,72	2013	206	17,4	76	474	1,9	65	195	То же
	3	6,21	1935	208	19,9	80	502	2,15	73	195	Разрушилась на 3-м периоде колебаний в фазе сжатия
	4	6,39	2107	264	22,3	85	522	2,2	75	205	То же
	5	6,59	2023	466	40	134	838	3,9	70	—	Разрушилась на 1-м периоде колебаний в фазе сжатия (рис. 1, б, 2, б)
	6*	6,25	1930	483	48,3	158	991	5,2	75	—	Разрушилась в фазе растяжения

Примечание.  $T_y$  -- период основного тона радиальных колебаний.



Р и с. 1



Р и с. 2

совпадает с данными [4] для оболочек аналогичной структуры с  $\varphi_0^* = +35^\circ$  и пониженным вдвое содержанием волокон в окружающих слоях, где получено  $\varepsilon_y^* = 4,7\%$  (коэффициент вариации 11,5%). Сравнивая эти деформации с предельной величиной для оболочек с кольцевой структурой ( $\varepsilon_y^* = 4,4 - 4,9\%$ ), видим, что все значения в пределах погрешности измерений совпадают с предельной деформацией разрыва при статическом растяжении элементарного стекловолокна  $\varepsilon_p = 4,8\%$  [7].

Во всех рассматриваемых структурах материала имелись кольцевые слои, которые (судя по сравнению с  $\varepsilon_p$  волокна) и определяют предельную окружающую деформацию стеклопластика комбинированной структуры. При достижении в этих слоях критических напряжений (деформаций) происходит их разрыв, что ведет к катастрофическому разрушению всего слоистого пакета (сдвиги и частичные обрывы спиральных слоев) и потере оболочкой несущей способности (рис. 1, в и 2, в).

Итак, при разрушении оболочки в начальной фазе высокоскоростного растяжения слоистый пакет композита полностью исчерпывает резервы прочности за счет разрыва силовой основы в наиболее нагруженных слоях. В этом случае за критерий прочности принимается предельная окружающая деформация  $\varepsilon_y^*$  по аналогии с [4] для стеклопластиков на основе стеклоткани, величина которой определяется разрушающей деформацией силовых стеклянных волокон.

Разрушение однослойных оболочек из стеклопластика комбинированных структур (без стали) происходило после одного или нескольких радиальных колебаний в центральном сечении с начальной деформацией  $\varepsilon_y \approx 2-3\%$  (табл. 2), что существенно ниже предельной для данных материалов при динамическом растяжении (см. выше). Оно наступало из-за потери устойчивости радиальных осесимметричных и развития изгибных форм колебаний по типу параметрического резонанса, когда наиболее сильно возбуждаются изгибные формы с частотой, равной или близкой половине частоты осесимметричных колебаний, подобно [1, 8]. Как и в [3, 5], после одного или нескольких периодов радиального расширения — сжатия образуются локальные выпучины, трещины и прорывы (рис. 1, а, б и 2, а, б).

При разрушении оболочек в процессе колебаний от изгиба появляется зависимость предельной деформации  $\varepsilon_y$  от угла спиральных слоев  $\varphi$ . Так, для комбинированной структуры с  $\varphi = \pm 45^\circ$  значения  $\varepsilon_y$  не пре-

вышают  $\leq 3,3\%$ , а для  $\varphi = \pm 65^\circ$   $\widehat{\varepsilon}_y \leq 2,15\%$ , т. е. отличаются до 1,5 раза (см. табл. 2). Здесь определяющими для разрушения при развитии изгибных форм колебаний являются факторы, влияющие на устойчивость колебаний, такие как запас упругой энергии радиальных колебаний, возможная несимметрия нагрузки, изменения модуля упругости и плотности материала, отклонения диаметра и относительной толщины ( $\delta/R$ ) стенки оболочки и др. [1, 8]. С применением подкрепляющего слоя стали [2, 4] возможно повышение деформации оболочек практически до предельных значений для материала. Следовательно, имеющиеся резервы несущей способности (как по  $\varepsilon_y$ , так и по  $\xi$ ) таких образцов неодинаковы для разных  $\varphi$ , т. е. параметр  $\widehat{\varepsilon}_y$  нельзя принимать за критерий сравнения динамической прочности композитных оболочек, отличных по углам намотки и структуре армирования, при разрушении их за счет потери устойчивости радиальных колебаний. Основным критерием для их сравнения может служить, например, параметр  $\xi$ , характеризующий удельную нагрузку, что использовалось в [1—5, 8]. Хотя жесткость в кольцевом направлении образцов с  $\varphi = +65^\circ$  больше по сравнению с  $\varphi = +45^\circ$  (имеют больший запас прочности по предельной окружной деформации растяжения), однако их несущая способность по  $\xi$  при реализации изгибного механизма разрушения примерно одинаковая, а отношение предельных деформаций обратно отношению жесткостей.

Стальная оболочка позволяет повысить сопротивление стеклопластиковой оболочки развитию изгибных колебаний и более полно реализовать ее резервы несущей способности (сравнение предельных  $\widehat{\varepsilon}_y = 2,15—3,2\%$  для однослойных (табл. 2) и  $\varepsilon_y^* \approx 5\%$  для двухслойных оболочек табл. 1), что соответствует выводам [2]. Однако в двухслойной оболочке не всегда удавалось добиться полного устранения механизма потери устойчивости стеклопластиковой оболочки при выбранных соотношениях толщин  $\delta_1/\delta$ . Наиболее характерно это проявлялось у образцов типа 1 с кольцевой намоткой, для которых  $\varepsilon_y^* = 4,4—4,9\%$  (см. табл. 1). Однако уже при  $\xi \leq 15,55 \cdot 10^{-3}—25,5 \cdot 10^{-3}$  в материале образовывались явно выраженные трещины меридиональной ориентации, что является следствием разрушения от изгиба [1, 3, 5, 8]. Модуль упругости образцов этого типа в кольцевом направлении наиболее высок ( $E_y \approx (4—5) \times 10^{10}$  Па [3]), как и его энергоемкость. Поэтому не хватало сопротивления деформированию слоя стали для полного демпфирования колебаний. Согласно [3], оболочки с кольцевой структурой без стальной вставки начинали разрушаться в процессе колебаний при  $\xi \leq 16,5 \cdot 10^{-3}$  и  $\widehat{\varepsilon}_y \leq 1,9\%$ , причем предельные деформации при расширении ранее для них не были получены.

Таким образом, для намоточного ориентированного стеклопластика с комбинированной спирально-кольцевой структурой армирования предельная окружная деформация динамического растяжения  $\varepsilon_y^*$  не зависит (в пределах погрешности измерений) от угла спиральных слоев в исследованном интервале  $\varphi = 35—65^\circ$ . Ее величина составляет  $\varepsilon_y^* = (4,8 \pm 0,4)\%$  и определяется деформацией разрыва элементарных волокон, испытывающих при данном виде нагружения наибольшее растяжение в кольцевых слоях. Как и для стеклопластиков на основе стеклоткани [1], 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 разрыва связующего раньше, чем напряжения растяжения в волокнах достигнут разрушающей величины, прочностные и деформационные характеристики силовой основы в полной мере не используются. Например, в [3] такой эффект наблюдался для оболочек, выполненных спиральной намоткой с  $\varphi = \pm 30^\circ$  (без намотки кольцевых слоев).

Итак, наряду с тем, что стеклянное волокно является несущим силовым элементом стеклопластика [1], оно также определяет его предельные динамические упругие (деформационные) характеристики независимо от угла армирования менее нагруженных слоев, однако при условии наличия слоев с ориентацией волокон, совпадающих с ведущим компонентом растягивающих напряжений. Это не исключает возможности ситуации, когда в конкретной оболочечной конструкции из-за особенностей ее динамической реакции предельная деформация в первой фазе растяжения может быть существенно ниже  $\epsilon_b^*$  и приводить к снижению удельной прочности оболочки в зависимости от структуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов А. Г., Цыпкин В. И. Деформация и разрушение стеклопластиковых оболочек при экстремальных импульсных нагрузках // МГМ.— 1987.— № 3.
2. Цыпкин В. И., Русак В. Н., Иванов А. Г. и др. Деформация и разрушение двухслойных металлопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // МГМ.— 1987.— № 5.
3. Сырунин М. А., Федоренко А. Г., Шитов А. Т. Прочность цилиндрических оболочек из стеклопластика различной структуры при нагружении взрывом // ФГВ.— 1989.— № 4.
4. Воронцова О. С., Сырунин М. А., Федоренко А. Г. и др. Экспериментальное исследование коэффициентов вариации прочностных характеристик стеклопластиковых цилиндрических оболочек при внутреннем импульсном нагружении // МГМ.— 1987.— № 4.
5. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Сырунин М. А. и др. Поведение композитных оболочек с высокоэластичным связующим при внутреннем импульсном нагружении // МГМ.— 1988.— № 2.
6. Иванов А. Г., Минеев В. И. О масштабных эффектах при разрушении // ФГВ.— 1979.— № 5.
7. Альперин В. И., Корольков Н. В., Мотавкин А. В. и др. Конструкционные стеклопластики.— М.: Химия, 1979.
8. Федоренко А. Г., Цыпкин В. И., Иванов А. Г. Деформация и разрушение разномасштабных цилиндрических стеклопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // МГМ.— 1986.— № 4.

г. Арзамас

Поступила 14/VI 1991 г.

УДК 620.10

*В. З. Васильев, С. Ю. Кантелин*

### О ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ЭФФЕКТА УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ И ТОНКИХ НИТЕЙ

Многочисленными экспериментами отечественных и зарубежных исследователей установлен факт существенного возрастания прочности материала нитевидных кристаллов и тонких нитей при уменьшении характерного размера последних — диаметра или площади поперечного сечения. Существующие гипотезы природы этого явления носят в общем-то феноменологический характер и не дают объяснения на микроуровне.

В данной работе выдвигается концепция, позволяющая, по мнению авторов, дать физико-механическое объяснение сущности эффекта упрочнения.

1. Первым из исследователей, достоверно установившим связь между прочностью материала тонкой нити и ее поперечным размером, был, по-видимому, Гриффитс [1]. В опытах на разрыв стеклянных стержней диаметром  $10 \div 100$  мкм он показал, что достигаемая при этом прочность материала образцов значительно выше обычной технической прочности данного материала. Подтверждение и дальнейшее развитие результаты [1] получили в опытах на кристаллах сурьмы, кремния, соляных столбиках и на кварцевых нитях [2—5].