

УДК 624.074.4:678.067

## ПРЕДЕЛЬНАЯ ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ БАЗАЛТОПЛАСТИКОВЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

В. Н. Русак, А. Г. Федоренко, М. А. Сырунин,  
Л. А. Соболев\*, А. В. Суханов\*, В. Г. Попов\*

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607190 Саров

\* Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения,  
141350 Хотьково Московской области

Приведены результаты экспериментальных исследований динамической прочности и деформируемости образцов из базальтопластика при однократном импульсном (взрывном) нагружении. Полученные данные свидетельствуют о высокой удельной прочности базальтопластиковых образцов и близости их прочностных характеристик к характеристикам аналогичных трубчатых образцов из стеклопластика на основе высокомодульного стекловолокна. При этом удельная несущая способность образцов не изменяется с увеличением всех геометрических размеров образцов в два раза.

При разработке взрывостойких конструкций, в частности взрывозащитных контейнеров, одной из основных проблем является выбор материала и параметров силового корпуса контейнера. В [1] показано, что более предпочтительным материалом для силового корпуса взрывостойкого контейнера или камеры является композит намоточного типа на основе высокомодульного стекловолокна. В настоящее время весьма актуальной является проблема замены высокомодульного стекловолокна, используемого в качестве материала силового корпуса взрывозащитных контейнеров, без снижения технических показателей. Одним из возможных путей решения этой проблемы является замена стекловолокна на базальтовое волокно, обеспечивающее наиболее близкие прочностные и упругие характеристики композита.

В табл. 1 представлены результаты исследований квазистатических физико-механических характеристик базальтопластика с однонаправленным армированием на основе связующего ЭДТ-10 и ровинга из базальтовых комплексных нитей РБ9-1200 (диаметр элементарной нити 9 мкм) с замасливателем 4С. Там же для сравнения приведены данные для стеклопластика на основе ровинга РВМН 10-1260-80 и связующего ЭДТ-10. Испытывались кольцевые и плоские однонаправленные образцы по стандартным методикам определения соответствующих физико-механических характеристик. Массовая доля связующего в кольцевых образцах диаметром 146–150 мм составляла 14,45–23,24 %, в плоских однонаправленных образцах — 16,25–23,65 %. В табл. 1 приняты следующие обозначения:  $E_1$ ,  $E_2$  — модули упругости при растяжении в направлении и поперек направления армирования соответственно;  $E_{\text{изг}}$  — модуль упругости при изгибе в направлении армирования;  $\sigma_{1b}$ ,  $\sigma_{2b}$  — разрушающие напряжения при растяжении в направлении и поперек направления армирования соответственно;  $\bar{\sigma}_{1b}$ ,  $\bar{\sigma}_{2b}$  — разрушающие напряжения при сжатии в направлении и поперек направления армирования соответственно;  $\sigma_{\text{см}}$ ,  $\sigma_{\text{ср}}$ ,  $\sigma_{\text{сдв}}$  — разрушающие напряжения при смятии, срезе и межслоевом сдвиге соответственно;  $G_{12}$  —

Таблица 1

Материал	$E_1$	$E_2$	$E_{изг}$	$\sigma_{1b}$	$\sigma_{2b}$	$\sigma_{1b}^-$	$\sigma_{2b}^-$	$\sigma_{см}$	$\sigma_{ср}$	$\sigma_{сдв}$	$G_{12}$	$\varepsilon_{1p}$	$\varepsilon_{2p}$	$\mu$
РБ9-1200+ ЭДТ-10	5184	1425	5160	112	4,88	64,2	13,0	12,0	20,0	4,14	574	2,18	0,34	—
	5483	1553	5586	131	5,98	95,0	16,3	19,9	26,7	4,99	618	2,93	0,39	—
	5356	1515	5347	121	5,55	84,4	14,8	16,1	22,2	4,69	590	2,40	0,37	0,290
РВМН 10-1260-80+ ЭДТ-10	5500	904	—	150	2,67	39,7	7,19	14,0	21,8	3,57	508	2,33	—	0,276

Примечания. 1. Единица измерения величин  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_{изг}$ ,  $\sigma_{1b}$ ,  $\sigma_{2b}$ ,  $\sigma_{1b}^-$ ,  $\sigma_{2b}^-$ ,  $\sigma_{см}$ ,  $\sigma_{ср}$ ,  $\sigma_{сдв}$ ,  $G_{12}$  — кгс/мм<sup>2</sup>;  $\varepsilon_{1p}$ ,  $\varepsilon_{2p}$  — %.

2. Для материала РБ9-1200 + ЭДТ-10 для всех величин, кроме коэффициента Пуассона  $\mu$ , указаны минимальное, максимальное и среднее значения по серии испытаний.

модуль межслоевого сдвига;  $\varepsilon_{1p}$ ,  $\varepsilon_{2p}$  — относительные удлинения в момент разрушения при растяжении в направлении и поперек направления армирования соответственно;  $\mu$  — коэффициент Пуассона. Из табл. 1 следует, что по основным квазистатическим параметрам упругости и прочностным характеристикам базальтопластик практически не уступает стеклопластику.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование при внутреннем взрывном нагружении основных характеристик динамической деформируемости и прочности трубчатых образцов из базальтопластика, имитирующих наиболее нагруженную центральную зону оболочки силового корпуса взрывостойкого контейнера.

**Параметры испытываемых трубчатых образцов.** Испытывались оболочки из указанного выше базальтопластика, имеющие следующие геометрические размеры и параметры армирования:

1) внутренний диаметр  $D = 150$  мм, длина  $L = 300$  мм, толщина  $h = (6,6 \pm 0,2)$  мм, углы армирования  $\varphi \approx 90^\circ$  и  $\varphi = \pm 35^\circ$  относительно образующей с чередованием 7 двойных кольцевых слоев и 7 двойных спиральных слоев, средняя массовая доля связующего  $(16,3 \pm 0,6)$  %;

2)  $D = 295$  мм,  $L = 600$  мм,  $h = (13,5 \pm 0,5)$  мм, углы армирования  $\varphi \approx 90^\circ$  и  $\varphi = \pm 35^\circ$  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 схеме армирования, обеспечивающей высокую удельную прочность цилиндрических оболочек из композита на основе высоко-модульного стекловолокна [2] при аналогичных условиях взрывного нагружения.

Образцы базальтопластиковых оболочек изготавливались мокрой намоткой на цилиндрическую технологическую оправку с последующей термообработкой, необходимой для полимеризации связующего.

В большинство образцов 1-го и 2-го типов перед испытанием вставлялась стальная оболочка толщиной  $h_1 = 1; 2$  мм соответственно. Оболочки из малоуглеродистой стали выполнялись сворачиванием в цилиндр листа и сваркой его встык (1-й тип). В этом случае сварной шов был менее качественным и менее пластичным, чем в оболочках 2-го типа, что приводило к образованию трещин по сварке практически во всех опытах. Оболочки 2-го типа изготавливались сворачиванием более толстого листа и сваркой его встык с последующим отжигом и точением до заданных размеров. Выбранный наружный диаметр стальной обечайки обеспечивал минимальный зазор относительно внутреннего диаметра базальтопластиковой оболочки. Двухслойное исполнение силовой оболочки, по данным ис-

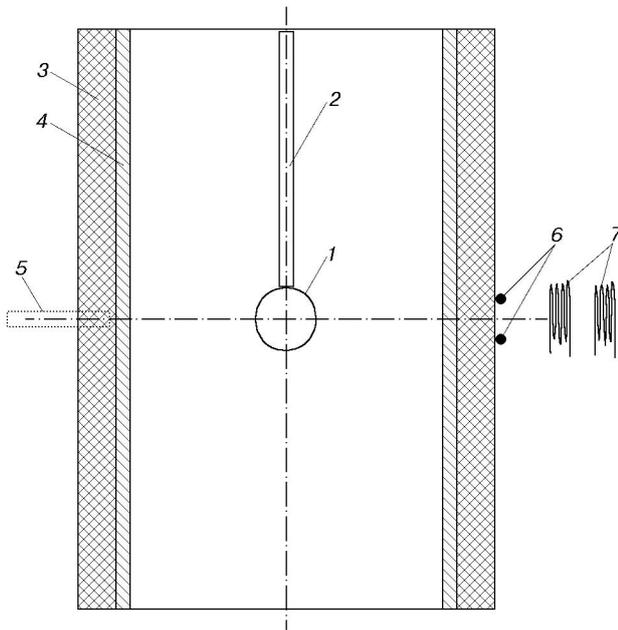


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — заряд ВВ из сплава ТГ 50/50; 2 — стержень для подвески ВВ; 3 — базальтопластиковая оболочка; 4 — стальная оболочка; 5 — область скоростной щелевой фоторегистрации радиального расширения оболочки; 6 — окружные тензодатчики с базой  $2\pi R$ ; 7 — продольные тензодатчики КФ-5 с базой 20 мм

пытаний стеклопластиковых оболочек, позволяет увеличить удельную взрывопрочность оболочки [3].

**Постановка опытов.** Схема опытов показана на рис. 1. При регистрации основного параметра — окружной деформации оболочки  $\varepsilon_1$  в сечении, в котором расположен заряд взрывчатого вещества (ВВ), — применялись окружные тензодатчики из нихромовой проволоки с бифилярной намоткой по всей длине окружности [4]. Скоростной щелевой фоторегистрацией [5] измерялось радиальное расширение оболочки в центральном сечении  $\Delta R_n$ , по величине которого может быть определена окружная осесимметричная деформация. Для измерения продольных деформаций в центральном сечении  $\varepsilon_3$  использовались промышленные тензодатчики КФ-5, позволяющие регистрировать деформации до 3–5 %. При определении максимального значения измеряемого параметра погрешность не превышала 10 %.

Для определения параметра удельной взрывной нагрузки  $\xi = M_{ВВ}/M$ , где  $M_{ВВ}$  — масса заряда ВВ;  $M = M_1 + M_2$  — суммарная масса стальной ( $M_2$ ) и базальтопластиковой ( $M_1$ ) оболочек, заряд и оболочки взвешивались с погрешностью не более 1 %. Для определения окружной деформации  $\varepsilon_1 = \Delta R_n/R_n$  по результатам щелевой фоторегистрации радиального расширения оболочки  $\Delta R_n$  в нескольких сечениях с обоих торцов измерялся наружный диаметр оболочки  $D = 2R_n$  с погрешностью примерно 0,1 %, а затем по среднему значению  $D$  вычислялся наружный радиус  $R_n$ .

Каждый образец подвергался взрывному нагружению один раз (лишь в одном случае для неповрежденной оболочки делалось повторное нагружение). Температура окружающей среды во время испытаний составляла 10–25 °С.

**Результаты экспериментов.** По результатам экспериментов определялись следующие величины: максимальная окружная деформация растяжения в центральном сечении  $\varepsilon_1$  и время ее достижения  $\tau_1$ ; максимальная окружная деформация сжатия в центральном сечении  $\varepsilon_2$ ; максимальная продольная деформация в центральном сечении  $\varepsilon_3$ ; период основного тона радиальных колебаний  $T$ ; максимальная скорость окружной деформации  $\max(d\varepsilon_1/dt)$ . Определялся характер повреждений образца и проводились его обмеры.

Исходные параметры образцов и результаты замеров для оболочек 1-го и 2-го типов приведены в табл. 2, 3 соответственно. Для более корректного сравнения с имеющимися

Таблица 2

Номер опыта	Номер образца	$h$ , мм	$R_{\text{н}}$ , мм	$h_1$ , мм	$M$ , г	$M_{\text{ВВ}}$ , г	$\xi \cdot 10^3$	$\varepsilon_1$ , %	$\tau_1$ , мкс	$\varepsilon_2$ , %	$\varepsilon_3$ , %	$T$ , мкс	$\max(d\varepsilon_1/d\tau)$ , $\text{с}^{-1}$
1	1	6,70	81,70	—	2054	23,80	11,59	2,20	45,1	-1,1	—	123	597
2	2	6,80	81,80	—	2060	37,40	18,16	2,45	34,6	-1,5	0,30	—	856
3	3	6,60	81,60	1	2980	46,00	15,64	2,90	43,2	-1,4	1,85	112	891
4*	3	6,60	81,60	1	2980	62,20	21,15	3,70	43,3	—	—	—	1188
5	4	6,70	81,70	1	3101	59,70	19,51	—	—	—	—	—	—
6	5	6,80	81,80	1	3057	90,70	30,07	4,70	41,7	—	—	—	1498
7	6	6,80	81,80	1	3125	81,15	26,32	4,35	49,8	—	2,10	—	919
8	7	6,77	81,77	1	3120	69,17	22,47	3,80	44,7	—	—	—	847
9	8	6,77	81,77	1	3070	63,00	20,61	3,20	43,2	-0,9	—	—	978
10	9	6,79	81,80	1	3135	30,10	9,63	1,72	42,1	-0,86	—	121	592

\* Результаты повторного нагружения.

Таблица 3

Номер опыта	Номер образца	$h$ , мм	$R_{\text{н}}$ , мм	$h_1$ , мм	$M$ , г	$M_{\text{ВВ}}$ , г	$\xi \cdot 10^3$	$\varepsilon_1$ , %	$\tau_1$ , мкс	$\varepsilon_2$ , %	$T$ , мкс	$\max(d\varepsilon_1/d\tau)$ , $\text{с}^{-1}$
1	1	13,47	161,22	—	15 750	135,0	8,70	1,47	75,0	-0,86	245	234
2	2	13,17	160,75	2,17	24 750	633,0	26,38	4,80	100,0	—	—	613
3	3	13,75	161,70	2,10	24 990	484,6	19,94	3,60	94,8	-1,60	—	507

данными по стеклопластикам в табл. 2, 3 приведены значения удельной взрывной нагрузки  $\xi = M_{\text{ВВ}}/M'$  ( $M' = 4M(R_{\text{н}} - h - h_1)/L$  — масса двухслойной оболочки, длина которой равна четырем внутренним радиусам). Если в опыте проводилось несколько измерений одной величины, то приводится ее среднее значение.

Ниже описано состояние оболочки после эксперимента.

1. Оболочка не разрушилась. На внутренней поверхности произошло отслоение материала толщиной 1,2 мм (табл. 2, опыт 1).

2. В оболочке образовалось сквозное отверстие диаметром 7 мм, произошло отслоение материала на внутренней поверхности толщиной 3 мм, на внешней — 1 мм (табл. 2, опыт 2).

3. Оболочка не разрушилась; стальной слой потерял устойчивость в окрестности сварного шва (образовалась вмятина шириной 40 мм и глубиной 10 мм; у нижнего торца оболочки сварной шов разошелся на длину 50 мм (табл. 2, опыт 3).

4. Оболочка находится в начальной стадии разрушения; произошли разрыв наружного слоя, армированного в окружном направлении, на ширину 45 мм и глубину 0,7 мм, разрыхление слоя со спиралевидной намоткой и разрыв стального слоя на длину 35 мм (табл. 2, опыт 4).

5. Оболочка не разрушилась; по внешней поверхности произошли отслоения материала шириной 8 мм и толщиной 0,5 мм; стальной слой потерял устойчивость (табл. 2, опыт 5).

6. Оболочка разрушилась на первой стадии расширения; остаточная деформация в центральной части оболочки шириной 31 мм составила 35 % (табл. 2, опыт 6).

7. Оболочка находится в стадии разрушения; произошло отслоение трех лент шириной 60 мм; остаточная деформация составила 7,2 %; в стальном слое образовалась трещина по сварному шву (табл. 2, опыт 7).

8. Оболочка не разрушилась; произошло отслоение одной ленты шириной 45 мм и толщиной 0,6 мм; стальной слой потерял устойчивость, на нем образовалась трещина по сварному шву длиной 35 мм (табл. 2, опыт 8).

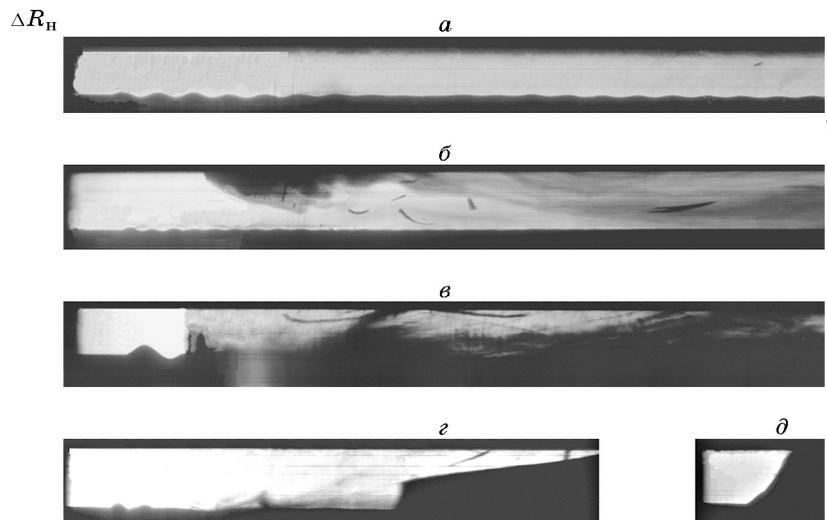


Рис. 2. Теневые фотохронограммы радиального расширения оболочки в опытах с различными уровнями нагружения:

*a* — колебания неразрушенной оболочки без слоя стали (табл. 3, опыт 1); *б* — колебания неразрушенной оболочки со слоем стали (табл. 2, опыт 10); *в* — разрушение после стадии сжатия (табл. 3, опыт 3); *г* — разрушение отслоением (табл. 2, опыт 9); *д* — разрушение в первой стадии расширения (табл. 3, опыт 2)

9. С оболочки произошло отслоение отдельных нитей; стальной шов находится в начальной стадии потери устойчивости, и на нем образовалась трещина по сварному шву длиной 280 мм (табл. 2, опыт 9).

10. Оболочка не разрушилась (табл. 2, опыт 10; табл. 3, опыт 1).

11. Оболочка разрушилась на первой стадии расширения; произошел разрыв слоев, армированных в окружном направлении, и разрыхление слоев со спиралевидной намоткой; остаточная деформация в центральном сечении составила примерно 17 %; стальной слой не разрушился (табл. 3, опыт 2).

12. Оболочка находится в начальной стадии разрушения; произошел разрыв 2–3 наружных слоев шириной 35 мм; стальной слой не разрушился, на нем имеются признаки потери устойчивости (табл. 3, опыт 3).

Примеры скоростной фоторегистрации динамической реакции образца на взрывное нагружение при отсутствии его разрушения, при разрушении после начальной стадии сжатия и в первой стадии расширения приведены на рис. 2.

Фотографии образцов 1-го и 2-го типов с различной степенью поврежденности приведены на рис. 3.

**Обсуждение и анализ результатов.** На рис. 4 представлены зависимости  $\varepsilon_1(\xi)$  для испытанных оболочек обоих типов. Темные точки соответствуют разрушенным оболочкам, серые — оболочкам с поверхностными повреждениями, светлые точки — неразрушенным и практически не имеющим повреждений оболочкам. Из рис. 4 следует, что в пределах погрешности измерений все зависимости имеют линейный характер и практически совпадают.

В [2, 6] для аналогичных образцов из стеклопластика с подобными схемами армирования получены экспериментальные зависимости окружной деформации  $\varepsilon_1$  от удельной взрывной нагрузки  $\xi$ , также показанные на рис. 4. Из сравнения указанных зависимостей следует, что в динамических условиях нагружения базальтопластиковые оболочки ведут

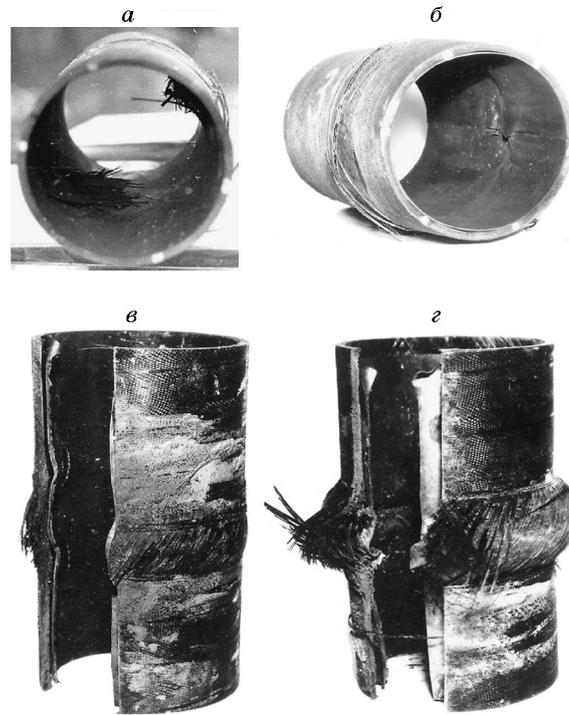


Рис. 3. Вид оболочки после эксперимента (см. табл. 2):  
 а — опыт 2, б — опыт 4, в — опыт 7, г — опыт 6

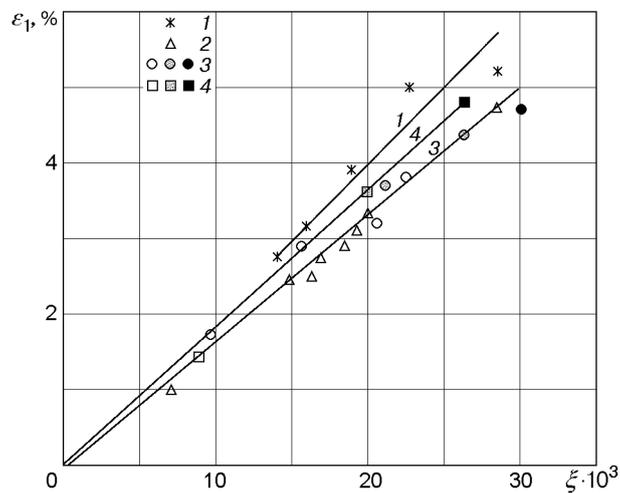


Рис. 4. Экспериментальные зависимости максимальной окружной деформации  $\varepsilon_1$  от удельной взрывной нагрузки  $\xi$ :

1 — данные [6] для стеклопластиковых оболочек с внутренним слоем стали толщиной  $h_1 = 2$  мм (внутренний радиус  $R = 150$  мм, длина  $L = 4R$ , относительная толщина стенок  $h/R = 4,8 \div 7$  %, чередование спиральных ( $\varphi_1 = \pm 45^\circ$ ) и кольцевых ( $\varphi_2 = 90^\circ$ ) слоев (соотношение толщин  $k = 1 : 1$ ); 2 — данные [2] для стеклопластиковых оболочек без внутреннего слоя стали ( $2R = 300 \div 320$  мм,  $L = 600$  мм,  $h/R = (8 \pm 2,9)$  %,  $\varphi_1 = \pm 45^\circ$ ,  $\varphi_2 = 90^\circ$ ,  $k = 1 : 1$ ); 3 — образцы 1-го типа из базальтопластика с внутренним слоем стали (диаметр 150 мм); 4 — образцы 2-го типа из базальтопластика с внутренним слоем стали (диаметр 295 мм) (светлый квадрат — образец из базальтопластика без внутреннего слоя стали); прямые 1, 3, 4 — линейные аппроксимации соответствующих экспериментальных зависимостей

себя подобно стеклопластиковым, т. е. практически как оболочки из линейно-упругого материала вплоть до разрушения (см. [2, 3, 6]). Однако наклон кривой  $\varepsilon_1(\xi)$  для базальтопластиковых оболочек 2-го типа при меньшем угле спирального армирования примерно на 9 % меньше наклона соответствующей кривой для подобных стеклопластиковых оболочек. Таким образом, жесткость базальтопластиковых оболочек выше вследствие более высокого содержания в них слоев, армированных в окружном направлении.

**Пределная деформируемость и удельная прочность базальтопластиковых оболочек.** Из табл. 2 (опыты 1, 2) следует, что при отсутствии подкрепляющего слоя стали разрушающая окружная деформация базальтопластиковых образцов диаметром 150 мм составляет 2,2–2,45 %, что почти на 25 % меньше, чем для стеклопластиковых образцов со схемой армирования, наиболее близкой к схеме, рассмотренной в [6], где получен диапазон предельных деформаций 3,1–3,3 %. Существенного повышения предельной деформации и удельной прочности, как и в случае стеклопластиковых оболочек [2, 3, 6], удается достичь, если внутри базальтопластиковой оболочки вставлена стальная. Так, для базальтопластиковых образцов 1-го (2-го) типа при подкреплении слоем стали предельная деформация и удельная прочность соответственно находятся в интервалах  $\varepsilon_1 = 3,7 \div 4,35$  % ( $\varepsilon_1 = 3,6 \div 4,8$  %),  $\xi = 21,2 \cdot 10^{-3} \div 26,3 \cdot 10^{-3}$  ( $\xi = 19,9 \cdot 10^{-3} \div 26,4 \cdot 10^{-3}$ ). Для стеклопластиковых оболочек при наличии слоя стали толщиной примерно 20 % толщины композита согласно [6]  $\varepsilon_1 = 3,9 \div 5,0$  %,  $\xi = 18,9 \cdot 10^{-3} \div 22,7 \cdot 10^{-3}$ . Следует отметить, что аналогично стеклопластику для базальтопластика установлено увеличение предельных деформаций при динамическом разрушении в начальной стадии расширения до 4,35–4,8 % (см. табл. 2, 3). Это значение почти в два раза превышает предельную деформацию образцов из базальтопластика с однонаправленным армированием в квазистатических условиях растяжения, составляющую 2,4 % (см. табл. 1).

Приведенные данные свидетельствуют о достаточно высокой удельной прочности базальтопластиковых и стеклопластиковых оболочек при взрывном нагружении и близости ее значений для этих оболочек. Сравнение данных для образцов 1-го и 2-го типов (т. е. для образцов разных размеров) свидетельствует о стабильности характеристик предельной деформируемости и удельной прочности базальтопластиковых оболочек при увеличении их размеров в два раза (т. е. при уменьшении максимальной скорости деформации больших образцов по сравнению с малыми с 1000 до 500 с<sup>-1</sup>).

**Оценка упругих констант базальтопластика по данным динамических испытаний.** Аналогично [2] по методике [7] можно оценить упругие постоянные базальтопластика с использованными типами армирования трубчатых образцов исходя из упругих постоянных связующего и волокна.

Для расчетов использовались следующие физико-механические характеристики связующего ЭДТ [8]: модуль Юнга  $E_c = 2,9 \cdot 10^3$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu_c = 0,4$ , плотность  $\rho_c = 1230$  кг/м<sup>3</sup>. Объемная доля связующего в материале  $\theta_c$  может быть рассчитана по формуле  $\theta_c = \rho\theta/\rho_c$ , где  $\rho = 2060$  кг/м<sup>3</sup> — плотность образцов;  $\theta = 0,1527$  — массовая доля связующего. Значения модуля упругости и плотности волокна из базальта, необходимые для расчетов, неизвестны. Из данных [9] следует, что для природного базальта характерен достаточно широкий разброс данных как о химическом составе, так и о физико-механических свойствах. Так, его модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность могут находиться в интервалах:  $E_b = 6,2 \div 11 \cdot 10^{10}$  Па,  $\mu_b = 0,2 \div 0,25$ ,  $\rho_b = 2520 \div 2970$  кг/м<sup>3</sup>. Поэтому ограничимся оценкой недостающих характеристик базальтовых волокон по имеющимся данным.

Исходя из закона аддитивности [8]  $E_1 = E_b(1-\theta_c) + E_c\theta_c$  ( $E_1 = 5,254 \cdot 10^{10}$  Па — среднее значение модуля упругости образца из базальтопластика с однонаправленным армированием (см. табл. 1)) находим модуль упругости базальтового волокна  $E_b = 6,96 \cdot 10^{10}$  Па,

Таблица 4

Тип образца	$E_y$ , ГПа	$E_x$ , ГПа	$G_{xy}$ , ГПа	$\mu_{xy}$	$\mu_{yx}$
Первый	36,05	24,52	10,94	0,140	0,206
Второй	33,44	19,50	8,81	0,119	0,204

а из уравнения  $\rho = (1 - \theta_c)\rho_b + \theta_c\rho_c$  — его плотность:  $\rho_b = 2345$  кг/м<sup>3</sup>. Определенные таким образом характеристики базальтового волокна близки к нижней границе справочных данных для природных базальтов. Для коэффициента Пуассона принято его среднее значение для природных базальтов  $\mu_b = 0,225$  [9].

В образцах из базальтопластика обоих типов слои с различными углами намотки  $\varphi$  имеют соответствующую относительную толщину  $\delta$  (т. е. отношение толщины слоев с данным углом армирования к суммарной толщине пакета): 1-й тип —  $\delta = 0,5$  для  $\varphi = \pm 35^\circ$  и  $\varphi = 90^\circ$ ; 2-й тип —  $\delta = 10 : 25,5$  для  $\varphi = \pm 35^\circ$ ;  $\delta = 14,5 : 25,5$  для  $\varphi = 90^\circ$ . Учтены также значения массовой доли связующего 16,3 и 21,3 % для 1-го и 2-го типов соответственно. Полученные в расчете [7] осевой  $E_x$  и окружной  $E_y$  модули упругости пакета из базальтопластика, а также коэффициенты Пуассона для данных ортотропных материалов указаны в табл. 4.

Частоту основной формы радиальных колебаний свободной цилиндрической оболочки можно определить по зависимости [10], которая после преобразований имеет вид

$$f' = \frac{1}{2\pi R_{\text{ср}}} \sqrt{\frac{E_y - E_x\mu_{yx}^2}{\rho(1 - \mu_{xy}\mu_{yx})}},$$

где  $R_{\text{ср}} = R_{\text{н}} - h/2$  — срединный радиус оболочки;  $\mu_{xy}$ ,  $\mu_{yx}$  — коэффициенты Пуассона.

Вычисленные для рассматриваемых типов базальтопластика периоды основного тона  $T' = 1/f'$  по квазистатическим упругим характеристикам ( $T'_1 = 117$  мкс,  $T'_2 = 234$  мкс) удовлетворительно (различие не более 5 %) согласуются со средними экспериментальными значениями  $T$  ( $T_1 = 123$  мкс,  $T_2 = 245$  мкс) для соответствующих частот радиальных колебаний (см. табл. 2, 3, опыт 1) для оболочки без слоя стали. Эти данные свидетельствуют о слабом влиянии динамики нагружения на упругие характеристики намоточных базальтопластиков, что согласуется с выводом, полученным в работах [2, 6] для стеклопластиков.

**Основные особенности разрушения и повреждения базальтопластиковых оболочек.** В ходе испытаний базальтопластиковых оболочек при взрывном нагружении обнаружены следующие основные особенности динамической реакции, повреждения и характера разрушения.

Динамическая реакция базальтопластиковых оболочек при достаточно низкой взрывной нагрузке, не вызывающей визуально наблюдаемых повреждений, характеризуется затухающими колебаниями типа биений с преобладающей частотой основного тона форм радиальных колебаний в случае оболочки без слоя стали (см. рис. 2, а). Оболочка со слоем стали реагирует аналогично. Однако из-за более высокого коэффициента демпфирования при пластических деформациях стали и контактном трении между сталью и базальтопластиком в этом случае биения уже не наблюдаются (см. рис. 2, б). Аналогичные особенности динамической реакции отмечены и для стеклопластиковых оболочек [3, 6].

Разрушение базальтопластиковых (как и стеклопластиковых) оболочек, не подкрепленных слоем стали, наблюдается после первой стадии сжатия при достаточно малой максимальной окружной деформации (примерно 2,5 %). Это происходит вследствие воз-

никновения изгибных форм движения центральной зоны (см. рис. 2, в; 3, а). В этом случае на оболочке имеются выпуклости материала как внутрь, так и наружу (см. рис. 3, а).

Для оболочки, подкрепленной слоем стали, при максимальной окружной деформации 3,2–3,8 % появляются лишь незначительные повреждения в виде отслоений одного-двух наружных слоев (см. рис. 3, б). Динамика появления отслоений показана на рис. 2, г. Видно, что процесс отслоения начинается после достижения максимального значения радиального расширения оболочки.

Дальнейшее увеличение взрывной нагрузки приводит к разрушению окружных слоев в первой стадии расширения (см. рис. 2, д; 3, в, з). Регистрируемая при этом деформация в точке излома кривой  $\varepsilon_1(\xi)$  (см. рис. 2, д) может рассматриваться как предельная деформация кольцевых слоев в условиях динамического растяжения с высокой начальной скоростью деформации ( $500\text{--}1000\text{ с}^{-1}$ ). В то же время волокна, уложенные по спирали, испытывают меньшие напряжения и не разрушаются, несмотря на разрушение связующего (см. рис. 3, в, з). В этом случае образуется кольцевая зона разрушения в виде пояса освобожденных от связующего спиральных слоев, в которой происходит выпучивание наружу разрушенного пакета базальтопластикового слоя. Слой стали в этой области получает значительные изгибные и окружные деформации и также может разрушаться (см. рис. 3, в, з).

В целом поведение (в частности, многостадийный характер увеличения поврежденности и разрушения) базальтопластиковых и стеклопластиковых оболочек при динамическом нагружении близко.

На основании полученных данных можно заключить, что в результате нагружения базальтопластиковых оболочек, подкрепленных стальным слоем, до окружных деформаций примерно 3,5 % не происходит недопустимого повреждения кольцевых слоев базальтопластика (потери работоспособности). Это позволяет ожидать сохранения достаточной несущей способности в замкнутых оболочках силового корпуса взрывозащитных контейнеров, в которых после действия импульсной взрывной нагрузки устанавливается достаточно высокое остаточное давление газов. Таким образом, деформацию примерно 3,5 % можно считать предельно безопасной для базальтопластика в составе трубчатых образцов со слоем стали. Для стеклопластика в аналогичных условиях предельная деформация трубчатых образцов со слоем стали составляет примерно 3,3 % [6], а при переходе к замкнутым цилиндрическим оболочкам с полусферическими днищами ее значение практически не уменьшается и составляет 3,1–3,5 % [1].

При повышенной нагрузке, разрушающей образец в первой стадии расширения, динамическая деформация разрыва базальтопластика составила 4,4–4,8 %, что близко к аналогичному значению для стеклопластика 4–5 %, определенному как на трубчатых образцах, так и на замкнутых моделях контейнеров [1, 2, 6]. Это значение можно интерпретировать как предельную деформируемость однонаправленных (кольцевых) слоев пакета в динамических условиях растяжения со скоростью деформации  $500\text{--}1000\text{ с}^{-1}$ . Как и в случае стеклопластика, она почти в два раза превышает статическую деформируемость.

Проведенные взрывные испытания трубчатых образцов из базальтопластика позволяют сделать следующие выводы.

1. Динамическая реакция оболочек при неразрушающей нагрузке подобна реакции оболочек из стеклопластика с близкой схемой армирования при сохранении в динамических условиях упругих свойств материала, определенных в статических испытаниях.

2. Предельная динамическая деформируемость и удельная прочность базальтопластиковых труб при внутреннем взрывном нагружении не меньше, чем для стеклопластиковых оболочек. Эти величины не меняются с увеличением размера образцов в два раза.

3. Рассмотренный композитный материал можно использовать в конструкциях силовых оболочек взрывозащитных контейнеров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванов А. Г., Федоренко А. Г.** Целесообразность применения композитных материалов для защитной оболочки АЭС // Атом. энергия. 1993. Т. 75, вып. 1. С. 45–48.
2. **Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г.** Влияние структуры армирования ориентированных стеклопластиков на прочность круговых цилиндрических оболочек при взрывном нагружении изнутри // Механика композит. материалов. 1991. № 4. С. 631–640.
3. **Цыпкин В. И., Русак В. Н., Иванов А. Г. и др.** Деформация и разрушение двухслойных металлопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Механика композит. материалов. 1987. № 5. С. 833–838.
4. **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.
5. **Дубовик А. С.** Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. М.: Наука, 1975.
6. **Иванов А. Г., Сырунин М. А., Федоренко А. Г.** Влияние структуры армирования на предельную деформируемость и прочность оболочек из ориентированного стеклопластика при взрывном нагружении изнутри // ПМТФ. 1992. № 4. С. 130–135.
7. **Труды ЦАГИ.** М., 1973. Вып. 1: Проектирование, расчет и испытание конструкций из композитных материалов. С. 143.
8. **Гуняев Г. М.** Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. М.: Химия, 1981.
9. **Горная энциклопедия** / Под ред. Е. А. Козловского. М.: Сов. энциклопедия, 1984. Т. 1.
10. **Бажанов В. Л., Гольденблат И. И., Копнов В. А. и др.** Сопротивление стеклопластиков. М.: Машиностроение, 1968.

*Поступила в редакцию 3/V 2001 г.*

---