

применения, для решения вопросов безопасной транспортировки ВВ в растворах, снижения взрывоопасности ряда химических производств, где в реакторах одновременно присутствуют окислители и горючее. Среди последних особое место занимают процессы нитрования азотной кислотой, которая образует детонационноспособные смеси с органическими соединениями.

Для систем 10, 11 (см. таблицу) приведены значения КП растворов азотной кислоты ($d_4^{20} = 1,510$, концентрация 99,5 %) с двумя горючими: хлористым метилом и уксусным ангидридом. Такие растворы достаточно широко используются для нитрования [9], причем, как правило, при соотношениях компонентов, обеспечивающих детонационную способность реакционной системы. Вместе с тем переход на недетонационноспособные нитрующие системы требует дополнительного комплексного изучения реакции нитрования, поскольку может быть связан, в частности, с замедлением скорости основного процесса и протеканием побочных реакций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 93-03-18460).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я.Б., Компанец А.С. Теория детонации. — М.: Гостехиздат, 1955.
2. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. — М.: Оборонгиз, 1960.
3. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. — М.: Недра, 1988.
4. Кондриков Б.Р., Райкова В.М. Пределы детонации взрывчатых растворов // ФГВ. — 1977. — 13, № 1. — С. 55—62.
5. Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С. и др. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
6. Дремин А.Н. Пульсирующий детонационный фронт // ФГВ. — 1983. — 19, № 4. — С. 159.
7. Еременко Л.Т., Нестеренко Д.А. // Детонация. — Черногловка: ОИХФ РАН, 1992.
8. Колесов В.П., Зенков И.Д. // Журн. физ. химии. — 1966. — 40. — С. 1378.
9. Топчиев А.В. Нитрование. — М.: Наука, 1965.

142432, Черногловка,
ИХФ РАН

Поступила в редакцию
23/XII 1994

УДК 620.172.25:546.821

*В.Н. Русак, В.А. Рыжанский, А.Г. Иванов,
С.Н. Заикин*

ВЗРЫВОСТОЙКОСТЬ СВАРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТИТАНОВЫХ ОБОЛОЧЕК

Приводятся результаты экспериментального исследования реакции на внутреннее взрывное нагружение сварных цилиндрических оболочек из титанового сплава ПТ-3В, заполненных воздухом или водой. Установлено, что при разрушении оболочек проявляется сильный масштабный эффект в виде резкого снижения взрывостойкости с увеличением размеров. Дана рекомендация по ослаблению влияния масштабного фактора и повышению взрывостойкости оболочек. Получены полуэмпирические формулы, которые рекомендованы для оценки параметров взрывной деформации оболочки цилиндрической взрывозащитной камеры из титанового сплава.

Для локализации взрывных процессов в замкнутом объеме широко применяются взрывозащитные камеры и контейнеры (ВЗК). Основным несущим элементом ВЗК является оболочка, для изготовления которой часто используются специальные стали, достаточно прочные, вязкие и пластичные. Данные факторы необходимы для диссипации энергии взрыва и, следовательно, обуславливают надежность ВЗК и экономичность по массе. С этой

© В.Н. Русак, В.А. Рыжанский, А.Г. Иванов, С.Н. Заикин, 1994.

Т а б л и ц а 1

Механические характеристики оболочек из сплава ПТ-3В

h, м	R ₀ , м	σ _{0,2} , МПа	σ _b , МПа	δ _s , %		Вид сварки	Место разрушения
				цельная	сварная		
0,005	0,10	630—660	720—750	17,0—18,5	12,4—14,0	Ручная	По металлу
0,016	1,00	560—580	630—640	13,5—20,0	—	“	По шву
0,025	0,20	530—600	600—610	14,0	4,6—5,0	“	То же
0,050	0,36	520	560—570	10,0—14,0	4,6—5,3	“	“
0,050	1,00	450—470	500—520	10,0—15,0	5,3—6,3	“	“
0,010	0,20	650—690	750—780	15,0—16,0	7,8—10,5	Автомат	По металлу
0,016	0,20	660—680	750—770	16,0	7,2—12,0	“	То же
0,025	0,20	630—680	750—780	13,0—15,0	5,8—11,5	“	“

П р и м е ч а н и е. R₀, h — внутренний радиус и толщина оболочки (длина 4R₀), σ_{0,2}, σ_b — пределы текучести и прочности, δ_s — относительное удлинение, характеризующее пластичность оболочки при статическом нагружении.

точки зрения перспективны также титановые сплавы, легкие и более прочные, чем стали.

Цель данного исследования — изучение взрывостойкости цилиндрических оболочек из титанового сплава ПТ-3В (ГОСТ 19807 — 74), используемого в несущих конструкциях многих объектов ответственного назначения. Оболочки сваривались встык из листов вручную или на автомате, без отжига. Их механические характеристики, полученные на стандартных цельных и сварных образцах-свидетелях, приведены в табл. 1. Толщина образца была равна толщине соответствующей оболочки.

Автоматическая сварка осуществлялась так называемой погруженной дугой за один проход независимо от толщины оболочки или образца, а ручная сварка — поверхностной дугой, причем 5-миллиметровые листы сваривались за один проход, а более толстые — за несколько. В отсутствие отжига это могло приводить к неоднородному напряженному состоянию по толщине и появлению остаточных напряжений в зоне шва; с увеличением толщины эта неоднородность могла усиливаться и дестабилизировать статическую пластичность оболочек, сваренных вручную, по сравнению с оболочками, сваренными на автомате. Однако по данным табл. 1 существенного влияния вида сварки на δ_s не обнаружено.

Постановка опытов. В центре оболочки (рис. 1), стоящей вертикально и заполненной воздухом или водой (при нормальных условиях), подрывали шаровой заряд из сплава тротила с гексогеном ТГ 50/50 или ТГ 40/60 (числа указывают массовое содержание компонентов). Плотность этих ВВ ρ_{ВВ} = 1650 и 1720 кг/м³, скорость детонации D = 7650 и 7900 м/с, теплота взрыва Q = 4,78 и 4,93 МДж/кг соответственно.

В опытах методами скоростной фотохронографии [1] и тензометрии регистрировали импульсное расширение и деформацию в центральном поперечном сечении оболочек (с относительной погрешностью соответственно не более 5 и 10 %), для чего их оснащали бифилярными (для компенсации электромагнитных наводок) тензодатчиками кольцевыми (конструкции [2]) и меридиональными (зигзаг-решетка с базой 50 мм). После опытов по заранее нанесенным меткам определяли остаточные дефор-

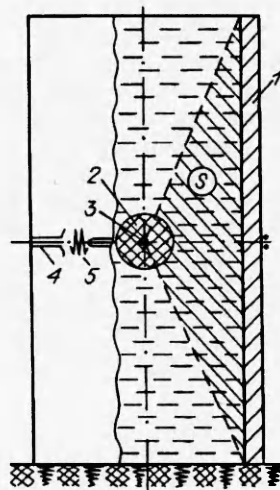


Рис. 1. Схема постановки опытов.

1 — оболочка; 2 — заряд ВВ; 3 — электродетонатор; 4 — кольцевой тензодатчик; 5 — меридиональный тензодатчик; S — сектор взрывного нагружения оболочки с водой.

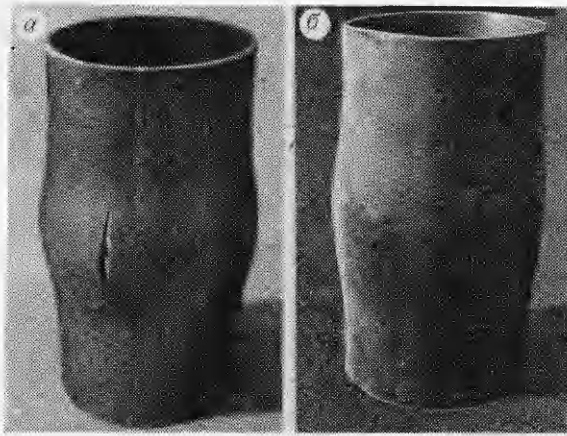


Рис. 2. Внешний вид оболочек после взрывного нагружения.
 а — при заполнении воздухом (опыт 9);
 б — при заполнении водой (опыт 10).

мации оболочек с относительной погрешностью не более 0,2 %. Появление сквозной трещины считалось разрушением оболочки, в противном случае ее нагружали повторно до разрушения.

Результаты эксперимента. Исходные данные и результаты опытов приведены в табл. 2, где m и r — масса и радиус заряда ВВ;

u_{\max} , ϵ_{\max} , t_{\max} — максимальные радиальная скорость и окружная относительная деформация оболочки и время ее достижения (от начала деформирования); $\epsilon_{\text{ост}}$ — остаточная окружная относительная деформация после серии нагружений (все данные для среднего поперечного сечения).

В результате взрыва оболочка принимала бочкообразную, практически осесимметричную форму (рис. 2). Это характерно для данной постановки опытов [3, 4], так как компактность заряда ВВ и его расположение в центре оболочки обуславливают наиболее интенсивное импульсное воздействие на ее ближайшую к заряду ВВ среднюю часть.

На реакцию оболочки существенно влияла заполняющая среда. Так, в опытах с водой возбужденные взрывом колебания оболочки затухали значительно быстрее, чем в опытах с воздухом: сказывалось демпфирующее влияние воды — среды существенно более плотной и менее сжимаемой (даже при взрыве), чем воздух. Этими же свойствами воды объясняется и более обширная зона пластической деформации (на всей длине), чем у оболочки с воздухом¹ (на длине $\sim 2R_0$), а также на порядок большие значения ϵ_{\max} в опытах с водой, чем с воздухом, при прочих равных условиях (см. табл. 2, опыты 1 и 10, 16 и 18, 23 и 25, 45 и 47, 52 и 53).

Как показано в [5], малая сжимаемость воды препятствует ее тангенциальному перетеканию, что обуславливает «секторное» действие взрыва, при котором оболочка нагружается в основном через воду в теле вращения сектора с вершиной в центре взрыва (см. рис. 1, сектор S). При воздействии же через воздух благодаря сильной сжимаемости его и продуктов детонации происходит их интенсивное перетекание. На удалении свыше R_0 от среднего сечения оболочки тангенциальные составляющие скоростей потоков резко возрастают, а нормальные соответственно падают. Такая осевая кумуляция взрыва приводит к существенному снижению эффективности его воздействия на края оболочки и соответственно к резкому уменьшению пластических деформаций в этих зонах.

Пластические деформации оболочек были растягивающими вдоль окружности с максимумом в среднем поперечном сечении (до 14 %), а меридиональные — преимущественно сжимающими (до 1 %), и после серии взрывов наблюдалось уменьшение длины, а в средней зоне — и толщины оболочек (на 2—8 %). Таким образом, общее деформирование оболочек происходило в состоянии, близком к одноосному (окружному) растяжению, при котором укорочение и утонение оболочки — результат пуассоновского сужения ее продольного сечения.

¹Эта особенность влияния заполняющей среды на деформацию цилиндрической оболочки ранее отмечена в [3].

Разрушение оболочек начиналось в средней, самой деформированной зоне с образованием продольных трещин вследствие окружного растяжения (см. рис. 2). Поверхности разрыва матового светло-серого цвета с мелкозернистой структурой, различимой при толщине 25 и 50 мм невооруженным глазом, наклонены к нормали под углом $\sim 45^\circ$ (разрушение типа «вязкий срез»).

Рассмотрим важную характеристику взрывостойкости оболочки — динамическую пластичность. Она характеризует способность оболочки диссипировать энергию взрыва и определяется разрушающей деформацией ϵ_p , которую можно оценить по данным табл. 2 (по сумме ϵ_{\max} в разрушающем опыте + $\epsilon_{\text{ост}}$ в предыдущем опыте). Полученные таким образом значения ϵ_p приведены в табл. 3 и, очевидно, практически не зависят от заполняющей среды и числа нагружений (как и у стальных оболочек [4]), но существенно зависят от размеров оболочки и сварки. Так, например, с увеличением h при $R_0 = \text{const}$ наблюдается тенденция к снижению ϵ_p (см. табл. 3, опыты 15, 17—19, 21, 22, 25, 29—31). Оболочки, сваренные вручную, при толщине 5 мм (однопроходная сварка) разрушались как по основному металлу (см. табл. 2, опыты 9 и 10), так и по сварному шву (опыт 14); при большей толщине оболочки разрушались только по шву. Оболочки, сваренные на автомате, разрушались, как правило, по основному металлу (кроме опытов 18 и 26, когда трещины возникли возле швов, в так называемых зонах термического влияния). Таким образом, замеченный переход места разрушения с основного металла на сварной шов (или его окрестность) показывает, что наряду с масштабным фактором на величину ϵ_p и локализацию трещин влияет также технологический фактор.

Для изучения влияния масштабного фактора требуются геометрически подобные объекты [6]. С этой точки зрения наиболее представительны опыты 11—14 и 54 (см. табл. 2), в которых изменение R_0 составило 10 раз при прочих почти равных условиях (отличие лишь в числе проходов при ручной сварке). В свете изложенного очевидно, что для исключения влияния технологического фактора необходимо, чтобы разрушение происходило вдали от сварного шва. К сожалению, указанные опыты не свободны от этого недостатка. Тем не менее рассмотрим их результаты.

В качестве характеристик взрывостойкости примем ϵ_p и параметр нагрузки $\xi = m/M$ (M — масса оболочки). Пусть критическое значение ξ есть ξ_0 ; при $\xi < \xi_0$ и $\epsilon < \epsilon_p$ оболочка не разрушается, а при $\xi > \xi_0$ и $\epsilon = \epsilon_p$ разрушается. Параметр ϵ_p , не зависящий от количества нагружений, оценивается по табл. 3 (опыты 11—14, 54). Значение ξ_0 можно непосредственно оценить лишь по данным опыта 54 (см. табл. 2), в котором оболочка разрушилась при однократном нагружении. По данным же опытов 11—14, в которых оболочка разрушилась после многократного нагружения, ξ_0 можно оценить с помощью полученной ниже формулы (11), используя в качестве ϵ_{\max} границы интервала ϵ_p из табл. 3 (опыты 11—14).

Результаты, приведенные на рис. 3, показывают, что при увеличении R_0 в 10 раз параметры ξ_0 и ϵ_p уменьшаются соответственно в ~ 4 и ~ 6 раз, т.е. взрывостойкость оболочки резко снижается, а это есть признак проявления сильного масштабного эффекта. Его природа (при разрушении по основному металлу) — энергетическая, что само по себе опасно [4, 6, 7], но в данном случае действие масштабного фактора, по-видимому, усилено влиянием технологического фактора. Надежно отделить это влияние по результатам данного исследования, к сожалению, не представляется возможным.

Взаимосвязь параметров нагрузки и деформации. Воспользуемся полуэмпирическим методом в постановке [3] и для упрощения задачи введем следующие предположения:

1) оболочка деформируется в результате ее одноосного растяжения. Это предположение, по существу, не противоречит эксперименту;

Таблица 2

Исходные данные и результаты опытов

Номер опыта	R_0 , м	h/R_0	Вид сварки	Заполненная среда	Номер нагружения	m , кг	r , м	v_{\max} м/с	ϵ_{\max} %	t_{\max} мкс	$\epsilon_{\text{ост}}$ %	Количество трещин, длина (в мм) и место
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0,1	0,050	Ручная	Воздух	1	0,0433	0,019	28,9	1,0	48	0,2	—
2	0,1	0,050	“	“	2	0,0435	0,019	26,1	0,9	47	0,3	—
3	0,1	0,050	“	“	3	0,0435	0,019	25,9	1,1	52	0,5	—
4	0,1	0,050	“	“	4	0,2063	0,031	132,4	11,5	163	10,2	—
5	0,1	0,050	“	“	5	0,0629	0,022	28,3	0,9	50	10,5	—
6	0,1	0,050	“	“	6	0,0618	0,022	27,6	1,0	53	10,5	—
7	0,1	0,050	“	“	7	0,0827	0,024	35,6	1,4	52	10,9	—
8	0,1	0,050	“	“	8	0,0625	0,022	31,2	1,1	52	10,9	—
9	0,1	0,050	“	“	9	0,1347	0,027	66,2	3,0	75	12,3	1 (135 по металлу)
10	0,1	0,050	“	Вода	1	0,0432	0,019	137,0	13,0	238	11,8	2 (90 и 137 по металлу)
11	0,1	0,050	“	“	1	0,0148	0,013	80,2	4,3	166	3,2	—
12	0,1	0,050	“	“	2	0,0142	0,013	73,9	4,2	163	6,0	—
13	0,1	0,050	“	“	3	0,0143	0,013	71,3	3,8	174	8,7	—
14	0,1	0,050	“	“	4	0,0147	0,013	77,4	2,6	66	10,4	1 (400 по шву)
15	0,2	0,050	Автомат	“	1	0,2820	0,035	142,4	13,0	474	11,0	—
16	0,2	0,050	“	Воздух	1	0,3320	0,036	26,2	0,8	87	0,2	—
17	0,2	0,050	“	“	2	0,3820	0,038	30,2	1,0	92	0,3	—
18	0,2	0,050	“	Вода	3	0,3320	0,036	145,3	13,9	514	13,1	1 (425 возле шва)
19	0,2	0,080	“	“	1	0,3820	0,038	121,5	8,5	363	7,2	—
20	0,2	0,080	“	Воздух	2	0,5030	0,042	19,6	0,6	89	7,2	—
21	0,2	0,080	“	Вода	3	0,1322	0,027	60,5	2,1	223	8,4	—
22	0,2	0,080	“	“	4	0,1351	0,027	59,1	2,3	245	9,4	2 (330 и 335 по металлу)
23	0,2	0,080	“	Воздух	1	0,4760	0,041	22,8	0,6	84	0,1	—
24	0,2	0,080	“	“	2	0,5832	0,044	22,2	0,8	94	0,2	—

25	0,2	0,080	"	Вода	3	0,4632	0,041	106,6	8,8	417	6,9	3 (340, 600, 800 по металлу)
26	0,2	0,080	"	"	1	0,5710	0,044	—	—	—	7,7	2(800 и 800 возле швов)
27	0,2	0,125	"	"	1	0,2910	0,035	77,9	3,2	177	2,8	—
28	0,2	0,125	"	"	2	0,2010	0,031	68,0	2,2	136	3,7	—
29	0,2	0,125	"	"	3	0,2910	0,035	88,2	2,9	153	5,8	—
30	0,2	0,125	"	"	4	0,2910	0,035	79,7	2,9	194	7,9	—
31	0,2	0,125	"	"	5	0,2450	0,033	75,7	2,0	98	8,6	2 (386 и 420 по металлу)
32	0,2	0,125	"	"	1	0,7670	0,048	—	—	—	7,7	2 (226 и 275 по металлу)
33	0,2	0,125	"	"	1	0,9210	0,051	164,0	9,4	200	7,0	4 (800 и 800 возле швов, 430 и 245 по металлу)
34	0,2	0,125	Ручная	"	1	0,4620	0,041	93,7	3,0	136	2,2	2 (800 и 800 по швам)
35	0,2	0,125	"	Воздух	1	0,7576	0,048	18,3	0,9	115	0,2	—
36	0,2	0,125	"	"	2	1,3360	0,058	30,7	1,2	118	0,5	—
37	0,20	0,125	"	"	3	1,3360	0,058	36,3	1,3	110	0,7	—
38	0,20	0,125	"	Вода	4	0,5843	0,044	105,2	5,6	170	1,9	2 (800 и 800 по швам)
39	0,20	0,125	"	—	1	0,7665	0,048	—	—	—	3,0	2 (800 и 800 по швам)
40	0,36	0,139	"	Воздух	1	3,0000	0,076	14,5	0,4	158	0,0	—
41	0,36	0,139	"	Вода	2	1,3320	0,058	58,2	2,5	298	1,7	—
42	0,36	0,139	"	"	3	1,3350	0,058	56,4	2,3	304	3,2	—
43	0,36	0,139	"	"	4	0,9840	0,052	49,3	1,7	283	4,0	—
44	0,36	0,139	"	"	5	0,9850	0,052	48,3	1,9	440	4,7	2 (560 и 610 по швам)
45	0,36	0,139	"	Воздух	1	2,6665	0,073	12,1	0,4	141	0,0	—
46	0,36	0,139	"	"	2	4,5020	0,088	32,3	0,6	161	0,0	—
47	0,36	0,139	"	Вода	3	2,1800	0,068	77,0	3,8	333	3,1	2 (90 и 350 по швам)
48	0,36	0,139	"	Воздух	4	4,1020	0,086	20,6	0,6	187	3,1	3 (10, 90, 530 по швам)
49	1,00	0,016	"	Вода	1	3,7000	0,081	—	2,7	833	1,3	1 (4000 по шву)
50	1,00	0,050	"	Воздух	1	21,0580	0,144	20,8	0,5	466	0,0	—
51	1,00	0,050	"	"	2	25,9600	0,155	24,5	0,7	407	0,00	—
52	1,00	0,050	"	"	3	10,4110	0,114	13,9	0,3	417	0,0	—

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
53	1,00	0,050	"	Вода	4	10,3700	0,114	68,8	1,2	200	0,0	3 (4000, 4000, 4000 по швам)
54	1,00	0,050	"	"	1	7,6540	0,103	51,5	1,9	1103	0,6	2 (4000 и 4000 по швам)

Примечание. В опытах 1—49 использовалась ВВ марки ТГ 50/50, в остальных опытах — ТГ 40/60; прочерк означает отсутствие трещин.

2) в начальный момент времени оболочка мгновенно получает скорость v_{\max} , после чего плавно расширяется по инерции в течение времени t_{\max} и тормозится за счет действия внутренних усилий до остановки при деформации ϵ_{\max} . Фактически, конечно, значение v_{\max} сообщается оболочке не мгновенно (особенно при заполнении воздухом), а в течение некоторого, хотя и достаточно короткого (по сравнению с t_{\max}), промежутка времени и деформация оболочки с водой протекает не плавно, а с относительно небольшой пульсацией вследствие воздействия ударных импульсов, циркулирующих в воде [8, с. 560—562];

3) при скоростном деформировании материал оболочки ведет себя как несжимаемое жестковязкопластическое тело с пределом текучести, зависящим от скорости деформации. Использование такой модели возможно для большинства металлов, в том числе и для титановых сплавов [9].

После детонации ВВ сферическая ударная волна (УВ) в среде, заполняющей оболочку, обладает удельным (на единицу поверхности) импульсом I . Пусть связь между I и кинетической энергией, сообщенной единице объема оболочки (плотность $\rho \approx 4500$ кг/м³), дается соотношением

$$\rho h v_{\max}^2 \sim I^2 / (\rho h). \quad (1)$$

Для УВ в воздухе [8]

$$I \sim m D (1 + \rho_a R_{УВ}^3 / \rho_{ВВ} / r^3)^{1/2} R_{УВ}^2 \quad (2)$$

при $R_{УВ} / r \leq 10 + 15$. Здесь $R_{УВ}$ — радиус фронта УВ; $\rho_a \approx 1,3$ кг/м³ — плотность воздуха. Для УВ в воде (в акустическом приближении) [10]

$$I \sim m^{2/3} / R_{УВ}. \quad (3)$$

В начале воздействия на оболочку $R_{УВ} = R_0$. Учитывая, что $h \ll R_0$, принимаем

$$\xi \approx m / (8\pi \rho R_0^2 h). \quad (4)$$

Из (1)—(3) следует

$$v_{\max} = F(\xi, R_0, h) I / (\rho h), \quad (5)$$

где $F(\xi, R_0, h)$ — эмпирическая функция.

Полученная оболочкой кинетическая энергия расходуется на работу по преодолению внутренних усилий при деформации в пределах $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{\max}$:

$$\rho v_{\max}^2 / 2 = \sigma_{0,2} \epsilon_{\max} F_1(\xi, R_0, h), \quad (6)$$

$F_1(\xi, R_0, h)$ — эмпирическая функция.

Обработав часть данных табл. 2 (опыты 1, 16, 23, 35, 40, 45, 50) методом наименьших квадратов, с учетом формул (1)—(6), получаем для оболочек с воздухом:

$$v_{\max}(m) \approx 3 \cdot 10^{-5} D [(1 + \rho_a R_0^3 / \rho_{ВВ} / r^3) m / R_0]^{1/2} / h, \quad (7)$$

$$\epsilon_{\max}(\xi) \approx 6,9 \cdot 10^{-3} D^2 \xi^{4/3} (1 + \rho_a R_0^3 / \rho_{ВВ} / r^3) / \sigma_{0,2} \quad (8)$$

или

$$\epsilon_{\max}(m) \approx 1,26 \cdot 10^{-9} D^2 m^{4/3} (1 + \rho_a R_0^3 / \rho_{ВВ} / r^3) / [\sigma_{0,2} R_0^4 (h / R_0)^{4/3}]. \quad (9)$$

Т а б л и ц а 3

Разрушающая деформация оболочек

Номера опытов	h/R_0 , м/м	Среда	Вид сварки	ε_p , %
7—9	0,005/0,10	Воздух	Ручная	$12,0 < \varepsilon_p < 13,9$
11—14	0,005/0,10	Вода	"	$9,8 < \varepsilon_p < 11,3$
15, 17, 18	0,010/0,20	"	Автомат	$13,0 < \varepsilon_p < 14,2$
19, 21, 22	0,016/0,20	"	"	$9,3 < \varepsilon_p < 10,7$
25	0,016/0,20	"	"	$< 9,0$
29—31	0,025/0,20	"	"	$8,7 < \varepsilon_p < 9,9$
42—44	0,05/0,36	"	Ручная	$4,9 < \varepsilon_p < 5,9$
47	0,05/0,36	"	"	$< 3,8$
49	0,016/1,00	"	"	$< 2,7$
50—53	0,050/1,00	Воздух — вода	"	$0,7 < \varepsilon_p < 1,2$
54	0,050/1,00	Вода	"	$< 1,9$

Аналогично обработав данные опытов 11, 15, 19, 27, 41, получаем для оболочек с водой:

$$v_{\max}(m) \approx 1,37m^{2/3} / [R_0^2(h/R)^{3/4}], \quad (10)$$

$$\varepsilon_{\max}(\xi) \approx 1,165 \cdot 10^6 \xi / [\sigma_{0,2}(h/R_0)^{1/6} \exp(7,12h/R_0)] \quad (11)$$

или

$$\varepsilon_{\max}(m) \approx 10,3m / [\sigma_{0,2} R_0^3 (h/R_0)^{7/6} \exp(7,12h/R_0)]. \quad (12)$$

Следует иметь в виду, что формулы (10)—(12) пригодны только для ТГ 50/50, так как в использованную здесь формулу Коула (3) параметры $\rho_{ВВ}$, D и Q , обуславливающие мощность ВВ, в явном виде не входят. Поэтому при использовании иного ВВ следует от его массы (m_x) перейти к эквивалентной (по энергии и ударному импульсу) массе ТГ 50/50 ($m_{ТГ}$), используя формулу, вытекающую в акустическом приближении из [8]:

$$m_{ТГ} = m_x Q_x / Q_{ТГ}, \quad (13)$$

где $Q_{ТГ}$ и Q_x — теплоты взрыва ТГ 50/50 и иного ВВ. Размерности исходных данных и параметров в формулах (7)—(12) те же, что в табл. 1, 2 и тексте. Расчетные значения v_{\max} и ε_{\max} удовлетворительно согласуются с экспериментальными при однократном нагружении (без разрушения).

Итак, при разрушении оболочки проявляется сильный масштабный эффект в виде резкого снижения ее взрывостойкости с увеличением размеров. Игнорировать это вряд ли допустимо, так как, например, при проектировании крупномасштабных конструкций из данного материала проектные запасы прочности могут быть завышены против фактических. Ослаблению масштабного эффекта, несомненно, способствовало бы улучшение качества сварки и применение отжига.

Формулы (7)—(12) верны при $5 \leq h/R_0 \leq 14$ % и по крайней мере в этих

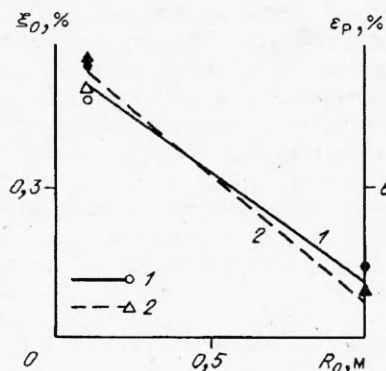


Рис. 3. Влияние масштабного фактора на взрывостойкость оболочки.

1 — зависимость $\xi_0(R_0)$, 2 — зависимость $\xi_p(R_0)$; темные точки — разрушение; светлые — нет разрушения.

пределах могут пригодиться при проектировании титановой ВЗК или для априорной оценки $v_{\max}(m)$ и $\epsilon_{\max}(m)$ эксплуатируемой титановой ВЗК. Прогнозировать разрушение эти формулы не позволяют, поскольку они получены без учета критерия разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубовик А.С. Фотографическая регистрация быстротекущих процессов. — М.: Наука, 1975. — С. 63—68.
2. Шитов А.Т., Минеев В.Н., Клещевников О.А. и др. Проволочный датчик для непрерывной регистрации больших деформаций при динамическом нагружении конструкций // ФГВ. — 1976. — 2, № 2. — С. 304—307.
3. Proctor J.F. Exp. Mech. — 1970. — 10, № 11. — P. 458—466.
4. Цыпкин В.И., Иванов А.Г., Минеев В.Н. и др. // Атомная энергия. — 1976. — 41, вып. 5. — С. 303—308.
5. Ryzhanski V.A., Ivanov A.G., Timonin L.V. // Proc. of X Int. Conf. HERF-89. September 18—22, 1989, Ljubljana, Yugoslavia. — P. 246—255.
6. Иванов А.Г., Минеев В.Н. О масштабных эффектах при разрушении // ФГВ. — 1979. — 15, № 5. — С. 70—95.
7. Иванов А.Г., Рыжанский В.А., Цыпкин В.И. и др. Экспериментальное исследование влияния масштаба на прочность котла высокого давления при внутреннем взрывном нагружении // ФГВ. — 1981. — 17, № 3. — С. 102—108.
8. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича. — М.: Наука, 1975.
9. Рыжанский В.А., Минеев В.Н., Герман В.Н. и др. // Изв. АН СССР. Металлы. — 1978. — № 5. — С. 139—141.
10. Коул Р. Подводные взрывы. — М.: Иностранная литература, 1950.

607200, г. Арзамас-16,
ВНИИЭФ

Поступила в редакцию 12/VIII 1993,
после доработки — 22/X 1993

УДК 620.178.7:620.179.4

*В.К. Голубев, К.Г. Рабинович, В.П. Белова,
Л.М. Морозова*

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ОБРАЗЦОВ С МЕДНЫМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ВЗРЫВОМ ЛИСТОВОГО ЗАРЯДА ВВ

Представлены результаты исследования разрушения образцов из низкоуглеродистой стали и меди с нанесенным гальваническим медным покрытием при их нагружении взрывом листового заряда ВВ. Полученные результаты по определению динамической адгезионной прочности медного покрытия на стали и откольной прочности стали и меди приведены в виде зависимостей критического отрицательного давления в месте начала разрушения от градиента давления в растягивающем импульсе. С помощью методов металлографического и автоматизированного количественного анализа получены результаты по характеру поврежденности образцов.

Защитные покрытия используются для предохранения элементов конструкций от механических, физических и химических воздействий. В связи с этим весьма актуальна проблема динамической адгезионной прочности покрытий при воздействии кратковременных импульсных механических нагрузок. Для определения динамической прочности соединения разнородных материалов в [1] предложен и реализован способ, в котором образец, состоящий из двух слоев, нагружается ударом пластины; приведены результаты по динамической прочности полученного методом прокатки соединения слоев из стали и алюминия толщиной не менее 4 мм. В работе [2] для нахождения динамической адгезионной прочности тонких покрытий используется кратковременный механический импульс в системе подложка — покрытие, возбуждаемый импульсным лазерным излучением либо электрон-

© В.К. Голубев, К.Г. Рабинович, В.П. Белова, Л.М. Морозова, 1994.