

УДК 623.61.66

РЕАКЦИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ СТАЛИ МАРОК 09Г2С И 10ХСНД С ПРОДОЛЬНЫМИ И КОЛЬЦЕВЫМИ СВАРНЫМИ ШВАМИ НА ВЗРЫВНОЕ НАГРУЖЕНИЕ

К. В. Ерофеев, В. А. Огородников, М. А. Сырунин, Д. В. Ханин

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, postmaster@ifv.vniief.ru

При создании взрывозащитных камер больших размеров используют цилиндрические оболочки, изготовленные из листопроката путем вальцевания и сварки с выполнением продольных и кольцевых швов. При этом часто возникает вопрос о выборе марки стали с повышенными значениями прочности или пластичности. В связи с этим в данной работе приведены результаты исследования реакции таких оболочек из стали марок 10ХСНД и 09Г2С на динамическое нагружение.

Ключевые слова: прочность, пластичность, стальные цилиндрические оболочки, взрывное нагружение, деформация, разрушение.

DOI 10.15372/FGV20200612

ВВЕДЕНИЕ

Взрывозащитные камеры с различными массово-габаритными характеристиками проектируются и используются в качестве защитных конструкций однократного и многократного применения, способных герметично локализовать в своем объеме продукты взрыва и осколки исследуемого объекта [1]. Созданный в РФЯЦ-ВНИИЭФ ряд взрывозащитных конструкций для испытания объектов с массой заряда взрывчатого вещества (ВВ) до 60 кг тротилового эквивалента (ТЭ) имеет цилиндрический корпус с наружным диаметром оболочек до 2 м, плоские или сфероидальные днища, в которых располагается загрузочная горловина, закрываемая прочной крышкой [2–4].

Основным несущим элементом взрывозащитной камеры является силовой корпус в виде цилиндрической оболочки, который выполняется из листовой стали после вальцевания и сварки. Наряду с продольными сварными швами, иногда приходится выполнять и кольцевые сварные швы. Взрывозащитные камеры проектируются таким образом, чтобы в наиболее нагруженных зонах силового корпуса его материал при действии высокоинтенсивной и неравномерно распределенной динамической нагрузки работал преимущественно в области упру-

гих или незначительных пластических деформаций, так как иначе для этих транспортабельных конструкций не удастся получить приемлемые массово-габаритные характеристики [5]. При изготовлении цилиндрической оболочки (корпуса взрывозащитной камеры) используют углеродистые или низколегированные стали (например, сталь 20, 09Г2С), поскольку они имеют высокие механические характеристики и сохраняют прочность при работе в области упругопластических деформаций. Так как процессы нагружения и реакции камеры на это нагружение носят динамический характер, устанавливаемые уровни допустимых пластических деформаций материала в отдельных, наиболее нагруженных зонах ее корпуса не должны превышать подтвержденные экспериментально уровни «неразрушающих» деформаций (напряжений), которые примерно на порядок ниже «предельных» (близких к разрушающим) значений. Для указанных выше сталей эти деформации не более $1 \div 2$ %, тогда как их «предельные» уровни составляют $13 \div 15$ % [6]. При этом даже при таких значениях уже не исключена вероятность хрупкого разрушения. Поэтому для повышения несущей способности и надежности взрывозащитной камеры необходимо применять стали с более высокими механическими характеристиками и проводить надежную диагностику качества материала.

В данной работе представлены резуль-

Таблица 1
Механические свойства исследуемых сталей

Марка стали	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	КСУ, Дж/см ²	
				-40 °С	+20 °С
09Г2С	365 ÷ 385	510	27 ÷ 32	325 ÷ 350	370 ÷ 394
10ХСНД	490 ÷ 520	610	23	220 ÷ 260	230 ÷ 265

таты сравнительных экспериментальных исследований реакции цилиндрических оболочек из стали 09Г2С, уже использовавшейся ранее для изготовления внутренней обечайки взрывозащитной камеры, и из легированной стали 10ХСНД, которая предлагается для замены. Сталь 10ХСНД имеет более высокие прочностные, но меньшие пластические характеристики, чем сталь 09Г2С, при взрывных нагрузках разного уровня. Кроме того, приведены сравнительные результаты по влиянию вида сварного шва (продольного и кольцевого) на реакцию оболочек при взрывном нагружении.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектами исследования являлись цилиндрические оболочки из стали марок 09Г2С и 10ХСНД, имеющие размеры: диаметр 850 мм, толщина стенки 25 мм, высота 1200 мм, масса ≈ 770 кг, изготовленные из листопроката методом вальцевания и сварки. Оболочки выполняли в двух вариантах: цельная с продольным сварным швом (далее образец 1 — сталь 09Г2С, образец 3 — сталь 10ХСНД) и составная, из двух частей с продольным сварным швом длиной по 600 мм каждая, сваренных между собой кольцевым швом (далее образец 2 — сталь 09Г2С, образец 4 — сталь 10ХСНД).

В табл. 1, согласно [7], приведены механические свойства сталей 09Г2С и 10ХСНД: σ_T — предел текучести, σ_B — предел прочности, δ — относительное удлинение, КСУ — ударная вязкость.

Динамические нагрузки на оболочку создавали за счет взрыва сферического заряда ВВ с энерговыделением в ее внутренней полости. Каждую оболочку изначально нагружали зарядами ВВ массой 5.7 кг ТЭ, затем образцы 1 и 3 испытывали повторно при массе заряда ВВ $M_{ВВ} = 10.7$ кг ТЭ, а образцы 2 и 4 — при $M_{ВВ} = 24.3$ кг ТЭ. Заряд ВВ устанавли-

вали в геометрическом центре оболочки, за исключением повторного нагружения образцов 2 и 4, где заряд ВВ устанавливали со смещением от центрального сечения вдоль оси оболочки на 175 мм (для минимизации влияния эффекта «упрочнения»). Заряд ВВ инициировали электродетонатором из геометрического центра. На рис. 1 приведены схема постановки экспериментов и общий вид оболочки перед испытанием.

На рис. 2 представлены фотографии оболочек из стали 09Г2С (верхний ряд) и стали 10ХСНД (нижний ряд) после нагружения зарядами ВВ массой 5.7 (рис. 2,а), 10.7 (рис. 2,б) и 24.3 кг ТЭ (рис. 2,в).

При испытании оболочек с помощью тензометрирования, скоростной фотохронографии, скоростной видеосъемки [8] регистрировали параметры, характеризующие их динамическую реакцию: окружную и продольную деформации, а также радиальное смещение наружной поверхности оболочки в сечении, совпадающем с центром заряда.

По данным измерения длины окружности в разных сечениях до и после опытов вычисляли среднюю остаточную (пластическую) окружную деформацию оболочек: $\varepsilon_{ост} = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100$ %, где L_0 — исходная длина окружности, L — длина окружности после опыта. Локальные остаточные окружные деформации находили аналогично по результатам измерения удлинений между точками координатной сетки, нанесенной на наружную поверхность оболочки с одинаковым шагом между точками.

Исходные данные и результаты опытов приведены в табл. 2: $\varepsilon_{max}^{окр}$ — максимальная окружная деформация в сечении, совпадающем с центром заряда ВВ, $\varepsilon_{ост}^{окр}$ — остаточная окружная деформация в том же сечении, $\varepsilon_{max}^{пр}$ — максимальная продольная деформация в том же сечении, ε' — скорость деформации, ΔR_{max} — максимальное радиальное смещение наружной поверхности оболочки в сечении, сов-

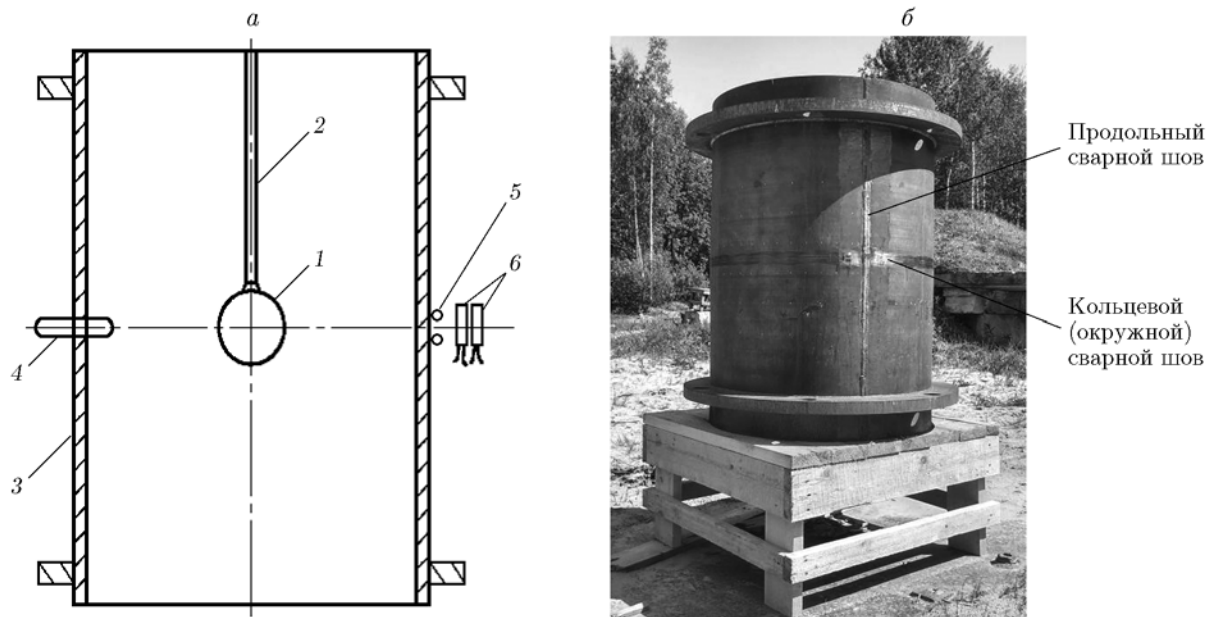


Рис. 1. Схема постановки экспериментов (а) и фотография оболочки перед испытанием (б):
 1 — заряд ВВ, 2 — подвес, 3 — стальная оболочка, 4 — область скоростной щелевой фоторегистрации радиального смещения оболочки, 5 — окружные тензодатчики с базой $2\pi R$, 6 — продольные и окружные тензодатчики КФ-5 с базой 20 мм и LY-11-10/350

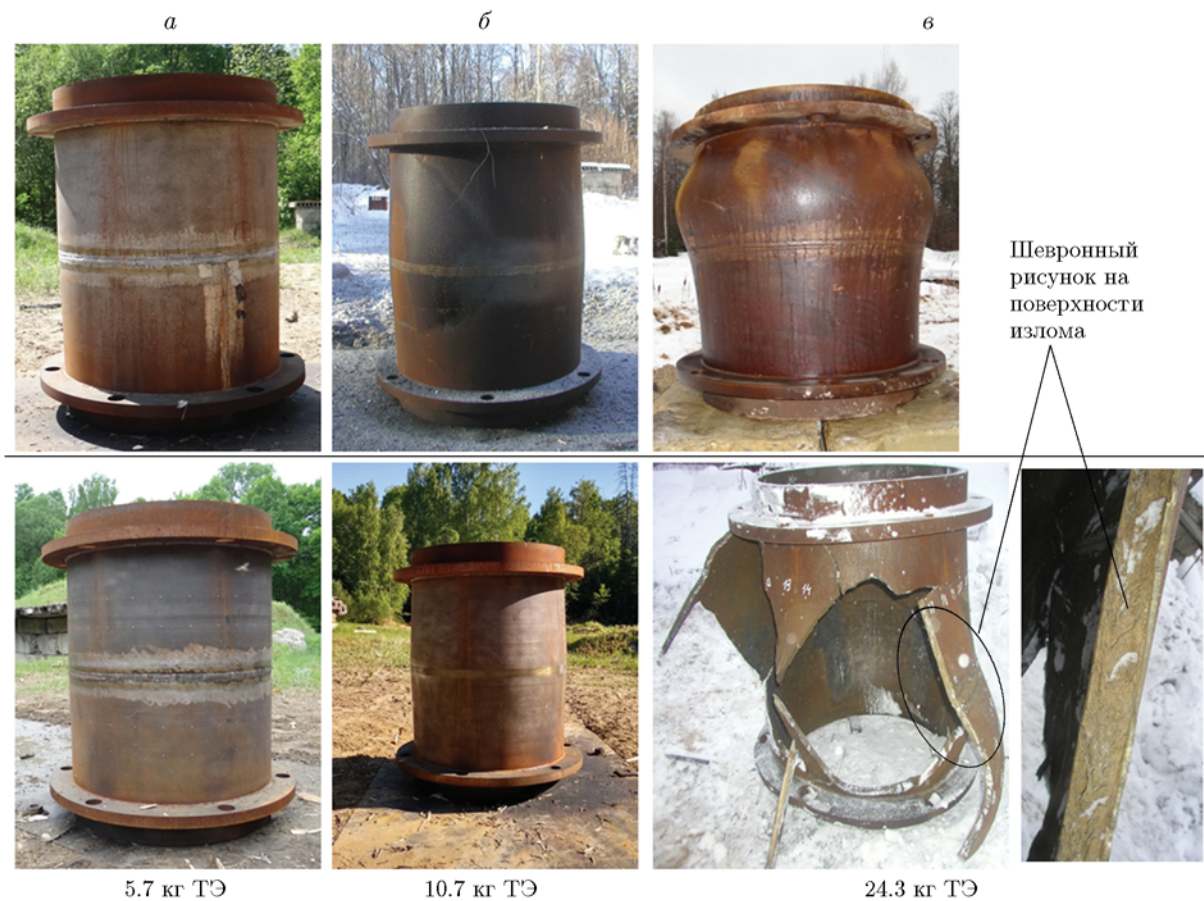


Рис. 2. Фотографии постопытного состояния оболочек

Таблица 2

Исходные данные и результаты опытов

Номер опыта	Марка стали	Масса ВВ, кг ТЭ	$\varepsilon_{\max}^{\text{окр}}, \%$	$\varepsilon_{\text{ост}}^{\text{окр}}, \%$	$\varepsilon_{\max}^{\text{пр}}, \%$	$\varepsilon', \text{с}^{-1}$	$\Delta R_{\max}, \text{мм}$
1	09Г2С	5.7	1.4 ÷ 1.6	1.0	0.6	55	5.8
2		10.7	3.3	3.1	—	95	14.1
3	09Г2С (с кольцевым швом)	5.7	1.2 ÷ 1.5	0.9	0.3	50	5.0
4		24.3	≈ 23	22.1	—	275	93.1
5	10ХСНД	5.7	1.3 ÷ 1.4	1.0	0.6	55	5.7
6		10.7	2.7	2.4	—	85	11.6
7	10ХСНД (с кольцевым швом)	5.7	1.0 ÷ 1.1	0.7	0.3	55	4.5
8*		24.3	≈ 20	19.8	—	250	84.7

*Оболочка разрушилась.

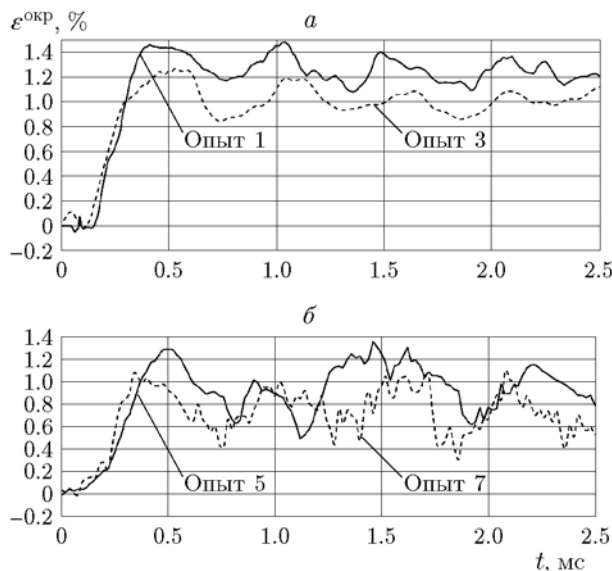


Рис. 3. Зависимости $\varepsilon^{\text{окр}}(t)$ для оболочек из стали 09Г2С (а) и 10ХСНД (б) при нагрузке 5.7 кг ТЭ

падающем с центром заряда ВВ.

На рис. 3 представлены зависимости окружной деформации от времени $\varepsilon^{\text{окр}}(t)$ в центральном сечении оболочек из стали марок 09Г2С и 10ХСНД при нагрузке 5.7 кг ТЭ, полученные с использованием данных тензометрирования.

На рис. 4 для образцов 1 и 3, испытанных при нагрузках 5.7 и 10.7 кг ТЭ, приведены зависимости $\varepsilon^{\text{окр}}(t)$, полученные пересчетом зависимостей радиальных смещений наружной поверхности оболочки от времени $\Delta R(t)$. При обработке фотохронограмм радиальных сме-

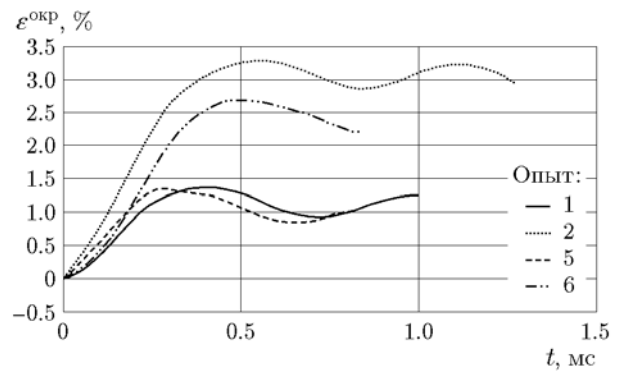


Рис. 4. Зависимости $\varepsilon^{\text{окр}}(t)$ для образцов 1 и 3

щений текущая окружная деформация оболочки вычислялась по формуле $\varepsilon(t) = \frac{\Delta R(t)}{R_0} \cdot 100 \%$, где R_0 — начальный наружный радиус оболочки, ΔR — текущее радиальное смещение наружной поверхности оболочки в регистрируемом сечении. Графики показывают возрастающее влияние на величину $\varepsilon^{\text{окр}}(t)$ более высокой пластичности стали 09Г2С по сравнению со сталью 10ХСНД в экспериментах с одинаковыми типами сварных швов.

На рис. 5 в полярной системе координат построено распределение локальных остаточных окружных деформаций в центральном сечении оболочек (образцы 1, 3) при $M_{\text{ВВ}} = 5.7$ и 10.7 кг ТЭ. Из этих данных следует, что при средней деформации ≈ 1.5 и 3 % локальные деформации могут отличаться на ± 0.5 и 1 % соответственно.

Распределение средних остаточных деформаций по образующей оболочек в опытах с на-

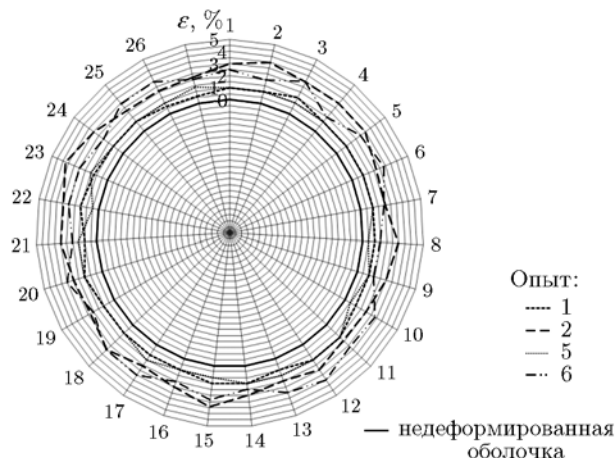


Рис. 5. Локальные остаточные деформации центрального сечения оболочек

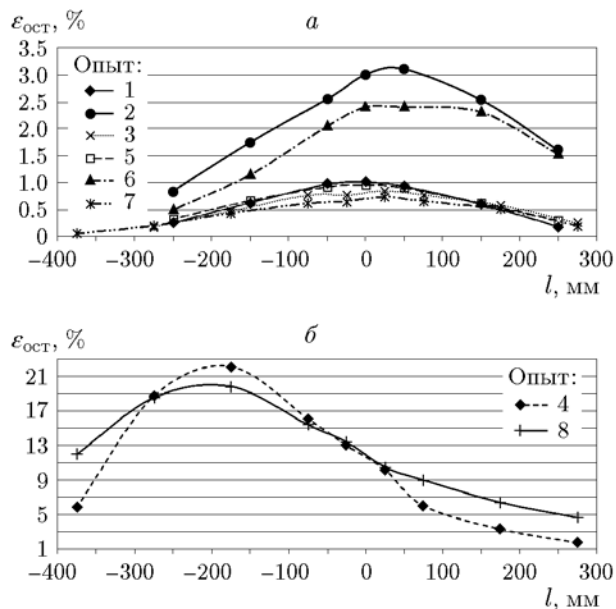


Рис. 6. Распределение средней остаточной деформации по образующей оболочек во всех опытах:

a — при нагрузке 5.7 и 10.7 кг ТЭ, *б* — при нагрузке 24.3 кг ТЭ

грузками 5.7 и 10.7 кг ТЭ показано на рис. 6, *a*, а с нагрузкой в 24.3 кг ТЭ — на рис. 6, *б*, где *l* — расстояние от центрального сечения оболочки.

Из характера деформирования оболочки вдоль образующей следует, что при ее нагружении взрывом сферического заряда ВВ наибольшую нагрузку получает зона оболочки длиной $\approx R$, что согласуется с результатами ранее проведенных экспериментальных ис-

следований деформирования и разрушения цилиндрических оболочек при взрывном нагружении [5].

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

При уровнях нагрузки 5.7 и 10.7 кг ТЭ в процессе реакции оболочки упругопластически деформируются без разрушения. Из характерного вида зависимостей $\varepsilon^{\text{окр}}(t)$ (см. рис. 3, 4) следует, что максимальные деформации оболочка получает вследствие радиального расширения, после чего совершает несколько упругих колебаний, постепенно затухающих во времени с периодом основного тона $\approx 0.6 \div 0.7$ мс. При нагрузке 24.3 кг ТЭ оболочка из стали 09Г2С не разрушилась, а оболочка из стали 10ХСНД разрушилась «катастрофически». На стадии радиального расширения оболочки в ее стенках образовались магистральные трещины, что привело к расхождению поверхностей изломов, образованию нескольких фрагментов (лепестков) и их полному или частичному отделению от оболочки.

При одинаковой взрывной нагрузке значения максимальных и остаточных окружных деформаций для оболочек из менее прочной, но более пластичной стали 09Г2С выше, чем у оболочек из стали 10ХСНД (см. рис. 3, 4). При нагрузках 5.7, 10.7 и 24.3 кг ТЭ отличия в уровнях деформаций ($\Delta\varepsilon$) составляют около 0.2, 0.6, 2.3 % (для опытов 4 и 8 в табл. 2 сравнение только по остаточным деформациям) соответственно, что не противоречит статическим пластическим характеристикам этих материалов, которые у стали 09Г2С выше (см. табл. 1).

Из зависимостей на рис. 3 видно, что при нагрузке 5.7 кг ТЭ наличие кольцевого шва в центральном сечении оболочки приводит к снижению максимальной динамической и остаточной деформации для оболочек как из стали 09Г2С, так и из стали 10ХСНД примерно на 0.2 %, т. е. их жесткость увеличивается.

В опыте с нагрузкой 24.3 кг ТЭ произошло разрушение оболочки из стали 10ХСНД при уровне окружных деформаций ≈ 20 %. В зоне с максимальной пластической деформацией зародились, по крайней мере, три продольные трещины, которые распространялись в разные стороны. О направлении распространения трещин можно судить по образовавшемуся шевронному рисунку на поверхности излома (см. рис. 2). По мере распространения

трещин к торцам оболочки менялась траектория их движения. За счет соединения двух соседних трещин в верхней и нижней частях оболочки произошло полное отделение от нее двух фрагментов. По проведенным обмерам за счет пластического деформирования стенки оболочки утонились: минимальная толщина стенки в сечении расположения центра заряда ВВ составила $h_{\min} = 22$ мм, по мере удаления к торцам средняя толщина стенки по границе излома $23 \div 24$ мм (при начальной толщине $h_0 = 25$ мм). Полученное утонение свидетельствует о вязкопластическом характере деформирования и хрупком характере разрушения, что подтверждается специфическим видом поверхности излома. При такой же нагрузке оболочка из стали 09Г2С пластически деформировалась до ≈ 23 % и не разрушилась.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При одинаковых взрывных нагрузках 5.7, 10.7 и 24.3 кг ТЭ оболочки из менее прочной, но более пластичной стали 09Г2С испытывают большие окружные деформации по сравнению со сталью 10ХСНД на 0.2, 0.6 и 2.3 % соответственно, что не противоречит статическим пластическим характеристикам этих материалов.

2. При одинаковых взрывных нагрузках наличие кольцевого шва в центральном сечении оболочек приводит к снижению величины максимальной динамической и остаточной деформации для оболочек как из стали 09Г2С, так и из стали 10ХСНД соответственно на ≈ 0.2 и 0.3 %, т. е. их жесткость увеличивается.

3. Взрывная нагрузка 24.3 кг ТЭ приводит к «катастрофическому» разрушению оболочки из стали 10ХСНД при деформации ≈ 20 % и не приводит к разрушению оболочки из более пластичной стали 09Г2С при реализовавшейся пластической деформации ≈ 22 %, т. е. опреде-

ляющую роль в несущей способности оболочки играют в первую очередь пластические, а не прочностные характеристики ее материала.

4. В качестве силового контура взрывозащитной камеры предпочтительнее использовать более пластичные стали, например сталь 09Г2С, вместо более прочной стали, например 10ХСНД.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сырунин М. А., Огородников В. А. Взрывозащитные камеры для исследований гидродинамических процессов и взрывных технологий // XV Харитоновские тематические научные чтения. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 765–773.
2. Белозеров Б. В., Долбищев С. Ф., Рождественский Б. Ф. Взрывозащитная камера: пат. РФ 2228515, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 06.05.2002.
3. Белозеров Б. В., Долбищев С. Ф., Романов В. И. Взрывозащитная камера: пат. РФ 2273821, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 30.08.2004.
4. Сырунин М. А., Вишневецкий Е. Д., Чернов В. А. Взрывозащитная камера: пат. РФ 2524064, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 09.04.2013.
5. Иванов А. Г. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
6. Иванов А. Г., Минаев В. Н., Цыпкин В. И., Кочкин Л. И., Васильев Л. В., Клещевников О. А. Пластичность, разрушение и масштабный эффект при взрывном нагружении стальных труб // Физика горения и взрыва. — 1974. — Т. 10, № 4. — С. 603–607.
7. Зубченко А. С., Колосков М. М., Каширский Ю. В. Марочник сталей и сплавов / под общей ред. А. С. Зубченко. — 2-е изд., доп. и испр. — М.: Машиностроение, 2003.
8. Медведев О. В., Егорычев Ю. Н., Миرون Д. С. Методики измерений, применяемые при экспериментальной отработке и эксплуатации взрывозащитных камер // XV Харитоновские тематические научные чтения. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. — С. 785–790.

Поступила в редакцию 25.10.2019.

Принята к публикации 19.02.2020.