

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ДВУХКОНТУРНОЙ ВЗРЫВОЗАЩИТНОЙ КАМЕРЫ С РАДИОГРАФИЧЕСКИМИ ОКНАМИ

Д. В. Ханин, М. А. Сырунин, В. А. Чернов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В составе разрабатываемого на базе синхротрона У-70 протонного радиографического комплекса (ПРГК) для исследования быстропротекающих процессов предусматривается проведение гидродинамических экспериментов с использованием взрывозащитных камер (ВЗК). ВЗК является основным элементом инженерного комплекса экологической безопасности, техническим средством защиты сооружений и оборудования ПРГК от воздействия поражающих факторов взрыва исследуемых образцов.

Взрывозащитная камера является первым защитным контуром ПРГК и должна обеспечивать надежную локализацию продуктов взрыва и осколков при проведении в ней экспериментов с образцами, содержащими взрывчатые вещества (ВВ). Поскольку стальные стенки взрывной камеры ослабляют радиографическое излучение, было предложено ввести в конструкцию ВЗК радиографические окна, которые позволяют ослабить данный эффект, влияющий на качество регистрируемого изображения. В работе [1] были проведены экспериментальные исследования конструктивных элементов радиографических окон для взрывозащитной камеры и выбран алюминиевый сплав АМц, как наиболее оптимальный для крышек, используемых в ВЗК. Для снижения динамической нагрузки на крышки радиографических окон в составе ВЗК используют специально разработанные устройства-расширители, которые уменьшают импульсное воздействие на крышки от взрыва ВВ [2]. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования динамической прочности центральной части двухконтурной ВЗК с радиографическими окнами, выполненными из сплава АМц, и проставками-расширителями.

Схема экспериментального макета центральной части ВЗК с радиографическими окнами диаметром ~200 мм приведена на рис. 1.

Макет ВЗК представляет собой стальную (сталь 20) сварную конструкцию цилиндрической формы, состоящую из наружной (1) и внутренней (2) оболочек с открытыми торцами, расположенных соосно, с воздушным зазором между ними величиной 34 мм. Диаметр наружной цилиндрической оболочки (1) 1220 мм, толщина стенки 16 мм, диаметр внутренней оболочки (2) 1120 мм, толщина стенки 13 мм. В центральной зоне внутренняя оболочка усилена изнутри контактирующей с ней дополнительной оболочкой (3) дли-

ной 1100 мм и толщиной 18 мм, крепящейся по торцам к стенкам оболочки (2) кольцевыми сварными швами. В наиболее нагруженном центральном сечении суммарная толщина стенок двухконтурного корпуса из стали 20 составляла 47 мм. Длина макета 2500 мм. В центральном сечении цилиндрического корпуса макета имеются два диаметральных ввода, для чего в стенках наружной, внутренней и дополнительной оболочек сделаны два диаметрально противоположных соосных сквозных отверстия. В отверстия вставлены патрубки с наружным диаметром 219 мм и толщиной стенки 13 мм, которые крепятся к внешней оболочке с помощью сварки. К свободному фланцу каждого патрубка крепится труба-расширитель (проставка), имеющая больший, чем патрубки, диаметр – 400 мм (4) и толщину стенки 10 мм. Их свободные торцы герметично закрываются крышками в форме диска из сплава АМц (6) толщиной 25 мм. Таким образом, в макете для снижения импульсного воздействия на крышки радиографических окон из алюминиевого сплава толщиной 25 мм использовались газодинамические устройства проставки-расширители (4) с двумя последовательными дроссельными диафрагмами (5).

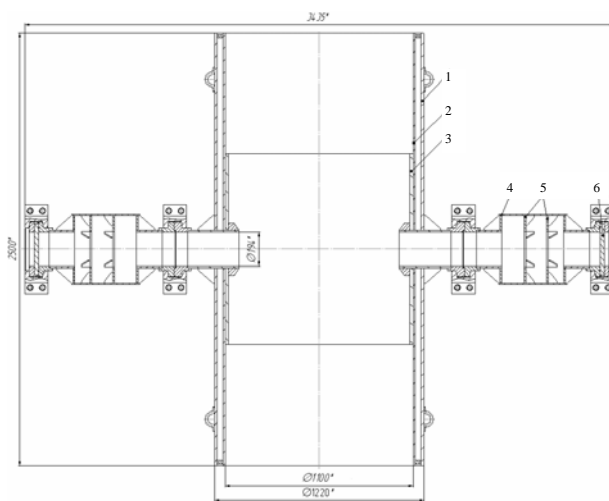


Рис. 1. Схема исследуемого макета: 1 – наружная цилиндрическая оболочка; 2 – внутренняя оболочка; 3 – дополнительная оболочка; 4 – проставки-расширители; 5 – дроссельные диафрагмы; 6 – крышки из алюминиевого сплава

С макетом была проведена серия из трех взрывных испытаний с нагрузкой зарядом ВВ, эквивалентным энерговыделению: $m_{ВВ} = 5,9$ кг тротила – опыт № 1; $m_{ВВ} = 8,7$ кг ТЭ – опыт № 2, $m_{ВВ} = 11,8$ кг ТЭ – опыт № 3.

Перед испытаниями пространство со стороны открытых торцов макета закрывалось бетонными блоками. Вид макета перед испытаниями приведен на рис. 2.



Рис. 2. Фотография макета перед проведением испытания

В опытах проводились следующие измерения:

1) методом тензометрирования измерялись окружные и продольные деформации: наружной оболочки макета, патрубка ввода, оболочки одного из расширителей и радиальные деформации обеих крышек;

2) методом щелевой фоторегистрации фиксировалось радиальное перемещение наружной поверхности оболочки в центральном сечении;

3) измерялись характерные размеры элементов макета (длина окружности наружной и внутренней оболочек в центральном сечении, прогиб дополнительной оболочки в центральном сечении, прогиб крышек и др.) до и после испытания.

Во всех опытах элементы внешнего корпуса макета сохранили конструкционную целостность. Результаты обмеров длины дуги окружностей до и после испытания по наружной поверхности в центральном, наиболее нагруженном, сечении внешней оболочки во всех опытах показали отсутствие остаточных деформаций. В первом опыте крышки радиографических окон из алюминиевого сплава толщиной 25 мм сохранили целостность и не имели остаточных прогибов. Во втором и третьем экспериментах крышки получили остаточные прогибы величины 20 и 24 мм; средние деформации, соответствующие этим прогибам, $\varepsilon_2 = 1,5\%$ и $\varepsilon_3 = 2\%$. Проставки-расширители, патрубки вводов в ВЗК, кольцевые бугели не имели повреждений и сохранили свою несущую способность.

В опыте № 1 на дополнительной оболочке (3), используемой для усиления наиболее нагруженного сечения внутренней оболочки, в районе радиографических окон образовались трещины практически по всей длине (рис. 3). Перед проведением второго эксперимента трещины были заварены.

В опыте № 2 реализовалось более сильное разрушение дополнительной оболочки с появлением не-

скольких трещин как в ранее заваренных, так и новых местах (рис. 4).



Рис. 3. Вид внутренней оболочки после опыта № 1

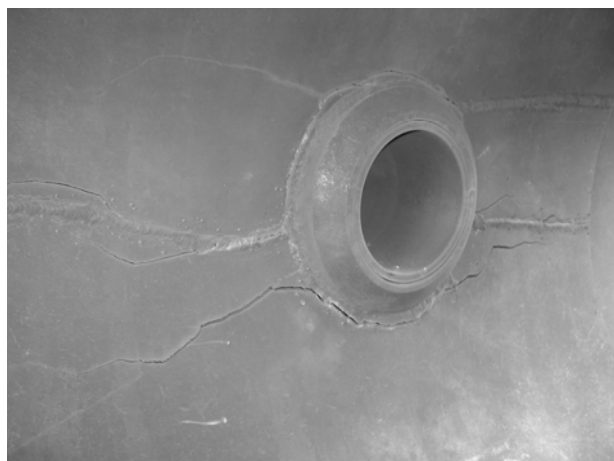


Рис. 4. Вид внутренней оболочки после опыта № 2

В опыте № 3 на внутренней двухслойной оболочке произошло раскрытие трещин, образовавшихся в предыдущем эксперименте. При этом образовавшиеся трещины на внутренней оболочке не повлияли на несущую способность макета в целом.

Результаты пересчета фотохронограмм радиальных перемещений наружной поверхности оболочки в центральном сечении в окружные деформации для всех трех опытов приведены на рис. 6. Время отсчета на графиках приведено ко времени начала движения поверхности оболочки.

Из графиков видно, что максимальная окружная деформация для опыта № 1 $\varepsilon_m = 0,19\%$, для опыта № 2 $\varepsilon_m = 0,32\%$, для опыта № 3 $\varepsilon_m = 0,49\%$.

Характерные осциллограммы опытов, полученные с тензодатчиков, расположенных в центральном сечении макета, представлены на рис. 7 и согласуются с данными, полученными по фотохронограмме. Максимальные значения окружных деформаций для центрального сечения макета, усредненные с учетом всех измерений, составили: для опы-

та № 1 ($m_{\text{ВВ}} = 5,9$ кг ТЭ) $\varepsilon_{\text{м}} = 0,15 \pm 0,03$ %; для опыта № 2 ($m_{\text{ВВ}} = 8,7$ кг ТЭ) $\varepsilon_{\text{м}} = 0,36 \pm 0,06$ %; для опыта № 3 ($m_{\text{ВВ}} = 11,8$ кг ТЭ) $\varepsilon_{\text{м}} = 0,51 \pm 0,05$ %. Окружные деформации для проставок-расширителей во всех опытах не превысили 0,6 %, т. е. работали в области незначительных пластических деформаций.

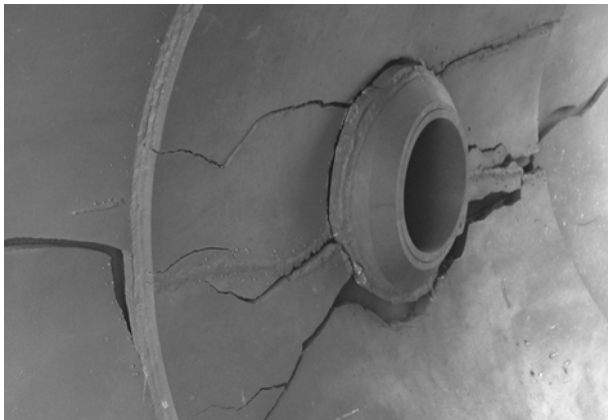


Рис. 5. Вид внутренней оболочки после опыта № 3

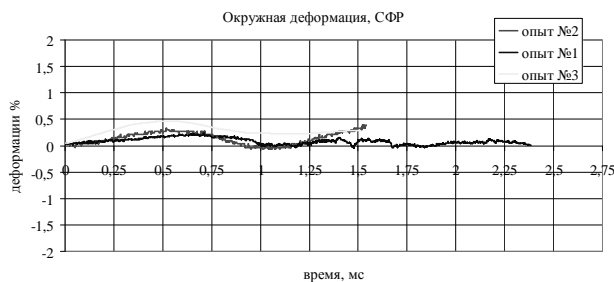


Рис. 6. Графики зависимости деформации от времени, полученные с помощью скоростного фоторегистратора

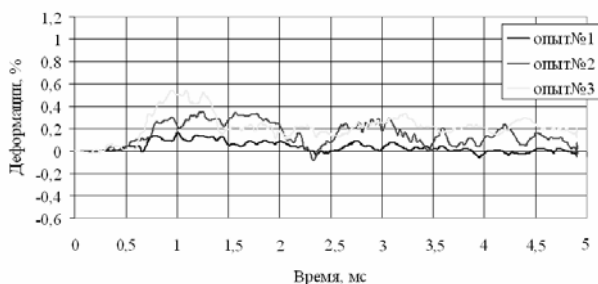


Рис. 7. Графики зависимости деформаций от времени, полученные с тензодатчиков

Для оценок ожидаемых уровней деформаций внутренней оболочки в опытах и оценок расстояния между внутренней и внешней оболочками проводили расчеты максимальных окружных деформаций внутренней цилиндрической оболочки макета по полуэмпирической формуле, в основе которой лежит закон

сохранения энергии для двухслойной цилиндрической оболочки в приближении к кольцу единичной длины:

$$A\varepsilon_r^2 + B\varepsilon_r + C = 0, \quad (1)$$

$$A = E_y \pi \left(r + h_1 + \frac{h}{2} \right) h \left(\frac{r + h_1 + h}{r + h_1 + \frac{h}{2}} \right); \quad 326$$

$$B = \sigma_{02} 2\pi \left(r + \frac{h_1}{2} \right) h_1 \left(\frac{r + h_1 + h}{r + \frac{h_1}{2}} \right);$$

$$C = - \frac{\left(\frac{8}{27} K_{\text{отр}} \right)^2 (m_{\text{ВВ}} + M_a) E}{\pi r^2 \rho_{\text{ст}} \left(h_1 \left(r + \frac{h_1}{2} \right) + h \left(r + h_1 + \frac{h}{2} \right) \right)},$$

где $E_y = 2,06 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости для стали 20; $r = 0,53$ м – внутренний радиус дополнительной оболочки; $h = 0,013$ м – толщина внутренней оболочки; $h_1 = 0,018$ м – толщина дополнительной оболочки; $\sigma_{02} = 500$ МПа – предел текучести для стали 20 с учетом динамического упрочнения; $K_{\text{отр}} = 1,26$ – коэффициент отражения [3]; $M_a = \frac{4}{3} \pi r_1^3 \rho_a$ – масса газовой полости ($\rho_a = 1,293$ кг/м³ – плотность продуктов взрыва); $E = Q \cdot m_{\text{ВВ}}$ (где Q – теплота взрыва, для ВВ состава ТГ 4/6 $Q = 4,925$ МДж/кг) – энергия, выделяемая при взрыве заряда [4]. Значения максимальных деформаций (расчетные и экспериментальные) для всех опытов приведены в таблице

$\left(R_i = \frac{\varepsilon_m (R_{i-1} + h)}{100 \%} \right)$ – радиус внутренней оболочки перед проведением опыта, ΔR – изменение в опыте радиуса внутренней оболочки, $\Delta R_i = \frac{\varepsilon_m (R_i + h)}{100 \%}$.

Поскольку в опытах измерялись только остаточные деформации внутренней оболочки, то максимальные динамические деформации можно оценить, учитывая упругую разгрузку $\sim 0,2$ %.

Данные расчетов максимальных относительных деформаций

№ опыта	$m_{\text{ТЭ}}$, кг	$\varepsilon_{\text{м}}^{\text{расч}}$, %	$\varepsilon_{\text{ост}}^{\text{экс}}$, %	$\varepsilon_{\text{м}}^{\text{экс}}$, %	R , мм	ΔR , мм
1	5,9	0,5	$\sim 0,2$	$\sim 0,4$	543	2
2	8,7	0,8	$\sim 0,6$	$\sim 0,8$	544	4
3	11,8	1,2	$\sim 0,9$	$\sim 1,1$	547	6

Из представленных данных видно удовлетворительное соответствие между экспериментальными и расчетными значениями. Расхождение между экспериментальными данными и расчетными оценками не превышает 25 %. Зазор между внутренней и внешней оболочками перед проведением экспериментов был равен 34 мм, максимальное изменение радиуса внутренней оболочки во время третьего опыта относительно первоначального радиуса составило 10 мм, таким образом зазор между внешней и внутренней оболочками сохранялся во всех опытах.

На основании результатов проведенных испытаний макета центральной части ВЗК и расчетных оценок сделаны следующие выводы.

Небольшие значения деформаций крышек из алюминиевого сплава АМц (а также их отсутствие в первом эксперименте) подтвердили необходимость использования проставок-расширителей для снижения динамического воздействия от продуктов взрыва на крышки из алюминиевого сплава.

Измерения и осмотр состояния внешней оболочки макета после каждого опыта показали, что все ее элементы в процессе проведения экспериментов сохраняли конструкционную целостность, несущую способность и имели незначительные остаточные деформации при взрывном нагружении сферическим зарядом ВВ с энерговыделением 5,9, 8,4, 11,8 кг ТЭ. Конструкция двух диаметральных вводов в ВЗК, включающая: патрубки с фланцами, проставки-расширители с двумя дросселями, бандажи крепления и крышки радиографических окон из алюминиевого сплава диаметром ~200 мм и толщиной 25 мм, обеспечила требуемую взрывостойкость и несущую способность двухконтурного макета центральной части ВЗК, не снизив его прочность при данных уровнях нагрузок.

Полученные в трех опытах значения динамических окружных и продольных деформаций в наиболее нагруженном сечении оболочки корпуса и на элементах вводов радиографических окон показали, что все элементы силового корпуса работали в области упругих и незначительных пластических деформаций.

Максимальные значения деформаций для центральной части наружной оболочки, полученные в экспериментах, составили: для опыта № 1 ($m_{ВВ} = 5,9$ кг ТЭ) $\epsilon_m = 0,15 \pm 0,03$ %; для опыта № 2 ($m_{ВВ} = 8,7$ кг ТЭ) $\epsilon_m = 0,36 \pm 0,06$ %; для опыта № 3 ($m_{ВВ} = 11,8$ кг ТЭ) $\epsilon_m = 0,51 \pm 0,05$ %.

Расхождение между экспериментальными данными и расчетными оценками максимальных деформаций внутренней оболочки, полученными по формуле (1), не превышает 25 %, зазор между внешней и внутренней оболочкой сохранялся во всех опытах.

Таким образом, экспериментально подтверждена взрывостойкость конструкции двухконтурного корпуса ВЗК с радиографическими окнами диаметром ~200 мм, закрываемыми крышками из алюминиевого сплава толщиной 25 мм, которые не снижают несущей способности ВЗК в наиболее нагруженном сечении. Данная конструктивная схема центральной части камеры может быть использована при разработке аналогичных ВЗК.

Литература

1. Ефремова Н. В., Сырунин М. А., Федоренко А. Г. и др. Экспериментальные исследования конструктивных элементов радиографических окон для взрывной камеры // Сб. докл. VII научно-технической конф. «Молодежь в науке». Саров, 2009.
2. Патент RU 2367899 С1. Локализирующее устройство для радиографических исследований взрывных процессов / М. А. Сырунин, Е. Д. Вишневецкий, А. Л. Михайлов и др. Оpubл. 20.09.2009. Бюл. № 26.
3. Цыпкин В. И., Русак В. Н., Иванов А. Г. и др. Деформация и разрушение двухслойных металлопластиковых оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Механика композитных материалов. 1987. № 5.
4. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве: Монография / Под ред. А. Г. Иванова. Саров, 2001.