

К оценке напряженно-деформированного состояния силовых элементов конструкции трубчатой взрывной камеры

Ю. М. Сидоренко^{а,1}, П. С. Шленский^{б,2}

^а Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, Украина

^б Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

¹ yura_michael@ukr.net

² shlensk@ukr.net

Рассмотрено определение напряженно-деформированного состояния силовых элементов трубчатой взрывной камеры путем численного моделирования. Описаны особенности построения расчетной (геометрической) и конечноэлементной моделей задачи. Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными.

Ключевые слова: взрывная камера, взрывчатое вещество, численное моделирование.

Введение. Сварка взрывом – это технологический процесс соединения разных деталей путем их высокоскоростного соударения, вызванного детонацией взрывчатого вещества (ВВ). Сварка позволяет соединять между собой металлы с разными физико-механическими характеристиками, например легкоплавкие металлы и сплавы с тугоплавкими [1, 2].

Значительная часть энергии, которая выделяется при взрыве, распространяется в виде воздушных ударных волн, сейсмических возмущений, разлета осколков. Поэтому сварку взрывом проводят на полигонах, расположенных на значительном расстоянии от жилых и промышленных объектов, или во взрывных камерах. Внешний вид одной из таких камер, созданной в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, показан на рис. 1 [3–5].

Постановка задачи. В настоящее время проектирование камер такого типа в основном проводят экспериментально с привлечением метода геометрического моделирования. Это обусловлено особенностями геометрии данной конструкции, состоящей из набора цилиндрических труб, которые в пространстве образуют полусферу. Один торец труб вставляется в отверстия перфорированного стального листа, изготовленного в виде полусферы, и приваривается к нему. Во время взрыва через эти отверстия продукты детонации попадают внутрь труб, где и расширяются. Противоположный торец труб закрывается путем приваривания к нему специальных донных крышек, к которым, в свою очередь, приваривается арматура, связывающая трубы между собой (рис. 1). Образовавшиеся между трубами воздушные полости засыпаются песком.

Такая геометрия камеры не позволяет в полном объеме применять известную инженерную методику расчета на прочность под действием взрыва [5].



Рис. 1. Общий вид трубчатой камеры для сварки взрывом.

Указанный выше способ проектирования камер достаточно дорогостоящий. Например, его нельзя использовать для решения вопроса поиска оптимального варианта конструкции, обладающей наименьшей металлоемкостью, так как в процессе проектирования приходится оценивать соответствие многих ее вариантов установленному критерию оптимизации.

Кроме того, для определения направления совершенствования отдельных узлов взрывной камеры необходимо располагать информацией о параметрах напряженно-деформированного состояния ее элементов. Экспериментально получить такую информацию можно только с применением большого количества специальных дорогостоящих датчиков одноразового использования. Однако и это не позволяет получать полную картину распределения напряжений и деформаций в конструкции, так как датчики размещаются в основном на наружной поверхности силовых элементов камеры. Во многих случаях необходимо знать величины напряжений внутри элемента конструкции, где установить датчик физически невозможно, и тогда используют численные методы исследования.

В данной работе методом компьютерного моделирования исследовали поведение силовых элементов конструкции трубчатой взрывной камеры при взрыве внутри нее заряда ВВ. На рис. 2 показано поперечное сечение масштабной модели такой камеры, изготовленной в форме полусферы.

Свариваемые материалы в виде пластин размером $320 \times 250 \times 30$ мм располагаются в центре камеры на рабочем столе. На них устанавливается плоский заряд ВВ – аммонит 6ЖВ (масса 2,4 кг, плотность $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, скорость детонации $D = 4200 \text{ м/с}$, теплота взрывчатого превращения $Q_v = 4180 \text{ кДж/кг}$).

Выше отмечалось, что силовые элементы камеры представляют собой набор равномерно расставленных стальных труб в виде полусферы. Радиус перфорированного стального листа R составляет 1050 мм. К нему открытым

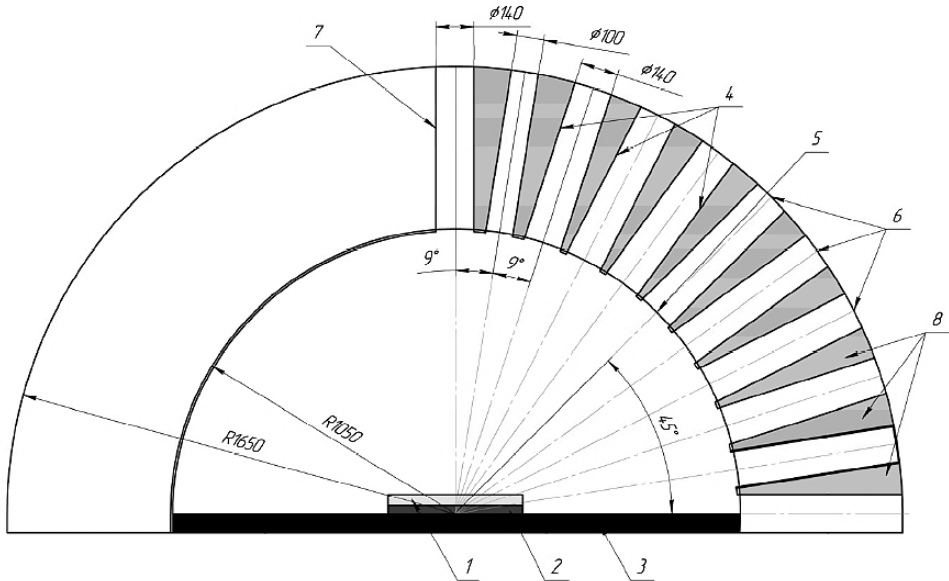


Рис. 2. Схема поперечного сечения трубчатой взрывной камеры: 1 – заряд ВВ; 2 – свариваемые материалы; 3 – рабочий стол (плита); 4 – трубы; 5 – перфорированный стальной лист; 6 – донные крышки труб; 7 – центральная труба; 8 – сыпучий наполнитель.

торцом привариваются трубы с угловым шагом 9° . Противоположный торец труб закрыт донной крышкой толщиной 4 мм. Наружный диаметр труб равен 100 и 140 мм, толщина стенки – 4,5 мм. Общее количество труб – 283 шт. Центральная вертикально установленная труба имеет оба открытых торца. Свободное пространство между трубами заполняется песком.

Методика математического моделирования. Для определения значений параметров напряженно-деформированного состояния силовых элементов трубчатой взрывной камеры (рис. 2) при взрыве внутри нее заряда ВВ был проведен численный анализ с помощью программы ANSYS/LS-DYNA [6–9].

По результатам ранее [10] проведенного численного анализа процесса взрыва открытого плоского заряда ВВ (аммонит 6ЖВ массой 2,4 кг) было установлено, что основное действие воздушной ударной волны (ВУВ) сосредотачивается в вертикальном направлении. При этом в горизонтальном направлении на расстоянии от 1 до 1,6 м от места взрыва величина избыточного давления на ее фронте ниже в среднем в 1,7 раза, в направлении под углом 45° к горизонту – в 3 раза.

Следовательно, именно в вертикальном направлении ВУВ максимально воздействует на силовые элементы камеры. Таким образом, для адаптации расчетной модели задачи к возможностям имеющейся ПЭВМ было принято решение ее упростить. Для этого в модель были включены только три наиболее нагруженные трубы: № 1 – вертикальная без донной крышки ($\text{Ø}140$ мм); № 2 – отклоненная на угол 9° от вертикали ($\text{Ø}100$ мм); № 3 – отклоненная на угол 18° ($\text{Ø}140$ мм).

Учитывая, что для камеры характерна симметрия, в расчетной схеме трубы № 2 и 3 представим 1/2 частью, трубу № 1 – 1/4 частью, получаемыми путем разрезания продольными плоскостями.

В рассматриваемой геометрической модели используется заряд ВВ размером $160 \times 125 \times 30$ мм, размер заполненной воздухом области составляет $604 \times 305 \times 1680$ мм. Положение точки инициирования детонации заряда ВВ располагается в точке с координатами $(0, 0, 0)$. Внешний вид расчетной схемы задачи представлен на рис. 3.

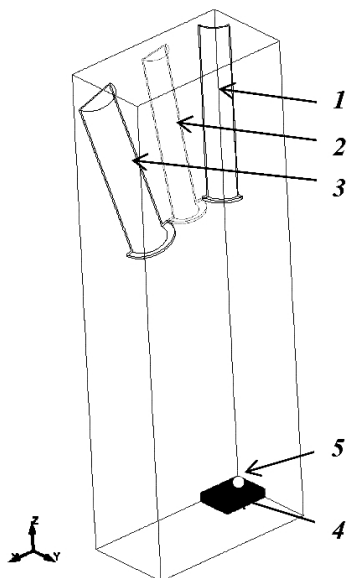


Рис. 3. Геометрическая схема задачи о взрыве плоского заряда ВВ внутри трубчатой взрывной камеры: 1, 2, 3 – трубы № 1, 2, 3; 4 – заряд ВВ; 5 – точка инициирования детонации заряда ВВ.

Для описания поведения различных сред под действием импульсной нагрузки в настоящее время наиболее часто используют подходы – эйлеров и лагранжев [8, 11, 12]. Эйлеров подход применяется к описанию движения сред через неподвижную расчетную сетку и наиболее подходит для изучения течения жидкостей и газа. В лагранжевом подходе, в отличие от эйлерового, используется подвижная сетка, которая жестко связывается со средой и деформируется вместе с ней. Такой подход удобен для исследования поведения твердых тел, в том числе металлов. Учитывая, что в нашей задаче рассматриваются как газообразные среды – продукты детонации (ПД), воздух, так и твердые – металлические трубы, при компьютерном моделировании использовался смешанный лагранжево-эйлеров подход [8]. Сыпучий материал (песок) в математической модели отсутствовал.

Определившись с методом моделирования, была построена конечноэлементная модель задачи. При моделировании процесса деформирования и разрушения различных материалов в условиях взрывного нагружения рекомендуется использовать конечный элемент в форме гексаэдра [10]. Для этого был выбран объемный конечный элемент SOLID 164, применяемый к решению динамических нестационарных трехмерных (3D) задач.

Поскольку для моделирования процесса нагружения силовых элементов трубчатой камеры был выбран смешанный лагранжево-эйлеров подход, это позволило использовать разный размер конечного элемента для газообразных и твердых сред.

Учитывая, что для расчетов применялся персональный компьютер с ограниченными возможностями (четырёхядерный центральный процессор IntelCore2Quad с тактовой частотой ядра 2,83 ГГц, 8Гб оперативной памяти), это наложило физические ограничения на количество используемых конечных элементов. Построение конечноэлементной модели задачи начиналось с создания конечноэлементной сетки металлических деталей камеры – труб. Опыт решения подобного класса задач показывает, что число рядов конечных элементов, приходящихся на толщину металлической трубы, должно быть не менее пяти [13]. Поэтому для построения конечноэлементной сетки труб взрывной камеры был выбран конечный элемент с максимальным характерным размером 1 мм.

Для построения конечноэлементной сетки заряда ВВ и окружающего его воздуха использовался конечный элемент в форме куба с двумя характерными размерами: 6 мм – для заряда ВВ и 12 мм – для воздуха. При этом конечные элементы для воздуха, расположенные в вертикальном и горизонтальном направлениях строго над боковой и торцевой поверхностями заряда ВВ, имеют форму параллелепипеда высотой 12 мм и поперечным сечением 6 × 6 мм.

Решение задачи на конечноэлементной сетке с такими параметрами потребовало 7,6 из 8 Гб имеющейся оперативной памяти компьютера.

Конечноэлементная модель была дополнена некоторыми граничными условиями. Поскольку расчетная модель задачи содержит только часть полной геометрии камеры, для правильного моделирования условий симметрии конструкции были наложены ограничения на перемещение узлов конечноэлементной сетки в направлении вектора нормали плоскостей симметрии задачи, на которых они находятся.

Аналогично моделировалось поведение рабочего стола, принятого в расчетной схеме абсолютно жестким телом. При этом на узлы, расположенные на его поверхности, накладывалось ограничение на их перемещение в вертикальном направлении. Подобное граничное условие применялось к узлам конечноэлементной сетки, принадлежащим боковым поверхностям круглых фланцев, приваренных к открытым торцам труб. Перемещение этих узлов ограничивалось в направлении вектора нормали к плоскости фланца.

В качестве материала труб использовалась сталь 09Г2С, поведение которой в математической постановке описывается с помощью упругопластической модели материала с кинематическим упрочнением PLASTIC-KINEMATIC. Параметры модели следующие: плотность $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$; модуль упругости $E = 210 \text{ ГПа}$; коэффициент Пуассона $\mu = 0,25$; предел текучести $\sigma_T = 350 \text{ МПа}$; тангенциальный модуль упругости $E_t = 1 \text{ ГПа}$.

Расширение ПД описывалось с помощью уравнения состояния в форме Джонса–Уилкинса–Ли (JWL) [14, 15]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V},$$

где p , E_0 , V – соответственно давление, энергия и относительный объем ПД; A , B , R_1 , R_2 , ω – эмпирические константы.

В литературных источниках для состава аммонит 6ЖВ отсутствуют экспериментальные данные о численных значениях коэффициентов этого уравнения ($A, B, R_1, R_2, \omega, E_0$). Поэтому проблема решалась в следующей последовательности [16].

1. Для ПД рассчитывались коэффициенты уравнения состояния Орленко в форме степенного двучлена [14, 17]:

$$p = B_0 \rho^k + C_0 \rho^{\Gamma+1},$$

где B_0, C_0, k – коэффициенты, определяемые по параметрам в точке Чепмена–Жуге (СЖ) [17]; значение коэффициента Грюнайзена Γ принималось равным 0,25. При этом давление $p_{СЖ}$ и плотность $\rho_{СЖ}$ ПД на фронте детонационной волны (ДФ) соответственно составляли 4,33 ГПа и 1333 кг/м^3 .

2. Методом математического перебора значений коэффициентов уравнения JWL отыскивалась такая группа величин, чтобы кривая JWL наилучшим образом аппроксимировала кривую Орленко. Результаты аппроксимации оценивались по критерию минимального значения площади между указанными зависимостями, нормированной на величину давления ПД. В результате получены такие значения коэффициентов уравнения JWL: $A = 140 \text{ ГПа}$; $B = 3 \text{ ГПа}$; $R_1 = 5,49$; $R_2 = 1,8$; $\omega = 0,25$; $E_0 = 4 \text{ ГПа}$.

Поведение окружающего воздуха с начальным значением плотности $\rho_0 = 1,26 \text{ кг/м}^3$ описывалось с помощью уравнения состояния в форме линейного полинома:

$$p = C_0 + C_1 v + C_2 v^2 + C_3 v^3 + (C_4 + C_5 v + C_6 v^2) E_0, \quad v = \frac{\rho}{\rho_0} - 1.$$

Коэффициенты данного уравнения выбирались согласно рекомендациям [8, 9, 18].

Результаты математического моделирования. Процессы формирования ВУВ и потока ПД, которыми нагружаются силовые элементы трубчатой взрывной камеры, иллюстрируют рис. 4, 5.

Из рис. 4 видно, что к моменту времени $t = 50 \text{ мкс}$ детонацией охвачен весь заряд ВВ. Такой результат подтверждает, что численная схема программы правильно воспроизводит значение скорости детонации ВВ, равной 4200 м/с .

В результате отражения ДФ от границы двух сред ВВ – воздух в ПД формировалась волна разрежения, которая движется по направлению к плоскостям симметрии геометрической схемы задачи. При подходе к ним начинается процесс ее отражения с формированием области высокого давления (на рис. 4 показана в виде пятна интенсивного цвета, вытянутого вдоль линии пересечения двух вертикальных плоскостей симметрии, $t = 150 \text{ мкс}$). В момент времени 100 мкс максимальное значение давления ПД в этой области достигает 112 МПа . По мере расширения ПД давление падает до 68 МПа (150 мкс), 25 МПа (200 мкс), 13 МПа (225 мкс) и к моменту $t = 250 \text{ мкс}$ сравнивается с таковым на фронте (8 МПа). В дальнейшем ПД продолжают расширяться, давление в них продолжает падать, наибольшее значение формируется только на их фронте (при $p = 7 \text{ МПа}$ имеем $t = 300 \text{ мкс}$; $5,3 \text{ МПа}$ – 350 мкс ; $4,7 \text{ МПа}$ –

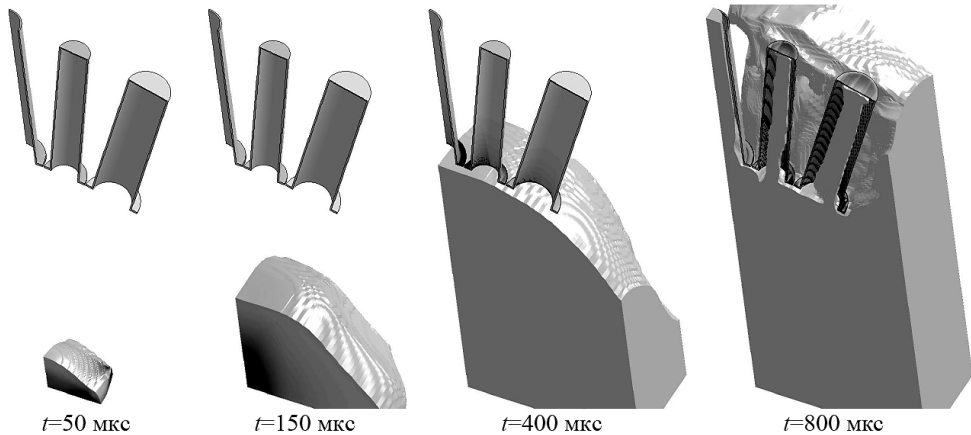


Рис. 4. Компьютерное моделирование процессов расширения ПД плоского заряда ВВ и взрывного нагружения силовых элементов трубчатой взрывной камеры.

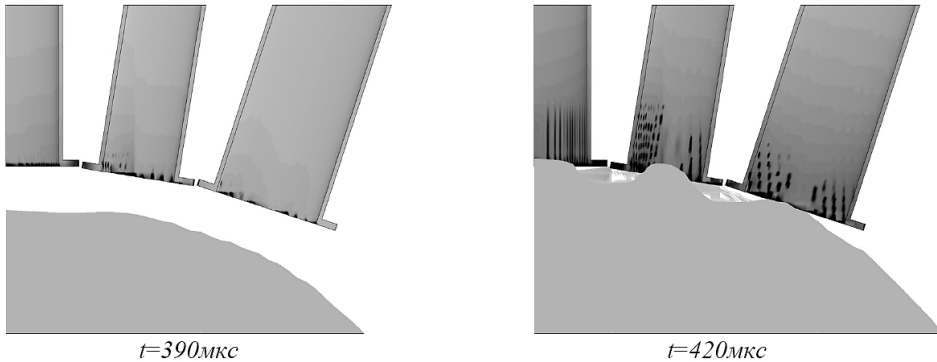


Рис. 5. Процесс взаимодействия воздушной ударной волны с силовыми элементами трубчатой взрывной камеры.

370 мкс). Расширяющиеся ПД формируют перед своим фронтом движущуюся ВУВ, которая к моменту времени $t = 370$ мкс начинает первой взаимодействовать с трубами камеры (рис. 5).

Сначала в контакт с ВУВ вступает труба № 2 при $t = 370$ мкс. В результате на наружной поверхности фланца трубы отмечаются первые внутренние напряжения. Затем возникает контакт с трубами № 3 ($t = 375$ мкс) и № 1 ($t = 380$ мкс).

При $t = 390$ мкс на фланцах труб наблюдается процесс формирования новых «очагов» внутренних напряжений в виде пламени – широкое основание и заостренная вершина, причем расстояние между ними на трубах разное. Если в трубе № 1 они сосредоточены достаточно близко друг к другу и практически сливаются в одно целое, то в трубе № 2 расстояние между ними возрастает, в трубе № 3 их распределение носит локальный характер.

По мере развития процесса взаимодействия ВУВ с трубами размер очагов напряжений увеличивается. В основном они вытягиваются по направлению ко дну труб. При этом можно констатировать, что в трубе № 1 очаги представляют собой непрерывные узконаправленные и практически параллельные образующей трубы линии. В трубах № 2 и 3 эти очаги хотя и вытягиваются,

все же имеют ограниченную длину. При этом они выстраиваются в некоторую линию-цепочку очаг за очагом (рис. 5, $t = 420$ мкс). Расстояние между ними вдоль этих линий в трубе № 3 приблизительно равно длине самого очага. В дальнейшем эти линии будем называть линиями очагов.

Следует отметить, что на момент более-менее отчетливого формирования описанной в трубах картины внутренних напряжений ($t = 410$ мкс) ПД только подходят к фланцам труб. Далее начинается процесс их проникновения сначала в глубь трубы № 2, затем № 1 и 3.

Процесс формирования линий очагов в трубах взрывной камеры заканчивается к моменту времени $t = 800$ мкс, когда ПД полностью охватывают все трубы (рис. 4). С течением времени картина интенсивности напряжений в трубах практически не изменяется (рис. 6).



Рис. 6. Расчетная картина интенсивности напряжений в трубах ($t = 800$ мкс).

С момента времени 800 мкс до 1500 мкс максимальные значения напряжений в трубах возрастают всего на 18 МПа. Обращает на себя внимание тот факт, что линии очагов, имея разный угол наклона к образующей труб, параллельны между собой (рис. 5, 6). Это обусловлено тем, что в основном действие ВУВ в данном месте камеры направлено практически вертикально, а сами трубы из-за особенности конструкции камеры наклонены под углом 9 и 18° от вертикали.

Кроме того, в разных трубах формируется различное количество линий очагов (рис. 7). Например, если в трубе № 2 их насчитывается 8–10, то в трубе № 3 – 16–18.

На формирование данного явления, по-видимому, оказывает влияние неравномерность нагружения труб со стороны ВУВ и ПД, т.е. передача нагрузки на трубы происходит не плавно по всей поверхности контакта, а имеет локальный характер.

Такая неравномерность нагружения может быть обусловлена двумя причинами:

- 1) особенностями численной схемы по передаче информации (нагрузки) от эйлеровой сетки (ПД, воздух) к лагранжевой (трубы), которые из-за ограниченных технических возможностей ПЭВМ были построены с использованием конечных элементов с разными размерами;

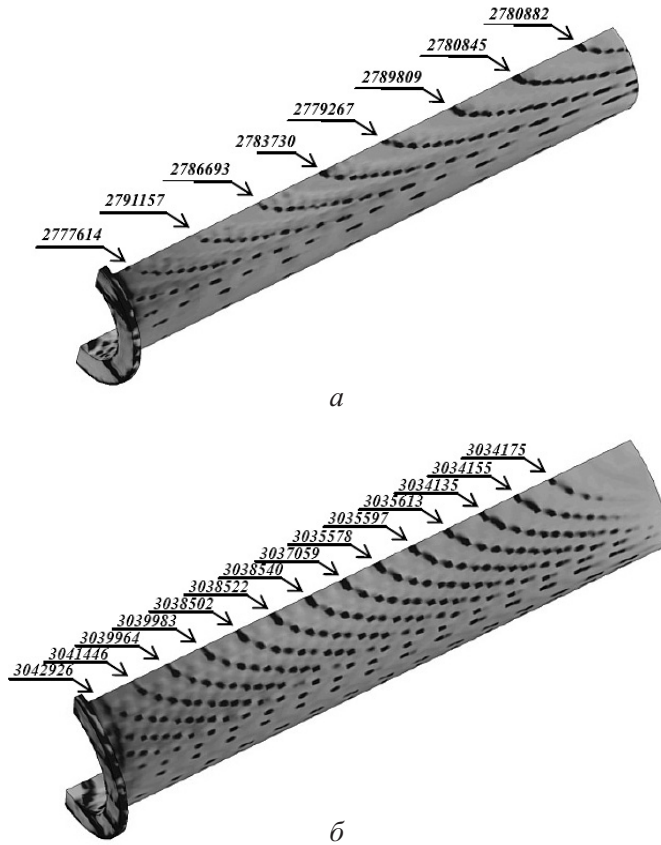


Рис. 7. Линии повышенных внутренних напряжений в трубах № 2 (а) и 3 (б) взрывной камеры, $t = 1500$ мкс.

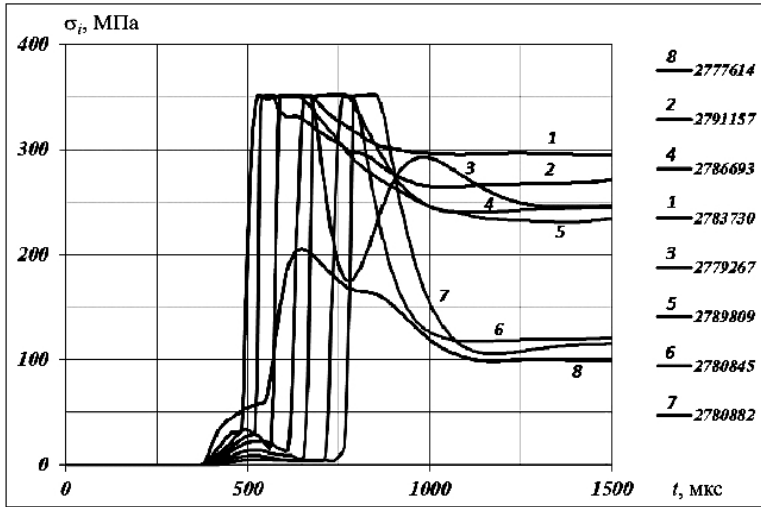
2) сложной структурой фронтов ВУВ и ПД, которые имеют неравномерное распределение давления по своей поверхности.

В любом случае неравномерность нагружения, обусловленная этими причинами, требует дополнительного исследования с использованием более производительного компьютера.

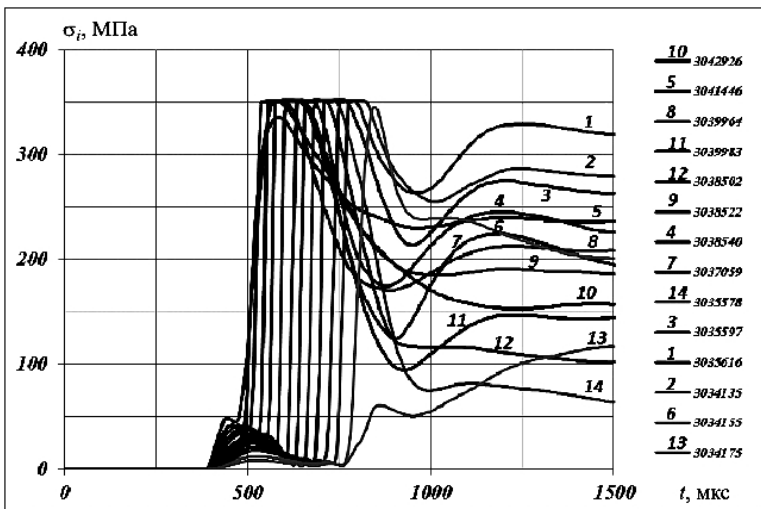
Представляет также интерес характер изменения во времени значений интенсивности напряжений в вершинах описанных выше очагов. Для этого выбирались соответствующие элементы конечноэлементной модели труб, расположенные в начале разных линий очагов, номера которых показаны на рис. 7.

Из рис. 8 видно, что характер кривых практически одинаков. На всех кривых имеется первый пик в области $t = 500$ мкс. Такое их поведение объясняется влиянием распространяющейся по трубам упругой волны сжатия [14]. Отметим, что для кривых время наступления пикового значения и его абсолютная величина разные. Если для первых двух кривых, которые характеризуют изменение напряжений в конечных элементах, расположенных ближе всех к открытому краю труб, максимальное значение составляет порядка 30...35 МПа в трубе № 2 и 50 МПа в трубе № 3 ($t = 450$ мкс), то в конечных элементах, расположенных ближе всех ко дну трубы, оно падает до 5...9 МПа.

При этом для последних конечных элементов характерно некоторое постоянство пикового значения напряжения, которое приблизительно наступает между 500 и 550 мкс. Такая временная задержка говорит о том, что созданная математическая модель задачи с достаточной точностью воспроизводит значение скорости распространения упругой волны сжатия, равной скорости звука в стали $c = 5100$ м/с.



a



b

Рис. 8. История изменения значений интенсивности напряжений σ_i в конечных элементах, расположенных в начале разных линий очагов в трубах № 2 (a) и 3 (б).

Повторное повышение напряжений обусловлено влиянием возрастающего внутреннего давления на трубы из-за движения в них ПД. Из рис. 8 видно, что максимальные значения интенсивности напряжений достигают предела текучести материала, заложенного в расчет (350 МПа), и сохраняют его некоторое время. Вследствие этого материал переходит из упругой стадии

деформирования в пластическую с накоплением соответствующих пластических деформаций. Далее начинается процесс разгрузки (падение значения напряжений) и повторное нагружение, которое является следствием внутренних волновых процессов в ПД.

Кроме того, данные, приведенные на рис. 8, свидетельствуют о существенном различии между скоростью движения ударных волн в металле и скоростью движения фронта ПД. Если у входа в трубы № 2 и 3 после ВУВ происходит повторное их нагружение ПД до предела текучести через 60 и 120 мкс соответственно, то в придонной области труб это происходит после прихода упругой волны сжатия через 185 и 270 мкс. Таким образом, несложные расчеты показывают, что средняя скорость фронта расширяющихся ПД в трубе № 2 составляет 2250 м/с, в трубе № 3 – 2000 м/с, что в 2,2...2,5 раза меньше, чем скорость звука в стали.

Точность полученных результатов оценивали путем сравнения с экспериментальными данными. На боковую поверхность на расстоянии 40 и 220 мм от донной части одной из труб второго ряда взрывной камеры устанавливали четыре тензорезистора. Два из них фиксировали величину деформации трубы в окружном направлении, два – в осевом (рис. 9).

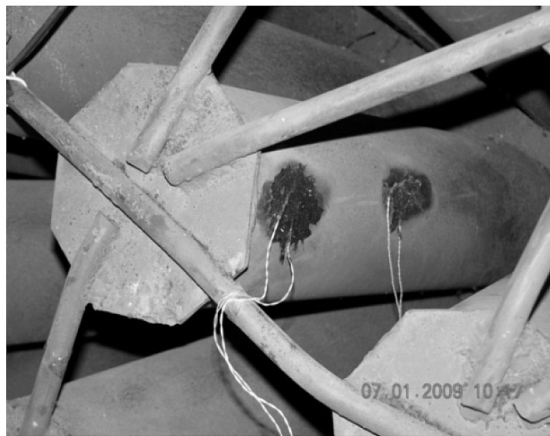


Рис. 9. Схема установки тензорезисторов на расстоянии 40 и 220 мм от донной части трубы № 3.

Для сравнения расчетных данных с экспериментальными в расчетной модели задачи использовали значения интенсивности напряжений в соответствующих конечных элементах, расположенных на расстоянии 40 мм от донной части трубы № 3. Следует отметить, что по данным расчетов именно в этом месте располагается один из очагов с повышенным значением напряжения (рис. 7,б). Ввиду невозможности точного определения расположения датчика по отношению к узлам конечноэлементной сетки трубы принято решение исследовать все конечные элементы, находящиеся в области очага. Таким образом, был рассмотрен характер напряжений в 16 конечных элементах (рис. 10). Кроме того, учитывая, что размеры датчика намного больше характерного размера конечного элемента конечноэлементной сетки трубы № 3 (1 мм), на рис. 10 представлена дополнительная кривая, соответствующая среднему напряжению по всем 16 конечным элементам.

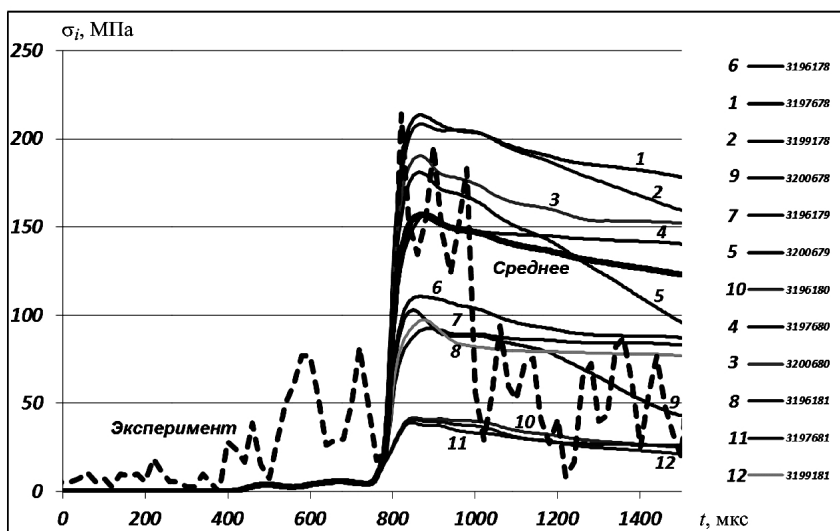


Рис. 10. История изменения значений интенсивности напряжений σ_i в расположенных под тензорезистором конечных элементах в трубе № 3 на расстоянии 40 мм от донной части.

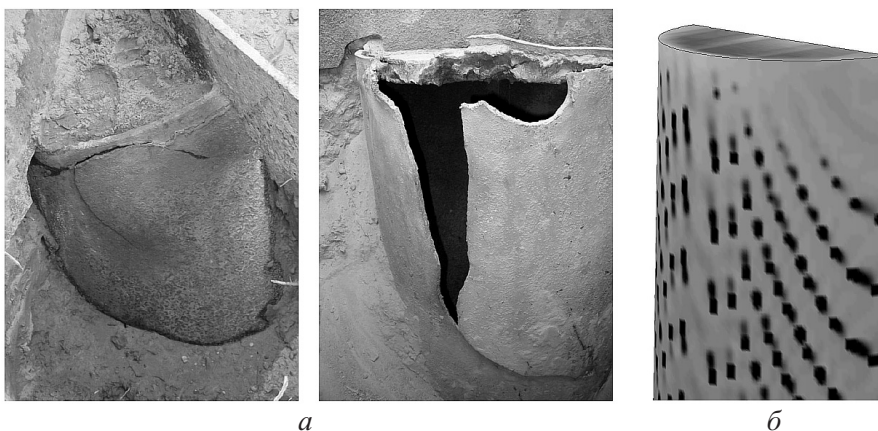


Рис. 11. Внешний вид трубы № 3 после натурального (а) и численного (б) эксперимента.

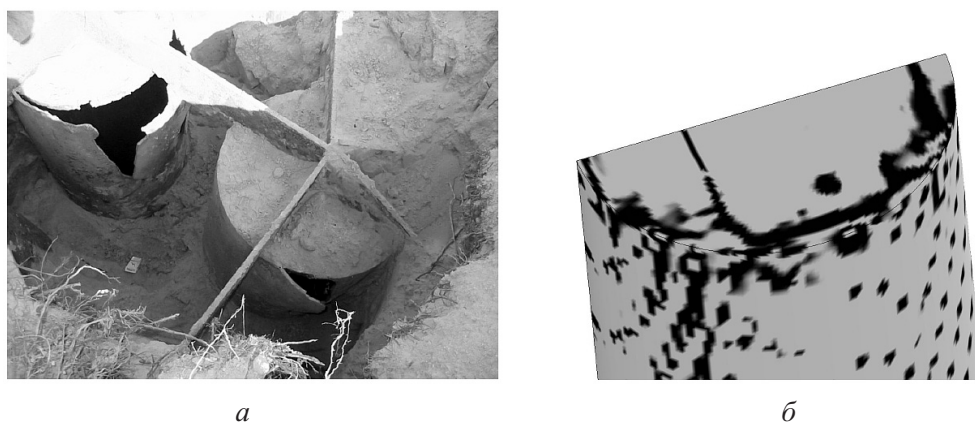


Рис. 12. Внешний вид донной части трубы № 3 после натурального (а) и численного (б) эксперимента.

Данные, приведенные на рис. 10, свидетельствуют о том, что расчет достаточно хорошо согласуется с экспериментом. Кроме того, результаты моделирования позволили определить одну из причин формирования криволинейной траектории движения трещины в придонной области труб в случае их разрушения. Из рис. 11 видно, что существует хорошая корреляция между этими траекториями и распределением на поверхности трубы № 3 интенсивности напряжений, равных пределу текучести материала.

Анализ расчета предельных значений интенсивности напряжений в донной части трубы № 3 позволяет объяснить характер разрушения в этом месте конструкции взрывной камеры (рис. 12).

Выводы

1. Разработана методика определения напряженно-деформированного состояния силовых элементов трубчатой взрывной камеры при взрыве в ней плоского заряда ВВ конечных размеров на основе метода численного моделирования. Величины расчетных напряжений, определяемые с помощью этой методики, хорошо коррелируют с экспериментальными.

2. По результатам численного анализа установлено, что:

в силовых элементах взрывной камеры (трубах) напряжения с предельными значениями распределены по винтовой линии, что позволяет объяснить характер разрушения труб в придонной области;

в трубах взрывной камеры количество винтовых линий с предельными значениями интенсивности напряжений возрастает по мере увеличения угла падения фронта воздушной ударной волны на их внутреннюю поверхность;

одной из причин отделения донной крышки от трубы по ее периметру является формирование в этой области конструкции внутренних напряжений с критическими значениями;

причины формирования в трубах линий очагов в виде отдельно стоящих локальных зон предельных значений интенсивности напряжений и увеличения расстояния между ними при переходе от второго яруса труб к третьему численно могут быть определены только с помощью высокопроизводительной суперЭВМ.

Резюме

Розглянуто визначення напружено-деформованого стану силових елементів трубчастої вибухової камери шляхом чисельного моделювання. Описано особливості побудови розрахункової (геометричної) та скінченноелементної моделей задачі. Проведено порівняння розрахункових даних з експериментальними.

1. *Лысак В. И., Кузьмин С. В.* Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.
2. *Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д.* Сварка взрывом / Под ред. В. М. Кудинова. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
3. *Единые правила безопасности при взрывных работах.* – Киев: Норматив, 1992. – 172 с.

4. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. – М.: Металлургия, 1978. – 166 с.
5. Демчук А. Ф., Исаков В. П. Металлические взрывные камеры. – Красноярск: РИО КрасГУ, 2006. – 297 с.
6. <http://www.ansys.com>
7. <http://www.ls-dyna.ru>
8. Муйземнек А. Ю., Богач А. А. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA. Учеб. пособие. – Пенза: Инф.-изд. центр ПГУ, 2005. – 106 с.
9. LS-DYNA 971. Keyword User's Manual. – Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2007. – Vol. 1. – 2206 p.
10. Шленский П. С., Сидоренко Ю. М. Численное моделирование разлета продуктов детонации и распространения воздушных ударных волн при взрыве плоского заряда конечных размеров // Вісн. НТУУ “КПІ”. Сер. Машинобудування. – 2011. – № 62. – С. 223 – 232.
11. Бабкин А. В., Колтаков В. И., Охитин В. Н. и др. Численные методы в задачах физики взрыва и удара / Под ред. В. В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – Т. 3. – 516 с.
12. Рудаков К. М. Чисельні методи аналізу в динаміці та міцності конструкцій. Навчальний посібник. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2007. – 379 с.
13. Одинцов В. А., Сидоренко Ю. М. Моделирование процесса взрыва стандартного осколочного цилиндра с различной степенью детализации // Оборон. техника. – 2001. – № 1-2. – С. 17 – 20.
14. Андреев С. Г., Бабкин Ю. А., Баум Ф. А. и др. Физика взрыва. В 2 т. / Под ред. Л. П. Орленко – М.: Физматлит, 2002. – Т. 1. – 832 с.
15. Dobratz V. M. and Crawford P. C. LLNL Explosive Handbook. Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants. – Livermore, 1985. – 541 p.
16. Сидоренко Ю. М., Мариненко Я. О. Особливості застосування рівняння стану продуктів детонації під час проведення чисельного моделювання процесу вибуху саморобних вибухових пристроїв // Наук. вісті НТУУ “КПІ”. – 2012. – № 6 (86). – С. 94 – 102.
17. Колтаков В. И., Ладов С. В., Рубцов А. А. Математическое моделирование функционирования кумулятивных зарядов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. – 38 с.
18. Hallquist J. O. LS-DYNA. Theory Manual. – Livermore Software Technology Corporation, 2006. – 680 p.

Поступила 10. 04. 2012