

МАСШТАБНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ВЗРЫВНОМ РАЗРУШЕНИИ ЗАМКНУТЫХ СТАЛЬНЫХ СОСУДОВ

А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Сеницын
(Москва)

В настоящей работе исследовалось влияние масштаба на разрушение подобных замкнутых стальных сосудов, нагружаемых взрывом заключенного в них заряда ВВ.

Постановка опытов была аналогична описанной в [1]. Сосуды имели форму, близкую к сферической (рис. 1). Характеристики этих сосудов приведены в таблице.

Сосуды 2 и 4 были изготовлены из осколков сосуда 1. Материал листов, из которых штамповались днища для сосуда 1, имел такие механические характеристики: $\sigma_b = 50 \text{ кг/мм}^2$, $\sigma_{S0,2} = 28 \text{ кг/мм}^2$. У сосудов 2 и 4 эти характеристики, определенные с помощью образцов-свидетелей, оказались равными $\sigma_b = 52 \text{ кг/мм}^2$, $\sigma_{S0,2} = 28 \text{ кг/мм}^2$. Сосуд 3 был изготовлен из Ст. 25 с близкими к Ст. 22к механическими характеристиками: $\sigma_b = 54 \text{ кг/мм}^2$, $\sigma_{S0,2} = 27 \text{ кг/мм}^2$.

Все сосуды после сварки подвергались термообработке для снятия остаточных напряжений.

В экспериментах сосуды доводились до разрушения при последовательном увеличении веса взрывааемых зарядов. Последовательные взрывы в сосуде 1 проводились с интервалом в несколько суток, в сосудах 2, 3 и 4 — не менее 1 суток. Интервалы времени между последовательными

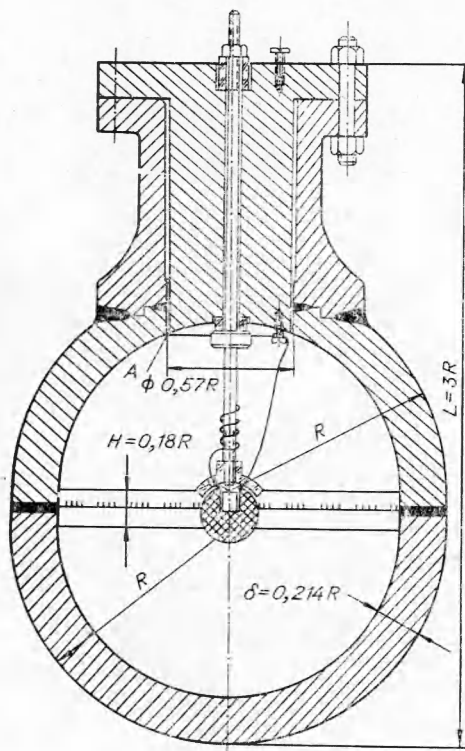


Рис. 1. Схема сосуда.

опытами превышали время релаксации остаточных напряжений от предыдущих подрывов [2]. Температура сосудов перед опытами была $-10^\circ\text{C} \div -20^\circ\text{C}$.

Сосуд 1 выдержал один взрыв заряда весом 3 кг и три взрыва зарядов весом 5 кг. При взрыве заряда весом 7,5 кг сосуд разрушился на две примерно равные части по сечению, перпендикулярному плоскости сварного соединения днища сосуда. При осмотре поверхностей разрушения после опыта каких-либо старых трещин, раковин или других дефектов в плоскости разрушения не замечено. Разрушение имело хрупкий характер с полюсом трещины в точке А (см. рис. 1). Фотография одного из двух осколков сосуда приведена на рис. 2, а. Максимальное тангенциальное напряжение на наружной по-

Номер сосуда	Сталь	R	M
1	22к	75	7120
2	22к	15	57
3	25	15	57
4	22к	5	2,1

Примечание. M — вес стальной сферической оболочки (кг) с наружным радиусом R (см) и толщиной 0,214 R.

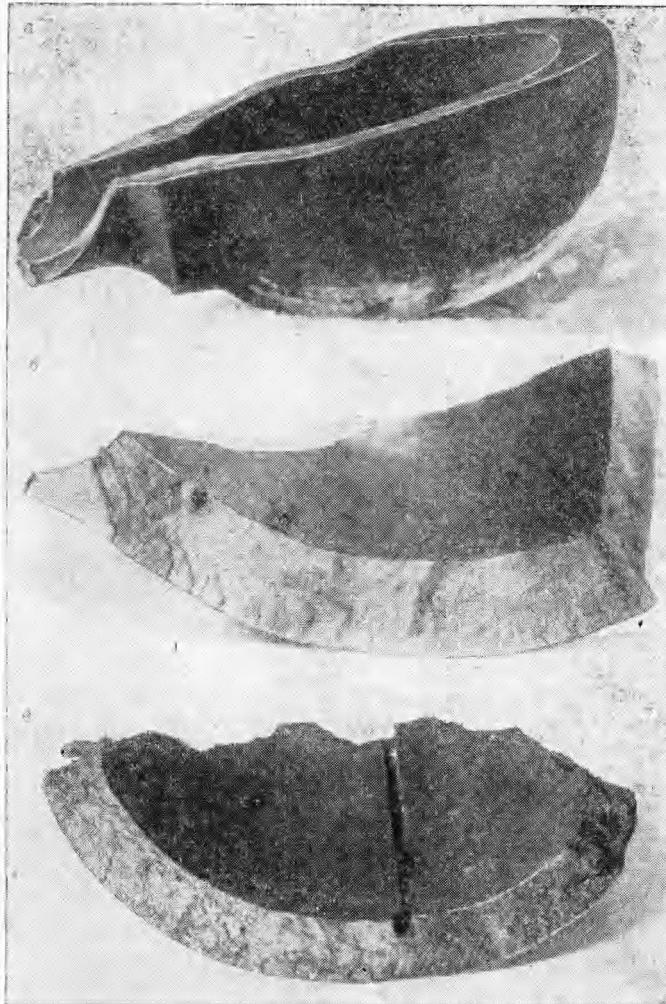


Рис. 2. Осколки сосудов 1 (а), 3 (б) и 4 (в) после разрушения взрывом.

верхности сосуда, зарегистрированное в опыте, в котором произошло разрушение сосуда, оказалось равным $12,0 \text{ кг/мм}^2$, т. е. ниже статического напряжения текучести.

Сосуд 2 выдержал 12 подрывов (2 заряда по 25 г, 2— по 37 г, 2— по 60 г, 2— по 130 г, 2— по 247 г, 1— 300 г и 1— 340 г). Подрыв в сосуде заряда весом 400 г привел к его разрушению.

Сосуд 3 выдержал 24 подрыва (4 заряда по 38 г, 6— по 60 г, 4— по 130 г, 2— по 163 г, 2— по 200 г, 2— по 240 г, 2— по 290 г, 2— по 300 г). При подрыве заряда весом 400 г сосуд разрушился на несколько частей. Фотография одного из осколков приведена на рис. 2, б.

В этих опытах с помощью емкостного датчика [3] записывались кривые, скорость наружной поверхности сосуда— время, по которым пересчетом определялась тангенциальная деформация стенок сосудов. В опыте с зарядом 400 г (сосуд разрушился) максимальная деформация наружной поверхности сосуда оказалась равной $\sim 0,3\%$, т. е. заметно превышала деформацию текучести, которая, как было отмечено в работе [1], равна $\sim 0,12\%$.

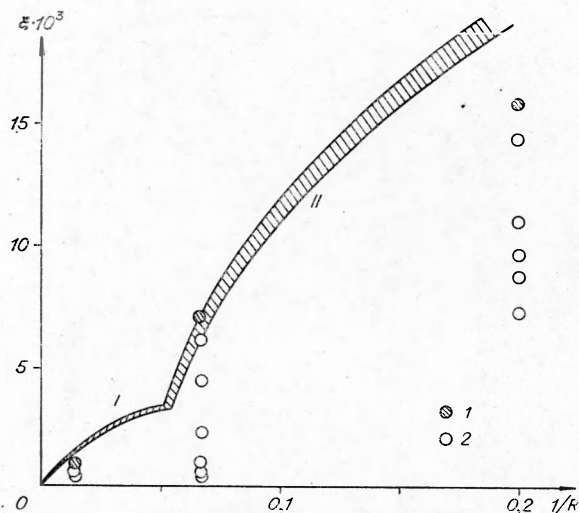


Рис. 3. Результаты экспериментов. $\xi = m/M$ — относительный вес заряда ВВ, m — вес заряда. 1 — сосуд разрушен; 2 — сосуд не разрушен. Расчетные области разрушения: I — упругая, II — упруго-пластическая.

сварному шву, а перпендикулярно ему, хотя шов имел непровар с внутренней стороны на глубину $\sim 1/4$ толщины стенки.

Результаты экспериментов с сосудами из стали 22к в координатах $\xi = f\left(\frac{1}{R}\right)$ приведены на рис. 3. Из экспериментов следует, что уменьше-

ние размеров сосуда в 15 раз привело к увеличению относительного веса разрушающего заряда в 15—16 раз, в то время как критерию разрушения сосудов при статическом нагружении — тождественности напряженных состояний исследуемых сосудов — при взрывном нагружении сосудов соответствует условие $\xi = \text{const}$ [4].

Объяснить такой результат можно изменением механических свойств материала сосудов, которое вызвано изменением скорости деформирования при увеличении размеров сосуда. Скорость деформирования сферической оболочки $\frac{d\varepsilon}{dt} \sim \frac{V(t)}{R}$, где $V(t)$ — скорость смещения стенки сосуда. У исследованных сосудов для геометрически подобных систем сосуд — заряд максимальное различие скоростей деформирования не превышало 15-кратного, а максимальное различие скоростей деформирования в опытах, когда произошло разрушение сосудов, достигало 200-кратного. Согласно [5], такое изменение скорости деформирования может привести к изменению предела текучести материала сосуда не более чем на 20%.

Оценки изменения разрушающих напряжений из-за изменения времени нахождения материала под нагрузкой, сделанные на основании работ [6—8] показали, что эти изменения незначительны и не могут объяснить результаты экспериментов.

Нельзя исключить возможность накопления необратимых изменений в материале сосудов, так как последние доводились до разрушения при последовательном повышении веса подрываемого заряда. Однако тот факт, что сосуд 1, в котором до разрушения было взорвано наименьшее количество зарядов, разрушился при ξ меньшем, чем сосуды 2, 3 и 4, говорит о том, что при однократном подрыве масштабный эффект может быть только большим.

Сосуд 4 выдержал взрывы двух сферических зарядов по 15 г и по одному взрыву зарядов весом 18, 20, 23 и 30 г. Разрушение сосуда произошло при взрыве заряда весом 33 г. Заряды весом более 20 г имели удлиненную форму из-за невозможности (без нарушения геометрического подобия сосуда) ввести сферический заряд такого веса через горловину сосуда. Удалось найти только один осколок сосуда размером примерно в $1/4$ его поверхности (рис. 2, в). Обращает на себя внимание тот факт, что разрушение произошло не по

Удовлетворительное объяснение масштабного эффекта удается получить, введя в рассмотрение энергию распространения трещины. Согласно [9], эта энергия при динамическом изгибе составляет заметную долю (13—15%) от первоначальной энергии конструкции. Сообщенная сосуду энергия (Q_1) частично проявляется как энергия (Q_2), циклически переходящая, вследствие волновых процессов при ударе, из энергии упругой деформации материала в кинетическую энергию его движения, а частично необратимо диссипирует, главным образом в процессе пластического течения материала сосуда. Если ξ мало и пластическая деформация отсутствует, то $Q_1 = Q_2$.

Рассмотрим два подобных элемента стенок сосудов, различающихся линейными размерами в n раз и нагруженных взрывами зарядов при $\xi = \text{const}$. В соответственные моменты времени напряженные состояния их будут тождественны. Предположим, что удельная энергия образования 1 см^2 трещины (q_3) постоянна, тогда полные энергии, затрачиваемые на прохождение трещин через подобные элементы сосудов, будут различаться в n^2 раз. В то же время запасы упруго-кинетической (Q_2) энергии, из которой черпается энергия на распространение трещины, различаются в этих элементах в n^3 раз. Это, означает, что сосуд большего размера должен разрушаться при меньшем значении ξ , чем сосуд меньшего размера.

Для количественного описания процесса динамического разрушения сосудов введем безразмерный определяющий параметр

$$\frac{Q_2}{Q_3} = \frac{Rq_2}{q_3} = \text{const}, \quad (1)$$

содержащий характерный размер R . Здесь Q_3 — полная энергия, идущая на распространение трещины, q_2 — удельная упруго-кинетическая энергия. Так как величина q_2 составляет лишь часть удельной полной энергии q_1 ($q_2 = \eta q_1$), то выражение (1) можно переписать в виде

$$\frac{q_1}{q_3} = \frac{\text{const}}{\eta R}. \quad (2)$$

Значение η находится из диаграммы σ — ϵ для материала сосуда как отношение энергии упругой деформации к полной. Для материала с линейным упрочнением ($E_2 = \text{const}$)

$$\eta = \lambda + (1 - \lambda) \frac{q_0}{q_1}, \quad (3)$$

где $\lambda = \frac{E_2}{E_1}$; E_1 — модуль Юнга; q_0 — удельная энергия упругой деформации на пределе текучести.

Выразим q_0 и η через максимальную деформацию сосуда (ϵ) и деформацию на пределе текучести (ϵ_0). Для материала с линейным упрочнением отношение максимального тангенциального напряжения (σ) к напряжению текучести (σ_S) можно записать в виде

$$\frac{\sigma}{\sigma_S} = 1 - \lambda + \lambda \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \sqrt{\frac{q_2}{q_0}}$$

или

$$\frac{\eta q_1}{q_0} = \left(1 - \lambda + \lambda \frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2. \quad (4)$$

Из формул (3) и (4) получаем

$$q_0 = q_1 \lambda \left[\left(1 - \lambda + \lambda \frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2 - (1 - \lambda) \right]^{-1}, \quad (5)$$

$$\eta = \lambda \left(1 - \lambda + \lambda \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \left[\left(1 - \lambda + \lambda \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 - (1 - \lambda) \right]^{-1}. \quad (6)$$

Согласно [10], величина q_1 может быть записана в виде

$$q_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{8}{27} \right)^2 \rho D^2 \xi^2 = \kappa \xi^2. \quad (7)$$

В рассмотренных выше экспериментах $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$, $D = 7,6 \text{ км/сек}$. Из формул (2), (3) и (7) можно получить следующее выражение, связывающее относительный вес разрушающего заряда с параметрами сосуда и ВВ:

$$\xi^2 + \frac{(1 - \lambda)}{\lambda} \cdot \frac{q_0}{\kappa} = \frac{C_1}{R\lambda}, \quad (8)$$

где

$$C_1 = \frac{\text{const}}{\kappa} q_3.$$

Для идеально упругого материала ($\lambda = 1$) выражение (8) упрощается:

$$\xi^2 = \frac{C_1}{R}. \quad (9)$$

Из выражения (8) следует, что масштабный эффект увеличивается при уменьшении величины λ . Из формул (5), (7) и (8) легко также получить выражение, связывающее радиус сосуда с величиной максимальной деформации при разрушении:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{R_0}{R} - \frac{1 - \lambda}{\lambda}}, \quad (10)$$

где $R_0 = \frac{C_1 \kappa}{q_1}$ — радиус сосуда, разрушающегося на пределе текучести.

Полученные выражения позволяют по результатам опытов с сосудом одного размера найти параметры разрушающих зарядов для сосудов, подобных испытанному. Величины q_0 и C_1 были вычислены по результатам опыта с сосудом 2 при разрушении ($\varepsilon = 0,3\%$, $\xi = 0,7 \cdot 10^{-2}$) и предыдущего опыта, в котором сосуд сохранился ($\xi = 0,6 \cdot 10^{-2}$).

Вычисленные значения η и ε для сосуда 1 равны 1 и 0,06% (экспериментальное значение $\varepsilon = 0,042\%$), а для сосуда 4 — 0,11 и 1,47% соответственно.

Отклонение экспериментальной точки разрушения сосуда 4 от расчетной может быть связано с различием формы разрушающих зарядов, подрывавшихся в сосудах 2 и 4 (сферический в сосуде 2 и удлиненный в сосуде 4), что могло снизить экспериментальное значение величины ξ , соответствующей разрушению сосуда 4.

Гипотеза об определяющей роли энергии образования трещин в процессе динамического разрушения сосудов позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные и понять причины, вызывающие сильные масштабные эффекты. При распространении трещины упруго-кинетическая энергия оболочки выделяется в трещине (оболочка «разгружается» на трещине), а так как величина этой энергии, приходящаяся на единичную поверхность трещины, различна для геометрически подобных сосудов разных размеров при сохранении подобия системы сосуд — заряд, то это обуславливает различие относительных весов разрушающих зарядов для этих сосудов. Детальный механизм этого явления остается неясным.

Дальнейшие исследования в этом направлении, возможно, позволят перенести гипотезу об определяющей роли энергии распространения трещин и на разрушение произвольных конструкций при динамическом воздействии, когда нельзя пренебрегать волновыми процессами. В частности, следует ожидать масштабных эффектов и в процессе растрескивания грунтов при подземных взрывах, хотя и в меньшей степени ввиду хрупкости горных пород.

Поступила в редакцию
6/IV 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Иванов, С. А. Новиков, В. А. Синицын. ПМТФ, 1968, 6.
2. T. Wreeland, D. S. Wood, D. S. Clark. Amer. Soc. Metals, 1953, 45.
3. А. Г. Иванов, С. А. Новиков. ПТЭ, 1963, 1.
4. W. E. Baker. J. Appl. Mech., 1960, 27, 1.
5. G. Taylor. J. of the Inst. of Civil Eng., 1946, 8.
6. С. Н. Журков, Б. Н. Нарзуллаев. ЖТФ, 1953, XXIII, 10.
7. Ю. И. Тарасов. Докл. АН СССР, 1965, 165, 2.
8. Л. В. Альтшулер, С. А. Новиков, И. И. Дивнов. Докл. АН СССР, 1966, 166, 1.
9. В. Н. Финкель, И. А. Куткин. Изв. вузов. Черная металлургия, 1967, 8.
10. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. Физматгиз, 1969.

УДК 541.124

ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

В. И. Головичев, В. И. Димитров

(Новосибирск)

1. Основными задачами химической кинетики являются определение термодинамических параметров и состава реагирующей смеси в любой момент времени реакции и задача определения значений констант скоростей индивидуальных реакций в реагирующей смеси. По аналогии с известными задачами спектроскопических расчетов эти две основные кинетические задачи могут быть названы соответственно прямой и обратной.

При решении прямой кинетической задачи для многокомпонентной смеси исходная система уравнений представляет собой закон действующих масс, записанный по каждому реагирующему компоненту, к которым присоединяются уравнения состояния и сохранения энергии. Если компонентов N и возможных реакций S , то для i -го компонента уравнение сохранения массы имеет вид

$$\frac{dy_i}{dt} = M_i \sum_{j=1}^S (v''_{ij} - v'_{ij}) k_j \rho^{n_j} \prod_{i=1}^N \left(\frac{y_i}{M_i}\right)^{v'_{ij}} \left[1 - \rho \sum_{i=1}^N (v''_{ij} - v'_{ij}) K_{cj}^{-1} \prod_{i=1}^N \left(\frac{y_i}{M_i}\right)^{v''_{ij} - v'_{ij}} \right], \quad (1)$$