

УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКИ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

В. Г. Баженов, В. В. Егунов, С. В. Крылов,
С. А. Новиков*, Ю. В. Батьков*

Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета, 603950 Нижний Новгород

* Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607190 Саров

Излагается методика численного моделирования нелинейных осесимметричных процессов гидровзрывной штамповки в связанной постановке. Проведено сопоставление результатов численного решения с экспериментальными данными по гидровзрывному нагружению круглых пластин. Получено хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов.

Гидровзрывная штамповка как один из способов использования энергии взрыва применяется для изготовления деталей из высокопрочных материалов с середины 50-х гг. XX в. Теоретические основы гидровзрывной штамповки содержатся в работах [1–5], авторы которых внесли значительный вклад в их разработку. Однако существующие в настоящее время методы решения технологических задач в силу необходимости учета различных факторов (детонации взрывчатых веществ (ВВ), распространения ударных волн в жидкости, высокоскоростного пластического деформирования заготовки) позволяют дать лишь оценку основных технологических параметров. Использование аналитических методов возможно только при существенных упрощениях. Поэтому практически единственная возможность теоретического анализа таких задач — применение численных методов.

Постановка задачи и метод решения. Рассматриваемая задача формулируется в двумерной связанной постановке. Для описания динамического деформирования заготовки, ее взаимодействия с жидкостью и матрицей используется методика [6, 7], которая основана на соотношениях механики сплошных сред. Связь тензора скоростей деформаций со скоростями перемещений в метрике текущего состояния в цилиндрической системе координат (r, β, z) принимается в следующем виде:

$$\dot{\epsilon}_{rr} = \dot{v}_{r,z}/r - \dot{v}_r/r^2, \quad \dot{\epsilon}_{zz} = \dot{v}_{z,z}/r, \quad \dot{\epsilon}_{\beta\beta} = \dot{v}_r/r^2,$$

$$\dot{\epsilon}_{rz} = (\dot{v}_{r,z}/r + \dot{v}_{z,r}/r - \dot{v}_z/r^2)/2,$$

где $\dot{v}_\alpha = r\dot{u}_\alpha$ ($\alpha = r, z$); \dot{u}_α — компоненты вектора скорости перемещений. Символ после запятой обозначает дифференцирование по соответствующей переменной, точка сверху — частную производную по времени.

Вариационное уравнение движения записывается в цилиндрической системе координат в форме уравнения Журдена

$$\iint_{\Omega} \left[\sigma_{rr} \delta \dot{v}_{r,r} + \sigma_{zz} \delta \dot{v}_{z,z} + \sigma_{rz} (\delta \dot{v}_{r,z} + \delta \dot{v}_{z,r}) - \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\beta\beta}}{r} \delta \dot{v}_r - \frac{\sigma_{rz}}{r} \delta \dot{v}_z + \rho (\ddot{u}_r \delta \dot{v}_r + \ddot{u}_z \delta \dot{v}_z) \right] d\Omega - \\ - \int_{G_p} (p_r \delta \dot{v}_r + p_z \delta \dot{v}_z) ds - \int_{G_q} (q_r \delta \dot{v}_r + q_z \delta \dot{v}_z) ds = 0. \quad (1)$$

Здесь σ_{ij} ($i, j = (r, \beta, z)$) — компоненты тензора напряжений; p_α, q_α — компоненты поверхностной нагрузки и контактного давления; ρ — плотность.

Уравнение (1) дополняется соответствующими начальными и кинематическими граничными условиями. Упругопластическое деформирование заготовки описывается уравнениями теории пластического течения с линейным кинематическим упрочнением.

Задача решается вариационно-разностным методом по явной схеме типа “крест” [7]. Большие деформации и формоизменение учитываются при пошаговой перестройке геометрии заготовки в эйлеровой цилиндрической системе координат. При расчете разрывных решений применяется аппарат сглаживания, основанный на использовании консервативной искусственной вязкости [8].

Для описания динамики жидкости и продуктов детонации используются законы сохранения массы, импульса и энергии, записанные в форме законов Эйлера [9]:

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{v} \right) d\Omega = 0, \\ \int_{\Omega} \left(\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \operatorname{div} [p \mathbf{n} + (\mathbf{v}, \mathbf{n}) \rho \mathbf{v}] \right) d\Omega = 0, \quad \int_{\Omega} \left(\frac{\partial e}{\partial t} + \operatorname{div} (e + p) \mathbf{v} \right) d\Omega = 0,$$

где p — давление; \mathbf{v} — вектор скорости; \mathbf{n} — вектор внешней нормали; e — внутренняя энергия.

Уравнение состояния принимается в виде

$$e = [p + fB(1 - \rho/\rho_0)]/[\rho(f - 1)],$$

где f, B, ρ_0 — константы. Система уравнений интегрируется численно с использованием модифицированной схемы Годунова [10], имеющей второй порядок точности на гладких решениях и монотонное поведение на разрывах.

Для моделирования процесса подрыва заряда ВВ применяется лучевая схема детонации. Согласно этой схеме каждая точка ВВ, до которой доходит детонационная волна, исходящая из заранее заданной области инициации, становится источником детонации и излучает детонационную волну. В соответствии с гидродинамической теорией детонации скорость распространения детонационной волны D постоянна и связана с калорийностью Q взрывчатого вещества соотношением $D^2 = 2(\gamma^2 - 1)Q$ (γ — показатель адиабаты продуктов детонации). Таким образом, детонация от точки инициирования распространяется по лучам. Вызванное химическими реакциями энерговыделение учитывается посредством увеличения внутренней энергии e на величину, соответствующую калорийности Q , в тех счетных ячейках, через которые проходит фронт детонационной волны.

Условия на поверхностях контакта жидкости с пластиной формулируются в виде условий непроникания на участках поверхностей, находящихся в данный момент в контакте, и условий на свободных границах на остальных участках. Критерием перехода от условий непроникания к условиям на свободной границе, образующейся в результате отрыва,

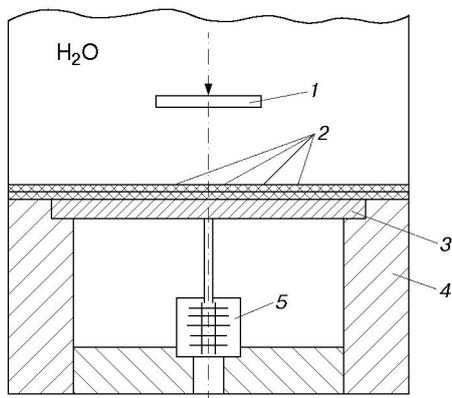


Рис. 1

служит выполнение неравенства $q < q_k$ (q — контактное давление; $q_k = 0$ — константа, характеризующая прочность жидкости на отрыв). Критерием вступления в контакт является пересечение поверхностей взаимодействующих объектов.

Методика эксперимента. Для экспериментальной проверки точности результатов численного моделирования проведены опыты по гидровзрывному нагружению круглых пластин. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Заряд ВВ 1 массой 48 г помещался в полиэтиленовый мешок с водой на расстоянии 30 мм от круглой пластины (заготовки) 3 из стали X18H10T (диаметр 155 мм, толщина 6 мм), которая в свою очередь вставлялась в опорный цилиндр 4.

Проводились измерения действующего на заготовку давления и перемещения ее центральной зоны (полуса). Для измерения давления применялись манганиновые датчики. Методика измерения с использованием этих датчиков описана в [11]. Четыре манганиновых датчика 2 типа ДМ-50, представляющие собой плоскую прямоугольную решетку площадью 6×7 мм из манганиновой проволоки типа ПЭМС диаметром 0,05 мм, устанавливались следующим образом: один в центре пластины, два на расстоянии 30 мм и один на расстоянии 50 мм от центра пластины. Датчики изолировались от стальной пластины фторопластовой пленкой толщиной 0,2 мм. Изменение сопротивления датчиков регистрировалось по мостовой схеме прибором ПИИД-4 и катодным осциллографом ОК-33. Чувствительность измерительного канала не менее 2 В/ГПа, погрешность измерения амплитуды давления не более 10 %.

Перемещение пластины измерялось с помощью электроконтактного датчика 5. В качестве контактов в датчике применялась латунная фольга толщиной 0,05 мм. Шток датчика устанавливался вплотную к пластине. При движении пластины происходит последовательное замыкание иглой штока рабочих контактов, которое формирует на специальных RC-цепочках блока формирования сигналов электрические импульсы, регистрируемые осциллографами с растровой разверткой СВР-5.

До начала опыта на заготовку были нанесены концентрические окружности. Измерение радиусов этих окружностей по окончании опыта позволило оценить распределение кольцевых деформаций ε_θ на одной из поверхностей детали. Одновременно измерялась толщина детали в различных точках.

Сопоставление результатов расчетов и экспериментов. Расчетная область покрывалась сеткой четырехугольных элементов (рис. 2), число которых составляло: для заготовки — 150, для заряда ВВ — 280, для области, занятой водой, — 952, для опорного кольца — 32. Механические характеристики материала пластины и опорного кольца принимались следующими: $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $\nu = 0,3$, $\rho = 7,8$ г/см³, $\sigma_T = 230$ МПа,

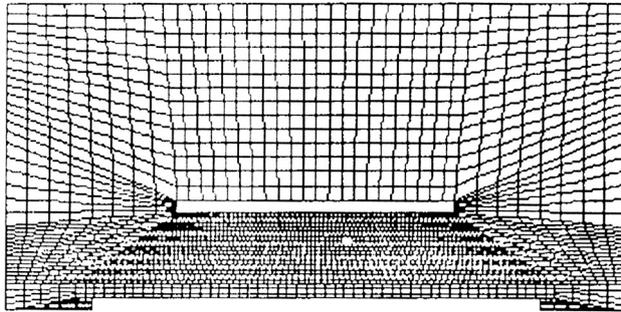


Рис. 2

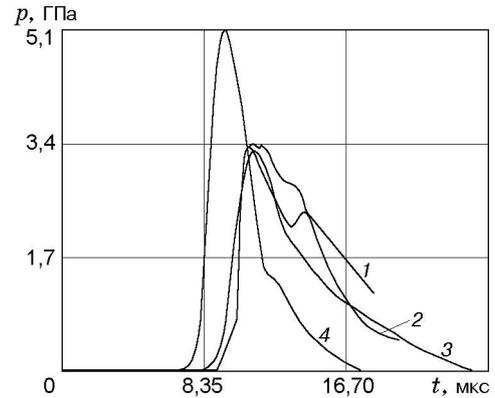


Рис. 3

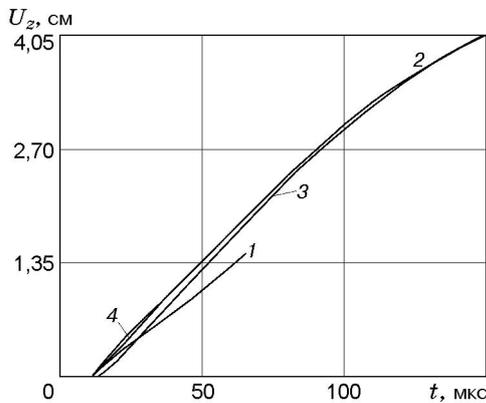


Рис. 4

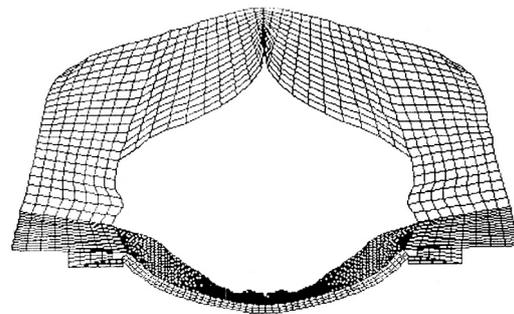


Рис. 5

модуль упрочнения $g = 830$ МПа. Константы, входящие в уравнение состояния для воды: $\rho_0 = 1$ г/см³, $B = 304,5$ МПа, $f = 7,15$. Для расчета процесса детонации приняты следующие значения: $D = 8,75$ км/с, $Q = 5300$ Дж/г, $\gamma = 1,25 + 1,51\rho/\rho_0$, $\rho_0 = 1,55$ г/см³.

Результаты расчетов и экспериментов приведены на рис. 3–6. На рис. 3 представлены зависимости давления $p(t)$, действующего в центре заготовки (кривые 1, 2 — экспериментальные данные, полученные в результате двух идентичных опытов; кривые 3, 4 — расчетные данные, полученные по лучевой модели и модели “мгновенной” детонации соответственно). На рис. 4 приведены экспериментальные и расчетные зависимости перемещения центральной точки заготовки $U_z(t)$ (обозначения те же, что на рис. 3). Расчетная область на конечном этапе деформирования представлена на рис. 5.

Процесс штамповки условно можно разбить на несколько этапов. На первом этапе происходит подрыв ВВ, его превращение в расширяющиеся продукты детонации. Вторым этапом связан с распространением ударных волн в окружающей ВВ жидкости и взаимодействием их с заготовкой. Амплитуда давления, действующего в центральной зоне заготовки, достигает 3,4 ГПа, длительность импульса составляет примерно 15 мкс. С использованием лучевой модели получена зависимость $p(t)$, хорошо согласующаяся с экспериментальными данными. Применение более простой модели “мгновенной” детонации, в том случае если размеры заряда ВВ соизмеримы с расстоянием до заготовки, приводит к существенным погрешностям в определении амплитуды действующего на заготовку давления (см. рис. 3).

На третьем этапе происходит интенсивное динамическое деформирование заготовки, отделение ее от жидкости (при $t \approx 25$ мкс) и движение по инерции. Процесс деформиро-

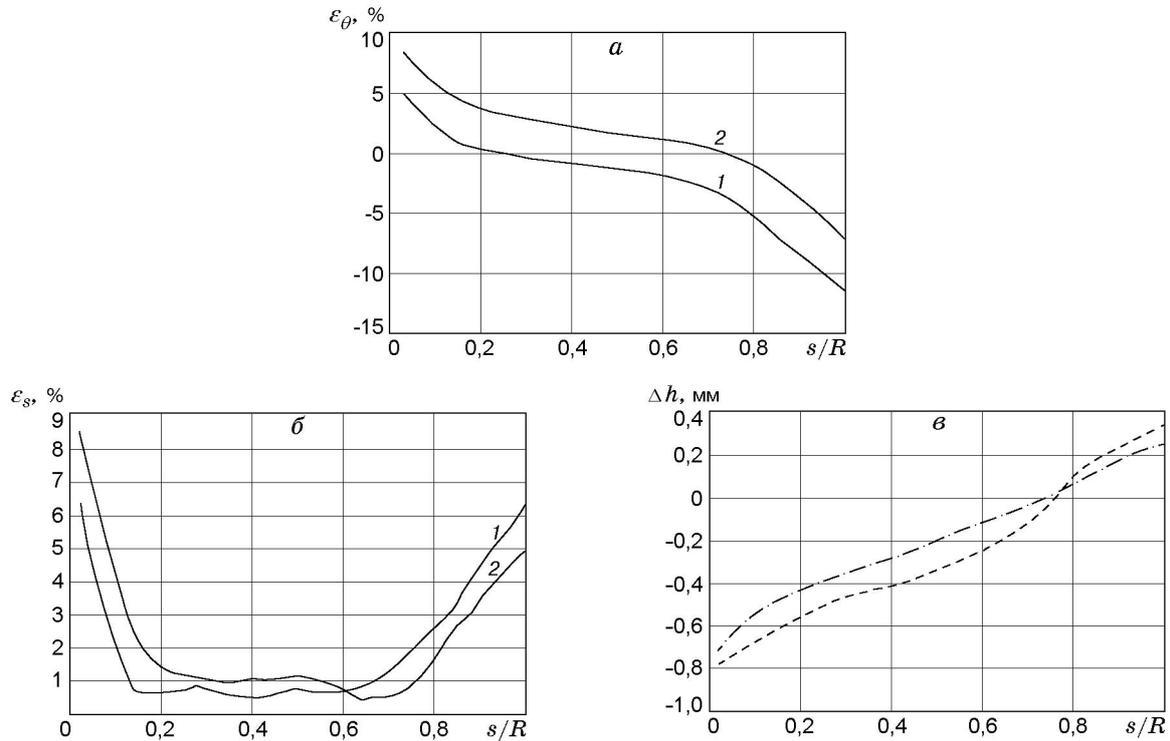


Рис. 6

вания заканчивается к моменту $t \approx 160$ мкс. В расчетах максимальное значение прогиба составляло 43 мм (см. рис. 4). Измерение заготовки после опыта показало, что максимальный прогиб составил 48 мм. Расчетные кривые перемещения центральной зоны заготовки, полученные с использованием модели “мгновенной” детонации и лучевой модели, практически совпадают. Это обусловлено тем, что импульсы давления, действующие на заготовку, различаются незначительно.

На рис. 6, а, б приведены соответственно эпюры кольцевых (ε_θ) и меридиональных (ε_s) деформаций, построенные на внутренней (кривые 1) и наружной (кривые 2) поверхностях заготовки. На рис. 6, в представлены эпюры изменения толщины заготовки Δh (штриховая кривая — эксперимент, штрихпунктирная — расчет). Здесь s/R — безразмерная длина дуги, отсчитываемая от оси симметрии заготовки.

Из расчетов следует, что напряженно-деформированное состояние близко к безмоментному. Максимальные деформации реализуются вблизи края и оси симметрии, причем кольцевые деформации являются знакопеременными (сжимающими в зоне, примыкающей к краю заготовки, и растягивающими вблизи оси симметрии), а меридиональные деформации везде положительные. Изменение толщины заготовки неравномерное. В зоне, примыкающей к краю заготовки, размер которой примерно равен $0,3R$, происходит увеличение толщины, что связано со значительными сжимающими кольцевыми деформациями в ней. Толщина детали, измеренная после опыта в десяти точках по образующей, удовлетворительно согласуется с соответствующими расчетными значениями.

Заключение. Разработана методика математического моделирования процесса гидровзрывной листовой штамповки, реализованная в программном комплексе “Динамика-2” [12]. Хорошее соответствие численных и экспериментальных результатов по основным параметрам нагружения и деформирования позволяет рекомендовать ее для использования при отработке технологических процессов, связанных с гидровзрывной штамповкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пихтовников Р. В., Завьялова В. И.** Штамповка листового металла взрывом. М.: Машиностроение, 1964.
2. **Степанов В. Г., Шавров И. А.** Импульсная металлообработка в судовом машиностроении. Л.: Судостроение, 1968.
3. **Борисевич В. К.** Общий подход к определению параметров внешних нагрузок при штамповке взрывом // Импульсная обработка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. С. 14–25.
4. **Борисевич В. К., Сабелькин В. П., Солодянкин С. Н.** О численном моделировании процесса взрывной штамповки на ЭВМ // ПМТФ. 1979. № 2. С. 165–175.
5. **Штамповка взрывом. Основы теории** / Под ред. М. А. Анучина. М.: Машиностроение, 1972.
6. **Баженов В. Г., Зефирова С. В., Цветкова И. Н.** Численное моделирование задач нестационарного контактного взаимодействия деформируемых конструкций // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов: Всесоюз. межвуз. сб. Н. Новгород: Изд-во Нижегород. ун-та, 1995. Вып. 52. С. 154–160.
7. **Баженов В. Г., Зефирова С. В., Кибец А. И.** О численной реализации вариационно-разностной моментной схемы решения нелинейных задач динамики нетонких оболочек при импульсных воздействиях // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения: Всесоюз. межвуз. сб. Горький: Изд-во Горьк. ун-та, 1988. Вып. 38. С. 66–73.
8. **Баженов В. Г., Зефирова С. В.** О консервативном сглаживании разрывных волн напряжений в МКЭ // Вестн. Нижегород. ун-та. Сер. Механика. 2001. Вып. 1. С. 166–173.
9. **Численное решение многомерных задач газовой динамики** / Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976.
10. **Абузяров М. Х., Баженов В. Г., Кочетков А. В.** О новом эффективном подходе повышения точности схемы Годунова // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения: Всесоюз. межвуз. сб. Горький: Изд-во Горьк. ун-та, 1987. Вып. 35. С. 44–50.
11. **Батьков Ю. В., Новиков С. А., Погорелов А. П., Сеницын В. А.** Исследование процесса взрывчатого превращения состава ТГ 50/50 за фронтом нестационарной ударной волны // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 5. С. 139–141.
12. **Баженов В. Г., Зефирова С. В., Кочетков А. В. и др.** Программный комплекс “Динамика-2” // Программные системы: Науч.-техн. сб. Томск: Том. политехн. ин-т, 1999. С. 40–45.

*Поступила в редакцию 18/XII 2000 г.,
в окончательном варианте — 12/III 2002 г.*
