

## Упругие деформации пластин в пороховой пресс-пушке

А.Н. СЕМКО

Донецкий национальный университет

Численно исследованы малые упругие деформации тонких круглых пластин в гидроимпульсной пресс-пушке с пороховым приводом. Деформации пластин описывались дифференциальным уравнением четвертого порядка, которое аппроксимировалось центральными разностями со вторым порядком точности. Осесимметричное движение жидкости описывалось уравнениями газовой динамики, которые решались методом Годунова. Горение пороха происходило по геометрическому закону и рассматривалось в квазистационарной постановке. Получены прогибы для пластин разной толщины из разных материалов для разной энергии порохового заряда.

Чисельно досліджені малі пружні деформації тонких круглих пластин у гідроімпульсній прес-гарматі з пороховим приводом. Деформації пластин описувалися диференціальним рівнянням четвертого порядку, що апроксимувалося центральними різницями із другим порядком точності. Вісісиметричний рух рідини описувалося рівняннями газової динаміки, які вирішувалися методом Годунова. Горіння пороху відбувалося за геометричним законом і розглядалося в квазістаціонарній постановці. Отримано прогини для пластин різної товщини з різних матеріалів для різної енергії порохового заряду.

Small elastic deformations of thin cycling plates in a hydropulse-gun with a powder drive are numerically investigated. Deformations of plates were described by the differential equation of the fourth order which was approximated by the central differences with the second order of accuracy. Axes-symmetrical movement of a liquid was described by the equations of gas dynamics which were solved by Godunov's method. Burning of gunpowder occurred under the geometrical law and was considered in quasisteady approach. Deflections for plates of different thickness from different materials for different energy of a powder charge are received.

**Введение.** Гидроимпульсная обработка металлов давлением нашла широкое применение в различных технологических процессах [1]. Большое распространение получила штамповка листовых материалов. К преимуществам гидроимпульсной штамповки перед традиционной штамповкой на прессах следует отнести упрощение конструкции и снижение стоимости оснастки благодаря отсутствию пуансона; большие энергетические возможности метода, позволяющие осуществлять штамповку крупногабаритных деталей из высокопрочных металлов и сплавов; возможность изготовления листовых деталей, отличающихся большой точностью, как размеров, так и формы. Методом гидроимпульсной штамповки можно изготавливать детали из цветных металлов, стали, высокопрочных алюминиевых и титановых сплавов.

Источниками энергии в гидроимпульсных пресс-пушках (ПП) чаще всего служат предварительно разогнанный поршень, взрывчатое вещество и электрический разряд. В работах [2–5] исследовалось поле давлений на жесткой преграде в ПП с поршнем, который разогнался за счет энергии сжатого газа или продуктов сгорания пороха. По сравнению с поршневым, в пороховой ПП энергия продуктов сгорания пороха непосредственно передается объекту обработки. Пороховая ПП не имеет поршня, поэтому ее конструкцию более простая и надежная, т.к. не содержит движущихся частей, работающих под высоким давлением.

В настоящей работе исследуются гидродинамические параметры пороховой ПП, оцениваются упругие деформации круглой тонкой пластины, как объекта обработки.

**Постановка задачи.** На рис. 1 приведена схема пороховой ПП, в которой можно выделить следующие основные элементы: 1 – пороховой заряд, 2 – корпус, 3 – вода, 4 – заготовка, 5 – матрица. Процесс в пороховой ПП начинается с воспламенения пороха. Давление

газов, образующихся при сгорании пороха, передается через воду заготовке, имеющей форму тонкой пластины, которая расположена на матрице, и вызывает ее деформацию. Рабочей средой в ПП является вода, а источником энергии – продукты сгорания пороха.

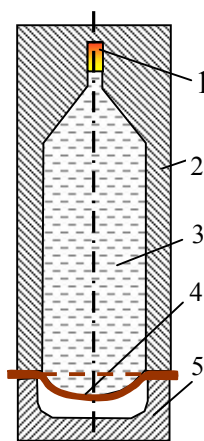


Рис. 1

Для описания процессов в ПП жидкость считаем идеальной и сжимаемой, движение жидкости осесимметричным и изэнтропическим, корпус установки жестким, заготовку тонкой круглой пластиной, закрепленной по контуру, упругие деформации пластины малыми. Сделаем дополнительные допущения, учитывающие конструктивные особенности установки. Границу раздела «пороховые газы - вода» считаем плоской, теплообмен между продуктами сгорания и корпусом не учитываем, считаем, что горение пороха происходит параллельными слоями по геометрическому закону, как принято в артиллерии [6].

Начало координат поместим в центре пластины, ось  $x$  направим в сторону деформации пластины, за начальный прием момент воспламенения пороха.

В принятой постановке осесимметричное движение жидкости описывалось системой уравнений нестационарной газовой динамики со следующими начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p r}{\partial t} + \frac{\partial p u r}{\partial x} + \frac{\partial p v r}{\partial r} &= 0; \\ \frac{\partial p u r}{\partial t} + \frac{\partial (p + \rho u^2) r}{\partial x} + \frac{\partial p u v r}{\partial r} &= 0; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial pvr}{\partial t} + \frac{\partial puvr}{\partial x} + \frac{\partial (p + \rho u^2)}{\partial r} r = p; \\
& u(0, x, r) = 0; \quad v(0, x, r) = 0; \quad p(0, x, r) = p_0; \\
& \quad -L \leq x \leq 0, \quad 0 \leq r \leq R_c; \\
& u(t, x_g, r) = u_g, \quad p(t, x_g, r) = p_g, \quad 0 \leq r \leq R_c; \\
& \quad v(t, x, R_c) = 0, \quad x_g \leq x \leq 0; \\
& w_n(x_G, r_G, t) = u_{Gn}, \quad p(x_G, r_G, t) = p_G; \\
& p = \begin{cases} B \left[ (\rho / \rho_0)^n - 1 \right], & \rho > \rho_0, \\ 0, & \rho \leq \rho_0. \end{cases} \quad (2)
\end{aligned}$$

Здесь  $B = 304,5$  МПа,  $n = 7,15$ ,  $\rho_0 = 10^3$  кг/м<sup>3</sup> - постоянные в уравнении состояния воды в форме Тэта;  $t$  - время;  $x$  и  $r$  - осевая и радиальная координаты;  $u$  и  $v$  - осевая и радиальная компоненты скорости;  $p$  и  $\rho$  - давление и плотность;  $p_0$  - начальное давление жидкости;  $L$  - длина части ствола, заполненного водой;  $R_c$  - радиус ствола;  $x_g$  и  $u_g$  - координата и скорость границы раздела "пороховые газы - вода";  $p_g$  - давление пороховых газов  $u_{Gn}$  - нормальная компонента скорости движения пластины;  $w_n$  - нормальная компонента скорости жидкости;  $x_G$  и  $r_G$  - координаты пластины;  $p_G$  - давление на пластине. Уравнение состояния жидкости (2) бралось в форме, которая учитывала возникновение кавитации [2, 8]. Для описания движения жидкости с кавитацией использовалась модель кавитации с постоянным давлением. Предполагалось, что жидкость совсем не выдерживает растягивающих напряжений и при их возникновении разрушается, т.е. наступает кавитация. В области кавитации давление полагалось равным нулю, и считалось, что жидкость оставалась сплошной средой, отдельные частицы которой двигались разлетаясь. Со временем под действием волн сжатия эта область может ликвидироваться, а жидкость возвратиться в обычное состояние.

Малые упругие деформации тонкой круглой пластины описывались уравнением [7]:

$$\begin{aligned}
D \left( \frac{\partial^4}{\partial r^4} + \frac{2}{r} \frac{\partial^3}{\partial r^3} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r^3} \frac{\partial}{\partial r} \right) \omega = \\
-\rho h \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} + p_G \quad (3)
\end{aligned}$$

с начальными и граничными условия

$$\begin{aligned}
\omega = 0, \quad \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0; \quad r \in [0, R_c]; \\
\omega = 0, \quad \frac{\partial \omega}{\partial r} = 0, \quad r = R_c; \\
\frac{\partial \omega}{\partial r} = 0; \quad r \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial r^2} + \frac{v}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) = 0, \\
\frac{\partial^3 \omega}{\partial r^3} + (2-v) \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) = 0.
\end{aligned}$$

Здесь  $\omega$  - прогиб пластины по оси  $x$ ;  $\rho$  - плотность материала пластины;  $h$  - толщина пластины;

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} - \text{коэффициент, который выражается через}$$

толщину пластины  $h$ , модуль Юнга  $E$  и коэффициент Пуассона  $\nu$ . Граничные условия ставились на контуре и в центре пластины. На контуре пластины выполнялись условия заземления пластины, а центре - условия симметрии, ограниченности изгибающего момента и равенства нулю поперечного реактивного усилия.

Квазистационарное горение пороха описывалось следующей системой уравнений

$$\begin{aligned}
\frac{dz}{dt} = \frac{u_1}{h_1} p_g, \quad Q_g = m_{p0} \chi_1 \sigma(z) \frac{dz}{dt}, \\
\frac{dV_g}{dt} = u_g F_g + \alpha_1 Q_g, \quad (4)
\end{aligned}$$

$$\frac{dp_g}{dt} = \frac{1}{V_g} \left[ (k-1)qQ_g - p_g (ku_g F_g + \alpha_1 Q_g) \right].$$

Здесь  $z = h/h_1$  - относительная толщина сгоревшего слоя,  $2h_1$  - начальная толщина порохового зерна,  $h$  - толщина сгоревшего слоя,  $\chi_1$  - коэффициент, зависящий от формы порохового зерна,  $\sigma(z)$  - относительная площадь поверхности горения,  $u_1$  - постоянная скорости горения пороха,  $F_g$  - площадь поперечного сечения камеры сгорания,  $q$  - удельная теплота сгорания пороха,  $\alpha_1 = 1/\rho_p - \alpha$  - коэффициент;  $\rho_p$  - плотность твердого пороха;  $\alpha$  - поправка, учитывающая собственный объем молекул пороховых газов;  $k$  - показатель адиабаты пороховых газов;  $V_g$  - объем пороховых газов,  $m_{p0}$  - начальная масса пороха;  $Q_g$  - скорость прихода пороховых газов.

Начальные условия для горения пороха следующие

$$z = 0, \quad V_g = V_{g0}, \quad p_g = p_{g0}.$$

где  $V_{g0}$ ,  $p_{g0}$  - параметры газа после срабатывания воспламенителя.

Поставленная задача решалась численно. Течение жидкости рассчитывалось методом Годунова [9], горение пороха интегрировалось по схеме Эйлера, а движение пластины - по конечно-разностным формулам второго порядка аппроксимации [10]. Расчетная область в жидкости покрывалась подвижной сеткой, которая строилась по методике, изложенной в [10]. Шаг по времени  $\tau_p$  для разностной задачи (3) ограничен условием

устойчивости  $\tau_p \leq \frac{h_y^2}{ch} \sqrt{3(1-\nu^2)}$ , где  $c = \sqrt{E/\rho}$  - скорость звука в материале пластины. Шаг  $\tau_k$  разностной

схемы в методе Годунова, ограничен условием устойчивости Куранта [9]. Для устойчивости счета выбирался наименьший из шагов  $\tau_p$  и  $\tau_k$ .

В расчетах варьировались геометрические размеры рабочей камеры ПП, изменялась толщина и материал пластины; масса пороха и начальный объем камеры сгорания. В расчетах контролировалось выполнение балансов массы и энергии. Дисбаланс энергии при расчете на мелких сетках ( $20 \times 200$  узлов по осям  $r$  и  $x$ ) не превышал 0,5 %.

**Анализ результатов расчетов.** Ниже приведены некоторые результаты расчетов для пороховой ПП с размерами: радиус ствола  $R_c = 56$  мм, длина ствола  $L = 0,65$  м, объем камеры сгорания  $V_{k0} = 1,5$  см<sup>3</sup> ее радиус поперечного сечения  $R_g = 15$  мм. Прототипом данной установки является пресс-пушка, работающая на энергии поршня [2, 10]. Масса порохового заряда выбиралась такой, чтобы энергия сгоревшего пороха равнялась кинетической энергии поршня, равной 1,2 кДж. В расчетах использовался порох массой 1 г с пороховыми зернами трубчатой формы с характеристиками:  $u_1 = 0,83$  м/(с·ГПа),  $q = 3,62$  МДж/кг,  $\rho_p = 1,6$  г/см<sup>3</sup>,  $k = 1,235$ ,  $\alpha = 0,001$  м<sup>3</sup>/кг,  $h_1 = 0,16$  мм,  $c = 1,075$  мм,  $\chi_1 = 1 + h_1/c$ ,  $\sigma(z) = 1 - 2h_1z/(c + h_1)$ , где  $c$  - половина длины порохового зерна. Начальное давление пороховых газов после срабатывания воспламенителя одинаковое по всему объему, равное  $p_{g0} = 5$  МПа.

В пороховой ПП сжатие жидкости происходит гораздо медленнее, чем в ПП с поршнем, поэтому волновые процессы практически не проявляются, а кавитация не возникает. Для рассматриваемой установки характерное время процесса равно времени распространения возмущений от камеры сгорания до заготовки и составляет  $t_L = L/a_0 = 0,43$  мс, что намного меньше времени горения пороха, которое продолжается около 2,5 мс. Поэтому параметры жидкости успевают выравниваться по всему объему. Их различие по длине и по радиусу установки незначительное. В этом случае хорошие результаты даст квазистационарное приближение, при котором параметры жидкости усредняются по всему объему рабочей камеры, а процесс горения пороха и движения жидкости в пороховой ПП описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \frac{u_1}{h_1} p_g, \\ \frac{dm_g}{dt} &= Q_g = m_{p0} \chi_1 \sigma(z) \frac{u_1}{h_1} p_g, \\ \frac{dp_g}{dt} &= \frac{(k-1)qQ_g - \alpha_1 p_g Q_g}{V_{g0} + \alpha_1 m_g + f_1(p_g) + k p_g f_2(p_g)}, \\ f_1 &= k_F V_{b0} \left[ 1 - \left( \frac{p_g}{B} k_F + 1 \right)^{\frac{1}{n}} \right], \\ f_2 &= \frac{k_F^2 V_{b0}}{nB} \left( \frac{p_g}{B} k_F + 1 \right)^{\frac{n+1}{n}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $k_F = F_g/F_c$  - отношение площадей поперечного сечения камеры сгорания и рабочей камеры,  $V_{g0}$  - начальный объем воды в рабочей камере. В этой постановке давление пороховых газов и жидкости одинаковое. Сжимаемость жидкости и изменение площади поперечного сечения рабочей камеры учитывается функциями  $f_1$  и  $f_2$ , которые входят в уравнение баланса энергии. Рабочей жидкостью является вода, параметры которой связаны уравнением состояния Тэта.

На рис. 2 приведены зависимости давления, прогиба и скорости пластины в центре от времени. Кривые 1 и 2 – давление в центре и у края пластины, 3 – прогиб пластины, 4 – скорость пластины. Исследовалась стальная пластина толщиной  $h = 3$  мм и диаметром  $d = 112$  мм с параметрами материала:  $E = 20 \cdot 10^{10}$  Па;  $\nu = 0,3$ ;  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. На рис. 3 представлены зависимости прогиба в центре стальных пластин толщиной 2, 3 и 4 мм от времени (кривые 1, 2 и 3). На рис. 4 приведен профиль пластин разной толщины на момент времени, когда прогиб максимальный. Кривые 1, 2 и 3 – стальная пластина толщиной 2, 3 и 4 мм, 4 – пластина из алюминиевого сплава Д16АТ толщиной 3 мм. Параметры сплава Д16АТ:  $E = 7,15 \cdot 10^{10}$  Па;  $\nu = 0,34$ ;  $\rho = 2800$  кг/м<sup>3</sup>.

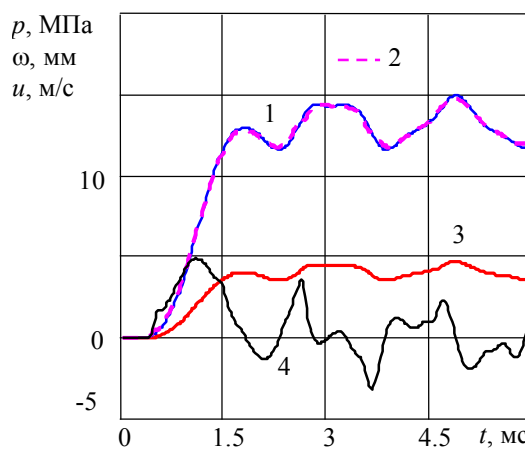


Рис. 2

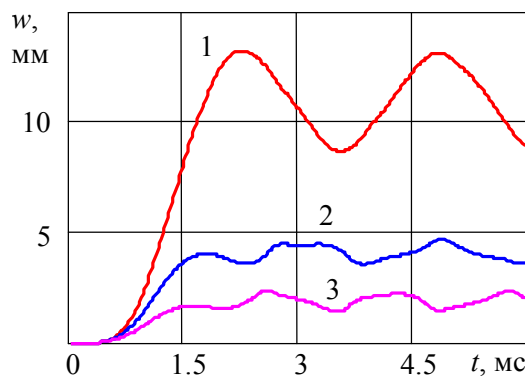


Рис. 3

Горение пороха в ПП заканчивается к моменту времени  $t = 2,5$  мс. Максимальное давление на пластине достигает 15 МПа, а прогиб – 4,5 мм для пластины толщиной 3 мм. Скорость перемещения центра пластины около 5 м/с. На графиках четко виден колебательный характер изменения параметров около их осредненных значений. Эти колебания обусловлены упругостью пластины и зависят от ее толщины и модуля Юнга. Период колебаний, рассчитанный по графикам, составляет около 2 мс.

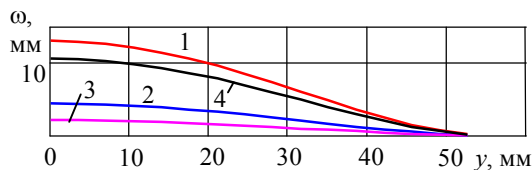


Рис. 4

Максимальный прогиб пластин наблюдается в центре. Контур поверхности имеет типичную форму, которую приобретают круглые пластины при деформации под действием равномерной нагрузки. Пластина из алюминиевого сплава обладает меньшей жесткостью, чем стальная, поэтому период ее колебаний и прогиб больше, чем стальной.

Исследовано распределение параметров жидкости по объему установки. Давление жидкости на пластину различается в ее центре и возле защемленного края на 1% на разных стадиях процесса. Такие же незначительные изменения наблюдаются и по длине установки от камеры сгорания до заготовки. Возле пластины имеется небольшое радиальное течение со скоростями около 0,1 - 3 м/с, которые направлены к центру пластины, где возникают самые большие деформации. Осевая скорость возле пластины сравнима по величине со скоростью движения пластины – около 5 – 10 м/с. Кавитация в рассмотренной установке не возникает.

**Заключение.** Как показали исследования, процессы в пороховой ПП не имеют волнового характера, как в установке ударного действия с поршневым приводом, и не сопровождаются кавитацией. Для пороховой ПП изме-

нение параметров происходит квазистационарно и хорошо описывается в квазистационарном приближении.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Импульсная обработка металлов давлением // Сб. науч. тр. – Харьков: 1981. – Вып. 9. – 141 с.
2. Галиев Ш. У. Динамика гидроупругопластических систем.- К.: Наук. думка, 1981. - 276 с.
3. Семко А.Н. Механика пороховой гидро-пресс пушки // Теоретическая и прикладная механика.- Харьков, Основа.- 1996.- Вып. 26.- С. 124 - 128.
4. Семко А.Н. Пороховая гидропресс-пушка с поршнем // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. - Донецк: ДонГТУ, 1998.- Вып. 5. - С. 181 - 185.
5. Семко А. Н. Гидроимпульсная пресс-пушка с расширенной рабочей камерой // Вісник Донецького університету, Серія А. Природничі науки. 1998. № 2. С. 62 – 65.
6. Проектирование ракетных и ствольных систем / Под ред. Орлова Б. В.- М.: Машиностроение. - 1974.- 832 с.
7. Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластин и оболочек. – М.: Наука, 1972.– 432с.
8. Семко А.Н. Нестационарная кавитация жидкости в импульсных процессах // Тезисы докладов Международной летней научной школы «Гидродинамика больших скоростей» (ГБС 2002).- Чебоксары, Россия, 16 – 23 июня, 2002. С. 154-155.
9. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. Годунова С.К.- М.: Наука, 1976. - 400 с.
10. Семко А. Н., Ганцевич Л. А. Деформация пластин в гидроимпульсной пресс-пушке // Теорет. и прикл. механика. – Харьков: Основа. 2001. Вып. 32. С. 170 - 176.1

пост. 20.02.07.

## Оценка влияния сжимаемости жидкости на параметры гидропушки

А.Н. СЕМКО

Донецкий национальный университет

Исследовано влияние сжимаемости жидкости на параметры гидропушки. Показано, что теория Б.В. Войцеховского для несжимаемой жидкости дает завышенные значения скорости и давления в гидропушке. В качестве критерия для оценки влияния сжимаемости жидкости предложено число Маха, которое определяется по максимальной скорости жидкости в гидропушке. При числах Маха меньше единицы сжимаемостью жидкости в гидропушке можно пренебречь.

Досліджено вплив стискальності рідини на параметри гідрогармати. Показано, що теорія Б.В. Войцеховського для нестисливої рідини дає завищені значення швидкості й тиску в гідропушці. Як критерій для оцінки впливу стискальності рідини запропоноване число Маху, що визначається по максимальній швидкості рідини в гідропушці. При числах Маху менше одиниці стискальністю рідини в гідропушці можна знехтувати.

Influence of compressibility of a liquid on parameters of a hydrocannon is investigated. It is shown, that B.V. Voitsekhoysky's theory for an incompressible liquid gives the overestimated values of speed and pressure in a hydrocannon. As criterion for an estimation of influence of compressibility of a liquid the Mach number which is defined on the maximal speed of a liquid in a hydrocannon is offered. At Mach number there is less than unit compressibility of a liquid in a hydrocannon it is possible to neglect.

