

УДК 621.7.044

В.В. ТРЕТЬЯК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГАЗО-ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКИ

*В статье рассмотрен процесс газо-взрывной импульсной штамповки, который основывается на преобразовании химической энергии топлива в работу пластического деформирования материала обрабатываемой заготовки посредством высвобождения химической энергии топлива в ходе экзотермической реакции окисления горючего окислителем. Представлена математическая модель для расчета физических и технологических параметров процесса. Рассмотрены преимущества и недостатки газо-взрывной штамповки. Приведен алгоритм расчета энергетических характеристик. Разработана программа и представлена форма для расчета энергетических и технологических характеристик.*

**Ключевые слова:** газо-взрывная штамповка, пластическое деформирование, энергетические характеристики, импульсные технологии.

### 1. Сущность газо-взрывной листовой штамповки

Процесс газо-взрывной штамповки (рис. 1, 2) основан на преобразовании химической энергии топлива в работу пластического деформирования материала обрабатываемой заготовки посредством высвобождения химической энергии топлива в ходе экзотермической реакции окисления горючего окислителем [1].

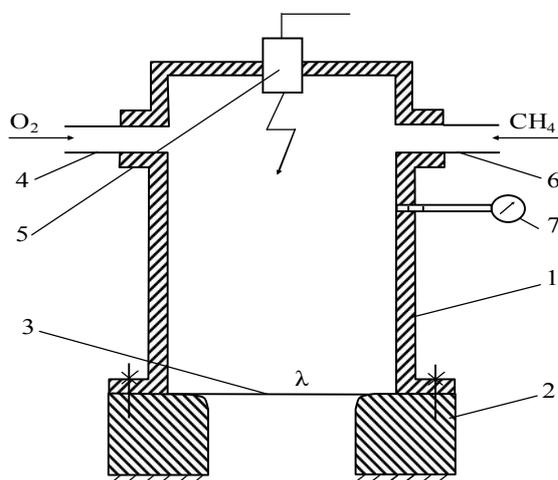


Рис. 1. Схема установки:

- 1 – взрывная камера; 2 – матрица; 3 – заготовка;  
4 – магистраль подвода окислителя; 5 – устройство для поджига; 6 – магистраль подвода горючего;  
7 – контрольный манометр

Экзотермические реакции окисления горючих газов в зависимости от характеристик горючего, окислителя, условий инициирования реакции, гео-

метрических характеристик реакционного сосуда могут протекать с различной скоростью и существенно отличаться по своему характеру.

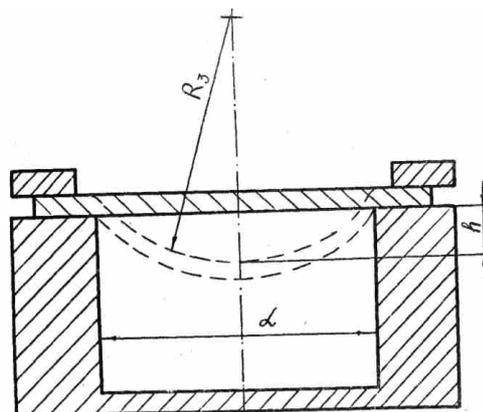


Рис. 2. Схема штамповки

В связи с этим такие реакции обычно делят на собственно горение (ламинарное или турбулентное) и детонационное горение (взрыв) смеси горючего газа с окислителем. Процессы горения, как правило, протекают с переменной скоростью в то время как скорость взрыва зависит от внешних возмущений в гораздо меньшей степени.

Между горением и взрывом (детонацией) существует строгая количественная граница: скорость горения всегда меньше, а скорость детонации всегда больше, чем скорость звука в исходной (непрореагировавшей) смеси.

Горение при известных критических условиях может скачкообразно переходить в детонацию.

Таким образом, детонация представляет собой наиболее эффективную форму осуществления реак-

ции окисления, имеющую постоянную и максимально возможную при заданных условиях для данной горючей смеси скорость распространения. Поэтому именно детонационный режим горения используется в подавляющем большинстве технологических установок.

Фронт детонационной волны представляет собой сильную ударную волну, которая адиабатически сжимает газ и, соответственно, нагревает его до весьма высокой температуры (степень повышения температуры может достигать 10...15). При столь высокой температуре и давлении химическая реакция протекает очень интенсивно, выделяя тепловую энергию в некоторой зоне за фронтом. Позади зоны находятся постепенно расширяющиеся продукты реакции.

Таким образом, поскольку энергия химической реакции заключена в самой среде (газовой смеси) и высвобождается только детонацией, обеспечивая стационарность своего распространения, то детонационная волна может распространяться на сколь угодно длинном пути с постоянной скоростью а постоянным давлением в волне.

Давление  $P_1$ , температура  $T$ , удельный объем  $V$ , скорость продуктов  $U_1$  за волной и скорость детонационной волны  $D$  являются тем набором параметров, которые однозначно характеризуют процесс стационарной детонации.

Для определения этих параметров воспользуемся основным уравнением сохранения массы

$$\rho_0(D - U_0) = \rho_1(D - U_1); \quad (1)$$

импульса

$$P_1 - P_0 = \rho_0(D - U_0)(U_1 - U_0) \quad (2)$$

и энергии

$$V - V_0 - 1/2(P_1 + P_0)(V_0 - V_1) + Q, \quad (3)$$

где  $P_0$ ,  $U_0$ ,  $V_0$ ,  $\rho_0$  – соответственно давление, массовая скорость, удельный объем и внутренняя энергия невозмущенной газовой смеси.

Добавив к уравнениям (1) – (3) уравнение состояния

$$P = f(S, T) \quad (4)$$

и следующее из первого начала термодинамики соотношение

$$D = U + C, \quad (5)$$

где  $S$  – энтропия, а  $C$  – местная скорость звука в продуктах реакции, получим систему уравнений для определения параметров детонационной волны.

Результатом решения системы относительно  $D$  для уравнения состояния идеального газа, являются такие зависимости:

$$P_1 = P_0 + \frac{\rho_0 D^2}{R+1} \left( 1 - \frac{C_0^2}{D^2} \right); \quad (6)$$

$$V_1 = V_0 - \frac{V_0}{R+1} \left( 1 - \frac{C_0^2}{D^2} \right); \quad (7)$$

$$U_1 = \frac{D}{R+1} \left( 1 - \frac{C_0^2}{D^2} \right); \quad (8)$$

$$T_1 = \frac{\mu_1 \rho_1 V_1}{R}, \quad (9)$$

где  $C_0^2 = R_0 P_0 V_0 = K_0 \frac{R_0 T_0}{\mu_0}$  – скорость звука в исходном газе.

Зная скорость детонационной волны  $D$ , легко вычислить все параметры детонационной волны.

Газовзрывная штамповка отличается от других процессов импульсного формообразования характером приложения нагрузки, кинематикой течения металла, а также конструкцией применяемой технологической оснастки.

Газовзрывная штамповка (иными словами – детонационно-газовая – ДГШ), как и другие способы беспрессовой штамповки, имеет существенные преимущества по сравнению со штамповкой на прессах;

а) возможность создания эффективной технологии без крупных уникальных прессов и сокращение сроков подготовки производства;

б) высокая экономичность технологии за счет упрощения оснастки и дешевизны энергоносителя;

в) возможность размещения технологических установок в обычных производственных зданиях и действующих цехах;

г) относительная простота оборудования и низкие амортизационные расходы;

д) широкий диапазон управления параметрами штамповки за счет варьирования начального давления в составе газовой смеси;

е) возможность полной автоматизации технологического процесса;

ж) вероятность создания принципиально новых комбинированных техпроцессов, сочетающих, например, формообразование с термообработкой изделий.

К недостаткам ДГШ следует отнести ограниченный энергетический потенциал установок, связанный с объемом взрывной камеры и трудностями удержания высокого начального давления горючей газовой смеси, а также невысокий КПД процесса.

## 2. Алгоритм расчета энергетических характеристик

По замеренному на оснастке размеру  $d$ , заданной толщине заготовки  $\delta$  и глубине проштамповки  $h$  рассчитать потребную работу деформирования и необходимое давление

$$q = 2\sigma_3 \delta / R_3, \quad (10)$$

где  $\sigma_3$  – предел текучести материала заготовки.

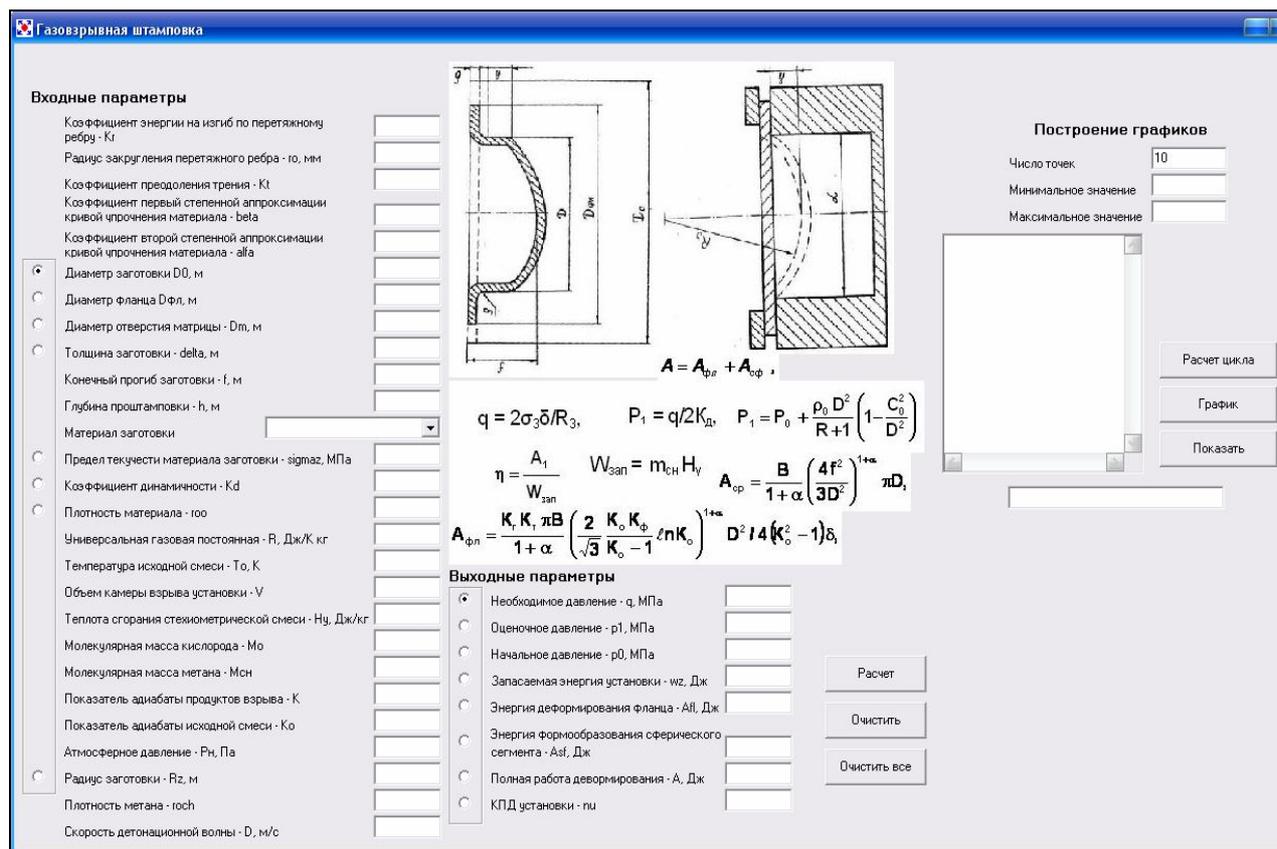


Рис. 3. Форма меню программы для расчета энергетических и технологических параметров газо-взрывной штамповки

Рассчитанное давление  $q$  является статическим, потребное давление в импульсе  $P_1$  может существенно отличаться из-за влияния скорости деформирования на физико-механические свойства материала.

В качестве первого приближения для оценочного инженерного расчета можно принять

$$P_1 = q/2K_d, \tag{11}$$

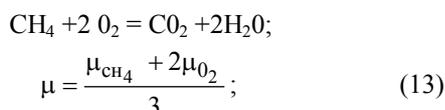
где  $K_d$  – коэффициент динамичности.

Записав уравнение состояния идеального газа для начальной смеси как

$$\frac{P_0}{\rho_0} = \frac{R T_0}{\mu_0}, \tag{12}$$

можно рассчитать необходимое начальное давление горючей газовой смеси  $P_0$  и остальные параметры детонационной волны в предположении, что скорость детонационной волны не сильно зависит от начального давления и равна  $D = 2540$  м/с.

Молекулярная масса смеси согласно уравнению реакции



$$R_0 = R = 8480 \text{ Дж/кг.}$$

Температуру исходной смеси принять равной  $T_0 = 293$  К.

По вычисленному значению  $P_0$  можно рассчитать запасаемую энергию установки по формуле

$$W_{зап} = m_{сн} H_y, \tag{14}$$

если плотность метана при нормальных условиях

$$\rho_{сн} = 0,67 \text{ кг/м}^3,$$

можно определить массу метана в исходной смеси:

$$m_{сн4} = V_{сн4} \rho_{сн4}. \tag{15}$$

Плотность метана при начальном давлении  $P_0$  вычислить из уравнения

$$\frac{P_0}{\rho_{сн4}} = \frac{P_n}{\rho_{сн4}}, \tag{16}$$

где  $P_n = 10^5$  Па – атмосферное давление.

Объем метана в стехиометрической смеси

$$V_{сн4} = V/3, \tag{17}$$

где  $V$  – объем камеры установки.

Рассчитав эти параметры, можно произвести штамповку мембраны при начальном давлении смеси  $P_0$ .

Измерив на отштампованной детали размеры  $d_1$  и  $h_1$  и рассчитав для нее потребную работу деформирования  $A_1$  можно оценить КПД установки по формуле

$$\eta = \frac{W_{зап}}{A_1}. \tag{18}$$

### 3. Программа для расчета энергетических и технологических параметров процесса

Для расчета основных технологических параметров газо-взрывной штамповки разработана программа, выполненная в объектном представлении [2 – 4].

На рис. 3 представлено форма меню программы для расчета параметров технологического процесса газо-взрывной штамповки.

Данная программа может быть использована для расчетов, как технологами, так и студентами в лабораторных работах и дипломном проектировании в курсе «Импульсные технологии» [5].

#### Литература

1. *Высокоэнергетические методы листовой штамповки: учебное пособие по лаб. практикуму / В.К. Борисевич, А.И. Волков, Н.И. Семшиов, В.В. Третьяк, Ю.И. Чебанов: – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т «Харк. авиац. ин-т», 1998. – 75 с.*

2. *К оценке экономической эффективности методов изготовления сложных деталей с помощью импульсных источников энергии / В.К. Борисевич, В.Н. Голованов, В.В. Третьяк, Ю.А. Невешкин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 11 (47). – С. 187-193.*

3. *Третьяк В.В. Особенности алгоритмов анализа и синтеза импульсных технологических процессов / В.В. Третьяк // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – 2009. – Вып. 31. – С. 92-99.*

4. *Третьяк В.В. Математическая модель и расчет импульсных технологических процессов в объектном представлении / В.В. Третьяк // Вісті академії інженерних наук. Спеціальний випуск. Машинобудування та прогресивні технології. – 2009. – № 1 (38). – С. 126-133.*

5. *Борисевич В.К. К вопросу моделирования импульсных процессов в замкнутой камере для взрывных процессов / В.К. Борисевич, В.В. Третьяк, И.В. Скорченко // Вестник двигателестроения. – 2010. – № 2. – С. 166-171.*

Поступила в редакцию 26.05.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры производства двигателей летательных аппаратов В.К. Борисевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ГАЗО-ВИБУХОВОГО ШТАМПУВАННЯ

*В.В. Третьяк*

В статті розглянутий процес газо-взрывного імпульсного штампування, який ґрунтується на перетворенні хімічної енергії палива в роботу пластичної деформації матеріалу оброблюваної заготовки за допомогою того, що вивільняється хімічної енергії палива в ході екзотермічної реакції окислення пального окислювачем. Представлена математична модель для розрахунку фізичних і технологічних параметрів процесу. Розглянуті переваги і недоліки газо-взрывного штампування. Приведений алгоритм розрахунку енергетичних характеристик. Розроблена програма і представлена форма для розрахунку енергетичних і технологічних характеристик.

**Ключові слова:** газо-взрывове штампування, пластична деформація, енергетичні характеристики, імпульсні технології.

### MATHEMATICAL MODEL FOR COMPUTATION OF PARAMETERS GAS EXPLOSIVE STAMPING

*V. V. Tretyak*

In article a process is considered of the gas explosive impulsive stamping, which is based on transformation of chemical energy of fuel in work of plastic deformation of material of the processed purveyance by means freed of chemical energy of fuel during the exothermic reaction of oxidization of fuel by oxidant. A mathematical model is presented for computation of physical and technological parameters of process. The advantages are considered and lacks of the gas explosive stamping. An algorithm is resulted of computation of power descriptions. The program is developed and presented form for computation of power and technological descriptions.

**Keywords:** gas explosive stamping, plastic deformation, power descriptions, impulsive technologies.

**Третьяк Владимир Васильевич** - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры производства авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mai: mint\_khai@rambler.ru.