

УДК 621.98.044.7

**Боташев А. Ю.  
Мусаев А. А.**

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ДВУХКАМЕРНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГАЗОВОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

В настоящее время в связи с глобальным мировым экономическим кризисом существенно снижается продукция крупносерийного и массового производств, а продукция мелкосерийного производства повышается. В этой связи особую актуальность приобретают разработки технологий, обеспечивающих снижение себестоимости продукции мелкосерийных производств.

Известны устройства для листовой штамповки, использующие энергию горючих газовых смесей [1–3]. В них штамповка осуществляется под действием давления газа. Эти устройства особенно эффективны в мелкосерийном производстве, вследствие их простоты и дешевизны.

Указанные устройства для листовой штамповки имеют существенный недостаток, обусловленный относительно низким уровнем давления, осуществляющего процесс штамповки. Максимальное давление продуктов сгорания в них составляет 20...25 МПа. Это давление обеспечивает штамповку деталей из листовой заготовки относительно небольшой толщины, в частности из стальной заготовки толщиной до 1,5 мм. Затруднена также штамповка деталей сложной конфигурации с малыми радиусами кривизны. Это в целом снижает технологические возможности данного метода штамповки.

Целью данной работы является расширение технологических возможностей газовой штамповки. Поставленная цель достигается существенным повышением давления продуктов сгорания, действующих на поверхность штампуемой заготовки. Для этого предварительно производится сжатие топливной смеси непосредственно в рабочей полости устройства для штамповки.

Это реализовано в двухкамерном устройстве для штамповки, схема которой показана на рис. 1. Устройство содержит корпус 1, в котором выполнена цилиндрическая полость, разделенная поршнем 2 на нижнюю 3 и верхнюю 4 камеры сгорания. К корпусу 1 с помощью фланца 5 болтов 6 и гаек 7 присоединена матрица 8. В верхней части корпуса 1 выполнена кольцевая полость 9, в которой установлен кольцевой поршень 10. В верхней части корпуса 1 выполнены сквозные каналы 11, сообщающие камеру сгорания 4 с полостью 12. Эти каналы перекрываются тарельчатым клапаном 13. Нижняя камера сгорания снабжена впускным клапаном 14, выпускным клапаном 15 и свечей зажигания 16. Верхняя камера сгорания также имеет аналогичные устройства 17, 18, 19. Штампуемая заготовка 21 зажимается между торцом матрицы 8 и кольцевым поршнем 10, для чего в полость 9 подается через канал 20 сжатый воздух.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Камеры сгорания 3 и 4 через впускные клапаны 14 и 17 наполняются топливной смесью. Топливная смесь через каналы 11 поступает также в полость 12, деформируя при этом заготовку 21. Давление смеси в обеих камерах сгорания одинаковое, поэтому поршень 2 остается неподвижным. Топливная смесь в камере сгорания 3 с помощью свечи 16 поджигается. При сгорании этой смеси давление в камере сгорания 3 увеличивается. Под действием давления продуктов сгорания поршень 2 перемещается вверх, сжимая при этом топливную смесь в камере сгорания 4. При этом топливная смесь из камеры сгорания 4 через отверстия 11 перетекает в полость 12, перемещая клапан 13 вверх. Под действием давления топливной смеси заготовка 21 начинает деформироваться, вследствие чего объем полости 12 увеличивается. Таким образом, по мере перемещения поршня 2 вверх часть топливной смеси вытесняется в полость 12. При этом вследствие непрерывного нарастания давления топливной смеси заготовка значительно деформируется. Не задолго до достижения поршнем 2 своего крайне верхнего положения топливная смесь в камере сгорания 4 свечей 19 поджигается. При сгорании топливной смеси давление

в камере сгорания 4 резко повышается, что вызывает интенсивное торможение поршня 2. В процессе горения топливная смесь продолжает перетекать из камеры сгорания 4 в полость 12, благодаря этому деформация заготовки 21 увеличивается. При достижении фронта горения отверстий 11 пламя через эти отверстия проникает в полость 12. Горение топливной смеси вызывает интенсивное повышение давления в полости 12. При этом клапан 13 закрывается, предотвращая перетекание продуктов сгорания из полости 12 в камеру сгорания 4. Под действием давления продуктов сгорания осуществляется заполнение заготовкой 21 всей полости матрицы 8. Процесс штамповки завершается.

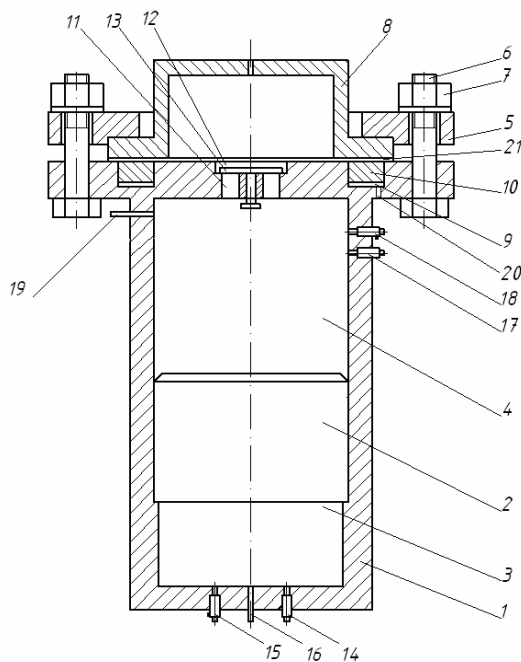


Рис. 1. Схема двухкамерного устройства газовой штамповки:

1 – корпус; 2 – поршень; 3 – нижняя камера сгорания; 4 – верхняя камера сгорания; 5 – фланец; 6 – болт; 7 – гайка; 8 – матрица; 9 – кольцевая полость; 10 – кольцевой поршень; 11 – сквозные каналы; 12 – полость; 13 – тарельчатый клапан; 14, 17 – впускные клапаны; 15, 18 – выпускные клапаны; 16, 19 – свеча зажигания; 20 – канал; 21 – штампуемая заготовка

После окончания процесса штамповки открываются клапаны 15, 18, и продукты сгорания из камер сгорания 3 и 4 через эти клапаны выпускаются. Прекращается прижим поршнем 10 фланца заготовки 21. Поршень 2 под действием собственного веса опускается в свое исходное положение. Далее, отвинтив гайки 7, матрицу 8 отсоединяют от корпуса 1 и из нее извлекают отштампованную деталь.

Установим закономерности изменения параметров рабочего процесса устройства для штамповки. Рассмотрим вначале период горения топливной смеси в первой (нижней) камере сгорания. Расчетная схема рабочего процесса представлена на рис. 2. Запишем уравнение первого закона термодинамики:

$$\delta q = du + \delta l, \quad (1)$$

где  $\delta q$  – элементарное количество теплоты;

$du$  – дифференциал внутренней энергии газа;

$\delta l$  – элементарная работа, совершенная газом.

Запишем уравнение состояния идеального газа:

$$PV = RT, \quad (2)$$

где  $P, V$  – давление и объем газа;  $T$  – абсолютная температура газа;  $R$  – газовая постоянная.

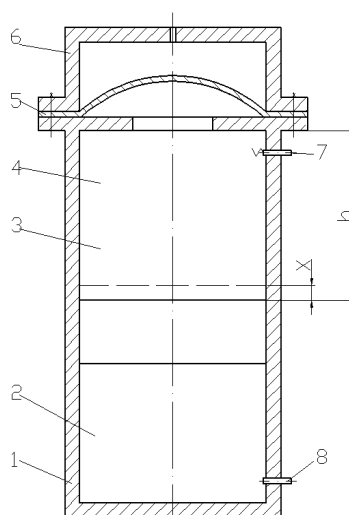


Рис. 2. Расчетная схема рабочего процесса двухкамерного устройства для штамповки: 1 – корпус; 2, 4 – камеры сгорания; 3 – поршень; 5 – штампуемая заготовка; 6 – матрица; 7, 8 – свечи зажигания

Используя это уравнение и учитывая, что  $u = RT/(\kappa - 1)$ , из уравнения (1) можно получить закон изменения давления газа в первой камере в следующем виде:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\kappa - 1}{V_1} \left( \frac{dq}{dt} - \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{d\ell}{dt} \right), \quad (3)$$

где  $P_1$  – давление газа в первой камере;  $V_1$  – объем первой камеры;  $\kappa$  – показатель адиабаты.

Пренебрегая теплоотдачей в стенки цилиндра, изменение количества теплоты во времени можно выразить следующим уравнением:

$$\frac{dq}{dt} = m_{\Gamma} H u_m \frac{d\chi}{dt}, \quad (4)$$

где  $q$  – количество теплоты, выделяющейся при сгорании топлива;  $m_{\Gamma}$  – начальная масса газа в камере сгорания;  $H u_m$  – низшая теплота сгорания 1 кг горючего газа;  $\chi$  – доля выгоревшего топлива за время  $t$ .

Работа  $\ell$ , входящая в уравнение (3), совершается для перемещения поршня, поэтому:

$$\frac{d\ell}{dt} = P_1 \frac{dV_1}{dt} = P_1 f \frac{dX}{dt} = P_1 f h \frac{dx}{dt}, \quad (5)$$

где  $f$  – площадь поперечного сечения поршня;  $X$  – ход поршня;  $x = X/h$  – относительный (безразмерный) ход поршня;  $h$  – высота второй камеры.

Полный ход поршня мало отличается от высоты  $h$  второй камеры. Поэтому в уравнении (5) в качестве характерного размера принят  $h$ .

Текущее значение объема первой камеры зависит от перемещения поршня:

$$V_1 = V_0 + fX = V_0 + fhx = V_0(1 + vx); \quad (6)$$

$$v = fh/V_0, \quad (7)$$

где  $V_0$  – начальный объем первой камеры;  $v$  – соотношение начальных объемов первой и второй камер;  $f$  – площадь поперечного сечения поршня.

Учитывая зависимости (4), (5), (6), из уравнения (3) получим:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\kappa - 1}{1 + \nu x} \left( \frac{m_{\Gamma} H u_m}{V_0} \frac{d\chi}{dt} - \frac{\kappa}{\kappa - 1} \frac{P_1 f h}{V_0} \frac{dx}{dt} \right). \quad (8)$$

Введем безразмерное давление  $P^*$  и безразмерное время  $\tau$ :

$$P_1^* = P_1 / P_c; \quad \tau = t / t_z, \quad (9)$$

где  $t_z$  – длительность процесса горения в первой камере;  $P_c$  – давление топливной смеси.

Безразмерная величина  $P_1^*$  характеризует степень повышения давления.

Используя введенные величины и соотношение (7), приведем уравнение (3) к безразмерному виду:

$$\frac{dP_1^*}{d\tau} = \frac{\kappa - 1}{1 + \nu x} \left( \frac{m_{\Gamma} H u_m}{V_0 P_c} \frac{d\chi}{d\tau} - \frac{\kappa}{\kappa - 1} \nu P_1^* \frac{dx}{d\tau} \right). \quad (10)$$

Это уравнение определяет степень повышения давления в первой камере в процессе горения топливной смеси. Используя уравнение И. Вибе [4], изменение доли выгоревшего топлива можно выразить следующим уравнением:

$$\frac{d\chi}{d\tau} = 6,908(m + 1)\tau^m e^{-6,908\tau^{m+1}}, \quad (11)$$

где  $m$  – показатель характера сгорания;  $e$  – основание натурального логарифма.

Изменение относительного хода поршня по времени определяется уравнениями движения поршня:

$$\frac{dX}{dt} = w; \quad (12)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{f}{m_n} (P_1 - P_2), \quad (13)$$

где  $m_n$  – масса поршня;  $P_2$  – давление во второй камере.

Введем безразмерную скорость поршня и безразмерное давление второй камеры:

$$w^* = \frac{w}{h/t_z}; \quad P_2^* = \frac{P_2}{P_c}. \quad (14)$$

Тогда уравнения (12), (13) можно привести к безразмерному виду:

$$\frac{dx}{d\tau} = w^*; \quad (15)$$

$$\frac{dw^*}{d\tau} = \frac{t_z^2 P_c}{h m_n} (P_1^* - P_2^*). \quad (16)$$

В процессе перемещения поршня топливная смесь во второй камере сжимается. Пренебрегая теплообменом, этот процесс можно считать адиабатическим, т. е.:

$$P_{2_0} V_{2_0}^{\kappa} = P_2 V_2^{\kappa}, \quad (17)$$

где  $P_{2_0}, P_2$  – начальное и текущее значения давления топливной смеси во второй камере;  $V_{2_0}, V_2$  – начальное и текущее значения объема второй камеры.

Начальное давление топливной смеси во второй камере может незначительно отличаться от начального давления топливной смеси в первой камере, т. е.:

$$P_{2_0} = a \cdot P_c, \quad (18)$$

где  $a$  – постоянный коэффициент,  $a = 1 \dots 1, 1$ .

Начальный объем второй камеры  $V_{2_0} = fh$ , а его текущее значение зависит от перемещения поршня. В этот период деформация штампуемой заготовки невелика. Поэтому, пренебрегая увеличением объема второй камеры за счет деформации заготовки, можно записать:

$$V_2 = V_{2_0} - fX = fh - fhx = fh(1 - x). \quad (19)$$

Из зависимостей (17)–(19) получим закон изменения давления топливной смеси во второй камере:

$$P_2^* = \frac{a}{(1-x)^k}. \quad (20)$$

Система уравнений (10), (11), (15), (16), (20) описывает изменение давления в обеих камерах устройства для штамповки в период горения топливной смеси в первой камере. Эти уравнения имеют безразмерный вид. Известно, что подобные явления описываются одними и теми же уравнениями, записанными в безразмерном виде. Следовательно, процесс горения в первой камере характеризуется двумя критериями подобия:

$$Q = \frac{m_\Gamma Hu_m}{V_0 P_c}; \quad (21)$$

$$N = \frac{t_z^2 P_c}{hm_n}. \quad (22)$$

Критерий  $N$  является по существу критерием Ньютона, записанным применительно к данному процессу.

Критерий  $Q$  представляет собой отношение химической энергии горючего газа к потенциальной энергии топливной смеси. Выразим массу горючего газа через давление топливной смеси:

$$m_\Gamma = \frac{P_c V_0}{(L_0 + 1) R_\Gamma T_C}, \quad (23)$$

где  $L_0$  – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг газа;  $R_\Gamma$  – газовая постоянная горючего газа;  $T_C$  – абсолютная температура топливной смеси.

Используя зависимость (23), из выражения (21) получим другую форму записи критерия  $Q$ :

$$Q = \frac{Hu_m}{(L_0 + 1) R_\Gamma T_C}. \quad (24)$$

Анализ и решение системы уравнений показали, что давление в первой камере в процессе горения топливной смеси повышается в 5...6 раз, при этом давление топливной смеси во второй камере повышается в 6...7 раз. На рис. 3 показаны графики изменения давления в обеих камерах. После окончания процесса горения в первой камере поршень по инерции некоторое время продолжает перемещаться вверх, сжимая газ в верхней камере.

В конечной стадии процесса горения в первой камере сгорания производится зажигание топливной смеси во второй камере сгорания. При этом благодаря высокой температуре топливной смеси и ее турбулизации, фронт пламени быстро распространяется по камере сгорания и проникает в полость, примыкающую к штампуемой заготовке. Давление резко

повышается. Под действием этого давления заготовка интенсивно деформируется и заполняет полость матрицы. Проведя выкладки, аналогичные вышеизложенным, были получены уравнения, описывающие изменение параметров газа в первой и второй камерах сгорания в этот период. Анализ этих уравнений показал, что в результате сгорания топливной смеси во второй камере давление в ней увеличивается в 3,5...5 раз в зависимости от параметров штампуемой детали.

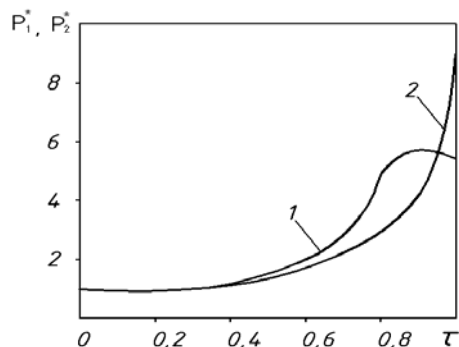


Рис. 3. Изменение давление в первой (1) и второй (2) камерах во времени

Таким образом, в результате сгорания топливной смеси в обеих камерах сгорания давление на поверхности штампуемой заготовки увеличивается в 22...30 раз, что в 3–4 раза больше, чем в известных устройствах газовой штамповки. При давлении топливной смеси 3 МПа давление на поверхности штампуемой заготовки может достигать 90 МПа. Это существенно расширяет технологические возможности разработанного устройства для штамповки. Можно штамповать детали значительно большей толщины, в частности стальные детали толщиной до 2,5...3 мм, а также детали сложной конфигурации с малыми радиусами кривизны.

### ВЫВОДЫ

В разработанном двухкамерном устройстве для штамповки за счет горения газообразной топливной смеси в первой камере обеспечивается увеличение давления топливной смеси во второй камере в 6...7 раз. Благодаря этому давление на поверхности штампуемой заготовки повышается в 20...28 раз, что в 3...4 раза выше, чем в известных устройствах газовой штамповки. Это дает возможность штамповать детали сложной конфигурации с малыми радиусами кривизны.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов В. Г. *Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов* / В. Г. Степанов, И. А. Шавров. – Л. : Машиностроение, 1975. – 267 с.
2. Зубцов М. Е. *Листовая штамповка* / М. Е. Зубцов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. – 432 с., ил.
3. Боташев А. Ю. *Исследование процесса газоимпульсной штамповки* / А. Ю. Боташев // *Кузнечно-штамповочное производство*. – 1999. – № 11. – С. 20–22.
4. Вибе И. И. *Новое о рабочем цикле двигателей* / И. И. Вибе. – М. : Наука, 1962. – 365 с.

Боташев А. Ю. – д-р техн. наук, проф. СКГГТА;

Мусаев А. А. – аспирант СКГГТА.

СКГГТА – Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия, г. Черкесск, Россия.

E-mail: brain\_95@mail.ru