

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА УСТРОЙСТВА С КАМЕРОЙ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ ДЛЯ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Во многих конструкциях летательных аппаратов используются листовые детали типа панелей жесткости. Применяемыми материалами являются высокопрочные алюминиевые сплавы с невысокими показателями пластичности. Их формообразование желательно проводить при температурах 180...250°C.

Известный способ штамповки листовых деталей эластичными, жидкими и газовыми средами [1] – способ газоимпульсной штамповки [2]. До настоящего времени он применялся для штамповки деталей типа днищ. Но в этом случае из-за большой степени увеличения объема при формоизменении плоской заготовки в днище даже малой глубины резко уменьшается давление газа, действующее на заготовку на окончательной стадии штамповки. Это ограничивает технологические возможности способа.

Целью настоящей работы является построение математической модели процесса нагружения листовой заготовки с повышением формоизменяющего давления до потребных для штамповки панелей жесткости давлений.

Анализ многочисленных конструкций панелей жесткости (пластины теплообменников, силовые панели и др.) показывает, что для их формообразования в теплом состоянии необходимо давление до 50...60 МПа в зависимости от материала, а изменение объема полости над заготовкой находится в пределах 1,5–2,5 раз. Это означает, что давление в рабочей среде, поданное в полость над заготовкой в начале процесса к его окончанию, т.е. к моменту потребности в максимальных значениях давления для калибровки заготовки, уменьшается в такой же степени.

Для повышения генерируемого давления разработано многокамерное устройство с последовательно расположенными камерами сгорания (рис. 1).

Устройство содержит камеру пульсирующего горения и матрицудержатель с матрицей, которые соединены между собой с помощью болтов. Камера пульсирующего горения имеет несколько полостей, соединенных между собой каналами, в которых установлены обратные клапаны. Впускной клапан и свечи зажигания установлены на торце первой полости. На рисунке условно показана только одна свеча (поз. 16), однако для повышения надежности и определенности времени зажигания равномерно по окружности камеры устанавливается несколько свечей.

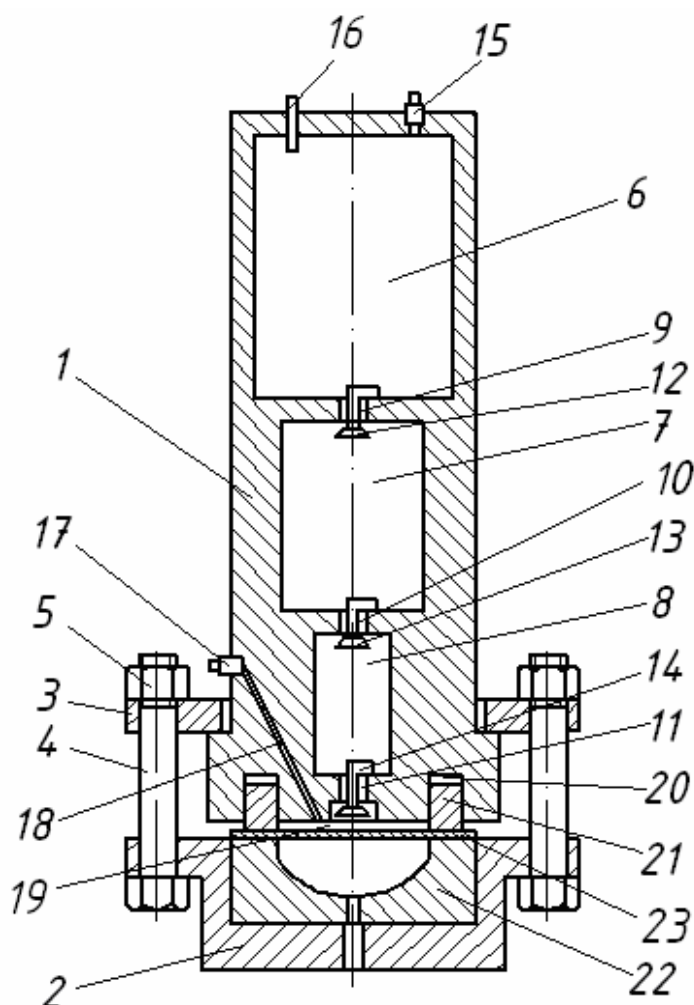


Рисунок 1 Схема устройства с камерой пульсирующего горения для штамповки: 1 – корпус; 2 – матрицaдержатель; 3 – фланец; 4 – болт; 5 – гайка; 6, 7, 8, 19 – полости; 9, 10, 11 - каналы; 12, 13, 14 – обратные клапаны; 15 – впускной клапан; 16 – свеча зажигания; 17 – выпускной клапан; 18 – канал; 20 – полость; 21 – кольцевой поршень; 22 – матрица; 23 – заготовка

При зажигании свечами топливной смеси пламя распространяется по длине полости 6. В результате горения топливной смеси давление в ней повышается и перетекает через канал 9 и открытый обратный клапан 12 в полость 7. При проникновении пламени в полость 7 и повышении в ней давления обратный клапан 12 закрывается, предотвращая перетекание продуктов сгорания из этой полости в полость 6. Аналогичное происходит при проникновении пламени в полости 8 и 19. Благодаря этому по мере перемещения фронта пламени по длине устройства давление топливной смеси непрерывно повышается, что обеспечивает кратное повышение давления продуктов сгорания в последней полости камеры по сравнению с давлением в первой ее полости. Деформирование штампуемой заготовки 23 сначала происходит под действием увеличенного давления. При этом объем полости 19, примыкающей к заго-

товке, увеличивается. Проникновение пламени из полости 8 в полость 19 вызывает горение топливной смеси в этой полости. Давление в ней резко повышается, что обеспечивает завершение процесса штамповки.

Математическое описание рабочего процесса устройства проведено при таких допущениях: продукты сгорания и топливную смесь считаем идеальным газом; фронт пламени является плоским; в каждой из полостей камеры сгорания давление продуктов сгорания и давление топливной смеси одинаковы; диссоциацией продуктов сгорания пренебрегаем. В данном случае эти допущения вполне приемлемы. Будем считать, что фронт пламени перемещается в виде плоскости, перпендикулярной к оси камеры. По мере перемещения фронта пламени давление топливной смеси непрерывно повышается. При этом часть топливной смеси перетекает в следующую полость камеры сгорания, что обуславливает повышение давления в ней.

Определим изменение параметров газа в полостях камеры сгорания. Масса газа во всех полостях камеры сгорания непрерывно изменяется. Поэтому для определения изменения параметров газа в них можно применить такие уравнения термодинамики тела переменной массы [3, 4]:

$$\frac{dP}{dt} = (k-1)V^{-1} \left[\left(\frac{dQ}{dt} \right) + \Pi_n G_n - \Pi_p G_p - \left(\frac{k}{k-1} \right) \left(\frac{dL}{dt} \right) \right]; \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{n}{n-1} \right) \left(\frac{T}{P} \right) \left(\frac{dP}{dt} \right); \quad (2)$$

$$n = k - (k-1) \frac{\left(\frac{dQ}{dt} + (\Pi_n - ku) G_n \right)}{\frac{dL}{dt} + (G_n - G_p)(k-1)u}, \quad (3)$$

где V – объем рабочего пространства; P , T – давление и температура газа; Q – количество теплоты, подведенной к газу; G_n – секундный приток газа; G_p – секундный расход газа; Π_n – приток энергии от 1 кг поступающего газа, т.е. удельный приток энергии; Π_p – удельный расход энергии; k – показатель адиабаты; n – показатель термодинамического процесса; L – работа, совершаемая газом; u – удельная внутренняя энергия.

Запишем уравнения (1) – (3) применительно к первой и второй полостям камеры сгорания, обозначив параметры первой полости индексом 1, а параметры второй полости – 2. При этом будем учитывать, что газ в первую полость не поступает, а вытекающий из нее газ поступает во вторую полость, т.е.

$$G_{n1} = 0; G_{p1} = G_{n2} = G_1. \quad (4)$$

Удельная энергия газа, поступающего во вторую полость, опреде-

ляется удельной энтальпией топливной смеси в первой полости

$$P_{p1} = P_{п2} = i_1 = k(k-1)^{-1} RT_1, \quad (5)$$

где i_1 – удельная энтальпия топливной смеси; R – газовая постоянная.

Так как объемы полостей камеры сгорания не изменяются, то работа, совершаемая газом против внешних сил, равна нулю, т.е. $L=0$.

Определим количество теплоты Q , подводимой к газу, используя известное соотношение

$$dQ = \xi_z H_{um} dm, \quad (6)$$

где dm – элементарная масса сгоревшей топливной смеси; H_{um} – низшая теплотворная способность топливной смеси; ξ_z – коэффициент выделения теплоты. Коэффициентом ξ_z будем учитывать не только неполноту сгорания топливной смеси, но и теплоотдачу в стенки камеры сгорания.

Считая фронт пламени плоским, можно записать

$$dm = S_1 \rho_1 dx, \quad (7)$$

где S_1 – площадь поперечного сечения первой полости; ρ_1 – плотность топливной смеси; dx – элементарное перемещение фронта пламени.

Разделив уравнение (6) на дифференциал времени dt и учитывая уравнение (7), получим

$$\frac{dQ}{dt} = \xi_z H_{um} S_1 \rho_1 W, \quad (8)$$

где W – скорость перемещения фронта пламени.

Следует отметить, что теплота, выделяющаяся при сгорании топливной смеси, практически не передается топливной смеси, находящейся перед фронтом пламени. Поэтому для топливной смеси $Q=0$. Тогда с учетом соотношений (4) имеем $n=k$. Следовательно, параметры топливной смеси перед фронтом пламени изменяются адиабатически. Тогда

$$T_1 = T_0 \left(P_1 P_0^{-1} \right)^{(k-1)/k}, \quad (9)$$

где P_0 , T_0 – начальные значения давления топливной смеси.

Принимая топливную смесь за идеальный газ, можно записать

$$\rho_1 = \frac{P_1}{RT_1}. \quad (10)$$

Из зависимостей (8) – (10) получим

$$\frac{dQ}{dt} = a P_1^{1/k} W; \quad (11)$$

$$a = \frac{\xi_z H_{um} S}{RT_0} P_0^{(k-1)k}. \quad (12)$$

Количество топливной смеси, перетекшей из первой камеры во вторую, можно определить по зависимости

$$G_1 = \mu_1 f_1 P_1 g_1 \sqrt{kR^{-1}T_1^{-1}}, \quad (13)$$

где f_1 – площадь проходного сечения канала из первой полости во вторую; μ_1 – коэффициент расхода топливной смеси. Величина g зависит от перепада давлений между первой и второй полостями. При надкритическом перепаде, когда $\frac{P_2}{P_1} \leq \beta$, где P_2 – давление во второй полости,

$$g_1 = \beta^{(k+1)/2k}, \quad (14)$$

а при подкритическом перепаде, когда $\frac{P_2}{P_1} > \beta$,

$$g_1 = \left[\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2/k} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k+1)/k} \right] \right]^{0,5}; \quad (15)$$

$$\beta = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)}. \quad (16)$$

Учитывая зависимости (4), (5), (9), (11), (13), из уравнения (1) получим выражение, описывающее изменение давления в первой полости:

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{k-1}{V_1 \left(aWP_1^{1/k} - b_1P_1^{(3r-1)/2k} g_1 \right)}; \quad (17)$$

$$b_1 = \frac{k-1}{k} \mu_1 f_1 \sqrt{kRT_0} P_0^{(1-k)/k}. \quad (18)$$

Запишем уравнения (1) – (3) применительно ко второй полости камеры сгорания:

$$Q=0; L=0; G_n=G; G_p=G_2; \quad (19)$$

$$P_n=i_1=\frac{k}{k-1}RT_1; P_p=i_2=\frac{k}{k-1}RT_2, \quad (20)$$

где G_2 – секундный расход газа из второй полости в третью полость; i_2 , T_2 – энтальпия и температура топливной смеси во второй полости.

Учитывая соотношения (19), (20), из уравнений (1) – (3) получим

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{k}{V_2} \left(\mu_1 f_1 P_1 \sqrt{kRT_1} g_1 - \mu_2 f_2 P_2 \sqrt{kRT_2} g_2 \right); \quad (21)$$

$$T_2 = T_0 \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{(n_2-1)/n_2}; \quad (22)$$

$$n_2 = k + k \frac{(T_1 - T_2) G_1}{(G_1 - G_2) T_2}, \quad (23)$$

где V_2 – объем второй полости; n_2 – показатель термодинамического процесса второй полости.

Расход газа G_2 определяется такой зависимостью:

$$G_2 = \mu_2 f_2 P_2 g_2 \sqrt{k R^{-1} T_2^{-1}}, \quad (24)$$

где f_2 – площадь проходного сечения канала из второй полости в третью; μ_2 – коэффициент расхода этого канала.

При надкритическом перепаде давлений, когда $\frac{P_3}{P_2} \leq \beta$, где P_3 – давление в третьей полости,

$$g_2 = \beta^{(k+1)/2k}, \quad (25)$$

а при подкритическом перепаде, когда $\frac{P_3}{P_2} > \beta$,

$$g_2 = \left[\frac{2}{k+1} \left[\left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{2/k} - \left(\frac{P_3}{P_2} \right)^{(k+1)/k} \right] \right]^{0,5}. \quad (26)$$

Уравнения (21) – (26) описывают изменение параметров газа во второй полости. Аналогичные уравнения можно получить и для третьей полости камеры сгорания:

$$\frac{dP_3}{dt} = \frac{k}{V_3} \left(\mu_2 f_2 P_2 \sqrt{k R T_2} g_2 - \mu_3 f_3 P_3 \sqrt{k R T_3} g_3 \right); \quad (27)$$

$$T_3 = T_0 \left(\frac{P_3}{P_0} \right)^{(n_3-1)/n_3}; \quad (28)$$

$$n_3 = k + k \frac{(T_2 - T_3) G_2}{(G_2 - G_3) T_3}; \quad (29)$$

$$G_3 = \mu_3 f_3 P_3 g_3 \sqrt{k R^{-1} T_3^{-1}}, \quad (30)$$

где f_3 – площадь проходного сечения канала из третьей полости в чет-

вертуют. При $\frac{P_4}{P_3} \leq \beta$

$$g_3 = \beta^{(k+1)/2k}, \quad (31)$$

а при $\frac{P_4}{P_3} > \beta$

$$g_3 = \left[\frac{2}{k+1} \left[\left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{2/k} - \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{(k+1)/k} \right] \right]^{0,5}. \quad (32)$$

Запишем уравнения (1) – (3) применительно к последней полости камеры сгорания. В этом случае

$$Q=0; G_p=0; G_p=G_3; \Pi_n = \frac{k+1}{k} RT_3; \frac{dL}{dt} = P_4 \frac{dV_4}{dt}, \quad (33)$$

где dV_4 – элементарное изменение объема четвертой полости, обусловленное деформацией штампуемой заготовки.

Учитывая соотношения (33), из уравнений (1) – (3) получим

$$\frac{dP_4}{dt} = \frac{k}{V_4} \left(\mu_3 f_3 P_3 g_3 \sqrt{kRT_3} - P_4 \frac{dV_4}{dt} \right); \quad (34)$$

$$T_4 = T_0 \left(\frac{P_4}{P_0} \right)^{(n_4-1)/n_4}; \quad (35)$$

$$n_4 = k - k \frac{(T_3 - T_4) G_3 R}{P_4 \frac{dV_4}{dt} - RT_4 G_3}. \quad (36)$$

Зависимости (12) – (18), (21) – (32), (34) – (36) описывают изменение параметров газа во всех полостях камеры в период горения топливной смеси в первой полости. В период горения топливной смеси во второй полости изменение давления в ней можно определить по уравнению (17), заменив P_1 на P_2 и g_1 на g_2 . Вид уравнений для остальных полостей остается неизменным. Если истечение из первой полости считать всегда критическим и величину g определять только по зависимости (14), то уравнение (17) интегрируется. При этом можно получить такое уравнение, описывающее изменение давления в первой полости:

$$\ln \frac{\sqrt{t^2 + td + d^2}}{t-d} - \sqrt{3} \arctg \frac{2}{d\sqrt{3}} (t+0,5d) = \frac{3cd(k-1)^2}{2kV_1} x + C_1; \quad (37)$$

$$C_1 = \ln \frac{(t_0 + t_0 d + d^2)^2}{t_0 - d} - \sqrt{3} \operatorname{arctg} \left(\frac{2(t_0 + d/2)}{d\sqrt{3}} \right);$$

$$t = P^{(k-1)/2k}; \quad t_0 = P_0^{(k-1)/2k},$$

где P_0 – начальное значение давления топливной смеси.

По уравнению (37) можно приближенно определить изменение давления в первой полости по ходу X перемещения фронта пламени. Это уравнение удобно для анализа. Аналогичные уравнения можно получить и для последующих полостей.

Приведем уравнение (17) к безразмерному виду. Для этого подставим в это уравнение значения a и b_1 из зависимостей (12), (18). Тогда после соответствующих преобразований получим

$$\frac{dP_1}{dt} = (k-1)P_0 \frac{s\sqrt{kRT_0}}{V_1} \left[\frac{\xi_z H_{um}}{RT_0} \frac{W}{\sqrt{kRT_0}} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{1/k} - \frac{k-1}{k} \frac{\mu f_1 g_1}{s} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{3k-1/2k} \right]. \quad (38)$$

Введем такие обозначения:

$$t_x = \frac{V_1}{s\sqrt{kRT_0}} = \frac{l_1}{\sqrt{kRT_0}}; \quad (39)$$

$$\tau = t/t_x; \quad (40)$$

$$h = \frac{\xi_z H_{um}}{R_0 T_0}; \quad (41)$$

$$\varepsilon = \frac{W}{\sqrt{kRT_0}}; \quad F_1 = \mu f_1 / s; \quad \bar{P}_1 = \frac{P_1}{P_0}; \quad \bar{T}_1 = \frac{T_1}{T_0},$$

где l_1 – длина первой полости камеры горения; t_x – характерное время; τ – безразмерное время; h – относительная калорийность топливной смеси; ε – безразмерная скорость фронта пламени; F_1 – относительная площадь проходного сечения канала, соединяющего первую полость камеры сгорания со второй; \bar{P}_1 – безразмерное давление; \bar{T}_1 – безразмерная температура.

Используя эти безразмерные величины, уравнение (38) можно привести к безразмерному виду

$$\frac{d\bar{P}_1}{d\tau} = (k-1) \left[h\varepsilon \bar{P}_1^{1/k} - \frac{k-1}{k} F_1 g_1 \bar{P}_1^{3k-1/2k} \right]. \quad (42)$$

Выполнив аналогичные выкладки, уравнение (21) также можно привести к безразмерному виду

$$\frac{d\bar{P}_2}{d\tau} = \frac{k}{V_2} \left[\bar{P}_1 g_1 \sqrt{\bar{T}_1} - F_2 \bar{P}_2 g_2 \sqrt{\bar{T}_2} \right], \quad (43)$$

где $V_2 = V_2/V_1$ – относительный объем второй полости камеры; $F_2 = \mu_2 f_2 / S$ – относительная площадь проходного сечения канала, соединяющего вторую полость с третьей полостью камеры.

Безразмерные уравнения (42) и (43) описывают изменение давления в первой и второй полостях камеры горения. Безразмерные уравнения, описывающие изменение давления в третьей и четвертой полостях камеры сгорания, аналогичны уравнению (43). Из полученных уравнений следует, что на закономерность изменения параметров газа в полостях камеры сгорания влияют такие безразмерные величины: относительная калорийность топливной смеси h ; безразмерная скорость фронта пламени W ; соотношения площадей проходных сечений перепускных каналов F_1, F_2, F_3 ; относительные объемы полостей камеры сгорания V_2, V_3, V_4 .

Из уравнения (42) видно, что увеличение h и ε ведет к повышению интенсивности роста давления в первой полости, а увеличение F_1 вызывает снижение давления в первой полости. В период горения топливной смеси во второй полости увеличение h и ε вызывает повышение давления в этой полости, а увеличение F_2 приводит к снижению давления. Анализ полученных безразмерных уравнений показывает, что на повышение эффективности работы камеры пульсирующего горения наибольшее влияние оказывает соотношение объемов ее полостей, т.е. величин V_2, V_3, V_4 .

Оценивая полученные результаты с определенной степенью точности, делаем вывод о том, что при оптимальном соотношении объемов камер, равном примерно трем для конструкции, состоящей из трех камер, можно реализовать 27-кратную общую степень повышения давления топливной системы на поверхности штампуемой заготовки. Начальная стадия процесса штамповки происходит под действием нарастающего давления топливной смеси. При сгорании этой смеси давление на поверхности заготовки повышается еще в 3,5–5 раз в зависимости от формы штампуемой детали. Таким образом, давление газа на поверхности заготовки повышается в 100–120 раз. Это дает возможность штамповать детали широкой номенклатуры.

При количестве полостей камеры, в которых сгорает топливная смесь, более трех увеличивается степень повышения давления, однако это малопривлекательно с практической точки зрения, так как ведет к повышению громоздкости устройства.

Выводы. Разработана математическая модель рабочего процесса устройства с камерой пульсирующего горения для листовой штамповки.

Она позволит оценить степень повышения давления в полости над заготовкой в зависимости от конструктивных параметров устройства и давления подачи топливной смеси.

Предложенное устройство можно рассматривать также как определенный генерирующий модуль более сложного устройства для штамповки деталей разного типа – днищ, панелей жесткости, полуторов и т.д.

Список использованных источников

1. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В.П. Романовский.– М.: Машиностроение, 1971.– 782 с.
2. Боташев, А.Ю. Исследование процесса газоимпульсной штамповки [Текст] / А.Ю. Боташев // Кузнечно-штамповочное производство.– М., 1999.– № 11.– С.20–22.
3. Мамонтов, М.А. Вопросы термодинамики тела переменной массы [Текст] / М.А.Мамонтов.– М.: Оборонгиз, 1961.– 55 с.
4. Вырубов, Д.Н. Двигатели внутреннего сгорания [Текст] / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко; под. ред. А.С. Орлина, М.Т. Круглова.– М.: Машиностроение, 1985. – 372 с.

Поступила в редакцию 15.09.2011.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Е. Тараненко,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*