

УДК 621.98.044.7

Боташев А. Ю.
Бисилов Н. У.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГАЗОВОЙ ШТАМПОВКИ С ДВУХСТОРОННИМ НАГРЕВОМ ЗАГОТОВКИ

В современных условиях в силу острой конкуренции отечественных и зарубежных производителей весьма актуальным является исследование и разработка новых способов листовой штамповки, обеспечивающих снижения себестоимости штампованных деталей. В существующих методах листовой штамповки [1–4] процесс штамповки в основном осуществляется в холодном состоянии заготовки. При этом ввиду ограниченности пластических свойств заготовки, штамповка деталей сложной конфигурации производится за несколько технологических переходов, что удорожает изготовления таких деталей.

Нагрев заготовки повышает ее пластичность и это используется при штамповке деталей из труднодеформируемых материалов [5]. При газоимпульсной штамповке [2] происходит некоторый нагрев заготовки, однако при этом температура заготовки увеличивается всего на 200...500 °С, что не достаточно для существенного повышения ее пластичности. Штамповку деталей сложной конфигурации целесообразно производить в интервале температур горячей обработки. При этом за счет повышения пластичности заготовки сокращается количество технологических переходов, что обеспечивает снижение стоимости изготовления деталей, особенно в мелкосерийном производстве.

Целью данной работы является создание нового оборудования для газовой штамповки, осуществляющего процесс штамповки в горячем состоянии заготовки.

Нагрев штампуемой листовой заготовки осуществляется двухсторонним воздействием на нее высокотемпературного газа. Это реализовано в устройстве для штамповки, схема которой представлена на рис. 1. Штампуемая заготовка зажимается между матрицей 1 и корпусом 7 камеры сгорания 6 с помощью болтов 5 и гаек 4. Матрица 1 и корпус 7 снабжены впускными клапанами 12, 10, выпускными клапанами 13, 8 и свечами зажигания 3, 9. Камера сгорания 6 и полость матрицы 2 через впускные клапаны 10 и 12 заполняются топливной смесью, например природным горючим газом и сжатым воздухом.

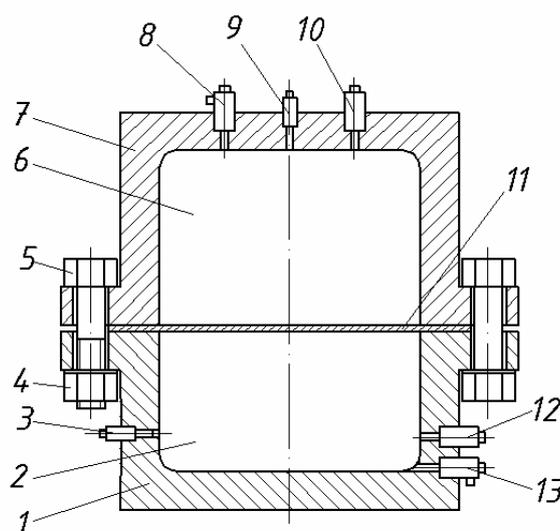


Рис. 1. Схема устройства для газовой штамповки:

1 – матрица; 2 – полость матрицы; 3, 9 – свечи зажигания; 4 – гайка; 5 – болт; 6 – камера сгорания; 7 – корпус; 8, 13 – выпускные клапаны; 10, 12 – впускные клапаны; 11 – заготовка

Топливная смесь с помощью свеч 3 и 9 поджигается. В результате сгорания давление и температура резко повышаются. Под действием продуктов сгорания заготовка 1 интенсивно нагревается. После достижения температуры заготовки заданной величины открывается выпускной клапан 3 и газ из полости матрицы 2 выпускается.

При этом под действием давления газа, находящегося в камере сгорания, заготовка деформируется и заполняет полость матрицы. Вследствие жесткого защемления краев заготовки заполнение полости матрицы происходит за счет утонения заготовки.

Исходя из описанного, газовая штамповка включает в себя процессы сгорания топливной смеси, нагревания заготовки и ее деформации.

Рассмотрим вначале процесс сгорания топливной смеси в камере сгорания и полости матрицы. Закон изменения давления в обеих полостях может быть описан, используя уравнение И. Вибе [6]:

$$X = 1 - e^{-6,906(t_z^{-1})^{m+1}}, \quad (1)$$

где X – доля сгоревшего топлива;

m – показатель характера сгорания;

t_z – время полного сгорания топлива;

t – время.

С другой стороны, доля выгоревшего топлива может быть также определена следующей зависимостью:

$$X = \frac{P - P_c}{P_z - P_c}, \quad (2)$$

где P – давление в данный момент времени;

P_c – давление топливной смеси;

P_z – давление в конце процесса сгорания.

Выразим давление P_z через степень повышения давления в результате сгорания топливной смеси:

$$P_z = \lambda P_c, \quad (3)$$

где λ – степень повышения давления.

Решая совместно уравнения (1)–(3), получим закон изменения давления в процессе сгорания топливной смеси:

$$P = P_c + P_c(\lambda - 1)[1 - e^{-6,906(t_z^{-1})^{m+1}}]. \quad (4)$$

Эта зависимость описывает закон изменения давления в процессе сгорания топлива. Характер изменения давления показан на рис. 2. Величины λ , m , t_z , входящие в зависимость (4), определяются опытным путем. Для случая сгорания стехиометрического состава смеси природного газа с воздухом величина λ составляет 7...8. Показатель характера сгорания m зависит от формы камеры сгорания. Для цилиндрических камер сгорания величина m может быть принята в пределах 4...4,5. Длительность процесса сгорания в первую очередь зависит

При синхронном поджиге топливной смеси в камере сгорания и в полости матрицы давление в этих полостях существенно не отличается. Возможная разность давлений, ввиду ее незначительности, в процессе сгорания топливной смеси не вызывает существенных деформаций заготовки, так как ее температура в этот период невелика.

Так как сгорание топливной смеси происходит без изменения объема, то температура изменяется пропорционально давлению:

$$T = T_c \frac{P}{P_c}, \quad (5)$$

где T_c – абсолютная температура топливной смеси.

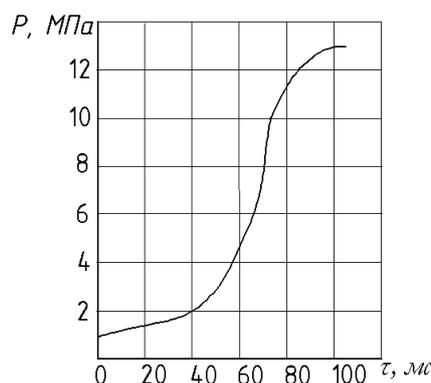


Рис. 2. Характер изменения давления в процессе горения топливной смеси от объема камеры сгорания

Для цилиндрических камер объемом 10...15 л, что соответствует рассматриваемому случаю, величина t_z составляет 0,08...0,10 с.

Зависимости (4) и (5) описывают изменение давления и температуры в период горения топливной смеси в камере сгорания и в полости матрицы.

Оценим изменение температуры заготовки в период горения топливной смеси. Из совместного решения уравнения теплового баланса и уравнения теплоотдачи следует, что повышение температуры заготовки можно определить по следующей зависимости:

$$\Delta t_3 = \frac{2\alpha(t_r - t_3)_{cp}}{s\rho_3 c_3} \tau, \quad (6)$$

где Δt_3 – приращение температуры заготовки;

$(t_r - t_3)_{cp}$ – среднее значение перепада температур между газом и заготовкой;

ρ_3, c_3 – плотность и удельная теплоемкость материала заготовки;

s – толщина заготовки;

τ – длительность процесса;

α – коэффициент теплоотдачи.

Как видно из рис. 2, в начальный период процесса сгорания, занимающий почти половину общей длительности процесса, давление существенно не повышается. Следовательно, в этот период существенно не увеличивается и температура газа. Поэтому нагрев заготовки происходит в основном во второй стадии процесса сгорания. Поэтому можно принять $\tau = 0,05...0,06$ с. За этот период перепад температур между газом и заготовкой изменяется примерно от 100 до 2200 °С, т. е. минимальный перепад $(t_r - t_3)_{\min} = \Delta t_{\min} = 100$, а максимальный перепад $(t_r - t_3)_{\max} = \Delta t_{\max} = 2200$. Среднюю величину перепада температур определим по известной зависимости [7]:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\ln(\Delta t_{\max} / \Delta t_{\min})}. \quad (7)$$

Подставляя вышеприведенные значения в зависимость (7), получим $\Delta t_{cp} \approx 700$ °С. По аналогии с поршневыми двигателями внутреннего сгорания коэффициент теплоотдачи α в период горения топливной смеси не превышает 5 кВт/(м²·К). Для стальной заготовки $c_3 = 0,46$ кДж/(кг·К), $\rho_3 = 7800$ кг/м³. Тогда по зависимости (6) получим, что приращение температуры стальной заготовки толщиной 1 мм в период горения топливной смеси составляет около 100...150 °С. Такое увеличение температуры для стальной заготовки существенного значения не имеет. Для заготовки из цветных сплавов это может вызвать ощутимые изменения механических свойств.

Существенное повышение температуры заготовки происходит уже после окончания процесса сгорания. При этом из-за высокой температуры газа (2000...2500 °С) примерно в 1,5 раза повышается среднее значение разности температур между газом и заготовкой. Наряду с этим высокое давление газа обуславливает некоторое увеличение коэффициента теплоотдачи α . Поэтому нагрев заготовки происходит значительно интенсивнее. Время нагрева заготовки можно определить по следующей зависимости, полученной из формулы (6):

$$\tau = \frac{s\rho_3 c_3}{2\alpha(t_\Gamma - t_3)_{cp}} \Delta t_3. \quad (8)$$

Расчет по этой зависимости показывает, что нагрев стальной заготовки толщиной 1 мм от 100 °С до 1000 °С происходит в течение 0,3...0,4 с.

В период нагрева заготовки, т. е. в течение времени τ_n , давление газа снижается вследствие теплоотдачи в заготовку и стенки камеры сгорания и матрицы. Без большой погрешности можно считать закон изменения давления линейным, т. е.:

$$P = P_z \left(1 - a \frac{\tau}{\tau_n}\right), \quad (9)$$

где a – коэффициент, определяемый опытным путем;

τ_n – время нагрева.

В этой зависимости время τ изменяется от 0 до τ_n . Давление газа в конце процесса нагрева заготовки, т. е. при $\tau = \tau_n$, является начальным давлением процесса штамповки:

$$P_0 = P_z(1 - a). \quad (10)$$

После завершения нагрева заготовки до заданной температуры открывается выпускной клапан, и начинается выпуск газа из полости матрицы. Давление в полости матрицы начинает снижаться. Исходя из уравнений термодинамики тело переменной массы [8], можно показать, что изменение давления в полости матрицы определяется следующим уравнением:

$$\frac{dP_M}{d\tau} = \frac{k-1}{V'_M} \left(-\Pi G - \frac{k}{k-1} \frac{dL}{d\tau}\right), \quad (11)$$

где P_M – давление в полости матрицы;

V'_M – текущее значение объема матрицы;

Π – удельный расход энергии;

G – секундный расход газа;

L – работа, совершаемая газом;

k – показатель адиабаты газа;

τ – время.

$$\frac{dP_M}{d\tau} = \frac{k}{V_M - V_3} \left(P_M \frac{dV_3}{d\tau} - RT_M G\right). \quad (12)$$

Выражение для определения расхода газа G зависит от режима истечения [6]. При критическом истечении, когда $P_a / P_M \leq \beta$:

$$G = mfP_M \beta^{\frac{k+1}{2k}} \sqrt{\frac{k}{RT_M}}, \quad (13)$$

а при докритическом истечении, когда $P_a / P_M > \beta$:

$$G = mfP_M \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_M} \left((P_a/P_M)^{\frac{2}{k}} - (P_a/P_M)^{\frac{k+1}{k}} \right)}; \quad (14)$$

$$\beta = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (15)$$

где f – площадь проходного сечения выпускного клапана;

m – коэффициент расхода;

P_a – атмосферное давление.

Зависимости (12)–(15) описывают изменение давления газа в полости матрицы. Длительность процесса выпуска газа из полости матрицы составляет 0,1...0,2 с.

В процессе деформирования заготовки объем камеры сгорания увеличивается, но масса газа остается неизменной. Давление газа изменяется по политропическому закону, т. е.:

$$P_\kappa = P_0 \left(\frac{V_\kappa}{V_\kappa + V_\varepsilon} \right)^n, \quad (16)$$

где P_0 – начальное давление, определяемое зависимостью (10);

V_κ – начальный объем камеры сгорания; n – показатель политропы.

Процесс штамповки осуществляется под действием разности давлений газа в камере сгорания и полости матрицы, т. е.:

$$P_{ш} = P_\kappa - P_M, \quad (17)$$

где $P_{ш}$ условно будем называть давлением штамповки.

Весь процесс штамповки по характеру деформирования заготовки можно разбить на три стадии (рис. 3). Первая стадия характеризуется увеличением высоты деформируемой заготовки (рис. 3, а). Она длится до момента касания центральной части заготовки дна матрицы. При пневмотермической формовке эту стадию называют свободной выдувкой [2].

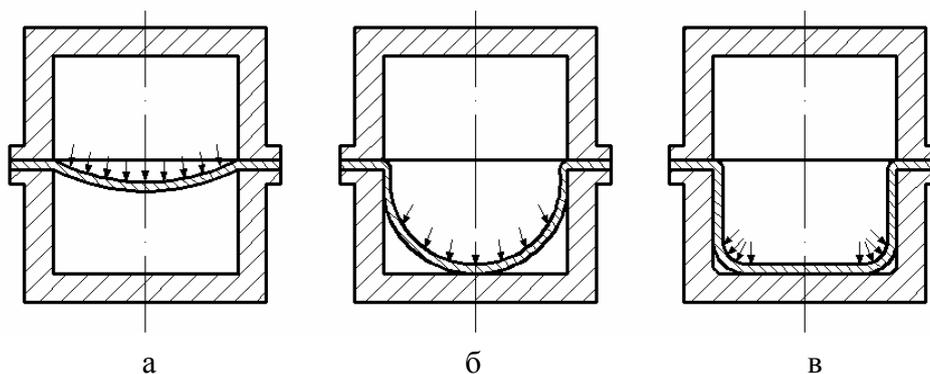


Рис. 3. Стадии процесса штамповки

При штамповке детали цилиндрической формы в течение первой стадии процесса заготовка деформируется в форме шарового сегмента. При штамповке деталей коробчатой формы очаг пластической деформации первоначально также имеет форму близкую к сферической, но в дальнейшем ее форма искажается.

Во второй стадии процесса штамповки происходит оформление дна штампуемой детали (рис. 3, б). При этом по мере увеличения площади контакта заготовки с дном матрицы площадь очага пластической деформации непрерывно уменьшается. Центральная зона заготовки, контактирующая с дном матрицы, неподвижна. Вследствие действия сил трения течение металла из этой зоны отсутствует.

В заключительной стадии процесса происходит заполнение углов матрицы (рис. 3, в). Форма очага деформации близка к сферической. Для заполнения углов матрицы требуется значительно большее давление газа.

При штамповке деталей типа сферического днища процесс заканчивается на первой же стадии. При штамповке деталей иных форм, например цилиндрической или коробчатой форм, реализуются все три стадии.

Для определения необходимой величины перепада давлений между камерой сгорания и матрицей, т. е. давления штамповки $P_{ш}$, может быть использовано уравнение Лапласа [9].

$$\frac{P_{ш}}{s} = \frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_\theta}{\rho_\theta}, \quad (18)$$

где σ_m и σ_θ – напряжения в меридиональном и широтном направлениях соответственно;

ρ_m и ρ_θ – радиусы кривизны очага деформации в меридиональном и радиальном направлениях.

Давление газа, т. е. величина $P_{ш}$, во много раз меньше напряжений σ_m и σ_θ . Поэтому можно считать, что в очаге деформации имеет место плоское напряженное состояние. Тогда, решая уравнение (18) совместно с условием пластичности, можно получить [5]:

$$P_{ш} = K\sigma_s \frac{s}{\rho}, \quad (19)$$

где ρ – наименьший радиус кривизны очага деформации;

K – коэффициент, зависящий от соотношения длин сторон штампуемой детали.

Величина K находится в пределах от 1 до 2. Для цилиндрической матрицы $K = 2$.

Ввиду малости радиуса углов матрицы величина $P_{ш}$ имеет наибольшее значение при заполнении углов матрицы. В этот период целесообразно обеспечить отсутствие давления в полости матрицы, т. е. $P_M = 0$. При этом в соответствии с зависимостью (17) $P_{ш} = P_k$, т. е. давление штамповки равно давлению газа в камере сгорания. Тогда согласно зависимости (19) конечное значение давления газа в камере сгорания:

$$P_k = K\sigma_s \frac{s}{\rho_M}, \quad (20)$$

где ρ_M – радиус углов дна матрицы.

С другой стороны давление газа в камере сгорания P_k определяется зависимостью (16). Причем в этот период объем деформируемой заготовки равен объему матрицы, т. е. $V_s = V_M$. С учетом этого из зависимостей (16) и (20) получим:

$$K\sigma_s \frac{s}{\rho_M} = P_0 \left(\frac{V_k}{V_k + V_M} \right)^n.$$

Отсюда получим:

$$P_0 = K\sigma_s \frac{s}{\rho_M} \left(\frac{V_k + V_M}{V_k} \right)^n. \quad (21)$$

Из зависимостей (3), (10), (21) получим выражение, определяющее необходимую величину давления топливной смеси:

$$P_c = \frac{K\sigma_s S}{\rho_M \lambda (1-a)} \left(\frac{V_{k_0} + V_M}{V_{k_0}} \right)^n \quad (22)$$

Расчет по этой зависимости показывает, что, в частности для стальной заготовки толщиной 1 мм. Давление топливной смеси составляет 1...1,5 МПа.

Расход топливной смеси для штамповки одной детали определяется следующей зависимостью:

$$q_c = (V_k + V_M) \frac{P_c T_a}{P_a T_c}, \quad (23)$$

где $P_a T_a$ – давление и абсолютная температура окружающей среды при нормальных условиях;

T_c – абсолютная температура топливной смеси.

Зависимости (3), (5)–(23) определяют энергосиловые характеристики процесса штамповки. Совокупность зависимостей (4), (5), (8–10), (12–19), (22) образуют математическую модель процесса газовой штамповки, которая описывает изменение параметров рабочего процесса устройства для штамповки.

ВЫВОДЫ

Двухсторонний нагрев штампуемой заготовки воздействием продуктов сгорания газобразной топливной смеси обеспечивает повышение ее температуры до интервала температур горячей обработки. Время нагрева стальной заготовки толщиной 1 мм составляет 0,3...0,4 с. Общая длительность нагрева заготовки и ее штамповки составляет около 0,5 с. Давление топливной смеси в зависимости от материала и толщины заготовки составляет 0,5...2,0 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубцев М. Е. Листовая штамповка / М. Е. Зубцев. – Л. : Машиностроения, 1980. – 432 с.
2. Боташев А. Ю. Исследование процесса газомпульсной штамповки / А. Ю. Боташев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 11. – С. 20–22.
3. Боташев А. Ю. Исследование процесса нагрева листовой заготовки при двухстороннем воздействии горячего газа / А. Ю. Боташев, Н. У. Бисилов // Рациональные пути решения социально-экономических и научно-технических проблем региона. – Черкесск, 2008. – № 4.1. – С. 109–112.
4. Боташев А. Ю. Разработка устройств газовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки / А. Ю. Боташев, Н. У. Бисилов // Инновационные направления в пищевых технологиях : материалы III международной научно-практической конференции 29–30 октября, 2009. – Пятигорск, РИА-КМВ, 2009. – 348 с.
5. Ковалевич М. В. Расчет режимов пневмотремической формовки деталей коробчатой формы в режиме сверхпластичности / М. В. Ковалевич // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – № 9. – С. 35–39.
6. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателей / И. И. Вибе. – М. : Наука, 1962. – 365 с.
7. Теплотехника / А. П. Баскаков, Б. В. Берг, О. К. Витт и др. – М. : Энергоиздат, 1982. – 264 с.
8. Мамонтов М. А. Некоторые случаи течения газа по трубам, насадкам и проточным сосудом / М. А. Мамонтов. – М. : Оборонгиз, 1951. – 490 с.
9. Александров А. В. Сопротивление материалов / А. В. Александров, В. Д. Попанов, Б. П. Державин. – М. : Высш. Шк., 2000. – 560 с.

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

Бисилов Н. У. – ассистент СКГГТА.

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

E-mail: w9187124909@mail.ru