

УДК 621.98.044.7

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ГАЗОВОЙ ФОРМОВКИ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ И СОЗДАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

*Боташев А.Ю., д.т.н. профессор, зав. кафедрой «Технологические машины
и переработка материалов»*

*Малсугенов Р.С., ассистент кафедры «Технологические машины
и переработка материалов»*

*Бисилов Н.У., к.т.н. доцент кафедры «Технологические машины
и переработка материалов» (w9187124909@mail.ru)*

Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия
(369000, Россия, Черкесск, ул. Ставропольская, 36)

Аннотация. Технологические машины и оборудование, используемые в пищевой, химической и в ряде других отраслей промышленности, выпускаются сравнительно небольшими партиями. Эти машины и оборудование содержат большое количество листовых деталей сложной формы, имеющих сравнительно небольшую высоту. Традиционные методы штамповки недостаточно эффективны для производства таких деталей в условиях мелкосерийного производства. Для эффективного производства таких деталей разработан новый метод листовой штамповки – газовая формовка с противоавлением. Сущность этого метода заключается в том, что односторонним воздействием горячего газа листовая заготовка нагревается до заданной температуры, а затем осуществляется ее формовка. При этом для ограничения деформации заготовки в период ее нагрева на противоположной стороне создается противоавление воздействием сжатого воздуха. В качестве горячего газа используются продукты сгорания газозвоздушных смесей. Благодаря нагреву заготовки до интервала температур теплой или горячей обработки данный метод обеспечивает получение деталей сложной формы за одну технологическую операцию, что существенно снижает себестоимость их производства. В ходе изучения нагрева заготовки установлена закономерность изменения температуры во времени, которая дает возможность управлять этим процессом. Получены также выражения для определения давления газа, обеспечивающего процесс формовки. Для реализации данного метода разработана и создана установка с противоавлением, содержащая устройство для газовой формовки и системы топливоподдачи и контроля. На ней проведены экспериментальные исследования процесса формовки нескольких типов деталей: сферообразных днищ, цилиндрической детали с фланцем, детали с поверхностью двойной кривизны, детали с мелким рельефом, панели теплообменника со спиральным каналом. При этом определены оптимальные технологические режимы газовой формовки, создающие условия для получения деталей хорошего качества. Экспериментальные исследования показали, что данный метод позволяет получать детали сложной формы за одну технологическую операцию, используя сравнительно простую штамповую оснастку. Благодаря этому, применение данного метода формовки может обеспечить значительное снижение себестоимости производимых деталей, особенно в мелкосерийном производстве. Данный метод целесообразно использовать для формовки стальных деталей толщиной до 1,5 мм и деталей из цветных сплавов толщиной до 2 – 3 мм.

Ключевые слова: листовая штамповка, формовка, газовая формовка, формовка с противоавлением, нагрев листовой заготовки, устройство для листовой штамповки, горячая обработка, штамповая оснастка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-1-6-11

Во многих отраслях промышленности значительна доля мелкосерийных производств [1]. В этих условиях более эффективны импульсные методы листовой штамповки [2 – 8]. Однако они не обеспечивают нагрев штампуемой заготовки, поэтому не достаточно эффективны для производства деталей из трудно деформируемых сплавов. Нагрев листовой заготовки необходимо осуществлять непосредственно в полости матрицы, так как она быстро остывает из-за большой площади ее поверхности. В настоящее время для нагрева металлов широко используют плазменный, лазерный, микроволновый и электрический методы нагрева [9, 10]. Использование этих методов для нагрева листовой заготовки в полости матрицы существенно усложнит штамповую оснастку, что вызовет повышение себестоимости штам-

пуемых деталей. Известен также метод газотермической формовки, при которой нагрев и деформирование заготовки осуществляется длительным воздействием нагретого инертного газа [11 – 13]. Данный метод обеспечивает получение деталей из труднодеформируемых материалов, но при этом из-за большого расхода энергоносителя повышается себестоимость их производства. Более экономичен метод газовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки, который осуществляется двухсторонним воздействием продуктов сгорания газовых смесей [14]. Однако этот метод мало приемлем для производства многих типов деталей, имеющих небольшую высоту. Это, в частности, сферообразные днища и крышки технологических емкостей, применяемых в пищевой отрасли [15, 16]; невысокие детали цилинд-

рической и коробчатой форм технологических машин и оборудования [17]; панели теплообменников с каналами, используемые в холодильной технике [18]. Такие детали целесообразно производить формовкой с нагревом заготовки.

Целью данной работы является разработка и апробация нового метода листовой штамповки для производства тонкостенных деталей, имеющих полости сравнительно небольшой высоты. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи: разработка метода газовой формовки с противодавлением, создание оборудования для его осуществления и экспериментальная апробация данного метода.

Сущность метода газовой формовки с противодавлением заключается в том, что односторонним воздействием горячего газа заготовка нагревается до заданной температуры, а затем осуществляется ее формовка. При этом для ограничения деформации заготовки в период нагрева на ее противоположной стороне создается противодавление также воздействием газа.

Схема установки для газовой формовки представлена на рис. 1. Установка включает в себя устройство для газовой формовки [19] и системы топливоподачи и контроля. Устройство содержит матрицедержатель 1 с матрицей 2 и корпус 3, стянутые между собой болта-

ми 4. В корпусе 3 помещена камера сгорания 5, снабженная предохранительным клапаном 6, впускным клапаном 7, свечей зажигания 8 и выпускным клапаном 9. К корпусу 3 прикреплен цилиндр 12 с поршнем 11. Полость 10 цилиндра 12 соединена с камерой сгорания 5, а полость 13 трубопроводом 14 соединена с полостью 18 матрицедержателя 1, которая сообщена каналами с внутренней полостью 19 матрицы 2. В нижней части корпуса 3 выполнена кольцевая полость 15, в которой установлен кольцевой поршень 16. Формуемая заготовка 17 зажимается между матрицедержателем 1 и кольцевым поршнем 16. В нижней части матрицедержателя 1 установлены впускной клапан 20, выпускной клапан 21 и предохранительный клапан 22.

Система топливоподачи установки включает в себя воздушный компрессор 25, ресивер 26, газовый баллон с пропан-бутаном, электропневматические клапаны 27, 28, 29, 30, 33 и обратные клапаны 31, 34. Система контроля содержит электроконтактные манометры 23, 36, 37 и электропневматические клапаны 35, 38.

Работа устройства осуществляется следующим образом. При открытии электропневматического клапана 28 сжатый воздух из ресивера 26 поступает в полости 18 и 19, а также через трубопровод 14 в полость 13. При достижении в полости 18 давления за-

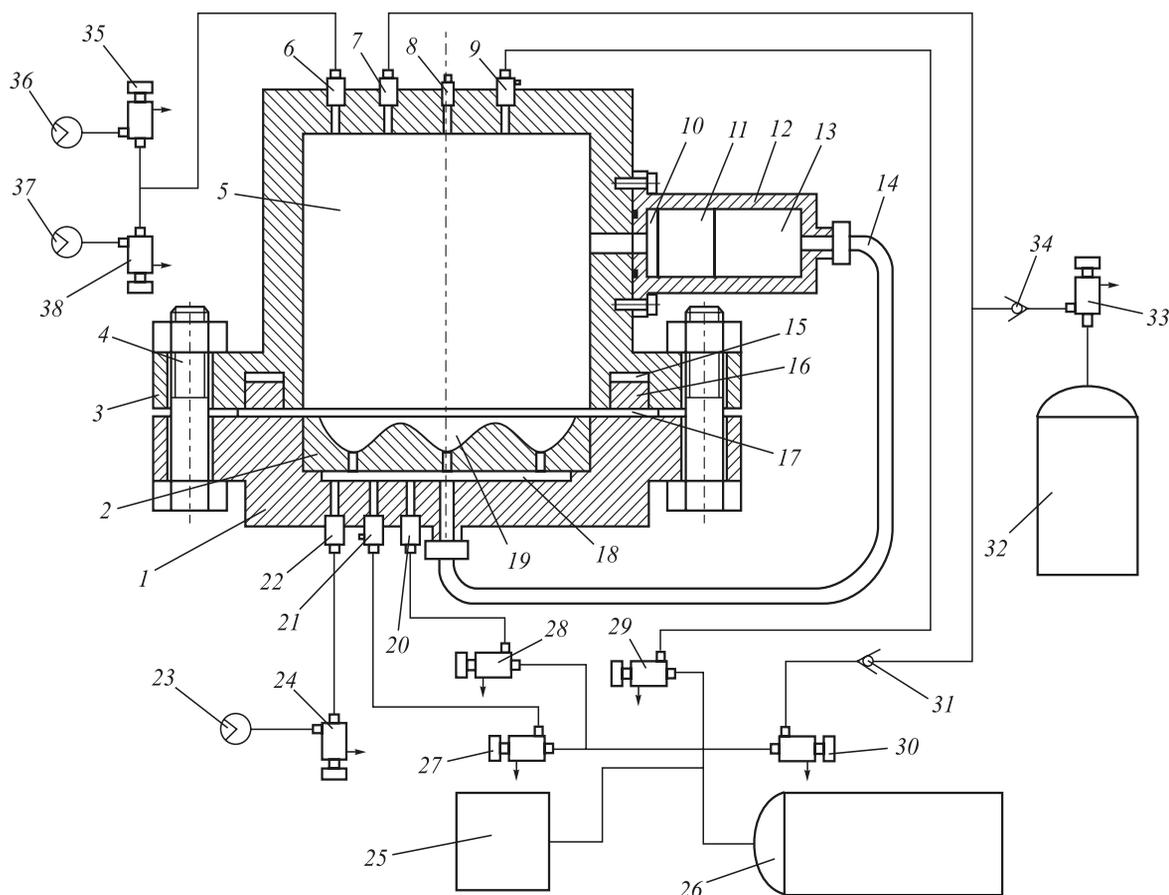


Рис. 1. Схема установки для газовой формовки с противодавлением

Fig. 1. Scheme of the unit for gas forming with backpressure

данной величины электроконтактный манометр 23 отключает подачу сжатого воздуха. Одновременно с этим при помощи электропневматических клапанов 30, 33 и электроконтактных манометров 36, 37 осуществляется последовательная подача в камеру сгорания 5 горючего газа и сжатого воздуха. При этом в камере сгорания 5 образуется топливная смесь, которая при помощи свечи 8 поджигается. В процессе горения топливной смеси давление в камере сгорания 5 повышается. Это давление передается в полость 10 цилиндра 12. При этом под действием давления газа поршень 11 перемещается, вытесняя воздух из полости 13 в полости 18 и 19. Благодаря этому давление в полости 19 увеличивается, что, ограничивая деформацию заготовки 17, предотвращает контакт ее с поверхностью матрицы [20]. После окончания горения топливной смеси заготовка 17 под воздействием продуктов сгорания интенсивно нагревается. При достижении температуры заготовки заданной величины открывается клапан 21 и воздух из полостей 18 и 19 выпускается. При этом под давлением продуктов сгорания заготовка 17 деформируется и заполняет полость 19 матрицы 2 – осуществляется процесс формовки.

Анализ процесса нагрева заготовки на основе уравнений конвективного теплообмена [21] и теплового баланса [22] показал, что закономерность изменения температуры заготовки выражается следующей зависимостью:

$$t_3 = \frac{1}{b+1} \left[t_z \left(1 - e^{-\frac{\alpha(b+1)\tau}{\rho_3 c_3 \delta}} \right) + t_{30} \left(b + e^{-\frac{\alpha(b+1)\tau}{\rho_3 c_3 \delta}} \right) \right], \quad (1)$$

где t_z – температура конца процесса сгорания, °C; t_{30} – начальная температура заготовки, °C; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·K; ρ_3 – плотность материала заготовки, кг/м³; c_3 – удельная теплоемкость материала заготовки, Дж/(кг·K); δ – толщина заготовки, м; τ – время нагрева заготовки; b – безразмерная величина, учитывающая параметры газа.

Расчет по зависимости (1) показал, что время нагрева заготовки до интервала температур горячей обработки не превышает 0,7–0,8 с, а оптимальная его величина составляет 0,4–0,5 с. Температура заготовки зависит от давления топливной смеси P_c . В частности, для нагрева стальной заготовки диаметром 400 мм и толщиной 0,5 мм до 900 °C это давление должно быть 1,1–1,3 МПа.

Деформируемую заготовку, ввиду малости ее толщины, можно рассматривать как тонкую оболочку, нагруженную давлением газа. Тогда для определения напряжений, возникающих в заготовке при ее деформировании, можно использовать уравнение Лапласа для тонкой оболочки [23]. Используя это уравнение и условие пластичности, получены зависимости для определения давления формовки для различных типов де-

талей. Для случая формовки сферообразного днища эта зависимость имеет следующий вид:

$$P_\phi = \frac{4h\delta}{0,25d^2 + h^2} \sigma_s, \quad (2)$$

где P_ϕ – давление формовки, Па; d – диаметр днища, м; h – высота днища, м; δ – толщина заготовки, м; σ_s – предел текучести материала заготовки, Па.

При формовке деталей цилиндрической и коробчатой форм наибольшее давление газа требуется для обеспечения заполнения заготовкой углов донной части матрицы. Давление формовки для этой стадии можно определить по зависимости

$$P_\phi = \frac{\delta}{R_3} \sigma_s, \quad (3)$$

где R_3 – радиус закругления донной части детали, м.

При формовке панелей теплообменников и деталей с мелким рельефом наибольшее давление газа требуется для формовки участков с минимальными радиусами кривизны. Это давление может быть определено по зависимости

$$P_\phi = \frac{2\delta}{R_{\min}} \sigma_s, \quad (4)$$

где R_{\min} – минимальный радиус кривизны поверхности детали, м.

Для того, чтобы давление формовки P_ϕ достигало значений, соответствующих уравнениям (2)–(4), необходимая величина давления топливной смеси должна быть определена как

$$P_c = \frac{aP_\phi}{\lambda_V} \left(1 - 0,1 \frac{\tau_n}{\tau_z} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где λ_V – степень повышения давления при сгорании топливной смеси в замкнутом объеме; τ_n – время нагрева заготовки после окончания процесса горения, с; τ_z – время сгорания топливной смеси, с; a – коэффициент.

Для практической апробации данного метода формовки, оценки его технологических возможностей и отработки технологических режимов были проведены экспериментальные исследования. Эксперименты проводили на установке, представленной на рис. 2. В процессе экспериментов формовке подвергали листовые заготовки из стали 3 толщиной 0,5 и 1 мм и заготовки из алюминия марки А5М толщиной 0,5; 1; 2 мм. В ходе экспериментов варьировали давление топливной смеси в пределах 0,3–0,7 МПа, время нагрева заготовки составляло 0,4–0,5 с. При этом производили отработку технологии формовки следующих типов деталей: сферообразного днища с плоским дном, сферообразного днища с центральным углублением, цилиндрической



Рис. 2. Установка для газовой формовки с противодавлением

Fig. 2. Unit for gas forming with backpressure

детали с фланцем, детали с поверхностью двойной кривизны, детали с мелким рельефом и панели теплообменника со спиральным каналом.

Для проверки приемлемости зависимости (5) была проведена формовка сферообразного днища с плоским дном из стальной заготовки толщиной 1 мм. Диаметр днища составлял 400 мм, его высота – 80 мм. Формовку производили при давлении топливной смеси 0,3 МПа. Значение давления, рассчитанное по зависимостям (2) и (5), удовлетворительно согласуется с его экспериментальным значением (расхождение не превышает 10 %).

На рис. 3, *а* представлено днище, полученное из стальной заготовки толщиной 0,5 мм. В центре днища имеется лунка диаметром 65 мм и глубиной 12,5 мм. Формовку производили при давлении топливной смеси 0,6 МПа и времени нагрева заготовки 0,4 с. При этом, согласно уравнению (1), температура заготовки при формовке составляла 550 – 600 °С.

На рис. 3, *б* показана деталь типа «крышка», полученная из стальной заготовки толщиной 1 мм. Размеры де-

тали в плане 550×550 мм, высота 55 мм. Формовка осуществлялась при давлении топливной смеси 0,5 МПа.

Формовку цилиндрической детали с фланцем (рис. 4, *а*) производили из алюминиевого листа толщиной 1 мм. Диаметр цилиндра составлял 400 мм, высота – 15 мм. Формовку производили при давлении топливной смеси 0,4 МПа. При этом ее температура была 350 – 380 °С.

На рис. 4, *б* представлена панель теплообменника со спиральным каналом, имеющим форму спирали Архимеда. Диаметр панели составлял 400 мм, ширина канала 30 мм, а глубина 12 мм. Формовку панели производили из алюминиевой заготовки толщиной 1 мм при давлении топливной смеси 0,5 МПа. При этом температура заготовки достигала 400 °С.

На рис. 4, *в* представлена деталь со сложным мелким рельефом, полученная из алюминиевой заготовки толщиной 1 мм. Формовка осуществлялась при давлении топливной смеси 0,5 МПа. Форма полученной детали полностью соответствовала форме матрицы.

Обобщая изложенное, можно заключить следующее. Разработанный метод газовой формовки с противодавлением обеспечивает интенсивный нагрев листовой заготовки до заданной температуры, что, повышая пластичность, создает оптимальные условия для ее формоизменения. Оптимальная величина времени нагрева заготовки составляет 0,4 – 0,5 с. Максимальная температура нагрева заготовки существенно зависит от давления топливной смеси, толщины и материала заготовки. Данный метод целесообразно использовать для формовки стальных деталей толщиной до 1,5 мм и деталей из цветных сплавов толщиной до 2 – 3 мм. Экспериментальные исследования показали, что данный метод формовки позволяет получать детали сложной формы за одну технологическую операцию, используя сравнительно простую штамповую оснастку. Благодаря этому, применение данного метода формовки может обеспечить значительное снижение себестоимости производимых деталей, особенно в мелкосерийном производстве.

Рис. 3. Сферообразное днище (*а*) и деталь типа «крышка» (*б*)Fig. 3. Sphere-like bottom (*a*) and part of “cap” type (*b*)



Рис. 4. Деталь цилиндрической формы с фланцем (а), панель теплообменника со спиральным каналом (б), деталь с мелким рельефом (в)

Fig. 4. Detail of cylindrical shape with a flange (a), a heat exchanger plate with a helical channel (b), item with fine relief (c)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ильин Л.Н., Семенов Е.И. Технология листовой штамповки. – М.: Дрофа, 2009. – 479 с.
- Бычков С.А., Борисевич В.К., Кривцов В.С., Брагин А.П. О концепции использования технологических критериев для выбора импульсных технологий листовой штамповки // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11. С. 222 – 231.
- Сухов В.В. Опыт создания газозрывных систем с многоточечным инициированием детонации метано-кислородной смеси // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11. С. 182 – 185.
- Борисевич В.К., Нарыжный А.Г., Молодых С.И. Влияние передающей среды на деформирование и точность детали при импульсной штамповке // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11 (47). С. 173 – 181.
- Мусаев А.А. Выработка исходных данных для разработки опытно-промышленного образца двухкамерного устройства для газовой листовой штамповки // *Изв. вуз. Машиностроение*. 2012. № 3. С. 43 – 48.
- Тараненко М.Е. Возможности штамповки автокузовных панелей из современных материалов повышенной прочности на ЭГ-прессах // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2014. № 9. С. 34 – 40.
- Князев М.К., Chebanov Yu.I. Multi-electrode discharge blocks for electrohydraulic forming and their capabilities // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2004. No. 3 (9). P. 13 – 20.
- Banabic D. *Sheet Metal Forming Processes*. – Berlin-Heidelberg, Springer Verlag. 2010. – 340 p.
- Туманов Ю.Н. Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах. – М.: Физматлит, 2010. – 968 с.
- Abedrabbo N., Pourboghhrat F., Carsley J. Forming of aluminum alloys at elevated temperatures. Part 2. Numerical modeling and experimental verification // *International Journal of Plasticity*. 2006. No. 22. P. 342 – 373.
- Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, С.С. Яковлев, Я.А. Соболев. – М.: Машиностроение -1, Изд-во ТулГУ, 2004. – 427 с.
- Ковалевич М.В. Расчет режимов пневмотермической формовки деталей коробчатой формы в режиме сверхпластичности // *Заготовительное производство в машиностроении*. 2006. № 9. С. 35 – 39.
- Ларин С.Н. Пневмоформовка ячеистых панелей из анизотропного материала // *Известия ТулГУ. Технические науки*. Вып. 3. 2010. С. 51 – 61.
- Боташев А.Ю., Бисилов Н.У. Исследование газовой листовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2013. № 3. С. 25 – 28.
- Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. *Процессы и аппараты пищевых производств*. – 2-е издание перер. и дополн. – М.: Колос С, 2005.
- Машины и аппараты пищевых производств. В 2-х кн. Кн. 1: Учебник для вуз. / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков и др. / Под ред. В.А. Панфилова. – М.: Высшая школа, 2001. – 703 с.
- Верболоз Е.И., Корниенко Ю.И., Пальчиков А.Н. *Технологическое оборудование: Учеб. пособие*. – Саратов: Вузовское образование, 2014. – 205 с.
- Румянцев Ю.Д., Калюнов В.С. *Холодильная техника: Учебник для вузов*. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2005. – 360 с.
- Пат. 150249 РФ. RU 150249 МПК В21 D 22/00. Устройство для листовой штамповки взрывом газовых смесей / А.Ю. Боташев, Н.У. Бисилов, Р.С. Малсугенов; опубл. 10.02.2015. Бюл. № 4.
- Боташев А. Ю., Бисилов Н.У., Малсугенов Р.С. Разработка и исследование устройства для газовой штамповки с односторонним нагревом заготовки // *Изв. вуз. Машиностроение*. 2014. № 7. С. 28 – 34.
- Ерофеев В.Л., Семенов П.Д., Пряхин А.С. *Теплотехника: Учебник для вуз.* / Под ред. В.Л. Ерофеева. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2008. – 488 с.
- Теплотехника: Учеб. пособие / А.В. Гдалев, А.В. Козлов, Ю.И. Сапрунов, С.Г. Майоров. – Саратов: Научная книга, 2012. – 286 с.
- Сопроотивление материалов: Учебник / А.Г. Схиртладзе, Б.В. Романовский, В.В. Волков, А.Н. Потемкин. – М.: Изд. центр «Академия», 2012. – 416 с.

Поступила 8 июня 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 1, PP. 6–11.

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF GAS MOLDING WITH BACK PRESSURE AND CREATION OF THE EQUIPMENT FOR ITS IMPLEMENTATION

A.Yu. Botashev, R.S. Malsugenov, N.U. Bisilov

North Caucasian State Academy of Humanities and Technology,
Cherkessk, Russia

Abstract. Technological machines and equipment used in the food, chemical and other industries, are produced in relatively small batches. These machines and equipment contains a large number of sheet metal parts of complex shape having a relatively small height. Traditional

methods of stamping are not sufficiently effective for the production of such parts in small batch production. For the efficient production of such parts there is a new method for sheet metal forming – forming gas backpressure. The essence of this method lies in the fact that the unilateral influence of the hot gas sheet billet is heated to a predetermined temperature, and then is formed. Thus to limit the deformation of the billet during its heating on the opposite side it creates pressure the influence of compressed air. As the hot gas a combustion gas-air mixtures is used. Due to the heating of the billet up to the temperature range of the warm hot treatment this method provides obtaining of complex-shaped parts in one work step, which significantly reduces the cost of production. Studying the heating process of the billet set up, the pattern of temperature change in time was determined, which ensures the controllability of the process. The expressions for determining the gas pressure were derived, ensuring the implementation of the molding process. To implement this method of molding installation for a gas forming a pressure is designed and developed containing device for forming the gas and fuel delivery and control. Using it the experimental studies were made for the process of forming several types of components: spherical bottoms, cylindrical part with a flange part with a surface of double curvature, parts with small relief panels of the heat exchanger with a helical channel. At the same time, optimal technological regimes of gas molding are determined, ensuring the obtaining of good quality parts. Experimental studies have shown that this method of forming allows to obtain parts of complex shape in one work step using a relatively simple stereotyped equipment. Due to this application of the molding method can provide considerable cost savings in parts production, especially in small-scale production. This method is useful for forming steel parts with thickness up to 1.5 mm and of parts made of nonferrous alloys with the thickness up to of 2 – 3 mm.

Keywords: sheet metal stamping, forming, gas forming, noncondensing forming, heating the slab, stamping device, gaseous fuel mixture, heat treatment, die tooling.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-1-6-11

REFERENCES

1. Il'in L.N., Semenov E.I. *Tekhnologiya listovoi shtampovki* [Sheet stamping technology]. Moscow: Drofa, 2009, 479 p. (In Russ.).
2. Bychkov S.A., Borisevich V.K., Krivtsov V.S., Bragin A.P. On the concept of using technological criteria for the selection of impulse technologies for sheet stamping. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2007, no. 11, pp. 222–231. (In Russ.).
3. Sukhov V.V. Experience of gas blasting systems with multipoint initiation of detonation of methane-oxygen mixture. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2007, no. 11, pp. 182–185. (In Russ.).
4. Borisevich V.K., Naryzhnyi A.G., Molodykh S.I. Influence of deformation on the transmission medium and precision stamping parts with impulse. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2007, no. 11 (47), pp. 173–181. (In Russ.).
5. Musaev A.A. Development of baseline data for the development of research and industrial design of dual-chamber device for gas stamping. *Izv. vuz. Mashinostroenie*. 2012, no. 3, pp. 43–48. (In Russ.).
6. Taranenko M.E. Possibilities of stamping of auto body panels made of modern materials of increased strength at EG presses. *Kuznechno-shtampovnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2014, no. 9, pp. 34–40. (In Russ.).
7. Knyazyev M.K., Chebanov Yu.I. Multi-electrode discharge blocks for electrohydraulic forming and their capabilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2004, no. 3 (9), pp. 13–20.
8. Banabic D. *Sheet metal forming processes*. Berlin-Heidelberg, Springer Verlag, 2010, 340 p.
9. Tumanov Yu.N. *Plazmennye, vysokochastotnye, mikrovolnovye i lazernye tekhnologii v khimiko-metallurgicheskikh protsessakh* [Plasma, high-frequency, microwave and laser technologies in chemical and metallurgical processes]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 968 p.
10. Abedrabbo N., Pourboghhrat F., Carsley J. Forming of aluminum alloys at elevated temperatures. Part 2: Numerical modeling and experimental verification. *International Journal of Plasticity*. 2006, no. 22, p. 342–373.
11. Yakovlev S.P., Chudin V.N., Yakovlev S.S., Sobolev Ya.A. *Izotermicheskoe deformirovanie vysokoprochnykh anizotropnykh metallov* [Isothermal deformation of high-strength anisotropic metals]. Moscow: Mashinostroenie -1, Izd-vo TulGU, 2004, 427 p. (In Russ.).
12. Kovalevich M.V. Calculation of modes of pneumothermal molding of box-shaped parts in superplasticity mode. *Zagotovitel'noe proizvodstvo v mashinostroenii*. 2006, no. 9, pp. 35–39. (In Russ.).
13. Larin S.N. Pneumo-forming of mesh panels made of an anisotropic material. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2010, Issue 3, pp. 51–61. (In Russ.).
14. Botashev A.Yu., Bisilov N.U. Study of gas sheet stamping with two-sided billet heating. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2013, no. 3, pp. 25–28. (In Russ.).
15. Plaksin Yu.M., Malakhov N.N., Larin V.A. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Processes and devices of food manufactures]. Moscow: Kolos S, 2005. (In Russ.).
16. Antipov S.T., Kretov I.T., Ostrikov A.N. etc. *Mashiny i apparaty pishchevykh proizvodstv. V 2 kn. Kn. 1: Uchebn. dlya vuzov* [Machinery and equipment for food production. In 2 books. Book 1: Textbook for universities]. Panfilov V.A. ed. Moscow: Vysshaya shkola, 2001, 703 p. (In Russ.).
17. Verboloz E.I., Kornienko Yu.I., Pal'chikov A.N. *Tekhnologicheskoe oborudovanie: uchebnoe posobie* [Technological equipment: Manual]. Saratov: Vuzovskoe obrazovanie, 2014, 205 p. (In Russ.).
18. Rumyantsev Yu.D., Kalyunov V.S. *Kholodil'naya tekhnika: Ucheb. dlya vuzov* [Refrigerators: Textbook for universities]. St. Petersburg: Izd-vo Professiya, 2005, 360 p. (In Russ.).
19. Botashev A. Yu., Bisilov N.U., Malsugenov R.S. *Ustroistvo dlya listovoi shtampovki vzyvom gazovykh smesei* [A device for stamping by explosion of gas mixtures]. Utility model patent no. 150249 RF, RU 150249 MPK B21 D 22/00. *Byulleten' izobretenii*. 2015, no. 4. (In Russ.).
20. Botashev A. Yu., Bisilov N.U., Malsugenov R.S. Development and research of the device for forming a gas one-side heated billets. *Izv. vuz. Mashinostroenie*. 2014, no. 7, pp. 28–34. (In Russ.).
21. Erofeev V.L., Semenov P.D., Pryakhin A.S. *Teplotekhnika: uchebnik dlya vuzov* [Heat engineering: Textbook for universities]. Erofeev V.L. ed. Moscow: Akademiya, 2008, 488 p. (In Russ.).
22. Gdalev A.V., Kozlov A.V., Saprunov Yu.I., Maiorov S.G. *Teplotekhnika: uchebnoe posobie* [Heat engineering: Manual]. Saratov: Nauchnaya kniga, 2012, 286 p. (In Russ.).
23. Skhirtladze A.G., Romanovskii B.V., Volkov V.V., Potemkin A.N. *Soprotivlenie materialov: uchebnik* [Strength of materials: Textbook]. Moscow: Akademiya, 2012, 416 p. (In Russ.).

Information about the authors:

A.Yu. Botashev, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Processing Machinery and Equipment”

R.S. Malsugenov, Assistant of the Chair “Processing Machinery and Equipment”

N.U. Bisilov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Processing Machinery and Equipment” (w9187124909@mail.ru)

Received June 8, 2016