



БОТАШЕВ

Анвар Юсуфович

(Северо-Кавказская
государственная
гуманитарно-технологическая
академия)

BOTASHEV

Anvar Yusufovich

(Cherkessk, Russian Federation,
North Caucasian State Academy
of Humanities and Technology)



БИСИЛОВ

Назим Урусланович

(Северо-Кавказская
государственная
гуманитарно-технологическая
академия)

BISILOV

Nazim Uruslanovich

(Cherkessk, Russian Federation,
North Caucasian State Academy
of Humanities and Technology)



МАЛСУГЕНОВ

Роман Сергеевич

(Северо-Кавказская
государственная
гуманитарно-технологическая
академия)

MALSUGENOV

Roman Sergeevich

(Cherkessk, Russian Federation,
North Caucasian State Academy
of Humanities and Technology)

Исследование процесса нагрева заготовки при газовой листовой штамповке

А.Ю. Боташев, Н.У. Бисилов, Р.С. Малсугенов

При газовой листовой штамповке под воздействием высокотемпературного газа, образованного при сгорании топливной смеси, заготовка нагревается, а затем подвергается штамповке. В статье приведены результаты экспериментального исследования нагрева листовой заготовки при газовой штамповке с двухсторонним нагревом заготовки. Получено выражение для определения температуры нагрева заготовки, которое позволяет оценить максимальную температуру заготовки в зависимости от давления топливной смеси, длительности нагрева и толщины заготовки с точностью до 50 °С. При давлении топливной смеси 1 МПа и времени нагрева 0,3 с обеспечивается нагрев стальной заготовки толщиной 1 мм до 900 °С. Экспериментальные исследования показали что, данный метод штамповки позволяет нагреть заготовку до интервала температур горячей обработки, что многократно повышает пластичность заготовки. Новый тип устройства для газовой штамповки, благодаря нагреву заготовки, осуществляет процесс штамповки при низком давлении газа, порядка 0,4...1,0 МПа, что существенно расширяет сферу применения газовой штамповки.

Ключевые слова: двухсторонний нагрев, пластичность, газовая штамповка, топливная смесь, давление газа, нагрев заготовки, высокотемпературный газ.

Study of the slab heating process in gas sheet forming

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

The results of experimental studies of two-sided slab heating in gas forming are presented. With this method, the high temperature gas generated by combustion of a fuel mixture heats the slab which is then subjected to press forming. A relationship for determining the slab heating temperature makes it possible to estimate the maximum temperature of the slab depending on the pressure of the fuel mixture, the duration of heating, and the slab thickness with an accuracy of 50° C. Given a fuel mixture pressure of 1 MPa and the heating time of 0.3 sec, a 1-mm-thick steel billet can be heated up to 900° C. Experimental studies have shown that this forming technique increases the slab temperature up to the hot forming temperature range, which significantly improves the ductility of the slab. A new type of device for hot metal gas forming enables forming metal sheets at a lower gas pressure of about 0,4 ... 1,0 MPa, which significantly extends the field of application of the gas forming process.

Keywords: two-sided heating, plasticity, gas forming, fuel mixture, gas pressure, slab heating, high temperature gas.

Метод газовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки [1—3] позволяет осуществлять процесс штамповки в горячем состоянии заготовки, что существенно облегчает штамповку деталей сложной конфигурации [4]. Принципиальная схема устройства для газовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки показана на рис. 1. Штампуемая заготовка зажимается между матрицей 1 и корпусом 7 камеры сгорания 6. Полость матрицы 2 и камера сгорания 6 через впускные клапаны 10 и 12 заполняются топливной смесью, например, природным горючим газом и сжатым воздухом. Топливная смесь при помощи свеч 3 и 9 поджигается. В результате сгорания давление и температура резко повышаются. Под действием продуктов сгорания заготовка 11 интенсивно нагревается. После достижения температуры заготовки заданного значения 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 1. Таким образом, при данном методе штамповки заготовка перед деформированием подвергается нагреву под двухсторонним воздействием горячего газа. При этом температура газа составляет порядка 2 000 °С, а давление в зависимости от материала и толщины заготовки — 5...20 МПа (при давлении топливной смеси 0,3...2,5 МПа). Для обеспечения процесса штамповки варьируемыми параметрами являются давление топливной смеси и время нагрева заготовки.

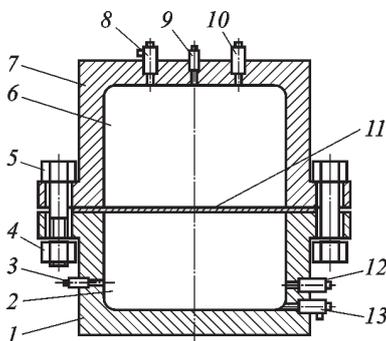


Рис. 1. Схема устройства для газовой штамповки:

- 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

Цель данной работы — определение температуры заготовки в зависимости от этих параметров.

Рассмотрим процесс нагрева заготовки под двухсторонним воздействием горячего газа. В работе [5] показано, что при теплообмене тонкой пластины с окружающей ее газовой средой температуру по толщине пластины можно считать одинаковой, если критерий Био меньше 0,1. В данном случае это условие выполняется, поэтому изменением температуры по толщине заготовки можно пренебречь, что позволяет использовать уравнение теплового баланса для определения температуры заготовки с учетом охлаждения газа. Часть теплоты, полученной заготовкой от газа, отводится через ее фланец к корпусу и матрице. Однако площадь тепловоспринимающей поверхности заготовки примерно в 50 раз больше площади ее сечения, через которую происходит отвод тепла. Поэтому, пренебрегая отводом тепла от заготовки, будем считать, что вся теплота, воспринимаемая заготовкой от газа, идет на повышение ее температуры. Тогда можно записать

$$m_3 cd = dQ, \quad (1)$$

где m_3 — масса тепловоспринимающей части заготовки; dQ — элементарное количество теплоты, воспринимаемой заготовкой от газа за время $d\tau$.

Будем считать, что заготовка нагревается только за счет конвективного теплообмена. Тогда согласно уравнению теплоотдачи Ньютона—Рихмана

$$dQ = \alpha F (t_r - t_3) d\tau, \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; F — площадь тепловоспринимающей поверхности заготовки; t_r — температура газа; t_3 — температура заготовки.

Поскольку температура газа сверху и снизу заготовки одинаковая, то в первом приближении можно считать, что потоки тепла со стороны камеры сгорания и со стороны матрицы примерно одинаковые. Тогда площадь тепловоспринимающей поверхности заготовки можно определить по формуле

$$F = F_B + F_H = 2(\pi/4)d_M^2 = 0,5\pi d_M^2, \quad (3)$$

где F_B, F_H — соответственно площадь верхней и нижней поверхностей заготовки; d_M — диа-

метр входной кромки матрицы. Массу теплопринимающей части заготовки можно выразить зависимостью

$$m_3 = 0,5Fsp, \quad (4)$$

тогда из уравнений (1), (2) и (4) получим

$$\alpha F(t_r - t_3) d\tau = 0,5Fspcdt. \quad (5)$$

Здесь s — толщина заготовки; ρ — плотность заготовки; c — удельная теплоемкость заготовки.

Из уравнения (5) после соответствующих преобразований и интегрирования получим выражение для определения времени нагрева заготовки:

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

где $(t_r - t_3)_{cp}$ — среднее значение перепада температур между газом и заготовкой; Δt_3 — приращение температуры заготовки,

$$\Delta t_3 = t - t_0. \quad (7)$$

Если задано время нагрева заготовки, то, исходя из формулы (6), приращение температуры заготовки определяется следующей зависимостью:

$$\Delta t_3 = \frac{2\alpha(t_r - t_3)_{cp}}{spc} \tau_n. \quad (8)$$

При этом среднее значение перепада температур $(t_r - t_3)_{cp}$ можно определить, используя известную формулу [6]

$$(t_r - t_3)_{cp} = (\Delta t_{max} - \Delta t_{min}) / \ln(\Delta t_{max} / \Delta t_{min}), \quad (9)$$

где Δt_{max} , Δt_{min} — соответственно максимальное и минимальное значения перепада температур между газом и заготовкой. При определении значений Δt_{max} и Δt_{min} учитывается уменьшение температуры газа в процессе нагрева заготовки.

Для оценки приемлемости полученных зависимостей были проведены экспериментальные исследования с помощью устройства, выполненного по схеме, представленной на рис. 1. Фотография устройства показана на рис. 2. Измерение температуры заготовки при помощи датчиков, наклеиваемых на ее поверхность, в данном случае невозможно, так как датчики также будут подвергаться воздействию горяче-

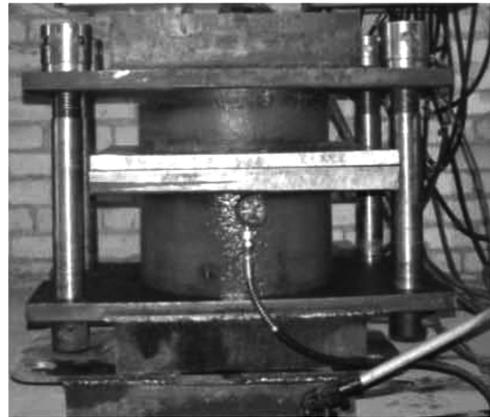


Рис. 2. Экспериментальное устройство

го газа. Поэтому для определения температуры заготовки использовали термоиндикаторные карандаши, которые плавятся при определенной температуре. Для предотвращения воздействия горячего газа на метки термоиндикаторных карандашей штамповке подвергали две заготовки, уложенные друг на друга. Метки наносили на внутреннюю поверхность заготовки.

Эксперименты проводили следующим образом. На листовую заготовку толщиной 0,5 мм из стали 08 термоиндикаторными карандашами наносили параллельные линии на расстоянии 10 мм друг от друга (рис. 3, а). Метки наносили таким образом, чтобы чувствительность на температуру нанесенных линий отличалась на 50 °С. Таким образом, эти линии представляли собой шкалу температур с ценой деления 50 °С. Затем на заготовку с нанесенными линиями устанавливали другую заготовку, после чего обе заготовки в сборе помещали в устройство для штамповки.

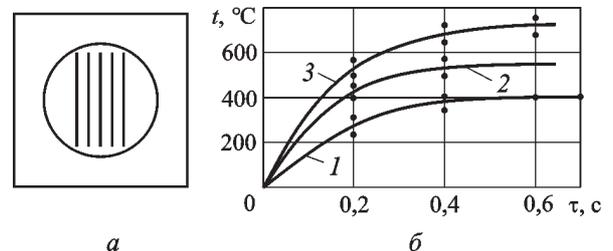


Рис. 3. Схема нанесения меток термоиндикаторными карандашами (а) и зависимости температуры заготовки от времени при различных давлениях топливной смеси (б):

1 — 0,3 МПа; 2 — 0,5 МПа; 3 — 0,7 МПа;
● — измеренные значения

В процессе экспериментов давление топливной смеси варьировали от 0,3 до 0,7 МПа, а время нагрева заготовки — от 0,2 до 0,7 с. При этом время нагрева заготовки определялось промежутками времени между подачей искры свечей зажигания и открытием выпускного клапана. Вначале провели серию экспериментов при давлении топливной смеси 0,3 МПа, устанавливая время нагрева заготовки равным 0,2; 0,4; 0,6 и 0,7 с. Каждый эксперимент повторяли 3 раза. При этом было установлено, что по мере увеличения времени нагрева заготовки от 0,2 до 0,6 с ее температура повышается до 400 °С. Однако при увеличении длительности нагрева от 0,6 до 0,7 с температура заготовки существенно не изменялась. Это свидетельствует о том, что при длительности нагрева 0,6 с практически наступает тепловое равновесие между газом и заготовкой. Следовательно, увеличение времени нагрева заготовки выше 0,6 с нецелесообразно. Поэтому в последующих сериях экспериментов время нагрева заготовки изменяли от 0,2 до 0,6 с.

Результаты экспериментов представлены на рис. 3, б. Измеренные значения температуры отмечены точками. В трех экспериментах значения температуры либо совпадали, либо отличались на 50 °С. Так, при давлении смеси $P_c = 0,5$ МПа и $\tau = 0,4$ с в двух экспериментах температура заготовки составляла 550 °С, а в одном эксперименте — 500 °С, поэтому значения температуры отмечены двумя точками. При $P_c = 0,5$ МПа и $\tau = 0,6$ с во всех трех экспериментах температура составила 550 °С. Значения температуры заготовки, относящиеся к каждой серии экспериментов, объединены в соответствующие кривые 1—3. Поскольку температура оценивалось с точностью 50 °С, можно считать, что доверительный интервал этих кривых составляет порядка 25 °С.

Из анализа представленных кривых следует, что интенсивный нагрев заготовки происходит при длительности нагрева до 0,3...0,5 с. При дальнейшем увеличении времени нагрева скорость роста температуры существенно снижается. Исходя из этого, а также учитывая, что в процессе нагрева заготовки давление газа уменьшается вследствие его охлаждения, время нагрева заготовки следует установить в пределах 0,3...0,5 с.

На рисунке видно, что температура заготовки существенно зависит от давления топливной смеси. В уравнении (2) влияние давления газа учитывается коэффициентом теплоотдачи α . В поршневых двигателях внутреннего сгорания для определения α широко используется формула Вошни [7], в которой величина α пропорциональна $P^{0,8}$. Для установления вида этой зависимости, приемлемой для исследуемого процесса, выполнен расчет значения α при различных значениях давления топливной смеси. При этом использовались экспериментальные значения температуры заготовки при $\tau_n = 0,6$ с и уравнение (8). По результатам расчета установлено, что для условий газовой штамповки зависимость коэффициента теплоотдачи от давления топливной смеси P_c может быть описана следующим выражением:

$$\alpha = 4 \left(\frac{P_c + 0,1}{1,1} \right)^{0,8} \quad (10)$$

Здесь P_c — в МПа, α — в кВт/(м² · К). Формула (10) по структуре соответствует формуле Вошни. Зависимости (8)—(10) в совокупности позволяют оценить увеличение температуры штампуемой заготовки под воздействием продуктов сгорания. Вычисленные по формуле (8) значения температуры заготовки при различных значениях времени нагрева и давления топливной смеси удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, расхождение не превышает 12...15%. Проведенные расчеты и экспериментальные исследования показали, что при определенном давлении топливной смеси и длительности нагрева температура заготовки повышается до значений температур горячей обработки. В частности при давлении топливной смеси 1 МПа и времени нагрева 0,3 с обеспечивается нагрев стальной заготовки толщиной 1 мм до 900 °С.

Выводы

1. При газовой штамповке с двухсторонним нагревом заготовки происходит интенсивный нагрев заготовки.
2. Получено выражение для определения температуры нагрева заготовки, которое позво-

ляет оценить максимальную температуру заготовки в зависимости от давления топливной смеси, длительности нагрева и толщины заготовки с точностью до 50 °С.

3. Новый тип устройства для газовой штамповки, благодаря нагреву заготовки, осуществляет процесс штамповки при низком давлении газа, порядка 0,4...1,0 МПа, что существенно расширяет сферу применения газовой штамповки.

Литература

[1] Боташев А.Ю., Бисиллов Н.У. Исследование рабочего процесса устройства для газовой штамповки с двухсторонним нагревом заготовки. *Обработка металлов давлением: Сб. науч. тр.* Краматорск, ДГМА, 2010, № 4(25), с. 126–132.

[2] Botashev A.Yu., Bisilov N.U. The research and creation of device for the gas punching with bilateral heating of stock material. *Applied and Fundamental Studies: Proceedings of the 2nd International Academic Conference*, 8–10 March 2013, vol. 1. St. Louis, Missouri, USA, pp. 195–198.

[3] Botashev A.Y., Bisilov N.U., Malsugenov R.S. Research of new method of the sheet stamping and creation of equipment for his realization. *European Innovation Convention: Proceedings of the 1st International scientific conference, 20–21 December 2013*. Vienna, East West Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH, pp. 129–135.

[4] Giuliano G., ed. *Superplastic Forming of Advanced Metallic Materials: Methods and Applications*. Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi, Woodhead Publishing, 2011. 369 p.

[5] Кудинов В.А., Карташов Э.М., Стефанюк Е.В. *Теплотехника*. Москва, Высшая школа, Абрис, 2012. 423 с.

[6] Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. *Процессы и аппараты пищевых производств*. Москва, Колосс, 2007. 760 с.

[7] Чайнов Н.Д., ред. *Конструирование двигателей внутреннего сгорания*. Москва, Машиностроение, 2011. 494 с.

References

[1] Botashev A.Yu., Bisilov N.U. *Issledovanie rabocheho protsessa ustroystva dlia gazovoi shtampovki s dvukhsstoronnim nagrevom zagotovki* [Study workflow device for forming a two-way gas heating billets]. *Obrabotka metallov davleniem: Sbornik nauchnykh trudov* [Metal Forming: Collection of scientific papers]. Kramatorsk, Donbass state engineering academy publ., 2010, no. 4(25), pp. 126–132.

[2] Botashev A.Yu., Bisilov N.U. The research and creation of device for the gas punching with bilateral heating of stock material. *Applied and Fundamental Studies: Proceedings of the 2nd International Academic Conference*. 8–10 March 2013, vol. 1. St. Louis, Missouri, USA, pp. 195–198.

[3] Botashev A.Y., Bisilov N.U., Malsugenov R.S. Research of new method of the sheet stamping and creation of equipment for his realization. *European Innovation Convention: Proceedings of the 1st International scientific conference, 20–21 December 2013*. Vienna, «East West» Association for Advanced Studies and Higher Education GmbH publ., pp. 129–135.

[4] *Superplastic Forming of Advanced Metallic Materials: Methods and Applications*. Ed. Giuliano G. Oxford, Cambridge, Philadelphia, New Delhi, Woodhead Publishing, 2011. 369 p.

[5] Kudinov V.A., Kartashov E.M., Stefaniuk E.V. *Teplotekhnika* [Heating Engineer]. Moscow, Vysshiaia shkola, Abris publ., 2012. 423 p.

[6] Plaksin Yu.M., Malakhov N.N., Larin V.A. *Protsessy i apparty pishchevykh proizvodstv* [Processes and devices of food manufactures]. Moscow, Koloss publ., 2007. 760 p.

[7] *Konstruirovaniye dvigatelei vnutrennego sgoraniia* [Designing the internal combustion engine]. Ed. Chainov N.D. Moscow, Mashinostroenie publ., 2011. 494 p.

Статья поступила в редакцию 30.01.2014

Информация об авторах

БОТАШЕВ Анвар Юсуфович (Черкесск) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Технология и оборудование пищевых производств». Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия (369000, Черкесск, Российская Федерация, ул. Ставропольская 36, e-mail: botashev11@mail.ru).

БИСИЛОВ Назим Урусланович (Черкесск) — старший преподаватель кафедры «Технология и оборудование пищевых производств». Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия (369000, Черкесск, Российская Федерация, ул. Ставропольская 36, e-mail: w9187124909@mail.ru).

МАЛСУГЕНОВ Роман Сергеевич (Черкесск) — аспирант кафедры «Технология и оборудование пищевых производств». Северо-Кавказская государственная гуманитарно-технологическая академия (369000, Черкесск, Российская Федерация, ул. Ставропольская 36, e-mail: malsugenov_roma@mail.ru).

Information about the authors

BOTASHEV Anvar Yusufovich (Cherkessk) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Food Production Technology and Equipment» Department. North Caucasian State Academy of Humanities and Technology (Stavropol'skaya str., 36, 369000, Cherkessk, Russian Federation, e-mail: botashev11@mail.ru).

BISILOV Nazim Uruslanovich (Cherkessk) — Senior Lecturer of «Food Production Technology and Equipment» Department. North Caucasian State Academy of Humanities and Technology (Stavropol'skaya str., 36, 369000, Cherkessk, Russian Federation, e-mail: w9187124909@mail.ru).

MALSUGENOV Roman Sergeevich (Cherkessk) — Post-Graduate of «Food Production Technology and Equipment» Department. North Caucasian State Academy of Humanities and Technology (Stavropol'skaya str., 36, 369000, Cherkessk, Russian Federation, e-mail: malsugenov_roma@mail.ru).