

УДК 669.017

**Воробьев К. Г.
Кузьмина О. М.****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЯЧЕЙ ЛИСТОВОЙ ВЫТЯЖКИ
АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ
С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ**

Процесс горячей листовой штамповки позволяет создать условия, когда материал проявляет повышенную пластичность. Это дает возможность получать детали с малым расходом материала за счет значительного снижения или абсолютного исключения последующей обработки. Изделия сложной формы получают заданную геометрию в ходе одной технологической операции, поскольку становится возможным получить различные степени деформации в разных участках заготовки. Таким образом, несколько отдельных конструктивных частей, которые в настоящее время производятся с применением различных процессов и впоследствии соединяются с помощью сварки, склеивания, механического или какого-либо другого способа, могут быть произведены как одна деталь. В связи с этим возможно сокращение длительности технологического цикла за счет уменьшения или исключения количества сборочных операций. Кроме того, достоинством процесса является возможность дальнейшей деформации деталей, полученных этим способом, поскольку подобный вид обработки не приводит к деформационному упрочнению материала – а такое упрочнение, как правило, сопровождается традиционными процессами обработки давлением.

Несмотря на большой объем проведенных исследований по вопросам повышенной пластичности, следует заметить, что остается достаточный исследовательский потенциал в контексте технологической цепочки: определение механических свойств выбранных сплавов – компьютерное моделирование процесса – технологические расчеты – разработка конструкций и конструирование деталей, производимых с помощью процесса горячей листовой штамповки – оценка механических свойств произведенных деталей.

Исследованию процесса горячей деформации легких сплавов и его различным составляющим, а также условиям достижения высокой пластичности, вплоть до сверхпластичности, материалов посвящены многие исследования. Так, из значительного числа статей, опубликованных за последние десять лет по результатам исследований в этой области, можно выделить работы следующих авторов. Работы S. Jäger [1] касаются формоизменения прутков и листов из магниевого сплава AZ31 в условиях повышенной пластичности; K. Higashi [2] занимается вопросом высокоскоростной деформации, что весьма актуально для внедрения процесса в технологию; различных сторон этой же области – механических свойств сверхпластически деформированных материалов, влияния скорости деформации на стабильность протекания процесса и т. п. – касается цикл статей авторов F. Abu-Farha и M. Khraisheh [3]. Наконец, автор Larry D. Nefti [4] обсуждает преимущества сверхпластически деформированных алюминиевых сплавов при их использовании в самолетостроении. Все это указывает на растущую актуальность исследования материалов с высокими пластическими свойствами в целом, и металлов и сплавов – в частности.

Целью настоящей работы является разработка установки и методики проведения экспериментальных исследований по горячей листовой вытяжке с целью получения повышенной пластичности деформируемого материала.

Настоящее исследование проводилось в рамках совместного украино-немецкого проекта UKR 005/08 «Получение деталей со специальными свойствами». Авторы статьи благодарят за содействие Интернациональное бюро Федерального министерства образования и науки Германии.

Основной проблемой при реализации процесса листовой штамповки является разрушение металла вследствие наличия растягивающих напряжений. Для смягчения схемы напряженного состояния при горячей листовой штамповке в газовой среде успешно

используется противодействие. Для реализации процесса горячей листовой штамповки в газовой среде с противодействием была разработана специальная установка для проведения горячей деформации с противодействием. Основным элементом установки является специальный штамп (рис. 1), спроектированный и изготовленный по требованиям Druckgeräterichtlinie 97/23/EG (директива 97/23/ЕС Европейского Парламента и Совета от 29 мая 1997 по сближению законодательств государств – членов ЕС, касающаяся оборудования, работающего под давлением).



Рис. 1. Общий вид штампа для горячей листовой штамповки в собранном виде

Штамп вместе с закрепленной в нем заготовкой помещается в печь камерного типа, что обеспечивает проведение эксперимента при определенной, контролируемой и регулируемой температуре (рис. 1). Давление в верхней и нижней полости штампа контролируется с помощью вентиля (рис. 2), управление которыми осуществляется с помощью компьютера (рис. 3).

В основу расчета динамики изменения давления в верхней и нижней полости штампа положена математическая модель, которая рассчитывает скорость деформации, кривую давления, толщину и высоту листа после вытяжки. Поскольку расчет кривой давления является ключевой задачей для проведения процесса горячей листовой штамповки в газовой среде с противодействием, необходимо остановиться на некоторых моментах.



Рис. 2. Печь с узлом регулируемой подачи газа



Рис. 3. Узел регулируемой подачи газа

Для расчета процесса горячей листовой штамповки газом необходимо рассчитать давление деформирующего газа (деформирующей средой является газообразный азот) на протяжении всего процесса. Зависимость давления газа от времени, т. н. «кривая давления», рассчитывалась по формуле (1):

$$p = \frac{2 \cdot \sigma \cdot s}{\rho} + p_{II}, \quad (1)$$

где p – давление газа, МПа;
 σ – сопротивление деформации, Н/мм²;
 s – толщина деформируемого листа, мм;
 ρ – радиус кривизны, мм;
 p_{II} – противодействие газа, МПа.

Для расчета сопротивления деформации при горячей деформации листа газом была использована формула:

$$\sigma = K \cdot \dot{\varepsilon}^m, \quad (2)$$

где K – коэффициент пропорциональности, Н/мм²;
 $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации;
 m – скоростная чувствительность напряжения течения, которая рассчитывается по формуле:

$$m = \lg\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0}\right) / \lg\left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{\dot{\varepsilon}_0}\right), \quad (3)$$

где σ_i, σ_0 – характеристики сопротивления деформации при скорости деформации соответственно $\dot{\varepsilon}_i, \dot{\varepsilon}_0$.

Подставляя выражение (3) в формулу (2), получаем:

$$p = \frac{2 \cdot K \cdot \dot{\varepsilon}^m \cdot s}{\rho} + p_{II}. \quad (4)$$

Исходя из формулы (1), для определения давления p необходимо знать радиус кривизны ρ и толщину стенки s . Расчет радиуса кривизны зависит от формы детали. Для случая конусной матрицы, с учетом ее геометрических особенностей, формулы сопротивления деформации (2), а также условия постоянства объемов, получаем формулу для расчета давления газа с учетом противодействия:

$$p = K \frac{4s}{a_0} \left(1 - \left(1 + \frac{h_p}{a_0}\right)^{-2}\right)^{0,5} \left(1 + \frac{h_p^2}{a_0^2}\right)^{-3} \dot{\varepsilon}^m + p_{II}, \quad (5)$$

где a_0 – радиус конуса, мм;
 h_p – высота в самой высокой точке сферы деформируемого металла, мм.

Построение кривых давления с учетом данных о механических свойствах деформируемого металла, полученных в результате испытаний на растяжение и обработанных с помощью методики полного факторного эксперимента, производилось в табличном процессоре. Результаты расчета кривых давления в зависимости от изменения угла конусности приведены на рис. 3. На приведенной диаграмме построена кривая давления деформирующего газа без учета противодействия. Противодействие в ходе процесса остается постоянным, так что с его учетом кривая давления будет смещена вверх по оси «давление» на величину противодействия.

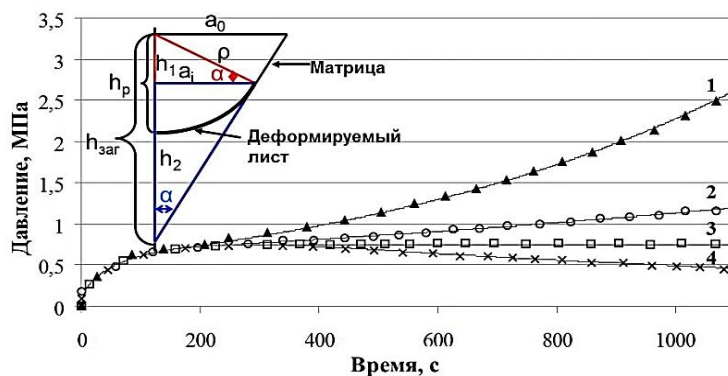


Рис. 3. Расчетные кривые давления для горячей вытяжки газом конусной заготовки (материал – алюминиевый сплав АА5083; толщина листа – 2 мм; температура – 550 °С; скорость деформации – 10^{-3} с^{-1}):

1 – для угла конусности 90°; 2 – для угла конусности 75°; 3 – для угла конусности 60°; 4 – для угла конусности 30°

Все приведенные выше формулы можно использовать для расчета горячей вытяжки газом и цилиндрических образцов. Рассчитанные кривые давления могут быть сопоставлены со значениями из литературных источников. На рис. 4 приведены кривые давления для сплавов АА5083 (расчетные и по литературным данным), АА5754 и АЗ31 для процесса горячей вытяжки цилиндрического образца газом. Данные показали хорошую сходимость; относительное отклонение теоретических значений от экспериментальных данных не превышает 15 %.

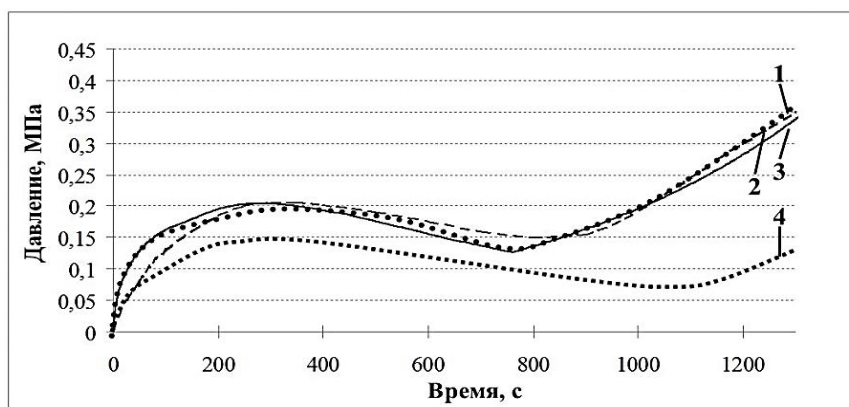


Рис. 4. Расчетные кривые давления для горячей вытяжки газом цилиндрической заготовки из сплавов:

1 – АА5754 (АМг3С); 2 – АА50833 (АМг4,5, литературные данные); 3 – АА5083 (АМг4,5); 4 – АЗ31 (МА2)

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Из листа алюминиевого или магниевого сплава толщиной 2 мм вырезали заготовку диаметром деформируемой части 100 мм. Перед проведением эксперимента на образцы была нанесена сетка с шагом 4 мм из окружностей диаметром 1 мм, по изменению размеров которых рассчитывалась локальная деформация в различных областях заготовки. Заготовку закрепляли в штампе таким образом, что она являлась разделителем между верхней и нижней полостью штампа, обеспечивая возможность независимого регулирования давления в этих частях. Затем штамп вместе с заготовкой помещался в печь. После достижения заготовкой и штампом необходимой температуры, составившей в зависимости от вида сплава 400...550 °С, с помощью программно задаваемого расхода газа на обоих вентилях, отвечающих за давление в верхней и нижней полости штампа, непосредственно проводился процесс деформации. Давление деформирующего газа при этом составило 0,8...1,3 МПа и противодействие 0,6...1,0 МПа.

Опытным путем было определено значение противодействия в штампе, при котором процесс проходит стабильно: для сплава AA5754 – 1 МПа, для сплава AA5083 – 0,8 МПа, для сплава AZ31 – 0,6 МПа. Установлено, что максимальная степень деформации была достигнута для алюминиевых сплавов – при температуре процесса 520 °С и для магниевого сплава – при 420 °С. Кривые давления для деформации исследуемых сплавов, полученные из эксперимента, представлены на рис. 5. Согласно проведенным аналитическим расчетам и результатам экспериментальных исследований, образцы из сплава AA5754 можно деформировать в 1,3 раза быстрее, чем из сплавов AA5083 и AZ31. Также экспериментально было установлено влияние противодействия величиной до 1,5 МПа при $D_M/H \geq 2,5$ на максимальную степень деформации (рис. 6).

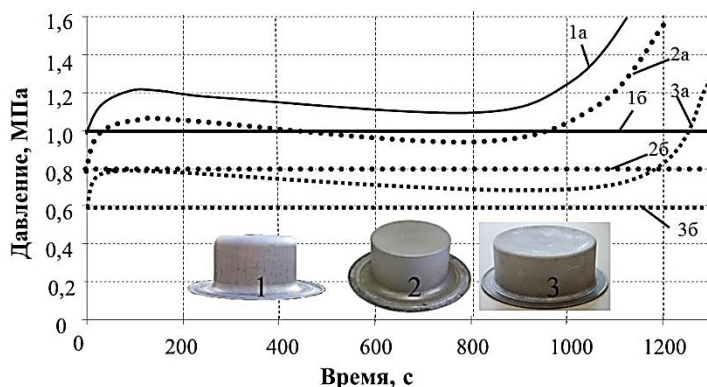


Рис. 5. Кривые давления в верхней (а) и нижней (б) полостях штампа для деформации цилиндрических изделий из сплавов:

1 – AA5754; 2 – AA5083; 3 – AZ31

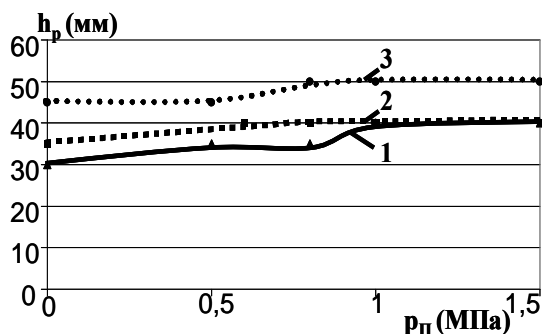


Рис. 6. Зависимость глубины вытяжки от противодействия для цилиндрических изделий из сплавов:

1 – AA5754; 2 – AA5083; 3 – AZ31

ВЫВОДЫ

Предложена конструкция установки для исследования процесса горячей листовой штамповки с противодействием. Рассчитана кривая давлений для горячей листовой штамповки в газовой среде с противодействием. Опытным путем было определено значение противодействия в штампе, при котором процесс проходит стабильно: для сплава AA5754 – 1 МПа, для сплава AA5083 – 0,8 МПа, для сплава AZ31 – 0,6 МПа.

Получены зависимости глубины вытяжки от противодействия для цилиндрических изделий из алюминиевых и магниевых сплавов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jäger S. *Untersuchungen zum Umformen von Blechen und Rohren aus Magnesium AZ31*. Verlag MAT-INFO (диссертация / S. Jäger. – Werkstoff-Informationsgesellschaft : Frankfurt/M, 2006.
2. Higashi K. High strain rate superplasticity in Japan / K. Higashi // *Materials Science and Technology*. – 2000. – Vol. 16. – N 11–12. – P. 1320–1329.
3. Abu-Farha F. Mechanical Characteristics of Superplastic Deformation of AZ31 / F. Abu-Farha, M. Khrishah // *Magnesium Alloy Advanced Engineering Materials. Special Issue: Magnesium Alloys and their Applications*. – 2007. – Vol. 9. – P. 777–783.
2. Hefli L. D. Commercial Airplane Applications of Superplastically Formed AA5083 Aluminium Sheet / L. D. Hefli // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – Vol. 16. – N 2. – P. 136–141.

Воробьев К. Г. – инженер НМетАУ;

Кузьмина О. М. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: olgakuzmina@bk.ru

Статья поступила в редакцию 04.04.2013 г.