

УДК 621.7

Воробьев К. Г.
Кузьмина О. М.
Фридрих Х. Э.
Данченко В. Н.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВЕРХПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Необходимость сокращения выбросов углекислого газа в атмосферу способствует развитию новых видов транспортных средств, таких как автомобили на электрической энергии, транспортных средств с альтернативными системами привода – например, топливными элементами или комбинированным приводом. Цель по снижению выбросов в атмосферу достигается и за счет снижения массы транспортных средств. В связи с этим за последние годы значительно вырос интерес к процессу сверхпластичности в областях автомобиле- и авиастроения, так как этот способ решения указанной задачи сочетает относительную малозатратность с возможностью получения деталей сложной формы из легких сплавов. В настоящее время детали, изготовленные из алюминиевого листа методом сверхпластичности, установлены в сорока моделях самолетов и в двадцати моделях производимых сейчас автомобилей (рис. 1) [1].



Рис. 1. Примеры применения деталей, произведенных с помощью сверхпластичности, в автомобилестроении [2]

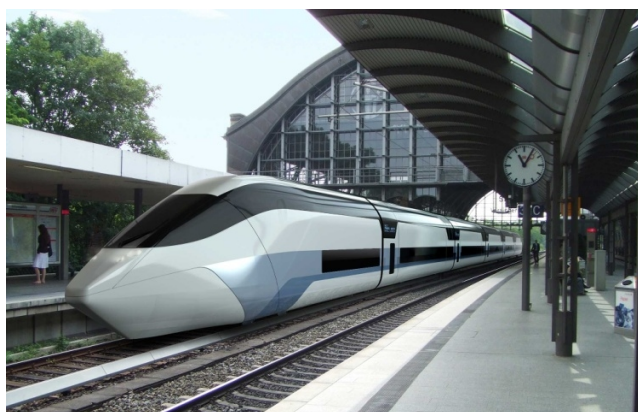


Рис. 2. Концепция поезда нового поколения, разработанная в DLR-FK [3]

С помощью указанного метода получают тонкостенные детали большой площади, например, для обшивки транспортных средств, которые отвечают высоким техническим и аэродинамическим требованиям, что позволяет реализовать самые смелые дизайнерские решения. Примером может служить разработанная концепция в DLR-FK (Институт концепций транспортного машиностроения Немецкого аэрокосмического центра) поезда нового поколения (рис. 2). Детали обшивки носовой части поезда, а также детали обшивки переходов между вагонами могут являться примерами применения метода сверхпластичности.

Замена алюминия магнием дает возможность дальнейшего снижения веса [4]. В свою очередь, листовая штамповка магниевых сплавов без подогрева из-за ограниченного формоизменения магниевых сплавов, является практически невозможной. Производство же деталей сложной формы из магниевых

сплавов возможно в условиях сверхпластичности. Большое количество публикаций на тему сверхпластичности подтверждает большой интерес к этому процессу обработки металлов давлением. Многие исследования направлены в первую очередь на теоретическое определение условий сверхпластичности выбранных металлов и проведение в лабораторных условиях испытаний. Так, для пневматического Bulge-теста были рассчитаны различные математические модели и разработаны МКЭ-модели для компьютерных расчетов. Эти модели описывают процесс деформации металлов, в основном алюминиевых сплавов, в условиях сверхпластичности. В этих моделях, например, скорость деформации, размер зерна не являются постоянными величинами [5, 6, 7]. Процесс сверхпластичности отличается длительным временем процесса, что делает его неприемлемым для производства деталей с высокой производительностью. Были проведены исследования по штамповке деталей в условиях, близких к условиям сверхпластичности, при повышенных скоростях [8]. При таких условиях процесс штамповки не является оптимальным для течения металла и получил название Quick Plastic Forming (QPF) [8]. Результаты исследований по разнотолщинности цельных деталей, а также штампованных сварных деталей, деформированных в условиях сверхпластичности, представлены в работах, например, [9, 10]. Свойства материалов после листовой штамповки в условиях сверхпластичности также являются важным фактором технологического процесса. Механические свойства произведенных деталей могут отличаться от исходных механических свойств листового материала, это зависит в первую очередь от условий деформации во время процесса [11]. Были также предприняты попытки штамповки магниевых сплавов AZ 31 при комнатной температуре. Процесс проходил пошагово. После каждого шага деформируемая заготовка поддавалась термической обработке (отжигу) в печи [12].

Преимущество указанного процесса состоит в возможности получения тонкостенных изделий из легких сплавов. С использованием этого процесса получают детали с малым расходом материала за счет возможности значительного снижения или абсолютного исключения последующей обработки. Изделия сложной формы получают заданную геометрию в ходе одной технологической операции. 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 сверхпластичности является возможность дальнейшей деформации деталей, полученных этим способом, поскольку подобный вид обработки не приводит к деформационному упрочнению материала – деформационное упрочнение металлов сопровождается традиционными процессами обработки давлением. Необходимо отметить, что, несмотря на многочисленные исследования, полностью процесс сверхпластичности – начиная от определения оптимальных свойств выбранных металлов, математического и компьютерного моделирования, производства и определения механических свойств произведенных деталей – исследован недостаточно и требует более подробного изучения.

Однако в осуществлении процесса имеются и сложности, которые заключаются в необходимости очень точного определения и выдержки технологических параметров – таких как температура, давление и пр. Кроме того, процесс характеризуется низкой скоростью деформации и достаточно большой длительностью, как уже отмечалось выше.

Целью данной работы является создание и проверка методики получения заданных механических свойств легких сплавов с использованием листовой штамповки в условиях сверхпластичности. Для расчета параметров процесса, а также для создания МКЭ-моделей необходимо определение оптимальных характеристик конкретных материалов. В рамках двустороннего проекта при поддержке Международного бюро Федерального Министерства образования и науки Германии UKR005/08 «Manufacture of parts with special properties» были проведены исследования по верификации механических свойств алюминиевых сплавов AA5083-SPF и AA5754 и магниевых сплавов AZ31. Основными факторами, влияющими на поведение металлических сплавов при высоких температурах, является химический состав сплава, температура, степень деформации и скорость деформации. Для определения механических свойств вышеупомянутых сплавов были проведены испытания на растяжения по DIN EN 10002 в условиях сверхпластичности. Для обработки полученных данных была использована методика

полного факторного эксперимента, получены уравнения регрессии и разработана математическая модель, связывающая механические свойства материала и параметров процесса. Аналитические результаты были сопоставлены с расчетными, полученными методом конечных элементов, и проверены с помощью экспериментальных исследований.

Таким образом, с помощью экспериментов можно построить и проанализировать математические модели даже в том случае, если известны и понятны не все процессы, протекающие в материале. В качестве варьируемых параметров были выбраны температура деформации (интервал варьирования 20–250 °С) и скорость деформации (интервал варьирования 10^{-2} – 10^{-4} с $^{-1}$); функциями отклика взяты напряжение текучести, предел прочности, относительное удлинение, относительное сужение. План полного факторного эксперимента, а также полученные математические модели были изложены в работе [13].

Математическая регрессия позволяет сделать выводы о взаимосвязи технологических параметров (температуры, скорости деформации) и механических свойств выбранных сплавов. Так, например, можно рассчитать последствия изменения температуры на пластическое поведение отдельных сплавов (рис. 3).

Для проверки результатов аналитического расчета и оптимизации параметров технологического процесса был сконструирован и создан штамп для вытяжки цилиндрических стаканов (рис. 4). На рис. 5 приведены графики экспериментальных исследований деформации образцов при высоких температурах в условиях сверхпластичности.

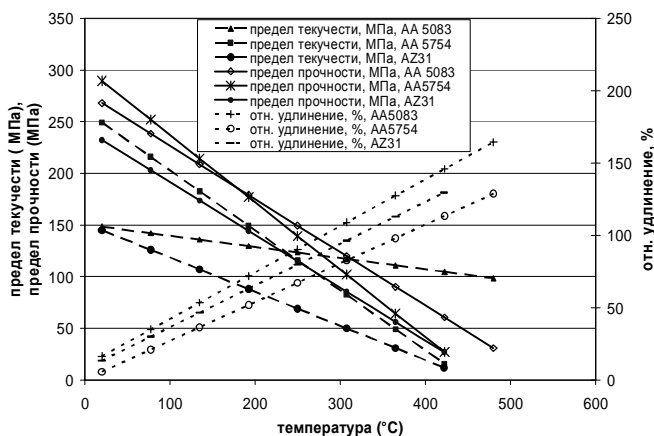


Рис. 3. Расчетные механические свойства исследуемых материалов в зависимости от температуры



Рис. 4. Штамп для горячей листовой вытяжки с противодействием в печи

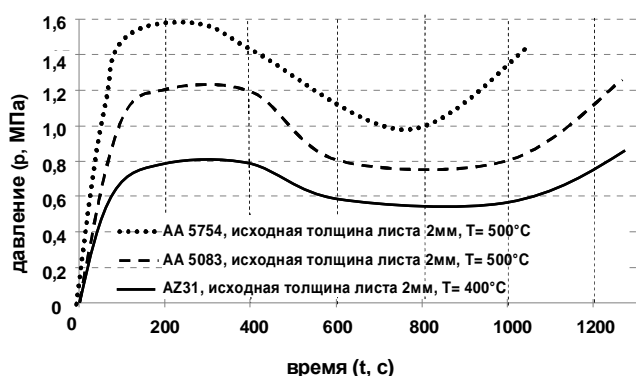


Рис. 5. Кривые зависимости давления от времени при деформации образцов из исследуемых материалов

На рис. 6 приведен вид деформированного образца и результат конечно-элементного моделирования при условиях, соответствующих экспериментальным исследованиям. Результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с результатами аналитических расчетов и моделирования МКЭ.

С использованием методики можно быстро и достаточно надежно определить характеристики деформируемых сплавов и найти параметры деформирования [13]. Согласно проведенным аналитическим расчетам и результатам экспериментальных исследований, образцы из сплава AA5754 можно деформировать быстрее, чем из AA5083 и AZ31 (рис. 5). Перед проведением эксперимента на образцы (толщиной 2 мм и диаметром деформируемой части 100 мм) была нанесена сетка из окружностей диаметром 1 мм, по изменению которой рассчитывалась деформация.

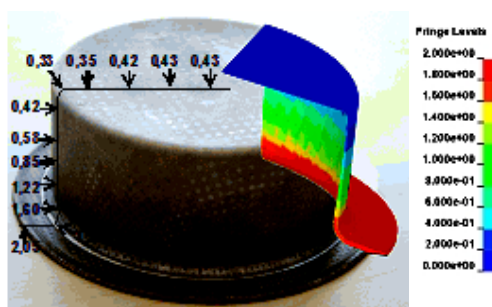


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования и экспериментального исследования

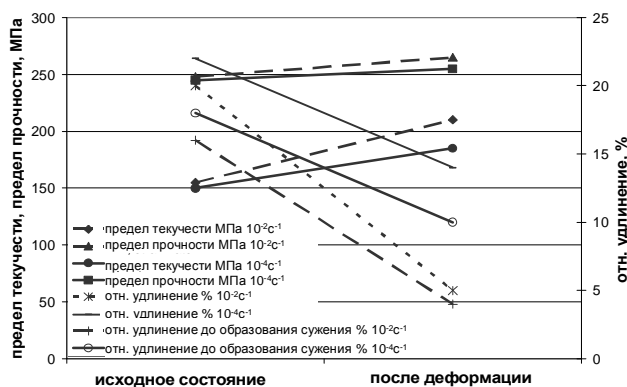


Рис. 7. Зависимость остаточного предела текучести, предела прочности на разрыв и удлинения от скорости деформации (магниевого сплава AZ31)

плотнупакованных атомных рядов. Еще одним механизмом деформации при комнатной температуре является двойникование. При температурах выше 225 °С будут задействованы дополнительные пирамидальные плоскости скольжения. Возможным является скольжение дислокаций на призматических плоскостях. Таким образом, металл при температурах, близких к 225 °С обладает хорошей для сплава AZ31 деформируемостью. При температуре около 250 °С и низких скоростях деформации наблюдается альтернативное – пирамидальное и призматическое – скольжение в кристалле магния. Как результат, доля результирующего упрочнения в быстро деформируемых листах значительно выше, чем в сверхпластически деформированных листах [14].

При рассмотрении относительного удлинения видно, что продеформированные с более высокой скоростью образцы имеют на 5 % меньше остаточное удлинение. Снижение относительного удлинения объясняется особенностью течения сплава. Даже при активации дополнительных плоскостей скольжения при температуре 250 °С, максимальная деформация пластин достигала 60 %. При деформации полос до 50 % образовались локальные места сужения, что приводило к появлению разнотолщинности конечных образцов.

При низких скоростях начальной (не остаточной) деформации (сверхпластическая область) образцы достигают значительного удлинения, до 135 %. При рассмотрении характера остаточного относительного удлинения сверхпластически деформированных листов можно сказать, что материал в ходе такой деформации течет равномерно. Поэтому образцы после такого вида обработки давлением обладают достаточным запасом пластичности, что позволяет в дальнейшем подвергать их обработке традиционными методами ОМД.

ВЫВОДЫ

В рамках данного исследования проведено экспериментальное исследование деформации легких сплавов (алюминиевых сплавов AA5083, AA5754 и магниевого сплава AZ31) в условиях сверхпластической листовой штамповки; диапазон параметров деформации был

Следующим этапом исследований было изучение остаточных механических свойств сплавов после сверхпластической деформации. Влияние параметров деформации на остаточные свойства материала было изучено на пластинах магниевого сплава AZ31. Свойства материала после деформации были определены при испытаниях на растяжение. Перед испытаниями образцы нагревались до температуры 250 °С; скорость деформации составила 10^{-2} - 10^{-4} с $^{-1}$. В ходе эксперимента образцы растягивались при постоянной температуре до степени деформации 50 %. Затем из деформированных образцов в соответствии с DIN EN 10002-1 были вырезаны пробы для испытаний на растяжение. Полученные результаты представлены на рис. 7.

Такие результаты для магниевого сплава AZ31 могут быть объяснены следующим образом. Ограниченная пластичность магния определяется гексагональной структурой его решетки; в отличие от магния алюминий имеет гранцентрированную решетку, что объясняет хорошую пластичность последнего и низкую пластичность магния при комнатной температуре. До температуры 225 °С наблюдается существенное скольжение в базисной плоскости в направлении

определен по предварительным результатам на основании опытов на растяжение. По полученным в результате предварительных исследований уравнениям регрессии построены графические зависимости механических свойств материала от переменных параметров процесса, которые затем были экстраполированы за пределы исследованного диапазона.

Проведено конечно-элементное моделирование процесса для условий реального эксперимента. Сопоставление показывает хорошее качественное совпадение экспериментальных и расчетных данных.

Проведено исследование остаточных механических свойств предварительно сверхпластически деформированных образцов. Показано, что сверхпластически деформированный материал обладает достаточным запасом пластичности для дальнейшей обработки традиционными способами ОМД. Можно предположить, что полученная методика позволяет прогнозировать параметры сверхпластической деформации и остаточные механические свойства для любого вида материалов по результатам стандартных испытаний их на растяжение и конечно-элементного моделирования. Для подтверждения этого предположения следует проверить такой подход на других видах материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barnes A. J. *Superplastic forming 40 years and still growing* / A. J. Barnes // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2007. – Vol. 16 (4). – P. 440–454.
2. *Superform – Aluminium: Technical, Stand 2008* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.superform-aluminium.com/technical/technical-summar.html>.
3. Winter J. *Neuartiges Zugkonzept eines Hochgeschwindigkeitszuges für die übernächste Generation-Next Generation Train (NGT)* / J. Winter, W. Granzeier // *11 Internationale Schienenfahrzeugtagung*, 23–25.02.2011, Dresden.
4. *Magnesium ein wichtiger Werkstoff der Zukunft* / R. Kawalla, K. Vorobyov, A. Stolnikov, H. Pircher, B. Engl, M. Weber // *Tagungsbank (MEFORM2003)*. – Freiberg, Deutschland. – 2003. – S. 129–141.
5. Bonet J. *Simulating superplastic forming* / J. Bonet, A. Gil, R. Wood Said, R. V. Curtis // *Computer methods in applied mechanics and engineering* 195. – 2005. – P. 6580–6603.
6. Khraisheh M. K. *Combined mechanics-materials based optimization of superplastic forming of AZ31 magnesium alloy* / M. K. Khraisheh, F. K. Abu-Farha, M. A. Nazzal, K. J. Weinmann // *Annals of the CIRP*. – 2006. – Vol. 55.
7. Nazzal M. A. *The effect of strain rate sensitivity evolution on deformation stability during superplastic forming* / M. A. Nazzal, M. K. Khraisheh, F. K. Abu-Farha // *Journal of Materials Processing Technology* 191. – 2007. – P. 189–192.
8. Murali K. *Improved simulation of local necks in Quick Plastic Forming* / K. Murali, F. Lee, A. Heath // *SAE International*. – 2007.
9. Beck W. *Titan 6-4 hemispheres for SCA system of ariane 5* / W. Beck, L. Duong, H. Rogall // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 39. – 2008. – No. 4–5. – S. 293–297.
10. Sanders D. G. *Superplastic forming of friction stir welds in Titanium alloy 6Al-4V: preliminary results* / D. G. Sanders, M. Ramulu, P. D. Edwards // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 39. – 2008. – No. 4–5. – S. 353–357.
11. Khraisheh M. K. *Investigations of post-superplastic forming properties of AZ31 magnesium alloy* / M. K. Khraisheh, F. K. Abu-Farha, K. J. Weinmann // *Annals of the CIRP*. – 2007. – Vol. 56.
12. Mori K. *Cold drawing of commercial magnesium alloy sheet* / K. Mori, H. Tsuji // *Annals of the CIRP*. – Vol. 56. – 2007. – P. 285–288.
13. *Исследование влияния параметров деформации на механические свойства алюминиевых и магниевых сплавов* / К. Г. Воробьев, Э. Бее, В. А. Гринкевич, О. М. Кузьмина, В. Н. Данченко // *Вестник нац. техн. ун-та ХПИ: сб. науч. тр. Новые решения в совр. технологиях*. – 2009. – № 31. – С. 70–74.
14. Novikov I. I. *Super plasticity of the alloys* / I. I. Novikov, V. K. Portnoj. – VEB: Leipzig, 1985.

Воробьев К. Г. – инженер НМетАУ;

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

Фридрих Х. Э. – проф. DLR-FK;

Данченко В. Н. – д-р техн. наук, проф. НМетАУ.

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

DLR-FK – Институт концепций транспортного машиностроения, Немецкий аэрокосмический центр, г. Штутгарт, Германия.

E-mail: olgakuzmina@bk.ru