

Сравнение результатов моделирования сверхпластической формовки двух типов многослойных полых конструкций

А. Р. Сафиуллин[†], А. Х. Ахунова, С. В. Дмитриев, Р. В. Сафиуллин

[†]d12art@mail.ru

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, Уфа, 450001, Россия

Развитие науки и техники в области авиастроения требует не только разработки новых, но и совершенствование уже существующих технологических процессов изготовления изделий из труднодеформируемых сплавов, таких как двухфазные титановые сплавы. Одним из подобных процессов является сверхпластическая формовка (СПФ), совмещенная со сваркой давлением (СД). Использование процесса СПФ/СД позволяет получать детали и конструкции, которые невозможно изготовить другими способами, например, многослойные полые конструкции. Совершенствование технологии СПФ многослойной конструкции требует решения целого ряда задач. Во-первых, для получения максимально однородной деформации материала при формовке конструкции необходимо обеспечить оптимальные температурно-скоростные условия сверхпластичности (СП). Несоблюдение этих условий может привести к неоднородности деформации, и как следствие, к существенной разнотолщинности заготовок, а также к разрыву заполнителя. Во-вторых, скорости СП очень малы и соответствующее время формовки очень велико и может составлять часы. Каждый элемент конструкции подвергается различной степени деформации, и ориентироваться нужно на наиболее деформируемые части конструкции, каковыми являются ребра жесткости. К тому же, если проводить формовку при постоянном давлении, то скорость деформации в ребрах жесткости может изменяться на несколько порядков, что приводит к нарушению условия СП. Поэтому давление газа в ходе процесса необходимо изменять таким образом, чтобы не только скорость деформации в ребрах жесткости соответствовала оптимуму СП, но и при этом сократилось время формовки. Работа посвящена совершенствованию процесса изготовления многослойных полых конструкций из титанового сплава ВТ6 по технологии СПФ. Исследовались два типа конструкций, напряженно-деформированное состояние которых при формовке близко к осесимметричному. На основании результатов численного моделирования формовки обоих типов конструкций определена зависимость подачи давления газа от времени, обеспечивающая деформирование ребер жесткости в условиях сверхпластичности при сокращении общего времени формовки.

Ключевые слова: сверхпластическая формовка, многослойная полая конструкция, зависимость давления газа от времени, метод конечных элементов

Comparison of modeling results for the superplastic forming of two types of three-layered hollow structures

A. R. Safiullin, A. Kh. Akhunova, S. V. Dmitriev, R. V. Safiullin

Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, 39 Khalturin St., Ufa, 450001, Russia

The development of science and technology in the aviation industry requires not only the development of new manufacturing processes, but also improvement of the existing manufacturing processes of products of hard alloys, such as two-phase titanium alloys. One of such processes is the superplastic forming (SPF) combined with pressure welding (PW). The use of SPF / PW technique allows one to obtain parts and structures which cannot be manufactured by other methods, for example, multilayered hollow structures. Improvement of the technology of the multilayer structure SPF requires solving a number of problems. First, to obtain the most homogeneous deformation of the material when forming the structure, it is necessary to ensure the optimal temperature and strain rate to achieve the superplasticity (SP) conditions. Failure to comply with these conditions can lead to inhomogeneous deformation and, as a result, a substantial inhomogeneity of the thickness and even to fracture of the metal sheets. Secondly, the SP strain rate is very small and the corresponding time of SPF is very long and can last for hours. Each element of the structure is subject to different degrees of deformation and one needs to take care of the most deformable part of the structure, which are the ribs. Moreover, if the SPF is carried out at a constant pressure, the strain rate in the stiffeners may vary by several orders of magnitude, which leads to violation of the SP condition. Therefore, the

pressure cycle must be designed so that the strain rate satisfies the optimal SP conditions and reduces the SPF time.

In this work an attempt to improve the process of production of multilayer hollow structures made of VT6 titanium alloy through the SPF technology is made. Two types of structures are analyzed under the conditions of axial symmetry. Based on the results of numerical modeling, for both types of structures, the pressure cycle is offered to satisfy the deformation of the ribs under the superplasticity conditions while reducing the overall SPF time.

Keywords: superplastic forming, three-layered hollow structure, pressure cycle, finite element method

Введение

Сверхпластическая формовка (СПФ), совмещенная со сваркой давлением (СД) [1—3] является одной из перспективных технологий, используемых в авиастроении для получения полых изделий из титановых сплавов. Совмещенный процесс СПФ/СД позволяет получать сложнопрофильные детали, которые невозможно изготовить другими способами [4—9], как, например, многослойные полые конструкции.

Многослойная полая конструкция состоит из трех листовых заготовок, собранных в один пакет, при этом средняя заготовка является заполнителем, а верхняя и нижняя заготовки играют роль обшивок. На внутренних поверхностях обшивок вытачивают пазы, которые заполняют противосварочным покрытием. Это необходимо для того, чтобы избежать сваривания внутренних участков поверхностей при СД. Далее пакет сваривают по периметру шовной сваркой. Подготовленный таким образом пакет помещается в формообразующую матрицу, и проводится СД. Далее подачей инертного газа в полость пакета производится формовка заготовок в условиях сверхпластичности. Обшивки принимают форму полости матрицы, а заполнитель, растягиваясь между обшивками, образует ребра жесткости [2—3, 10—13]. Примером конструкции такого типа является головка клюшки для игры в гольф, изготовленная в ИПСМ РАН по технологии, совмещающей процессы СПФ/СД.

Важным моментом при СПФ конструкций является необходимость обеспечения деформации материала в оптимальных температурно-скоростных условиях сверхпластичности (СП) [14], чтобы избежать локализации деформации и возможных разрывов листовых заготовок. Такая локализация может возникнуть в ребрах жесткости, поскольку они являются наиболее деформируемыми элементами конструкции. Скорость деформации определяется давлением газа, поэтому для оптимизации процесса СПФ в первую очередь необходимо выбрать рациональный закон подачи давления газа. Экспериментальное определение этого закона требует весьма больших затрат. Значительную помощь в решении данной задачи может оказать конечно-элементное моделирование, позволяющее сэкономить время и ресурсы.

Отметим, что при всем разнообразии форм многослойных конструкций, получаемых по технологии СПФ/СД, во многих случаях напряженно-деформированное состояние в формируемом изделии допустимо рассматривать как близкое либо к плоской, либо к осесим-

метричной деформации. Ранее изучался процесс СПФ конструкций в плоско-деформированном состоянии [15—16]. В данной работе методами компьютерного моделирования рассматриваются две многослойные полые конструкции (рис.1), в которых напряженно-деформированное состояние близко к осесимметричному. Геометрия конструкций отличается наличием дополнительной плоскости симметрии у одной из них, что должно повлиять на процесс ее формообразования. Исследуется влияние закона подачи давления газа на распределение скорости деформации в различных точках конструкции в зависимости от ее типа.

Математическое моделирование

Компьютерное моделирование проводили в трехмерной постановке на базе универсального комплекса DEFORM-3D. Формообразующая матрица задавалась как абсолютно жесткое тело. Кривые упрочнения для заготовки, с небольшой погрешностью соответствующие кривым упрочнения сплава ВТ6, полученным при механических испытаниях при температуре 900°C, были выбраны из базы данных DEFORM-3D для сплава ВТ6. Известно, что для сплава ВТ6 СП течение при 900°C наблюдается в интервале скоростей деформации от 10^{-4} до 10^{-3} c^{-1} [12,13].

Рассматривались два вида конструкций, исходные и конечные формы которых представлены на рис.1a,b и рис.1c,d, соответственно. Цифрами на рис.1 обозначены точки, в которых снимались данные о напряженно-деформированном состоянии в процессе формовки. Различие состоит в том, что конструкция типа 1 не обладает плоскостью симметрии, и в процессе ее формовки оба внешних листа теряют плоскую форму, и лишь в конце формовки одна из обшивок приобретает плоскую форму за счет контакта с жесткой формообразующей матрицей (рис.1c). В конструкции типа 2, обладающей плоскостью симметрии, средний лист сохраняет плоскую форму в ходе всего процесса СПФ (рис.1d).

Результаты расчетов

На рис.2,3 приведены графики зависимостей давления газа P (правая шкала) и интенсивности скорости деформации в точках 1—4 ребер жесткости (левая шкала) от времени для конструкций типа 1 и 2, соответственно. Изображенный на рисунках закон подачи давления газа

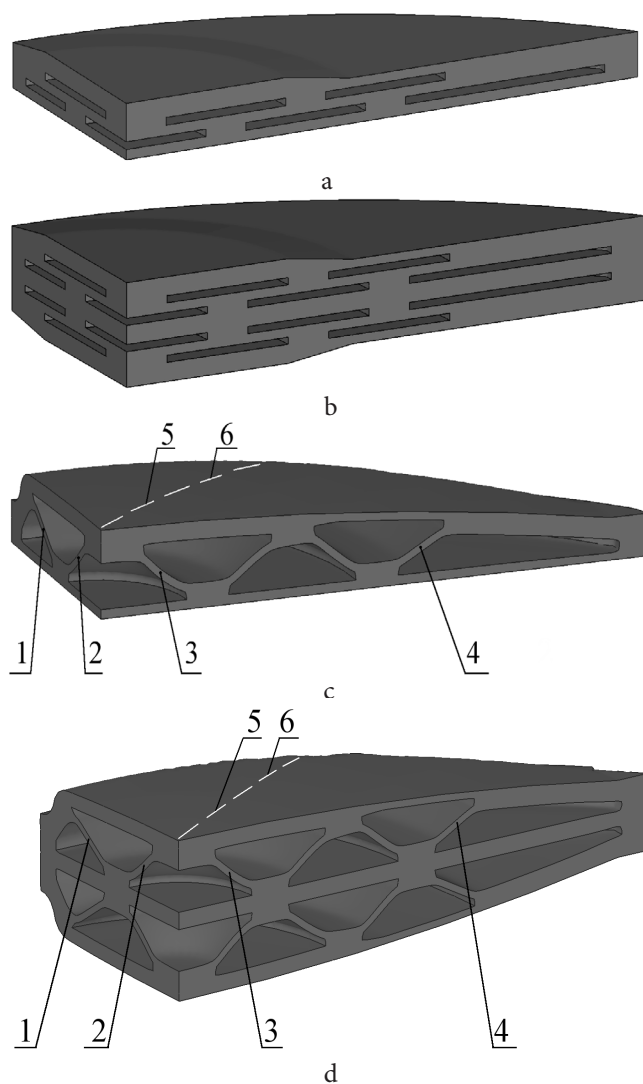


Рис. 1. Начальная (а, б) и конечная (с, д) формы многослойных полых конструкций типа 1 (а, с) и типа 2 (б, д) с отмеченными точками, в которых регистрировались данные о напряженно-деформированном состоянии в процессе формовки.

Fig. 1. Initial (a, b) and final (c, d) form hollow multilayer structures type 1 (a, c) and type 2 (b, d) with distinguished points at which the data is recorded on the stress-deformed state in the molding process.

был подобран таким образом, чтобы скорости деформации в ребрах жесткости трехслойных конструкций не выходили за интервал скоростей СП деформации от 10^{-4} до 10^{-3} c^{-1} [12,13].

Отметим, что для обоих типов конструкции наблюдаются два максимума на зависимостях интенсивности скорости деформации от времени. Первые максимумы для всех точек 1–4 конструкции 1 (рис.2) наблюдаются в интервале от 0 до 200 с. Вторые максимумы наблюдаются около 800 с и, очевидно, связаны с увеличением скорости роста давления газа.

Для конструкции типа 2 (рис.3) первые максимумы для всех точек 1 и 4 аналогичны наблюдаемым для конструкции типа 1, но имеют большую ширину по времени. Вторые максимумы имеют значительные отличия. В этом случае максимальное значение скоростей дефор-

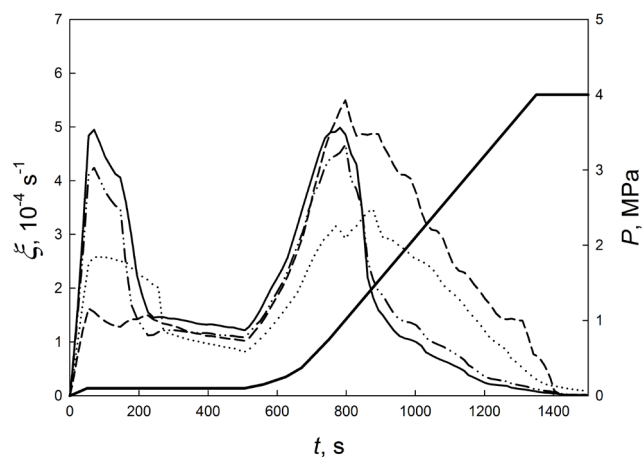


Рис. 2. Закон подачи давления газа P (правая шкала) и интенсивность скорости деформации в ребрах жесткости в точках 1-4 (левая шкала) при СПФ конструкции типа 1.

Fig. 2. The pressure cycle, P (right ordinate), and the strain rate intensity in the stiffeners in the points 1-4 (left ordinate) during SPF of the type 1 structure.

мации достигается в точке 3. Это объясняется тем, что, в отличие от конструкции типа 1, в конструкции типа 2 средний лист сохраняет свою плоскую форму в ходе всего процесса СПФ. Такая разница в процессе формообразования конструкций приводит к значительной разнице скоростей деформации в ребрах жесткости.

На рис.4 приведены графики зависимостей давления газа P (правая шкала) и интенсивности скорости деформации в точках обшивки 5 и 6 (левая шкала) от времени для конструкций типа 1 и 2. Месторасположение точек показано на рис.2с,д. Видно, что для обеих конструкций в точке 6 достигаются большие значения скорости деформации, чем в точке 5. В точке 5 скорости деформации в течение всего времени формовки ниже, чем во всех остальных исследованных точках (1–4, 6). Можно сделать вывод, что точка 5 является не опасной с точки зрения возникновения дефекта типа «разрыв». В точке

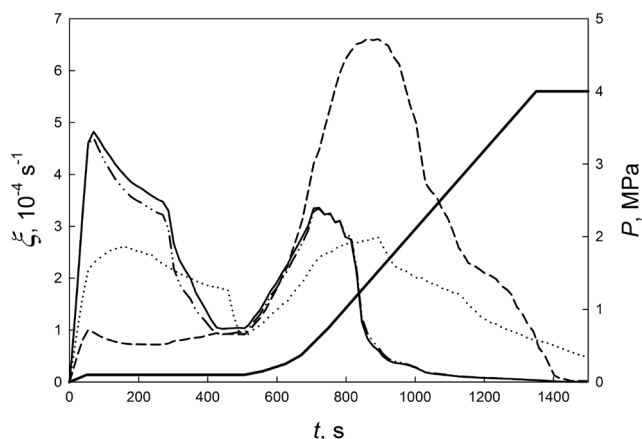


Рис. 3. Закон подачи давления газа P (правая шкала) и интенсивность скорости деформации в ребрах жесткости в точках 1-4 (левая шкала) при СПФ конструкции типа 2.

Fig. 3. The pressure cycle, P (right ordinate), and the strain rate intensity in the stiffeners in the points 1-4 (left ordinate) during SPF of the type 2 structure.

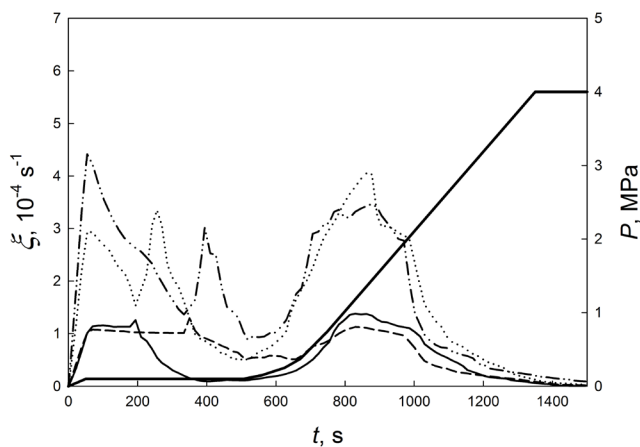


Рис. 4. Интенсивность скорости деформации в точках обшивки 5 и 6 в конструкциях 1 и 2 типов (левая шкала). Закон подачи давления газа P (правая шкала).

Fig. 4. The strain rate intensity at the points 5 and 6 in the structures of type 1 and 2 (left ordinate). Pressure cycle, P (right ordinate).

6 скорости деформации не превышают значений, характерных для ребер жесткости. Значения скоростей деформации в обшивках обоих типов конструкций близки; в целом они не выходят за верхний предел интервала сверхпластичности для рассматриваемого сплава ВТ6.

Выводы

На основании проведенного моделирования процесса СПФ трехслойных конструкций можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что в конструкции типа 1 различие скоростей деформации в ребрах жесткости проявляется менее заметно, чем для конструкции типа 2. Это различие объясняется разницей в формообразовании конструкций, имеющих различную симметрию.

2. Показано, что для конструкции типа 2 скорость деформации в точке 3 примерно в два раза выше, чем в остальных рассматриваемых точках, что необходимо учитывать при выборе закона подачи давления газа, с тем, чтобы избежать разрыва ребра жесткости при формовке в случае выхода из интервала скорости деформации, характерного для сверхпластического течения материала.

3. При использовании рассматриваемого закона подачи давления газа скорости деформации в исследуемых точках не выходят за пределы интервала сверхпластичности сплава ВТ6 при 900°C.

Литература / References

1. R. V. Safiullin. Letters on Materials. **2** (1), 32—35 (2012). (in Russian) [Р.В. Сафиуллин. Письма о материалах. **2** (1), 32—35 (2012).]
2. R. V. Safiullin. Letters on Materials. **2** (1), 36—39 (2012). (in Russian) [Р.В. Сафиуллин. Письма о материалах. **2** (1), 36—39 (2012).]

3. A. Kh. Akhunova, S. V. Dmitriev, A. R. Safiullin, R. V. Safiullin, F. F. Safin. Letters on Materials. **2** (2), 90—94 (2012). (in Russian) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев, Р.В. Сафиуллин, А.Р. Сафиуллин, Ф.Ф. Сафин. Письма о материалах. **2** (2), 90—94 (2012).]
4. A. Kh. Akhunova, S. V. Dmitriev. Deformation and Fracture of Materials. **11**, 40—44 (2009). (in Russian) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев. Деформация и разрушение материалов. **11**, 40—44 (2009).]
5. A. Kh. Akhunova, S. V. Dmitriev, A. A. Kruglov, R. V. Safiullin. Deformation and Fracture of Materials. **9**, 38—41 (2010). (in Russian) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев, А.А. Круглов, Р.В. Сафиуллин. Деформация и разрушение материалов. **9**, 38—41 (2010).]
6. A. Kh. Akhunova, S. V. Dmitriev, A. A. Kruglov, R. V. Safiullin. Key Engineering Materials. **433**, 319—323 (2010).
7. A. R. Safiullin, A. A. Kruglov, R. V. Safiullin The useful model patent № 101949 (2011). (in Russian) [А.Р. Сафиуллин, А.А. Круглов, Р.В. Сафиуллин. Полное изделие с гофрированным наполнителем, патент на полезную модель № 101949 (2011).]
8. R. Ya. Lutfullin. Letters on Materials. **1** (1), 59—64 (2011). (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин. Письма о материалах. **1** (1), 59—64 (2011).]
9. R. Ya. Lutfullin. Letters on Materials. **1** (2), 88—91 (2011). (in Russian) [Р.Я. Лутфуллин. Письма о материалах. **1** (2), 88—91 (2011).]
10. A. Kh. Akhunova, S. V. Dmitriev, A. A. Kruglov, R. V. Safiullin. Deformation and Fracture of Materials. **11**, 38—41 (2011). (in Russian) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев, А.А. Круглов, Р.В. Сафиуллин. Деформация и разрушение материалов. **11**, 38—41 (2011).]
11. Safiullin R. V., Kruglov A. A., Akhunova A. Kh., Safiullin A. R., Dmitriev S. V. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. **43** (9), 786—788 (2012).
12. A. Kh. Akhunova, S. V. Dmitriev, A. A. Kruglov, R. V. Safiullin. Journal of advanced materials. **12**, 42—44 (2011). (in Russian) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев, А.А. Круглов, Р.В. Сафиуллин. Перспективные материалы. **12**, 42—44 (2011).]
13. M. S. Nikitin, T. M. Zagirov, F. U. Enikeev. Engineering Technology. **8**, 5—10 (2010). (in Russian) [М.С. Никитин, Т.М. Загиров, Ф.У. Еникеев. Технология машиностроения. **8**, 5—10 (2010).]
14. F. U. Enikeev. Proceedings of the higher academic institutions. Non-ferrous metallurgy. **1**, 43—49 (2008). (in Russian) [Ф.У. Еникеев. Известия высших научных заведений. Цветная металлургия. **1**, 43—49 (2008).]
15. A. Kh. Akhunova, S. V. Dmitriev, A. R. Safiullin, R. V. Safiullin, F. F. Safin. Journal of advanced materials. **15**, 114—118 (2013). (in Russian) [А.Х. Ахунова, С.В. Дмитриев, Р.В. Сафиуллин, А.Р. Сафиуллин, Ф.Ф. Сафин. Перспективные материалы. **15**, 114—118 (2013).]
16. A. Kh. Akhunova, A. I. Pshenichnyuk, S. V. Dmitriev, A. R. Safiullin, R. V. Safiullin. Deformation and Fracture of Materials. **7**, 33—38 (2013). (in Russian) [А.Х. Ахунова, А.И. Пшеничнюк, С.В. Дмитриев, Р.В. Сафиуллин, А.Р. Сафиуллин. Деформация и разрушения материалов. **7**, 33—38 (2013).]