

# Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций Часть I. Международный опыт

Сафиуллин Р.В.

dr\_rvs@mail.ru

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

## Superplastic forming and pressure welding of multilayer hollow structures Part I. International experience

R.V. Safiullin

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

В работе описаны результаты многолетних исследований по разработке технологии сверхпластической формовки и сварки давлением (СПФ/СД). В части I описан международный опыт получения типовых изделий авиакосмической промышленности, таких, как полые лопатки, крыльевые и корпусные панели. Обсуждены последние результаты и перспективы развития технологии СПФ/СД.

**Ключевые слова:** сверхпластическая формовка, сварка давлением, полые конструкции, титановый сплав.

The paper describes the results of long-term investigations related to the development of the technology of superplastic forming and pressure welding (SPF/PW). Part I presents the international experience for processing standard articles of aero-space engineering, such as hollow blades, wing and shell panels. Prospects of the development of the SPF/DB technology are considered and the latest results are discussed.

**Keywords:** superplastic forming, pressure welding, hollow structures, titanium alloy.

### 1. Введение

Конструкции в виде тонкостенных панелей и оболочек широко используются в летательных аппаратах, кораблестроении и ряде других инженерных сооружений. Прочность и устойчивость таких конструкций традиционно обеспечивается либо набором продольных и поперечных подкрепляющих ребер, либо выполнением конструкций многослойными, состоящими из внешних (несущих) слоев, связанных слоем наполнителя. Связь несущих слоев с наполнителем обеспечивается с помощью паяных, сварных, клеевых и других соединений. Многослойные конструкции обладают меньшим весом, чем эквивалентные по жесткости гладкие оболочки и оболочки с подкрепляющими ребрами. Общим недостатком рассмотренных выше конструкций является пониженная технологичность [1].

Проведенные в последние десятилетия в России и за рубежом исследования показывают, что высокую эффек-

тивность при изготовлении многослойных конструкций обеспечивает технологический процесс, основанный на сочетании сверхпластической формовки со сваркой давлением (СПФ/СД). Многослойные конструкции, получаемые методом СПФ/СД, называют ячеистыми, так как они представляют собой тонкостенные оболочки, поделенные изготовленными заодно с ними перегородками на множество полых ячеек. Метод СПФ/СД в настоящее время рассматривается как один из наиболее перспективных, поскольку он обеспечивает гибкость проектирования и изготовления сложных конструкций с экономией по массе до 30% при снижении стоимости изготовления приблизительно на 50%.

Метод СПФ/СД позволяет получать жесткие тонкостенные конструкции сложного профиля с высоким коэффициентом использования материала при относительно низких энергетических и капитальных затратах. Изделия, изготавливаемые по технологии СПФ/СД находят применение в таких отраслях машиностроения как

авиакосмическая, автомобилестроение, нефтехимическая, судостроение, транспорт, строительство и т.д. Этот метод используется для изготовления силовых конструкций типа крыльевых и корпусных узлов, перегородок, стенок, панелей, ребер, балок, сложных оболочек, баков, сосудов давления, вращающихся частей двигателя. В производстве элементов конструкций методом СПФ/СД наиболее широкое распространение получили титановые сплавы. Совмещенный процесс СПФ/СД позволяет использовать преимущества, создаваемые необыкновенными особенностями титановых сплавов – склонностью к сверхпластичности и свариваемостью в твердом состоянии. Сочетание таких двух качеств позволяет получать титановые детали, которые не могут быть изготовлены другими способами. В настоящее время ведущие авиакосмические компании США, Великобритании, Франции, Германии, Японии и Китая развивают и используют технологию СПФ/СД для изготовления крупногабаритных изделий ответственного назначения [2-4].

Отметим работу [5], в которой изложены основы диффузионной сварки применительно к интегральным процессам СПФ/ДС.

## 2. Технологические схемы изготовления и примеры использования полых конструкций

Методом СПФ/СД могут быть получены самые разнообразные конструкции, узлы и детали. Анализ существующих методов изготовления многослойных полых конструкций из титановых сплавов методом СПФ/СД позволил выделить основные типы конструкций и способы их получения. Конструкции, получаемые методом СПФ/СД, разделяют по количеству используемых листов на двух-, трех- и четырех- листовые. Наибольшее применение при изготовлении силовых изделий типа крыльевых и корпусных узлов, вращающихся частей двигателя, используемых в авиакосмической промышленности, находят трехслойные гофрированные панели и четырехслойные ячеистые конструкции. Технологические схемы их получения и образцы конструкций приведены на рис. 1 и 2.

В работах [1,3,5-8] подробно описаны схемы и конструкции, получаемые по технологии СПФ/СД. При изготовлении многослойных конструкций используются два основных способа: первый основан на использовании противосварочных покрытий [9]; второй - на использовании предварительной сварки плавлением [10]. По первому способу (рис. 1а) сваркой в твердом состоянии соединяют только определенные участки листовых заготовок, а остальные поверхности, благодаря нанесенному на них защитному покрытию, при этом не соединяются. После чего полученную заготовку деформируют в условиях сверхпластичности и придают конструкции сложную форму (3-х листовые конструкции). В качестве противосварочного покрытия чаще всего используют нитрид бора BN или окись иттрия  $Y_2O_3$ . В зависимости от конфигурации наполнителя данные конструкции подразделяются на панели с аккордеонным, гофрированным, армированным наполнителем.

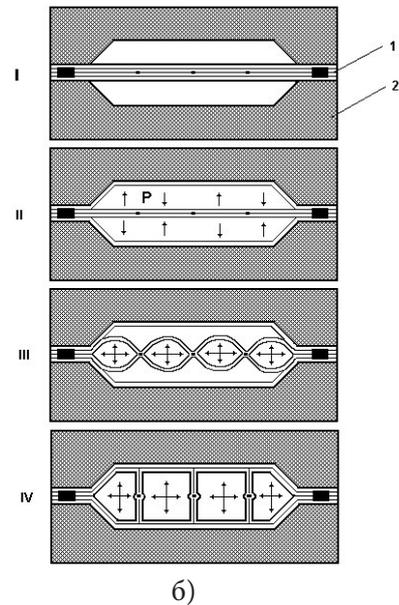
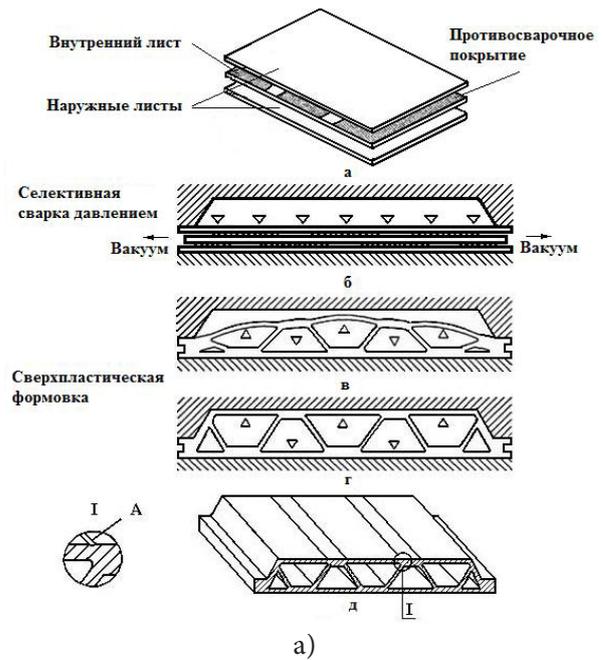
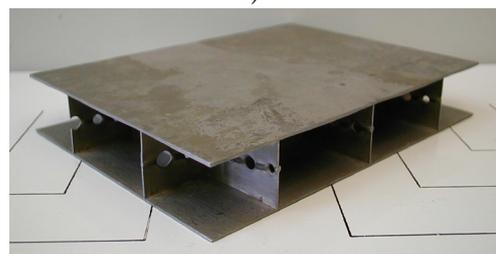


Рис. 1. Технологические схемы процесса получения многослойных конструкций: а) трехслойные гофрированные панели, б) четырехслойные ячеистые панели.



а)



б)

Рис. 2. Образцы (а) трех- и (б) четырехслойных конструкций.

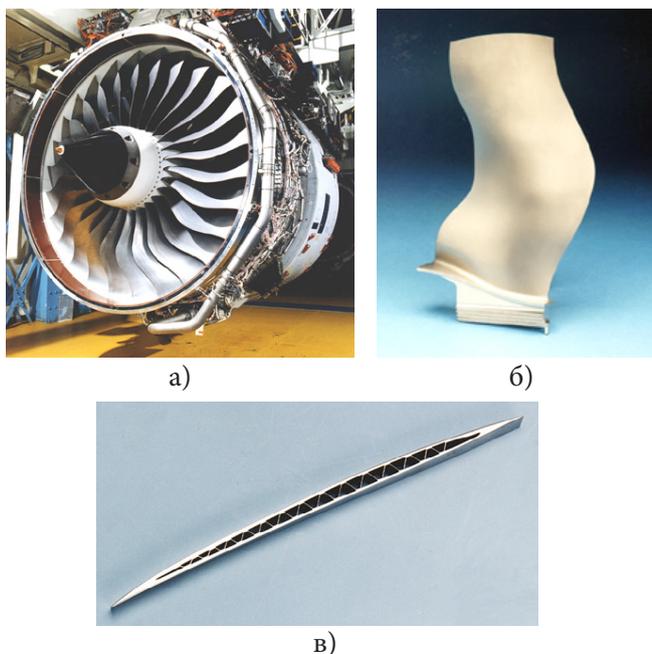


Рис. 3. (а) Вентилятор двигателя фирмы Rolls-Royce, (б) полая лопатка третьего поколения, (в) сечение полой лопатки.

Недостатком данного способа изготовления таких конструкций является участие обшивок в создании геометрической формы наполнителя, что приводит к образованию на них утяжин. Примером использования такого вида конструкций служит изготовленное методом СПФ/СД воздуховодное сопло козырька для самолета В-1 [5]. Четыре титановых узла, полученных методом СПФ/СД, обеспечили замену прежней стальной конструкции, которая изготавливалась из 32 механически обработанных деталей. Новая технология изготовления обеспечила снижение затрат и веса на 45-50 %. Другим и наиболее ярким примером использования полых конструкций, изготовленных по технологии СПФ/СД, является широкохордная полая лопатка вентилятора, из-

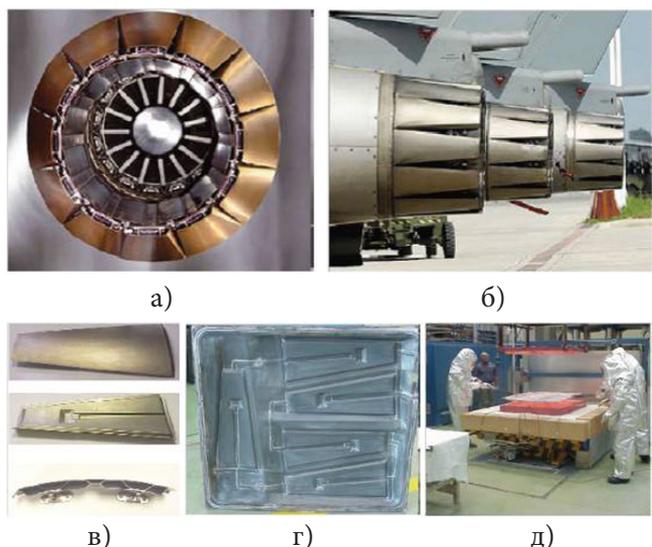


Рис. 4. Изготовление створок реактивного сопла на фирме ITR. (а,б) – реактивное сопло истребителя - бомбардировщика Eurofighter с двумя двигателями EJ-200, состоящее из 12 створок, (в) – створки (РС) трехслойной конструкции после финишной обработки, (г) – заготовки створок РС после СПФ/СД, за один цикл изготовлено 5 деталей, (д) – изготовление створок РС на прессе для СПФ/СД.

готовляемая из титанового сплава Ti-6Al-4V фирмой Rolls-Royce [11] и используемая в семействе двигателей Trend. Первое поколение лопаток, начиная с 1984 года, изготавливалось с сотовым наполнителем. С 1995 фирма Rolls-Royce использует в своих двигателях второе поколение полых лопаток – трехслойные конструкции с гофрированным наполнителем, которые наиболее эффективно воспринимают аэродинамические нагрузки (рис. 3). В настоящее время на основе использования технологии СПФ/СД разрабатываются и изготавливаются полые лопатки третьего поколения для наиболее эффективной работы на высоких оборотах, позволяя добиться снижения шума работающего двигателя (рис. 3б,в).

Одним из направлений работы фирмы ITR (Испания) [12] является изготовление реактивного сопла (РС) для истребителя - бомбардировщика Eurofighter с двумя двигателями EJ-200 (рис. 4). В каждом РС устанавливаются 12 створок, изготавливаемых методом СПФ/СД из титанового сплава Ti6Al4V трехслойной конструкции с гофрированным наполнителем. Для достижения максимальной эффективности, за один технологический цикл СПФ/СД изготавливаются 5 створок. Далее проводят химическое травление и разрезку заготовок створок с использованием гидроабразивной резки и осуществляют аргонодуговую сварку створок и сборку сопла.

При изготовлении многослойных конструкций с использованием предварительной сварки плавлением (рис. 16) для соединения листов наполнителя применяют контактную шовную или точечную [13], электронно-лучевую [14] и лазерную сварку, а в некоторых случаях используют сварку давлением. Получаемые многослойные ячеистые конструкции состоят из четырех листов: двух наружных листов, являющихся обшивкой, и двух внутренних листов, представляющих собой силовой каркас – наполнитель (рис. 5). Такая технология характеризуется возможностью получения изделий с гладкими аэродинамическими обводами, равными прочностными характеристиками на изгиб как в продольном, так и в поперечном направлениях и высоким сопротивлением сжимающим нагрузкам, что делает ее перспективной для применения в авиакосмической промышленности.

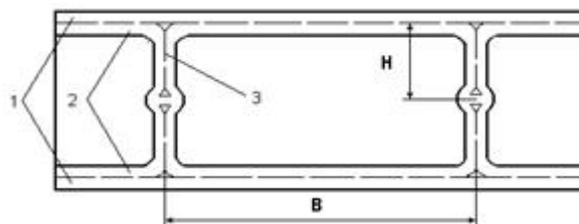
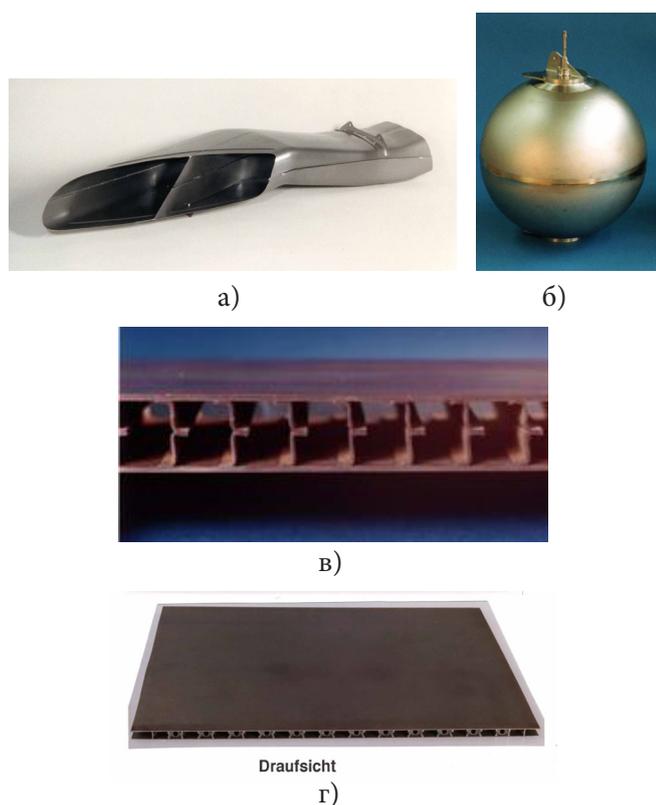


Рис. 5. Схема многослойной ячеистой конструкции: 1 - обшивка; 2 - наполнитель; 3 - ребро жесткости. В и Н - ширина и высота ячейки.

Наполнитель и обшивка соединены друг с другом сваркой в твердом состоянии и совместно образуют жесткую интегральную конструкцию. Листы наполнителя предварительно соединяют прерывистыми сварными швами так, чтобы рисунок швов представлял собой ряды взаимно перпендикулярных линий, образующих прямоугольные ячейки. Прерывистость сварного шва обусловлена необходимостью создания отверстий, обеспечивающих проход деформирующего газа ко всем



**Рис. 6.** Полые конструкции, изготовленные из титанового сплава Ti-6Al-4V в фирме FormTech: а) - трубопровод истребителя Tornado; б) – топливный бак для спутников и ракет (ARIANE V), в) - аккордеонная панель; г) – ячеистая панель.

ячейкам в процессе формовки. Для соединения листов наполнителя наиболее удобна в промышленном использовании контактная шовная сварка. Она обеспечивает прочное соединение при температуре СПФ с минимальной шириной сварного шва и размерами околошовной зоны [15]. Примерами использования многослойных ячеистых конструкций для изготовления узлов авиакосмической промышленности могут служить предкрылки для самолета Мираж-2000 [16], трубопровод истребителя Tornado (рис. 6), изготовленный фирмой FormTech (Германия). Работы сотрудников фирм Boeing и Airbus и многих других описаны в зарубежных публикациях ведущих авиакосмических фирм мира.

Сфера применения СПФ/СД в настоящее время распространяется на получение: управляющих поверхностей, небольших аэродинамических поверхностей, различного рода силовых перегородок, корпусных элементов, газодоводов, вращающихся частей двигателя.

### 3. Заключение

В работе представлен передовой международный опыт изготовления многослойных полых конструкций по технологии, сочетающей сверхпластическую формовку со сваркой давлением (СПФ/СД). Описаны технологические схемы и особенности данной технологии. Представлены основные типы конструкций, изготавливаемых ведущими зарубежными фирмами, которые находят применение в авиакосмической технике.

Опыт ИПСМ РАН в развитии данной технологии будет представлен во второй части обзора.

### Литература

1. Petrov E.N., Rodionov E.N., Kuzmin E.N., Lutfullin R.Ya., Safiullin R.V. *Sellular Structures*. Snezhinsk, RFNC-VNIITF, 2008. – 176 p. (in Russian) [Е.Н. Петров, В.В. Родионов, Э.Н. Кузьмин, Р.Я. Лутфуллин, Р.В. Сафиуллин. Ячеистые конструкции. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2008. – 176 с.]
2. G.B. Stroganov, I.I. Novikov, V.V. Boitsov, V.F. Pshirkov *The Use of Superplasticity in Metal Forming*. Moscow, Mashinostroenie, 1989, 108 P. (in Russian) [Г.Б. Строганов, И.И. Новиков, В.В. Бойцов, В.Ф. Пширков. Использование сверхпластичности в обработке металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1989. – 108с.]
3. D. Stephen. *AGARD Lecture Series 154(7)*, 1 (1987).
4. Smirnov O.M. *Superplasticity of Materials: from Rheology to Technology*. Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo. 1998. №2. P. 18-23. (in Russian) [О.М. Смирнов. Кузнечно-штамповочное производство 2, 18 (1998).]
5. *Superplastic Forming of Structural Alloys*, Peyton, N.E. and Hamilton, K.H., Eds. Moscow, Mashinostroenie, 1985, 312 P. [Сверхпластическая формовка конструкционных сплавов. / Под ред. Н. Пейтона и К. Гамильтона. –М. : Металлургия, 1985.- 312 с.]
6. Maehara Y., Komizo Y., Langdon T.G. *Principles of Superplastic Diffusion Bonding*, Mater. Sci. Technol., 1988, vol.4, pp.669 – 674.
7. C.H. Hamilton. *AGARD Lecture Series 154*, 1 (1987).
8. Partridge P.G. *Diffusion Bonding Of Metals // AGARD Lecture Series № 154*. 1987. P. 1 – 29.
9. Pat. 3927817 USA, B 23 K 31/02. *Method of making metallic sandwich structures / Hamilton C. H., Ascani Jr L. A.; Rockwell International Corp.* – 1975.
10. Safiullin R.V. *SPF/DB of Multilayer Hollow Structures// Proceedings of European Conference on Superplastic Forming EuroSPF-2004; July 7-9, 2004*, P. 167-174.
11. *European Patent № 0568201*, 1993.
12. Serra D. *Superplastic forming application on aero-engines. A review of ITP manufacturing processes. Proceedings of the 6th Europe Conference on Superplastic Forming, 2008*, 10 pages. ([hal-00359685, version 1]).
13. Pat. 4217397 USA, B 23 K 31/02. *Metallic sandwich structure and method of fabrication / Ecklund R. C., Hayase Masashi, Hughes J. B. et al.; Mc Donnell Douglas Corp.* – 1980.
14. Pat. 4351470 USA, B 23 K 28/02, B 21 D 26/02. *Method of making a stiffened panel / Swadling S. J., Mansbridge M. H., Payne D. J., Norton J.; British aerospace.* – 1982.
15. O.A. Kaibyshev, R.V. Safiullin, R.Y. Lutfullin, S.N. Fatkhullin *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo*. 4, 10 (1994). (in Russian) [О. А. Кайбышев, Р. В. Сафиуллин, Р. Я. Лутфуллин, С. Н. Фаткуллин. Кузнечно-штамповое производство 4, 10 (1994).]
16. Roland B. *SPF-DB Applications for Military Aircraft / Superplasticity and Superplastic Forming*. Edited by Hamilton C.H. and Paton N.E. *The Minerals, Metals and Materials society*. 1988. P. 601-612.