

# ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.7.043

## ПНЕВОТЕРМИЧЕСКАЯ ФОРМОВКА ДЕТАЛЕЙ И МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ20

Колесников А.В. \*, Михайлов И.В. \*\*

Государственный космический научно-технический центр имени М.В. Хруничева, Конструкторское бюро «Салют»,  
ул. Новозаводская, 18, Москва, 121309, Россия

\* e-mail: Feridium@mail.ru

\*\* e-mail: Mikhaylov.iv@khrunichev.ru

Статья поступила в редакцию 18.12.2018

Рассмотрен процесс изготовления деталей и трёхслойных конструкций из титанового сплава ВТ20 пневмотермической формовкой в режиме сверхпластичности. Описан способ определения технологических параметров формообразования с помощью моделирования в программном комплексе MSC Marc. Приведены примеры экспериментальных образцов деталей и многослойных конструкций.

*Ключевые слова:* пневмотермическая формовка, сверхпластичность, диффузионная сварка, многослойные конструкции, титановые сплавы.

В современных конструкциях летательных аппаратов всё большее применение находят конструкции из труднодеформируемых титановых сплавов. Однако высокая трудоемкость, связанная с изготовлением деталей из титановых сплавов, сдерживает их широкое применение. Значительно снизить трудоёмкость при изготовлении титановых деталей можно с помощью процесса пневмотермической формовки (ПТФ) (рис. 1), а также совмещенного процесса пневмотермической формовки и диффузионной сварки (ПТФ/ДС) (рис. 2) в режиме сверхпластичности. Сверхпластичность проявляется у сплавов с мелкозернистой структурой, характерной для титановых сплавов [1–3].

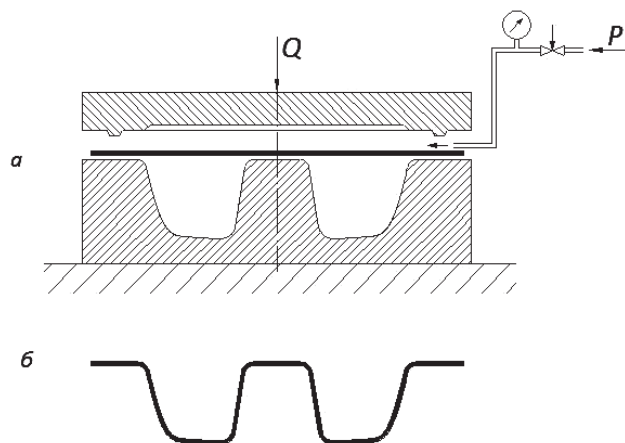


Рис. 1. Схема процесса ПТФ: а — схема процесса ПТФ; б — получаемая деталь

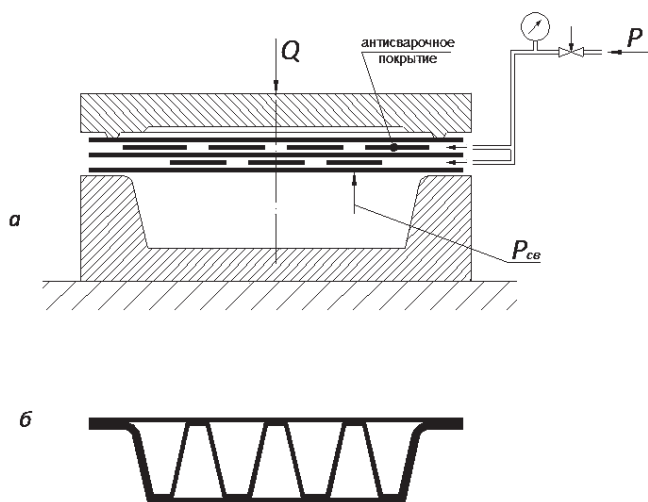


Рис. 2. Схема процесса ПТФ/ДС: а — схема процесса; б — получаемая панель

В условиях ПТФ и ПТФ/ДС и за рубежом [4—10], и у нас [11—17] уже изготавливают такие элементы конструкций летательных аппаратов, как корпуса, законцовки, лопатки компрессора, крышки люков, силовых панелей и др.

В настоящей статье рассматривается моделирование изготовления деталей и трехслойных кли-

новидных панелей из титановых сплавов при пневмотермической формовке в режиме сверхпластичности в программе MSC Marc, по результатам которого становится возможным изготовление экспериментальных образцов.

На примере формовки ячеистой панели из титанового сплава ВТ20 ОСТ1 90218-76 (рис. 3) показана возможность изготовления деталей методом ПТФ.

При изготовлении деталей методом ПТФ необходимо поддерживать режимы, при которых соблюдаются условия сверхпластичности. Одним из условий сверхпластичности является сохранение постоянной скорости деформации в процессе формообразования. Скорость деформации, обеспечивающая режим сверхпластичности, определяется для каждого сплава с помощью испытаний на одноосное либо двухосное растяжение. Сохранение постоянной скорости деформации в процессе формообразования обеспечивается непрерывным изменением давления формовки по времени. Для решения этой задачи и визуализации процесса формообразования был применён программный комплекс «MSC Marc». В результате моделирования получено распределение относительных деформаций (рис. 4), из анализа которых

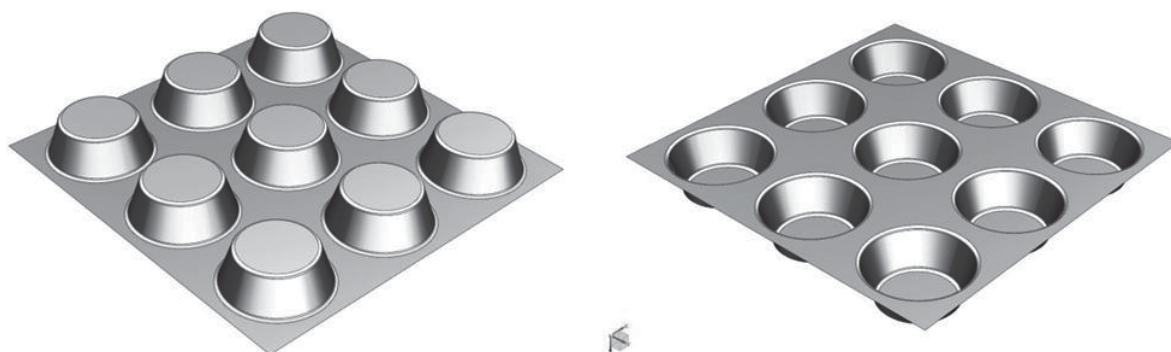


Рис. 3. Ячеистая панель

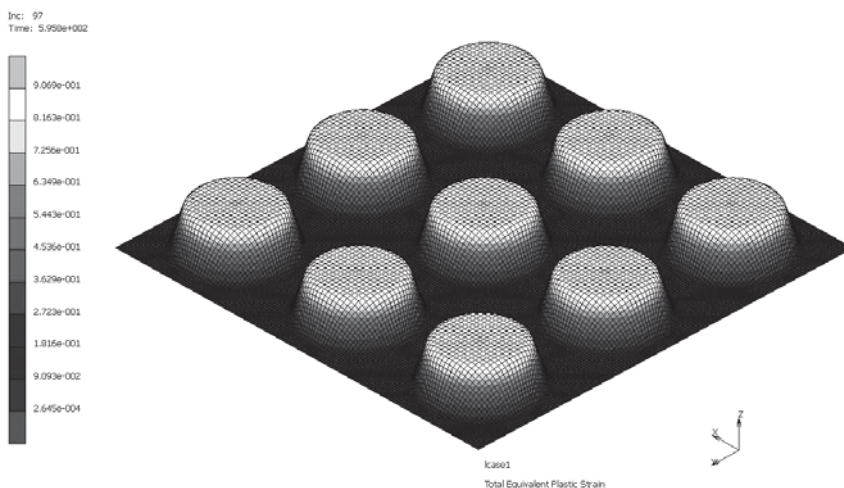


Рис. 4. Относительные деформации при формовке ячеистой панели

следует, что максимальные относительные деформации заготовки составляют 90,7%. Так как для сплава ВТ20 допустимая относительная деформация в режиме сверхпластичности составляет более 400% [3], то рассчитанные значения являются допустимыми, поэтому разрушения деталей в процессе формовки не произойдет.

Также в результате моделирования была получена управляющая программа по изменению давления по времени для изготовления детали. По рассчитанной в результате моделирования управляющей программе на прессе сверхпластического формования в оснастке при температуре 900°C была изготовлена ячеистая панель (рис. 5).

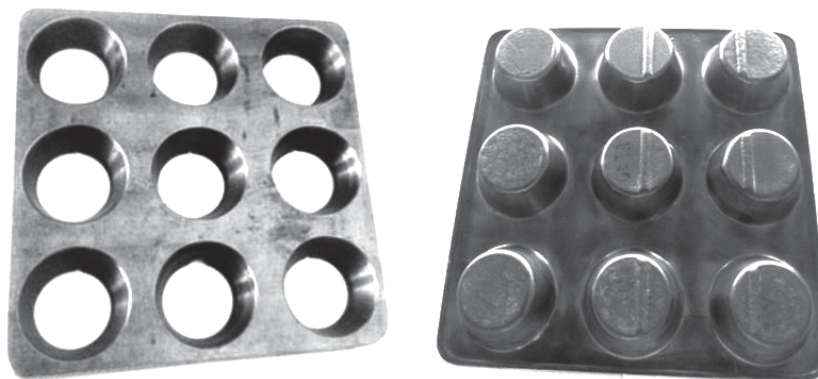


Рис. 5. Оснастка и отформованная ячеистая панель

После процесса формообразования деталей в режиме сверхпластичности отсутствует гофрообразование и не проявляется эффект пружинения, что исключает доводочные работы. При этом ожидаемое снижение трудоемкости по технологии ПТФ может достигать более 30%.

В случае необходимости технология ПТФ позволяет выполнять групповую формовку нескольких деталей, чтобы получить многослойные ячеистые конструкции (рис. 6).

Также широкие возможности по изготовлению многослойных панелей из титановых сплавов предоставляет совмещенная технология пневмотермической формовки и диффузионной сварки. В зависимости от требований к многослойной кон-



Рис. 6. Многослойная ячеистая панель

струкции можно изготавливать панели с изменяющимся сечением. Определение параметров заполнителя таких конструкций, обеспечение условий минимальной разнотолщинности и расчёт условий формообразования представляет наибольшие трудности. В качестве примера рассмотрим многослойные клиновидные панели с поперечным и продольным гофровым набором, представленные на рис. 7. Толщина внешних листов панелей составляет 2 мм. Толщина заполнителя 1 мм.

Изготовление многослойных титановых панелей по технологии ПТФ/ДС состоит из ряда этапов:

- 1) раскрой листов обшивок и заполнителя;
- 2) нанесение по трафарету на лист заполнителя или обшивок в заданных местах антисварочного покрытия;
- 3) сборка пакета из листов обшивок и заполнителя;
- 4) закладка пакета в оснастку и загрузка в установку ПТФ/ДС;
- 5) нагрев оснастки с пакетом заготовок до температуры диффузионной сварки и поддержание её в течение этапа сварки;

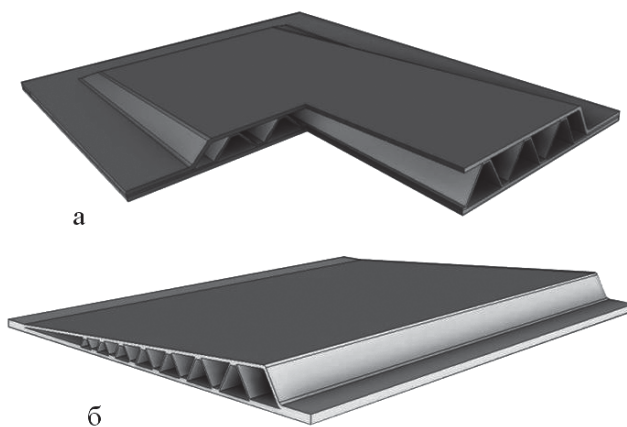


Рис. 7. Клиновидная панель с поперечным (а) и продольным (б) гофровым заполнителем

б) выполнение диффузионной сварки листов на участках, непокрытых антисварочным покрытием, путём создания вакуума между листами обшивки и заполнителя, а также давления аргона снаружи листов и выдержки при этом давлении;

7) нагрев оснастки до температуры, обеспечивающей режим сверхпластичности материала заготовок, и поддержание её в течение этапа формовки;

8) подача инертного газа между обшивками и заполнителем с регулированием давления по ходу процесса в соответствии с расчётными значениями для формовки заполнителя панели в режиме сверхпластичности;

9) охлаждение отформованной панели вместе с оснасткой и извлечение готовой трёхслойной панели.

С целью анализа процесса деформирования и определения параметров изготовления проведено моделирование формообразования клиновидной панели с продольным гофровым набором из титанового сплава ВТ20 ОСТ1 90218-76, представленное на рис. 8. Из анализа распределения относительных деформаций следует, что максимальные относительные деформации в конструкции составляют 126,6%.

Так как для титанового сплава ВТ20 допустимая относительная деформация в режиме сверхпластичности составляет 400% [3], то рассчитанные значения являются допустимыми, поэтому разрушения конструкции в процессе формовки не произойдет. Аналогичное моделирование проведено для клиновидной панели с поперечным гофровым набором.

По рассчитанным параметрам ПТФ/ДС была осуществлена формовка клиновидных трехслойных панелей с габаритными размерами 22,5x212x188 мм из титанового сплава ВТ20 на прессе сверхпластического формования и диффузионной сварки при температуре 950°C (рис. 9).

Панели были изготовлены без дефектов. В случае возникновения дефектов необходимо рассчитать оптимальные параметры заполнителя [18, 19] либо использовать способы поддержки обшивки в процессе формообразования [20, 21].

### Выводы

С помощью технологии ПТФ и ПТФ/ДС можно значительно расширить возможности производства при изготовлении сложных деталей и конструкций из труднодеформируемых титановых сплавов, а с помощью моделирования процесса

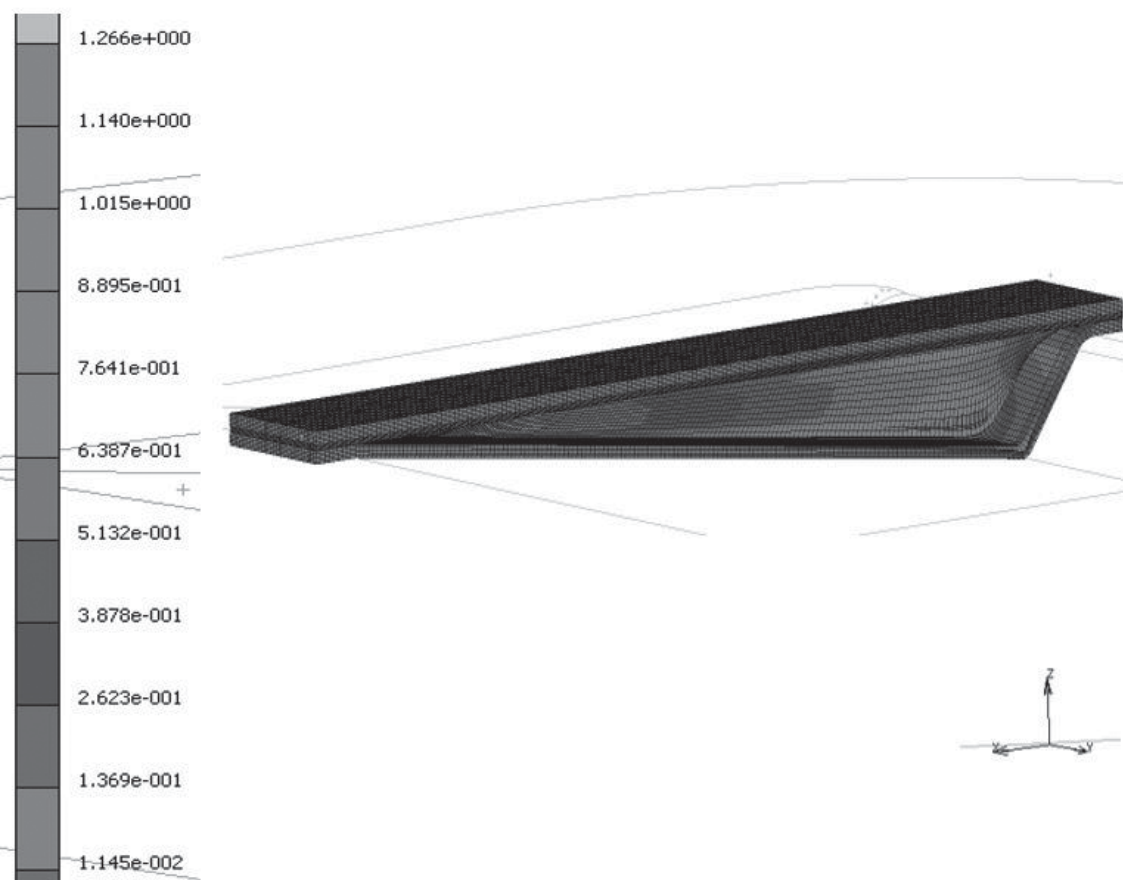


Рис. 8. Относительные деформации при формовке клиновидной панели



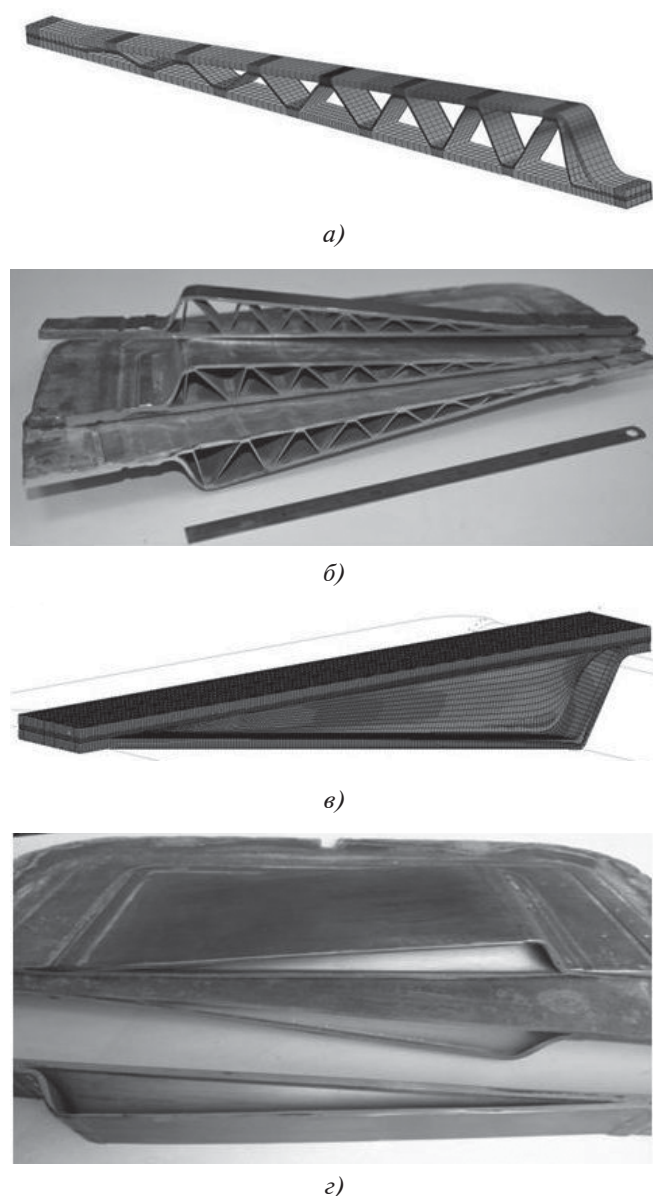


Рис. 9. Клиновидные панели из титанового сплава BT20 с поперечным и продольным гофровыми наборами: а — моделирование клиновидной панели с поперечным гофровым набором; б — клиновидная панель с поперечным гофровым набором; в — моделирование клиновидной панели с продольным гофровым набором; г — клиновидная панель с продольным гофровым набором

изготовления — определять параметры формообразования и степень деформации, управляя разнотолщинностью в детали.

### Библиографический список

1. Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии. — М.: КомКнига, 2005. — 320 с.
2. Новиков И.И., Портной В.К. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном. — М.: Металлургия, 1981. — 168 с.
3. Грабский М.В. Структурная сверхпластичность металлов. — М.: Металлургия, 1975. — 272 с.

4. Degarmo E., Black J., Kohser R. Materials and Processes in Manufacturing — 9th ed. — New York; Chichester: Wiley, 2003. — 1154 p.
5. Jarrar F.S., Liewald M., Schmid P., Fortanier A. Superplastic Forming of Triangular Channels with Sharp Radii // Journal of Materials Engineering and Performance. 2014. Vol. 23. No. 4, pp. 1313-1320. DOI: 10.1007/s11665-014-0878-y
6. Jarrar F.S., Hector L.G., Khraisheh M.K., Deshpande K. Gas Pressure Profile Prediction from Variable Strain Rate Deformation Paths in AA5083 Bulge Forming // Journal of Materials Engineering and Performance. 2012. Vol. 21. No. 11, pp. 2263-2273. DOI: 10.1007/s11665-012-0196-1
7. Albakri M.I., Jarrar F.S., Khraisheh M.K. Effects of Interfacial Friction Distribution on the Superplastic Forming of AA5083 // Journal of Engineering Materials and Technology. 2011. Vol. 133. No. 3, pp. 031008-031014. DOI:10.1115/1.4004159
8. Xu C., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G. Achieving a Superplastic Forming Capability through Severe Plastic Deformation // Advanced Engineering Materials. 2003. Vol. 5. No. 5, pp. 359-364. DOI: 10.1002/adem.200310075
9. Collier A.D., Jackson N. Industrialization of SPF within Bae Military Aircraft // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995, pp. 377-383.
10. Spittle P. Gas turbine technology // Physics Education. 2003. Vol. 38. No. 6, p. 504. DOI: 10.1088/0031-9120/38/6/002
11. Лазарев В.А., Ковалевич М.В., Гончаров А.В. Опыт внедрения технологии пневмотермической формовки в серийном производстве // Авиационная промышленность. 2014. № 4. С. 36-40.
12. Ковалевич М.В., Климова А.А. Совмещение традиционных операций листовой штамповки и пневмотермической формовки в режиме сверхпластичности для изготовления изделий авиационной техники // Труды МАИ. 2010. № 38. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=14150>
13. Мироненко В.В., Колесников А.В., Максименко Н.В., Станиславчик А.С., Котов В.В. Пневмотермическая формовка в режиме сверхпластичности рифтовых конструкций из листа // Металлург. 2013. № 9. С. 50-54.
14. Кайбышев О.А., Круглов А.А., Таюпов А.Р., Бердин В.К., Лутфуллин Р.Я. Сверхпластическая формовка многослойных конструкций // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. № 9. С. 20-21.
15. Пашкевич А.Г., Орехов А.В., Смирнов В.А. Формовка-сварка трехслойных титановых конструкций в состоянии сверхпластичности // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1985. №4. С. 90-93.
16. Бирюков Н.М., Смирнов В.А. Формообразование многослойных титановых панелей в состоянии сверхпластичности // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 1988. № 3. С. 38-42.

17. Колесников А.В., Колесник А.В., Заболотский А.П. Пневмотермическая формовка трёхслойных клиновидных панелей из титанового сплава VT20 // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 3. С. 155-161.
18. Колесников А.В., Шмаков А.К., Чеславская А.А. К расчету оптимальных параметров заполнителя многослойных конструкций переменной высоты для изготовления их методом пневмотермической формовки и диффузионной сварки // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2015. № 1. С. 98-102.
19. Колесников А.В. Предотвращение возникновения дефектов в процессе пневмотермической формовки трёхслойных панелей из титановых сплавов // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 2. С. 66-74.
20. Смирнов В.А., Бирюков Н.М., Садков В.В., Ростковский И.Г. Формовка-сварка многослойных титановых конструкций в состоянии сверхпластичности без матрицы // Авиационная промышленность. 1986. № 9. С. 46-48.
21. Колесников А.В., Шмаков А.К. Пневмотермическая формовка трёхслойных клиновидных панелей с подпором обшивок // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. №11(82). С. 52-57.

## SUPERPLASTIC FORMING OF AEROSPACE FACILITIES' PARTS AND MULTILAYER STRUCTURES FROM VT20 TITANIUM ALLOY

**Kolesnikov A.V.\* , Mikhailov I.V.\*\***

*Khrunichev State Research and Production Space Center, Design Bureau "Salyut",  
18, Novozavodskaya str., Moscow, 121087, Russia*

\* e-mail: Feridium@mail.ru

\*\* e-mail: Mikhaylov.iv@khrunichev.ru

### Abstract

The structures from titanium alloys are increasingly employed in aerospace structures. Labor intensity may be significantly reduced while titanium parts manufacturing by application of superplastic forming process (SPF) and combined process of SPF and diffusion welding (SPF/DW). Superplasticity manifests itself in alloys with a fine-grained structure under certain strain-rate conditions and maintaining a constant temperature during the formation process. Maintaining a constant strain rate in the process of shaping is ensured by a continuous change in the forming pressure over time. The computing of the plot of the forming pressure change with time is rather labor consuming. For this problem solving and the process visualization, modeling with the MSC "Marc" program was performed.

By the example of forming a cellular panel from VT20 titanium alloy, the possibility of manufacturing parts by the SPF method is demonstrated. The simulation result allowed obtain relative deformations distribution, which analysis revealed that maximum relative deformations constituted 97%. This is quite acceptable, and there will be no destruction while the forming process. The simulation results allowed also develop the control program according to which the

cellular panel was produced by the superplastic forming press.

The article considers the form shaping modeling of multilayer wedge-shaped panels with transverse and longitudinal corrugation set. It follows from the relative deformation distribution analysis that maximum relative deformations in the structure constituted 126.6%, which is acceptable. The forming of the wedge-shape three-layer panels was performed by the SPF/DW method according to the computed plot of forming pressure change with time.

After the superplastic forming process, there are no both corrugation forming and springing effect, which eliminates the finishing work.

Thus, the SPF and SPF/DW technologies and modeling the process of production to obtain the forming parameters allow significantly enhance the production possibilities while producing complex parts from titanium alloys.

**Keywords:** superplastic forming, superplasticity, diffusion welding, multilayer structures, titanium alloys.

## References

1. Chumachenko E.N., Smirnov O.M., Tsepin M.A. *Sverkhplastichnost': materialy, teoriya, tekhnologii* (Superplasticity: materials, theory, technologies), Moscow, KomKniga, 2005, 320 p.
2. Novikov I.I., Portnoi V.K. *Sverkhplastichnost' splavov s ul'tramelkim zernom* (Superplasticity of alloys with ultrafine grain), Moscow, Metallurgiya, 1981, 168 p.
3. Grabskii M.V. *Strukturnaya sverkhplastichnost' metallov* (Structural superplasticity of metals), Moscow, Metallurgiya, 1975, 272 p.
4. Degarmo E., Black J., Kohser R. *Materials and Processes in Manufacturing*. 9th ed. New York, Chichester, Wiley, 2003, 1154 p.
5. Jarrar F.S., Liewald M., Schmid P., Fortanier A. Superplastic Forming of Triangular Channels with Sharp Radii. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 1313-1320. DOI: 10.1007/s11665-014-0878-y
6. Jarrar F.S., Hector L.G., Khraisheh M.K., Deshpande K. Gas Pressure Profile Prediction from Variable Strain Rate Deformation Paths in AA5083 Bulge Forming. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, vol. 21, no. 11, pp. 2263-2273. DOI: 10.1007/s11665-012-0196-1
7. Albakri M.I., Jarrar F.S., Khraisheh M.K. Effects of Interfacial Friction Distribution on the Superplastic Forming of AA5083. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2011, vol. 133, no. 3, pp. 031008-031014. DOI:10.1115/1.4004159
8. Xu C., Furukawa M., Horita Z., Langdon T.G. Achieving a Superplastic Forming Capability through Severe Plastic Deformation. *Advanced Engineering Materials*, 2003, vol. 5, no. 5, pp. 359-364. DOI: 10.1002/adem.200310075
9. Collier A.D., Jackson N. *Industrialization of SPF within Bae Military Aircraft*. Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995, pp. 377-383.
10. Spittle R. Gas turbine technology. *Physics Education*, 2003, vol. 38, no. 6, p. 504. DOI: 10.1088/0031-9120/38/6/002
11. Lazarev V.A., Kovalevich M.V., Goncharov A.V. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2014, no. 4, pp. 36-40.
12. Kovalevich M.V., Klimova A.A. *Trudy MAI*, 2010, no. 38. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=14150>
13. Mironenko V.V., Kolesnikov A.V., Maksimenko N.V., Stanislavchik A.S., Kotov V.V. *Metallurg*, 2013, no. 9, pp. 50-54.
14. Kaibyshev O.A., Kruglov A.A., Tayupov A.R., Berdin V.K., Lutfullin R.Ya. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, 1990, no. 9, pp. 20-21.
15. Pashkevich A.G., Orekhov A.V., Smirnov V.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 1985, no. 4, pp. 90-93.
16. Biryukov N.M., Smirnov V.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 1988, № 3, pp. 38-42.
17. Kolesnikov A.V., Kolesnik A.V., Zabolotskii A.P. Pneumo-thermal molding of sandwich wedge-like panels from titanium alloy VT20. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 3, pp. 155-161.
18. Kolesnikov A.V., Shmakov A.K., Cheslavskaya A.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*, 2015, no. 1, pp. 98-102.
19. Kolesnikov A.V. Prevention of defects in the process of superplastic forming and diffusion bonding sandwich panels of titanium alloys. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no 2, pp. 66-74.
20. Smirnov V.A., Biryukov N.M., Sadkov V.V., Rostkovskii I.G. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 1986, no. 9, pp. 46-48.
21. Kolesnikov A.V., Shmakov A.K. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 11(82), pp. 52-57.