

## ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК Том 18 Выпуск 3

УДК 621.98.04

DOI 10.22405/2226-8383-2017-18-3-55-71

### КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ

А. Х. Ахунова<sup>1</sup>, Р. Р. Мулюков<sup>2</sup>, Р. В. Сафиуллин<sup>3</sup> (Уфа)

#### Аннотация

В работе рассматриваются вопросы совершенствования процесса изготовления трехслойных полых конструкций из титанового сплава ВТ6, изготовленных по технологии, комбинирующей сверхпластическую формовку (СПФ) и сварку давлением (СД). Для оптимизации процесса формовки целесообразно использовать конечно-элементное моделирование, для которого необходимо задание адекватных определяющих соотношений, описывающих отклик материала на термомеханическое воздействие, а также феноменологического закона трения на поверхности контакта деформируемого материала с формообразующей матрицей. Для нахождения материальных констант в определяющих соотношениях и коэффициента трения прибегают к тестовым формовкам листового материала в матрицы различных форм. В таких экспериментах реализуется двухосное нагружение, как и в реальных процессах изготовления сложнопрофильных конструкций из листовых материалов методом СПФ. С этой целью выполнено конечно-элементное моделирование СПФ листовых заготовок в матрицы двух типов: протяженную, имеющую в поперечном сечении форму равнобедренного треугольника, и коническую. Даны рекомендации по выбору оптимального угла при вершине, определяющего геометрию матриц, при котором обеспечивается постоянство действующих напряжений в ходе формовки при постоянном давлении, что позволяет существенно упростить анализ результатов эксперимента. Установлено, что на выбор угла матриц оказывают влияние различные факторы: для протяженной матрицы это коэффициент трения на границе заготовка-матрица, а для конической матрицы - образующая при формовке разнотолщинность.

На основании численного моделирования процесса формовки листовых заготовок в матрицы дана методика оценки коэффициента трения на контактной поверхности заготовка-матрица. С использованием

<sup>1</sup>Ахунова Ангелина Халитовна, научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН, e-mail: akhunova.a.kh@gmail.com

<sup>2</sup>Мулюков Радик Рафикович, член-корреспондент Российской академии наук, директор Института проблем сверхпластичности металлов РАН, e-mail: imsp@imsp.ru

<sup>3</sup>Сафиуллин Ринат Владикович, старший научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН, e-mail: dr\_rvs@mail.ru

материальных констант определяющего соотношения, рассчитанных по предложенным методикам и рекомендациям, проведено конечно-элементное моделирование процесса СПФ трехслойных полых конструкций. Установлены технологические ограничения на геометрические параметры конструкций такие, как угол наклона ребер жесткости и отношение толщины обшивки к толщине заполнителя, обеспечивающие формовку без образования складок на обшивках и минимальную разнотолщинность ребер жесткости.

*Ключевые слова:* сверхпластическая формовка, матрица, трехслойная полая конструкция, метод конечных элементов.

*Библиография:* 24 названий.

## FINITE-ELEMENT MODELING OF SUPER-PLASTIC FORMING PROCESSES

A. Kh. Akhunova, R. R. Mulyukov, R. V. Safullin (Ufa)

### Abstract

The present work is devoted to the development of the production of three-layered hollow structures made of VT6 titanium alloy by means of superplastic forming (SPF) and pressure welding. Finite-element modeling can be successfully applied to optimize the forming process, if the adequate constitutive relations would be defined and the friction at the contact surface of the material with the die would be specified. To find the friction coefficient and the parameters of the constitutive relations for metal forming process, test experiments are conducted to the forming of sheet into dies of various shapes. In such test experiments, a biaxial loading is realized, as in the actual processes of fabricating complicated structures from sheet by SPF. To this end, Finite-element modeling of the SPF process of sheet forming into dies of two types is performed: (i) into wedge die having cross section in the form of equilateral triangle, and (ii) cone die. Recommendations are given for the choice of the optimum angle at the vertex, determining the geometry of the dies, which results in the constancy of the stresses during forming at constant pressure.

The methodology for estimating the coefficient of friction on the contact surface between sheet and die is given. Finite-element modeling of the SPF process of three-layer hollow structures is carried out using the parameters of the constitutive relations obtained by the proposed methods. Technological constraints on the geometric parameters of structures, such as the angle of inclination of the stiffening ribs and the thickness ratio of outer to inner sheet thicknesses are established, which provides forming without the formation of folds on the shell and the minimum variability of ribs thickness.

*Keywords:* superplastic forming, die, three-layered hollow structure, finite element method.

*Bibliography:* 24 titles.

## 1. Введение

Совершенствование технологии сверхпластической формовки (СПФ) изделий из различных сплавов может быть сопряжено со значительными затратами времени и ресурсов. Существенное сокращение сроков разработки и отладки технологии может быть достигнуто за счет применения современных методов компьютерного моделирования, позволяющих проанализировать практически все аспекты процесса СПФ. Во-первых, моделирование позволяет подтвердить или опровергнуть возможность получения конечной конфигурации изделий, в частности, показать области утонения листовых заготовок или образования складок. Во-вторых, по результатам моделирования можно определить технологические ограничения на геометрические параметры изделия. В-третьих, с помощью моделирования можно оптимизировать закон подачи давления газа, с тем, чтобы обеспечить деформацию материала в наиболее деформируемых частях изделия со скоростями, обеспечивающими сверхпластическое течение, и минимизировать время формовки [1,2].

В настоящее время при моделировании процессов СПФ в основном используются программные продукты, основанные на методе конечных элементов. Это такие пакеты прикладных программ, как ANSYS, DEFORM-3D, Fidesys [3] и др. Алгоритмы решения физически и геометрически нелинейных задач, решение контактных задач и примеры их применения описаны в работах [4-6]. Использование программного обеспечения является более или менее рутинной задачей. Тем не менее, есть несколько важных аспектов, которые могут повлиять на точность и эффективность моделирования, такие как выбор определяющего соотношения, описывающего отклик материала на термомеханическое воздействие [7-8], а также установление феноменологического закона трения на поверхности контакта деформируемого материала с формообразующей матрицей.

Параметры определяющих соотношений (ОС) для различных материалов, как правило, находят из экспериментальных данных, полученных при одноосном растяжении образцов. Для получения более надежных определяющих соотношений следует использовать экспериментальные данные, где схема нагружения образца близка к той, что реализуется в реальном процессе СПФ.

В данной работе описываются технологические эксперименты, проводимые для установления параметров определяющих соотношений для материалов, деформируемых в режиме сверхпластической формовки. Рассматриваются методы учета трения между матрицей и формируемой деталью. С помощью компьютерного моделирования процесса СПФ с использованием параметров ОС, рассчитанных по приведенным методикам, определяются технологические ограничения на геометрические параметры трехслойных конструкций.

## 2. Сверхпластическая формовка листовых заготовок в формообразующие матрицы

Результаты использования пакета прикладных программ в значительной степени зависят от принятой модели деформируемого материала. При этом очевидна необходимость анализа имеющихся в пакете ОС и выбора такого соотношения, которое адекватно описывает поведение материала в исследуемом процессе. В этой связи, преимуществом обладают такие программные продукты, например, ANSYS, Fidesys [9], которые позволяют не только использовать ОС, уже имеющиеся в базе данных, но и вводить свои ОС, что существенно облегчает разработку математической модели технологического процесса.

ОС содержат параметры, которые должны быть установлены из экспериментальных данных. Сверхпластичность металлов и сплавов, как правило, исследуется с помощью испытаний на одноосное растяжение плоских образцов. В этом случае только одна из главных компонент напряжений не равна нулю  $\sigma_1 = \sigma$ ,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ , где  $\sigma = P/S$ ,  $P$  - растягивающая нагрузка и  $S$  - площадь поперечного сечения образца.

Хорошо известно, что пластическое течение очень чувствительно к количеству ненулевых компонент главных напряжений. В процессе СПФ листовых материалов, как правило, два из трех компонент главных напряжений не равны нулю и, таким образом, параметры определяющих соотношений должны определяться из экспериментов на двухосное нагружение.

Одним из наиболее популярных экспериментов, где реализуется двухосная схема нагружения, является свободная выдувка листового материала. Однако в таких испытаниях при постоянном давлении газа, напряжения и скорости деформации в вершине купола существенно зависят от времени. Поскольку напряжение течения сверхпластического материала показывает очень высокую чувствительность к скорости деформации, то желательно определять параметры материала из экспериментов при постоянной скорости деформации. Это может быть достигнуто при СПФ листовой заготовки в коническую (рис. 1) [10-12] или в протяженную клиновую (рис. 2) [7, 12-13] матрицы.

При формовке листовой заготовки в коническую матрицу деформируемая часть заготовки имеет форму части сферы (рис. 1), где реализуется напряженное состояние с главными компонентами тензора напряжений  $\sigma_1 = \sigma_2 = pR/(2s)$ ,  $\sigma_3 = 0$ , где  $p$  - давление формирующего газа,  $R$  - радиус кривизны сферической части образца,  $s$  - толщина листа в сферической части образца. Выбором угла раствора конической матрицы можно добиться постоянства напряжений в формируемой заготовке при постоянном давлении газа, при этом уменьшение радиуса кривизны сферы и ее толщины происходит так, что отношение  $R/s$  остается неизменным в ходе всего процесса.

Формовка в клиновую матрицу (рис. 2) осуществляется в условиях плоской деформации, поскольку на достаточном удалении от торцов заготовки

краевым эффектом, распространяющимся примерно на одну ширину матрицы, можно пренебречь. Деформируемая часть заготовки имеет при этом форму боковой части цилиндра. В предположении соосности девиаторов напряжений и деформаций для несжимаемого материала имеем следующие выражения для главных компонент тензора напряжений:  $\sigma_1 = pR/s$ ,  $\sigma_2 = pR/(2s)$ ,  $\sigma_3 = 0$ , где  $R$  - радиус кривизны цилиндрической части заготовки, а  $s$  - её толщина. Если матрица имеет в поперечном сечении форму клина с углом раствора  $\alpha$ , то выбором этого угла можно добиться постоянства напряжений в формуемой части заготовки при постоянном давлении газа, как и в случае конической матрицы.



Рис. 1: Образцы после СПФ листовой заготовки в коническую матрицу. Часть листа, не пришедшая в соприкосновение с конической матрицей, деформируется свободно и имеет форму части сферы.



Рис. 2: Образцы после СПФ листовой заготовки в клиновую матрицу. Часть листа, не пришедшая в соприкосновение с клиновой матрицей, деформируется свободно и имеет форму части цилиндра.

#### Оптимизация угла матрицы.

Оценка оптимального угла конической и вытянутой формообразующих матриц производилась со следующими предположениями [12]:

1. Толщина заготовки достаточно мала, так что можно пренебречь изгибными деформациями и при определении напряженного состояния образца пользоваться безмоментной теорией оболочек;
2. Купол в процессе СПФ принимает форму сегмента цилиндра (вытянутая матрица) или сегмента сферы (коническая матрица), гладко сопряженных с частью заготовки, находящейся в контакте с матрицей;
3. Толщина части заготовки, находящейся в контакте с матрицей, изменяется вдоль меридиана по линейному закону;
4. В цилиндрическом или сферическом сегментах заготовки предполагается равнотолщинность;

5. На границе контакта заготовка-матрица отсутствует проскальзывание.

На рис. 3 представлена схема деформирования заготовки в моменты времени  $t$  и  $t'$ . Данная схема является общей как для формовки в коническую, так и в клиновую матрицы. В случае конической (клиновой) матрицы используют цилиндрическую (декартову) системы координат.

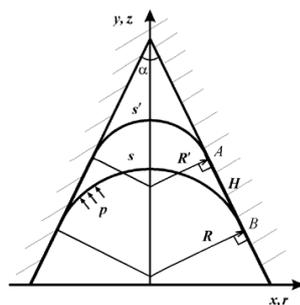


Рис. 3: Схема формовки листовой заготовки в формообразующую матрицу. В случае конической (клиновой) матрицы используют цилиндрическую (декартову) системы координат.

### Формовка листовой заготовки в протяженную матрицу (плоская деформация)

Оценим оптимальный угол  $\alpha$  между образующими плоскостями протяженной матрицы при сверхпластической формовке (рис. 3). Рассмотрим конфигурацию заготовки в моменты времени  $T$  и  $T'$  ( $T < T'$ ). Считаем, что в момент времени  $T$  заготовка имеет форму сегмента цилиндра радиусом  $R$  и толщиной  $s$ . В момент времени  $T'$  часть материала оказывается в контакте с матрицей (отрезок  $AB$ ) и приобретает форму пластин шириной  $H$  и средней толщиной  $(s + s')/2$ , гладко сопряженных с цилиндрическим сегментом радиусом  $R'$  и толщиной  $s'$ . Заметим, что  $R'$  и  $s'$  зависят от  $\alpha$ ,  $R$  и  $s$ , и их можно найти из условия сохранения объема материала

$$\frac{V}{V'} = \frac{sR(\pi - \alpha) \operatorname{tg}(\alpha/2)}{s'R'(\pi - \alpha) \operatorname{tg}(\alpha/2) + (R - R')(s + s')} = 1, \quad (1)$$

где  $V$  и  $V'$  – объем материала заготовки в моменты времени  $T$  и  $T'$  соответственно.

Согласно безмоментной теории оболочек меридиональное разрывное усилие в цилиндрическом сегменте заготовки в момент времени  $T$  определяется как  $\sigma = \frac{Rp}{s}$ , а в момент времени  $T'$  величина усилия составляет  $\sigma' = \frac{R'p}{s'}$ , где  $p$  – давление газа. Приравнивая эти значения, получим условие постоянства напряжений в процессе деформации при постоянном давлении

$$\frac{R}{s} = \frac{R'}{s'}. \quad (2)$$

Выразив  $s'$  из уравнения (1), подставим его в уравнение (2). После элементарных преобразований получим уравнение для оптимального угла  $\alpha$ :

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{(\pi - \alpha)}. \quad (3)$$

Корень этого уравнения  $\alpha = 46^\circ$  является значением оптимального угла между образующими плоскостями протяженной матрицы, при котором напряжения в цилиндрическом сегменте заготовки будут постоянными в процессе формовки с постоянным давлением.

**Формовка листовой заготовки в коническую матрицу (осесимметричная деформация)**

Оценим оптимальный угол  $\alpha$  конической матрицы. Аналогично первому случаю, рассмотрим конфигурацию заготовки в моменты времени  $T$  и  $T'$  ( $T < T'$ ). Считаем, что в момент времени  $T$  заготовка имеет форму сегмента сферы радиусом  $R$  и толщиной  $s$  (см. рис. 1(с)). В момент времени  $T'$  часть материала оказывается в контакте с матрицей (отрезок  $AB$ ) и приобретает форму усеченного конуса средней толщиной  $(s + s')/2$ , гладко сопряженного со сферическим сегментом радиусом  $R'$  и толщиной  $s'$ . Условие равенства объема материала в рассматриваемые моменты времени имеет вид:

$$\frac{V}{V'} = \frac{4\pi R^2 S (1 - \sin(\alpha/2)) \operatorname{tg}(\alpha/2)}{4\pi R'^2 S' (1 - \sin(\alpha/2)) \operatorname{tg}(\alpha/2) + \pi (S + S') (R - R') \cos(\alpha/2)(R + R')} = 1. \quad (4)$$

Согласно безмоментной теории оболочек меридиональное разрывное усилие в сферическом сегменте заготовки в момент времени  $T$  равняется  $\sigma = \frac{Rp}{2s}$ , а в момент времени  $T'$  достигает значения  $\sigma' = \frac{R'p}{2s'}$ . Условие постоянства напряжений и в этом случае сводится к выражению (2). Получив выражение для  $s'$  из (4), подставим его в уравнение (2). Положив  $R' = R - \varepsilon$ , где  $\varepsilon \ll 1$ , после линеаризации по малому параметру  $\varepsilon$  получим уравнение для оптимального угла  $\alpha$ :

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2}. \quad (5)$$

Корень этого уравнения  $\alpha = 60^\circ$  дает значение оптимального угла раствора конической матрицы, при котором напряжения в куполе остаются постоянными в процессе формовки при постоянном давлении.

**Трение между матрицей и листовой заготовкой.**

Известно, что снижение поверхностного трения между деформируемым листом и поверхностью матрицы позволяет улучшить распределение толщины в отформованной части заготовки [14]. В процессе СПФ в протяженную и коническую матрицы лист металла частично контактирует с матрицей. Следовательно, эти эксперименты могут быть использованы как для подгонки материальных констант, так и для определения констант модели трения. Параметры, соответствующие наилучшему приближению к экспериментальным данным, рекомендуются для использования в компьютерном моделировании СПФ с использованием коммерческих программных продуктов.

Чтобы описать действие контактного трения при формовке коническую матрицу, проводилось моделирование СПФ в матрицу с углом  $\alpha=58^\circ$  для диапазона значений коэффициента трения [15]. По результатам моделирования рассчитывалась толщина отформованной заготовки  $s$  по формуле  $s = \sqrt{(r_2 - r_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$ , где  $(r_1, z_1)$  и  $(r_2, z_2)$  - координаты точек внешней и внутренней поверхностей образца, лежащих на нормали к срединной поверхности, а  $r = (r_1 + r_2)/2$  - радиус (рис.4). Было выявлено, что коэффициент трения заметно влияет на наклон линейного участка кривых  $s(r)$  (толщина заготовки как функция радиальной координаты). Действительным значением коэффициента трения принимался тот, при котором тангенс угла наклона  $\varphi$  линейного участка кривой  $s(r)$ , построенный по результатам моделирования для различных значений коэффициентов трения (сплошная линия  $\text{tg}\varphi_{mod}$  на рис. 5), совпадал с  $\text{tg}\varphi$ , полученным из экспериментов (пунктирная линия  $\text{tg}\varphi_{exp}$  на рис. 5).

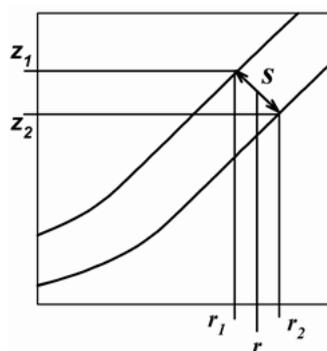


Рис. 4: Схема измерения толщины образца  $s$ .

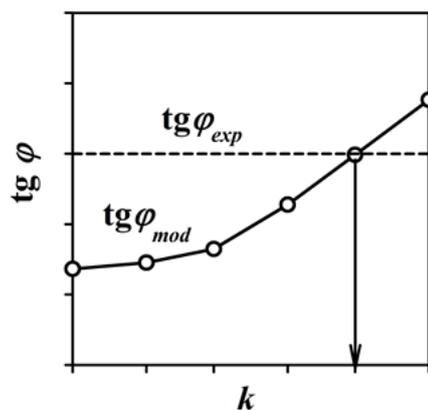


Рис. 5: Зависимость тангенса угла наклона  $\varphi$  линейного участка кривой  $s(r)$  от коэффициента трения  $k$ , представленного в логарифмической шкале.

В случае клиновой матрицы для оценки коэффициента трения  $k$  было проведено моделирование СПФ в матрицы с углами  $\alpha = 35^\circ$  и  $\alpha = 45^\circ$  для

диапазона значений коэффициента трения. Действительным значением коэффициента трения считался тот, при котором происходило совпадение положения полюса и формы куполов, полученных при расчете и из эксперимента.

### 3. Моделирование СПФ трехслойных полых конструкций.

При разработке современных авиадвигателей нового поколения особый интерес представляют трехслойные полые конструкции, состоящие из обшивок и образующего ребра жесткости гофрированного заполнителя, изготавливаемые из двухфазных титановых сплавов по технологии, сочетающей сверхпластическую формовку (СПФ) и сварку давлением (СД) [16-19] (рис. 6). Применение таких конструкций позволяет снизить вес летательного аппарата, что делает актуальным совершенствование технологии их изготовления [20].

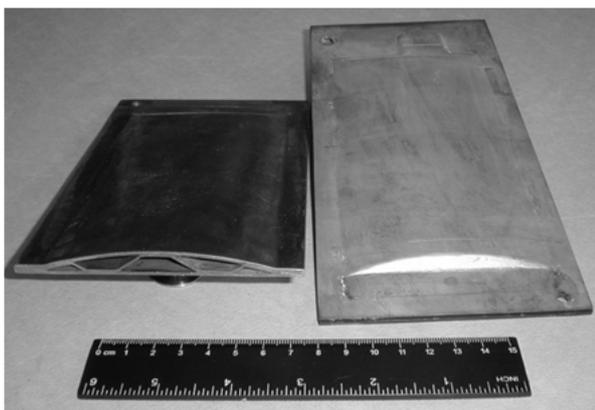


Рис. 6: Трехслойная конструкция.

Технология получения трехслойных полых конструкций методом СПФ/СД включает в себя подготовку пакета из трех листовых заготовок, где верхняя и нижняя заготовки играют роль обшивок, а средняя – заполнителя. На обшивки наносят рисунок противосварочного покрытия и проводят сварку пакета давлением. Пакет после сварки помещают в формообразующую матрицу и подачей инертного газа в полость пакета производят формовку изделия в условиях сверхпластичности. При этом лист заполнителя образует ребра жесткости, а обшивки принимают форму полости матрицы. В процессе формовки трехслойных полых конструкций необходимо обеспечивать оптимальные температурно-скоростные условия деформации листовой заготовки заполнителя для того, чтобы избежать его разрыва и уменьшить разнотолщинность ребер жесткости.

При совершенствовании технологии процесса СПФ трехслойных полых конструкций важнейшим моментом является определение технологических

ограничений на такие геометрические параметры конструкции, как угол наклона ребер жесткости и отношение толщин обшивок и заполнителя. Определение рациональных геометрических параметров направлено на обеспечение формообразования изделий без складок на обшивках и на уменьшение разнотолщинности ребер жесткости. Решение этой задачи многовариантно и основывается, как правило, на производственном опыте. Существенную помощь при этом может оказать компьютерное моделирование [20-21].

Компьютерное моделирование выполнялось на базе универсального комплекса ANSYS10.0 (ED). При моделировании использовалось ОС Пежины. Параметры ОС определялись по результатам СПФ листовых заготовок из титанового сплава ВТ6 в протяженную клиновую матрицу при температуре 900°C [12-13]. Выбор данного эксперимента для определения параметров обусловлен тем, что напряженно-деформированное состояние при СПФ трехслойной конструкции, и при СПФ листовой заготовки в протяженную клиновую матрицу, близко к плоской деформации.

Моделирование СПФ трехслойной полый конструкции проводилось в двумерной постановке (плоская деформация) [22-24]. Конечно-элементная модель исходного пакета, состоящего из трех листовых заготовок, представлена рис. 7, а. Пакет помещался в абсолютно жесткую матрицу. СПФ конструкции осуществлялась путем подачи давления инертного газа в полость пакета, в результате чего конструкция принимала форму матрицы, а из листа заполнителя формировались ребра жесткости, как показано на рис. 7, б. Ввиду симметрии пакета при моделировании рассматривалась половина всей конструкции. Расчетная область разбивалась на восьмиузловые изопараметрические конечные элементы «PLANE183» с квадратичной аппроксимацией поля перемещений. Формообразующий инструмент определялся элементом «TARGE169». Граничные условия на поверхности раздела формообразующего инструмента и деформируемого пакета задавались контактными элементами «CONTA172». Давление газа при формовке увеличивалось по линейному закону.

Результаты экспериментов показывают, что при СПФ трехслойных конструкций для малых значений отношений толщины обшивки к толщине заполнителя возникает опасность образования складок на обшивках. В этой связи появляется задача определения минимально возможной величины  $s_0/s_3$ , (где  $s_0$  и  $s_3$  это исходные толщины обшивки и заполнителя, соответственно), обеспечивающей СПФ без образования складок. С этой целью было проведено моделирование СПФ трехслойных конструкций с толщиной заполнителя  $s_3=0,8$  мм для набора толщин обшивок  $s_0=\{0,5; 0,7; 0,8; 1,2; 1,5\}$  мм, т.е. для  $s_0/s_3=\{0,6; 0,9; 1,0; 1,5; 1,9\}$ . Скорость увеличения давления газа была принята  $dp/dt = 12000$  Па/с.

Расчеты показали, что при малых  $s_0/s_3$  на обшивке возникают области большой кривизной поверхности, что приводит к уменьшению напряжений в данных областях. Напряжения можно грубо оценить как  $\sigma = p/(\rho s)$ , где  $p$  – давление газа,  $s$  – толщина обшивки в зоне с большой кривизной поверхности  $\rho$ . С уменьшением отношения  $s_0/s_3$  существенно возрастает общее время

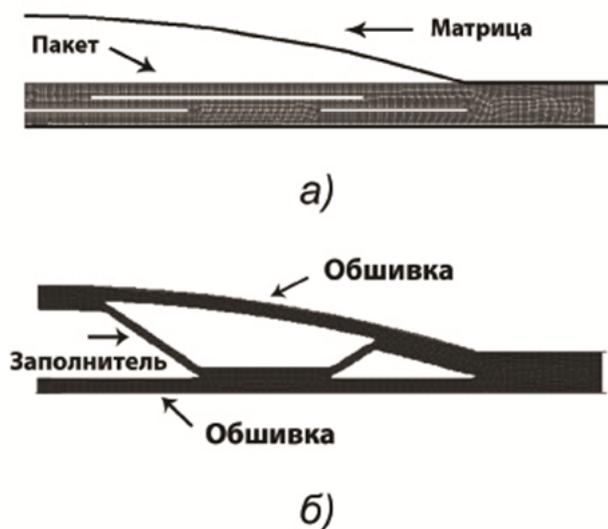


Рис. 7: Конечно-элементная модель а) исходного и б) отформованного пакета.

формовки, которое необходимо для разглаживания областей с большой кривизной. Более того, когда отношение  $s_o/s_3$  становится меньше определенной величины, которую обозначим  $(s_o/s_3)_{\min}$ , кривизна обшивок приводит к образованию складок, которые уже невозможно устранить. Для рассматриваемой геометрии трехслойной полый конструкции с гофрированным заполнителем  $(s_o/s_3)_{\min}=0,9$ . Результаты формовки конструкции с отношением  $s_o/s_3 < 0,9$  представлены на рис. 8.

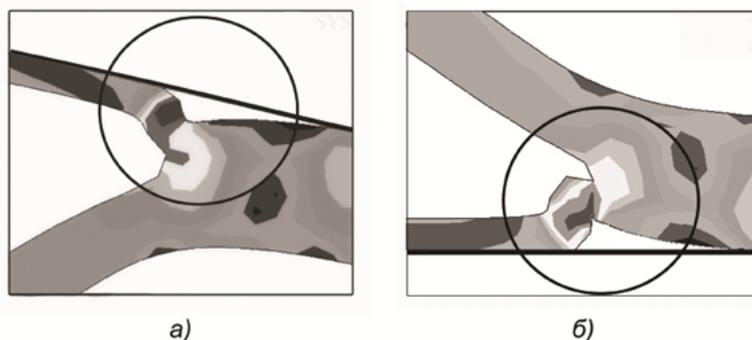


Рис. 8: Результаты моделирования для конструкции с отношением  $s_o/s_3=0,6$ . Образование складок а) на верхней и б) на нижней обшивке.

Важным параметром качества трехслойной полый конструкции с гофрированным заполнителем является однородность толщины ребер жесткости. Разнотолщинность ребер определим как  $(1 - s_{\min}/s_{\max}) \times 100\%$ , где  $s_{\min}$  и  $s_{\max}$  – минимальная и максимальная толщина ребра. Моделирование формовки трехслойной полый конструкции проводилось для набора значений отношения толщин обшивки и заполнителя  $s_o/s_3$  (от 0,6 до 1,9 мм), и угла

наклона ребер жесткости,  $\alpha = \{30^\circ; 40^\circ; 50^\circ\}$ . Скорость увеличения давления газа была принята  $dp/dt$  12000 Па/с.

Приведенные результаты моделирования СПФ трехслойной полый конструкции показывают, что разнотолщинность ребер жесткости возрастает как с увеличением отношения  $s_o/s_3$ , так и с увеличением угла наклона ребра жесткости. При этом угол наклона ребра жесткости влияет на значение  $(s_o/s_3)_{\min}$ .

Увеличение угла наклона ребра приводит к увеличению значения  $(s_o/s_3)_{\min}$ , а именно, с  $(s_o/s_3)_{\min} = 0,75$  для угла  $30^\circ$  до  $(s_o/s_3)_{\min} = 1,1$  для угла  $50^\circ$ .

Разнотолщинность в ребре жесткости с наклоном  $50^\circ$  изменяется от 23% до 39% в зависимости от значения отношения  $s_o/s_3$ . При этом она значительно выше, чем в ребрах с наклоном  $30^\circ$  и  $40^\circ$ , разнотолщинность которых варьируется от 5% до 10%. Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что выбор конкретного сочетания угла наклона ребер жесткости и отношения  $(s_o/s_3)_{\min}$  зависит от допуска на разнотолщинность конкретного изделия.

## 4. Заключение

Проведено компьютерное моделирование процесса СПФ трехслойной конструкции с использованием параметров ОС, найденных по результатам СПФ листовой заготовки в протяженную клиновую матрицу

Установлено, что при значении отношения толщины обшивки  $s_o$  к толщине заполнителя  $s_3$  ниже предельного возникает опасность образования складок на обшивке. Кроме того, при достаточно малых отношениях  $s_o/s_3$ , на обшивке могут образовываться участки с большой кривизной поверхности, что приводит к необходимости значительно увеличивать время формовки для того, чтобы разгладить эти участки;

Разнотолщинность ребер жесткости возрастает как с увеличением угла наклона ребер, так и с увеличением отношения толщин обшивки и заполнителя, при этом, разнотолщинность не превышает 10% для угла наклона ребер не более  $40^\circ$ .

Применение компьютерного моделирования позволяет определить условия образования неустраняемых дефектов в конструкциях еще на стадии разработки, тем самым уменьшив количество брака на стадии производства.

## СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bonet J., Gil A., Wood R.D., Said R., Curtis R.V. Simulating superplastic forming // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2006. Vol. 195. Issue 48-49. P. 6580–6603. doi: 10.1016/j.cma.2005.03.012
2. Pradeep P., Ayyanar S., Balasubramanian M., Ramanathan K. and Senthilkumar V.S. Advanced Finite Element Analysis and Simulation in Superplastic Forming Process of Stepped Semispherical Die // Journal of Applied Sciences. 2012. Vol. 12. Issue 10. P. 1048-1052.

3. Система прочностного анализа Fidesys, [электронный ресурс] URL <http://www.cae-fidesys.com>
4. Левин В.А. Зингерман К.М. Точные и приближенные аналитические решения при конечных деформациях и их наложении. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 393 с.
5. Левин В. А., Калинин В. В., Зингерман К. М., Вершинин А. В. Развитие дефектов при конечных деформациях. Компьютерное и физическое моделирование / Под ред. В. А. Левина. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 392 с.
6. Левин В. А., Морозов Е. М., Матвиенко Ю. Г. Избранные нелинейные задачи механики разрушения / Под ред. В. А. Левина. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 407 с.
7. Akhunova A., Dmitriev S., Kruglov A., Safiullin R., Constitutive relations for superplastic flow modeling from two axial loading experiments // Key Engineering Materials. 2010. Vol. 433. P. 319-323.
8. Левин В.А., Зингерман К.М. О построении эффективных определяющих соотношений для пористых упругих материалов при конечных деформациях и их наложении // Доклады РАН. 2002. Т. 382, № 4. С. 482–487.
9. Simulation designed for designers, [электронный ресурс] URL <https://www.sim4design.com/en/index>
10. Lederich R.J., Sastry S.M.L., Hayase M., Mackay T.L. Superplastic formability testing // Journal of Metals. 1982. Vol. 34. Issue 8. P. 16-20.
11. Ghosh A.K., Hamilton C.H. On constant membrane stress test for superplastic metals // Metallurgical Transactions A. 1980. Vol. 11. Issue 11. P. 1915-1918.
12. Ахунова А. Х., Дмитриев С. В. Оптимизация формы матриц для тестовых сверхпластических формовок листовых заготовок // Деформация и разрушение материалов. 2009. № 11. С. 40-44.
13. Ахунова А. Х., Дмитриев С. В., Круглов А. А., Сафиуллин Р. В. Сверхпластическая формовка листовых заготовок в протяженную клиновую матрицу // Деформация и разрушение материалов. 2010. №9. С. 38-41.
14. Панченко Е.В., Алексеев П.А. Влияние контактного трения на формообразование тонкостенных оболочек в режиме сверхпластичности // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 7. С. 37-40.

15. Ахунова А.Х., Дмитриев С.В., Круглов А.А., Сафиуллин Р.В. Методика оценки коэффициента трения при сверхпластической формовке листового материала в конической матрице // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2009. № 6. С. 15-19.
16. Петров Е.Н., Родионов В.В., Кузьмин Э.Н., Лутфуллин Р.Я., Сафиуллин Р.В. Ячеистые конструкции. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2008, 176 с.
17. Сафиуллин Р.В. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций Часть I. Международный опыт // Письма о материалах. 2012. Т. 2(1). С. 32-35.
18. Сафиуллин Р.В. Сверхпластическая формовка и сварка давлением многослойных полых конструкций Часть II. Опыт ИПСМ РАН // Письма о материалах. 2012. Т. 2(1). С. 36-39.
19. Способ изготовления полых вентиляторной лопатки // Патент РФ 2555274, МПК, В21D 53/78. Опубликовано 10.07.2015. Бюл. №19. / Морозов М.А., Трифонов В. Г., Харин С.А., Сафиуллин Р.В., Мулюков Р.Р., Манапов И.У., Иноземцев А.А., Павлович С.П., Артюхов А.В.
20. Темис Ю. М., Худяков А. П. Математическое моделирование операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки изготовления полых лопатки вентилятора // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 3 (69). С. 50–60.
21. Ахунова А.Х., Дмитриев С.В., Круглов А.А., Сафиуллин Р.В. Моделирование процесса сверхпластической формовки полых конструкций с гофрированным наполнителем из титанового сплава ВТ6 // Перспективные материалы. 2011. № 12. С. 42-44
22. Ахунова А.Х., Дмитриев С.В., Круглов А.А., Сафиуллин Р.В. Моделирование процесса сверхпластической формовки трехслойных полых конструкций для определения ограничений на их геометрические параметры // Деформация и разрушение материалов. 2012. №11. С. 38-41.
23. Ахунова А.Х., Пшеничнюк А.И., Дмитриев С.В., Сафиуллин А.Р., Сафиуллин Р.В. Оптимизация параметров сверхпластической формовки полых трехслойных конструкций // Деформация и разрушение материалов. 2013. №7. С. 33-38.
24. Сафиуллин А.Р., Сафиуллин Р.В., Сафин Ф.Ф., Ахунова А.Х., Дмитриев С.В. Оптимизация процесса сверхпластической формовки трехслойных полых конструкций // Перспективные материалы. 2013. № 15. С. 114-118.

## REFERENCES

1. Bonet, J., Gil, A., Wood, R.D., Said, R. & Curtis, R.V. 2006, "Simulating superplastic forming", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 195, issue 48-49, pp. 6580–6603. doi: 10.1016/j.cma.2005.03.012
2. Pradeep, P., Ayyanar, S., Balasubramanian, M., Ramanathan, K. & Senthilkumar, V.S. 2012, "Advanced Finite Element Analysis and Simulation in Superplastic Forming Process of Stepped Semispherical Die", *Journal of Applied Sciences*, vol. 12, issue 10, pp. 1048-1052. doi: 10.3923/jas.2012.1048.1052
3. Strength analysis system Fidesys (2012), Available at: <http://www.caefidesys.com> (Accessed 5 August 2017).
4. Levin, V.A. & Zingerman, K.M. 2016. *Tochnyye i priblizhennyye analiticheskiye resheniya pri konechnykh deformatsiyakh i ikh nalozhenii* [Exact and approximate analytical solutions for finite deformations and their imposition], Fizmatlit, Moscow, Russia.
5. Levin, V. A., Kalinin, V. V., Zingerman, K. M. & Vershinin, A. V. 2007. *Razvitiye defektov pri konechnykh deformatsiyakh. Komp'yuternoye i fizicheskoye modelirovaniye* [Development of defects in finite deformations. Computer and physical modeling], Fizmatlit, Moscow, Russia.
6. Levin, V. A., Morozov, Ye. M. & Matviyenko, Yu. G. 2004. *Izbrannyye nelineynyye zadachi mekhaniki razrusheniya* [Selected nonlinear problems of fracture mechanics], Fizmatlit, Moscow, Russia.
7. Akhunova, A., Dmitriev, S., Kruglov, A. & Safiullin, R. 2010, "Constitutive relations for superplastic flow modeling from two axial loading experiments", *Key Engineering Materials*, vol. 433, pp. 319-323. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.433.319
8. Levin, V.A. & Zingerman, K.M. 2002, "On the construction of effective constitutive relations for porous elastic materials subjected to finite deformations including the case of their superposition", *Doklady RAN*, vol. 382, no. 4, pp. 482–487.
9. Simulation designed for designers (2016), Available at: <https://www.sim4design.com/en/index> (Accessed 5 August 2017).
10. Lederich, R.J., Sastry, S.M.L., Hayase, M. & Mackay, T.L. 1982, "Superplastic formability testing", *Journal of Metals*, vol. 34, issue 8, pp. 16-20. doi: 10.1007/BF03338067

11. Ghosh, A.K. & Hamilton, C.H. 1980, "On constant membrane stress test for superplastic metals", *Metallurgical Transactions A*, vol. 11, issue 11, pp. 1915-1918.
12. Akhunova, A. Kh. & Dmitriev, S. V. 2009, "Optimization of the shape of dies for test superplastic forming of sheet", *Russian metallurgy (Metally)*, no. 11, p. 40-44.
13. Akhunova, A. Kh., Dmitriev, S. V., Kruglov, A. A. & Safiullin, R. V. 2010, "Superplastic forming of sheet into wedge die", *Russian metallurgy (Metally)*, no. 9, pp. 38-41.
14. Panchenko, Ye.V. & Alekseyev, P.A. 2012, "Effect of contact friction on the formation of thin-walled shells in the superplasticity regime", *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, no. 7, pp. 37-40.
15. Akhunova, A.Kh., Dmitriev, S.V., Kruglov, A.A. & Safiullin, R.V. 2009, "Method for estimating the friction coefficient for superplastic forming of sheet into cone die", *Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, no. 6, pp. 15-19.
16. Petrov, Ye.N., Rodionov, V.V., Kuz'min, E.N., Lutfullin, R.YA. & Safiullin, R.V. 2008, *Yacheistyie konstruksii* [Cellular structures], RFYATS-VNIITF, Snezhinsk, Russia.
17. Safiullin, R.V. 2012, "Superplastic forming and pressure welding of multilayer hollow structures Part I. International experience", *Letters on materials*, V. 2, issue 1(5), pp. 32-35.
18. Safiullin, R.V. 2012, "Superplastic forming and pressure welding of multilayer hollow structures Part II. Experience of IMSP RAS", *Letters on materials*, V. 2, issue 1(5), pp. 36-39.
19. Morozov, M.A, Trifonov, V.G., Kharin, S.A., Safiullin, R.V., Mulyukov, R.R., Manapov, I.U., Inozemtsev, A.A., Pavlinich, S.P. & Artyukhov, A.V. Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, UEC-Aviadvigatel (2015), Sposob izgotovleniya poloy ventilyatornoy lopatki [Method of manufactured hollow fan blade], RU, Pat. № 2555274, B21D 53/78.
20. Temis, YU. M. & Khudyakov, A. P. 2015, "Mathematical modeling of isothermal stamping and superplastic forming operations for manufacturing a hollow fan blade", *Vestnik UGATU*, vol. 19, issue 3 (69), pp. 50-60.
21. Akhunova, A.Kh., Dmitriyev, S.V., Kruglov, A.A. & Safiullin, R.V. 2011, "Modeling of the process of superplastic forming of hollow structures with goffred filler produced from titanium alloy Ti-6Al-4V", *Journal of Advanced Materials*, no. 12, pp. 42-44.

22. Akhunova, A.Kh., Dmitriyev, S.V., Kruglov, A.A. & Safiullin, R.V. 2012, "Modeling of the process of superplastic forming of three-layer hollow structures for determining constraints on their geometric parameters", *Russian metallurgy (Metally)*, no. 11, pp. 38-41.
23. Akhunova, A.Kh., Pshenichnyuk, A.I., Dmitriyev, S.V., Safiullin, A.R. & Safiullin, R.V. 2013, "Optimization of parameters of superplastic forming of hollow three-layer structures", *Russian metallurgy (Metally)*, no. 7, pp. 33-38.
24. Safiullin A.R., Safiullin R.V., Safin F.F., Akhunova A.KH. & Dmitriyev S.V. 2013, "Optimization of the process of superplastic forming of three-layer hollow structures", *Journal of advanced materials*, no. 15, pp. 114-118.

ФГБУН Институт проблем сверхпластичности металлов РАН

получено 22.05.2017

принято в печать 14.09.2017