

# Программное средство для расчета технологических и геометрических характеристик процесса сверхпластической формовки

Г.Р. Мурзина, В.Р. Ганиева, Ф.У. Еникеев, О.П. Тулупова

**Аннотация** — Современные технологии обработки металлов, основанные на применении процесса сверхпластичности, позволяют изготавливать детали сложной формы и высокой надежности. Использование метода сверхпластической формовки может вызывать определенные проблемы, такие как разнотолщинность деталей или отклонения от заданной формы, требующие тщательной оценки геометрических параметров получаемых изделий. Данные проблемы влияют на качество изготавливаемых сферических оболочек. Для упрощения процесса оценки характеристик изделий, создание автоматизированной системы становится необходимостью.

В статье показано компьютерное моделирование процесса сверхпластической формовки листовой заготовки из титанового сплава ВТ6 в цилиндрическую матрицу при различном давлении для оценки сферообразности и толщины купола.

Компьютерное моделирование с помощью программного комплекса ANSYS ускоряет процесс создания сферических оболочек, при этом метод конечно-элементного моделирования обеспечивает точность расчетов.

Проведено математическое моделирование для расчета геометрических параметров, зависимостей временных характеристик и характеристик напряженно-деформированного состояния.

Данная работа посвящена автоматизации процесса обработки результатов конечно-элементного моделирования в ANSYS.

Разработанное программное средство «Оценка геометрии купола» помогает обрабатывать отчетные файлы, полученные в ANSYS и анализировать результаты, позволяет проводить дополнительные расчеты и предоставляет возможность строить графические зависимости для более подробного анализа, а также

минимизировать человеческий фактор в расчетах и значительно сократить время на выполнение необходимых операций.

**Ключевые слова** — программное средство, сверхпластическая формовка, сферическая оболочка, ANSYS.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большую популярность набирает процесс обработки металлов давлением в состоянии сверхпластичности (СП). Данный процесс позволяет изготавливать из труднодеформируемых материалов детали разного назначения, формы, геометрических размеров и эксплуатационных характеристик.

С помощью метода сверхпластической формовки (СПФ) под воздействием формообразующего газа на заготовку можно изготовить детали сферической формы. Такие изделия имеют широкое применение в различных отраслях промышленности, поскольку обладают высокой устойчивостью к агрессивным средам.

Для создания сферических оболочек используются компьютерные технологии, а именно, компьютерное моделирование. Данный метод позволяет визуализировать процесс создания оболочек с помощью различных программных комплексов, например, ANSYS. Программный комплекс для осуществления расчетов и решения задач использует метод конечно-элементного моделирования, который позволяет дать как качественную, так и количественную оценку процессов.

Использование метода СПФ обуславливается тем, что он позволяет обеспечивать в изготавливаемых деталях необходимый уровень функциональных и эксплуатационных свойств, в отличие, например, от метода штамповки. Но использование этого метода влечет за собой и некоторые проблемы: возникновение разнотолщинности детали (утонение или утолщение некоторых участков изготавливаемой детали) или отклонения от сферообразности купола детали [1-4]. В связи с этим необходимо проводить оценку геометрических параметров получаемых деталей.

Однако программный комплекс ANSYS не позволяет производить некоторые расчеты, благодаря которым можно оценить требуемые характеристики и произвести

Статья получена 18.09.2024.

Мурзина Г.Р., Уфимский государственный нефтяной технический университет, преподаватель кафедры вычислительной техники и инженерной кибернетики (e-mail: guzelya\_murzina@mail.ru).

Ганиева В.Р., Уфимский государственный нефтяной технический университет, старший преподаватель кафедры вычислительной техники и инженерной кибернетики (e-mail: venega5577@mail.ru).

Еникеев Ф.У., доктор технических наук, Уфимский государственный нефтяной технический университет, профессор кафедры вычислительной техники и инженерной кибернетики (e-mail: kobros@yandex.ru).

Тулупова О.П., кандидат технических наук, Уфимский государственный нефтяной технический университет, доцент кафедры вычислительной техники и инженерной кибернетики (e-mail: box\_mail\_2011@mail.ru).

построения графиков для анализа данных. В результате работы с комплексом возможно получить данные об узлах и их перемещениях, но затруднительно, не используя дополнительных средств, произвести оценку параметров, поскольку количество значений, содержащихся в выходных файлах ANSYS может превышать несколько тысяч. Таким образом, одной из главных проблем является сложность обработки получаемых данных из специализированного программного комплекса ANSYS.

Решением данной проблемы может стать создание автоматизированной системы, которая помимо обработки выходных файлов ANSYS, будет производить расчеты, позволяющие оценивать и анализировать характеристики получаемого изделия, а также строить графики.

Таким образом, разработка автоматизированной системы оценки геометрии куполов по результатам моделирования в среде программного комплекса ANSYS процесса сверхпластической формовки является актуальной задачей. Использование данной системы позволит минимизировать влияние человеческого фактора, который мог бы возникнуть при выполнении расчетов по аналитическим формулам, а также существенно сократит время, затраченное на выполнение необходимых расчетов.

Целью является автоматизация процесса обработки результатов конечно-элементного моделирования, полученных в среде программного комплекса ANSYS.

Для получения полусферы в данной работе используется круглый лист из титанового сплава ВТ6, который под воздействием газа, подающегося по линейному закону, деформируется в цилиндрическую матрицу.

Для получения изделий с требуемыми характеристиками необходимо производить анализ полученной формы изделия. Для этого стоит проводить оценку таких параметров как толщина купола и отклонение от сферообразности.

Первый параметр отвечает за наличие разнотолщинности, которая в свою очередь является одним из главных недостатков метода СПФ. При изготовлении изделий к ним выдвигают различные требования, в том числе прочностные, механические и эксплуатационные, а наличие неравномерной толщины стенки снижает их. Возникновение разнотолщинности обуславливается тем, что при деформации листовой заготовки в матрицу материал деформируется не одновременно, а по участкам. Когда участок материала достиг стенки матрицы, он не деформируется дальше, а достижение нужной формы происходит за счет деформирования других участков. Вследствие чего, те участки, которые достигают поверхности матрицы последними, имеют максимальное утонение. К такому участку относится купол полусферы. Поэтому необходимо отслеживать наличие разнотолщинности и не допускать отклонения от выдвинутых требований к изготавливаемой детали.

Вторым параметром является отклонение от сферообразности, который также необходимо

оценивать, поскольку при деформации может возникнуть существенное отклонение, и полученная деталь будет иметь совершенно другую форму, отличную от полусферы или сферы. При проведении моделирования выдвигается гипотеза о допустимом проценте отклонения. В рамках данной работы принято, что допустимый процент отклонения от сферообразности не может превышать 5 %.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Основными характеристиками, которые требуется оценивать при моделировании, являются распределение толщины и радиуса по профилю купола, также необходимо анализировать зависимости временных характеристик и характеристик напряженно-деформированного состояния.

Для рассмотрения способов оценки геометрических характеристик аналитическим методом, следует ввести примерную модель отформованного купола (рис. 1).

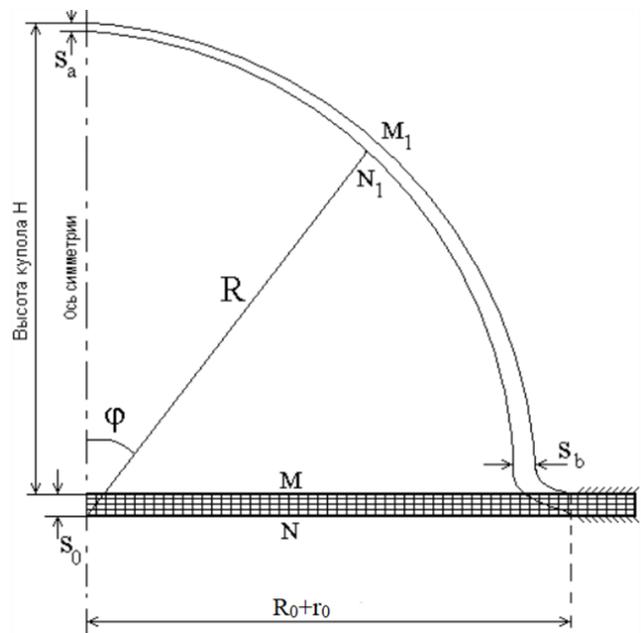


Рисунок 1 – Модель отформованного купола

При моделировании, выдвигалась гипотеза, в которой говорилось, что отклонение от сферообразности не должно превышать 5 %. Отсюда следует, что выполнение гипотезы о сферообразности достигается при выполнении условия:

$$R(\varphi) = R_0 + r_0 = const.$$

И в таком случае предполагается, что форма купола близка к геометрии сферического сегмента и в момент окончания формовки образуется полусфера.

Оценка данного утверждения происходит путем аналитических расчетов. Для этого выделим два произвольных узла M и N (рис. 1), которые в начале моделирования имеют одинаковые координаты по оси абсцисс. В конечный момент времени моделирования, узлы изменяют свое положение и будут находиться на

месте  $M_1$  и  $N_1$ , соответственно. Таким образом, радиусом отформованной оболочки будет являться расстояние от начала координат до середины отрезка  $M_1N_1$ . Середину отрезка обозначим точкой D.

$$x_D = \frac{x_{M1} + x_{N1}}{2}; y_D = \frac{y_{M1} + y_{N1}}{2};$$

2) используя координаты точки D вычисляем радиус оболочки:

$$R = (x_D^2 + y_D^2)^{\frac{1}{2}};$$

3) по формулам вычисляется значение угла между осью симметрии и рассчитанным радиусом:

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{x_{M1}}{y_{M1}}\right); \varphi_2 = \arctg\left(\frac{x_{N1}}{y_{N1}}\right); \varphi_3 = \arctg\left(\frac{x_D}{y_D}\right).$$

Для оценки распределения толщины по профилю купола, в рамках геометрической модели, используется выражение

$$s(\varphi, \alpha) = s_0 \cdot \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^2 \cdot \frac{\varphi}{\sin \varphi}$$

где  $\varphi$  – точка купола;

$\alpha$  – его текущая конфигурация.

Тогда толщина в полюсе купола для полусферы рассчитывается формулой

$$s_a = \frac{4s_0}{\pi^2}$$

А толщина полусферы вблизи зоны закрепления определяется формулой

$$s_b = \frac{2s_0}{\pi}$$

Следовательно, распределение толщины по профилю полусферы вычисляется с помощью следующего выражения:

$$s = \frac{4s_0}{\pi^2} \cdot \frac{\varphi}{\sin \varphi}$$

Далее следует определить расчетные формулы для определения зависимостей высоты и толщины купола от времени, а также зависимости напряженно-деформированного состояния.

Исходя из схемы, представленной на рис. 1 высота купола равна

$$H(t) = R - R \cos \varphi + r_0 - r_0 \cos \varphi = (R + r_0) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

где учитывается соотношение

$$R_0 + r_0 = (R_0 + r_0) \sin \varphi \quad (1)$$

Расчет временной зависимости происходит на основании следующего соотношения:

$$t \cdot \left[ \frac{p_0 \cdot (R_0 + r_0)}{2Ks_0} \right]^2 = 2I'_m(\varphi)$$

где  $I'_m(\varphi)$  – определенный интеграл, вычисляющийся по формуле

$$I'_m(\varphi) = \int_0^\varphi \left[ \frac{\sin^3 x}{x^2} / \left( \frac{1 - r_0 \sin x}{R_0 + r_0} \right) \right]^n \cdot \left( \frac{1}{x} - \operatorname{ctg} x \right) dx$$

Поскольку предполагается, что каждый меридиан оболочки равномерно растянут в каждой своей точке, то это растяжение определяется следующим образом:

$$\frac{(R_0 + r_0)\varphi}{(R_0 + r_0)}$$

Тогда текущая толщина листа в полюсе купола, исходя из (1), определяется формулой

$$s_a = s_0 \cdot \left[ \frac{(R_0 + r_0)\varphi}{(R_0 + r_0)} \right]^2 = s_0 \cdot \left( \frac{\sin \varphi}{\varphi} \right)^2$$

В зоне деформации отмечается наличие напряженного состояния, которое описывается меридиональным, тангенциальным и нормальным напряжениями. Для выражения напряженного состояния в полюсе купола необходимо выделить всего две компоненты: меридиональную и тангенциальную, поскольку в полюсе купола наблюдается плосконапряженное состояние, которое достигается при равенстве этих компонент. На основании этого интенсивность напряжения в полюсе купола описывается выражением

$$\sigma_e = \frac{pR}{2s_a} \quad (2)$$

Тогда, используя (1), интенсивность напряжения, описанная (2), примет вид:

$$\sigma_e = p \left( \frac{R_0 + r_0}{2s_0} \right) \cdot \left( 1 - \frac{r_0 \sin \varphi}{R_0 + r_0} \right) \cdot \frac{\varphi^2}{\sin^3 \varphi}$$

А первая главная деформация ползучести определяется выражением

$$\varepsilon_{cr1} = \ln \left[ \frac{(R_0 + r_0)\varphi}{(R_0 + r_0) \sin \varphi} \right] = \ln \left( \frac{\varphi}{\sin \varphi} \right)$$

В рамках решения задачи механики сверхпластичности используются специализированные программные комплексы, которые позволяют производить моделирование процесса обработки металлов давлением с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Задача поставлена в терминах теории ползучести. Для реализации моделирования, в данном случае, как говорилось ранее, был выбран программный комплекс ANSYS.

### III. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Компьютерное моделирование производилось на основании исходных данных (таблица 1), взятых из статьи [5], в которой были получены экспериментальные данные по формовке полусфер при постоянном давлении. Температура 900 °С. Давление газа 1 МПа и 0,5 МПа.

Таблица 1 – Исходные данные

Параметр	Значение, мм
Исходная толщина листа, $s_0$	1
Радиус цилиндрической матрицы, $R_0$	35
Входной радиус цилиндрической матрицы, $r_0$	1

Постоянные СП, которые использовались при моделировании, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Постоянные сверхпластичности

Параметр	Значение
K	$410 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}^m$
m	0,43
C	$9,338 \cdot 10^{-21} \text{ Па}^{-n} \cdot \text{с}^{-1}$
n	2,32558

Для решения задачи необходимо ввести упругие свойства, а именно: модуль Юнга и коэффициент Пуассона, которые равны, соответственно,  $1 \cdot 10^{10}$  Па и 0,41.

Поскольку моделирование производилось несколько раз при воздействии инертного газа различной величины, то и результаты приведены для двух случаев (рис. 2, 3).

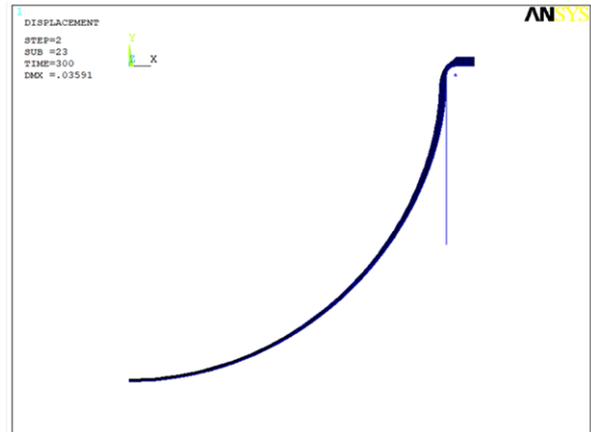


Рисунок 2 – Результат моделирования для давления в 1 МПа

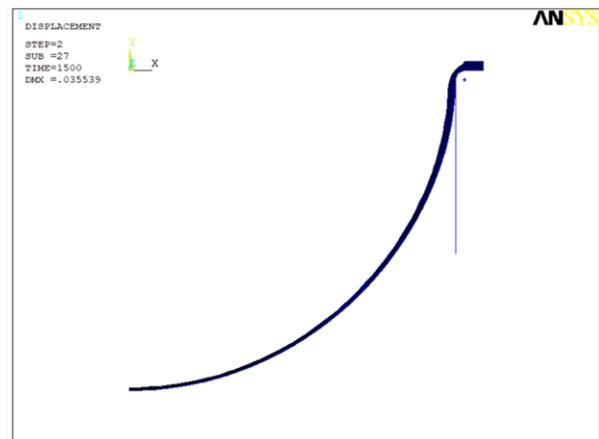


Рисунок 3 – Результат моделирования для давления в 0,5 МПа

Из полученных графиков (рис. 2, 3) видно, что максимальное смещение при воздействии давления в 1 МПа равно 35,91 мм, а при давлении в 0,5 МПа – 35,54 мм. Данные значения примерно равны радиусу деформируемой зоны, которая равна 36 мм.

### IV. РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА

Программное средство (ПС) «Оценка геометрии купола» разрабатывалось для упрощения процесса обработки результатов конечно-элементного моделирования, полученных в среде программного комплекса ANSYS. Для осуществления упрощения расчетов и уменьшения временных затрат на качественную оценку геометрических характеристик были реализованы следующие функции:

- обработка текстовых файлов (удаление текстовой информации и лишних пробелов, отделение друг от друга числовых значений);
- объединение файлов для приведения их к нужному виду;
- выбор текстовых файлов для расчетов;
- ввод данных, необходимых для расчетов;
- расчет радиуса и толщины купола полусферы;
- расчет временных характеристик и характеристик напряженно-деформированного состояния;
- сохранение полученных расчетов;

- построение графических зависимостей по рассчитанным значениям из таблиц или текстовых файлов.

В интегрированной среде разработки Microsoft Visual Studio разрабатывалась программно-аппаратная часть, позволяющая автоматизировать расчеты. Для написания был выбран язык программирования C#. Для реализации пользовательского интерфейс используется Windows Forms. Для реализации функционального модуля, отвечающего за построение графиков выбрана открытая программная библиотека для рисования на плоскости ZedGraph.

Для расчета распределения радиуса и толщины по профилю купола реализованы функции, выполняющиеся на вкладке «Радиус и толщина» (рис. 4). Для осуществления расчетов сначала необходимо заполнить три текстовых поля: радиус матрицы, исходная толщина листа и входной радиус.

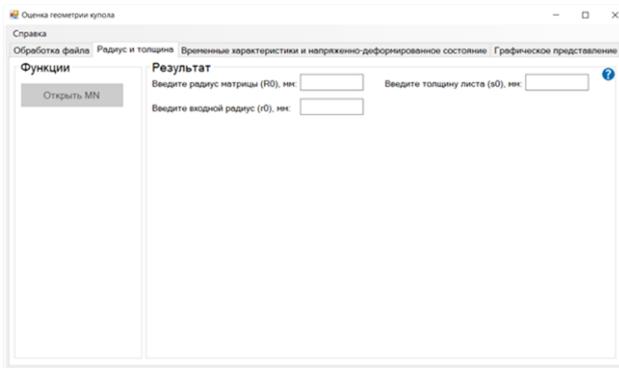


Рисунок 4 – Стартовый вид вкладки «Радиус и толщина»

Результаты расчетов отображаются в таблице (рис. 5).

№	R, мм	s, мм	U, мм	U <sub>0</sub> , мм	U <sub>1</sub> , мм	U <sub>2</sub> , мм	U <sub>3</sub> , мм	U <sub>4</sub> , мм	U <sub>5</sub> , мм	U <sub>6</sub> , мм	U <sub>7</sub> , мм	U <sub>8</sub> , мм	U <sub>9</sub> , мм	U <sub>10</sub> , мм	U <sub>11</sub> , мм	U <sub>12</sub> , мм	U <sub>13</sub> , мм	U <sub>14</sub> , мм	U <sub>15</sub> , мм	U <sub>16</sub> , мм	U <sub>17</sub> , мм	U <sub>18</sub> , мм	U <sub>19</sub> , мм	U <sub>20</sub> , мм	U <sub>21</sub> , мм	U <sub>22</sub> , мм	U <sub>23</sub> , мм	U <sub>24</sub> , мм		
1	1.0000E-000	1.4915E-002	0.0000E+000	1.5217E-002	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Рисунок 5 – Результат работы на вкладке «Радиус и толщина»

Расчет временных характеристик и характеристик напряженно-деформированного состояния выполняется на соответствующей вкладке (рис. 6). Для осуществления расчетов необходимо ввести исходные данные, которые использовались при моделировании в программном комплексе ANSYS. К таким данным относятся: радиус матрицы, толщина листа, входной радиус, давление газа, параметр K и параметр скоростной чувствительности.

t, c	σ <sub>1</sub> , МПа	σ <sub>2</sub> , МПа	σ <sub>3</sub> , МПа	ε <sub>1</sub>	ε <sub>2</sub>	ε <sub>3</sub>
0.0000E+000	1.1700E-000	1.0000E-000	2.7010E-000	1.1934E-010	0.0000E+000	0.0000E+000

Рисунок 6 – Результат работы на вкладке «Временные характеристики и напряженно-деформированное состояние»

Для осуществления анализа результатов, полученных на вкладках «Радиус и толщина» и «Временные характеристики и напряженно-деформированное состояние», создана вкладка «Графическое представление» (рис. 7). Она предназначена для построения графиков и графических зависимостей по значениям, полученным в ходе расчетов.

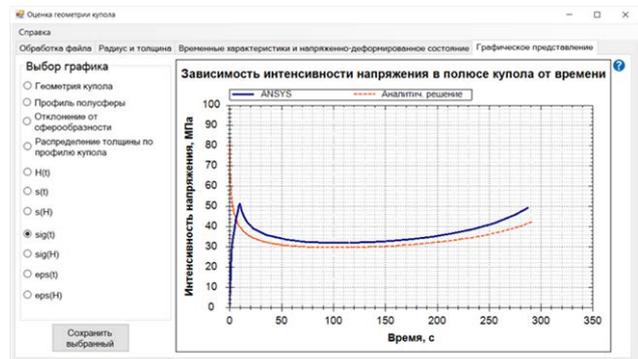


Рисунок 7 – Результат работы на вкладке «Графическое представление»

Как описывалось ранее, при моделировании выдвигалась гипотеза, что если отклонение от сферообразности не превышает 5 %, то отформованная оболочка близка к геометрии сферического сегмента.

На основании построенных графиков (рис. 8) можно сделать вывод, что данная гипотеза выполняется для обоих случаев, поскольку из графика для давления в 1 МПа, видно, что отклонение не превышает 3,8 %, а для давления 0,5 МПа – не превышает 4,2 %.

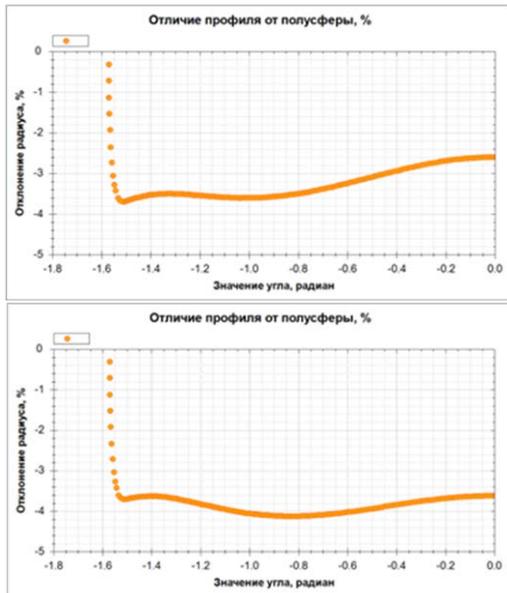


Рисунок 8 – График отличия профиля от полусферы для давлений 1 и 0,5 МПа

Разработанное ПС «Оценка геометрии купола» позволяет производить обработку отчетных файлов, полученных в программном комплексе ANSYS, и с их помощью рассчитывать геометрические характеристики купола полусферы, а также на основании полученных расчетов строить графические зависимости. Также позволяет значительно быстрее осуществлять выполнение анализа полученных данных, за счет того, что произведена автоматизация всех задач, которые требовалось решать при выполнении расчетов. Эффективность подтверждается тем, что суммарное время на выполнение задач сокращено примерно в 18 раз.

Также стоит отметить, что выполнение расчетов в разработанном ПС происходит с удовлетворительной точностью, это подтверждается оценкой результатов, полученных в ANSYS и в ходе аналитических расчетов.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описано ПС, которое позволяет значительно быстрее осуществлять выполнение анализа полученных данных, за счет того, что произведена автоматизация всех задач, которые требовалось решать при выполнении расчетов. Эффективность ПС «Оценка геометрии купола» подтверждается тем, что суммарное время на выполнение задач сокращено примерно в восемнадцать раз.

Программное средство было внесено в государственный Реестр программ для ЭВМ (№2021660408) [6].

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] A. Dutta, "Thickness-profiling of initial blank for superplastic forming of uniformly thick domes," *Materials Science and Engineering A.*, 2004, pp. 79–81.
- [2] М.Н. Кирьянова, Е.В. Панченко, "Уменьшение разнотолщинности стенки при сверхпластической формовке крупногабаритных полусферических оболочек," *КШП. ОМД.* – 2016. № 1. С. 13–15.
- [3] M.A. Khaleel, K.I. Johnson, M.J. Smith, "On the Thinning Profiles in Superplastic Forming of a Modified 5083 Aluminum Alloy," *Mater. Sci. Forum.*, vol. 243–245, pp. 739–744.

- [4] G.R. Murzina, V.R. Ganieva, A.A. Kruglov, F.U. Enikeev, "Modeling of the process of superplastic forming of hemispherical shells from blanks of different profiles," *Lett. Mater.*, 2021, 11(4s), pp. 548-552.
- [5] F.U. Enikeev, A.A. Kruglov, "An analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm," *International Journal of Mechanical Sciences*, 1995, vol. 37, № 5, pp. 473-483.
- [6] О.О. Лучинина, Г.Р. Мурзина, В.Р. Ганиева, Ф.У. Еникеев, Программа для автоматизированной оценки геометрических характеристик купола // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №20216663554 от 18.08.2021 г.

# Software for calculating technological and geometric characteristics of the superplastic forming process

G.R. Murzina, V.R. Gaanieva, F.U. Enikeev, O.P. Tulupova

**Abstract** — Modern metalworking technologies based on the application of the superplasticity process allow manufacturing parts of complex shape and high reliability. The use of the superplastic forming method can cause certain problems, such as uneven thickness of parts or deviations from the specified shape, requiring careful evaluation of the geometric parameters of the resulting products. These problems affect the quality of the manufactured spherical shells. To simplify the process of evaluating the characteristics of products, the creation of an automated system becomes necessary.

The article shows computer modeling of the process of superplastic forming of a sheet blank made of titanium alloy VT6 into a cylindrical matrix at different pressures to evaluate the sphericity and thickness of the dome.

Computer modeling using the ANSYS software package accelerates the process of creating spherical shells, while the finite element modeling method ensures the accuracy of calculations.

Mathematical modeling was carried out to calculate the geometric parameters, dependencies of time characteristics and characteristics of the stress-strain state.

This work is devoted to the automation of the process of processing the results of finite element modeling in ANSYS. The developed software tool "Dome Geometry Assessment" helps to process report files obtained in ANSYS and analyze the results, allows for additional calculations and provides the

ability to build graphical dependencies for more detailed analysis, as well as minimize the human factor in calculations and significantly reduce the time for performing the necessary operations.

**Ключевые слова** — software, superplastic forming, spherical shell, ANSYS.

- [1] A. Dutta, "Thickness-profiling of initial blank for superplastic forming of uniformly thick domes," *Materials Science and Engineering A.*, 2004, pp. 79–81.
- [2] M.N. Kiryanova, E.V. Panchenko, "Forging and Stamping Production," *Material Working by Pressure*, 2016, 1, pp. 13–15.
- [3] M.A. Khaleel, K.I. Johnson, M.J. Smith, "On the Thinning Profiles in Superplastic Forming of a Modified 5083 Aluminum Alloy," *Mater. Sci. Forum.*, vol. 243–245, pp. 739–744.
- [4] G.R. Murzina, V.R. Ganieva, A.A. Kruglov, F.U. Enikeev, "Modeling of the process of superplastic forming of hemispherical shells from blanks of different profiles," *Lett. Mater.*, 2021, 11(4s), pp. 548-552.
- [5] F.U. Enikeev, A.A. Kruglov, "An analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm," *International Journal of Mechanical Sciences*, 1995, vol. 37, № 5, pp. 473-483.
- [6] O.O. Luchinina, G.R. Murzina, V.R. Ganieva, F.U. Enikeev Г.П., Software for automated evaluation of geometric characteristics of a dome . RF certificate of state registration of a computer program, no. 20216663554, 2021.