

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

*На правах рукописи*

Захарьев Иван Юрьевич

**Идентификация параметров деформационного поведения материалов  
для задач проектирования технологических процессов  
сверхпластической формовки**

**РЕЗЮМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Аксенов Сергей Алексеевич

Москва - 2022

## Постановка проблемы

Сверхпластическая формовка (СПФ) является перспективным технологическим процессом формообразования тонкостенных изделий для применения в авиакосмической и автомобильной отраслях. Он заключается в деформировании листовой заготовки при повышенных температурах посредством давления инертного газа. Одним из ключевых элементов проектирования технологических процессов СПФ является расчет режима давления, который должен обеспечивать достижение заданного значения максимальной скорости деформации в объеме образца.

Для расчета режимов давления используются системы компьютерного инжиниринга (Computer-Aided Engineering, CAE-систем), которые позволяют осуществлять технологическое проектирование с использованием компьютерных моделей, основанных на методах механики сплошной среды и современных вычислительных алгоритмах. Для построения модели СПФ помимо начальных и граничных условий процесса необходимо описать механические свойства деформируемого материала, которые характеризуются уравнением состояния, связывающим напряжение течения со скоростью и степенью деформации при заданной температуре. Константы, входящие в уравнения состояния, называемые также параметрами материала, как правило определяются эмпирически.

Степень достоверности параметров материала напрямую влияет на точность расчетов технологических режимов СПФ, что приводит к необходимости разработки приемлемых с практической точки зрения методик их идентификации. В ряде известных работ построение уравнений состояния, описывающих деформационное поведение материала, указывается в качестве важной проблемы исследований сверхпластичности<sup>1,2</sup>.

Классическим уравнением состояния, используемым при проектировании процессов СПФ, является степенное соотношение, известное как уравнение Бэкофена<sup>3</sup>:

$$\sigma_e = K \dot{\epsilon}_e^m, \quad (1)$$

где:  $\sigma_e$  – интенсивность напряжения течения,  $\dot{\epsilon}_e$  – интенсивность скорости деформации,  $K$  и  $m$  – константы материала. Данное уравнение описывает поведение сверхпластичного материала в узком диапазоне скоростей деформации. В работе О.М. Смирнова предложена реологическая модель поведения сверхпластичного материала в широком диапазоне скоростей деформации<sup>4</sup>:

$$\sigma_e = \sigma_s \frac{\sigma_0 + k_v \dot{\epsilon}_e^{mv}}{\sigma_s + k_v \dot{\epsilon}_e^{mv}}, \quad (2)$$

<sup>1</sup> Сверхпластическая формовка конструкционных сплавов, под ред. Н.Пейтона и К.Гамильтона, Металлургия, 1985, стр.122-123.

<sup>2</sup> Васин Р.А., Еникеев Ф.У. Введение в механику сверхпластичности. Часть 1. Уфа, 1998, стр.44-45

<sup>3</sup> Backofen W.A., Turner I.R., Avery D.H. Superplasticity in an Al-Zn Alloy // ASM Trans. Q. 1964. V.57. P. 980-990.

<sup>4</sup> Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности / О.М.Смирнов // – М.: Машиностроение. 1979. – 184 с.

где  $\sigma_0$ - пороговое напряжение, соответствующее малым скоростям деформации,  $\sigma_s$ - предел текучести при больших скоростях деформации,  $k_v, m_v$  – параметры материала.

Параметры материала подбираются таким образом, чтобы соответствовать проектируемому процессу. Их значения зависят от химического состава сплава, его исходного микроструктурного состояния, температуры формовки и скоростного диапазона деформирования. Особую роль играет коэффициент скоростной чувствительности  $m$ , значение которого влияет на устойчивость течения материала и равномерность утонения листа.

Более сложные уравнения состояния могут учитывать влияние интенсивности деформации, температуры, размеры максимального и среднего зерна и иметь более широкий набор параметров по сравнению с уравнением Бэкофена.

В основе построения уравнений состояния и идентификации параметров материала лежат механические испытания, в ходе которых воспроизводятся условия воздействия на материал, характерные для конкретного проектируемого технологического процесса: температура, ориентация главных осей деформации, способ и длительность нагружения, изменение скорости нагружения и т.п. Многообразие условий обработки материала может потребовать проведения большого числа испытаний.

При проектировании СПФ в основном используются испытания на одноосное растяжение плоских образцов. Однако, этот стандартный подход имеет ряд недостатков, связанных с неравномерностью деформации образцов, которая приводит к ошибкам в определении деформационного поведения. Кроме того, напряженное состояние, которое реализуется в таких испытаниях, отвечает одноосному растяжению, в то время как в технологических процессах СПФ преобладают двуосные растягивающие напряжения. Эти особенности могут приводить к ошибкам в проектировании технологических процессов, связанным с недостаточной предсказательной способностью используемых имитационных моделей.

Таким образом, для повышения точности решения задач проектирования технологических процессов СПФ необходима разработка и развитие новых методов идентификации деформационного поведения материала. Состояние двуосного растяжения реализуется в технологических экспериментах по формовке листовой заготовки в цилиндрическую матрицу, которые могут быть использованы в качестве источника информации о деформационном поведении материала в условиях, близких к промышленным. Работа посвящена проблеме идентификации параметров материала по результатам таких экспериментов.

## Степень разработанности проблемы

Проблемы, возникающие при применении испытаний на одноосное растяжение для определения деформационного поведения материалов, отмечены в работах J. Cheng<sup>5</sup>, D. Sorgente и др.<sup>6</sup>, J.T. Yoo и др.<sup>7</sup>. В работах M. Albakri и др.<sup>8</sup>, A. El-Morsy и др.<sup>9</sup> показано, что микроструктурное поведение поликристаллических материалов в условиях горячей деформации различается в условиях сжатия, растяжения или сдвига и существенно зависит от типа материала, его химического состава и начального микроструктурного состояния. Полученные результаты говорят, в частности, о том, что параметры материала, определенные на основе испытаний на одноосное растяжение, требуют уточнения для использования при проектировании процессов СПФ.

Использование результатов механических испытаний по формовке листовой заготовки в цилиндрическую матрицу для идентификации реологических параметров материалов рассматривалось в работах Ф.У. Еникеева и А.А. Круглова, G. Guliano, D. Sorgente, A. El-Moorsy, F.S. Jarrar, F. Jovane и др.

Сложности, возникающие при интерпретации результатов испытаний по газовой формовке, связаны с отсутствием физической возможности для прямого измерения величин интенсивности напряжения течения металла, интенсивности деформации и скорости деформации непосредственно в ходе испытания. Эти данные приходится рассчитывать на основании параметров оснастки, режима давления, значения высоты образовавшегося купола и толщины заготовки в вершине этого купола.

Выделяют несколько разновидностей испытаний в зависимости от оборудования, с помощью которого они реализуются. Прежде всего, это «слепые» тесты, при которых формовка производится в течение заданного времени при постоянном давлении. Результатами таких тестов являются высота купола и толщина заготовки в его вершине, измеряемые по окончании формовки. Еще один вид – тесты с фиксацией касания, при которых формовка производится до момента соприкосновения заготовки и дна матрицы, результатами являются время формовки и толщина оболочки в вершине купола на момент касания. Наиболее информативными являются испытания с непрерывным мониторингом высоты купола, начиная с момента начала формовки. В результате получают кривую

---

<sup>5</sup> Cheng, J. H., The Determination of Material Parameters from Superplastic Inflation Tests. // Journal of Materials Processing Technology, 1996, 58:233–246.

<sup>6</sup> Sorgente, D., Palumbo, G., Piccininni, A., Guglielmi, P., Aksenov, S.A., Investigation on the Thickness Distribution of Highly Customized Titanium Biomedical Implants Manufactured by Superplastic Forming. // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2018, 20:29–35.

<sup>7</sup> Yoo, J.T., Yoon, J.H., Lee, H.S., Youn, S.K., Material Characterization of Inconel 718 from Free Bulging Test at High Temperature. // Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26:2101–2105.

<sup>8</sup> Albakri M., Abu-Farha F., Khraisheh M., A new combined experimental–numerical approach to evaluate formability of rate dependent materials. // International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 66. 2013. pp. 55-66.

<sup>9</sup> El-Morsy A., Akkus N., Manabe K., Nishimura H., Superplastic characteristics of Ti-alloy and Al-alloy sheets by multi-dome forming test. // Materials Transactions Vol.42(11). 2001. pp. 2332-2338.

зависимости высоты купола от времени и значение толщины оболочки в вершине купола на момент окончания теста.

Представленные в литературе подходы к идентификации параметров материала на основе результатов испытаний по свободной формовке основаны на прямых или обратных методах. Прямые методы позволяют вычислить требуемые параметры материала непосредственно по результатам измерений, сделанных в ходе испытаний. Обратные методы основаны на минимизации функции ошибки, которая характеризует отклонение измеренных значений от расчетных, полученных с помощью компьютерного моделирования.

Одними из первых предложили использовать эксперименты по свободной формовке для определения реологических характеристик материалов Ф.У. Еникеев и А.А. Круглов<sup>10</sup>. Для промышленного титанового сплава ВТ6 они определяли параметры материала, входящие в уравнение Бэкофена. Для решения задачи была предложена модель процесса формовки листа в цилиндрическую матрицу, основанная на безмоментной теории оболочек. Параметры материала рассчитывались на основе двух тестов по формовке купола одинаковой высоты при различных давлениях. Для контроля высоты была выполнена модификация оснастки стандартного испытательного оборудования, которая позволила зафиксировать моменты времени, при которых заготовка касается дна оснастки.

Для коэффициента скоростной чувствительности  $m$  было получено выражение:

$$m = \frac{\ln(P_1/P_2)}{\ln(t_2/t_1)}, \quad (3)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  – продолжительность формовки полусфер при постоянных давлениях газа  $P_1$  и  $P_2$  соответственно.

Для расчета значения параметра  $K$  предложено выражение:

$$K_i = \frac{P_i R}{2s_0} \left[ \frac{t_i}{2I_m(\pi/2)} \right]^m, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

где  $P_i$  – величина постоянного давления,  $R$  – радиус матрицы,  $s_0$  – начальная толщина заготовки, а  $I_m(\varphi)$  – выражается через определённый интеграл:

$$I_m(\varphi) = \int_0^\varphi \left( \frac{\sin^3 x}{x^2} \right)^{1/m} \left( \frac{1}{x} - \operatorname{ctg} x \right) dx \quad (5)$$

где  $\varphi$  – половина угла, образуемого купольной поверхностью в центре ее кривизны.

В контрольных экспериментах, проведенных при постоянных скоростях деформаций в соответствии с законами подачи давления, рассчитанными с использованием

---

<sup>10</sup> Enikeev F.U. An analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm / F.U. Enikeev and A.A. Kruglov // Int. J. of Mech. Sci. – 1995. – Vol. 37. – No.5. – pp. 473–483.

найденных  $m$  и  $K$ , было получено удовлетворительное согласие расчетной продолжительности формовки с данными экспериментов.

Идея метода прямого расчета Ф.У. Еникеева и А.А. Круглова использована во многих работах. Например, ее применил G. Giuliano для получения констант материала для сплава Ti-6Al-6V в случае отличного от нуля параметра деформационного упрочнения  $n$ , входящего в уравнение состояния вида  $\sigma_e = K \dot{\epsilon}_e^m \epsilon_e^n$ , где  $\epsilon_e$  - интенсивность деформации,  $n$  – показатель деформационного упрочнения.

С использованием прямых методов G. Giuliano, F. S. Jarrar, F. K. Abu-Farha и рядом исследователей из Института проблем сверхпластичности РАН были определены параметры материала для алюминиевых и титановых сплавов AA-5083, AZ31, AMг6, AMг4, BT6, OT4-1.

Серьезным препятствием для применения прямых методов является отсутствие у выпускаемых промышленностью экспериментальных установок конструктивных возможностей для проведения тестов с фиксацией высоты. Недостатком известных в настоящее время прямых методов является то, что они разрабатываются для конкретного вида уравнения состояния.

В сравнении с прямыми методами идентификации параметров материала основным преимуществом обратного анализа является возможность использования различных уравнений состояния.

Обратный анализ представляет собой итерационный процесс, блок-схема которого представлена на рисунке 1. Соотношение, связывающее напряжение течения ( $\sigma$ ), степень ( $\epsilon$ ) и скорость ( $\dot{\epsilon}$ ) деформации, зависит от параметров  $p_1 - p_n$ :  $\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, p_1, \dots, p_n)$ . Целью обратного анализа является поиск таких значений параметров, при котором результаты имитационного моделирования процесса формовки в наименьшей степени отклоняются от экспериментальных данных. Степень этого отклонения определяет целевая функция  $F(p_1, \dots, p_n)$ . Как правило, она строится как сумма квадратичных ошибок, полученных при моделировании процесса формовки с использованием заданного набора параметров. Таким образом, задача идентификации параметров материала сводится к задаче поиска минимума функции многих переменных.

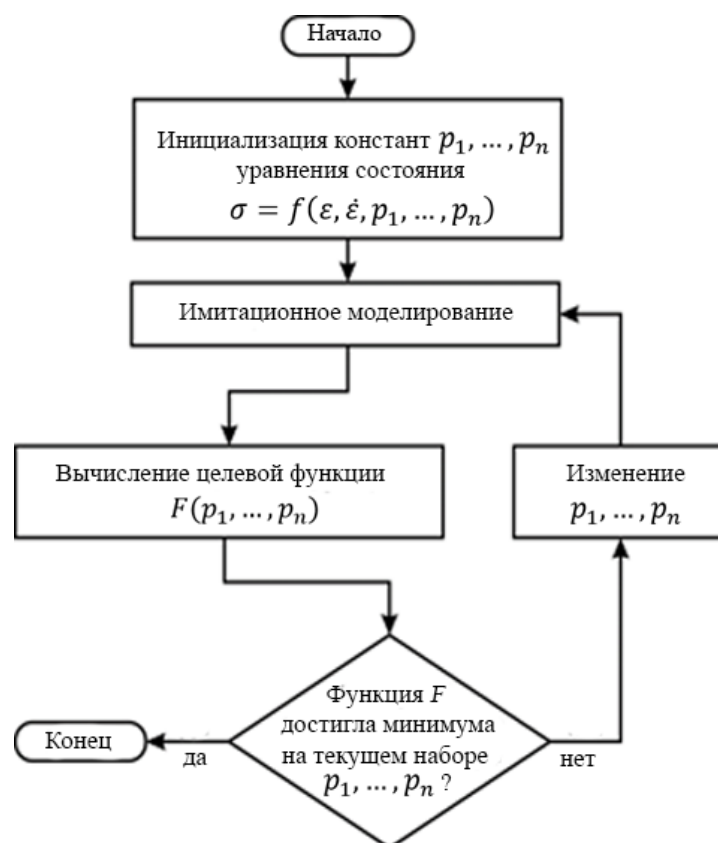


Рис. 1. Схема алгоритма идентификации реологических параметров на основе обратного метода.

Примеры использования обратного метода для идентификации параметров, характеризующих механическое поведение сверхпластических материалов, представлены в работах G.Y. Li и др.<sup>11</sup>, D. Sorgente и др.<sup>12</sup>. Для решения задачи компьютерного моделирования процесса формовки листовой заготовки они используют метод конечных элементов (МКЭ).

МКЭ является одним из наиболее распространенных и хорошо себя зарекомендовавших численных методов решения задачи о медленном течении вязкой среды, описывающей формоизменение заготовки в процессе СПФ. Он реализован в различных промышленных САЕ-системах и широко используется при проектировании технологических процессов обработки материалов давлением. Однако применение МКЭ требует значительного времени для решения задачи о формоизменении заготовки. При обратном анализе, реализация которого связана с большим количеством итераций, на каждой из которых необходимо осуществлять моделирование всех исследуемых экспериментов, время расчета многократно возрастает. В связи с этим более

<sup>11</sup> Li G.Y., Tan M.J., Liew K.M., Three-dimensional modeling and simulation of superplastic forming. // Journal of Materials Processing Technology, vol. 150, 2004, pp. 76 – 83

<sup>12</sup> Sorgente D., Tricarico L. Characterization of a superplastic aluminium alloy ALNOVI-U through free inflation tests and inverse analysis // International Journal of Material Forming. 2014. Vol. 7. pp. 179–187.

предпочтительным представляется применение упрощённых моделей формовки, позволяющих оперативно строить достоверные прогнозы формоизменения купола.

Построению таких упрощенных моделей посвящено значительное количество работ<sup>8,13,14,15</sup>. Большинство из них основано на равновесии сил, приложенных к элементарному участку образца, находящемуся в вершине купола. При построении моделей используется ряд гипотез о распределении толщины по заготовке и его связи с формой купола. Предложенные в рамках таких гипотез зависимости толщины купола от его высоты приведены ниже.

В работе F. Jovane использовалась гипотеза о равномерном утонении купола по всему объёму:

$$s(H) = \frac{s_0 R^2}{R^2 + H^2} \quad (6)$$

Гипотезу о равномерной растянутости меридиана купола использовали Ф.У. Еникеев и А.А. Круглов:

$$s(H) = s_0 \left( \frac{\sin \varphi}{\alpha} \right)^2, \quad (7)$$

где  $\varphi = \arcsin \left( \frac{2HR}{R^2 + H^2} \right)$

Предположение о том, что в каждой точке купола наблюдается идеальное двусное растяжение, позволяет построить зависимость, предложенную в работе R. Hill<sup>16</sup> и использованную в работе S. Yu-Quan и Z. Jun:

$$s(H) = \frac{s_0 R^4}{(R^2 + H^2)^2} \quad (8)$$

Обобщение (6)-(8) предложено M.J. Nategh и B. Jafari:

$$s(H) = s_0 \left( \frac{R^2}{R^2 + H^2} \right)^{2-m} \quad (9)$$

Общими недостатками соотношений (6)-(8) является то, что ни одно из них не учитывает влияния свойств материала на утонение заготовки. Это не согласуется с экспериментальными данными, говорящими о том, что чем больше значение коэффициента скоростной чувствительности, тем выше равнотолщинность заготовки, и как следствие, – толщина в вершине. Попытка учесть этот факт была сделана в работе M.J. Nategh и B. Jafari, однако полученное соотношение (9) описывает указанный эффект лишь на качественном уровне.

<sup>13</sup> Jovane F., An approximate analysis of the superplastic forming of a thin circular diaphragm: theory, and experiments // International Journal of Mechanical Science 10, 1968, pp. 403-424.

<sup>14</sup> Nategh M.J., Jafari B., Analytical and Experimental Investigations on Influential Parameters of Superplastic Forming of Titanium Based Workpieces // JAST, (2007), 4 (2), pp. 43- 51.

<sup>15</sup> Yu-Quan S., Jun Z., A Mechanical Analysis of the Superplastic Free Bulging of Metal Sheet // Materials Science and Engineering, 84, 1986, pp. 111- 125.

<sup>16</sup> Hill, R., A Theory of the Plastic Bulging of a Metal Diaphragm by Lateral Pressure // The London Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1950, 41, pp. 1133–1142.



Кроме того, ни одно из представленных соотношений (6)-(9) не учитывает геометрических параметров оснастки, которые также оказывают влияние на утонение заготовки в ходе формовки. Отмеченные недостатки не позволяют использовать известные полуаналитические модели процесса формовки листовой заготовки в цилиндрическую матрицу при реализации процедуры обратного анализа. Для решения задачи идентификации параметров материала по результатам тестовых формовок необходимы модели, учитывающие свойства материала и геометрию оснастки.

### **Актуальность**

Проектирование технологических процессов сверхпластической формовки требует разработки режимов давления, обеспечивающих формоизменение в заданном диапазоне скоростей деформации. Такие режимы рассчитываются с помощью компьютерного моделирования, ключевым элементом которого являются параметры деформационного поведения материалов. Наиболее распространенные методы исследования деформационного поведения сверхпластических материалов позволяют описать его формоизменение в условиях одноосного растяжения, что не соответствует напряженному состоянию, реализуемому в ходе СПФ. Это несоответствие может приводить к существенным расхождениям между прогнозами, полученными с помощью компьютерного моделирования, и реальным формообразованием заготовки. В результате чего, реализация режима давления, рассчитанного на стадии проектирования технологического процесса, может привести к выходу за пределы скоростного диапазона сверхпластичности и спровоцировать возникновение геометрических дефектов полой конструкции.

Существующие методы идентификации параметров деформационного поведения в условиях двухосного растяжения основаны на технологических экспериментах по формовке листовой заготовки в цилиндрическую матрицу. Такой подход позволяет испытывать материал в условиях, максимально приближенных к промышленным, однако усложняет процесс идентификации параметров его деформационного поведения. Задача идентификации решается либо с помощью приближенных аналитических соотношений, либо с помощью громоздких конечно-элементных вычислений.

Таким образом, создание новых методов идентификации параметров деформационного поведения сверхпластических материалов, основанных на результатах технологических экспериментов по формовке листовой заготовки в цилиндрическую матрицу является актуальной научно-технической задачей.

### **Цели и задачи исследования.**

Целью данного исследования является разработка метода идентификации параметров сверхпластичных материалов на основании экспериментов по сверхпластической формовке листовой заготовки в цилиндрическую матрицу.

При проведении исследования решались следующие задачи:

- анализ известных аналитических соотношений, связывающих толщину заготовки и ее высоту в верхней точке купола;
- конечно-элементное моделирование и анализ процесса формообразования купола с целью выявления и анализа ключевых закономерностей формоизменения образца;
- разработка модели формоизменения образца в вершине купола в ходе испытания по формовке листовой заготовки в цилиндрическую матрицу, учитывающей влияние параметров материала;
- разработка метода идентификации параметров деформационного поведения материалов на основе разработанной модели формоизменения;
- разработка компьютерной программы, реализующей построенную методику;
- проведение вычислительных экспериментов для анализа применимости разработанной методики;
- определение реологических характеристик промышленных сплавов на основе алюминия и титана.

### **Описание методологии исследования**

Основу методологии исследования составляют компьютерное моделирование и вычислительный эксперимент, которые в сочетании с обратным анализом позволили создать метод идентификации параметров материала с использованием результатов формовки листовой заготовки в цилиндрическую матрицу. Исследование проводилось в предположении, что материал формуемой заготовки является однородным, изотропным и несжимаемым, а процесс сверхпластической формовки – изотермическим.

На первом этапе были проведены многочисленные расчеты процесса формовки листовой заготовки в программном комплексе Abacus. Задача решалась в осесимметричной постановке, при моделировании использовались 4х узловые элементы. В качестве модели материала использовалось степенное соотношение Бэкофена.

Расчетные эксперименты проводились с различными параметрами материала, давлением, геометрическими параметрами заготовки и оснастки. Параметры материала выбирались в диапазонах допустимых значений для сверхпластичных и квазисверхпластичных материалов. Коэффициент скоростной чувствительности  $m$

варьировался от 0.2 до 0.9, с шагом 0.5. Коэффициент пропорциональности принимал значения от 75 до 3200. Величина рабочего давления, варьировалась от 0.1 до 1.2 с шагом 0.2 МПа. Толщина заготовки принимала значения от 0.5 до 4 мм с шагом 0.5 мм. Радиус внутренней полости оснастки  $R$  варьировался в диапазоне от 20 до 60 мм, радиус скругления кромки  $\rho_0$  – от 0 до 18 мм.

Анализ полученных результатов позволил установить характер зависимости толщины заготовки от высоты купола. В отличие от предложенных в литературе, найденная зависимость<sup>17</sup> учитывает влияние параметров материала на утонение заготовки, а также учитывает величину радиуса скругления  $\rho_0$  оснастки:

$$\frac{s}{s_0} = 1 - \frac{BH}{\rho + \rho_0} \quad (10)$$

где  $s$  – текущая толщина заготовки в вершине купола,  $s_0$  – начальная толщина заготовки,  $H$  – высота подъема купола,  $\rho$  – радиус кривизны поверхности купола в его вершине,  $B$  – коэффициент, зависящий от свойств материала и геометрии оснастки.

В работе<sup>17</sup> показано, что величина коэффициента  $B$  не зависит ни от величины рабочего давления  $P$ , ни от коэффициента  $K$  уравнения Бэкофена. Предложена зависимость, позволяющая рассчитать значение  $B$  для заданных значений геометрических параметров оснастки ( $\rho_0$  и  $R$ ) и значения скоростной чувствительности материала:

$$B = 0.5 + \frac{1}{\alpha(1+m)\beta'} \quad (11)$$

где  $\alpha = -2.3 \frac{\rho_0}{R} + 2.1$ ,  $\beta = 1.8 \frac{\rho_0}{R} + 2.5$

Соотношения (10) и (11) позволяют оценить значение скоростной чувствительности, на основании значений высоты купола и толщины заготовки в его вершине.

На втором этапе исследования, соотношение (10) было использовано для построения модели, описывающей изменение высоты образца в процессе формовки в форме обыкновенного дифференциального уравнения<sup>18</sup>:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\rho + \rho_0 - BH}{BH} f^{-1} \left( \frac{P\rho}{2(s_0 - \frac{s_0 BH}{\rho + \rho_0})}, \ln \left( \frac{s_0}{s_0 - \frac{s_0 BH}{\rho + \rho_0}} \right) \right), \quad (12)$$

где  $f^{-1}(\dots)$  – функция, обратная функции, связывающей интенсивность напряжений степень и скорость деформации в уравнении состояния материала, такая что:  $f^{-1}(\sigma_e, \dot{\epsilon}_e) = f^{-1}(f(\dot{\epsilon}_e, \epsilon_e), \epsilon_e) = \dot{\epsilon}_e$ ,  $P$  – величина давления. Для уравнения состояния Бэкофена  $\sigma_e = K \dot{\epsilon}_e^m$  соотношение (12) принимает вид:

<sup>17</sup> Zakhariyev I. Y. Aksenov S. A. Influence of a material rheological characteristics on the dome thickness during free bulging test // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. - 2017. - Vol. 52. No. 5. - pp. 1002-1007.

<sup>18</sup> Zakhariyev, I.Y. Aksenov, S.A., Logashina, I.V. Application of inverse analysis for a determination of material rheological constants basing on forming tests of circular membranes // Letters on Materials. - 2017. - № 1. - стр. 49-54.

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\rho + \rho_0 - BH}{BH} \left( \frac{P\rho}{2Ks_0 \left(1 - B \frac{H}{\rho + \rho_0}\right) \ln\left(\frac{\rho + \rho_0}{\rho + \rho_0 - BH}\right)} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (13)$$

На основе разработанной модели была построен метод идентификации параметров материала по результатам тестовых формовок листовой заготовки в цилиндрическую матрицу. Процедура идентификации состоит из двух этапов. На первом этапе для каждой экспериментальной точки  $(H_i, s_i)$  определялось значение  $B_i$ :

$$B_i = \frac{(s_0 - s_i)(H_i^2 - (R_0 + \rho_0)^2)}{s_0 H_i^2} \quad (14)$$

На втором этапе подбираются константы уравнения состояния путём минимизации целевой функции, рассчитываемой как суммарное отклонение решений дифференциальных уравнений (13)  $H_i(t)$  от соответствующей экспериментальной точки  $(H_i, t_i)$ :

$$F = \sum_{i=1}^N \min_t \left( \sqrt{\left(\frac{H(t) - H_i}{H_i}\right)^2 + \left(\frac{t - t_i}{t_i}\right)^2} \right), \quad (15)$$

где  $N$  – это общее количество экспериментов,  $H(t)$  – высота купола в момент времени  $t$ , полученная с помощью решения уравнения (13) при  $B = B_i$ ,  $t_i$  и  $H_i$  – экспериментальные значения времени и высоты купола.

На основе разработанной модели и метода определения параметров материала была предложена методика идентификации констант уравнения Бэкофена для описания деформационного поведения сверхпластичных материалов по результатам тестовых формовок листовой заготовки в цилиндрическую матрицу. Предложенная методика была применена для определения реологических параметров алюминиевых сплавов АМгб, АА5083, АZ31, на основании данных испытаний по формовке листовой заготовки в цилиндрическую матрицу<sup>18</sup>. А также для определения характеристик титанового сплава ОТ4-1<sup>19</sup> на основании данных тестов по формовке листовой заготовки в многоместную матрицу с 6-ю различными радиусами. Химические составы сплавов АМгб, АА5083, АZ31 и ОТ4-1 представлен в таблицах 1-4.

Таблица 1 Химический состав в % сплава АМгб

Fe	Si	Mn	Ti	Cu	Be	Mg	Zn	Al
0.4	0.4	0.5	0.02	0.1	0.0002	5.8	0.2	основа

Таблица 2 Химический состав в % сплава АА5083

Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ni	Ti	Cd	Zr	Pb	Al
3.20	0.031	0.25	0.24	0.20	1.02	0.95	0.14	0.09	0.37	0.02	основа

<sup>19</sup> Zakhariiev I. Y. Aksenov S. A., Kotov A., Kolesnikov, A. Characterization of OT4-1 Alloy by Multi-Dome Forming Test // Materials. - 2017. - Vol. 10. - No. 8. - pp. 1-10.

Таблица 3. Химический состава в % сплава AZ31

Al	Zn	Mn	Cu	Ni	Si	Fe	Mg
2.60	0.86	0.2859	0.0012	0.01	0.0092	0.0015	основа

Таблица 4. Химический состава в % сплава OT4-1

Fe	C	Si	Mn	N	O	Al	Zr	Ti
0.3	0.1	0.12	2	0.05	0.15	2.5	0.3	основа

Решение дифференциального уравнения (13) осуществлялось методом Рунге Кутты 4-го порядка. Минимизация функции ошибки (15) осуществлялась методом деформированного многогранника<sup>20</sup>, который не требует вычисления производной целевой функции при минимизации функции ошибки, являясь при этом методом второго порядка точности. Верификация полученных данных о свойствах исследуемых материалов осуществлялась путем сравнения результатов конечно-элементного моделирования с экспериментальными данными.

#### **Основные результаты, выносимые на защиту**

- Модель формообразования купола при сверхпластической формовке листовой заготовки в цилиндрическую матрицу;
- Метод идентификации параметров уравнений состояния материалов по результатам тестовых формовок в цилиндрическую матрицу;
- Параметры деформационного поведения промышленных алюминиевых (АМг6, АМг4, АМг2) и титанового (ОТ4-1) сплавов в условиях двухосного растяжения при температурах сверхпластичности.

#### **Научная новизна**

Предложена новая модель формообразования купола при сверхпластической формовке листовой заготовки в цилиндрическую матрицу позволяющая, в отличие от известных, учитывать параметры сверхпластичного материала и геометрию штамповой оснастки.

Предложенный метод идентификации параметров уравнений состояния деформируемых материалов по результатам тестовых формовок в цилиндрическую

<sup>20</sup> Nelder J. A. and Mead R., Computer Journal, 1965, vol. 7, pp. 308—313.

матрицу с использованием новой модели формообразования купола позволяет существенно повысить адекватность результатов без применения конечно-элементного моделирования.

### **Общие выводы исследования**

Исследование посвящено проблеме идентификации параметров, характеризующих деформационное поведение материалов, играющей одну из важнейших ролей в задачах проектирования технологических процессов сверхпластической формовки.

Предложена оригинальная модель, описывающая изменение высоты и толщины купола в ходе эксперимента по формовке листовой заготовки в цилиндрическую матрицу учитывающая влияние параметров материала и геометрию оснастки.

На основе предложенной модели разработан метод идентификации реологических параметров сверхпластичных материалов по результатам тестовых формовок листовой заготовки в цилиндрическую матрицу.

С помощью разработанного метода найдены параметры, характеризующие деформационное поведение ряда алюминиевых и титанового сплава, достоверность которых подтверждается хорошей согласованностью конечно-элементных моделей формовки с экспериментальными данными.

### **Личный вклад автора в разработку проблемы**

Все результаты, выносимые на защиту, получены диссертантом лично. Участие соавторов опубликованных статей заключалось в следующем: Аксенов С.А. – постановка проблемы и общее научное руководство, Логашина И.В. – библиографический поиск информации, Осипов С.А., Колесников А.В., Котов А.Д. – проведение натурных экспериментов.

### **Список опубликованных статей, где отражены основные результаты диссертации**

*Все статьи опубликованы в рецензируемых научных журналах, индексируемых международными базами цитирования Web of Science и Scopus:*

1. Zakhariev I. Y. Numerical simulation of superplastic bulge forming test. (Имитационное моделирование процесса формовки листовой заготовки в цилиндрическую матрицу) // Journal of Physics: Conference Series. -2021. -Vol. 1740. -P. 012021
2. Zakhariev I. Y. The effect of finite element type on the results of superplastic forming simulation (Влияние типа конечных элементов на результаты имитационного

- моделирования сверхпластической газовой формовки)// Procedia Manufacturing. - 2019. -Vol. 37. -P. 85-90
3. Zakhariev I. Y. Aksenov S. A., Kotov A., Kolesnikov, A. Characterization of OT4-1 Alloy by Multi-Dome Forming Test (Определение параметров сплава OT4-1 на основании экспериментов по формовке листовой заготовки в многокупольную матрицу) // Materials. - 2017. - Vol. 10. - No. 8. - P. 1-10.
  4. Zakhariev I. Y. Aksenov S. A. Influence of a material rheological characteristics on the dome thickness during free bulging test (Влияние реологических параметров на утонение заготовки в ходе процесса формовки листовой заготовки в цилиндрическую матрицу) // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. - 2017. - Vol. 52. No. 5. - P. 1002-1007.
  5. Zakhariev, I.Y. Aksenov, S.A., Logashina, I.V. Application of inverse analysis for a determination of material rheological constants basing on forming tests of circular membranes (Применение обратного анализа для определения реологических параметров по данным тестовых формовок листовых заготовок) // Letters on Materials. - 2017. - № 1. - С. 49-54.
  6. Aksenov S. A., Zakhariev I. Y., Osipov S. A., Kolesnikov A. V. Characterization of superplastic materials by results of free bulging tests (Определение параметров сверхпластичных сплавов на основании экспериментов по формовке листовой заготовки в цилиндрическую матрицу) // Materials Science Forum. - 2016. - Vol. 838-839. - P. 552-556.

**Основные результаты диссертационной работы были доложены и обсуждались на российских и международных конференциях:**

- Computer Simulations in Physics and beyond» CSP2020 (Москва, Россия, 2020), тема доклада – «*Numerical simulation of superplastic bulge forming test*»;
- The 13th European Conference on Superplastic Forming EuroSPF 2019 (Матера, Италия, 2019), тема доклада – «*The effect of finite element type to the prognosis of thickness distribution obtained by simulation of superplastic forming*»;
- Physical and Numerical Simulation of Materials Processing ICPNS'2019 (Москва, Россия, 2019), тема доклада – «*The effect of finite element type on the results of superplastic forming simulation*»;
- XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механике (Уфа, Россия, 2019), тема доклада – «*Исследование влияния типа конечного элемента на результаты моделирования процесса свободной формовки листовой заготовки в цилиндрическую матрицу*»;

- 13<sup>th</sup> International Conference in Superplasticity in Advanced Materials - ICSAM-2018 (Санкт-Петербург, Россия, 2018), тема доклада – «*The effect of finite element geometry on superplastic forming simulation*»;
- 8th International Conference on Computational Methods and Experiments in Material and Contact Characterization (Таллин, Эстония, 2017), тема доклада – «*Characterization of superplastic alloy by multi-dome bulging tests*»;
- International Conference on Metallurgy and Materials – ICMM 2016 (София, Болгария, 2016), тема доклада – «*Influence of a material rheological characteristics on the dome thickness during free bulging test*»;
- XIV Российская ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (Москва, Россия, институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, 2018), тема доклада – «*Разработка режима давления для изготовления изделия в условиях сверхпластической формовки*»;
- VI Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии. Проблемы и решения», (Уфа, Россия, 2018), тема доклада – «*Сравнение реологических параметров сплава ОТ4-1 полученных на основании экспериментов по многокупольной формовке и тестов на одноосное растяжение*»;
- XIV Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (Москва, Россия, институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, 2017), тема доклада – «*Определение реологических характеристик сплава ОТ4-1 с помощью экспериментов по формовке листовой заготовки в многокупольную матрицу*».