

# Математическое моделирование операции прямого выдавливания осесимметричной заготовки из алюминиевого сплава в сферическую матрицу\*

Рулин С.П., Петров П.А.

Московский политехнический университет  
г. Москва, Российская Федерация  
[sergey.profi@inbox.ru](mailto:sergey.profi@inbox.ru), [petrov\\_p@mail.ru](mailto:petrov_p@mail.ru)

**Аннотация.** В данной статье анализируются особенности формообразования осесимметричной заготовки в матрицу со сферическим дном. Пластическая деформация материала исходной заготовки выполняется при комнатной температуре. Материал исходной заготовки, выбранный в работе для выполнения исследования – технически чистый алюминий марки АД, имеющий деформируемую структуру в исходном состоянии. Математическое моделирование, основанное на вычислительном эксперименте, позволило разработать компьютерную модель операции прямого выдавливания, учитывающую, упрочнение материала, связанное с эволюцией структуры материала, тепловой эффект пластической деформации, контактное трение, а также позволяющая проанализировать изменение параметров напряженно-деформированного состояния. Вычислительный эксперимент проведен в программном комплексе QForm. Полученные результаты показывают не только локализацию напряжений и деформаций, но и повышение температуры в области сферического торца, а также искажение линий течения и приповерхностных линий. В модели используются приповерхностные линии и поле Гартфилда для анализа заполнения формообразующей полости. Показана взаимосвязь скорости деформации в трассируемых точках с расчетными значениями поля Гартфилда. Полученные результаты позволяют перейти в калибровки компьютерной модели операции прямого выдавливания по результатам натурного эксперимента.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние, алюминиевый сплав АД, холодная деформация, сопротивление деформации, компьютерное моделирование, поле Гартфилда, приповерхностные линии, прямое выдавливание, матрица с сферическим дном.

## ВВЕДЕНИЕ

Область применения полых осесимметричных штампованных деталей со сферическим дном связана с общим машиностроением, автомобильной промышленностью, авиастроением, приборостроением [1,2]. Один из вариантов типового процесса изготовления штампованных деталей включает две формообразующие операции: прямое выдавливание и комбинированное выдавливание [2, 3]. В результате первой операции формируется сферический торец на исходной цилиндрической заготовке; в результате второй операции – выполняется выдавливание осесимметричной

детали с фланцем и со сферическим дном на внешней и внутренней поверхностях. На рис. 1 показан эскиз заготовки со сферическим торцом после выполнения первой формообразующей операции – прямого выдавливания исходной заготовки. материалы, из которых возможно изготовление катодов: алюминиевые сплавы АД0, АД1, Д16, медь марки М1 и др. На катоды из сплавов АД0, АД1, Д16 наносят покрытие из алюминия высокой чистоты [4, 5]. Допускается применение чистого алюминия, что благоприятно сказывается на выполнении операций обработки давлением, но его последующая обработка сопряжена с повышением требований к организации производства и качеству изделия.

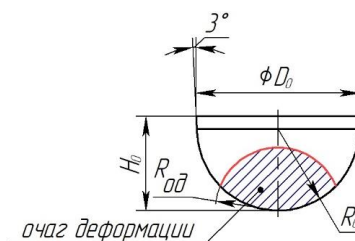


Рис. 1. Эскиз осесимметричной штампованной заготовки с сферическим торцом

В настоящее время в литературе отсутствуют рекомендации по выбору технологических параметров операции получения осесимметричных штампованных заготовок со сферическим торцом под последующее комбинированное выдавливание. В связи с этим актуальным является разработка компьютерной (расчетной) модели операции прямого выдавливания металла в сферическую матрицу. При этом будем использовать программный комплекс QForm [6].

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Математическое моделирование операции прямого выдавливания основано на проведении вычислительного эксперимента [7]. Компьютерная модель операции прямого выдавливания связана с решением краевой задачи обработки давлением, которая решается численно с применением метода конечных элементов, реализованного в программе QForm. Исходные данные для моделирования:

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", <https://icie-rus.org>

- 1) материал – алюминиевый сплав АД;
- 2) модель сопротивления деформации сплава АД (рис. 2) из базы деформируемых материалов программы QForm – диапазон температуры 20-250°C и диапазон скорости деформации – 0,01-500 с<sup>-1</sup>;
- 3) температура деформирования – 20 °С;
- 4) оборудование – гидравлический пресс с номинальной силой 1 МН и скоростью рабочего хода 2 мм/с;
- 5) модель трения – модель А.Н.Леванова; при этом коэффициент теплопередачи смазки принимается равным 30000 Вт/(м<sup>2</sup>×К);
- 6) тип задачи – трехмерная. Фактора трения в модели трения А.Н.Леванова принимается варьируемым параметром, изменяемым в диапазоне значений от 0 до 1. Тепловой эффект пластической деформации учитывается.

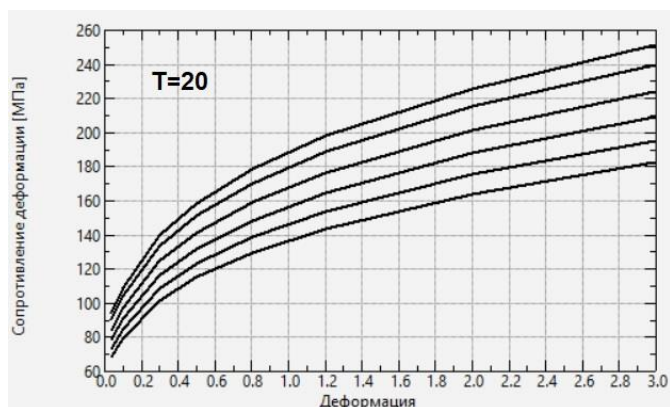


Рис. 2. Модель сопротивления деформации сплава АД

Для оценки заполнения матрицы металлом, формирования деформационных дефектов применен комплекс инструментов, имеющихся в программе QForm (рис. 3): 1) приповерхностные и лагранжевы линии; 2) поле Гартфилда, рассчитываемое за счет применения стандартной подпрограммы в системе QForm.

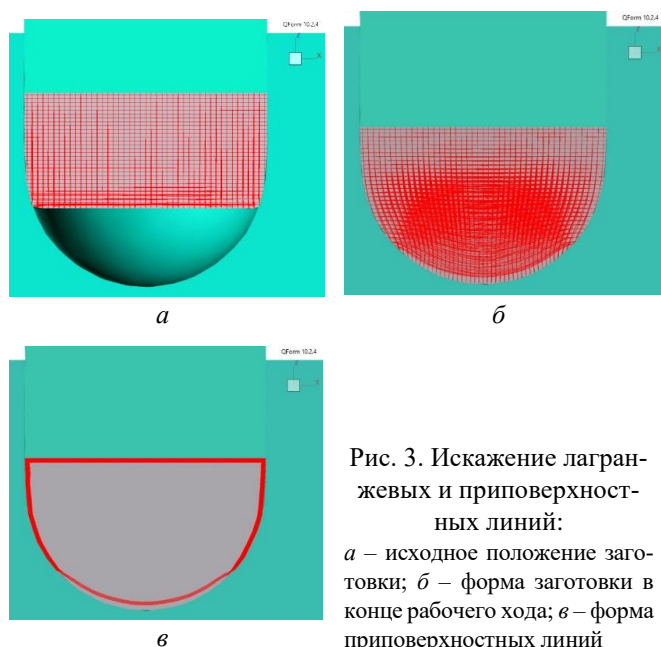


Рис. 3. Искажение лагранжевых и приповерхностных линий:  
*а* – исходное положение заготовки; *б* – форма заготовки в конце рабочего хода; *в* – форма приповерхностных линий

Поле Гартфилд [10] определяется в режиме пост-процессора по результатам расчета растягивающих деформаций в направлении нормали к поверхности деформируемой заготовки; чем выше значение поля, тем выше вероятность появления деформационных дефектов. Оценка значений параметров поле Гартфилда и скорости деформации выполнена в трассируемых точках, добавленных в исходную заготовку с учетом параметров настройки: число интервалов по OX, OY, OZ = 7, 3, 3, соответственно. Расположение трассируемых точек показано на рис. 4.

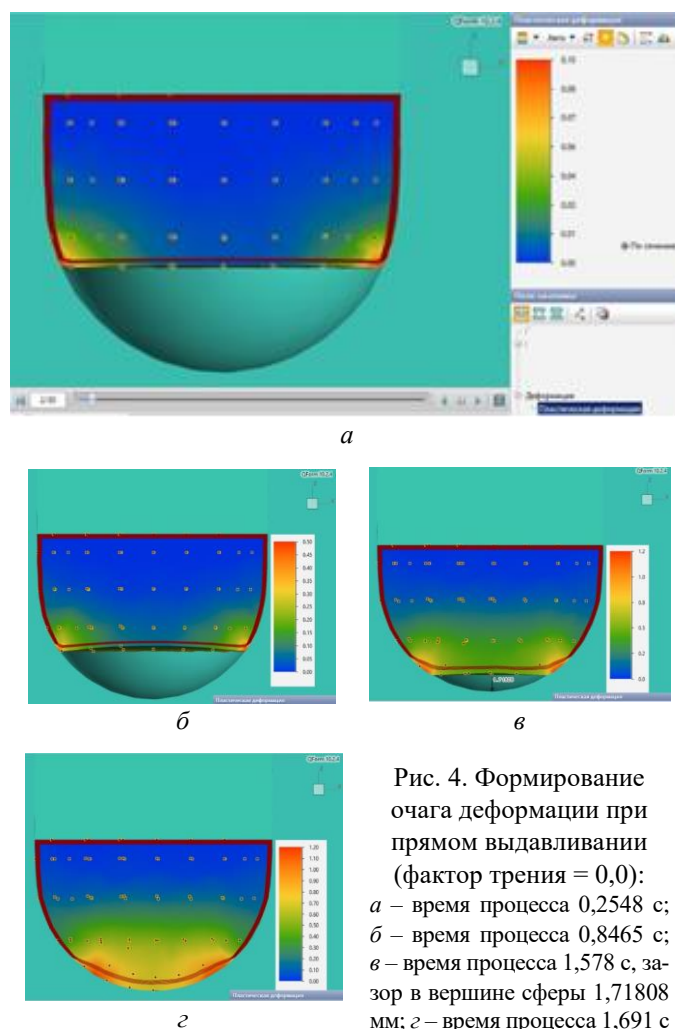


Рис. 4. Формирование очага деформации при прямом выдавливании (фактор трения = 0,0):  
*а* – время процесса 0,2548 с;  
*б* – время процесса 0,8465 с;  
*в* – время процесса 1,578 с, зазор в вершине сферы 1,71808 мм;  
*г* – время процесса 1,691 с

При величине зазора в центральной части сферической поверхности равном 1,71808 мм, приповерхностные линии расположены практически горизонтально. Далее, начинается их изгиб в противоположном направлении (см. рис. 4) – в сторону сферической поверхности радиуса R<sub>0</sub>.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В процессе формоизменения лагранжевы линии и приповерхностные линии наиболее сильно искривляются в центральной области деформируемой заготовки принимая сферическую форму. Напряженно-деформированное состояние локализуется также в центральной области. На рис. 5 показано распределение параметров напряженно-деформированного состояния в конце рабочего хода.

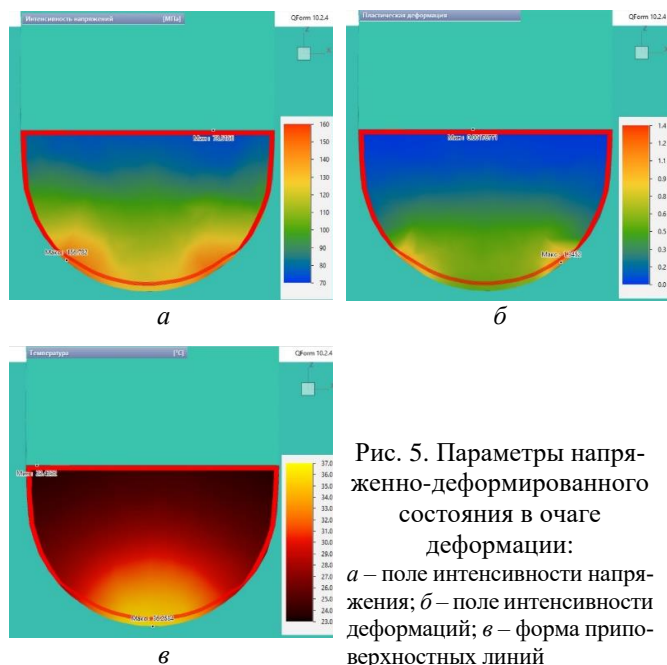


Рис. 5. Параметры напряженно-деформированного состояния в очаге деформации:  
 а – поле интенсивности напряжения; б – поле интенсивности деформаций; в – форма приповерхностных линий

Наибольшие значения напряжений и деформаций достигаются в зонах, симметрично расположенных относительно оси заготовки. В среднем значение напряжения составляет 140-150 МПа; значение деформации – 0,7-1,1. Максимальное значение напряжения составляет 156,78 МПа при максимальной деформации 1,34. Достигаемые значения деформации приводят к тепловому эффекту, также локализованному в центральной части деформируемого металла (рис. 5, в).

На рис. 6 показано движение трассируемых точек от момента входа металла в матрицу до момента оформления сферического торца. В конце рабочего хода металл в точках 191, 193, 195 перемещается в направлении формообразующей поверхности; контакт металла с матрицей происходит в завершении операции прямого выдавливания.

На рис. 7 показана взаимосвязь между скоростью деформации в трассируемых точках и значениями поля Гартфилда. В точках 191, 193, 195 наблюдается увеличение значения поля Гартфилда на всем протяжении рабочего хода. Достижение максимального значения и последующее уменьшение поля Гартфилда в трех исследуемых точках соответствует перемещению металла в направлении формообразующей поверхности матрицы и ее заполнению (см. рис. 4).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ (Выводы)

Проведенные вычислительные эксперименты позволяют сделать следующие выводы:

1) в программе QForm разработана компьютерная модель операции прямого выдавливания, позволяющая выполнить анализ течения металла при заполнении формообразующей полости матрицы с учетом возможного формирования деформационных дефектов – неполное оформление центральной части штампованного изделия со сферическим торцом;

2) искажение приповерхностных линий в процессе формообразования позволяет оценить неравномерность течения металла, которая наблюдается на всем рабочем ходе пуансона;

3) искажение приповерхностных линий (см. рис. 3, в) может свидетельствовать об отходе металла от сферической формообразующей поверхности матрицы; проверка данной гипотезы требует проведения натурного эксперимента и последующего контроля размеров полученной заготовки;

4) локализация напряжений и деформаций наблюдается в области сферического торца формируемой прямым выдавливанием заготовки; как следствие, тепловой эффект пластической деформации приводит к повышению температуры до 36,26 °С (максимальное значение; см. рис. 5, в);

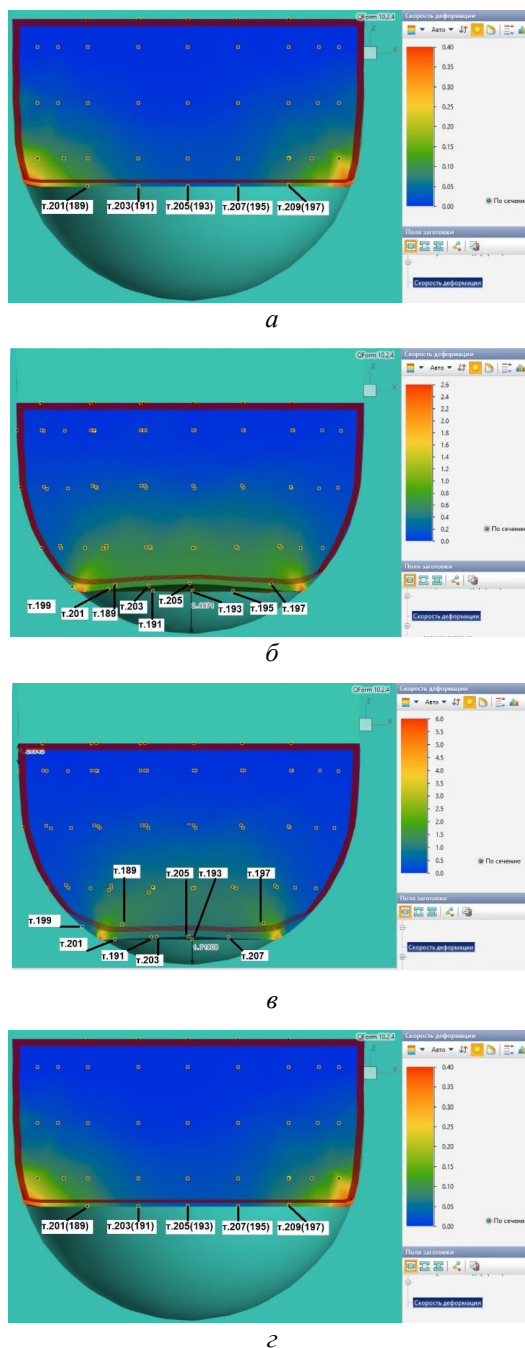


Рис. 6. Изменение значений поля скорости деформации при заполнении матрицы:  
 а – исходное положение заготовки; б – время процесса 1,377 с;  
 в – время процесса 1,578 с, зазор в вершине сферы 1,71808 мм;  
 г – время процесса 1,691 с



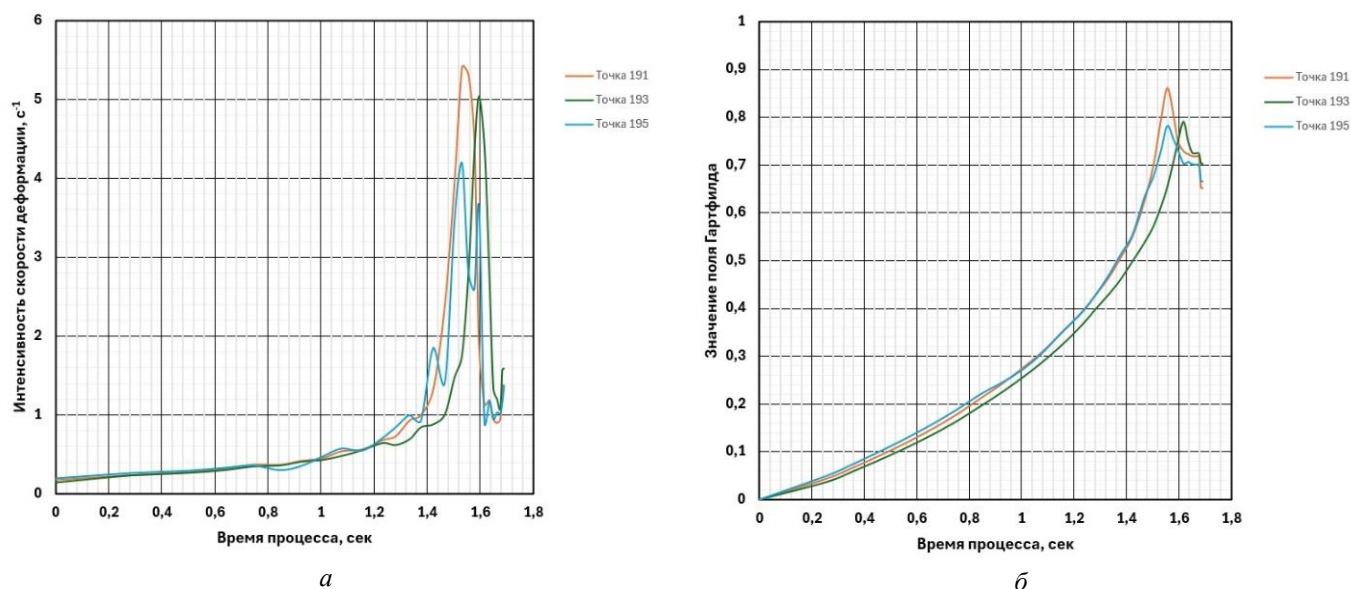


Рис. 7. Изменение значений поля скорости деформации при заполнении матрицы:  
 а – время процесса 1,578 с; зазор в вершине сферы 1,71808 мм; б – время процесса 1,691 с

5) разработанная компьютерная модель операции прямого выдавливания, учитывающая расчет поля Гартфилда требует калибровки диапазонов его значений по результатам натурального эксперимента, что предполагается выполнить для продолжения данной НИР.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев И.С. Совершенствование процессов точной объемной штамповки выдавливанием / И.С. Алиев, К.Д. Махмудов, Г.А. Гамзатов, К. Крюгер // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2020. – № 9. – С. 10-23.
2. Гречников Ф.В. Прогрессивные технологические процессы холодной штамповки / Ф.В. Гречников, А.М. Дмитриев, В.Д. Кухарь и др. Под общ. ред. А.Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
3. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л., Абрамов Е.А. Комбинированное выдавливание полых цилиндрических изделий со сферическим дном // Металлообработка. – 2002. – №3(9). – С. 22-24.
4. Карачабан П.Н. Разработка научно обоснованных методик проектирования технологических процессов холодной штамповки выдавливанием деталей плазмотрона: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1999. – 197 с.
5. Чан Ньейн. Исследование и разработка пленочного холодного катода гелий-неонового лазера: автореф. дис. канд. техн. физико-математических наук. – М., 2015. – 16 с.
6. Власов А.В. Конечно-элементное моделирование технологических процессовковки и объемной штамповки: уч. пособие / А.В. Власов и др.; под ред. А.В. Власова. – М.: Издательство МГТУ им Н.Э. Баумана, 2019. – 383 с.
7. Умнов А.М., Туриков В.А., Муратов М.Н., Скворода А.С. Современные методы вычислительного эксперимента в прикладной физике: Учеб. пособие / А.М. Умнов, В.А. Туриков, М.Н. Муратов, А.С. Скворода. – М.: РУДН, 2008. – 248 с.

# Mathematical Modeling of the Operation of Direct Extrusion-type Forging of an Axisymmetric Aluminum Alloy Part into a Spherical Die

Rulin S.P., Petrov P.A.

Material Forming and Additive Technologies department.

Moscow Polytechnic University

Moscow, Russian Federation

[sergey.profi@inbox.ru](mailto:sergey.profi@inbox.ru), [petrov\\_p@mail.ru](mailto:petrov_p@mail.ru)

**Abstract.** This article analyzes the features of shaping an axisymmetric part into a die with a spherical bottom. Plastic deformation of the original workpiece material is performed at room temperature. The initial workpiece material chosen for the study is technically pure AD grade aluminum, which has a deformable structure in the initial state. Mathematical modeling based on a computational experiment made it possible to develop a computer model of the direct extrusion-type forging operation, which takes into account the hardening of the material associated with the evolution of the material structure, the heat effect of plastic deformation, contact friction, and also allows one to analyze the change in the parameters of the stress-strain state. The computational experiment was carried out by means of the QForm software package. The results obtained show not only the localization of stresses and strains, but also the increase in temperature in the region of

the spherical bottom, as well as distortion of flow lines and near-surface lines. The model uses near-surface lines and the Garfield subroutine to analyze the filling of the die cavity. The relationship between the strain rate at the traced points and the calculated values of the Garfield are shown. The results obtained allow us to proceed to the calibration of a computer model of the direct extrusion-type forging operation based on the results of a full-scale experiment.

**Keywords:** stress-strain state, aluminum alloy of AD type, cold deformation, flow stress, computational simulation, Garfield subroutine, near-surface lines, direct extrusion-type forging, die with spherical contact surface.

## Библиографическое описание статьи

Рулин С.П. Математическое моделирование операции прямого выдавливания осесимметричной заготовки из алюминиевого сплава в сферическую матрицу / С.П. Рулин, П.А. Петров // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2025. – Т.12, №1. – С. 53-57. DOI: 10.24892/RIJIE/20250108

## Reference to article

Rulin S.P., Petrov P.A. Mathematical modeling of the operation of direct extrusion-type forging of an axisymmetric aluminum alloy part into a spherical die, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2025, vol.12, no.1, pp. 53-57. DOI: 10.24892/RIJIE/20250108