

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ / TECHNOLOGIES AND MACHINES OF
PROCESSING BY PRESSURE

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70>

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ ДЕТАЛИ «ФЛАНЕЦ» ИЗ
НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т

Научная статья

Казаков А.В.^{1,*}, Саргаева Т.С.²

^{1,2} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kazakov.anton205[at]mail.ru)

Аннотация

Представлены результаты разработки альтернативной технологии изготовления детали «Фланец» из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Предложен вариант исполнения детали с применением широко известных операций листовой штамповки, таких как вытяжка и отбортовка. Описана методика проведения вычислительного эксперимента в программном комплексе LS-DYNA. В результате написания работы был решён целый ряд поставленных задач, а также определены направления для дальнейших исследований. Данные результаты будут полезны для инженеров и ученых, занимающихся разработкой и оптимизацией технологий обработки металлов давлением, а также для специалистов, занимающихся проектированием и изготовлением различных типов деталей.

Ключевые слова: заготовка, оснастка, конечно-элементное моделирование, листовая штамповка, LS-DYNA, 12Х18Н10Т, фланец.

DEVELOPMENT AND OPTIMIZATION OF SHEET FORGING TECHNOLOGY OF 'FLANGE' PART FROM
STAINLESS STEEL 12X18H10T

Research article

Kazakov A.V.^{1,*}, Sargaeva T.S.²

^{1,2} Samara University, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (kazakov.anton205[at]mail.ru)

Abstract

The results of development of an alternative technology of manufacturing of the part 'Flange' from stainless steel 12X18H10T are presented. The variant of part design with application of widely known operations of sheet forging, such as drawing and flanging, is offered. The methodology of the computational experiment in the software package LS-DYNA is described. As a result of writing the paper, a number of set tasks have been solved and directions for further research have been determined. These results will be useful for engineers and scientists involved in the development and optimization of metal forming technologies, as well as for specialists involved in the design and manufacture of various types of parts.

Keywords: blank, fittings, finite element modelling, sheet metal stamping, LS-DYNA, 12Cr18Ni10T, flange.

Введение

В современном мире эффективность производственных процессов и качество продукции стали основными факторами, влияющими на конкурентоспособность предприятий. Одним из ключевых инструментов для поддержания данных факторов на должном уровне и совершенствовании процессов металлообработки является компьютерное моделирование. С помощью математических моделей и численных методов моделирования можно тщательно исследовать и оптимизировать технологии обработки металлов давлением, что способствует увеличению эффективности производства и улучшению качества готовой продукции [1].

Механизм оптимизации процессов листовой штамповки – актуальный вопрос которому посвящено множество публикаций. Например, метод решения многокритериальных задач в программе LS-OPT для оптимизации типового технологического процесса изготовления кузовной детали автомобиля [2]. Или работы посвящённые учёту стандартных параметров, как при операции формовки с учетом допущения о плоско-деформированном состоянии [3]. Несмотря на большое количество, всё ещё разрабатываются новые модели деформирования и методики проведения вычислительного эксперимента [4], [5]. При этом для подтверждения полученных результатов всё чаще используется различное программное обеспечение [6], в том числе LS-DYNA [2], [3], [4], [5], [6].

Целью данной работы стоит разработка технологии изготовления детали «Фланец» из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Задачи:

1. Произвести анализ литературных источников на предмет построения классической технологии изготовления детали и расчёта технологических параметров процесса.
2. Разработать методику вычислительного эксперимента, которая учитывает критерий разрушения заготовки, утонение материала и различные схемы деформирования.
3. Произвести расчёт процесса вытяжки и последующей отбортовки, а на основании полученных моделей уточнить: размер заготовки, геометрию пуансона и диаметр отверстия под отбортовку.

Результаты данной работы будут полезны для инженеров и ученых, занимающихся разработкой и оптимизацией технологий обработки металлов давлением, а также для специалистов, занимающихся проектированием и изготовлением различных типов деталей.

Описание процесса

Рассматриваемая деталь (рисунок 1) входит в соединение с трубкой Вентури (рисунок 2) и вместе они являются частью газовой горелки. Такое соединение изготавливается методом зафланцевки из двух половинок. Данный метод является нежелательным с точки зрения экономики предприятия, так как для его реализации необходимо импортное дорогостоящее оборудование. При этом две половинки данной конструкции изготавливаются в большом штампе, что также является довольно затратным способом.

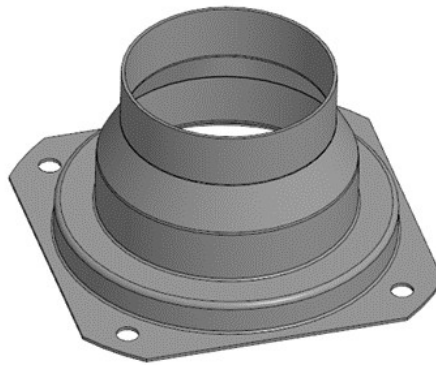


Рисунок 1 - 3D-модель исследуемой детали
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.1>

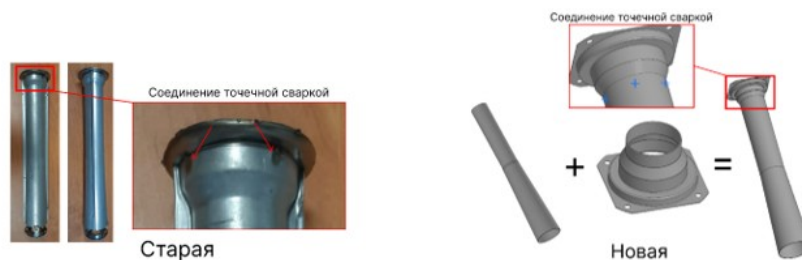


Рисунок 2 - Конструкция детали на данный момент (слева) и предлагаемая технология (справа)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.2>

Новая технология изготовления будет состоять из операций вытяжки, пробивки и отбортовки (рисунок 3). Все эти операции хорошо известны и широко используются в отрасли машиностроения.

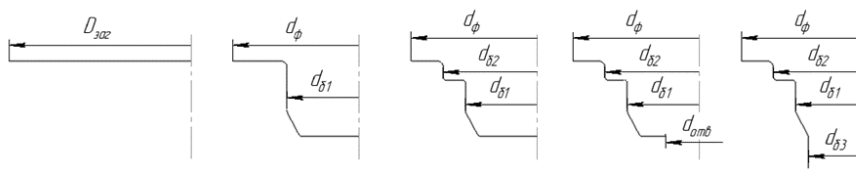


Рисунок 3 - Предлагаемая схема технологического процесса
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.3>

Оценка методики проведения вычислительного эксперимента

Для подтверждения возможности использования полученных результатов в условиях реального производства, в первую очередь был произведён ряд моделирований экспериментально подтверждённых процессов вытяжки с материалом заготовки сталь 08 и параметрами приведёнными в [7] (таблица 1).

Таблица 1 - Параметры проверочного моделирования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.4>

Параметр	Значение
Материал заготовки	Сталь 08
Диаметр заготовки, мм	100
Диаметр борта, мм	50
Толщина заготовки, мм	1
Коэффициент вытяжки	0,5

В соответствии с [7] коэффициент вытяжки 0,5 для таких параметров процесса является ниже минимально допустимого (см. таблицу 45 в [7]), следовательно, возможен разрыв заготовки.

Результат моделирования представлен на рисунке 4.

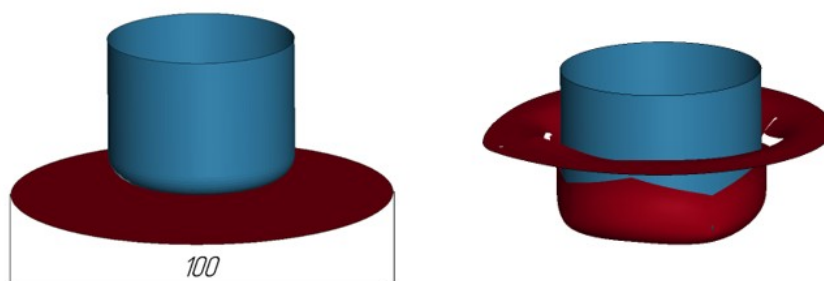


Рисунок 4 - Результат моделирования процесса вытяжки по параметрам из таблицы 1

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.5>

Как видно из рисунка, произошло разрушение. С целью окончательного подтверждения корректности получаемых данных, произведено ещё одно моделирование, основным отличием которого является увеличенный коэффициент вытяжки, за счёт уменьшения диаметра заготовки по [7]. Параметры процесса заданы в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 - Параметры процесса вытяжки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.6>

Параметр	Значение
Материал заготовки	Сталь 08
Диаметр заготовки, мм	80
Диаметр борта, мм	50
Толщина заготовки, мм	1
Коэффициент вытяжки	0,6

В данном случае коэффициент вытяжки больше необходимого, следовательно, процесс вытяжки должен завершиться без разрушения.

Результат моделирования представлен на рисунке 5.

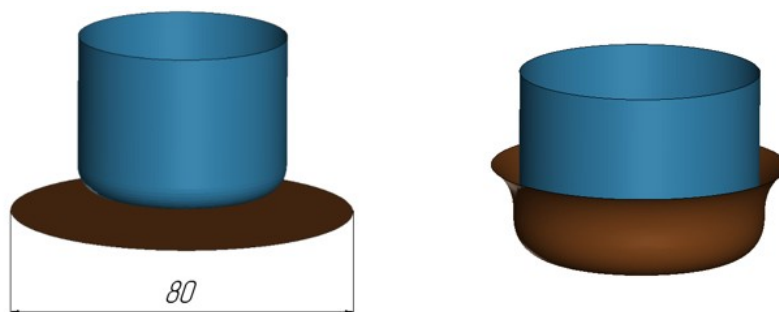


Рисунок 5 - Результат моделирования процесса вытяжки по параметрам таблицы 2
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.7>

Разрушение не произошло и на основании произведённых моделирований можно сделать вывод о достоверности полученных результатов.

Моделирование основного процесса вытяжки

С целью приближения формы первой вытяжки к форме готовой детали, было принято решение выполнить нижнюю часть пуансона сферической формы. Таким образом, обеспечить более равномерное утонение по всей поверхности.

Параметры процесса рассчитаны по [7] и представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Параметры процесса

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.8>

Параметр	Значение
Материал заготовки	12X18H10T
Диаметр заготовки, мм	100
Диаметр борта, мм	45
Толщина заготовки, мм	0,6
Усилие прижима, кН	7
Зазор между инструментами, мм	0,6
Предельная деформация	0,34

Для заготовки выбрана модель 3 PLASTIC_KINEMATIC – используется для расчёта изотропного и кинематического упрочнения пластичных материалов. В карте этой модели материала определяются параметры, представленные в таблице 4.

Таблица 4 - Параметры материала заготовки (12X18H10T)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.9>

Параметр	Расшифровка	Значение
RO	Массовая плотность, кг/м ³	7930
E	Модуль Юнга, МПа	220000
PR	Коэффициент Пуассона	0,3
SIGY	Предел текучести, МПа	200
ETAN	Касательный модуль, МПа	1600

ETAN рассчитывается по [8].

Результаты расчёта вытяжки представлены на рисунках 6-8.

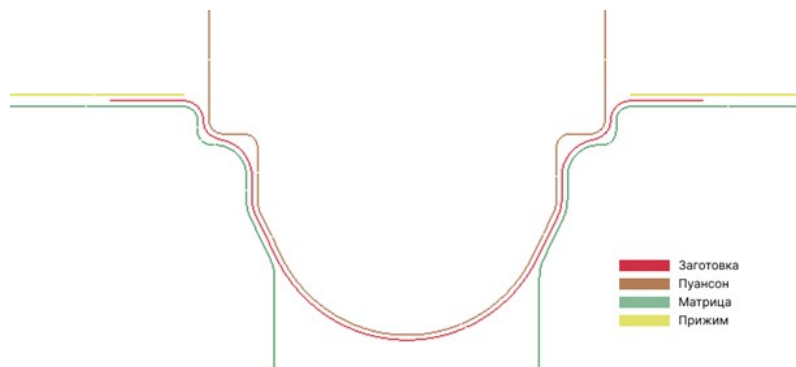


Рисунок 6 - Результат расчёта в оснастке с формой детали и сферической нижней частью
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.10>

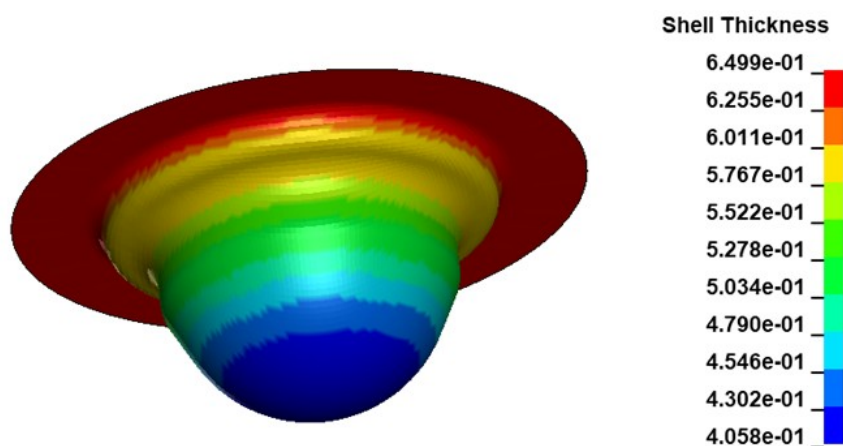


Рисунок 7 - Поле толщины заготовки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.11>

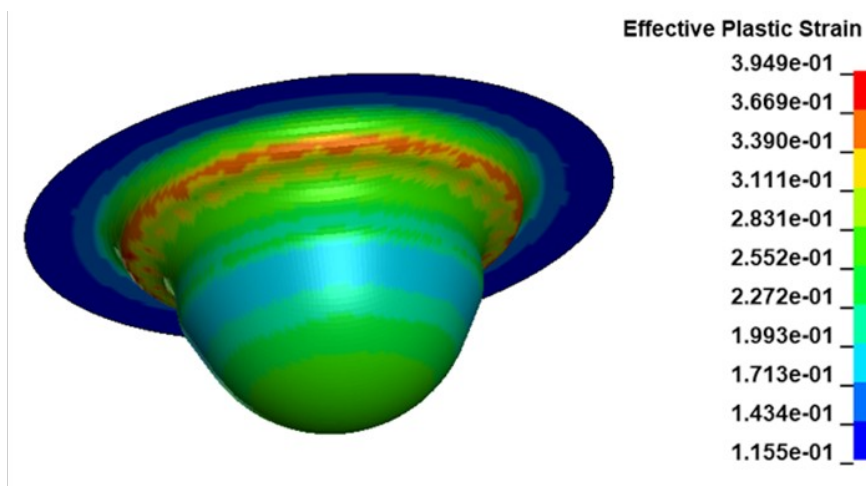


Рисунок 8 - Поле деформаций заготовки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.12>

Из рисунка 8 видно, что максимальные деформации сконцентрированы в области формирования меньшего борта. После этого наблюдения было решено, прежде чем переходить к отбортовке, ещё раз доработать процесс вытяжки. Применить отдельный инструмент, сначала вытянуть глубокий участок и не препятствовать затягиванию металла из верхней части фланца, где максимальная толщина материала, а затем при помощи кольцевого пуансона вытянуть широкую часть детали. Схема вытяжки представлена на рисунке 9.

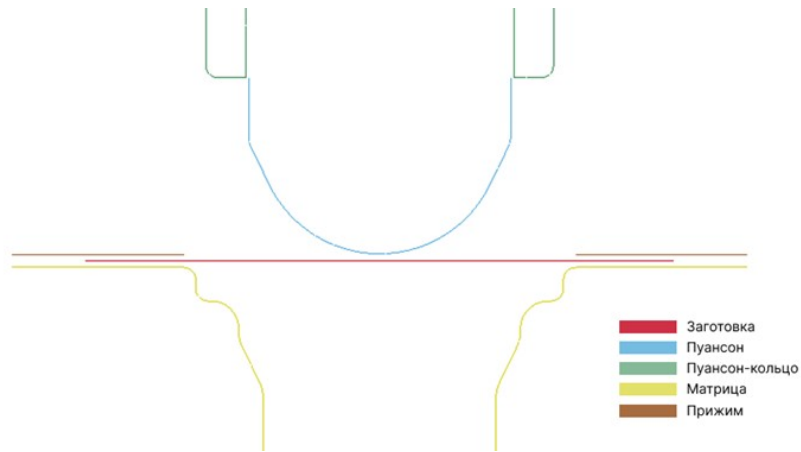


Рисунок 9 - Схема процесса последовательной вытяжки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.13>

Помимо разделения инструмента на две части, была произведена оценка функционального назначения длины цилиндрического участка между широкой и конической частями фланца. Оказалось, что длина задаётся для протекания процесса эжекции кислорода. Было решено сократить длину этого участка на 3 мм. Остальные параметры процесса аналогичны таблице 3. Результаты расчёта представлены на рисунках 10-12.

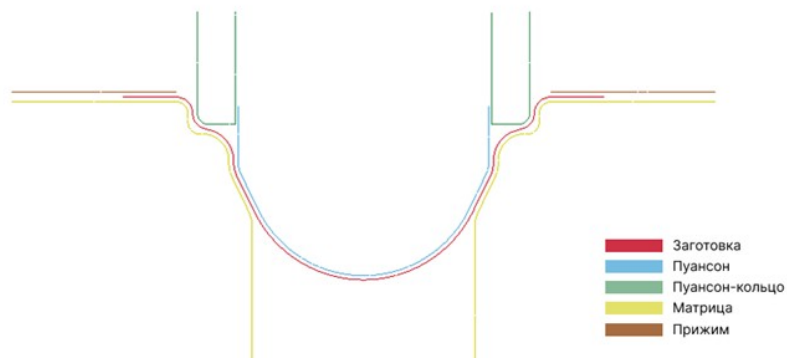


Рисунок 10 - Результат расчёта последовательной вытяжки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.14>

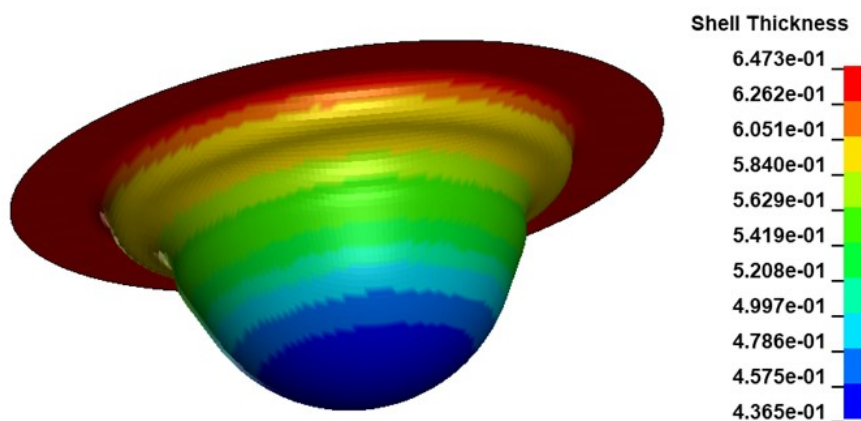


Рисунок 11 - Поле толщины заготовки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.15>

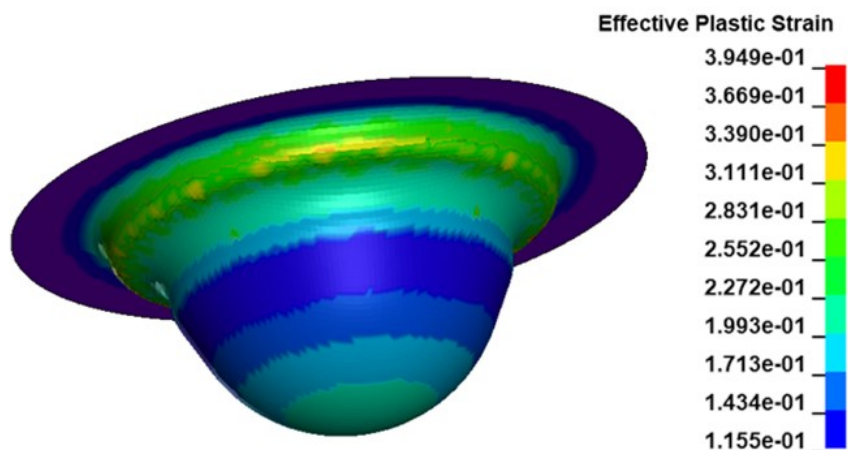


Рисунок 12 - Поле деформаций заготовки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.16>

Из рисунков видно, что деформации в опасном сечении значительно снизились в сравнении с рисунком 8.

После выбора схемы операций вытяжки можно оценить реальный потребный размер заготовки, на основании рассчитанной модели процесса. Все задачи были посчитаны с начальным диаметром заготовки равным 100 мм, при этом конечный потребный диаметр фланца по чертежу детали равен 79 мм. На рисунке 13 представлен диаметр фланца, полученный при моделировании последнего процесса вытяжки.

MM

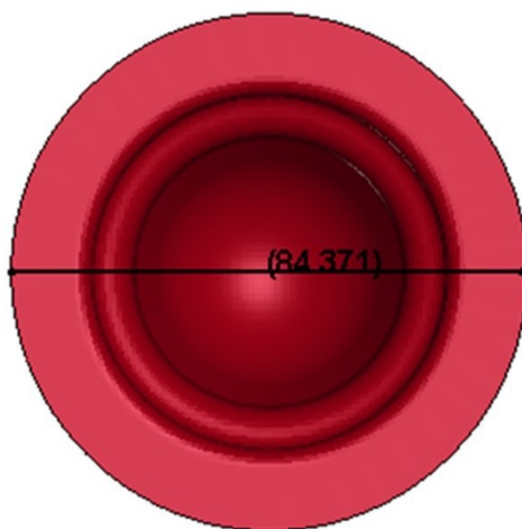


Рисунок 13 - Диаметр фланца из заготовки 100 мм
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.17>

Диаметр фланца больше 84 мм, что не только будет иметь негативный экономический эффект от лишних трат материала при производстве детали, но и повлияет на утонение в нижней части фланца. Ведь чем больше начальный диаметр заготовки, тем больше она сопротивляется затягиванию в полость матрицы.

Был произведён ряд моделирований, с одинаковыми параметрами процесса, но с разным диаметром заготовки. Результаты сведены в таблицу 5.

Таблица 5 - Результаты подбора начального размера заготовки

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.18>

№	Радиус матрицы, мм	Радиус пуансона, мм	Диаметр заготовки, мм	Толщина максимальная, мм	Толщина минимальная, мм	Диаметр фланца, мм
1	4,5	20	100	0,65	0,41	84,4
2	4,5	20	96	0,65	0,44	81,5
3	4,5	20	94	0,65	0,44	79,5

Исходя из таблицы 5 были определены размеры заготовки: 94 мм как минимальный и 96 мм как оптимальный.

Моделирование процесса отбортовки

После вытяжки, необходимо получить отверстие операцией пробивки или сверления. Размер отверстия рассчитан по [7], исходя из равенства длин образующих и равен 20 мм. Схема процесса представлена на рисунке 14.

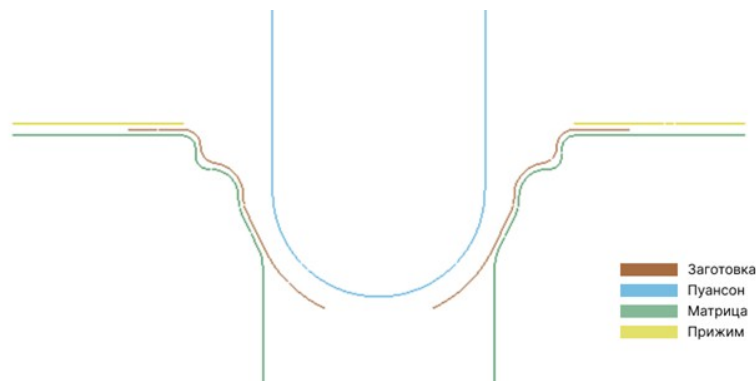


Рисунок 14 - Схема процесса отбортовки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.19>

Результат моделирования с отверстием 20 мм представлен на рисунке 15.

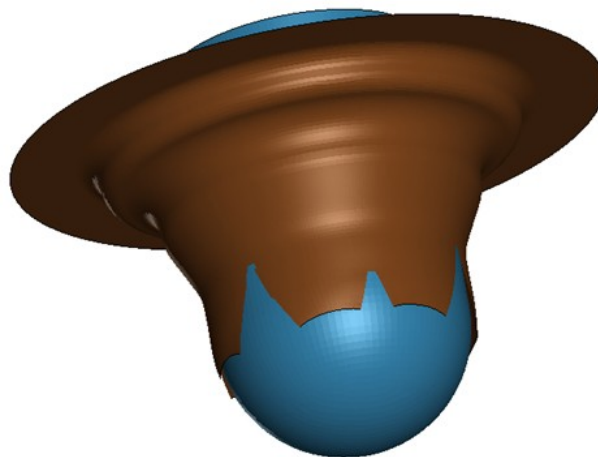


Рисунок 15 - Результат отбортовки с отверстием диаметром 20 мм
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.20>

Из рисунка 15 видно, что произошло разрушение. С целью определения получаемой длины борта, с учётом утонения материала, были произведены расчёты с различными диаметрами отверстий. Результаты сведены в таблицу 6.

Таблица 6 - Результаты моделирования отбортовки с различными диаметрами отверстий

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.21>

Диаметр отверстия, мм	Высота борта, мм
20	разрыв
22	разрыв
24	8,32
26	6,73

Функциональным назначением данного участка детали является площадь поверхности для соединения фланца с трубкой Вентури при помощи точечной сварки, поэтому даже длины в 6,7 мм вполне достаточно для исполнения своего назначения.

Заключение

В результате выполнения работы была разработана технология изготовления детали «Фланец» и решён ряд поставленных задач, а именно:

- 1) произведена оценка возможности получения данной детали методами холодной листовой штамповки, что позволяет определить наиболее подходящий способ производства;
- 2) рассчитаны технологические параметры процесса в соответствии с литературными источниками, обеспечивая точность и соответствие стандартам качества;
- 3) разработана методика проведения вычислительного эксперимента, которая включает в себя: учёт критерия разрушения материала заготовки, утонение материала заготовки и различные схемы деформирования. Она будет полезна для инженеров и ученых, занимающихся разработкой и оптимизацией технологий обработки металлов давлением, а также для специалистов, занимающихся проектированием и изготовлением различных типов деталей. К тому же обратит внимание начинающих специалистов на программный комплекс LS-DYNA для решения своих задач.
- 4) произведён ряд расчётов процесса вытяжки и отбортовки с различными технологическими параметрами, что даёт возможность выбрать оптимальные условия для производства;
- 5) на основании произведённых моделирований были уточнены: размер заготовки, усилие прижима, геометрия пуансона и диаметр отверстия под отбортовку. Это обеспечит более высокую точность и качество получаемых деталей.

Однако целый ряд вопросов связанных интерпретацией результатов численного моделирования требует более тщательного анализа, а именно:

1. Оценка влияния настроек разбиения на конечные элементы на сеточную независимость решения, диапазон изменения начальных условий в которых вычислительная модель верифицируема.
2. Верификации полученной модели требует проведения ряда физических экспериментов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Канарейкин А.И., Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.22>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Kanareikin A.I., Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.153.70.22>

Список литературы / References

1. Комаров А.Д. Штамповка листовых и трубчатых деталей полиуретаном / А.Д. Комаров. — Ленинград : ЛДНТП, 1975. — 36 с.
2. Почекуев Е.Н. Оптимизация процессов листовой штамповки в программах LS-DYNA и LS-OPT / Е.Н. Почекуев, П.Н. Шенбергер, А.Н. Грунюшкин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. — 2020. — № 10. — С. 43–47.
3. Демьяненко Е.Г. Разработка математической модели операции формовки с учетом допущения о плоскодеформированном состоянии / Е.Г. Демьяненко, А.Ю. Косолапова // Сборник трудов ИТНТ-2019, САМАРА, 21–24 мая 2019 года. — Самара : Новая техника, 2019. — С. 91–97.
4. Келлер И.Э. Модель пластического деформирования и разрушения металла при листовой штамповке, расчет технологических процессов и их подтверждение экспериментом / И.Э. Келлер, А.А. Адамов, Д.С. Петухов [и др.] // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики : Сборник трудов. В 4-х томах, Уфа, 19–24 августа 2019 года. Том 3. — Уфа : Башкирский государственный университет, 2019. — С. 316–317.
5. Елизаров Ю.М. Проектирование процессов листовой штамповки на основе уточнения модели материала : специальность 05.03.05 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Елизаров Юрий Михайлович. — Воронеж, 2007. — 16 с. — EDN NJBRGN.
6. Решетников Д.С. Обзор программного обеспечения для расчета пластической деформации металлических материалов методами ОМД / Д.С. Решетников, М.А. Сабирова, М.А. Ахатов // Быстрозакаленные материалы и

покрытия : Материалы XX Международной научно-технической конференции, Москва, 17–18 октября 2023 года. — Москва : Издательство Пробел-2000, 2023. — С. 322–333. — EDN CJKRKP.

7. Попов Е.А. Технология и автоматизация листовой штамповки / Е.А. Попов, В.Г. Ковалев, И.Н. Шубин. — Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. — 479 с.

8. Илюшкин М.В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе LS-DYNA. Теория и семинары / М.В. Илюшкин. — Ульяновск, 2017. — 125 с.

9. Маслов В.Д. Моделирование процессов листовой штамповки в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA / В.Д. Маслов. — Самара : Изд-во СГАУ, 2007. — 80 с.

10. Попов И.П. Исследование процессов штамповки полусфер вытяжкой и обжимом : дис. ...канд. : 05.03.05 : защищена 1976-12-01 : утв. 1976-12-01 / И.П. Попов. — Москва : 1976. — 186 с.

11. Интенсификация кузнечно-штамповочного производства. Прогрессивное оборудование и средства автоматизации в технологических процессахковки и объемной штамповки // Национальная электронная библиотека. — 1989. — URL: https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_dc5eb1aa862fc1471c3221a81941bc38/ (дата обращения: 01.12.2024).

12. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов : Резервы интенсификации / Ф.В. Гречников. — Москва : Машиностроение, 1998. — 445 с.

13. Нестеренко Е.А. Совершенствование процесса глубокой вытяжки тонкостенных осесимметричных деталей в штампе с упругим прижимом / Е.А. Нестеренко // Российская национальная библиотека (РНБ). — 2007. — URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_1300265/ (дата обращения: 01.12.2024).

14. Шпунькин Н.Ф. Основы расчета параметров штамповки листовых деталей и оценка их технологичности / Н.Ф. Шпунькин, С.А. Типалин. — Москва : Университет машиностроения, 2016. — 185 с.

15. Зубцов М.Е. Листовая штамповка : учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Машины и технология обработки металлов давлением" / М.Е. Зубцов. — Владимир : Машиностроение, Ленинградское отделение, 1980. — 432 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Komarov A.D. Shtampovka listovyh i trubchatyh detalej poliuretanom [Stamping of sheet and tubular parts with polyurethane] / A.D. Komarov. — Leningrad : LDNTP, 1975. — 36 p. [in Russian]

2. Pochekuev E.N. Optimizatsiya processov listovoj shtampovki v programmah LS-DYNA i LS-OPT [Optimization of sheet stamping processes in the LS-DYNA and LS-OPT programs] / E.N. Pochekuev, P.N. Schoenberger, A.N. Grunuyshkin // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem [Forging and stamping production. Pressure treatment of materials]. — 2020. — № 10. — P. 43–47. [in Russian]

3. Demyanenko E.G. Razrabotka matematicheskoy modeli operacii formovki s uchetom dopushheniya o plosko-deformirovannom sostojanii [Development of a mathematical model of the forming operation taking into account the assumption of a plane-deformed state] / E.G. Demyanenko, A.Y. Kosolapova // Sbornik trudov ITNT-2019, SAMARA, 21–24 maja 2019 goda [Proceedings of ITNT-2019, SAMARA, May 21–24, 2019]. — Samara : New Technology, 2019. — P. 91–97. [in Russian]

4. Keller I.E. Model' plasticheskogo deformirovaniya i razrusheniya metalla pri listovoj shtampovke, raschet tehnologicheskikh processov i ih podtverzhenie jeksperimentom [A model of plastic deformation and destruction of metal during sheet stamping, calculation of technological processes and their experimental confirmation] / I.E. Keller, A.A. Adamov, D.S. Petukhov [et al.] // XII Vserossijskij s#ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoy i prikladnoj mehaniki [XII All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics] : Proceedings. In 4 volumes, Ufa, August 19–24, 2019. Volume 3]. — Ufa : Bashkir State University, 2019. — P. 316–317. [in Russian]

5. Elizarov Yu.M. Proektirovanie processov listovoj shtampovki na osnove utochneniya modeli materiala [Designing sheet stamping processes based on the refinement of the material model] : specialty 05.03.05 : abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Elizarov Yuri Mikhailovich. — Voronezh, 2007. — 16 p. — EDN NJBRGN. [in Russian]

6. Reshetnikov D.S. Obzor programmnoho obespecheniya dlja rascheta plasticheskoy deformacii metallicheskih materialov metodami OMD [Review of software for calculating plastic deformation of metallic materials by OMD methods] / D.S. Reshetnikov, M.A. Sabirova, M.A. Akhatov // Bystrozakalennye materialy i pokrytija [Quick-hardened materials and coatings] : Proceedings of the XX International Scientific and Technical Conference, Moscow, October 17–18, 2023. — Moscow : Space Publishing House-2000, 2023. — P. 322–333. — EDN CJKRKP. [in Russian]

7. Popov E.A. Tehnologija i avtomatizatsija listovoj shtampovki [Technology and automation of sheet stamping] / E.A. Popov, V.G. Kovalev, I.N. Shubin. — Moscow : MGTU im. N. E. Bauman, 2003. — 479 p. [in Russian]

8. Ilyushkin M.V. Modelirovanie processov obrabotki metallov davleniem v programme LS-DYNA. Teorija i seminar [Modeling of metalworking processes by pressure in the LS-DYNA program. Theory and seminars] / M.V. Ilyushkin. — Ulyanovsk, 2017. — 125 p. [in Russian]

9. Maslov V.D. Modelirovanie protsessov listovoj shtampovki v programmnom komplekse ANSYS/LS-DYNA [Modeling of sheet stamping processes in the ANSYS/LS-DYNA software package] / V.D. Maslov. — Samara : Izd-vo SGAU, 2007. — 80 p. [in Russian]

10. Popov I.P. Issledovanie protsessov shtampovki polusfer vytjazhkoj i obzhimom [Investigation of the processes of stamping hemispheres by drawing and crimping] : dis....of PhD in Engineering : 05.03.05 : defense of the thesis 1976-12-01 : approved 1976-12-01 / I.P. Popov. — Moscow : 1976. — 186 p. [in Russian]

11. Intensifikatsija kuznechno-shtampovochnogo proizvodstva. Progressivnoe oborudovanie i sredstva avtomatizatsii v tehnologicheskikh protsessah kovki i ob'emnoj shtampovki [Intensification of forging and stamping production. Advanced technological processes of forging and stamping production. Advanced

equipment and automation tools in the technological processes of forging and volumetric stamping] // National Electronic Library. — 1989. — URL: https://rusneb.ru/catalog/010003_000061_dc5eb1aa862fc1471c3221a81941bc38/ (accessed: 01.12.2024). [in Russian]

12. Grechnikov F.V. Deformirovanie anizotropnyh materialov : Rezervy intensivifikatsii [Deformation of anisotropic materials : Reserves of intensification] / F.V. Grechnikov. — Moscow : Mashinostroenie, 1998. — 445 p. [in Russian]

13. Nesterenko E.A. Sovershenstvovanie protsessa glubokoj vytjazhki tonkostennyh osesimmetrichnyh detalej v shtampe s uprugim prizhimom [Improvement of the deep drawing process of thin-walled axisymmetric parts in a die with an elastic clamp] / E.A. Nesterenko // The Russian National Library (RNL). — 2007. — URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_1300265/ (accessed: 01.12.2024). [in Russian]

14. Shpun'kin N.F. Osnovy rascheta parametrov shtampovki listovyh detalej i otsenka ih tehnologichnosti [The basics of calculating the parameters of stamping sheet metal parts and evaluating their manufacturability] / N.F. Shpun'kin, S.A. Tipalin. — Moscow : Universitet mashinostroenija, 2016. — 185 p. [in Russian]

15. Zubtsov M.E. Listovaja shtampovka [Sheet stamping] : a textbook for university students studying in the specialty "Machines and technology of metalworking by pressure" / M.E. Zubtsov. — Vladimir : Mashinostroenie, Leningradskoe otdelenie, 1980. — 432 p. [in Russian]