

На правах рукописи

**ЛО СИНЬ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫТЯЖКИ ТОНКОСТЕННЫХ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ БЕЗ ПРИЖИМА**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

*Ло Сить*

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре технологий обработки давлением федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

**Научный руководитель:** Евсюков Сергей Александрович  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** Ремнев Кирилл Сергеевич,  
доктор технических наук, доцент кафедры  
«Автомобили и автомобильное хозяйство»  
ФГБОУ ВО «Тульский Государственный  
университет»

Харсеев Виталий Евгеньевич  
кандидат технических наук,  
специалист технической поддержки  
ООО «КванторФорм»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Московский политехнический  
университет»

Защита состоится «   » \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.04 при ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

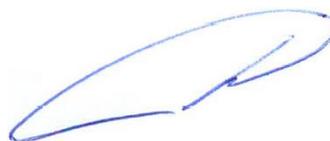
Телефон для справок 8 (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 212.141.04  
кандидат технических наук, доцент



Плохих А.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Тонкостенные пустотелые детали являются достаточно распространенными изделиями (колпачки, гильзы, стаканы, баллоны и т.д.), применяемыми в современной технике. Основным способом их изготовления в современном машиностроении является вытяжка из листовых заготовок в цилиндрическую матрицу с прижимом. При этом для каждой детали требуется изготовить свой индивидуальный штамп, включающий матрицу, пуансон, прижим и вспомогательные детали, что составляет основную часть затрат на подготовку производства. В тех случаях, когда высота детали существенно больше ее диаметра, приходится использовать несколько переходов вытяжки. А для каждого перехода вытяжки необходимо спроектировать и изготовить свой отдельный штамп, с использованием дорогостоящей инструментальной и конструкционной сталей.

Сократить расход материалов и уменьшить трудозатраты при изготовлении можно при упрощении конструкции штампов, в частности за счет исключения прижима. Однако, исключение прижима и сопутствующих ему дополнительных деталей при вытяжке в цилиндрическую матрицу, возможно только при изготовлении деталей, для которых требуется незначительное формоизменение (максимальный коэффициент вытяжки для наиболее распространенных относительных толщин (0,5-1,0) % заготовок находится в пределах 1,25-1,3). При больших коэффициентах вытяжки без прижима во фланце заготовки образуются гофры, препятствующие получению годной детали.

Поэтому большой научный и практический интерес представляет поиск путей выполнения вытяжки при увеличенных коэффициентах формоизменения. Одним из возможных путей достижения подобного результата, является вытяжка в коническую матрицу. В этом случае прижим и сопутствующие ему детали исключатся из конструкции штампа, что упростит изготовление и эксплуатацию штамповой оснастки. Но главное, максимальное формоизменение (максимально допустимый коэффициент вытяжки) при этом превосходит максимальное формоизменение при вытяжке в цилиндрическую матрицу с прижимом, что снижает число переходов штамповки. Это позволит достичь значительной экономии трудозатрат и материалов.

Ограничением формоизменения при вытяжке в коническую матрицу без прижима в одних случаях является потеря устойчивости фланцем заготовки, в других отрыв доньшка детали.

К сожалению, несмотря на значительное количество работ посвященных изучению вытяжки пустотелых деталей, процессы вытяжки без использования прижима еще недостаточно изучены, что сдерживает их широкое внедрение в промышленность. Основная сложность при изучении процессов вытяжки без прижима заключается в предсказании потери устойчивости заготовкой в процессе формоизменения и определении допустимых коэффициентов вытяжки в зависимости от геометрических параметров матриц и относительной толщины заготовок.

**Цель работы:** Совершенствование процессов вытяжки тонкостенных цилиндрических деталей путем увеличения максимального коэффициента формоизменения и исключения прижима, обеспечивающих уменьшение числа переходов штамповки и сокращение затрат на производство.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ современного состояния технологий вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок в штампах без использования прижимов;
2. Провести аналитическое исследование операции вытяжки в цилиндрическую матрицу без прижима для определения особенностей потери устойчивости заготовкой, используя различные выражения для функции прогиба и кривой упрочнения;
3. Разработать компьютерные модели процессов вытяжки цилиндрических деталей без использования прижимов из листовых заготовок в штампах с цилиндрическими и коническими матрицами и определить на основе компьютерного моделирования силовые параметры процессов и закономерности деформации заготовок;
4. Спроектировать экспериментальную штамповую оснастку и провести экспериментальную проверку разработанных математических моделей процессов вытяжки цилиндрических деталей в штампах без использования прижимов;
5. Разработать методику проектирования технологических процессов вытяжки тонкостенных цилиндрических деталей без прижима.

**Область исследований** (по паспорту специальности). Технологии листовой штамповки.

**Объектом исследования** являются процессы вытяжки тонкостенных цилиндрических деталей из листовых заготовок без использования прижима.

**Предметом исследования** являются условия потери устойчивости и зависимости величины максимального коэффициента вытяжки от относительной толщины заготовки, формы и геометрических параметров вытяжных матриц.

**Методы исследования.** Теоретические исследования процесса формоизменения заготовки при вытяжке цилиндрических деталей из листовых заготовок в цилиндрическую матрицу без использования прижимов проводились с помощью энергетического метода с учетом принятия обоснованных допущений.

Численное моделирование проводилось с использованием специализированных комплексов математического моделирования AUTOFORM и DYNAFORM.

Экспериментальные исследования проводились на универсальной испытательной машине INSTRON.

В качестве материала для исследований использовались листовые заготовки из стали 08пс.

**Достоверность результатов** подтверждается хорошим совпадением теоретических зависимостей с результатами экспериментов, проведенными соискателем, а также с опубликованными результатами экспериментов других авторов. Методики построения математических моделей базируются на общепринятых положениях математической теории пластичности.

**Научная новизна** заключается в:

1. Полученной аналитической зависимости предельного коэффициента вытяжки в цилиндрическую матрицу без прижима от относительной толщины заготовки, позволяющей определить условия проведения вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок из стали 08пс на первом переходе без образования брака в виде складок;

2. Впервые полученной аналитической зависимости предельного коэффициента вытяжки в коническую матрицу без прижима от относительной толщины заготовки, позволяющей определить условия проведения вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок из стали 08пс на первом переходе без образования брака в виде складок и трещин;

3. Впервые полученной аналитической зависимости оптимального угла конусности матрицы от относительной толщины заготовки для вытяжки без прижима, позволяющего получить наибольшее формоизменение при проведении вытяжки цилиндрических деталей из листовых заготовок из стали 08пс на первом переходе без образования брака в виде складок и трещин;

4. Созданных компьютерных моделей в программных комплексах DYNIFORM и AUTOFORM процессов вытяжки цилиндрических деталей в цилиндрическую и коническую матрицы без использования прижимов и установленных на их основе закономерностях деформации заготовок, в зависимости от параметров технологических процессов.

5. Выявленном механизме гофрообразования при вытяжке в коническую матрицу без использования прижимов при смещении оси заготовки относительно оси матрицы, заключающемся в образовании только одного гофра.

**Практическая значимость** заключается в:

1. Разработанной методике проектирования технологических процессов вытяжки тонкостенных цилиндрических деталей без прижима.

2. Установленных значениях максимальных коэффициентов формоизменения для осуществления вытяжки в цилиндрическую и в коническую матрицы без прижима из стали 08пс, обеспечивающих получение тонкостенных цилиндрических деталей без брака в виде трещин или складок во фланце;

**Апробация работы.** Основные положения и материалы работы доложены и обсуждены на: Международной научной конференции «Будущее машиностроения России» (Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017), на XII конгрессе «Кузнец-2015» (Рязань: ОАО «Тяжпрессмаш», 2015), на VI Международной научной конференции «Техника и технологии» (Омск: ОГТУ, 2017), на научных семинарах кафедры «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2018-2020 г.г.

**Основные положения, выносимый на защиту:**

1. Установленная закономерность изменения механизма гофрообразования при вытяжке в коническую матрицу в случае смещения оси заготовки относительно оси матрицы;

2. Результаты теоретического исследования операции вытяжки в штампах с цилиндрическими матрицами без использования прижимов, для оценки возможности потери устойчивости;

3. Результаты компьютерного моделирования операций вытяжки в штампах с цилиндрическими и коническими матрицами без использования прижима;

4. Результаты экспериментального исследования операции вытяжки в коническую матрицу без использования прижима, в зависимости от угла конусности матрицы.

**Личный вклад автора состоит:**

- в проведении аналитического обзора научно-технической информации по теме исследования в российской и зарубежной литературе;

- в разработке математических моделей процессов вытяжки без использования прижима;

- в проведении математического моделирования процессов вытяжки без использования прижима;

- в подготовке и проведении экспериментальных исследований;

- в обработке и анализе экспериментальных данных.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав основного текста, общих выводов и приложений. Общий объем диссертации составляет 181 страницу. Диссертация содержит 102 рисунков, 52 таблицы и список литературы из 111 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее научная новизна и практическая значимость, определены цель и задачи исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ существующих технологических процессов изготовления осесимметричных деталей методами вытяжки. Рассмотрено современное состояние теоретических и экспериментальных исследований операций вытяжки. Обоснована постановка задач исследований.

Отмечается значительный вклад в исследование операций вытяжки российских и зарубежных ученых, таких как Е.А.Попов, С.И.Губкин, М.Е.Зубцов, А.Д.Матвеев, В.И.Ершов, А.Г.Овчинников, Ю.А.Аверкиев, С.П.Яковлев, С.С.Яковлев, В.Д.Головлев, И.Н.Шубин, Э.Л.Мельников, В.П.Романовский, Л.А.Шофман, Ф.В.Гречников, И.П.Попов, С.А.Евсюков, В.Ф.Константинов, Л.И.Рудман, С.А.Валиев, В.Д.Кухарь, К.С.Ремнев, Z.Marciniak, Q.S.Kong, Z.Q.Yu, Y.X.Zhao, S.P.Timoshenko, R.Soweby, R.Narayanasamy, C.Loganathan, L.C.Zhang, T.X.Yu, A.L. Mahdawle, P.B.Mellor, P.Tugcu, B.W.Seinor, Kawai Nozomu, W. Johnson, J. Cao, L. Hill, N. Triantafyllidis, A. Needleman и других.

**Вторая глава** посвящена аналитическому исследованию особенностей потери устойчивости заготовкой при операции вытяжки в цилиндрическую матрицу без прижима. При этом были использованы различные выражения для функции прогиба и кривой упрочнения. Условия потери устойчивости в виде образования складок во фланце тонколистовой заготовки (кольцевой пластины с внутренним отверстием) были исследованы на основе энергетического метода.

В качестве расчетной схемы была принята тонкая кольцевая пластина, нагруженная по внутреннему отверстию растягивающими напряжениями (Рис.1).

При энергетическом методе считается, что если виртуальная работа, вызываемая малым возможным смещением, не превышает приращения накопленной энергии деформации, то можно считать, что система устойчива. Если это условие не выполнено для некоторого возможного смещения, то избыток энергии будет отражен как кинетическая энергия для образования складок, тогда система неустойчива. Изменение общей энергии системы запишется так

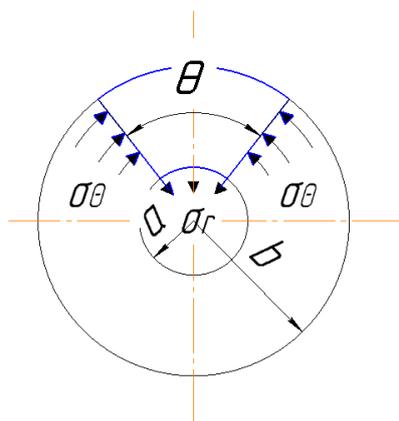


Рис.1. Распределение напряжений в кольцевой пластине  
 $a$  - внутренний радиус;  
 $b$  внешний радиус

$$\Delta\Pi = U - T \quad (1)$$

где  $U$ - энергия деформации (внутренняя энергия),  $T$ - работа внешних сил.

Если  $\Delta\Pi < 0$ , то образуется складка. Если  $\Delta\Pi > 0$ , то складки отсутствуют.

Чтобы вычислить значения  $\Delta\Pi$  надо знать конкретную функцию прогиба  $\omega$ , которая соответствует граничными условиям процесса вытяжки в цилиндрическую матрицу без прижима. В диссертации для вычисления изменение полной потенциальной энергии были выбраны две функция прогиба (2) и (3). Одна функция прогиба (2) больше используется в зарубежных работах, а функция прогиба (3) встречается в российских работах.

$$\omega = \omega_0(r - a)(1 + \cos N\theta) \quad (2)$$

$$\omega = \omega_0 \left[ 1 - \cos \frac{\pi}{2(b - a)}(r - a) \right] \sin \frac{N\theta}{2} \quad (3)$$

где  $\omega_0$  – постоянная, равная максимальной амплитуде волны;  $r$  – радиус рассматриваемого элемент во фланце;  $a$  –внутренний радиус фланца;  $b$  –внешний радиус фланца;  $N$ – количество волн.

Меридиональные и тангенциальные напряжения определялись по методике Е. А. Попова. А при расчетах использовались средние значения этих величин во фланце. Для упрощения анализа интенсивность напряжений  $\sigma_i$  приравнивали к напряжению текучести. А в качестве деформации для кривой упрочнения использовали тангенциальную деформацию по среднему диаметру фланца.

После проверки адекватности, полученных зависимостей для описания потери устойчивости на известных из литературы экспериментальных данных, они были использованы для определения предельных диаметров (а значит и максимальных коэффициентов вытяжки). Вычисления выполнялись в программном комплексе Mathcad.

Схема вычисления предельного диаметра заготовки в процессе вытяжки в цилиндрическую матрицу без прижима следующая. Сначала задают начальный диаметр  $D$  заготовки. Далее, считая, что при вытяжке диаметр фланца уменьшается на 1 мм ( $D_1 = D - 1$ ), вычисляют  $\Delta\Pi$  при текущем диаметре  $D_1$  с разным числом волн  $N$ , которое последовательно меняется от 2 до 30. Если для всех  $N$  величина  $\Delta\Pi > 0$ , то это значит, что во фланце заготовки не образуются складки. Тогда уменьшаем текущий диаметр заготовки (продолжаем вытяжку) на 1 мм, и вычисляем  $\Delta\Pi$  при текущем диаметре  $D_2$  ( $D_2 = D_1 - 1$ ). Если

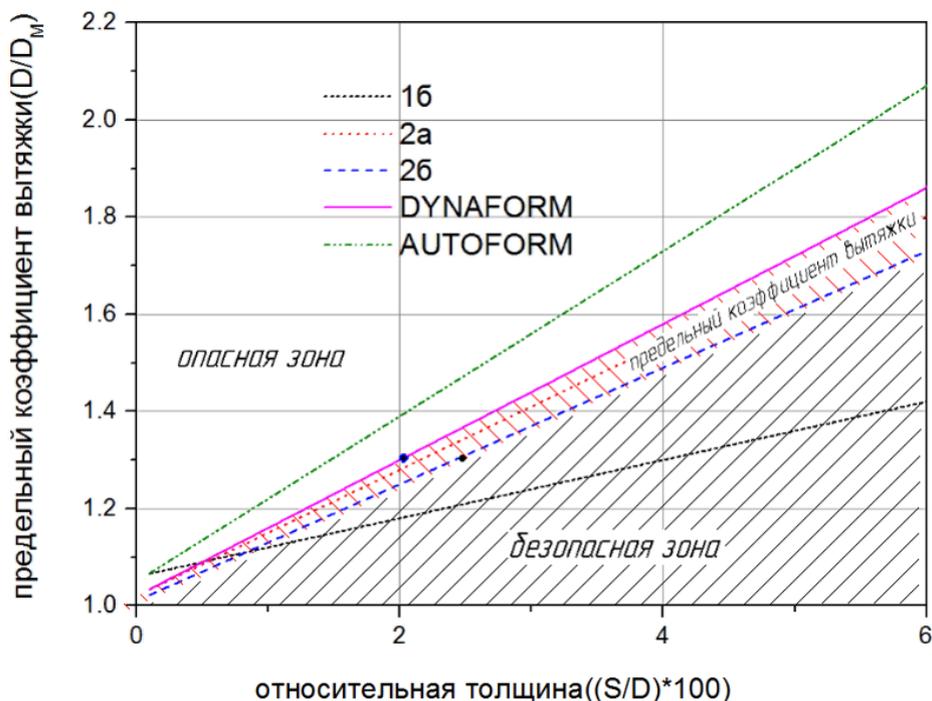


Рис.2. Зависимости предельного коэффициента вытяжки от относительной толщины заготовки.

при каком-то текущем диаметре заготовки  $D_n$  существует такое число волн  $N$ , для которого  $\Delta\Pi < 0$ , то считаем, что при этом диаметре у заготовки во фланце образуются складки. Если образовались складки ( $\Delta\Pi < 0$ ), то уменьшаем начальный диаметр заготовки  $D$  на 1 мм и повторяем цикл. Если при уменьшении текущего диаметра заготовки до диаметра матрицы, для всех диаметров  $\Delta\Pi > 0$ , то считаем что при данной толщине заданный диаметр заготовки, можно вытягивать в цилиндрическую матрицу без прижима без образования складок. Следовательно, предельный коэффициент вытяжки  $k = D/D_m$  будет соответствовать именно этому диаметру. Результаты вычисления предельного коэффициента вытяжки, для различных толщин заготовки показаны на Рис.2. Кривые 1б и 2б получены с использованием зависимости (3), а кривая 2а получена с использованием зависимости (2).

На Рис.2 видно, что предельный коэффициент вытяжки увеличивается с увеличением относительной толщины заготовки. Причем результаты, полученные при различных функциях прогиба, имеют схожий характер.

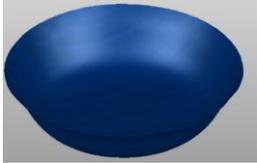
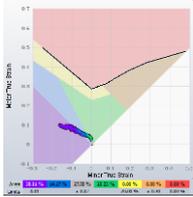
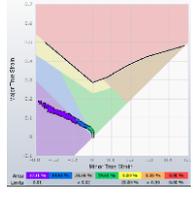
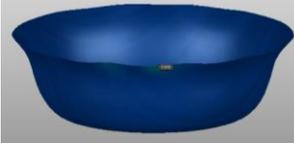
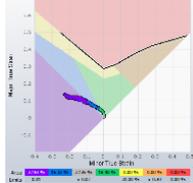
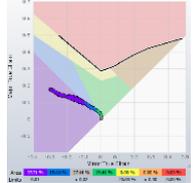
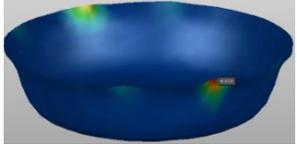
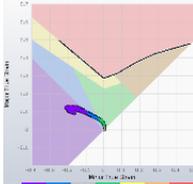
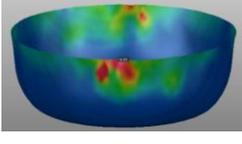
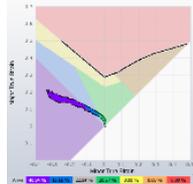
**В третьей главе** выполнено всестороннее компьютерное моделирование вытяжки в цилиндрическую и коническую матрицы без прижима, которое проводилось с использованием программных комплексов AUTOFORM и DYNAFORM.

При моделировании матрица и пуансон принимались абсолютно твердыми, в качестве закона контактного трения был использован закон Амонтона-Кулона, а коэффициент трения для моделирования принимался равным  $\mu = 0,23$  на всех контактных поверхностях. Данное значение было определено на основе инверсного подхода по результатам сравнения моделирования с экспериментами. Одним

из важных параметров при моделировании в программном комплексе DYNIFORM является скоростью деформации. Чтобы сократить время вычисления виртуальные скорости деформирования (после верификации) приняли равными 2000 мм/с.

Таблица 1.

Результаты моделирования в AUTOFORM

Диаметр заготовки	В процессе вытяжки		Конечная деталь		Current wrinkles
		FLD		FLD	
56 мм	 C=0 без складок		 C=0 без складок		
57 мм	 C=0,016 складки		 C=0,016 складок нет		
58 мм	 C=0,1 складки		 C=0,264 складки		

В программном комплексе AUTOFORM для определения потери устойчивости заготовкой есть функция «показать складку» в заготовке. Чем больше значение критерия «С» (current wrinkles – существующая складка), тем больше вероятность появления складки. Было установлено (Таблица 1), что при малых значениях критерия, возникшая складка может расправиться. В дальнейшем считали, что если значение критерия складкообразования в программном комплексе AUTOFORM в процессе вытяжки достигало величины 0,1, то в заготовке образовывались не исправимые складки. Момент появления складок в DYNIFORM определяли следующим образом.

На Рис.3 показано распределение толщины во фланце заготовки. До того момента, пока складка не образовалась распределение толщины во фланце заготовки равномерное, осесимметричное. С началом образования складок равномерность распределения толщины во фланце нарушается. Это хорошо видно на Рис.3, где показано появление 8 гофр.

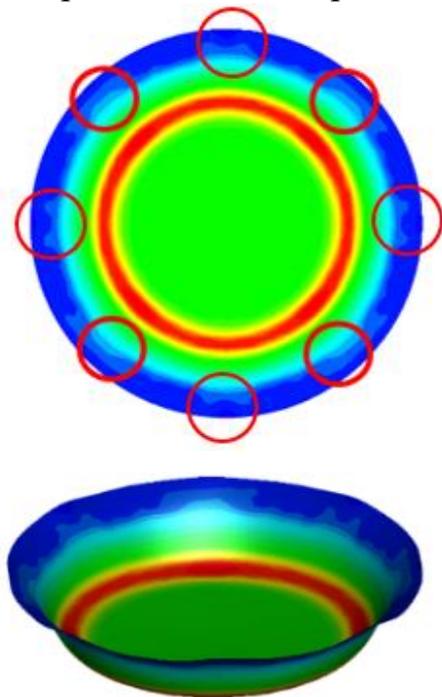


Рис.3. Распределение толщины во фланце заготовки в DYNAFORM

Первоначально исследовали влияние относительной толщины заготовки на предельный коэффициент вытяжки. Результаты моделирования показали, что с увеличением относительной толщины заготовки, предельный коэффициент вытяжки увеличивается. В результате моделирования также было установлено, что в процессе вытяжки возможно образование складки, которая к концу процесса формоизменения исправляется.

С помощью программы ORIGIN, получили математические выражения (4) для определения предельного коэффициента вытяжки в цилиндрическую матрицу без прижима в зависимости от относительной толщины заготовки.

$$0,14 \left( \frac{S}{D} * 100 \right) + 1,02 < k < 0,12 \left( \frac{S}{D} * 100 \right) + 1,01 \quad (4)$$

Чтобы узнать влияние радиуса закругления кромки матрицы на предельный коэффициент вытяжки, варьировали при моделировании величиной этого радиуса при постоянной толщине заготовки  $S=1,0$  мм. Установили, что с увеличением относительного радиуса скругления кромки матрицы, предельный коэффициент вытяжки увеличивается. При этом относительная толщина заготовки имеет на предельный коэффициент вытяжки в цилиндрическую матрицу большее влияние, чем радиус скругления кромки матрицы.

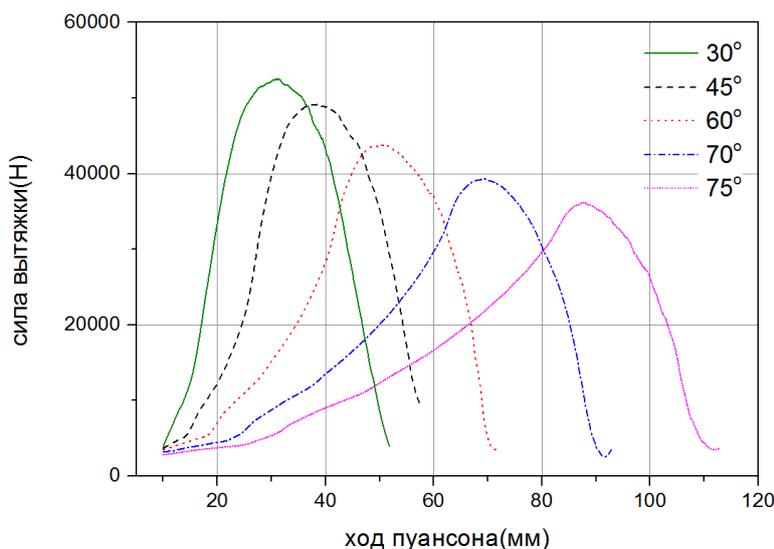


Рис.4. Зависимости силы деформирования от хода пуансона при разных углах конусности матриц

коэффициент вытяжки ( $K=D/D_M$ ).

В этом исследовании использовали только программный комплекс DYNIFORM, потому что результаты моделирования в нем оказались более точны по сравнению с AUTOFORM. Материалом для моделирования была принята сталь 08пс, которая использовалась при экспериментах. В результате испытания на растяжение плоских образцов, вырезанных под углами 0, 90 и 45 градусов с направлением прокатки, были получены кривая упрочнения и величина модуля упругости, которые были использованы при моделировании.

Некоторые графики «сила вытяжки - ход пуансона» при разных углах конусности матрицы показаны на Рис.4. Диаметр исходной заготовки во всех случаях был одинаковым и составлял 78 мм. Это позволило получить годную деталь при всех углах конусности. На Рис.3 видно, что характер изменения каждого из графиков одинаковый. Однако, при этом с увеличением угла конусности матрицы, максимальная сила вытяжки уменьшается, а ход деформирования увеличивается.

При моделировании были рассмотрели виды брака, возникающего в процессе вытяжки в коническую матрицу при углах конусности с толщинами заготовки 0,5 мм и 1,0 мм. Для их выявления в процессе моделирования увеличивали диаметр заготовки до появления брака. Результат моделирования показан на Рис.5. При

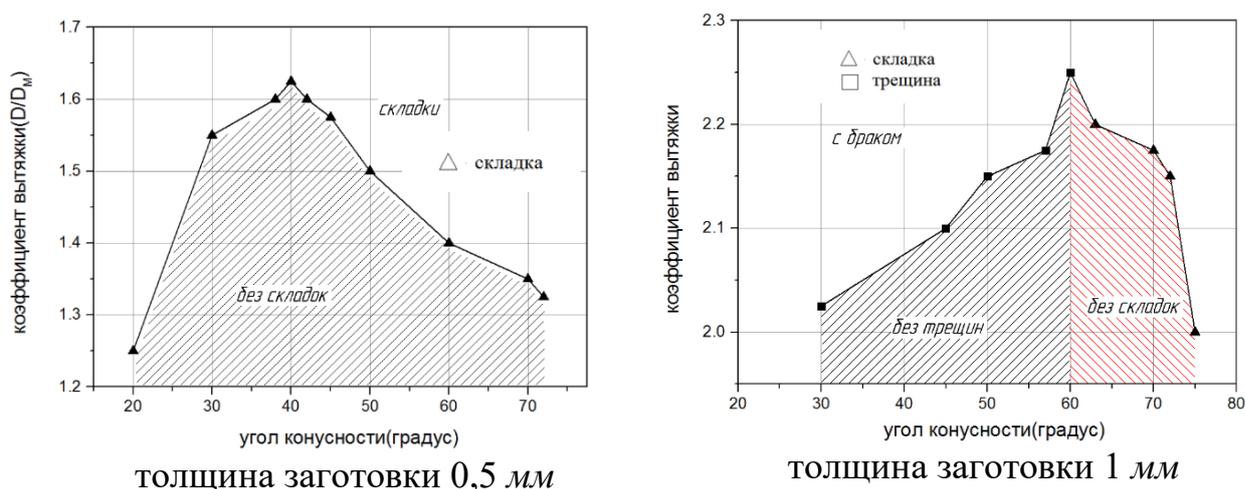


Рис.5. Зависимость предельного коэффициента вытяжки от угла конусности матрицы

этом было установлено, что ограничением нормального протекания операции вытяжки в конической матрице без прижима является либо появление трещины (отрыв доньшка), либо образование складки. А какой вид брак появится раньше зависит от толщины заготовки и от угла конусности матрицы.

После обработки результатов моделирования вытяжки при разных толщинах заготовки (0,5 мм, 0,75 мм, 1,0 мм, 1,25 мм и 1,5 мм) и при разных углах конусности (от 20 до 75 с интервалом 10°) с помощью программы ORIGIN получили математические соотношения (5) и (6) для определения максимального коэффициента вытяжки и оптимального угла конусности матрицы.

$$k = 2,49 \left( \frac{S}{D} * 100 \right) - 0,6 \left( \frac{S}{D} * 100 \right)^2 + 0,13 \quad (5)$$

$$\alpha = 115 \left( \frac{S}{D} * 100 \right) - 35 \left( \frac{S}{D} * 100 \right)^2 - 27 \quad (6)$$

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований, которые проводились на кафедре технологии обработки давлением (МТб) МГТУ им. Н. Э. Баумана на испытательной машине INSTRON с номинальной силой 600кН. Для проведения эксперимента были изготовлены пуансоны и конические матрицы, представленные на Рис.6.



Рис.6. Экспериментальная оснастка.

- 1- Коническая матрица с углом конусности  $30^\circ$ ;
- 2- Коническая матрица с углом конусности  $60^\circ$ ;
- 3- Коническая матрица с углом конусности  $72^\circ$

С целью облегчения момента начала потери устойчивости в процессе вытяжки и исключения исправления складки между матрицей и пуансоном, зазор между ними был выбран больше толщины заготовок. После вытяжки кружков разных диаметров на проход, визуально определяли наличие складок.

Сравнение результатов моделирования предельного коэффициента вытяжки в цилиндрическую матрицу (Рис.7) с экспериментом, установлено, что моделирование в программных комплексах DYNAFORM (погрешность 1,9%) и AUTOFORM (погрешность 7,7%) адекватно отражают процесс потери устойчивости фланцем заготовки при вытяжке в цилиндрическую матрицу без прижима. При этом точность моделирования в программном комплексе DYNAFORM оказалась несколько лучше. Поэтому для моделирования вытяжки в коническую матрицу был принят программный комплекс DYNAFORM.

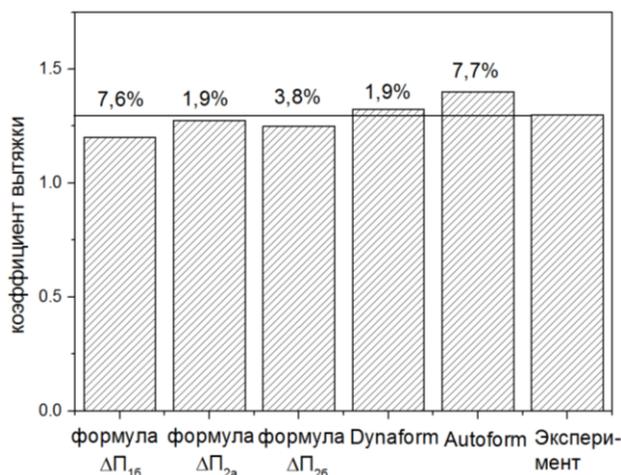


Рис.7. Сравнение результатов вычисления и моделирования с экспериментом

аналогичные данные при различных значениях коэффициента трения. Коэффициент трения, обеспечивший наилучшее совпадение результатов, был использован при моделировании.

### Определение коэффициента трения

для анализа операций вытяжки производилось с помощью дополненного инверсного подхода, который состоял в следующем. Сначала проводилась экспериментальная вытяжка, в процессе которой были получены экспериментальные зависимости силы деформирования от перемещения. По полученным диаграммам определялись максимальные силы и работа деформации. Далее с помощью моделирования получали

В качестве примера на Рис.8 представлены результаты определения коэффициента трения инверсным методом по результатам вытяжки в коническую матрицу

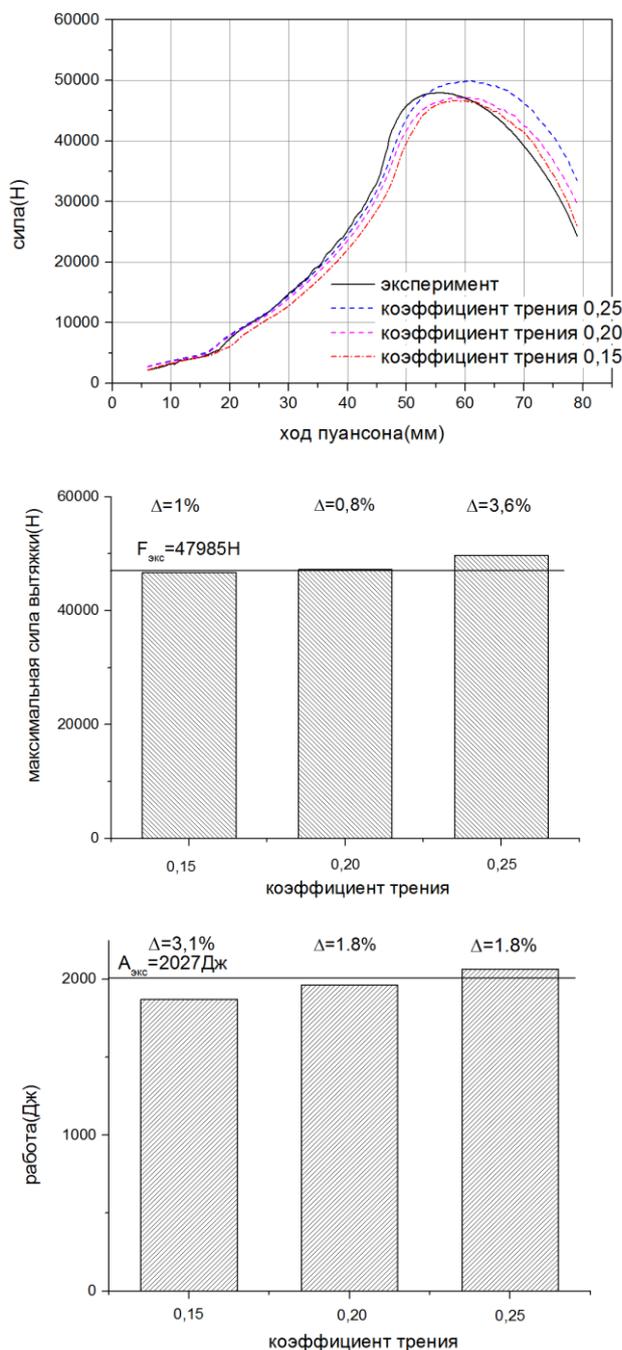


Рис.8. Графики максимальной силы и работы деформации матрицы  $30^\circ$ , составила 2,5 %.

На Рис. 9 представлены результаты измерения толщины заготовки вдоль образующей при вытяжке в коническую матрицу (диаметр заготовки 90 мм при угле конусности  $60^\circ$ ). Отметим, что максимальное утонение и утолщение в эксперименте и при моделировании близки и количественно (Таблица 4), и по месту расположения.

без прижима при угле конусности  $60^\circ$  матрицы для заготовки из стали 08пс толщиной 1 мм и диаметром 90 мм. Из графиков следует, что наиболее точное численное совпадение результатов будет при коэффициенте трения в пределах 0,2-0,25. Поэтому при моделировании принимали значение коэффициента трения равным 0,23.

Детали, полученные вытяжкой в коническую матрицу без прижима и результаты моделирования в программном комплексе DYNAFORM, показаны в Таблице 2. По результатам эксперимента установлено, что в процессе вытяжки в коническую матрицу без прижима главными видами брака являются складкообразование и трещина вблизи закругления дна пуансона. При моделировании было обнаружено тоже самое явление.

Фактором, влияющим на предельный коэффициент вытяжки, является угол конусности матрицы. Сравнение значений предельных коэффициентов вытяжки в коническую матрицу без прижима, полученных экспериментально и с помощью компьютерного моделирования, представлены в Таблице 3. Как следует из данных Таблицы 3, результаты моделирования и эксперимента имеют хорошую сходимость. Максимальная погрешность, полученная при угле конусности матрицы

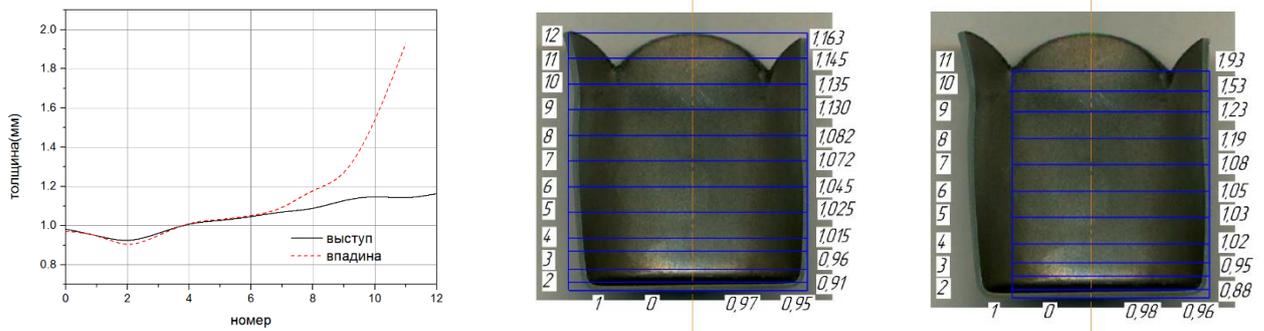


Рис.9. Распределение толщины стенки у детали

Таблица 2.

Результаты эксперимента вытяжки в коническую матрицу

Угол 30°, D=79 мм		Угол 60°, D=90 мм		Угол 72°, D=86 мм	
Угол 30°, D=83 мм		Угол 60°, D=94 мм		Угол 72°, D=86 мм	

Таблица 3.

Предельный диаметр заготовки и предельный коэффициент вытяжки в эксперименте и моделировании

Угол конусности	Эксперименте	Предельный коэффициент (эксперимент)	Моделировании	Предельный коэффициент (моделирование)	Погрешность
30°	79 мм	1,975	81 мм	2,025	2,5%
60°	90 мм	2,25	91 мм	2,275	1,0%
72°	86 мм	2,15	86 мм	2,15	0 %

Таблица 4.

Сравнение утонения и утолщения при вытяжке

Угол	D	Минимальная толщина (мм)					Максимальная толщина (мм)				
		Впадина	Выступ	Среднее	Моделир.	Ошибка	Впадина	Выступ	Среднее	Моделир.	Ошибка
60°	86	0,87	0,90	0,89	0,86	2,3%	1,78	1,14	1,46	1,50	2,7%
72°	86	0,92	0,95	0,92	0,90	2,1%	1,77	1,12	1,45	1,49	2,7%

В работе исследовался момент образования трещины. Резкое падение силы вытяжки означает момент появления трещины. В этих операциях, трещина вблизи дна заготовки появлялась и при моделировании в Dynaform, и в эксперименте. Типовые графики показаны на Рис.10. Максимальная погрешность составила 9% при определении максимальной силы вытяжки и 11% при определении ход пуансона до момента разрыва.

При вытяжке в коническую матрицу разрушение происходит после полного соприкосновения заготовки со стенками и скругленной кромкой матрицы из-за

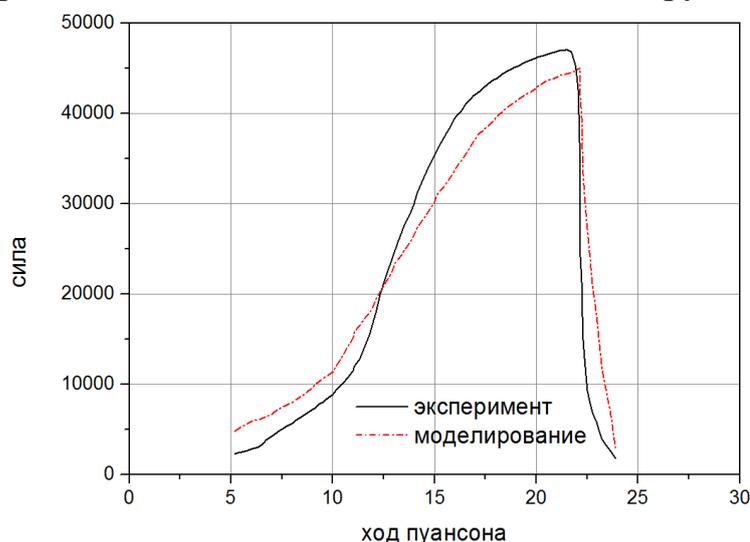


Рис.10. Изменение силы вытяжки при отрыве до-

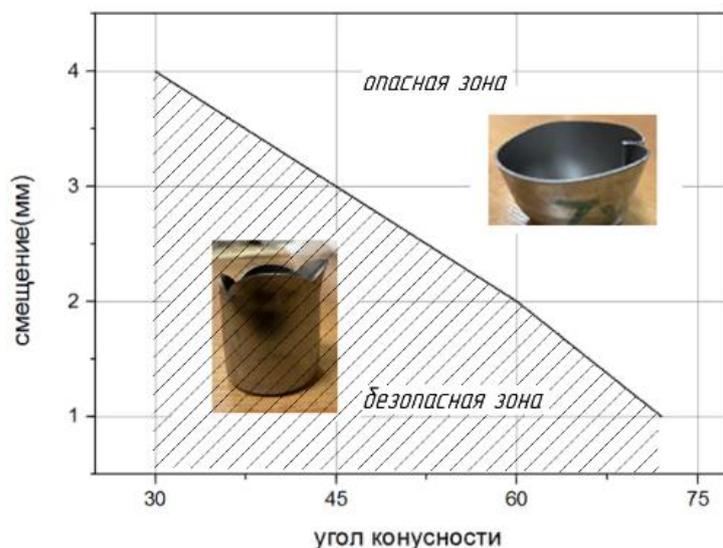


Рис.11. Зависимость смещения от угла конусности нышка

являются в появлении только одного гофра (Рис.11). Установлено, что критическая смещения осей заготовки и матрицы, при которых происходит изменения характера формоизменения, зависит от толщины заготовки и угла конусности матрицы. Причем с увеличением угла конусности матрицы эта величина уменьшается.

увеличения растягивающего меридионального напряжения, а складки появляются под действием сжимающих тангенциальных напряжений, когда заготовки деформируются в конической части матрицы. Поэтому коэффициент трения имеет сильное влияние на предельный диаметр заготовки только в зоне «трещина». В зоне «складка», коэффициент трения не имеет столь сильного влияния на предельный коэффициент вытяжки. Причем с увеличением угла конусности матрицы влияние коэффициента трения на предельный коэффициент вытяжки уменьшается.

Проведенные исследования вытяжки в коническую матрицу без прижима выявили особенности в механизме образования гофр при отсутствии соосности заготовки и матрицы, которые прояв-

В пятой главе приведена методика проектирования технологических процессов вытяжки цилиндрических деталей без прижима (Рис.12) и примеры ее использования для конкретных деталей.

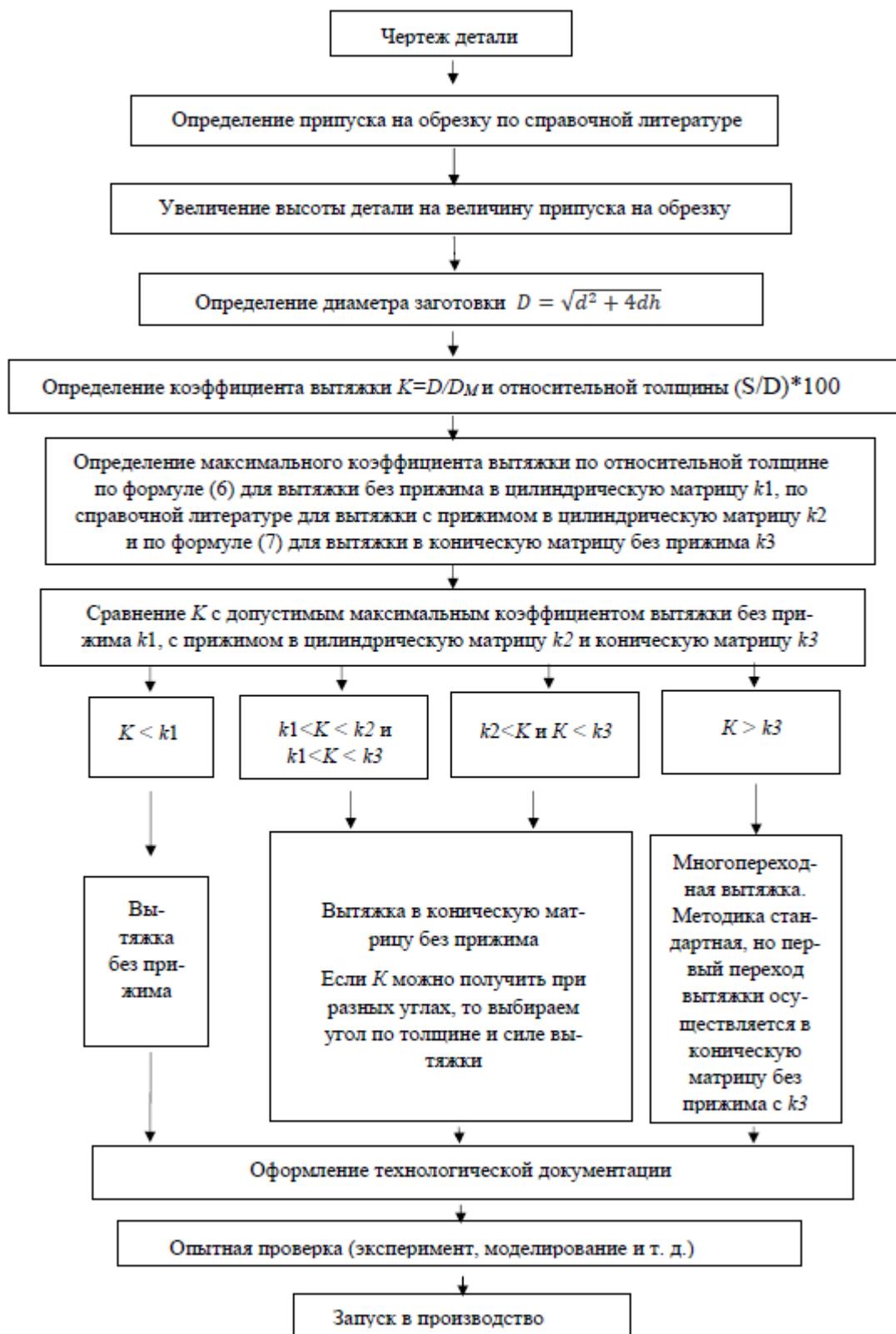


Рис.12. Методика проектирования технологических процессов вытяжки цилиндрических деталей без прижима.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе изложены научно обоснованные технологические решения, направленные на совершенствование процессов вытяжки тонкостенных цилиндрических деталей без прижима путем увеличения максимального коэффициента формоизменения, обеспечивающее уменьшение числа переходов и сокращение затрат на производство, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие машиностроительной отрасли промышленности.

1. Проведенный анализ современного состояния технологий изготовления цилиндрических тонкостенных деталей показал, что основные усилия исследователей были направлены на изучение процессов вытяжки в цилиндрическую матрицу с использованием прижима. Работ посвященных рассмотрению процессов вытяжки без прижима, в том числе в конических матрицах, существенно меньше, и поэтому закономерности присущие указанным процессам исследованы не в полной мере.

2. Полученные на базе энергетического метода аналитические зависимости для определения максимальных коэффициентов вытяжки в цилиндрическую матрицу без прижима, основанные на переборе возможного числа возникающих складок, адекватно отражают реальный характер потери устойчивости фланцем заготовки.

Показано, что предельный коэффициент вытяжки увеличивается с увеличением толщины заготовки. При этом характер влияния толщины заготовки на предельные коэффициенты вытяжки слабо зависит от выбранной функции возможного прогиба. Расхождение не превышает 3%.

3. Установлено, что при вытяжке в цилиндрическую матрицу без прижима число складок, возникающих в момент потери устойчивости фланцем, с уменьшением относительной толщины заготовки увеличивается. Так при относительной толщине заготовки меньше 2, число складок находится в пределах 10-13, а при относительной толщине больше 2, число складок уменьшается до 8-9.

4. На основе разработанных компьютерных моделей вытяжки в цилиндрическую матрицу без прижима и экспериментальных исследований установлено, что моделирование в программном комплексе DYNAFORM (погрешность 2%) более адекватно описывает процесс формоизменения вытяжки в цилиндрическую матрицу по сравнению с моделированием в программном комплексе AUTOFORM (погрешность 8%).

5. Проведенные исследования вытяжки в коническую матрицу без прижима выявили особенности в механизме образования гофра при отсутствии соосности заготовки и матрицы, которые проявляются в появлении только одного гофра. Установлено, что критическая величина смещения осей, при которых происходит изменения характера формоизменения, зависит от толщины заготовки и угла конусности матрицы и составляет от 2 до 4 толщины материала.

6. Установлено, что ограничением нормального протекания операции вытяжки в конической матрице без прижима является либо появление трещины (от-

рыв доньшка), либо образование складки. При углах конусности матрицы, которые меньше оптимального, главным видом браком являются трещины, а с увеличением угла конусности матрицы основным браком становятся складки. При этом предельный коэффициент вытяжки для стали 08пс в коническую матрицу без прижима превышает допустимый коэффициент вытяжки в цилиндрическую матрицу без прижима на 37% при толщине 0,5 мм, на 72% при толщине 1 мм и 72% при толщине 1,5 мм.

7. Полученные в работе аналитические зависимости позволяют вычислить угол конусности матрицы, обеспечивающий получение максимального коэффициент вытяжки для данной относительной толщины заготовки и значение этого максимального коэффициента.

8. Спроектированная и изготовленная штамповая оснастка позволила провести экспериментальную проверку разработанных математических моделей вытяжки в штампах без использования прижимов.

Сравнение значений предельных коэффициентов вытяжки в коническую матрицу без прижима, полученных экспериментально и с помощью компьютерного моделирования показало хорошую сходимость результатов. Максимальная погрешность, которая была получена при угле конусности матрицы  $30^{\circ}$ , составила 2,5%.

Моделирование изменения геометрических размеров в процессе вытяжке в коническую матрицу совпадает с экспериментом как качественно, так и количественно. Расхождение не превышает 6%.

Моделирование момента образования трещины в процессе вытяжке в коническую матрицу без прижима имеет наибольшую погрешность по максимальной силе вытяжки 9%, а по ходу пуансона, при котором происходит отрыв, 11%.

9. Разработанная методика проектирования технологических процессов вытяжки тонкостенных цилиндрических деталей без прижима обеспечивает выбор наиболее рационального способа изготовления разнообразных тонкостенных цилиндрических деталей, что представляет интерес для ООО «ЧТПЗ-Инжиниринг» и будет использована при разработке новых технологических процессов изготовления цилиндрических баллонов.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ло Синь, Евсюков С.А., Юй Чжунци Исследование потери устойчивости при вытяжки в цилиндрическую матрицу без прижима. //Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып 8. С 274-283. (0,6 п.л./0,35 п.л.).

2. Синь Ло, Евсюков С.А., Чжунци Юй. Влияние толщины заготовки на процесс вытяжки в коническую матрицу без прижима // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Том 18. № 1. С. 22-25. (0,5 п.л./0,2 п.л.)

3. Ло Синь, Евсюков С.А., Юй Чжунци. Исследование процесса вытяжки в коническую матрицу// Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2019. Вып. 9. С. 513-520. (0,44 п.л./0,24 п.л.).

4.Евсюков С.А., Ло Синь Исследование потери устойчивости заготовки при вытяжке без прижима // Перспективы развития отечественного кузнечно-прессового машиностроения и кузнечно-штамповочных производств в условиях импортозамещения: Сборник докладов и научных статей XII Конгресса «Кузнец-2015». Рязань, 2015. С.437-442. (0,31 п.л./0,16 п.л.).

5. Ло Синь Исследование влияние угла конусности вытяжной матрицы на потерю устойчивости// Будущее машиностроение России. Международная научная конференция, сборник трудов. Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана. 2017. С 91-94. (0,23 п.л./0,23 п.л.).

6. Ло Синь Исследование влияние радиуса закругления вытяжной матрицы на потерю устойчивости заготовки//Техника и технологии. VI Международная научная конференция, сборник трудов. Омский Государственный Технический Университет. 2017. С 56-60. (0,3 п.л./0,3 п.л.).