

Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики

Работа допущена к защите

Заведующий кафедрой

«Теоретической механики»

_____ А.М. Кривцов

«___» _____ 2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

ТЕМА РАБОТЫ

по направлению 01.04.03_01 "Механика деформируемого твердого тела"

**Численное моделирование процесса формообразования отводов методом
протяжки**

Выполнил
студент гр. 23642/1
Руководитель
Ведущий инженер, к.т.н.

В.С. Погодина

Д.С. Михалюк

Санкт-Петербург

2018

ЗАДАНИЕ

по выполнению квалификационной работы

студенту Погодиной Валерии Сергеевне, группы 23642/1

1. Тема работы: Численное моделирование процесса формообразования отводов методом протяжки
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 08.06.2018
3. Исходные данные по работе: условия проведения эксперимента, результаты эксперимента
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):
 - a. Анализ исходных данных и нагрузок
 - b. Разработка расчетной модели процесса протяжки
 - c. Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных
 - d. Изучение влияния параметров протяжки на отклонения геометрических размеров отводов
5. Дата выдачи задания: 01.02.2018

Руководитель ВКР _____
(подпись) _____
инициалы, фамилия

Задание принял к исполнению _____
(дата)

Студент _____
(подпись) _____
инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

На 47 с., 20 рисунков, 5 таблиц, 3 приложения

ПРОТЯЖКА, ОТВОД, РОГООБРАЗНЫЙ СЕРДЕЧНИК, РАДИУС ГИБА, МОДЕЛЬ АНАНДА, КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ СЕТКА, СЕТОЧНАЯ СХОДИМОСТЬ, КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, ДОВЕРИТЕЛЬНЫЙ ИНТЕРВАЛ, НАПРЯЖЕНН-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

В данной работе выполнено численное моделирование процесса формообразования отводов методом протяжки, построена расчетная модель в конечно-элементном пакете Ansys, проведено сравнение с экспериментальными данными. Изучено влияние трения между заготовкой и рогообразным сердечником, температуры и скорости напрессовывания на отклонения геометрических размеров отвода.

THE ABSTRACT

47 pages, 20 pictures, 5 tables, 3 application

ELBOW HOT FORMING, ELBOW, HORN CORE, BENDING RADIUS, ANAND MODEL, FINITE ELEMENT MESH, MESH CONVERGENCE, CONTACT INTERACTION, TRUST REGION, STRESS-STRAIN STATE

In this paper, a numerical modeling of the elbow hot forming process was carried out, a computational model was constructed using the finite-element package Ansys, a comparison was made with the experimental data. The effect of friction between the sample and the horn core, the temperature and the pressing speed on the deviations of the geometric dimensions of the elbow were studied.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение..... | 5 |
| Глава 1. Эксперимент по протяжке трубы-заготовки | 9 |
| 1.1 Условия проведения эксперимента | 9 |
| 1.2 Результаты эксперимента..... | 10 |
| 1.3 Обработка экспериментальных данных | 10 |
| Глава 2. Модель материала заготовки..... | 12 |
| 2.1 Вязкопластичность..... | 12 |
| 2.2 Модель Ананда..... | 13 |
| 2.3 Валидация и верификация модели Ананда | 16 |
| Глава 3. Разработка модели процесса протяжки..... | 19 |
| 3.1 Постановка задачи..... | 19 |
| 3.2 Конечно-элементная сетка | 19 |
| 3.3 Нагрузки и закрепления..... | 22 |
| 3.4 Выбор температурного режима | 24 |
| 3.5 Выбор способа получения результатов | 25 |
| Глава 4. Результаты..... | 28 |
| 4.1 Сравнение с экспериментальными данными | 28 |
| 4.2 Оценка напряженно-деформированного состояния отводов | 31 |
| 4.3 Варьирование трения | 32 |
| 4.4 Варьирование температуры | 34 |
| 4.5 Варьирование скорости напрессовывания | 35 |
| Заключение | 37 |
| Список литературы | 38 |
| Приложение А | 40 |
| Приложение Б..... | 42 |
| Приложение В..... | 44 |

Введение

Из-за природного ландшафта, а также необходимости ответвлений трубопроводы, как правило, прокладываются не по прямой. Для организации изгибов труб и изменения их диаметра при строительстве магистральных трубопроводов, распределительных и насосных станций, нефте- и газоперерабатывающих производств, атомных и тепловых электростанций используются отводы. Отводы – это трубчатые изделия изогнутой формы, изображенные на рисунке 1.



Рисунок 1 - Отводы

Отводы делают из труб-заготовок, выполненных штамповкой или горячей протяжкой. При протяжке применяют трубы-заготовки меньшего диаметра, чем получаемый отвод, так как трубу-заготовку в горячем состоянии протягивают через расширяющийся рогообразный сердечник (рисунок 2), придавая ей нужный диаметр и кривизну. Процесс протяжки трубы-заготовки через рогообразный сердечник изображен на рисунке 3. В работе [1] описаны общие принципы изготовления отводов методом горячей протяжки.



Рисунок 2 – Рогообразные сердечники

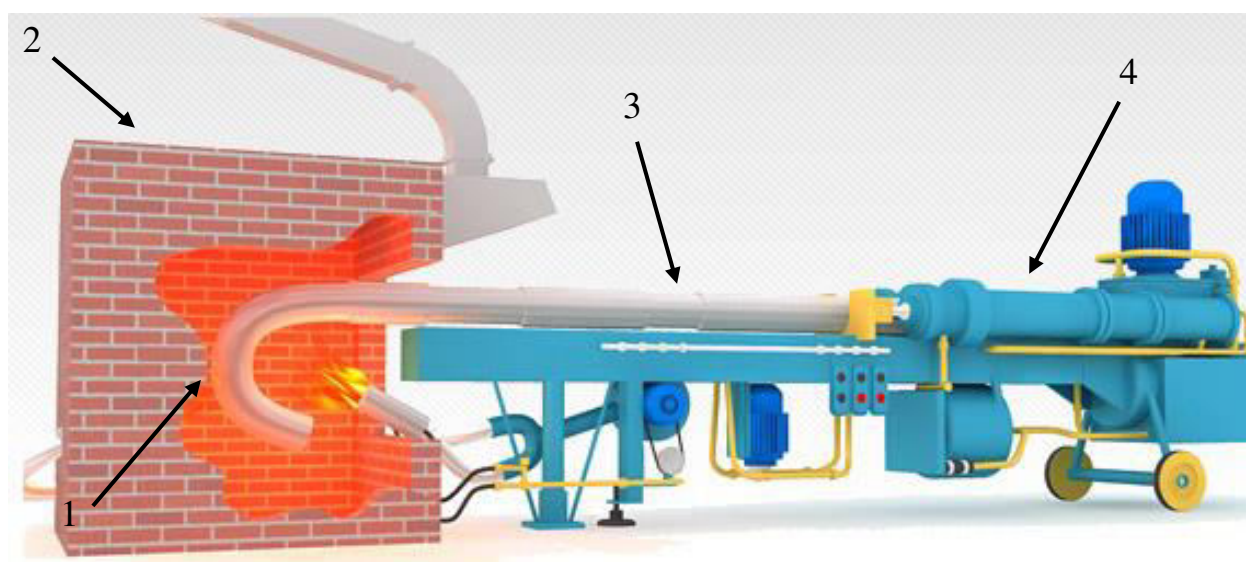


Рисунок 3 - Процесс протяжки трубы-заготовки через рогообразный сердечник;

1 – рогообразный сердечник, 2 – печь, 3 – заготовки, 4 – вытяжной пресс

Однако, несмотря на то, что способ изготовления отводов методом горячей протяжки изобретен и успешно применяется уже давно, имеются определенные проблемы и связанные с ними задачи в области изготовления отводов. Одной из таких проблем является отсутствие четких представлений о том, как параметры процесса протяжки такие как трение между заготовкой и рогообразным сердечником, температурный и скоростной режим влияют на результат, а именно на итоговую геометрию отвода.

При изготовлении отводов инженер-технолог не располагает способами предсказания геометрии отвода, вследствие чего подбор параметров протяжки происходит непосредственно на практике. Такой способ является достаточно затратным за счет изготовления новых опытных образцов и за счет времени, необходимого для прохождения всего цикла инженерного процесса. Численное моделирование способно устранить эту проблему.

Современные методы численного моделирования позволяют исследовать процесс протяжки без проведения реальных экспериментов. Например, в работе [2] исследованы особенности деформирования трубной заготовки при изгибе проталкиванием с помощью численного пакета ANSYS/LS-DYNA. Было установлено, что утонение, равно как и утолщение, имеет место не по всей длине большой и малой образующих, что величина радиусагиба не влияет на величину утонения в опасных сечениях. В работе [3] изучено влияние формы рогообразного сердечника на напряженно-деформированное состояние отвода, доказано, что форма сердечника является определяющим фактором устойчивого процесса протяжки. Однако, влияние различных параметров протяжки не были исследованы в достаточной степени.

В связи с этим целью данной работы является исследование влияния температуры, скорости напрессовывания и трения между рогообразным сердечником и трубой на геометрические параметры получившегося отвода.

Задачами работы являются:

- анализ исходных данных и нагрузок;
- разработка расчетной модели процесса протяжки, включая построение конечно-элементной сетки и выбор материала заготовки;
- сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных;
- изучение влияния параметров протяжки на отклонения геометрических размеров отводов.

Работа выполнена методами численного моделирования в программном пакете конечно-элементного анализа ANSYS 18.2.

Глава 1. Эксперимент по протяжке трубы-заготовки

В данной главе описаны условия проведения эксперимента по протяжке трубы-заготовки по рогообразному сердечнику. Проведён анализ и обработка экспериментальных данных для последующего сравнения с результатами численного моделирования.

1.1 Условия проведения эксперимента

Перед протяжкой на заготовки наносят разметку и замеряют толщины в точках заготовки согласно разметке. Затем проводят протяжку экспериментальных образцов в условиях, соответствующих технологии изготовления отводов данного типоразмера.

Условия проведения эксперимента подразумевают под собой определенный температурный режим и скорость движения плунжеров вытяжного пресса.

Температурный режим достигается с помощью горелок. Их число зависит от типоразмера заготовки. Чем больше типоразмер заготовки, тем большее количество горелок понадобится.

С помощью горелок устанавливается температура в печи равная 900 °С. В ходе эксперимента проведено измерение температуры заготовки в разные моменты протяжки. В начале протяжки температура заготовок колеблется в пределах от 845 °С до 890 °С, а в конце протяжки в пределах от 900 °С до 1000 °С.

Скорость напрессовывания колеблется в пределах от 220 мм/мин до 280 мм/мин. Это связано с тем, что для плунжеров вытяжного пресса нет возможности установить постоянную скорость, устанавливается постоянное давление напрессовывания. При этом скорость зависит не только от давления, но и от количества заготовок на направляющей. Поэтому в начале работы скорость меньше, а с уменьшением количества заготовок на направляющей скорость возрастает.

1.2 Результаты эксперимента

В результате эксперимента протянуты восемь заготовок. Для каждой заготовки определены три типа величин: радиус гiba, диаметры и толщины до и после протяжки.

На рисунке 1.1 показана разметка и точки замера этих величин. Черной стрелкой показано направление движения трубы по рогообразному сердечнику. Пунктирными линиями обозначены кривые, вдоль которых в нескольких сечениях измеряются толщины. В тех же сечениях измеряются диаметры в двух направлениях, перпендикулярных друг к другу.

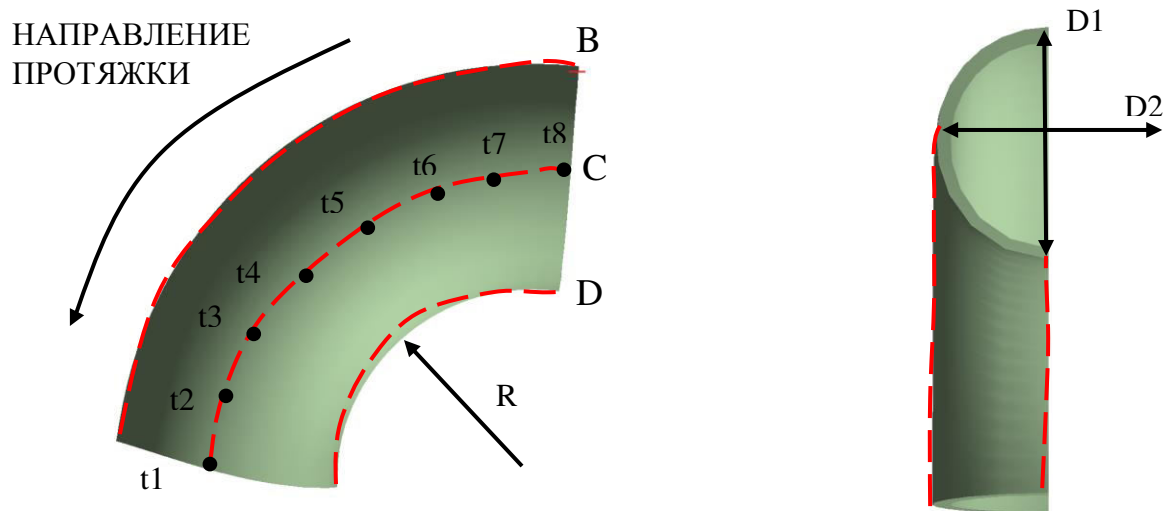


Рисунок 1.1 – Радиус гiba, толщины и диаметры

1.3 Обработка экспериментальных данных

Грубой погрешностью измерений называют погрешность измерения, существенно превышающую ожидаемую при данных условиях производственного процесса. Причиной появления грубой погрешности в результатах эксперимента является кратковременные изменения условий измерений вследствие сбоя в работе производственного оборудования. В подобных случаях результаты, содержащие грубую погрешность, исключают путем применения специальных методов.

Для анализа результатов численного моделирования, проведена обработка экспериментальных данных и исключены результаты, содержащие грубые погрешности.

В настоящей работе используется метод отсева грубых погрешностей, описанный в [4]. Отсев произведен по значениям радиусагиба, так как этот геометрический параметр определяет итоговую форму отвода. Сначала вычисляется среднее значение радиусагиба и стандартное отклонение. Затем для каждого радиусагиба вычисляется τ' по формуле 1.1, которая не должна превышать критического значения τ' равного 2,17 для выборки из восьми испытаний и уровня значимости 0,05. Максимальное значение τ' для нашей выборки равно 1,89, из чего следует, что выборка не имеет грубых погрешностей.

$$\tau' = \frac{\text{радиусгиба} - \text{среднее значение радиусагиба}}{\text{стандартное отклонение}} \quad (1.1)$$

На конечном этапе обработки экспериментальных данных определены средние значения толщин до и после протяжки, а также средние значения диаметров. Поскольку в эксперименте толщина трубы-заготовки до протяжки неодинакова в различных ее точках, в отличие от численного эксперимента, то принято следующее правило расчета толщины для последующего сравнения с численным экспериментом:

$$t = t_{\text{после протяжки}} - t_{\text{до протяжки}} + t_{\text{средняя}} \quad (1.2)$$

В Приложении А таблицы А.1 приведены средние толщины, полученные по формуле 1.2, а в таблице А.2 приведены средние диаметры. Средний радиусгиба по результатам эксперимента равен 99,76 мм.

Глава 2. Модель материала заготовки

В данной главе дано описание нескольких моделей вязкопластичности и сделан выбор в пользу одной из них в качестве модели материала заготовки. Выбранная модель материала используется для последующей разработки расчетной модели процесса протяжки, описанной в главе 3.

2.1 Вязкопластичность

Вязкопластичность является формой пластичности, зависящей от времени, где развитие пластических деформаций зависит от скорости приложения нагрузки. Простейшим применением вязкопластичности является процесс высокотемпературной формовки металла, такой, как прокатка и глубокая вытяжка, вызывающие большие пластические деформации и перемещения с малыми упругими деформациями.

Вязкопластичность определяется объединением пластичности и ползучести посредством набора уравнений для пластических деформаций и эволюционных уравнений. Вязкопластичность позволяет вводить эффект скорости изменения деформаций в модели материалов для моделирования отклика материала, зависящего от времени. При расчете в численном пакете Ansys применяются различные модели вязкопластичности такие как модель Пежины (Perzyna) [5] или модель Пирса (Peirce) [6]. В отличие от других моделей, зависящих от скорости деформации материала, модели Пежины (Perzyna) и Пирса (Peirce) включают поверхность пластичности. То есть эффект упрочнения, связанный со скоростью деформации, активизируется только после пластического деформирования.

Дадим краткое описание модели Пежины. Теория Пежина построена на пластическом релаксационном уравнении Бингама. Согласно этой теории, скорость деформации складывается из упругой и вязкопластической составляющих. Упругое поведение, предполагаемое изотропным, моделируется

гуковыми соотношениями. Следуя предположению Пежины, скорость пластической деформации находится из закона течения по формуле 2.1.

$$\dot{\epsilon} = \gamma \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)^{1/m}, \quad (2.1)$$

где $\dot{\epsilon}$ – скорость эквивалентных пластических деформаций, γ – параметр вязкости, m – параметр упрочнения скорости деформации, σ – эквивалентные напряжения, а σ_0 – напряжения, при которых возникают пластические деформации.

Также рассмотрим модель Пирса, которая схожа по своей структуре с моделью Пежины с той лишь разницей, что параметр упрочнения скорости деформации стоит в другой части уравнения. Скорость эквивалентных пластических деформаций находится по формуле 2.2.

$$\dot{\epsilon} = \gamma \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{1/m} - 1 \right], \quad (2.2)$$

Несмотря на то что в моделях Пежины и Пирса развитие пластических деформаций зависит от скорости деформации посредством степенной функции, эти модели не описывают поведение материала в меняющихся температурных условиях. Именно поэтому для моделирования процесса протяжки заготовки через рогообразный сердечник эти модели не подходят. Зато требованию зависимости деформаций от температуры удовлетворяет модель материала Ананда, которую рассмотрим в следующем параграфе.

2.2 Модель Ананда

Модель Ананда (Anand) [7] успешно применяется для моделирования горячей обработки или других структурных изменений металлов. Модель обладает рядом особенностей.

Во-первых, в модели отсутствуют явные условия текучести или критерий по нагрузке. Вместо этого предполагается, что текучесть имеет место везде, где

напряжения не равны нулю, хотя при низких напряжениях скорость пластических деформаций может быть неизмеримо мала.

Во-вторых, данная модель учитывает внутреннюю структуру материала с помощью единственного параметра, измеряемого в единицах напряжения. Как было отмечено Анандом, предположение, что внутреннюю структуру материала при множестве режимов нагружения можно учесть с помощью одного единственного параметра, неточно. Тем не менее было доказано, что модель описывает поведение материала достаточно хорошо в определенных случаях, в том числе тестах на сжатие и растяжение при различных температурах и скоростях деформации.

В-третьих, модель, предложенная Анандом и впоследствии доработанная Брауном, объединяет ползучесть и не зависящую от скорости пластичность при помощи закона течения и эволюционных уравнений.

Сначала рассмотрим определяющее уравнение (2.3), которое включает в себя модель Ананда.

$$\dot{\varepsilon}_p = A \exp\left(-\frac{Q}{R\theta}\right) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{S}\right)\right]^{1/m} \quad (2.3)$$

Уравнение представляет собой закон течения и по форме аналогично уравнению, используемому для описания стационарной вторичной ползучести, с той лишь разницей, что в нем присутствует внутренний параметр S . Этот параметр называется деформационным сопротивлением и зависит от температуры и скорости деформации материала.

Заметим, что $\dot{\varepsilon}_p$ – это скорость неупругой деформации и представляет собой сумму ползучести и зависящей от времени пластической деформации.

Первая часть уравнения – закон Аррениуса, который фиксирует температурную зависимость ползучести, где R – универсальная газовая постоянная, θ – абсолютная температура, A – преэкспоненциальный множитель, который не зависит от температуры, а Q – энергия активации. Энергию активации можно охарактеризовать как некоторую пороговую

энергию активации структурного изменения материала: процесс структурного изменения материала не запустится до тех пор, пока энергия активации меньше Q .

Вторая часть уравнения – множитель с гиперболическим синусом – описывает зависимость скорости неупругой деформации от напряжения. Здесь ξ – мультипликатор напряжений, σ – напряжения, а m – коэффициент, отвечающий за чувствительность напряжений к скорости деформаций. Именно множитель с гиперболическим синусом включает внутренний параметр, для которого справедливо следующее соотношение:

$$\dot{S} = \left\{ h_0 (|B|)^a \frac{B}{|B|} \right\} \dot{\varepsilon}_p, \quad (2.4)$$

где:

$$B = 1 - \frac{S}{S^*}, \quad (2.5)$$

где:

$$S^* = \hat{S} \left[\frac{\dot{\varepsilon}_p}{A} \exp \left(\frac{Q}{R\theta} \right) \right]^n \quad (2.6)$$

Соотношение, приведенное выше, называется эволюционным уравнением, где \hat{S} – коэффициент насыщения сопротивления деформациям, n – коэффициент, отвечающий за чувствительность насыщения (сопротивления деформациям) к скорости деформации, a – коэффициент, который отвечает за чувствительность насыщения к упрочнению материала. Эволюционное уравнение в основном захватывает эффект деформационного упрочнения с помощью коэффициента упрочнения h_0 .

Предполагаемое соотношение между напряжением и деформационным сопротивлением выражается следующим соотношением:

$$\sigma = cS, \quad (2.7)$$

где по определению:

$$c = \frac{1}{\xi} \sinh^{-1} \left[\left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} \exp \left(\frac{Q}{R\theta} \right) \right)^m \right] \quad (2.8)$$

Модель Ананда будет использована в качестве модели материала заготовки в расчетной модели процесса протяжки, разработка которой описана в следующей главе. Но перед этим необходимо провести валидацию и верификацию модели.

2.3 Валидация и верификация модели Ананда

Прежде чем моделировать протяжку трубы по рогообразному сердечнику необходимо убедиться, что выбранная модель корректно описывает поведение материала в соответствующих условиях. Для этого решена задача одноосного сжатия в численном пакете Ansys, а полученные результаты сравнены с экспериментом.

Стальной цилиндрический образец сжимается прессом. Верхний торец образца перемещается вдоль оси цилиндра с постоянной скоростью, а перемещения нижнего торца образца вдоль оси цилиндра равны нулю и свободны в плоскости торца. Описанные выше нагрузки и закрепления изображены на рисунке 2.1.

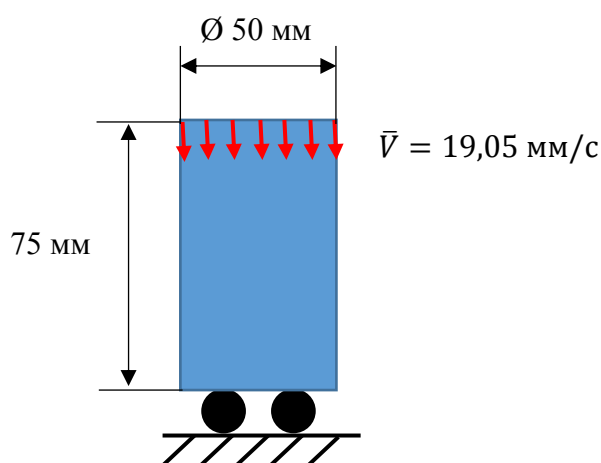


Рисунок 2.1 - Постановка модельной задачи

Параметры модели Ананда для стали приведены в таблицах 2.1-2.3. Эти параметры получены Стюартом Брауном и описаны в [8].

Таблица 2.1 – Параметры Ананда для стали

| | |
|----------------|------------------------|
| A, c^{-1} | 6.346×10^{11} |
| $Q/R, K$ | 37587 |
| ξ | 3,25 |
| m | 0,1956 |
| \hat{S}, MPa | 125,1 |
| n | 0,06869 |
| h_0, MPa | 3093,1 |
| α | 1,5 |

Таблица 2.2 – Зависимость S_0 от температуры

| Температура, °C | S_0, MPa |
|-----------------|------------|
| 800 | 102,7 |
| 850 | 89,6 |
| 900 | 74,6 |
| 950 | 79,1 |
| 1000 | 66,1 |
| 1100 | 58,4 |
| 1200 | 60,1 |

Таблица 2.3 – Зависимость упругих констант стали от температуры

| Температура, °С | Е, ГПа | ν |
|-----------------|--------|-------|
| 800 | 135 | 0,35 |
| 900 | 115 | 0,37 |
| 1000 | 105 | 0,41 |
| 1100 | 93 | 0,43 |
| 1200 | 87 | 0,45 |

Сжатие цилиндра промоделировано при различных скоростях деформации и различных температурах заготовки. На рисунке 2.2 изображены графики зависимости напряжений от деформаций при скорости деформации 1 с^{-1} . Среднее отклонение экспериментальной кривой от кривой, полученной в результате численного моделирования, равно 7 %, что говорит о том, что результаты численного моделирования довольно хорошо коррелируют с экспериментальными данными. Так как данная модель материала корректно описывает поведение материала при различных температурных и скоростных режимах, ее использование в последующем моделировании протяжки теоретически обоснованно.

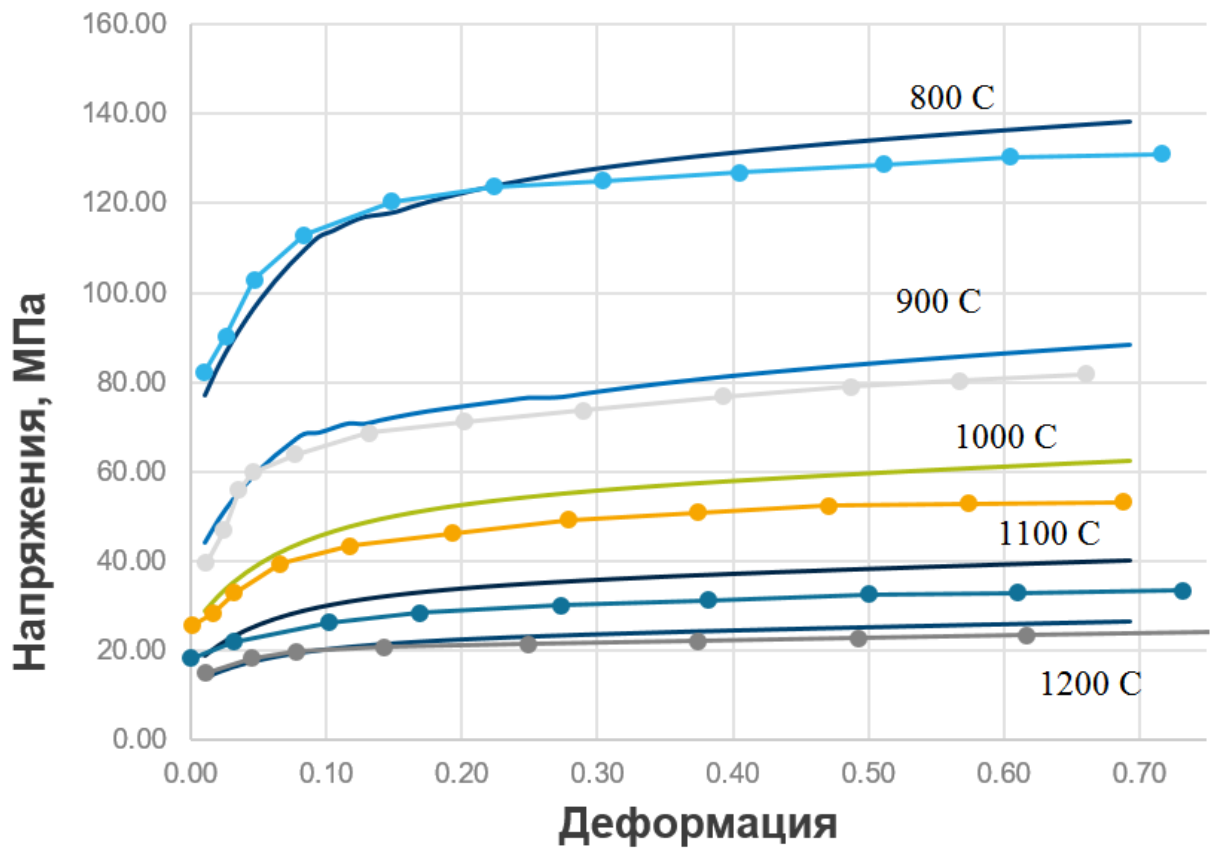


Рисунок 2.2 – Сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных для модели Ананда

Глава 3. Разработка модели процесса протяжки

В данной главе описана разработка расчетной модели протяжки заготовки по рогаобразному сердечнику. Описаны принятые упрощения и выработаны способы измерения параметров, которые будут использоваться для сравнения с экспериментальными данными, приведенными в главе 1.

3.1 Постановка задачи

Геометрическая модель представляет собой систему двух тел: заготовки и рогаобразного сердечника. С помощью вытяжного прессы осуществляется движение заготовки по направлению к расширяющейся части сердечника. При этом скорость напрессовывания и температура заготовки должны удовлетворять условиям проведения эксперимента, изложенным в главе 1. Торец длинной части сердечника закреплен. Описанные выше условия изображены на рисунке 3.1. Заметим, что постановка задачи симметрична относительно плоскости рисунка.

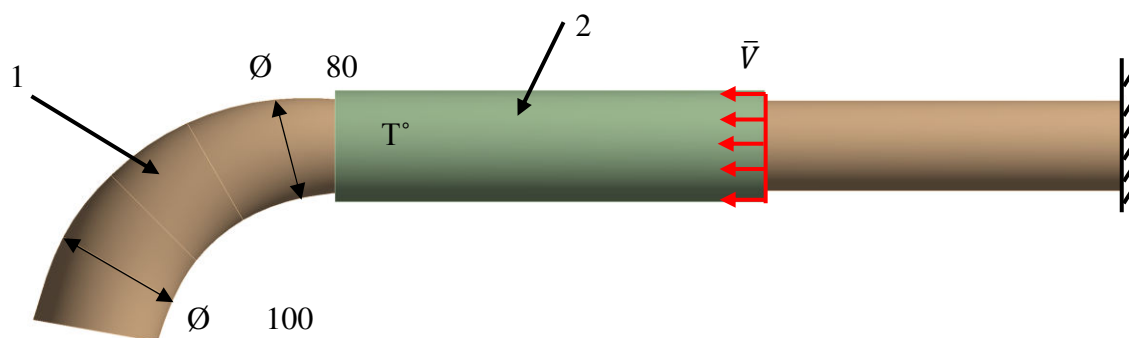


Рисунок 3.1 - Постановка задачи; 1 – рогаобразный сердечник, 2 – заготовка

В результате численного моделирования необходимо получить геометрические параметры отвода, а именно радиусгиба, толщины и диаметры для последующего сравнения с экспериментальными данными.

3.2 Конечно-элементная сетка

Программный продукт ANSYS Mechanical решает задачи механики деформируемого твёрдого тела методом конечных элементов. Расчёт методом конечных элементов предполагает разбиение всех элементов геометрической модели на некоторое число непересекающихся объёмов – элементов. Совокупность этих объёмов и математических связей между ними называется конечно-элементной сеткой.

При построении конечно-элементной сетки использованы объёмные твердотельные конечные элементы с функцией формы второго порядка в форме гексаэдров. Конечные элементы второго порядка имеют промежуточные узлы на середине грани и соответственно могут более точно описать форму элемента. Благодаря этому для построения качественной конечно-элементной сетки на заготовке достаточно двух элементов по толщине стенки, что позволяет сократить общее число конечных элементов модели и, следовательно, сэкономить расчетные ресурсы. Данное упрощение сделано, исходя из исследования сходимости по сетке.

В теории метода конечных элементов процесс поиска минимально необходимой расчетной сетки для получения качественного расчета в задаче называется исследованием сходимости по расчетной сетке. Выбирается характерный параметр (в нашем случае – это толщина отвода в середине нижней образующей), а затем производится расчет с последовательным измельчением расчетной сетки. На рисунке 3.2 изображен график зависимости толщины отвода от количества степеней свободы расчетной модели. Из графика видно, что разница между значениями толщины при двух и трех конечных элементах на толщину трубы не превышает 1 %, что говорит о том, что использование конечно-элементной сетки с двумя элементами по толщине трубы обоснованно.



Рисунок 3.2 - Исследование сходимости по сетке

Общий вид конечно-элементной сетки изображен на рисунке 3.3. Характерный размер элемента сердечника и элемента трубы-заготовки равен 5 мм. Общее число конечных элементов равно 34982.

Итоговая расчетная модель состоит из сердечника и двух заготовок, соприкасающихся торцами. Необходимость дополнения расчетной модели еще одной трубой связана с заданием граничного условия, имитирующего движение вытяжного пресса. Это и остальные граничные условия, а также нагрузки более подробно описаны в следующем параграфе.

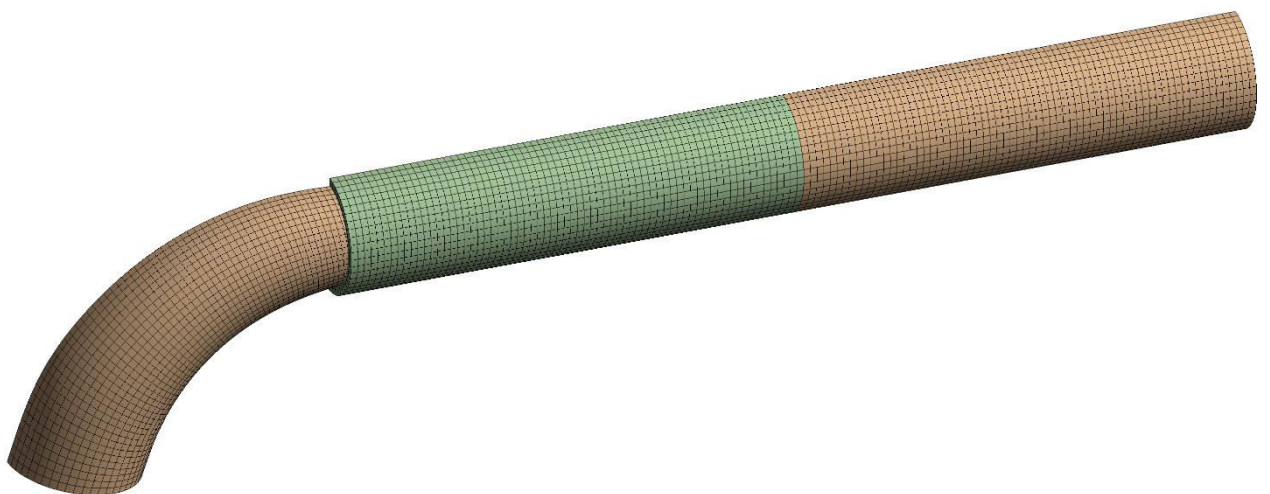


Рисунок 3.3 - Итоговая конечно-элементная сетка

3.3 Нагрузки и закрепления

Прежде чем определить контактные взаимодействия расчётной модели приведем ряд условий на границе контакта тел, описанных в работе [9]. Рассмотрим систему из двух тел, которые в состоянии равновесия занимают объемы V^1 и V^2 и ограничены поверхностями S^1 и S^2 (рисунок 3.4).

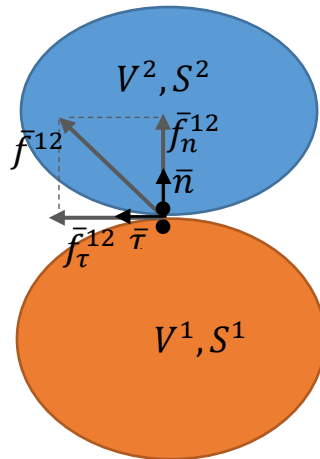


Рисунок 3.4 – Система двух тел, находящихся в контактном взаимодействии

Предположим, что две точки, находящиеся на границе двух тел, находятся в контактном взаимодействии. Обозначим силу сцепления в точке 1, обусловленную контактным взаимодействием с точкой 2 за \bar{f}^{12} , причем:

$$\bar{f}^{12} = -\bar{f}^{21} \quad (3.1)$$

Если два контактирующих тела не скреплены друг с другом, то в точках контакта не допустимо нормальное растяжение в направлении нормали \bar{n} к поверхности тел в точке контакта, т.е. имеем:

$$f^{12} \leq 0 \quad (3.2)$$

В соответствие с законом трения Кулона тангенциальная компонента силы сцепления связаны с нормальной компонентой следующим соотношением:

$$f_{\tau}^{12} \leq \mu f_n^{12} \quad (3.3)$$

При выполнении условий (3.2) и (3.3) контактное взаимодействие сохраняется, в противном случае происходит скольжение одной поверхности относительно другой.

Кроме рассмотренных выше статических граничных условий необходимо учитывать условие отсутствия взаимного проникновения контактирующих тел:

$$V^1 \cap V^2 = \emptyset \quad (3.4)$$

Это условие является кинематическим, так как накладывает ограничения на перемещения контактирующих тел.

Все условия на границе двух тел описаны, поэтому приступим к определению нагрузок, граничных условий и контактных взаимодействий, непосредственно относящихся к расчетной модели.

Расчёт проведён под действием следующей нагрузки: на задний торец второй заготовки задано перемещение с постоянной скоростью, равной средней скорости напрессовывания в ходе эксперимента (250 мм/мин). Вектор этого перемещения сонаправлен с осью неизогнутой части сердечника (рисунок 3.5). Таким образом, дополнение расчетной модели второй заготовкой, позволяет избежать трудностей с заданием перемещения в случае наличия в модели только одной заготовки, так как вектор перемещения изменял бы свое направление в ходе протяжки в соответствии с положением отвода на сердечнике.

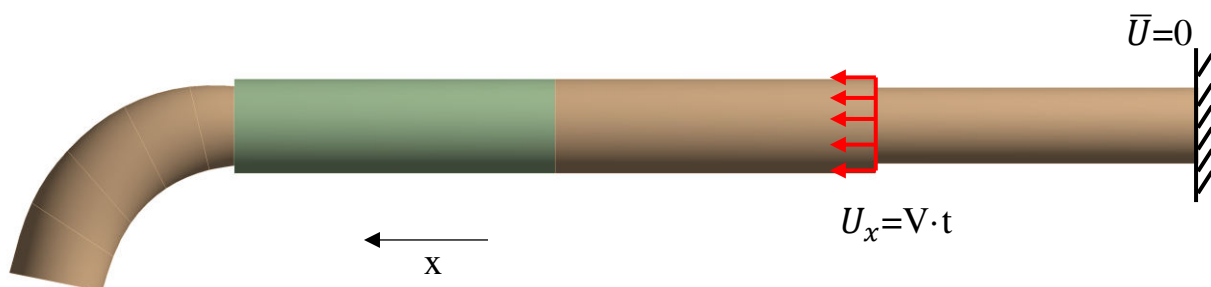


Рисунок 3.5 – Расчетная модель

На торце рогообразного сердечника задана жесткая заделка, то есть равенство нулю перемещений всех узлов конечно-элементной сетки по всем осям.

Зададим контактное взаимодействие между внутренней поверхностью заготовок и внешней поверхностью сердечника. Поверхности могут скользить друг относительно друга с трением, коэффициент которого выбирается исходя из близости к экспериментальным данным. Подобранный коэффициент трения равен 0,17. Более детальное исследование влияния коэффициента трения на результаты описано в главе 3.

3.4 Выбор температурного режима

При изготовлении отводов заготовка имеет различную температуру в течение протяжки. Температура заготовки в середине процесса протяжки самая высокая и может отличаться на 50-100°C от температуры в начале или конце процесса. Оценим, какой эффект на геометрию отвода оказывает разброс в температуре.

С целью оценки данного эффекта выполнены расчеты при разных температурных режимах: в первом случае температура постоянна в течение всего процесса протяжки и равна 950°C, во втором случае температура равна 850°C в начале процесса протяжки, 950°C в середине процесса и 900°C в конце. Результаты расчета представляют собой девять толщин, четыре диаметра и радиусгиба, изображенные на рисунке 3.6. Эти геометрические параметры используются для сравнения с экспериментальными данными в процессе разработки расчетной модели.

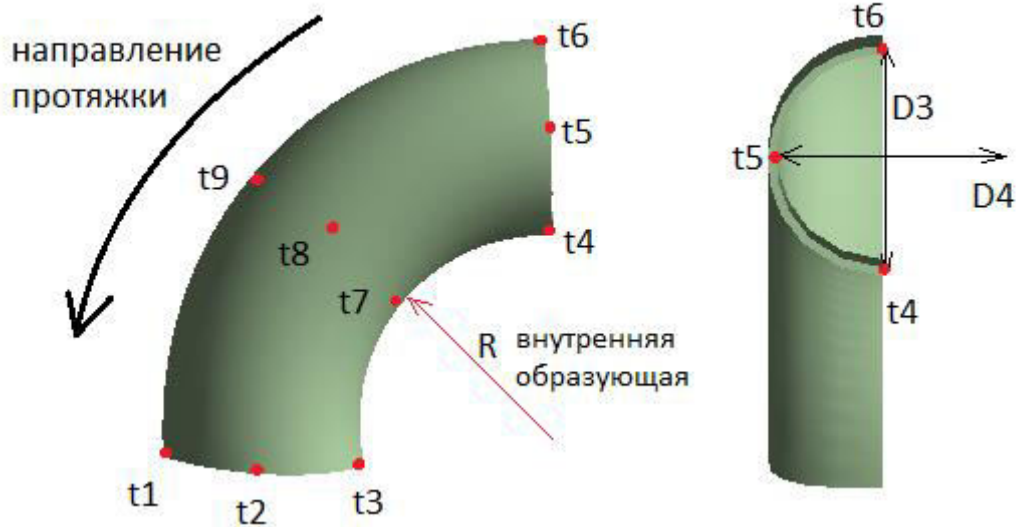


Рисунок 3.6 - Геометрические параметры отвода

В Приложении Б приведена таблица Б.1, содержащая результаты расчетов при разных температурных режимах, описанных выше. Так как результаты отличаются не более чем на 1%, в расчете допустимо задать постоянную температуру на трубу-заготовку, которая соответствует средней температуре заготовки в ходе эксперимента. Более точные данные по температуре заготовки недоступны исходя из метода замера на производстве.

3.5 Выбор способа получения результатов

Проведен расчёт и получены результаты, которые приведены в приложении В таблицах В.1 и В.2. В результате анализа результатов численного моделирования и их сравнения с экспериментальными данными определено, что результаты численного моделирования хуже согласуются с экспериментом на переднем торце заготовки. Предположим, что это связано с тем, что не учитывается контактное взаимодействие заготовки с другими такими же заготовками, находящимися на рогообразном сердечнике. Действительно, расчетная модель состоит только из двух заготовок, торец первой трубы оказывается свободным от контактных взаимодействий.

Чтобы учесть контактное взаимодействие двух торцов заготовки с другими заготовками, необходимо включить в расчетную модель третью заготовку. Однако это потребует большее количество расчетного времени и значительно ухудшит сходимость контактной задачи, так как усложнение расчетной модели повлечет за собой увеличение числа контактных элементов. Чтобы избежать описанных выше сложностей, предлагается изменить способ измерения геометрических параметров в расчетной модели.

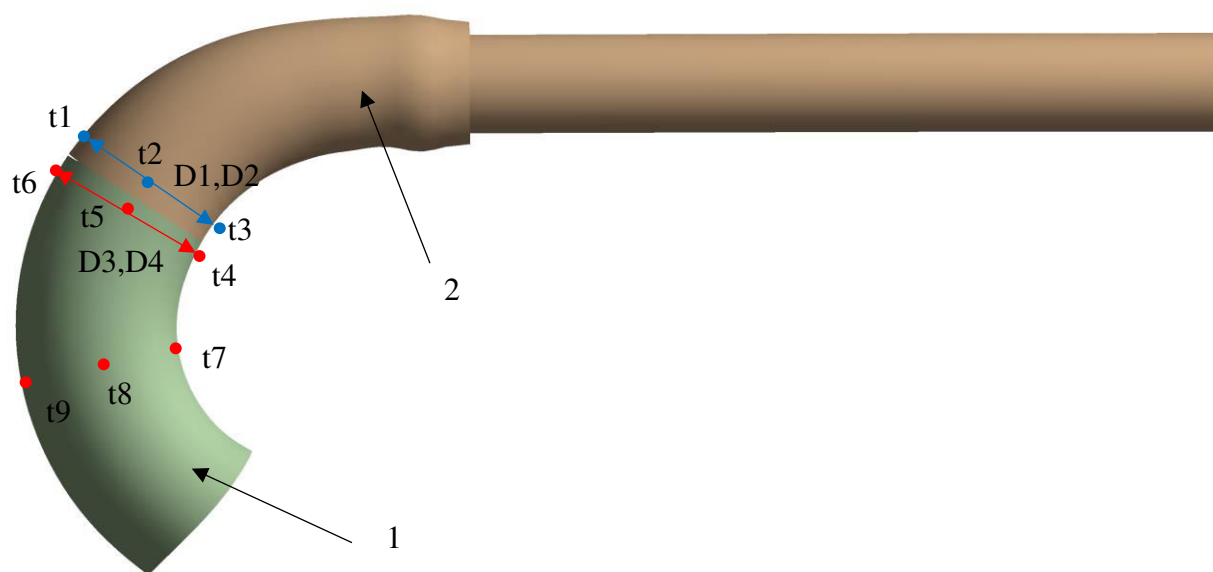


Рисунок 3.7 – Толщины и диаметры, определенные вторым способом

Производится расчет, затем толщины t_1 , t_2 , t_3 и диаметры D_1 и D_2 измеряются с заготовки 2, а толщины t_4 , t_5 , t_6 , t_7 , t_8 , t_9 и диаметры D_3 и D_4 заготовки 2 (рисунок 3.7). Этот способ позволяет получить результаты для заготовки, расположенной на рогообразном сердечнике между двумя другими заготовками, не включая в расчетную модель третью заготовку.

Замер толщин и диаметров происходит в тот момент, когда процесс протяжки для первой заготовки завершается. Предполагается, что заготовка имеет свои окончательные размеры на своем переднем торце еще до полного окончания процесса протяжки. С целью проверки корректности результатов, полученных выбранным способом, проведено сравнение двух наборов результатов: в момент, когда процесс протяжки первой заготовки завершился

(~167 с) и в момент, когда первая заготовка уже завершает протяжку, но еще находится на рогообразном сердечнике (~80 с).

В таблице 3.1 приведены значения толщин t_1 , t_2 , t_3 и диаметров D_1 , D_2 для двух моментов времени. Из таблицы видно, что значения отличаются менее чем на 0,5%. Это подтверждает, что еще до окончания процесса протяжки, заготовка уже имеет окончательные размеры, поэтому в дальнейшем используется выбранный способ получения результатов.

Таблица 3.1 - Результаты численного моделирования в разные моменты времени

| Параметр | Результаты, мм | | Относительное отклонение, % |
|----------|----------------|--------|-----------------------------|
| | ~80 с | ~167 с | |
| t_1 | 6,78 | 6,76 | 0,33 |
| t_2 | 9,37 | 9,37 | менее 0,1 |
| t_3 | 8,00 | 7,99 | 0,12 |
| D_1 | 119,67 | 119,43 | 0,20 |
| D_2 | 110,76 | 110,76 | менее 0,1 |

В таблице Б.2 Приложения Б приведены два набора результатов: полученные первым способом и вторым. Из таблицы видно, что результаты, полученные вторым способом, лучше согласуются с экспериментом, а именно точность совпадения по некоторым толщинам улучшилась в 5 раз (с 15 % до 3 %). Поэтому здесь и далее приводятся результаты, полученные выбранным способом.

Глава 4. Результаты

В данной главе результаты численного моделирования сравниваются с экспериментальными данными, приведенными в главе 1. Исследуется влияние трения, температуры и скорости напрессовывания на отклонения геометрических параметров отвода.

4.1 Сравнение с экспериментальными данными

Экспериментальные данные по протяжке отводов представляют собой три набора результатов: значения толщин, диаметров и радиусовгиба. Для корректной оценки результатов численного моделирования, необходимо обработать экспериментальные данные с помощью статистических методов.

Статистические методы предлагают два вида оценки данных: точечную и интервальную. Точечная оценка – это, например, вычисление среднего арифметического и его последующее сравнение с результатом численного моделирования. Такая оценка произведена для всех геометрических параметров отвода.

Радиусгиба, полученный в результате численного моделирования, равен 99,76 мм, погрешность с экспериментальными данными составляет 0,05%. Что касается толщин и диаметров (таблица С.1 и С.2 Приложения С), то средняя погрешность равна 3,38% и 0,61% соответственно.

Несмотря на малую погрешность результаты сравнения могут быть ошибочны в некоторых случаях. Например, при протяжке небольшого числа отводов (в нашем случае – десяти) может произойти следующее: средний радиусгиба одной партии отводов может значительно отличаться от среднего радиусагиба другой партии. Это связано с тем, что у производителей отводов на рассмотренном производстве нет возможности обеспечить стабильные условия протяжки. Получается, что точечная оценка случайна, и остается неясным, какое значение радиусагиба брать за меру сравнения. Поэтому

предлагается воспользоваться интервальной оценкой статистических параметров на примере радиуса гйба.

Интервальная оценка представляет собой вычисление доверительного интервала [10]. Доверительный интервал – это интервал значений радиуса гйба, в который результаты численного моделирования попадают с заданной надежностью. Если в результате численного моделирования радиус гйба принадлежит доверительному интервалу, значит моделирование хорошо описывает реальный процесс. Доверительный интервал имеет вид:

$$(\bar{x} - \varepsilon; \bar{x} + \varepsilon), \quad (4.1)$$

где \bar{x} – математическое ожидание, которое равно среднему арифметическому радиусов гйба, а ε – стандартное отклонение. ε вычисляется из предположения, что случайная величина (радиус гйба) имеет нормальное распределение:

$$\varepsilon = t_\gamma \frac{s}{\sqrt{n-1}}, \quad (4.2)$$

где t_γ – коэффициент Стьюдента, n – количество экспериментов, s – дисперсия. t_γ находится из [11] для n экспериментов и заданной надежности, а s вычисляется по формуле:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum (x - \bar{x})^2 \quad (4.3)$$

В таблице 4.1 представлены значения радиуса гйба, \bar{x} , $x - \bar{x}$ для каждого эксперимента и дисперсия.

Таблица 4.1 - Вычисление среднего значения радиуса гиба и дисперсии

| Номер эксперимента | Радиус гиба | $x - \bar{x}$ |
|--------------------|-------------|---------------|
| 1 | 93,50 | 37,39 |
| 2 | 98,99 | 0,39 |
| 3 | 101,33 | 2,94 |
| 4 | 101,89 | 5,18 |
| 5 | 101,89 | 5,18 |
| 6 | 99,34 | 0,08 |
| 7 | 96,90 | 7,37 |
| 8 | 103,01 | 11,53 |
| 9 | 94,36 | 27,62 |
| 10 | 104,94 | 28,36 |
| | \bar{x} | s^2 |
| | 99,62 | 12,60 |

Предположим, что надежность равна 0,99. Отсюда коэффициент Стьюдента для десяти экспериментов и надежности 0,99 равен 3,25. По формуле 9 найдены границы доверительного интервала, которые приведены ниже:

$$(95,77;103,46) \quad (4.4)$$

При заданной надежности 0,99 и десяти экспериментах доверительный интервал равен 7,69 мм. Это значит, что в 99 случаях из 100 результаты протяжки будут попадать в доверительный интервал.

В результате численного моделирования радиус гиба равен 99,76 мм. Так как 99,76 попадает в доверительный интервал (4.4), то можно говорить, что созданная расчетная модель соответствует реальному процессу протяжки.

4.2 Оценка напряженно-деформированного состояния отводов

Далее опишем напряженно-деформированное состояние заготовки для того, чтобы определить наиболее нагруженные области, в которых вероятность разрыва заготовки выше всего.

На рисунке 4.1 показаны эквивалентные напряжения в трубах-заготовках в середине процесса протяжки первой трубы-заготовки. Из рисунка видно, что максимальные напряжения (47 МПа) в трубах-заготовках возникают на внутренней образующей в области, где сердечник начинает изгибаться. Столь низкое значение вызвано высокими температурами. Сравним полученное значение максимальных напряжений с пределом прочности материала заготовки при температуре 950 °С, который равен 200 МПа. Максимальные напряжения не превышают предел прочности, соответственно разрыва не происходит. По мере дальнейшего движения трубы-заготовки по сердечнику происходит уменьшение напряжений.

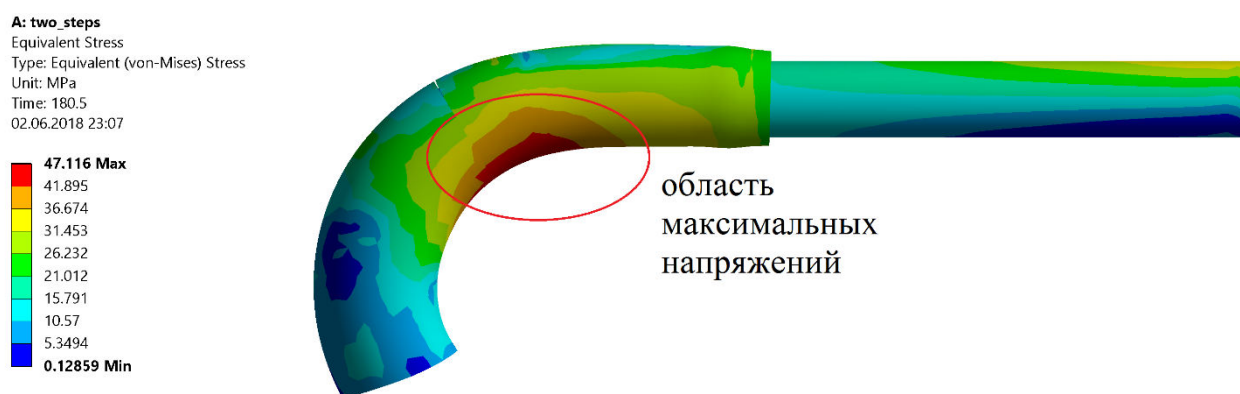


Рисунок 4.1 – Эквивалентные напряжения по Мизесу в трубах-заготовках, проходящих через сердечник, МПа

На рисунке 4.2 показаны пластические деформации труб-заготовок в середине процесса протяжки первой трубы-заготовки. Из рисунка видно, что максимальные пластические деформации в заготовках накапливаются на внутренней образующей трубы-заготовки, что согласуется с выводом анализа распределения напряжений о расположении зоны возможного разрушения.



Рисунок 4.2 – Пластические деформации в трубах-заготовках

4.3 Варьирование трения

При изготовлении отводов обычно используются разные смазывающие вещества для скольжения заготовки по сердечнику. Однако, вопрос, как смазывающее вещество, определяющее коэффициент трения, влияет на качество производимых отводов, остается открытым.

С целью определения влияния коэффициента трения на геометрические параметры отводов рассмотрим результаты численного моделирования при нескольких значениях коэффициента трения между внутренней поверхностью заготовки и внешней поверхностью сердечника: 0,14; 0,15; 0,16; 0,17 и 0,18.

В результате расчёта получено, что варьирование коэффициента трения не оказывает эффекта на радиусгиба и диаметры, так как разница при крайних значениях коэффициента трения не превышает 0,31%.

Разница между толщинами при крайних значениях коэффициента трения составляет 1,87%, что говорит о том, что трение влияет на итоговое значение толщины. Для толщин, изображенных на рисунке 4.3, приведены графики зависимости от коэффициента трения (рисунок 4.4). Из рисунка видно, что толщина линейно возрастает с увеличением коэффициента трения. Можно предположить, что при изменении коэффициента трения на 0,20 толщина изменится на 7,5 %, что в значительной степени отразится на итоговых размерах отвода.

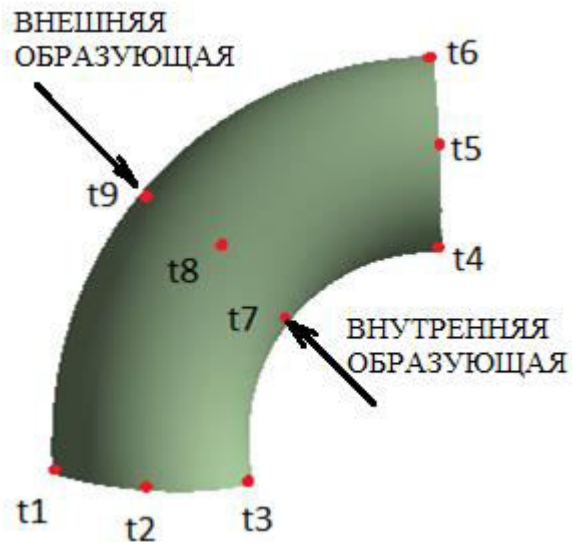


Рисунок 4.3 - Точки замера толщин

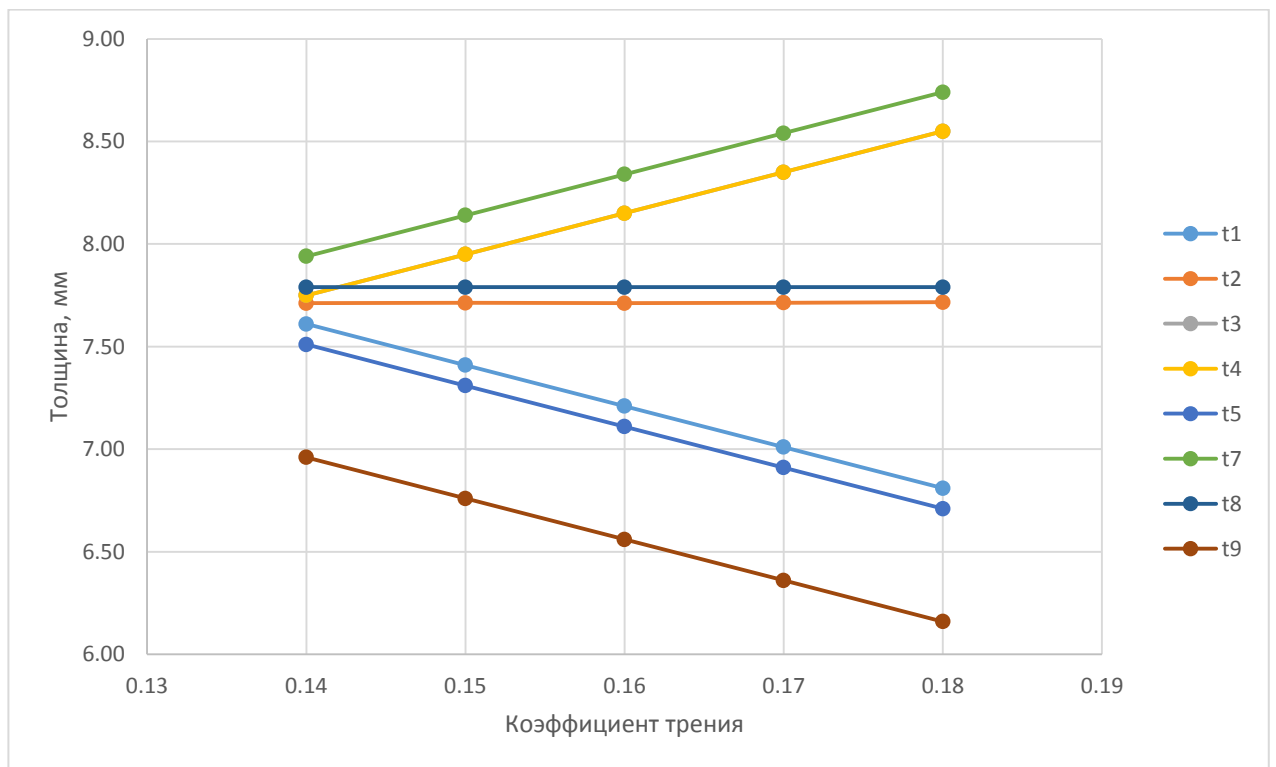


Рисунок 4.4 - Зависимость толщин от коэффициента трения

При изготовлении отводов существует проблема частого брака изделия, заключающаяся в утонении стенки на внешней образующей. Исходя из полученных результатов следует, что утонение отвода связано с повышенным значением коэффициента трения. То есть, для предотвращения излишнего утонения стенки на внешней образующей рекомендуется использовать

смазывающие вещества высокого качества, при которых трение между заготовкой и сердечником минимально.

4.4 Варьирование температуры

В процессе протяжки печь нагревается с помощью горелок. При этом температура в печи не постоянна и колеблется в пределах диапазона достаточного для изготовления отводов нужного типоразмера. Для изготовления отводов меньшего типоразмера требуется меньшая температура в печи, для большего типоразмера – наоборот. Тем не менее, поддерживать постоянную температуру в печи не представляется возможным, так как на рассматриваемом производстве нет автоматических устройств обратной связи для регулировки температурного режима. С целью определения влияния температурных условий на геометрические параметры трубы-заготовки, проведен расчет при нескольких температурах: 800, 850, 900, 950, 1000 С.

В результате численного моделирования выяснено, что варьирование температуры в пределах 200 градусов практически не влияет на радиус гиба и диаметры (разница меньше 1 %), но влияет на некоторые толщины.

На рисунке 4.5 изображен график зависимости толщин от температуры трубы-заготовки. Из рисунка видно, что наибольшим изменениям подвергаются толщины t_1 (3,39 %), t_4 (3,38 %) и t_7 (2,22 %). При этом с ростом температуры толщина стенки трубы-заготовки уменьшается.

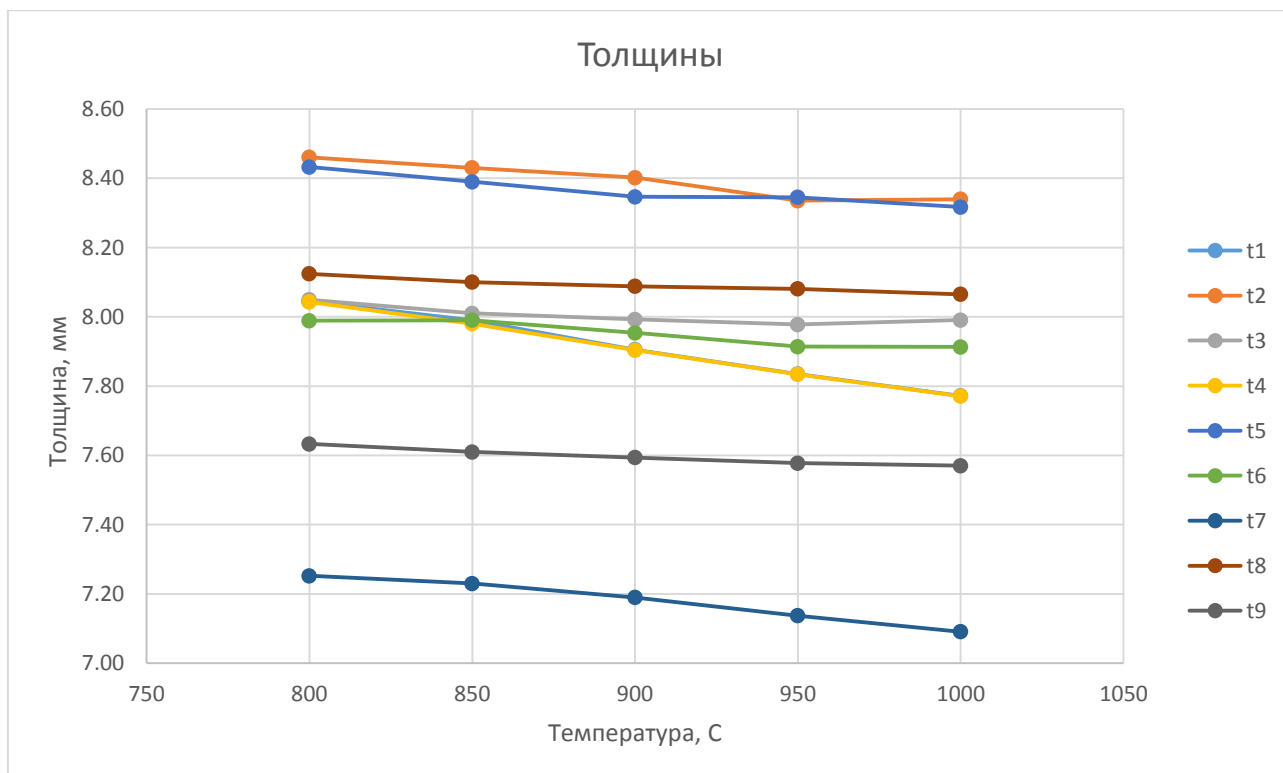


Рисунок 4.5 - График зависимости толщин от температуры

4.5 Варьирование скорости напрессовывания

С целью определения влияния скорости напрессовывания на геометрические размеры отвода, проведено численное моделирование протяжки на разных скоростях, отличающихся от искомой на 25, 50 и 100 %. В результате обнаружено, что скорость напрессовывания практически не влияет на радиусгиба, толшины и диаметры (отклонение меньше 1 %). Между тем скорость напрессовывания оказывает значительное влияние на напряженное состояние заготовки в ходе протяжки.

Рассмотрим поля напряжений заготовки в один и тот же момент времени, полученные в результате численного моделирования с разными скоростями напрессовывания. На рисунке 4.6 изображено распределение эквивалентных напряжений при исходной скорости напрессовывания, а на рисунке 4.7 – при скорости, в два раза превышающей исходную. Зона повышенных напряжений на втором рисунке значительно шире. Очевидно, что при увеличении скорости, возрастают напряжения на заготовке, а при слишком большой скорости может

произойти ее разрыв. Поэтому поддержание скорости напрессовывания в определенном диапазоне должно являться первоочередной задачей при ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТВОДОВ.

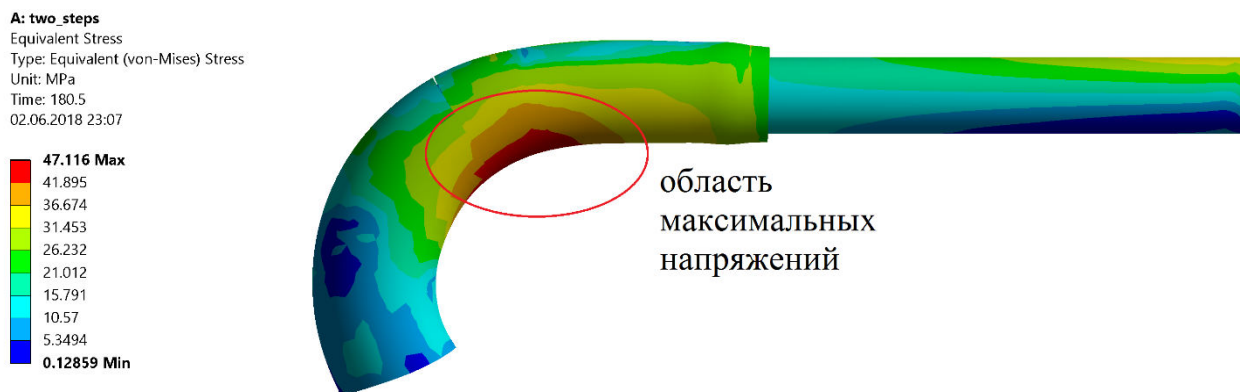


Рисунок 4.6 - Эквивалентные напряжения при исходной скорости напрессовывания

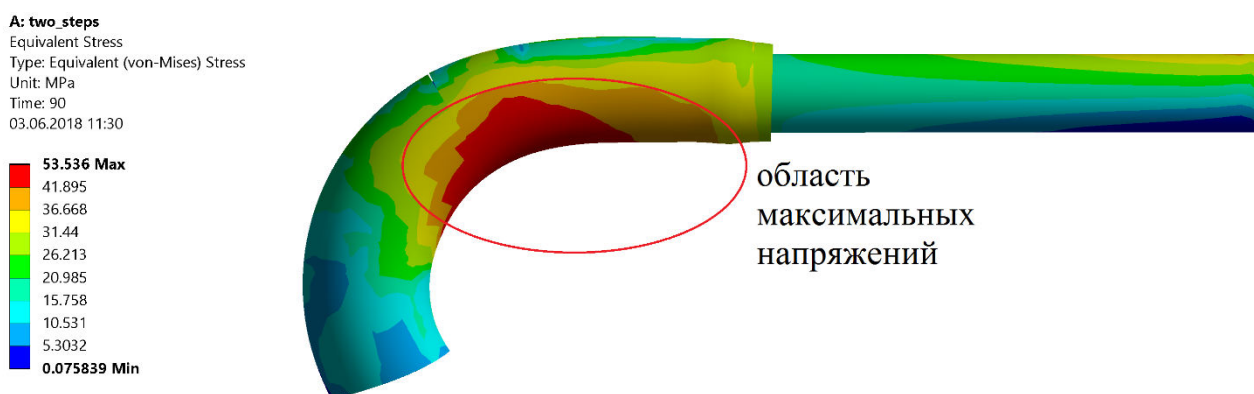


Рисунок 4.7 – Эквивалентные напряжения при скорости напрессовывания, в два раза превышающей исходную

При протяжке заготовки проталкиваются гидравлическим прессом через рогообразный сердечник, при этом давление пресса постоянно, но скорость напрессовывания изменяется в зависимости от того, какое количество заготовок находится на сердечнике. Чем больше заготовок, тем меньше скорость напрессовывания. Соответственно, чтобы поддерживать постоянную скорость напрессовывания, необходимо постоянно менять давление в прессе, которое выставляется вручную. Разумеется, процесс поддержания постоянной скорости напрессовывания трудоемок, однако полученные результаты могут

послужить рекомендациями при изготовлении отводов, так как причиной разрушения отвода может быть слишком высокая скорость напрессовывания.

Заключение

В настоящей работе достигнута основная цель и решены поставленные задачи. Построена расчетная модель процесса протяжки трубы-заготовки по рогаобразному сердечнику. Произведен расчет, по результатам которого получены итоговые геометрические размеры отвода: радиусгиба, толщины и диаметры. Достигнуто хорошее совпадение результатов численного моделирования с экспериментальными данными, что говорит о том, что расчетная модель корректно описывает процесс протяжки.

Проведен анализ напряженно-деформированного состояния заготовки и обнаружено, что область в середине нижней образующей является наиболее нагруженной. Тем не менее напряжения в этой области не превышают критических значений.

Исследовано влияние таких параметров протяжки, как скорость напрессовывания, температура и трение между заготовкой и сердечником на отклонения размеров отвода. Результаты варьирования трения показали, что утонение заготовки на верхней образующей и утолщение на нижней напрямую зависит от коэффициента трения. Результаты варьирования температуры показали, что температурный режим также оказывает влияние на итоговые значения толщин. Что касается скорости напрессовывания, то ее увеличение влечет за собой повышение напряжений в заготовке вплоть до разрыва.

Полученные результаты могут быть полезны для инженеров-технологов при разработке условий технологического процесса протяжки отвода.

Список литературы

1. Понгильский А. Ф. Слесарь по ремонту трубопроводов и пароводяной арматуры. – М.: Высшая Школа. – 1967. – 92 с.
2. В. Д. Маслов, К. А. Николенко, В. Д. Мисюра. Об особенностях деформирования анизотропной трубной заготовки при изгибе проталкиванием // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – 278-284 с.
3. A Rodriguez, M Mezzetti, P Fodor, R Colas. Forming of seamless pipe fittings // Journal of Materials Processing Technology. – 2002. – Volume 120. – Pages 432-437.
4. Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. - М.: Наука, 1970.
5. P. Perzyna. Fundamental problems in viscoplasticity // Advances in Applied Mechanics. – 1968. – Volume 9. – Pages 313-377.
6. D. Peirce, C.F. Shih, and A. Needleman. A tangent modulus method for rate dependent solids // Computers & Structures. – 1984. Volume 18. – Pages 888-975.
7. Lallit Anand. Constitutive equations for hot-working of metals // Internal Journal of Plasticity. – 1985. – Volume 1, Issue 3. – Pages 213-231.
8. Stuart B. Brown, Kwon H. Kim, Lallit Anand. An internal variable constitutive model for hotworking of metals // Internal Journal of Plasticity. –1989. – Volume 5, Issue 2. – Pages 95-130.
9. Zhong Zhihua. Static contact problems // Engineering Computation. – 1992. – Volume 9. Pages 3-37.
10. О.А. Романчук, В. И. Чеботарев, Г. И. Целоусова, В. В. Мухранова. Статистическая обработка и анализ экспериментальных данных массовых случайных явлений: Методические к расчетно-графической работе для

студентов II курса всех специальностей. – Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та. – 2004. – 21 с.

- 11.К. Дерффель. Статистика в аналитической химии. [Электронный ресурс] - М.: Мир, 1994. URL: <http://chemstat.com.ru/node/17> (дата обращения: 19.05.2018).
- 12.Sung, Y., Luo, G., Kerm, S. C. A Viscoplastic Constitutive Model for 63Sn37Pb Eutectic Solders // Journal of Electronic Packaging. – 2002. – Volume 124. – Pages 91-96.
- 13.Bai, N., Chen, X., and Gao, H. Simulation of Uniaxial Tensile Properties for Lead-Free Solders with Modified Anand Model // Materials and Design. – 2009. – Volume 30. – Pages 122- 128.
- 14.Rodgers, B., Flood, B., Punch, J., and Waldron, F. Determination of the Anand Viscoplasticity Model Constants for SnAgCu // in Proceedings of InterPACK. – 2005. – Pages 17-22.
- 15.Zhang, Y., Cai, Z., Suhling, J. C., Lall, P., and Bozack, M. J. The Effects of Aging Temperature on SAC Solder Joint Material Behavior and Reliability // Proceedings of the 58th IEEE Electronic Components and Technology Conference. – 2008. – Pages 99-112.

Приложение А

Таблица А.1 - Экспериментальные данные по толщинам для трубы-заготовки 89х8

| Продольное сечение / Поперечное сечение | А | В | С | Д |
|---|------|------|------|------|
| 1 | 8,03 | 8,12 | 8,15 | 7,80 |
| 2 | 7,93 | 8,34 | 8,13 | 7,80 |
| 3 | 8,03 | 8,25 | 8,17 | 7,79 |
| 4 | 7,98 | 8,25 | 8,19 | 7,62 |
| 5 | 8,02 | 8,24 | 8,22 | 7,62 |
| 6 | 7,92 | 8,16 | 8,12 | 7,59 |
| 7 | 7,93 | 8,11 | 8,08 | 7,48 |
| 8 | 8,03 | 8,18 | 8,05 | 7,82 |

Таблица А.2 - Экспериментальные данные по диаметрам для трубы-заготовки 89x8

| Диаметр Попереч- ное сечение | D1 | D2 |
|---------------------------------------|-------|-------|
| 1 | 116,9 | 112,5 |
| 2 | 116,2 | 113,0 |
| 3 | 115,8 | 113,2 |
| 4 | 115,7 | 113,2 |
| 5 | 115,6 | 113,1 |
| 6 | 115,5 | 113,0 |
| 7 | 115,6 | 112,7 |
| 8 | 115,8 | 112,6 |

Приложение Б

Таблица Б.1 – Сравнение результатов двух температурных режимов

| Параметр | Результат, мм | | Относительное изменение, % |
|----------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| | Постоянная температура 950°C | Переменная температура 850-950-900°C | |
| R | 104,78 | 104,51 | -0,25 |
| t1 | 7,16 | 7,16 | -0,05 |
| t2 | 7,56 | 7,52 | -0,58 |
| t3 | 8,27 | 8,29 | 0,25 |
| t4 | 8,01 | 7,96 | -0,61 |
| t5 | 8,12 | 8,08 | -0,54 |
| t6 | 8,18 | 8,19 | 0,15 |
| t7 | 9,16 | 9,12 | -0,43 |
| t8 | 9,27 | 9,20 | -0,81 |
| t9 | 7,43 | 7,42 | -0,10 |
| D1 | 110,16 | 109,29 | -0,79 |
| D2 | 112,42 | 113,03 | 0,54 |
| D3 | 99,48 | 99,89 | 0,41 |
| D4 | 116,75 | 116,06 | -0,59 |

Таблица Б.2 – Сравнение результатов первого и второго способов

| Параметр | Результаты, мм | Отклонение от эксперимента, % | Результаты, мм | Отклонение от эксперимента, % |
|----------|-------------------|--|-------------------|--|
| | Методика 1 | | Методика 2 | |
| R | 101,13 | 1,43 | 101,13 | 1,43 |
| t1 | 6,76 | -13,31 | 7,89 | 1,15 |
| t2 | 9,37 | 14,93 | 8,41 | 3,19 |
| t3 | 7,99 | -1,60 | 8,01 | -1,35 |
| t4 | 7,89 | -3,55 | 7,89 | -3,55 |
| t5 | 6,10 | 3,73 | 6,10 | 3,73 |
| t6 | 5,93 | 1,92 | 5,93 | 1,92 |
| t7 | 6,50 | -13,09 | 6,50 | -13,09 |
| t8 | 6,30 | -1,10 | 6,30 | -1,10 |
| t9 | 6,02 | -0,26 | 6,02 | -0,26 |
| D1 | 119,43 | 2,16 | 116,97 | 0,06 |
| D2 | 110,76 | -1,55 | 114,97 | 2,20 |
| D3 | 117,00 | 1,04 | 117,00 | 1,04 |
| D4 | 114,89 | -0,61 | 114,89 | -0,61 |

Приложение В

Таблица В.1 - Результаты численного моделирования для толщин

| Продольное сечение Поперечн ое сечение | В | | С | | D | |
|---|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| | Экспе римен т | Числ. Мод-е | Экспе римен т | Числ. Мод-е | Экспе римен т | Числ. Мод-е |
| 1 | 8,12 | 7,72 | 8,15 | 8,23 | 7,80 | 7,90 |
| | -4.94% | | 1.01% | | 1.23% | |
| 2 | 8,34 | 7,80 | 8,13 | 8,26 | 7,80 | 7,81 |
| | -6.50% | | 1.62% | | 0.10% | |
| 3 | 8,25 | 8,22 | 8,17 | 8,40 | 7,79 | 7,86 |
| | -0.34% | | 2.81% | | 0.86% | |
| 4 | 8,25 | 8,78 | 8,19 | 8,53 | 7,62 | 7,95 |
| | 6.48% | | 4.13% | | 4.27% | |
| 5 | 8,24 | 7,14 | 8,22 | 8,02 | 7,62 | 7,53 |
| | -13.39% | | -2.38% | | -1.17% | |
| 6 | 8,16 | 7,36 | 8,12 | 8,10 | 7,59 | 7,65 |
| | -9.76% | | -0.20% | | 0.78% | |
| 7 | 8,11 | 7,56 | 8,08 | 8,17 | 7,48 | 7,73 |
| | -6.77% | | 1.15% | | 3.32% | |
| 8 | 8,18 | 7,72 | 8,05 | 8,23 | 7,82 | 7,82 |
| | -5.64% | | 2.26% | | -0.03% | |

Таблица В.2 - Результаты численного моделирования для диаметров

| Диаметр Поперечное сечение | D1 | | D2 | |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Эксперимент | Числ. Мод-е | Эксперимент | Числ. Мод-е |
| 1 | 116,90 | 115,40 | 112,50 | 113,40 |
| | -1,28% | | 0,80% | |
| 2 | 116,20 | 115,56 | 113,00 | 112,96 |
| | -0,55% | | -0,04% | |
| 3 | 115,80 | 114,10 | 113,20 | 112,52 |
| | -1,47% | | -0,60% | |
| 4 | 115,70 | 114,37 | 113,20 | 112,94 |
| | -1,15% | | -0,23% | |
| 5 | 115,60 | 114,56 | 113,10 | 113,02 |
| | -0,90% | | -0,07% | |
| 6 | 115,50 | 114,96 | 113,00 | 113,21 |
| | -0,47% | | 0,19% | |
| 7 | 115,60 | 115,22 | 112,70 | 113,39 |
| | -0,33% | | 0,61% | |
| 8 | 115,80 | 115,59 | 112,60 | 113,52 |
| | -0,18% | | 0,82% | |