

# Исследование формоизменения и разработка технологии изготовления на ГПС гнутых профилей на основе математического моделирования с использованием пакета LS-DYNA

*Дипломник Некрасов С.А.*

## *Содержание диплома*

### СОДЕРЖАНИЕ

#### ВВЕДЕНИЕ

#### 1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ К РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИИ

##### 1.1. Литературный обзор

##### 1.1.1. Применение гнутых тонкостенных профилей

##### 1.1.2. Программное обеспечение для математического моделирования

##### 1.1.3. Патентный поиск

##### 1.1.4. Состояние вопроса

##### 1.2. Основные исходные данные

#### 2. НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

##### 2.1. Описание пакета LS-DYNA

##### 2.2. Моделирование процесса изготовления профиля квадратного сечения методом конечных элементов в программе LS-DYNA

##### 2.2.1. Исследование модели с различными материалами

##### 2.2.2. Исследование модели с различной толщиной стенки заготовки

##### 2.3. Экспериментальные исследования процесса обжатия круглой трубной заготовки для получения профиля квадратного сечения 32x32x2.5 мм

##### 2.4. Моделирование процесса изготовления С-образного профиля методом конечных элементов в программе LS-DYNA

#### 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

##### 3.1. Расчет ширины исходной заготовки

##### 3.1.1. С – образный профиль «Штакетник» 21x70x0,5

##### 3.1.2. Профиль «Квадрат» 32x32x2,5

##### 3.2. Анализ технологичности деталей

##### 3.2.1. Материал и требования, предъявляемые к исходной заготовке

##### 3.2.2. Радиусы изгиба

- 3.2.3. Расчет зоны плавного перехода
- 3.3. Выбор оптимального способа раскроя материала и определение коэффициента использования (КИМ)
- 3.4. Определение положения профилей в роликах
- 3.5. Выбор схемы и режимов формообразования
  - 3.5.1. Выбор технологического процесса профилирования
  - 3.5.2. Выбор углов подгибки профилей по переходам
  - 3.5.3. Выбор радиусов закругления переходных форм, выбор принципа формовки (схемы формообразования) профилей
- 3.6. Определение энергосиловых параметров операций технологического процесса изготовления профилей
  - 3.6.1. Определение усилий и моментов на первой паре валков
- 3.7. Выбор основного и вспомогательного технологического оборудования
- 3.8. Техническое нормирование и определение нормы штучного времени

#### 4. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

- 4.1. Разработка профилирующей оснастки
  - 4.1.1. Алгоритм проектирования профилирующей оснастки
  - 4.1.2. Этапы проектирования переходов
  - 4.1.3. Проектирование профилирующей оснастки
  - 4.1.4. Изготовление профилирующей оснастки
  - 4.1.5. Установка и отладка профилирующей оснастки
- 4.2. Средства механизации и автоматизации, применяемые на участке
- 4.3. Описание и принцип работы ГПС 350 – М8
- 4.4. Описание конструкции и работы устройства для отрезки профиля
  - 4.4.1. Назначение и область применения
  - 4.4.2. Принцип работы устройства для отрезки профиля
  - 4.4.3. Расчет основных параметров для отрезного устройства

#### 5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

- 5.1. Проведение исследований с применением СПУ
- 5.2. Расчет экономического эффекта от реализации проекта
  - 5.2.1. Расчет капитальных затрат
  - 5.2.2. Расчет себестоимости продукции
- 5.3. Техничко-экономические показатели

#### 6. БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОЕКТА

- 6.1. Анализ опасных и вредных факторов на рабочем месте технолога с ПЭВМ
- 6.2. Разработка мероприятий по охране труда на рабочем месте
- 6.3. Расчет освещения на рабочем месте с ПЭВМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

ПРИЛОЖЕНИЯ

## 2. НАУЧНО – ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

### 2.1. Описание пакета LS-DYNA

Применяемые в настоящее время методы изготовления гнутых профилей устарели и не отвечают требованиям, предъявляемым к технологии и оборудованию, а именно компактность, мобильность, быстропереоснащаемость такого оборудования и малый срок окупаемости данной технологии и оборудования.

Поэтому разработка новых технологий, которые отвечали бы этим требованиям, являются актуальной задачей в настоящее время.

Переход от старой технологии к новой требует немалых финансовых вложений, большой теоретической и экспериментальной базы, где можно было набирать и анализировать накопленный материал и опыт. Все это может затягиваться на многие годы.

Выходом из этой ситуации может служить применение компьютерных программ, основанных на методе конечных элементов, которые способны с высокой точностью воспроизводить реальный технологический процесс. Для процессов обработки металлов давлением наиболее адекватным является моделирование процесса в LS-DYNA . Данная программа позволяет смоделировать практически любой процесс в обработке металлов давлением (ОМД).

Процесс профилирования является одним из сложных процессов в ОМД, в котором есть немало тонкостей. Все эти особенности позволяет учесть программа LS-DYNA при моделировании данного процесса.

LS-DYNA - многоцелевая программа, использующая явную постановку метода конечных элементов (explicit finite element program) - предназначена для анализа нелинейного динамического отклика трехмерных неупругих структур. Полностью автоматизированный процесс решения контактных задач, а также множество функций по проверке получаемого решения позволяют инженерам во всем мире успешно решать сложнейшие задачи удара, разрушения и формования.

LS-DYNA позволяет использовать математическое моделирование для решения задач ОМД. Математическое моделирование является наиболее совершенным и эффективным методом моделирования, открывая путь для применения современных мощных методов математического анализа, вычислительной математики и программирования при исследовании и оптимизации технологических процессов. В настоящее время количественные методы исследования проникают практически во все сферы человеческой деятельности, а математические модели становятся средством познания основных закономерностей реального мира.

Моделирование позволяет оптимизировать температурно-скоростные, учитывающие напряжённо-деформированное состояние, условия процессов, проектировать оптимальные технологии. Этому способствует адекватность моделей технологического процесса, а также точное описание реологического поведения металла в условиях горячей деформации.

Современная форма математического моделирования - это моделирование на компьютере с использованием математических методов. Вычислительные машины дали учёным мощное средство для математического моделирования. Математические модели являются основой моделирования. Развитие методов математического моделирования и оптимизации технологических процессов обработки металлов давлением в сочетании с широким внедрением персональных компьютеров позволяют создавать уникальные программы, позволяющие в автоматизированном режиме моделировать процессы пластического формоизменения, исследовать напряжённо-деформированное состояние, температурные поля при обработке металлов давлением.

Для решения задач обработки металлов давлением наиболее эффективным в настоящее время является применение программ, основанных на методе конечных элементов. К таким программам кроме LS-DYNA можно отнести ABAQUS, MSC и др.

Существуют различные методы изготовления деталей в виде тонкостенных профилей. К одному из таких методов можно отнести изготовление обжатием или редуцированием трубной заготовки. Данный метод позволяет изготавливать профили различного поперечного сечения замкнутого вида и имеет ряд преимуществ перед традиционными методами изготовления из плоской заготовки. Например, для изготовления профиля прямоугольного поперечного сечения традиционным методом понадобится от 6 до 12 технологических переходов, в то время как при изготовлении из трубной заготовки количество требуемых переходов может составлять от 4 до 6. Кроме того, при изготовлении таких профилей требуется гораздо меньший состав оборудования, поскольку в этой линии отсутствует такие элементы как подающая рулонница, устройство резки и сварки профиля. Поэтому данная технология применяется довольно широко при изготовлении определенного сортамента профилей замкнутого поперечного сечения.

Несмотря на то, что в качестве технологической оснастки в обоих случаях применяются ролики, взаимодействие исходной заготовки и роликового инструмента отличаются. Это же относится и к контактному взаимодействию заготовки и инструмента, что особенно актуально при изготовлении профилей с покрытием.

Исследование контактного взаимодействия в настоящее время наиболее рационально путем моделирования процесса в программах математического анализа. В данном случае использовали программу математического моделирования LS-DYNA. В данной программе моделировался процесс обжатия трубной заготовки в роликовых калибрах. Инструмент был рассчитан на изготовление из круглой трубной заготовки профиля квадратного сечения. Использование программы позволяет еще на стадии разработки роликовой оснастки, показать какой бы был профиль при реальном изготовлении данной оснастки, показать дефекты, в случае их возникновения, а также напряженно-деформированное состояние в любом месте профиля, в любой момент времени. Программа LS-DYNA позволяет также оценить контактное взаимодейст-

вие, например, значение нормальных и касательных напряжений в зоне контакта, что актуально при изготовлении профилей из заготовки с предварительно нанесенным покрытием.

## 2.2. Моделирование процесса изготовления профиля квадратного сечения методом конечных элементов в программе LS-DYNA.

### Цели исследования обжатия трубной заготовки:

- Выявление особенностей деформирования.
- Подбор материала для наилучшего редуцирования трубной заготовки.
- Проверка адекватности математической модели, сопоставив ее с полученным на практике образцом.

Параметры моделирования следующие: тип элемента – Shell 163 с однотоочечной редуцированной схемой интегрирования по плоскости, модель материала: для профиля – билинейная изотропная модель (\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC), для роликов - инструментальная сталь У8. Ролики задавались как абсолютно жесткие (Rigid) тела, КЭ сетка задавалась только на их поверхности, используя тип элемента Shell 163 тип контактного элемента: заготовка – формирующие ролики-Forming surface-to-surface contact (ASTS), заготовка – направляющие и промежуточные ролики-Automatic surface-to-surface contact (ASTS).

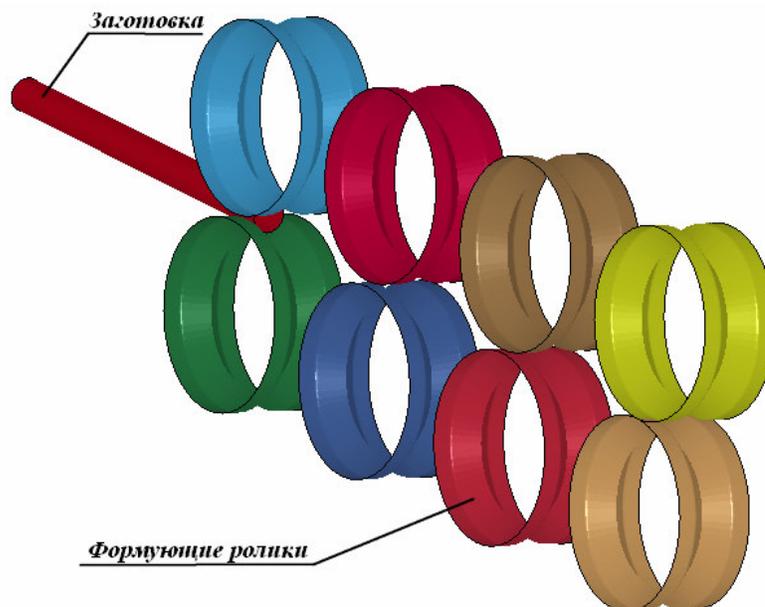


Рис. 2.1. Формообразующая оснастка (4 пары роликовых калибров) для изготовления профиля 32x32x2,5мм

### 2.2.1. Исследование модели с различными материалами.

Было выбрано четыре типа материала с совершенно разными свойствами, характеристика которых представлена в таблице 2.1. Выбор данного материала связан больше с научной точки зрения, чем с практической.

Таблица 2.1  
Характеристики материалов профилей

Материал	1018 Steel	Aluminum	Nickel Alloy	Titanium Alloy
Плотность ( $\rho$ ), т/м <sup>3</sup>	7,86e-9	2,7e-9	8,49e-9	4,65e-9
Модуль Юнга (E), МПа	2e5	7e4	1,8e5	1e5
Коэффициент Пуассона	0,27	0,3	0,31	0,36
Предел текучести ( $\sigma_T$ ), МПа	310	120	900	112
Касательный модуль, МПа	763	700	445	700

Конечно-элементная модель (рис. 2.2) включала в себя 60000 оболочных элементов на исходной заготовке и 20000 оболочных элементов на роликовом инструменте.

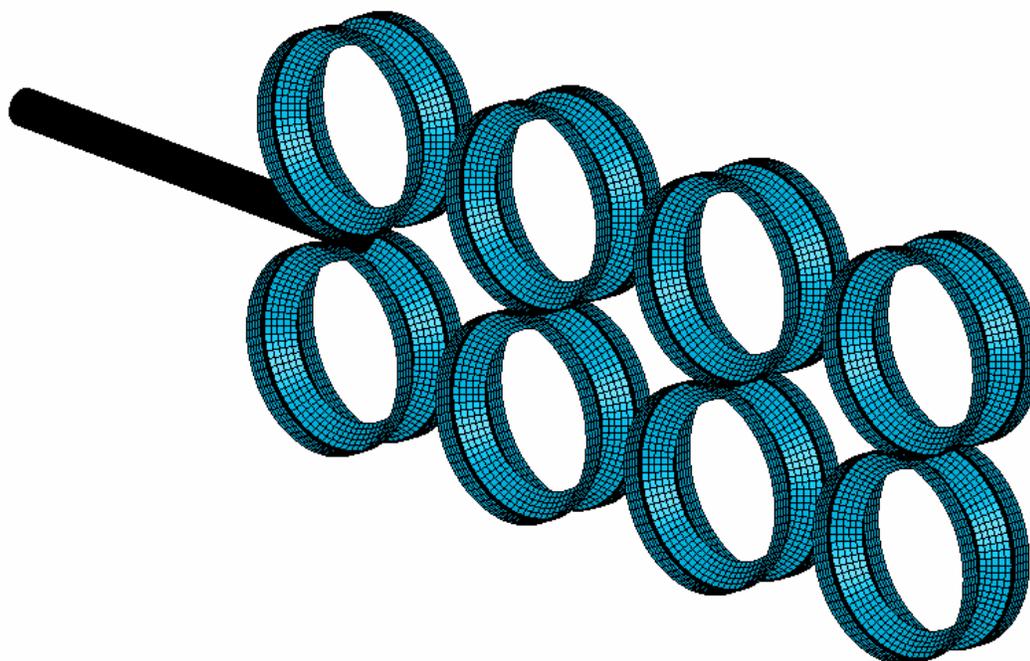


Рис. 2.2. Конечно-элементная модель роликов и заготовки.

Формоизменение заготовки методом конечных элементов осуществляли следующим образом. Заготовка в виде трубы длиной 900 мм, диаметром Ø38 мм и толщиной стенки 2,5 мм поступала в первый переход, при этом

верхний формующий ролик поднят на 5 мм. На ролики задавались угловые скорости, соответствующие направлению проката. Движение полосы через калибры происходило под воздействием сил трения, возникающих в процессе подгибки элементов полок, что полностью соответствует реальному процессу.

Заготовку продвигали на 3 мм перпендикулярно оси симметрии роликов для более надежного и качественного захода в калибр. Через заданное время (0,005с) ролики начинали вращаться, при этом верхний ролик также начинал опускаться (время перемещения верхнего ролика составляет 0,01с), приводя в движение заготовку и образуя сечение профиля в соответствии с калибром. Заготовка начинала перемещаться по направляющим роликам (рис. 2.1), проходя через четыре перехода.

По результатам моделирования построены сечения профилей, изображенные на (рис. 2.3). Все сечения сняты в режиме «Contours of Effective Plastic strain».

По сечениям мы видим, как распределились пластические деформации.

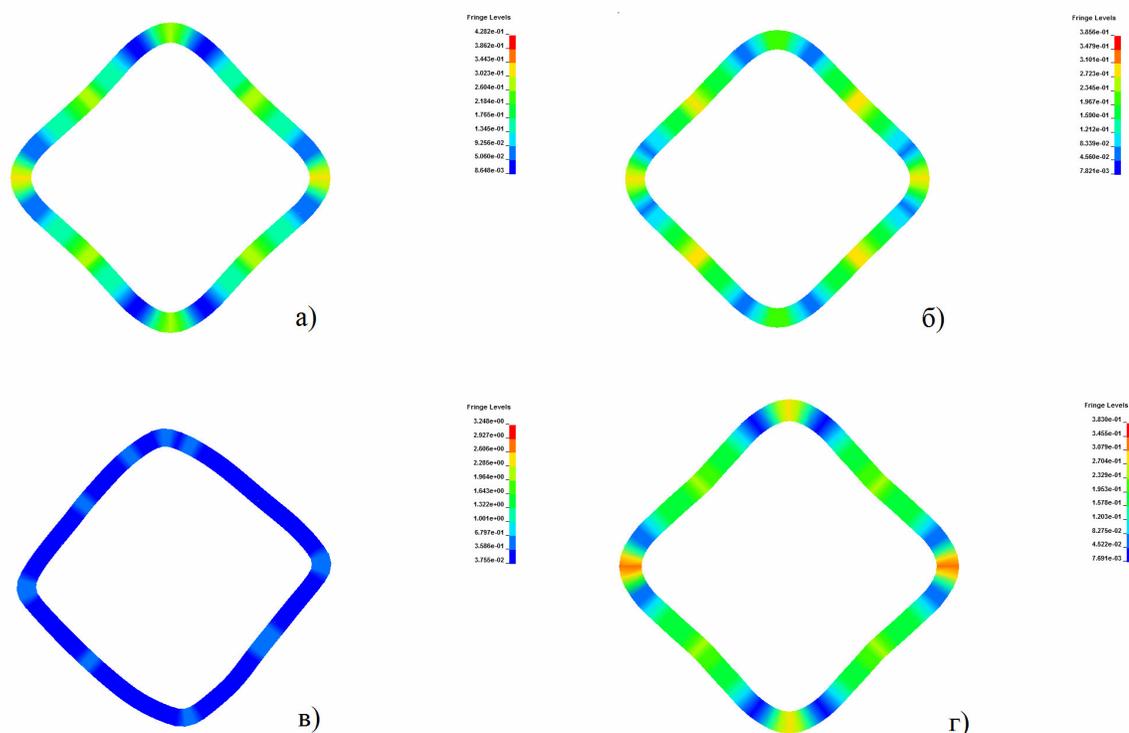


Рис. 2.3. Сечения профилей.  
а) Steel 1018; б) Aluminum; в) Nickel Alloy; г) Titanium Alloy.

На всех изображениях (Рис.2.3.) мы видим явное различие радиусов расположенных в горизонтальном сечении и в вертикальном сечении профилей. Что в свою очередь обуславливается меньшим количеством

формообразующих клеток и их вертикальным расположением. Моделирование процесса редуцирования трубной заготовки осуществлялось максимально приближенно к практическому эксперименту. В ОАО “Ульяновский НИ-АТ” отсутствует оборудования для проведения иного расположения формообразующей оснастки (рис.2.4.), именно поэтому расположение роликов вертикально в моделировании.

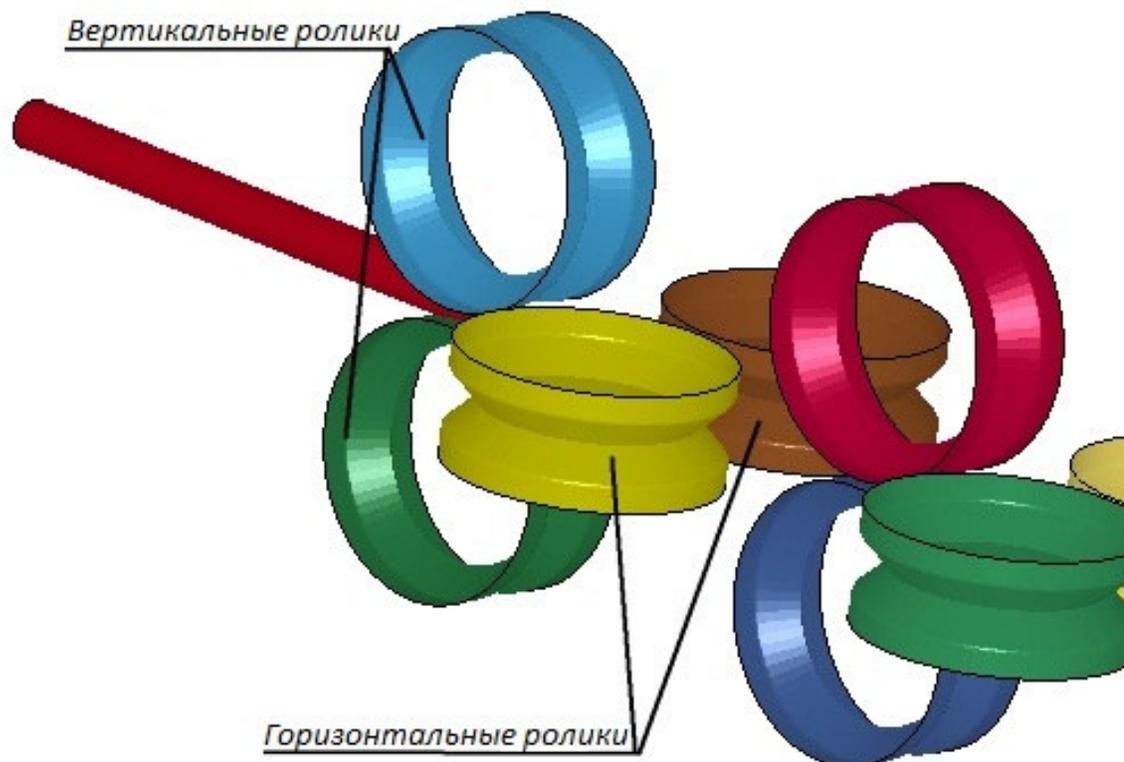


Рис.2.4. Формующая оснастка с вертикальными и горизонтальными роликами

### 2.2.2. Исследование модели с различной толщиной стенки заготовки.

Мы провели дополнительное моделирование с различной толщиной стенки трубной заготовки. Первоначально было выбрано 4 размера толщины – 2 мм, 2,5 мм, 3 мм, 3,5 мм. Проведя моделирование со всеми размерами, было выявлено, что модель заготовки с толщиной стенки в 2 мм не была захвачена первой парой роликов, что привело к невозможности ее использования в анализе. Мы видим (Рис.2.5) что радиус горизонтальных пар с изменением толщины стенки присутствует во всех типах материала.

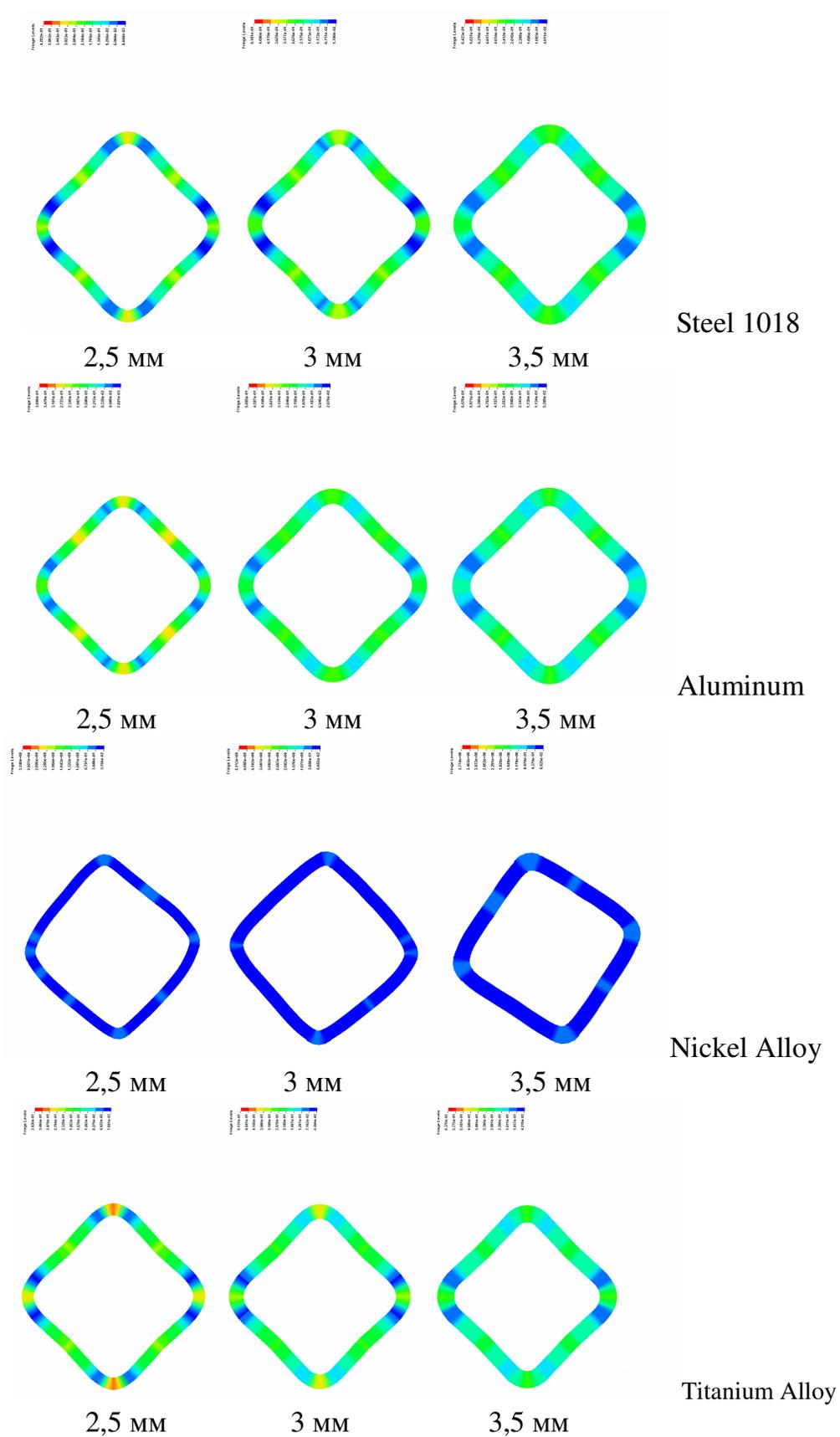


Рис. 2.5. Сечения профилей.

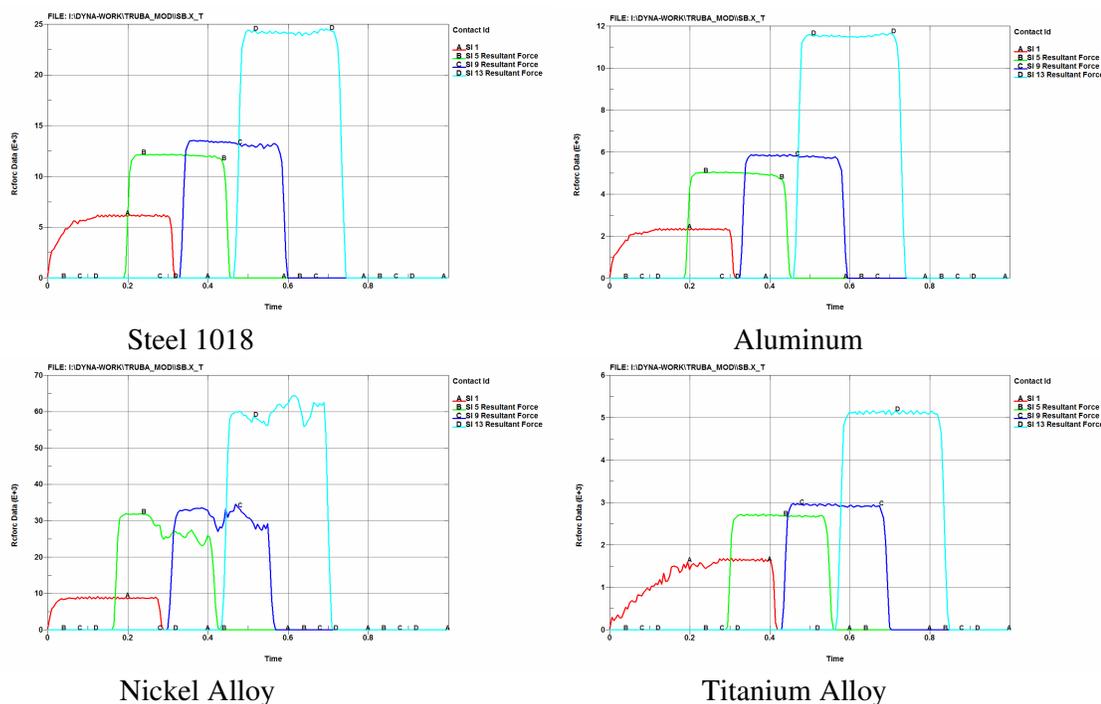


Рис. 2.5.1. Усилия деформирования

Как было отмечено ранее, данное моделирование было выполнено с научной точки зрения, но оно показало, что:

1. Разные материалы деформируются по-разному.
2. Требуется разные усилия деформирования (Рис. 2.5.1).
3. Форма конечного профиля для разных материалов разная.

### *2.3. Экспериментальные исследования процесса обжатия круглой трубной заготовки для получения профиля квадратного сечения 32x32x2.5мм.*

#### Цели исследования:

1. Проанализировать возможность практического изготовления профиля квадратного сечения в вертикальных роликовых калибрах
2. проверить адекватность математической модели.

#### Основные факторы процесса и применяемые методы

Основными факторами, влияющими на процесс пластического формоизменения заготовки при интенсивном деформировании являются:

- геометрические характеристики сечения профиля (форма и размеры);
- технологические характеристики (параметры заготовки, схемы и режимы формообразования, включая углы подгибки по переходам,

величину и точность установки зазоров в формующих калибрах, выбор и установку оси профилирования);

- характеристики оборудования (количество переходов; межклетьевое расстояние).

При экспериментальных исследованиях применяемое оборудование, инструменты и приборы приведены в табл. 2.2.

При настройке профилегибочного оборудования и формующей оснастки контролировали следующие параметры:

- расположение оси профилирования в горизонтальной плоскости;
- расположение оси профилирования в вертикальной плоскости;
- расположение оси профилирования относительно базовой плоскости;
- расположение направляющего устройства;
- зазоры в формующих калибрах экспериментального оснащения.
- 

Таблица 2.2

Оборудование, инструменты и приборы применяемые  
при исследовании

№	Наименование	Назначение	Примечание
1	2	3	4
1	Гибочно-прокатные станки: ГПС350М8	Профилирование заготовок	
2	Экспериментальная оснастка	Исследование схем формообразования	
3	Фотоаппарат Panasonic Lumix DMC-LS75, сканер Mustek 12000	Фотографии и изображения образцов	
4	Компьютер (II-IV)	Введение базы данных изготавливаемых профилей, технологических особенностей изготовления, статистическая обработка результатов, выполнение расчетов	
5	Штангенциркули ШЦ-I-125, ШЦ-I-250	Измерение линейных параметров заготовок, оснастки	ГОСТ 166-80
6	Набор щупов №2, №4	Замер зазоров в роликах	ТУ 2-034-225-87
7	Наборы радиусных шаблонов №1, №3	Замер радиуса кривизны заготовки в межклетьевом пространстве и радиусов скругления ролика	ТУ 2-034-228-88
8	Угломер 1-2	Замер угловых размеров профиля, оснастки	ГОСТ 5378-88

Для подтверждения адекватности теоретической и конечно-элементной модели в ОАО “Ульяновский НИАТ” были произведены экспериментальные исследования изготовления данного профиля по рассматриваемой технологической схеме. Данный профиль был испытан на гибочно-прокатном станке ГПС-350М8 (рис. 2.6), с технической характеристикой, указанной в таблице 2.3.

В нашем случае использовалась только одна формующая клеть.

Таблица 2.3

Технические характеристики станка ГПС-350М8

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1.	Число клетей, шт.	8
2.	Межклетьевое расстояние, мм	400
3.	Межосевое расстояние, мм	120...160
4.	Диаметр рабочих валов, мм	65
5.	Базовые диаметры роликов, мм	90
6.	Скорость профилирования, м/мин	6
7.	Вспомогательные устройства: направляющее и правильное, шт.	4



Рис.2.6. Гибочно-прокатный стан ГПС-350М8

Данный профиль был получен за 4 прохода в одном формующем переходе. Зазор между роликовыми калибрами (рис. 2.7) по переходам указан в таблице 2.4

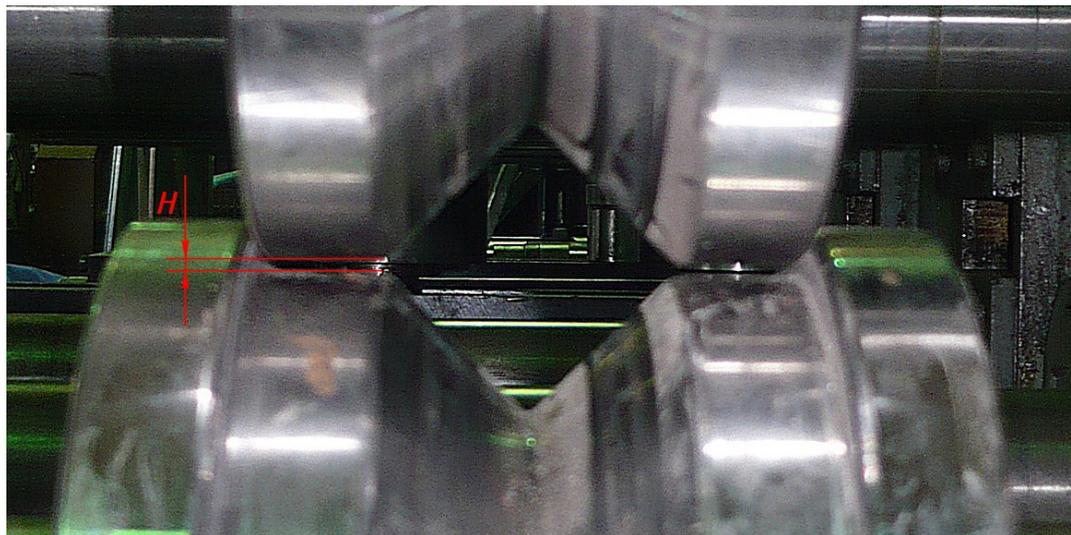


Рис. 2.7. Зазор формующего перехода.

Таблица 2.4

Зазор между посадками роликового калибра

Номер перехода	Величина зазора Н, мм
Первый проход	6
Второй проход	4
Третий проход	2
Четвертый проход	0

#### Описание эксперимента

В качестве исходной материала заготовки была выбрана Сталь 20. В качестве заготовки мы взяли трубу  $\text{Ø}38$  мм с толщиной стенки 2.5 мм. С помощью отрезной пилы мы разрезали ее на четыре заготовки длиной 200 мм. Далее мы установили формующую оснастку на ГПС350-М8. В качестве оснастки мы используем экспериментальный роликовый калибр состоящий из верхнего и нижнего ролика (рис. 2.8).

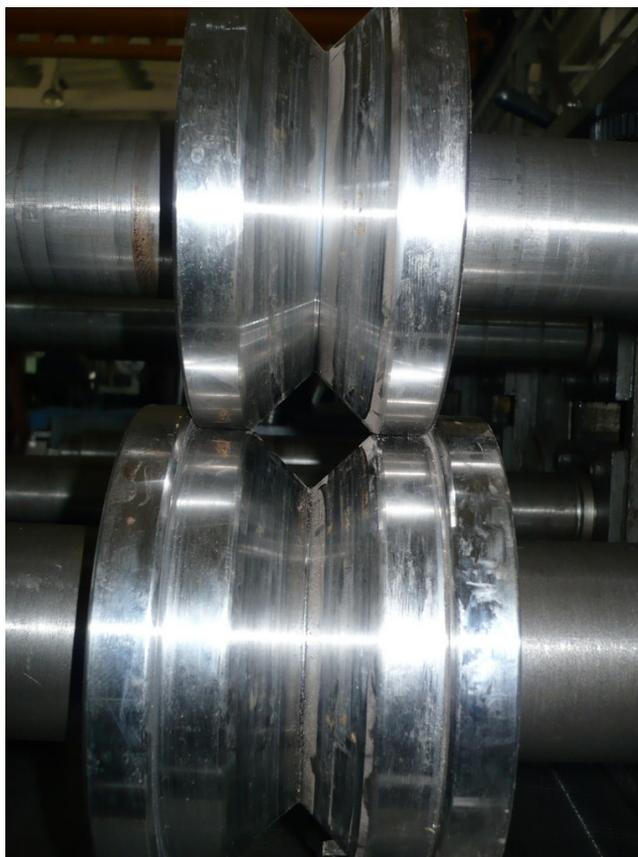


Рис. 2.8. Роликовый калибр.

Выставляем с помощью щупа зазор между роликами согласно таблице 4.10. После прокатки партии заготовок в роликах с зазором в 6мм мы откладываем одну заготовку в сторону. Далее выставляем уже новый зазор в 4 мм. (Рис. 2.9)



Рис.2.9. Роликовая обжимная оснастка. Процесс изготовления профиля.

И снова после прокатки партии из оставшихся заготовок откладываем в сторону одну. И так до последнего – окончательного перехода с величиной зазора в 0 мм. Получили четыре профиля с разной степенью деформации (рис. 2.10).



Рис.2.10. Профили, полученные после обжатия по переходам.  
а) 4-ый проход; б) 3-ий проход; в) 2-ой проход; г) 1-ый проход.

Соответственно по краям профилей мы имеем деформированные стенки, полученные вследствие начала процесса формоизменения профиля в роликах. Чтобы нам получить качественное сечение для снятия результата, мы обрезаем деформированные концы с помощью отрезной пилы. После отрезки на торцах профилей имеются заусенцы, их зачищаем напильниками – «круглым» и «прямым» расположением рабочей части (Рис.2.11)

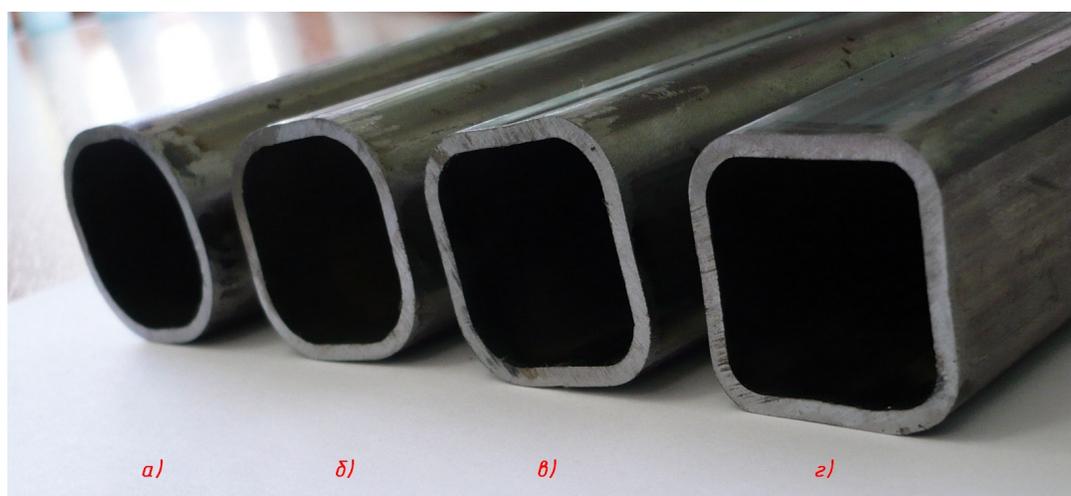


Рис.2.11. Профили после обрезки и зачистки.  
а) 1-ый проход; б) 2-ий проход; в) 3-ой проход; г) 4-ый проход.

Итак, основная часть эксперимента окончена, теперь мы снимаем полученные результаты сечений по переходам с помощью сканера Mustek 12000 (Рис. 2.12)

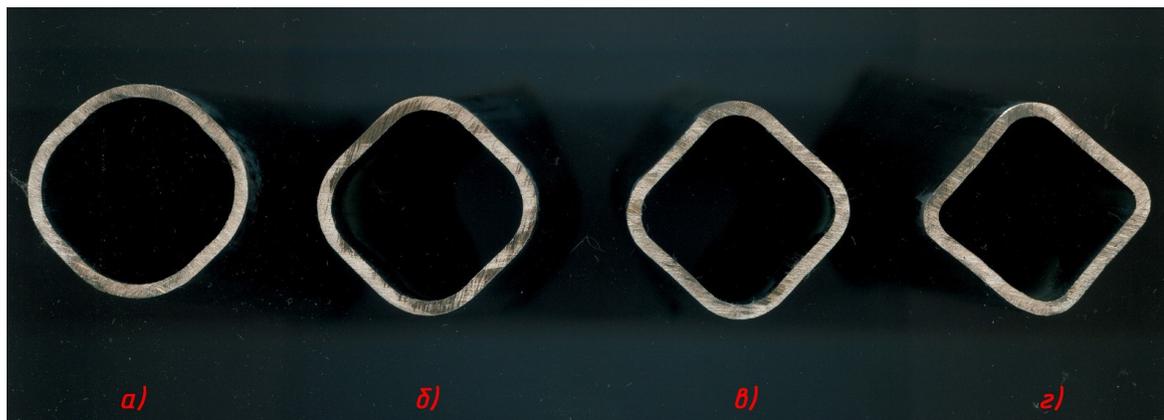


Рис.2.12. Сечения профилей по переходам, полученные экспериментально.  
а) 1-ый проход; б) 2-ий проход; в) 3-ой проход; г) 4-ый проход.

Теперь сравним сечения полученным экспериментальным путем и математическим моделированием. (Рис. 2.13)

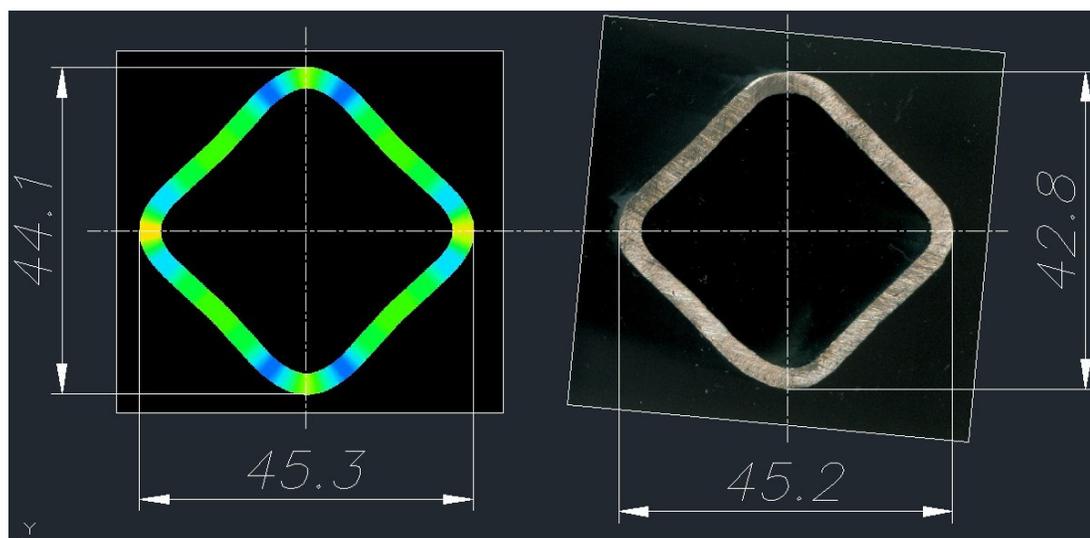


Рис. 2.13. Моделированное и практическое сечения.

Результаты практического эксперимента позволили сделать следующие выводы:

- Возможна практическая реализация процесса обжатия трубной заготовки в вертикальных роликах;
- Результаты практической апробации процесса соответствует результатам математического моделирования;
- Можно рекомендовать использование данной технологии для получения труб в производственных цехах.

## 2.4. Моделирование процесса изготовления С - образного профиля методом конечных элементов в программе LS-DYNA.

При разработке технологических процессов на изготовление любого типа профилей основной целью является получение профиля высокого качества, а также не имеющего таких дефектов, как кромковая волнистость полок, скручивание вдоль оси профилирования, прогиба донной части, нарушение покрытия. Для тонкостенных профилей первичным дефектом является кромковая волнистость. Наиболее часто данному дефекту подвержены профили, толщина которых варьируется в пределах 0,3 – 0,6 мм.

Примером может служить профиль “Штакетник” (рис. 2.14), который применяется при строительстве ограждений (рис. 2.15).[ ]

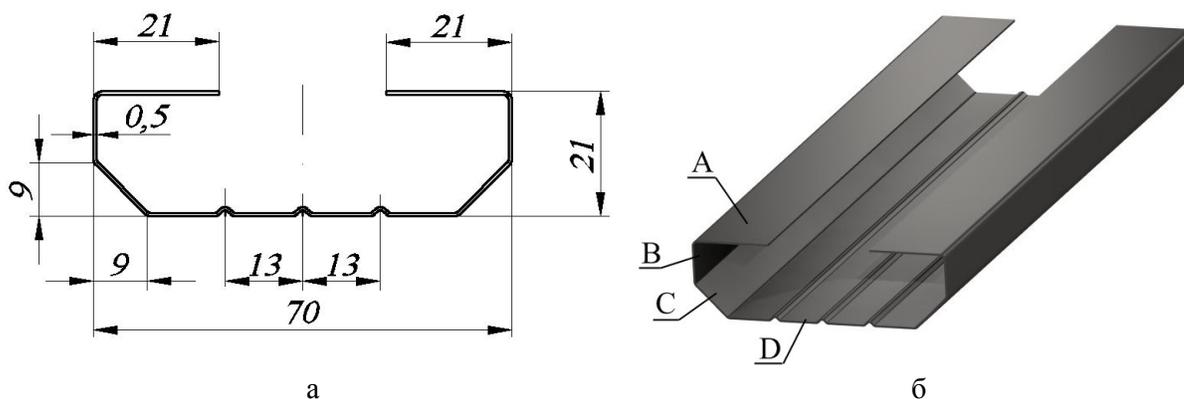


Рис. 2.14. Профиль “Штакетник”: а – чертеж профиля, б – готовый профиль (А – горизонтальная полка (отбортовка), В – вертикальная полка, С – наклонная полка, D – донная часть профиля)

Особенностью данного профиля является наличие больших горизонтальных полок (отбортовок) шириной  $40S$  при  $S = 0,5$  мм, имеющие угол подгибки  $180^\circ$ , а также рифтов в донной части профиля.



Рис. 2.15. Применение профиля “Штакетник”

Основной проблемой, возникающей при изготовлении профиля, является дефект кромковой волнистости по отбортовке (рис. 2.16), возникающих в результате образования продольных деформаций по отбортовкам.

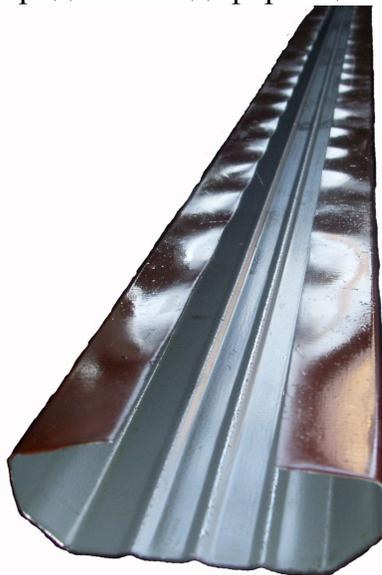


Рис. 2.16. Кромковая волнистость на профиле

Данный профиль изготавливается за 8 технологических переходов из стали 08кп, с предварительно нанесенным декоративным лакокрасочным покрытием.

Процесс изготовления профиля из листовой заготовки происходит в 8-и роликовых калибрах (рис. 2.17), где последовательной подгибкой образуется требуемое поперечное сечение профиля.

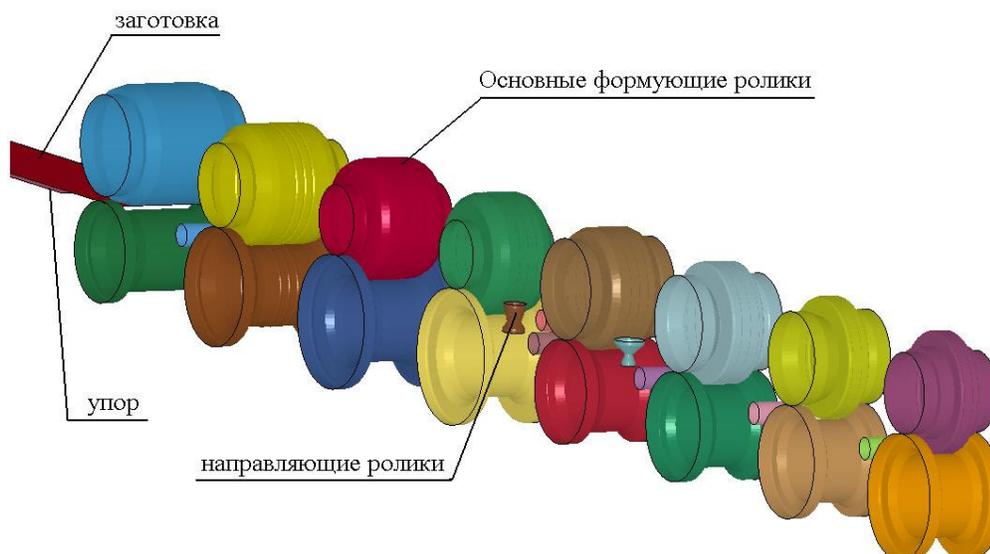


Рис. 2.17. Формообразующая оснастка (8 пар роликовых калибров) для изготовления профиля “Штакетник” 21x70x0,5мм

Параметры моделирования следующие: тип элемента – Shell 163 с од-ноточечной редуцированной схемой интегрирования по плоскости с контро-

лем Hourglass 4, модель материала: для профиля – билинейная изотропная модель (\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC) (табл. 2.5), для роликов - инструментальная сталь У8. Ролики задавались как абсолютно жесткие (Rigid) тела, КЭ сетка задавалась только на их поверхности, используя тип элемента Shell 163 тип контактного элемента: заготовка – формирующие ролики-Forming surface-to-surface contact (ASTS), заготовка – направляющие и промежуточные ролики-Automatic surface-to-surface contact (ASTS).

Таблица 2.5

## Характеристики материала профиля (Сталь 08кп)

Плотность ( $\rho$ ), т/м <sup>3</sup>	7,85e-9		
Модуль Юнга (E), МПа	1e5	2e5	4e5
Коэффициент Пуассона	0,3		
Предел текучести ( $\sigma_T$ ), МПа	250		
Касательный модуль, МПа	420		

Конечно-элементная модель (рис. 2.18) была создана в программе ANSYS и включала в себя 100000 оболоченных элементов на исходной заготовке и 70000 оболоченных элементов на роликовом инструменте.

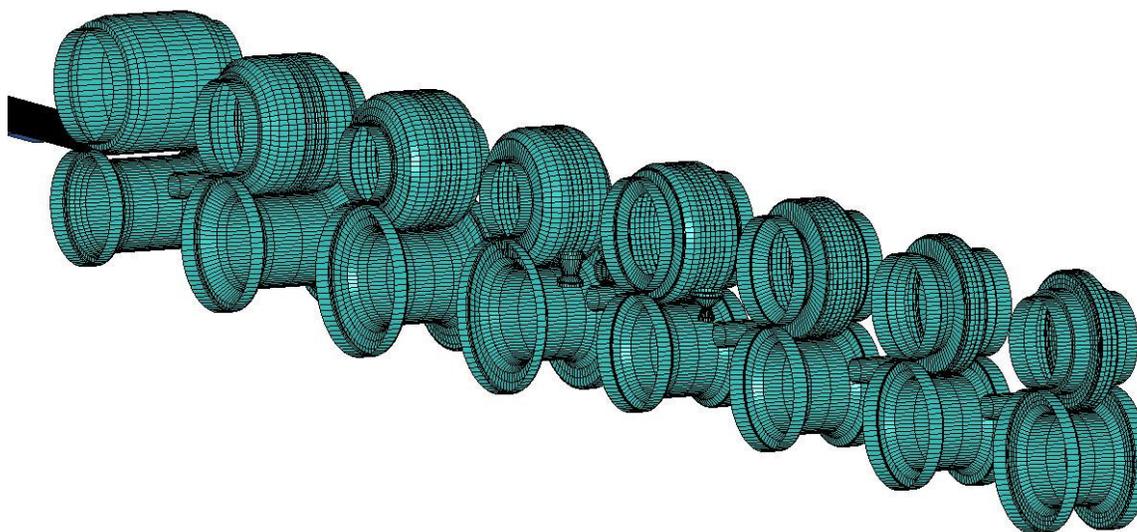


Рис. 2.18. Конечно-элементная модель роликов и заготовки.

Формоизменение заготовки методом конечных элементов осуществляли следующим образом. Заготовка в виде полосы длиной 900 мм, шириной, равной ширине развертки, 140 мм поступала в первый переход, при этом верхний формирующий ролик поднят на 10 мм. На ролики задавались угловые скорости, соответствующие направлению проката. Движение полосы через калибры происходило под воздействием сил трения, возникающих в процессе подгибки элементов полки, что полностью соответствует реальному процессу.

Заготовку продвинули на 3 мм перпендикулярно оси симметрии роликов для более надежного и качественного захода в калибр. Через заданное время (0,005с) ролики начинают вращаться, при этом верхний ролик также начинает опускаться (время перемещения верхнего ролика составляет 0,01с), приводя в движение заготовку и образуя сечение профиля в соответствии с калибром. Заготовка начинает перемещаться по направляющим роликам (рис. 2.17), проходя через четыре первых перехода. Между четвертым и пятым (пятым и шестым) переходами установлены промежуточные ролики, которые предварительно подгибают боковые полки, а также придерживают профиль (для исключения прогиба по донной части профиля). Зайдя в пятый переход, заготовка деформируется, образуя сечение в соответствии с заданным калибром.

Аналогично формообразование заготовки осуществляется на остальных переходах.

По результатам моделирования построены сечения профиля по переходам, изображенные на рис. 2.19.

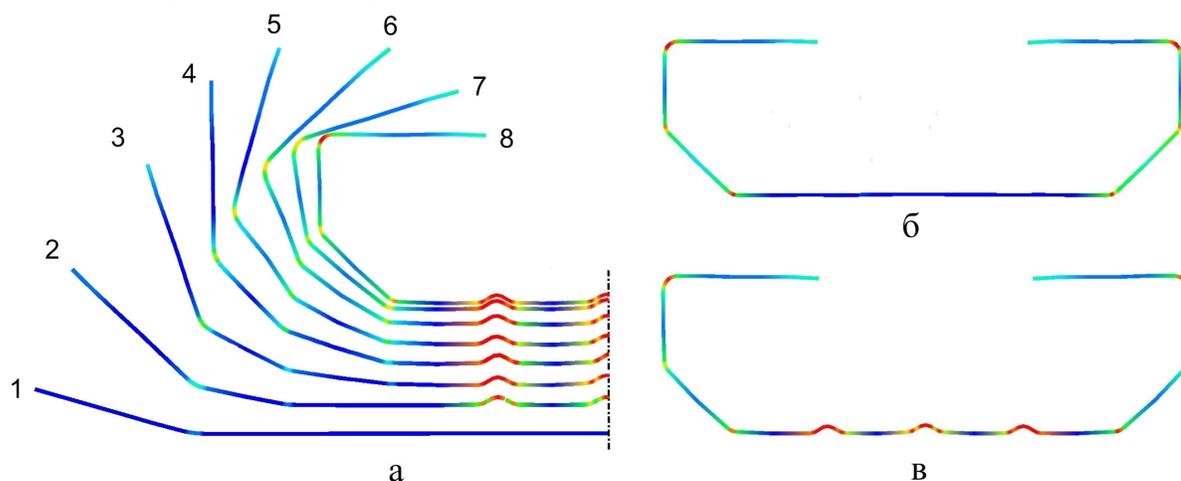


Рис. 2.19. Распределение пластических деформаций для профиля “Шткетник”: а – технологическая схема профиля, б – без рифтов, а – с продольными рифтами

В результате проведенного первого варианта моделирования профиля наблюдалось появление дефекта кромковой волнистости после выхода из калибра 8 – перехода.

Первоначально, в процессе моделирования волнистость образуется между 2-3 переходами в результате образования излома в зоне контакта заготовки с инструментом, причем в тот момент, когда заготовка поступила в 3 переход. В процессе профилирования данный дефект сохраняется на последующих переходах. На рис. 2.20 представлен профиль с волнистостью на горизонтальных полках.

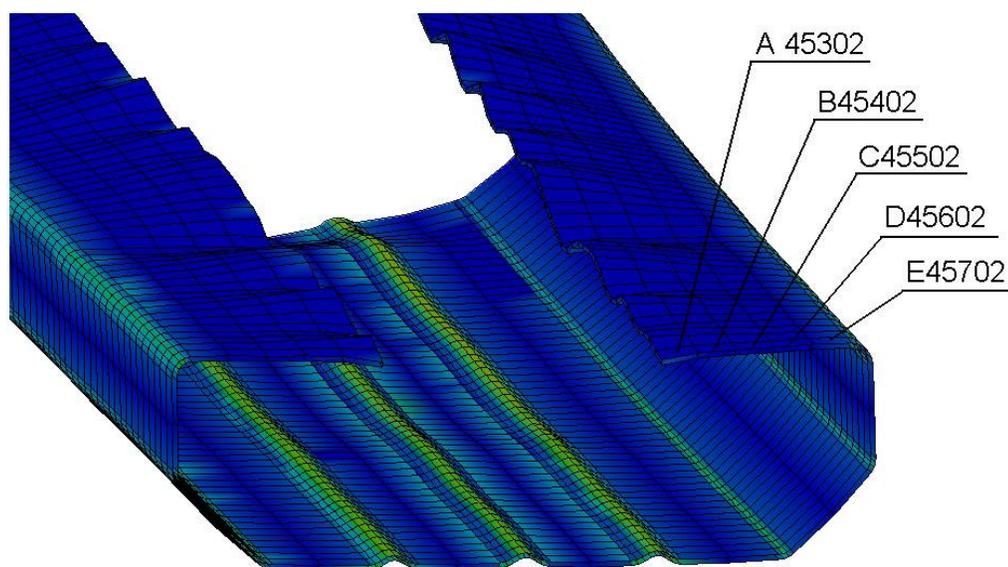


Рис. 2.20. Профиль с образованием кромочной волнистости в результате моделирования

В теоретическом исследовании предполагали, что возникновению кромочной волнистости способствуют большие продольные деформации, которые превышают предел перехода из упругого состояния в пластическое (0,2 – 0,4 %). На рис. 2.21 построены кривые распределения продольных деформаций по 5-и точкам (рис. 2.22).

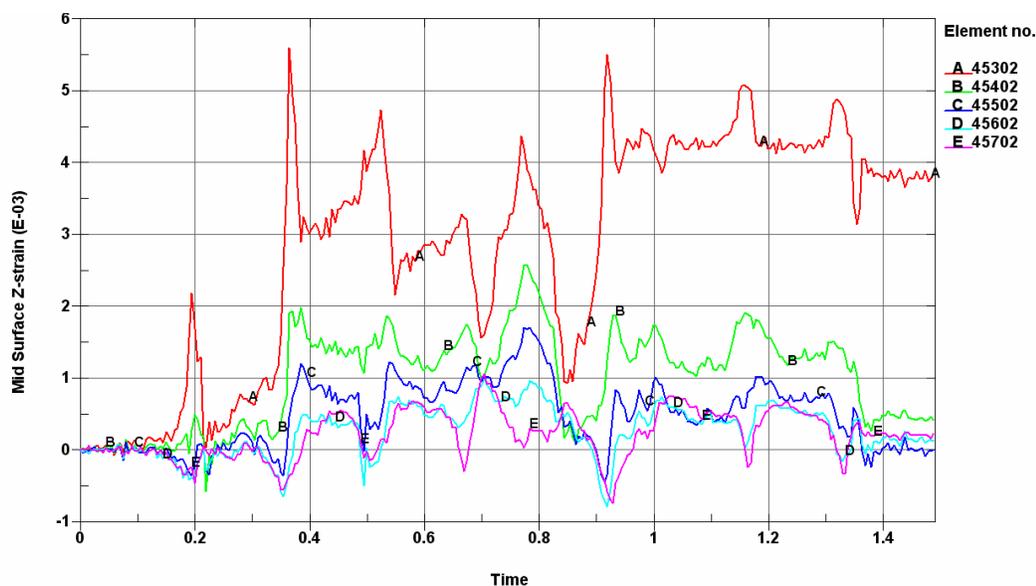


Рис. 2.21. Кривые распределения продольных деформаций по пяти точкам на полке профиля.

Как видно из графика, наименьшая величина продольных деформаций (в точке А 45302 – краевая точка) наблюдается на первом переходе (time=0,2с), и составляет  $\varepsilon = 0,23\%$ , что является допустимой величиной, не превышающей предел перехода из упругого состояния в пластическое, и как результат отсутствие волнистости. После выхода из калибра 2-го перехода

(time=0,38с) наблюдается резкий скачек деформаций ( $\varepsilon = 0,56\%$ ). Неравномерность распределения продольных деформаций и вызывают образование дефекта волнистости.

Кроме того, в остальных точках, наблюдается тенденция к уменьшению деформаций, что говорит о повышении жесткости полки, приближаясь к зоне сгиба (максимальная величина деформации составляет  $\varepsilon = 0,26\%$ ).

Наша задача исследовать крайнюю точку на предмет продольной деформации полки штакетника с разными заданными характеристиками модуля Юнга (табл.2.5., рис.2.22) использованных моделей материала в пакете LS-DYNA. И проанализировать полученные результаты с целью определения свойств материала (в нашем случае модуля Юнга) при котором величина гофры будет минимальной. Выбор данного параметра связан только с научной стороной вопроса и характеризует упругую составляющую материала. В тоже время в данной модели данный параметр жестко связан с коэффициентом перехода из упругого состояния в пластическое, который, как правило, принимается 0,002. Но на практике мы встречаемся с колебанием этого параметра. Именно поэтому для исследования мы взяли две кривые с уменьшенным и увеличенным параметром модуля Юнга в 2 раза.

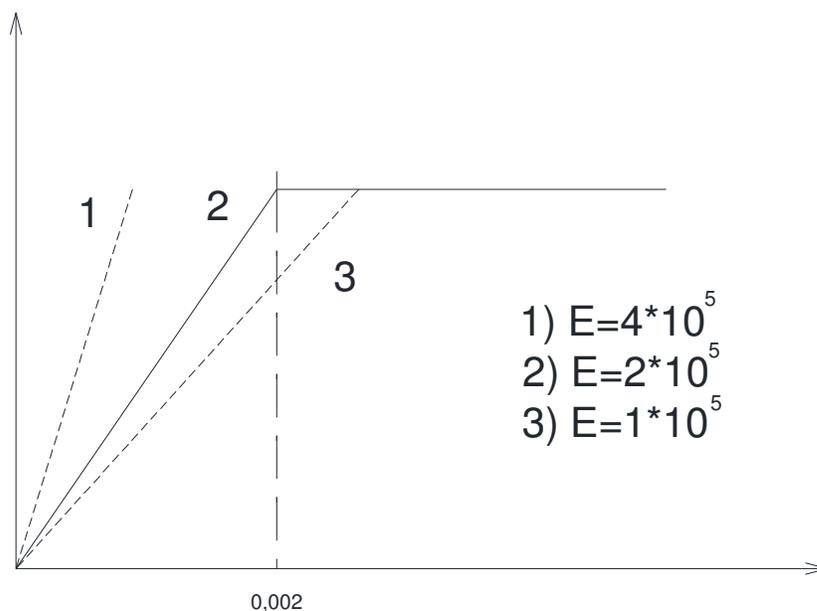


Рис. 2.22. Графическое изображение билинейной модели материала с различным модулем Юнга.

В ходе моделирования процесса формообразования профиля 21x70x0,5 мм «Штакетник» в программе LS-DYNA были сняты следующие результаты:

Материал – сталь 08кп (модуль Юнга  $1e5$ )

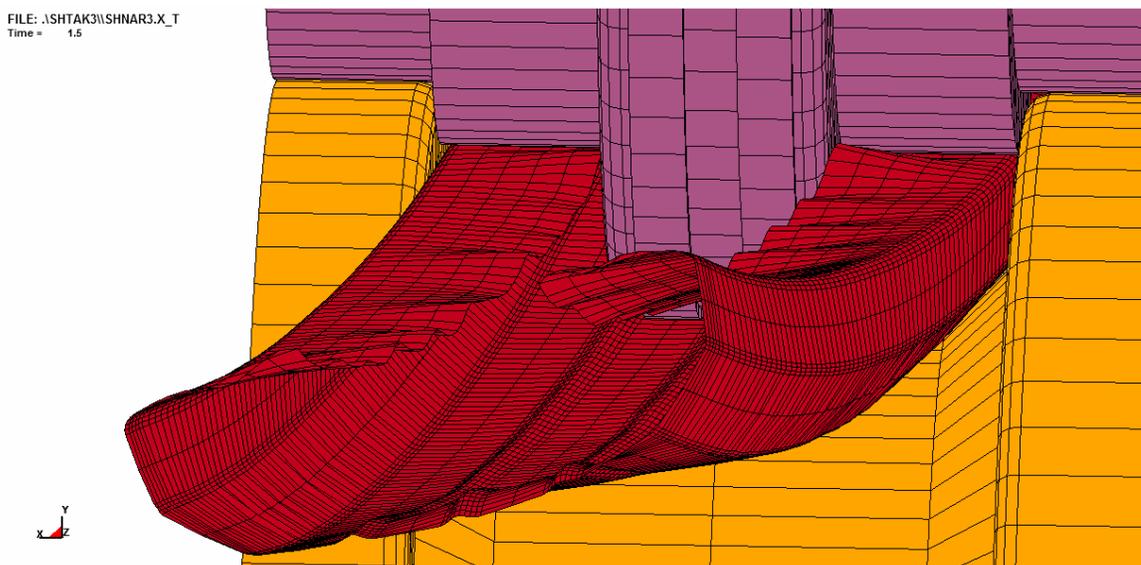


Рис.2.23 Процесс формирования профиля

По рис. 2.23. мы видим, что на выходе 8 перехода явно выражена кромочная волнистость на полке, продольный прогиб и скручивание профиля.

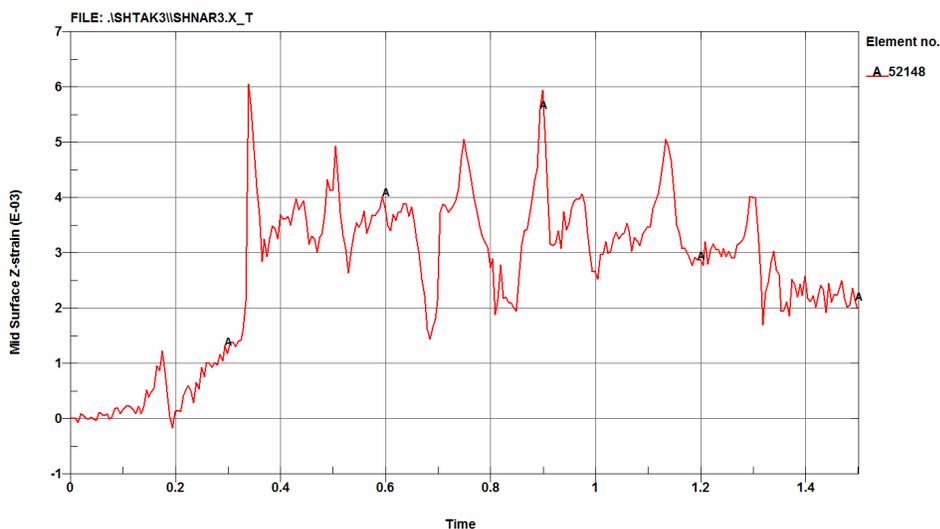


Рис.2.24. Кривая распределения продольной деформации по крайней точки на полке профиля

По графику (рис.2.24) мы можем наблюдать резкие скачки деформации (time-0,34с,  $\varepsilon = 0,61\%$ ), (time-0,75с,  $\varepsilon = 0,5\%$ ), (time-0,9с,  $\varepsilon = 0,59\%$ ) и др., которые превышают предел перехода из упругого состояния в пластическое (0,2-0,4%), и как результат появление волнистости. На выходе с последней пары формирующих роликов (time-1,4с) мы наблюдаем деформацию ( $\varepsilon = 0,23\%$ ).

Резкие скачки деформации соответствуют заходу сечения профиля на которой поставлена контрольная точка в калибр ролика.

Мы измерили период и амплитуду (рис.2.25)

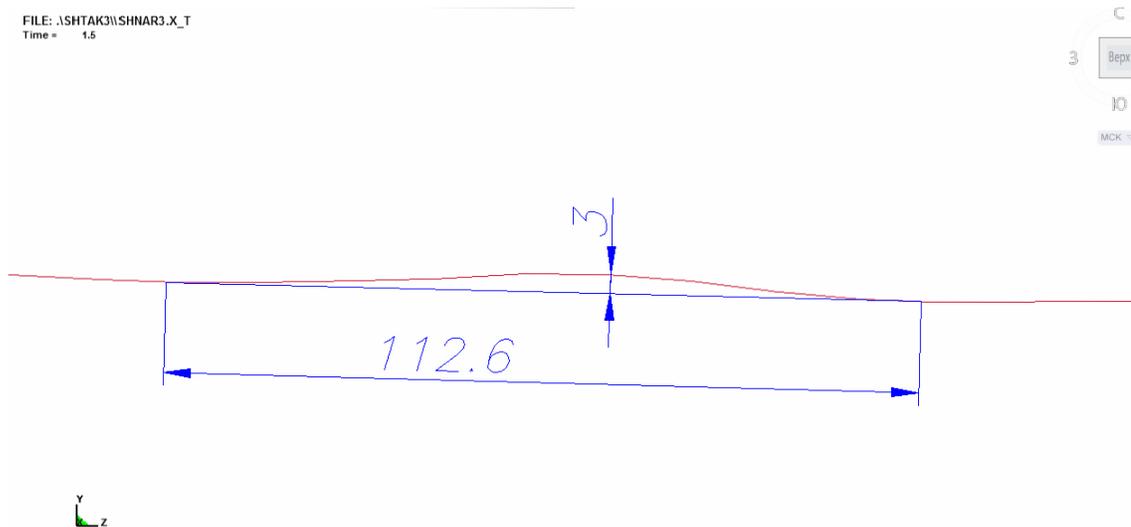


Рис.2.25. Волнистость на полке.  $T=112.6$  мм;  $A=3$  мм.

Материал – сталь 08кп (модуль Юнга  $2e5$ )

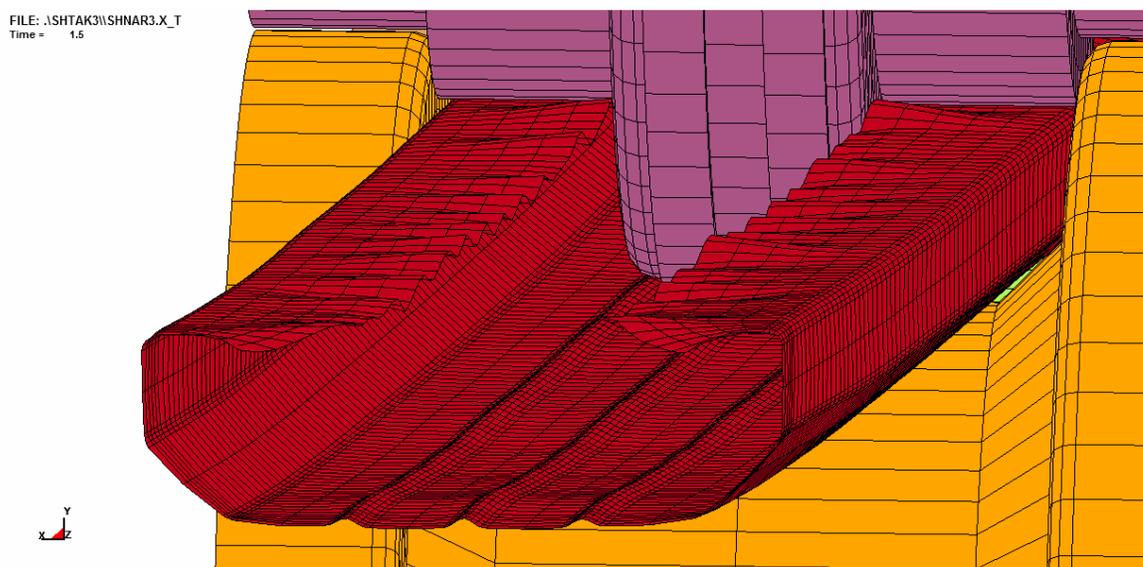


Рис.2.26 Процесс формирования профиля

На рис. 2.26 мы наблюдаем все ту же кромковую волнистость, но отсутствие продольного прогиба и скручивания тут не наблюдается.

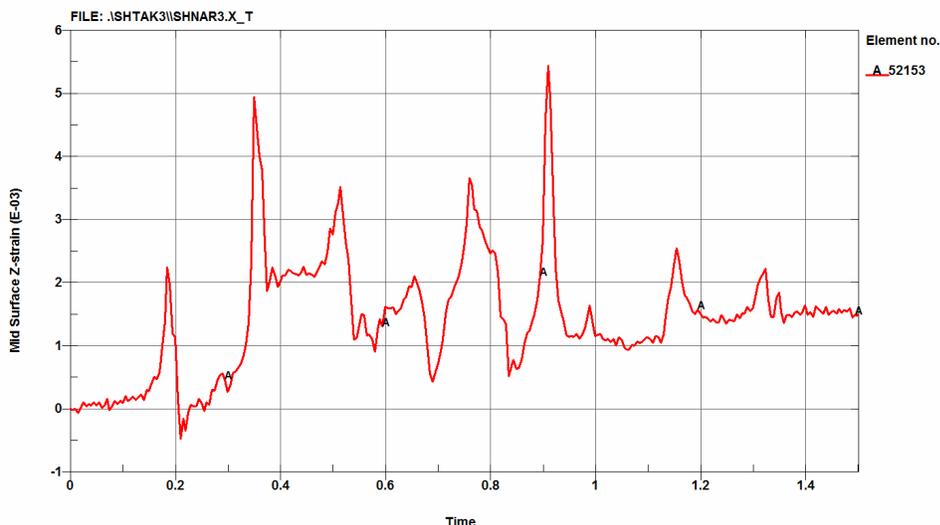


Рис. 2.27. Кривая распределения продольной деформации по крайней точке на полке профиля

По графику (рис.2.27) мы можем наблюдать резкие скачки деформации (time-0,36с,  $\varepsilon = 0,49\%$ ) и (time-0,91с,  $\varepsilon = 0,55\%$ ), которые превышают предел перехода из упругого состояния в пластическое (0,2-0,4%), и как результат появление волнистости. На выходе с последней пары формирующих роликов (time-1,4с) мы наблюдаем деформацию ( $\varepsilon = 0,16\%$ ).

Мы измерили период и амплитуду (рис.2.28)

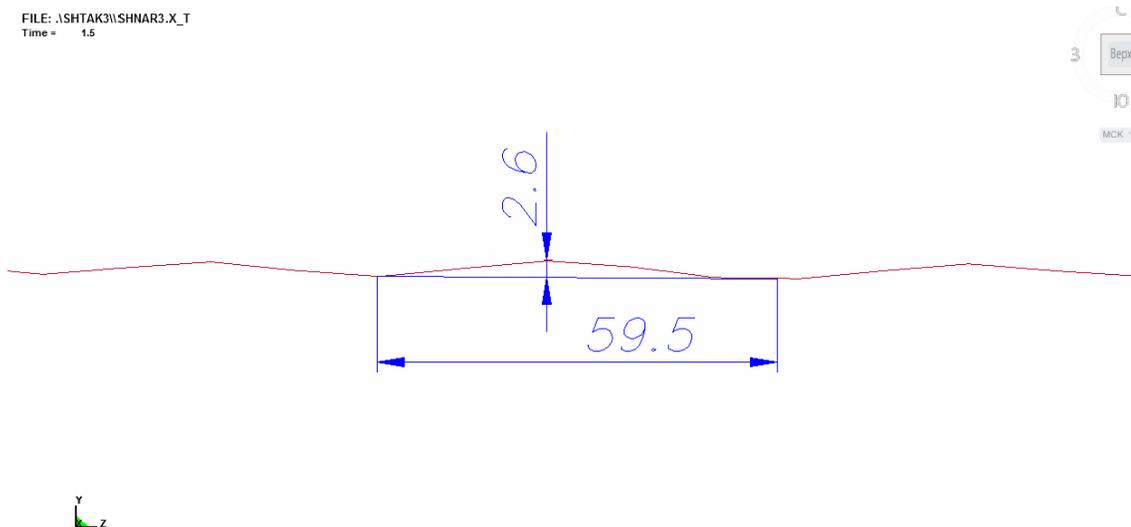


Рис.2.28. Волнистость на полке. T=59.5 мм; A=2,6 мм.

Материал – сталь 08кп (модуль Юнга 4e5)

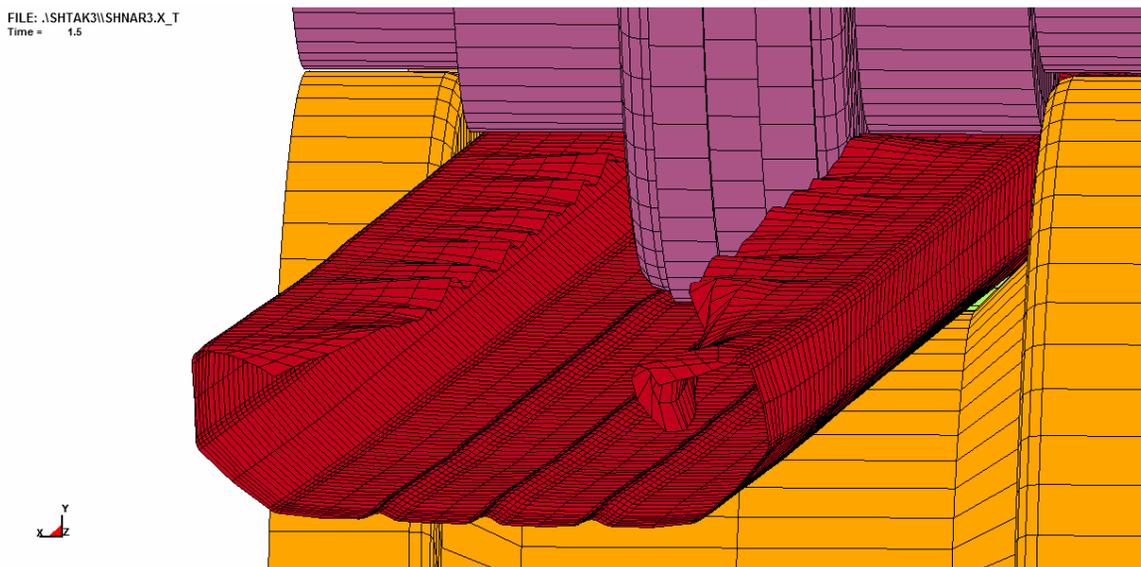


Рис. 2.29. Процесс формирования профиля

На рис. 2.29 мы наблюдаем все ту же кромковую волнистость и ярко-выраженный брак на правой полке профиля.

По графику (рис.2.30) мы можем наблюдать резкие скачки деформации (time-0,36с,  $\varepsilon = 0,78\%$ ), (time-0,48с,  $\varepsilon = 0,58\%$ ) и (time-0,88с,  $\varepsilon = 0,43\%$ ), которые превышают предел перехода из упругого состояния в пластическое (0,2-0,4%), и как результат появление волнистости. На выходе с последней пары формирующих роликов (time-1,4с) мы наблюдаем деформацию ( $\varepsilon = 0,09\%$ ).

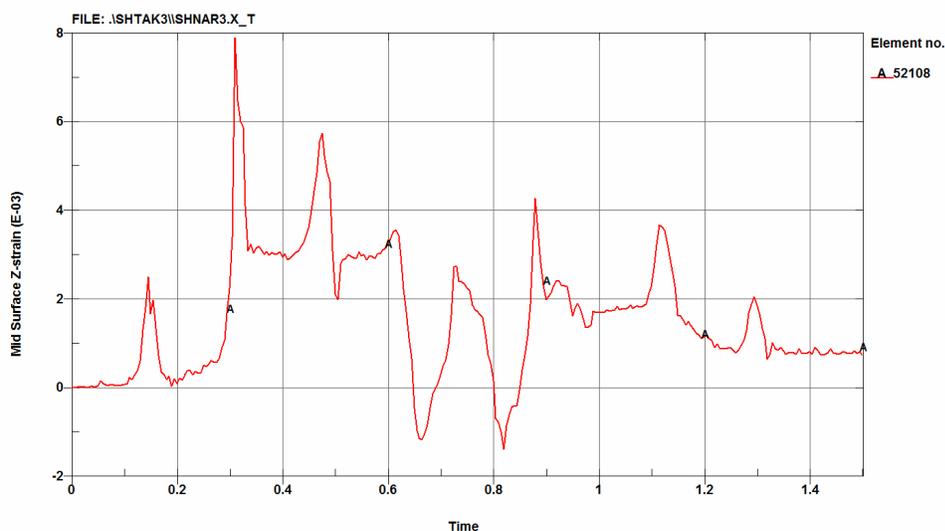


Рис. 2.30. Кривая распределения продольной деформации по крайней точке на полке профиля

## Мы измерили период и амплитуду (рис.2.31)

FILE: \SHTAK3\SHNAR3.X\_T  
Time = 1.5

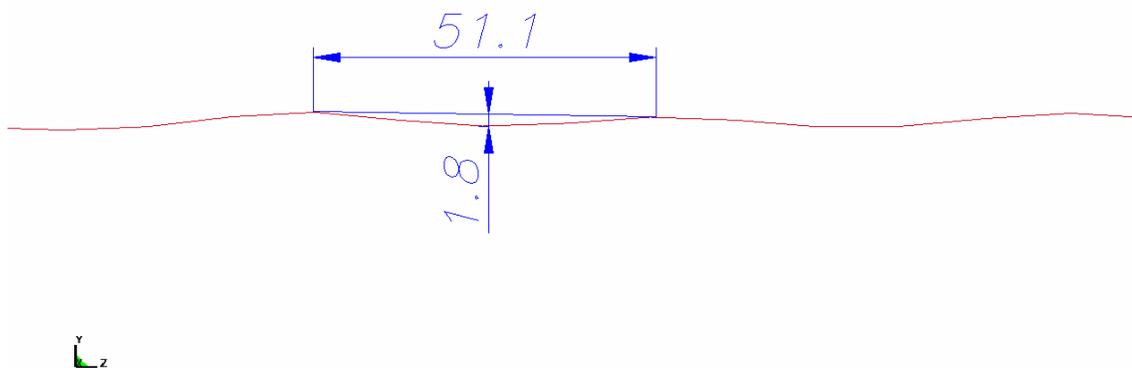
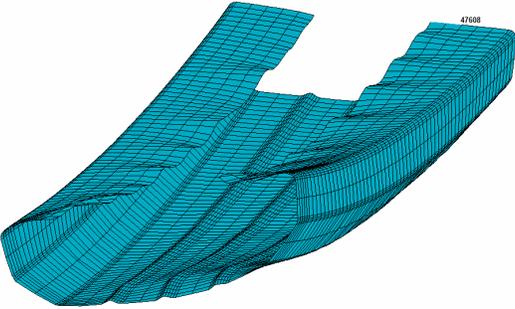


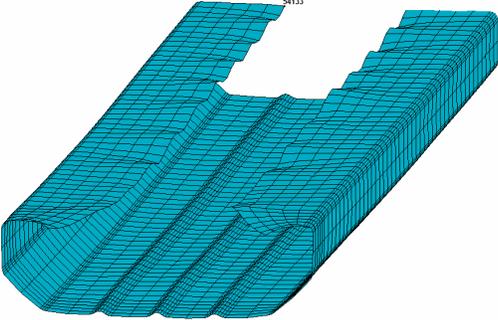
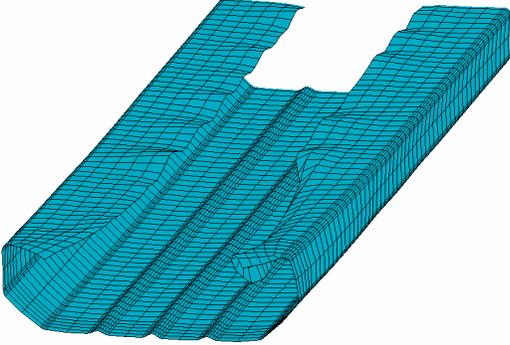
Рис. 2.31. Волнистость на полке.  $T=51.1$  мм;  $A=1,8$  мм.

Таким образом, исследовав краевую точку на предмет продольной деформации полки штакетника с разными заданными характеристиками модуля Юнга, мы выявили, что с увеличением характеристики, гофра на полке штакетника становится меньше (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Результаты моделирования

Модуль Юнга	Профиль	Величина гофры, мм
1e5		$T = 112,6$ $A = 3$

2e5		$T = 59,5$ $A = 2,6$
4e5		$T = 51,1$ $A = 1,8$

Если считать деформацию исходя их величины гофры, то получится следующее:

- 1) 1e5 - 0,14%
- 2) 2e5 - 0,38%
- 3) 4e5 - 0,23%

Как мы наблюдаем, в данном варианте тенденции нет. Для объяснения данного феномена необходимо более глубокое погружение в процессы образования гофры происходящей в процессе интенсивной деформации листовой заготовки при получении профиля. Что естественно не входит в задачи дипломной работы.