

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный исследовательский технологический  
университет «МИСиС»

ЧАН БА ХЮИ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ  
В ЧЕТЫРЁХВАЛКОВОМ СТАНЕ НА ОСНОВЕ ФИЗИЧЕСКОГО И  
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением»

Автореферат диссертации  
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
к.т.н., доц.

Скрипаленко М.М.

Москва – 2018

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время при производстве сплошных и полых круглых заготовок применяют двухвалковые и трёхвалковые станы винтовой прокатки, а также для отдельных материалов и сортамента четырёхвалковые планетарные станы винтовой прокатки. Двухвалковая схема требует применения направляющего инструмента - неподвижных линеек, неприводных или приводных валков, роликов или дисков. При этом получаемые заготовки имеют овальность, теряется энергия вследствие трения о линейки и неприводные диски или ролики, а приводные диски, валки или ролики не сообщают точкам заготовки геликоидальные траектории перемещения, как это делают основные валки, повернутые на угол подачи. При этом нарушается характер формоизменения и, вследствие этого, снижается качество и свойства получаемых изделий. При трёхвалковой схеме винтовой прокатки имеет место труднопрогнозируемое кольцевое разрушение, которое отрицательно влияет на качество сплошных круглых заготовок и приводит к существенной разностенности получаемых гильз. Применение планетарных станов винтовой прокатки возможно только для узкого круга материалов и типоразмеров, так как имеют место существенные конструктивные ограничения. Актуальной задачей является разработка и исследование способа винтовой прокатки, который бы совмещал в себе преимущества существующих способов, но не имел присущих им недостатков.

**Цель работы:** разработка и исследование процесса винтовой прокатки в четырёхвалковом стане на основе физического и компьютерного моделирования для получения сплошных и полых заготовок повышенной точности.

Для достижения цели были поставлены задачи исследования:

- провести анализ существующих способов винтовой прокатки, по показателям качества получаемых сплошных и полых заготовок, эффективности производства и осуществить выбор объектов и методов исследования;

- на основе результатов выполненного анализа обосновать схему винтовой прокатки в четырёхвалковом стане;

- провести компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки и прошивки в четырёхвалковом стане для определения основных конструктивных и технологических параметров процесса и показать возможность осуществления четырёхвалковой винтовой прокатки по выбранной схеме;

с учётом результатов компьютерного моделирования создать действующую модель четырёхвалкового стана и выполнить комплекс исследований с использованием модельного материала для подтверждения возможности реализации четырёхвалковой винтовой прокатки и прошивки;

- на основе результатов опытных прокаток и компьютерного моделирования выявить преимущества предложенного способа прошивки и прокатки по сравнению с существующими.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- показана принципиальная возможность осуществления четырёхвалковой винтовой прокатки по схеме с двумя грибовидными и двумя чашевидными валками;

- разработан новый способ винтовой прошивки заготовок;

- на основе компьютерного моделирования установлено, что, при прочих равных условиях, при четырёхвалковой винтовой прокатке изменение коэффициента жёсткости напряжённого состояния меньше, по сравнению с двухвалковой и трёхвалковой схемами винтовой прокатки;

- определены интервалы значений нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма для стали 45: при двухвалковой прокатке он

изменяется от 0 до 0,5, при трёхвалковой прокатке — от 0 до 0,3, при четырёхвалковой - от 0 до 0,2;

-показано, что распределение среднего напряжения в пережиме, а также интенсивности деформации на нестационарной стадии при четырёхвалковой прокатке подобны распределению аналогичных параметров при трёхвалковой винтовой прокатке и существенно отличаются от двухвалковой. При этом распределение осевой компоненты деформации в поперечном сечении в очаге деформации на стационарной стадии трёх- и четырёхвалковой прокатки имеет кольцевой характер.

### **Практическая значимость работы**

Создана действующая модель четырёхвалкового стана винтовой прокатки и проведены прошивки и прокатки заготовок из модельного материала.

Показано, на основе компьютерного моделирования, что при четырёхвалковой прокатке, по сравнению с двухвалковой и трёхвалковой, уменьшается вероятность разрушения заготовок в процессе деформации.

Установлено, по результатам компьютерного моделирования, что прокатка в четырёхвалковом стане способствует получению более равномерной структуры и, следовательно, свойств в объёме заготовки по сравнению с двухвалковой и трёхвалковой прокаткой.

Показано снижение энергозатрат и повышение точности сплошных и полых круглых заготовок при использовании четырёхвалковой схемы винтовой прокатки по сравнению с двухвалковой и трёхвалковой схемами.

Создана подпрограмма на языке программирования Lua, позволяющая осуществлять расчёт и отображать поля изменения значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния при компьютерном моделировании процессов обработки металлов давлением с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа QForm.

## **Методы исследования**

1) Моделирование процессов винтовой прокатки и прошивки осуществляли с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа QForm.

2) Создание 3D моделей валковых узлов для последующего моделирования процессов винтовой прокатки и прошивки проводили с помощью SolidWorks

3) Опытные прокатки проводили на действующей модели четырёхвалкового стана винтовой прокатки с использованием модельного материала

**Достоверность** полученных результатов базируется на использовании методов физического и математического моделирования, применения современных вычислительных систем и методик. Достоверность результатов моделирования подтверждена в ходе экспериментальных исследований на оборудовании кафедры «Обработка металлов давлением» НИТУ «МИСиС».

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- способ винтовой прокатки в четырёхвалковом стане;
- способ винтовой прошивки в четырёхвалковом стане;
- результаты исследований напряжённо-деформированного состояния при различных схемах винтовой прокатки с помощью компьютерного моделирования, в том числе, распределение накопленной деформации и коэффициента жёсткости напряжённого состояния в объёме заготовки;
- анализ точности размеров сплошных и полых круглых заготовок, полученных при четырёхвалковой, трёхвалковой и двухвалковой схемах;
- анализ энергосиловых параметров при двухвалковой, трёхвалковой и четырёхвалковой прокатках и прошивках.

### **Реализация результатов работы**

Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе в Московском политехническом

университете и на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС» при выполнении курсовых и дипломных работ студентов.

**Личный вклад состоит:**

- в проектировании и изготовлении деформирующего инструмента для реализации четырёхвалковой винтовой прокатки;
- в проектировании и изготовлении действующей модели четырёхвалкового стана винтовой прокатки;
- в выполнении экспериментальных исследований по прокатке и прошивке заготовок в двухвалковом, трёхвалковом и четырёхвалковом станах и анализе полученных результатов;
- в выполнении компьютерного моделирования процессов винтовой прокатки и прошивки по различным схемам, сравнительный анализ полученных результатов и выявлении преимуществ четырёхвалковой схемы винтовой прокатки;
- в разработке и создании подпрограммы для расчёта накопленной деформации и коэффициента жёсткости напряжённого состояния в объёме заготовки с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа QForm.

**Апробация работы.**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- XXII международная промышленная выставка «Металл-Экспо 2016», премия «Молодые учёные» (Москва: ВВЦ, 2016);
- международный форум Инженерные системы – 2017 (Москва: NOVOTEL Москва сити, 2017);
- XXII международная промышленная выставка «Металл-Экспо 2017», премия «Молодые учёные» (Москва: ВВЦ, 2017);

**Публикации.**

Основное содержание диссертационной работы отражено в 6 печатных работах, в том числе в 6 изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 2 в базы цитирования WoS, Scopus и 1 патенте РФ.

### **Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов и списка использованных источников из 82 наименований отечественных и зарубежных авторов. Текст диссертации содержит 102 страницу машинописного текста, включающего 9 таблиц и 48 рисунка.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, описаны её научная новизна, практическая значимость и реализация работы; приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

**В первой главе** проведён аналитический обзор исследований в области существующих процессов винтовой прокатки и прошивки, методов их исследований, рассмотрены преимущества и недостатки используемых в настоящее время технологических схем. Показано что применение направляющего инструмента при двухвалковой схеме винтовой прокатки связано с дополнительным расходом энергии, ведёт к овальности получаемых гильз, а также не сообщает точкам деформируемой заготовки геликоидальных траекторий перемещения. При трёхвалковой схеме прошивки гильзы имеют существенную разностенность, так как оправка смещается в кольцевую зону растягивающих напряжений, где сопротивление её внедрению меньше. Применение четырёхвалковых планетарных станков возможно только при больших коэффициентах вытяжки, что существенно ограничивает марочный сортамент. Предложено разработать способ винтовой прокатки, который совмещал бы в себе преимущества существующих схем, но не имел их недостатков.

Во второй главе выбрана и обоснована схема винтовой прокатки четырьмя приводными валками: два основных валка расположенных по чашевидной схеме и два вспомогательных валка, расположенных по грибовидной схеме (рис. 1). Проведено компьютерное моделирование в QForm прошивки заготовки по предложенной схеме, а также двухвалковой и трёхвалковой. Параметры моделируемых способов представлены в табл. 1. Показано, что в очаге деформации при четырёхвалковой прошивке заготовка не имеет овальности как при двухвалковой прошивке, а также нет течения в зазоры между валками как при трёхвалковой прошивке (рис. 2). По результатам моделирования оценили изменение овальности получаемых полых круглых заготовок, результаты статистического анализа данных по овальности приведены в табл. 2.

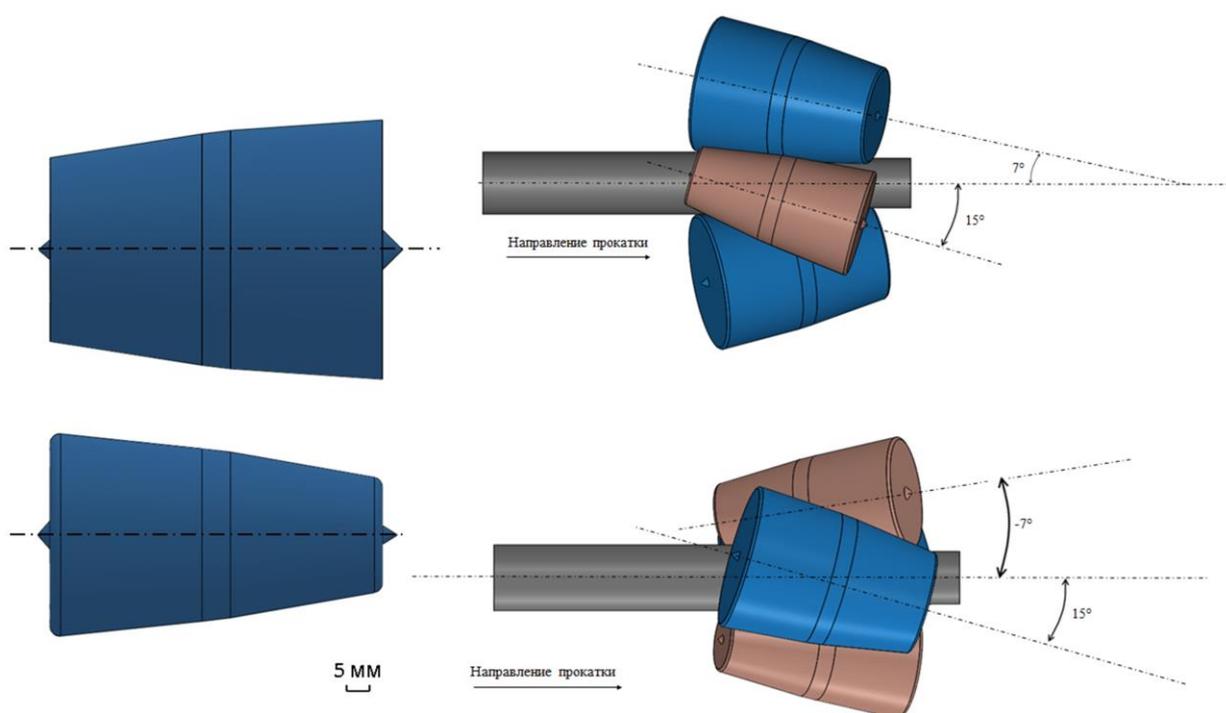


Рисунок 1. Форма валков и их положение при четырёхвалковой схеме винтовой прокатки.

Таблица 1. Параметры способов прошивки, смоделированных в QForm

| Параметр  | Двухвалковая прошивка в стане с направляющим и линейками | Трёхвалковая прошивка | Прошивка в стане без направляющего инструмента                            |
|---|--|-----------------------|---|
| Рабочие валки:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• диаметр в пережиме, мм</li> <li>• длина бочки, мм</li> <li>• Частота вращения, мин<sup>-1</sup></li> </ul> | 420<br>320<br>60   | 140<br>180<br>60      | Рабочие валки /Вспомогательные валки<br>150 / 110<br>200 / 200<br>60 / 80 |
| Угол:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• раскатки</li> <li>• подачи</li> </ul>   | 0<br>18  | -5<br>18              | 7 / -7<br>15 / 15   |
| Обжатие перед носиком оправки, %  | 6  | 6                     | 6   |

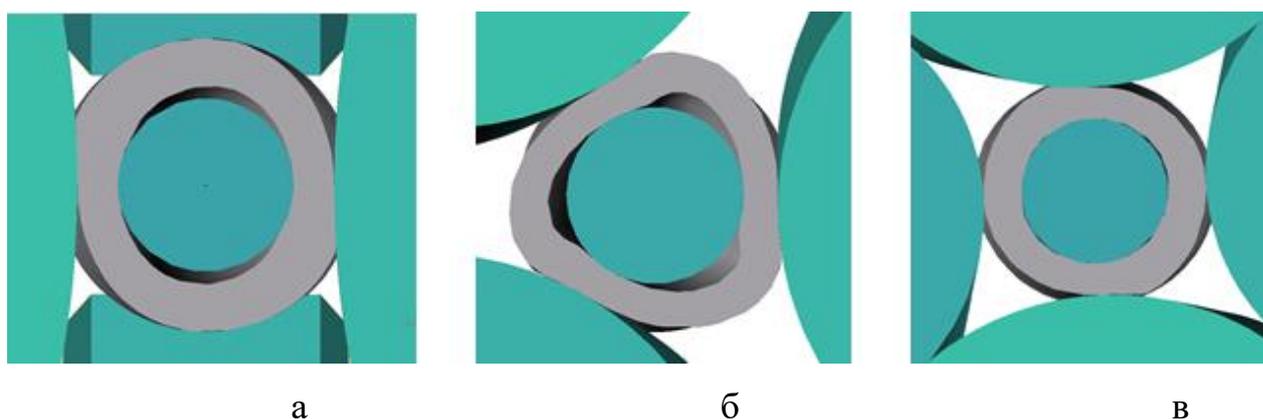


Рисунок 2. Формоизменение в пережиме: а – двухвалковый стан с линейками, б – трёхвалковый стан, в – стан без направляющего инструмента

Таблица 2. Результаты статистического анализа данных по овальности гильз

| Статистические оценки         | Двухвалковая прошивка | Трёхвалковая прошивка | Прошивка в стане без направляющего инструмента |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| Среднее значение овальности   | 1,008                 | 1,008                 | 1,007  |
| Дисперсия                     | $3,6 \cdot 10^{-5}$   | $1,9 \cdot 10^{-5}$   | $1,7 \cdot 10^{-5}$                            |
| Среднеквадратичное отклонение | 0,006                 | 0,004                 | 0,004  |

Проведённые с помощью компьютерного моделирования исследования позволили установить возможность реализации процесса четырёхвалковой винтовой прокатки.

**Третья глава** посвящена созданию действующей модели четырёхвалкового стана винтовой прокатки и осуществлению прокатки заготовок из модельного материала в действующей модели.

Действующая модель имеет четыре валка, все валки приводные, два валка имеют чашевидную форму и одинаковые размеры, другие два валка имеют грибовидную форму и одинаковые размеры, отношение диаметра в пережиме чашевидного валка к диаметру в пережиме грибовидного валка составляет 1,4, угол раскатки для чашевидных валков составляет  $7^\circ$ , для грибовидных валков -  $7^\circ$ , угол подачи для всех валков составляет  $15^\circ$ , обжатие в пережиме 9 %. Угол подачи  $15^\circ$  согласно данным отечественных исследователей позволит «смягчить» схему напряженно-деформированного состояния и максимально снизит вероятность осевого разрушения заготовки. Угол раскатки  $7^\circ$  для чашевидных валков необходим для размещения главного привода и входной стороны. Для грибовидных валков угол раскатки

7° также необходим для размещения их главного привода и выходной стороны. Чашевидные валки осуществляют основную деформацию металла, а грибовидные необходимы для закрытия очага деформации в плоскости, перпендикулярной основным валкам и создания дополнительных тянущих сил. Для восприятия соответствующих усилий прокатки конструкция валкового узла должна быть выполнена с соотношением диаметра рабочего валка в пережиме к диаметру вспомогательного валка в пережиме 1,4. Вследствие наличия четырёх приводных валков увеличивается площадь контакта заготовки с деформирующим инструментом и образуется достаточно замкнутый калибр. Это позволяет повысить устойчивость поперечного сечения и точность получаемых прутков и гильз. Большая площадь контакта валков с заготовкой и то, что все валки приводные, будет способствовать более равномерному распределению энергии по поверхности заготовки и уменьшать неравномерность деформации по поперечному сечению.

При создании действующей модели в основу конструкции клетки были положены следующие принципы: использование станины закрытого типа, расположение рабочих валков при постоянных углах подачи и раскатки, вывод исполнительного механизма установки валков из-под прямого действия усилия прокатки, что не только упростило конструкцию модели прокатного стана, но и условия её эксплуатации

Схема действующей модели представлена на рис.3.

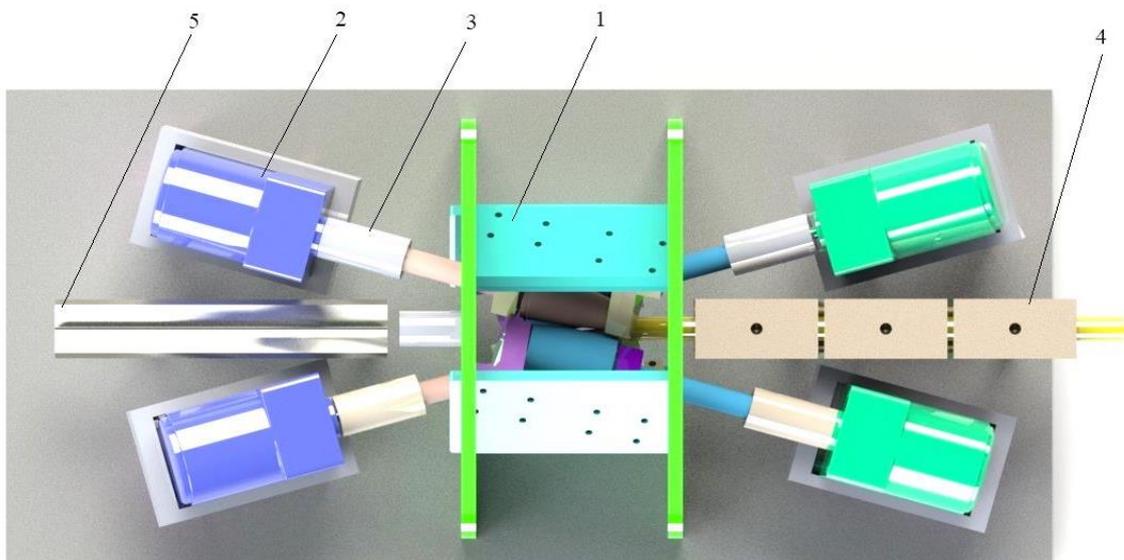


Рисунок 3. Схема расположения основных механизмов и устройств модели: 1 – рабочая клеть, 2 – индивидуальные главные приводы - мотор-редукторы, 3 – шпиндельные устройства, 4 - проводка с входной стороны, 5 – проводка с выходной стороны.

На основе представленных выше параметров создали действующую модель стана четырёхвалковой винтовой прокатки (рис. 4) с использованием цифровых технологий изготовления.

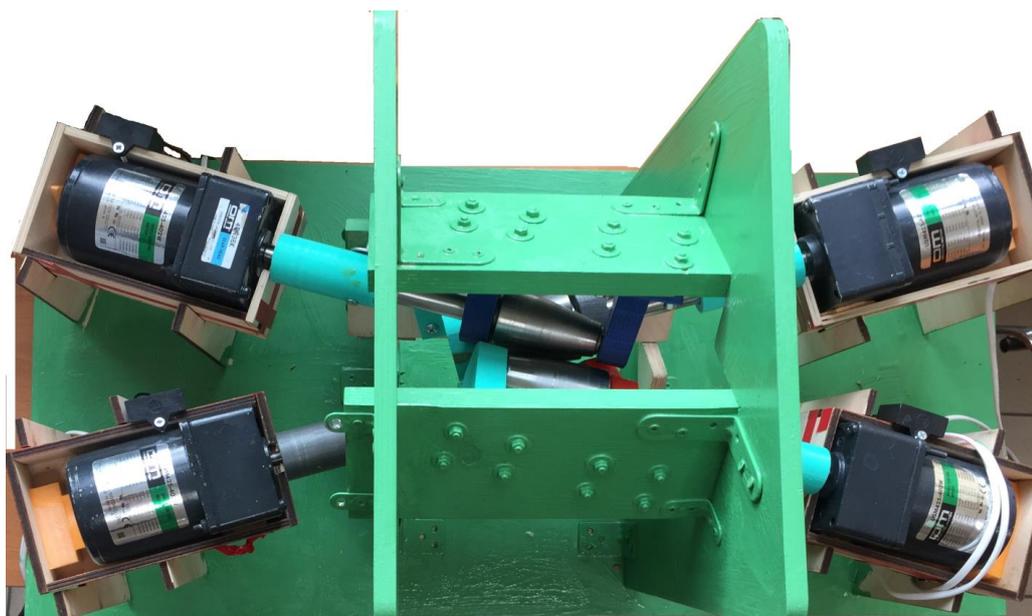


Рисунок 4. Вид действующей модели четырёхвалкового лабораторного стана винтовой прокатки

С целью демонстрации возможности процесса винтовой четырёхвалковой прокатки осуществили деформацию заготовки из пластилина (Roma Plastilina No. 1) в действующей модели. Исходная заготовка имела длину 120 мм и диаметр 25 мм. При прокатке калибр, образуемый валками в пережиме, имел диаметр 20 мм. Полученная после прокатки заготовка имела характерные утяжины на переднем и заднем торцах подобно заготовкам, имеющим утяжину после прокатки в двух- и трёхвалковых станах (рис. 5). Также, как и при прокатке по двух- и трёхвалковой схемам чётка видна винтовая линия на поверхности заготовки.



а



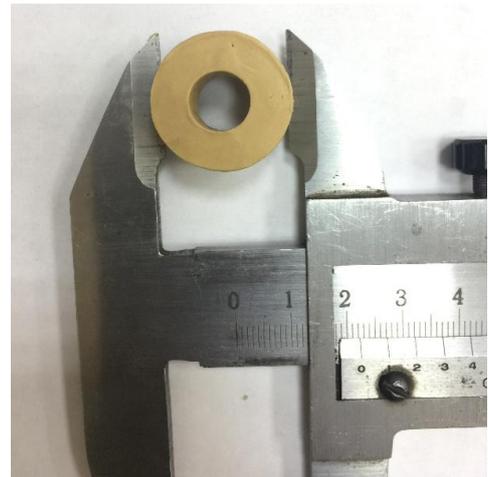
б

Рисунок 5. Заготовка из пластилина, прокатанная в четырёхвалковом стане: виды на цилиндрическую поверхность (а) и со стороны торца (б)

Для реализации процесса прошивки в действующей модели прошивали заготовки длиной 70 мм и диаметром 25 мм. При прошивке калибр, образуемый валками в пережиме, имел диаметр 22 мм. Процесс прошивки протекал стабильно, на поверхности заготовки были видны характерные винтовые линии (рис. 6).



а



б

Рисунок 6. Заготовка из пластилина, прошитая в четырёхвалковом стане: виды на цилиндрическую поверхность (а) и со стороны торца (б)

Опытные прокатки смоделировали с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа QForm. Результаты моделирования сравнили с результатами экспериментов (табл. 3, рис. 7).

Таблица 3. Длина заготовки и глубина утяжины на переднем и заднем торце после опытных прокаток и компьютерного моделирования в QForm

|                       | Глубина утяжины на переднем торце, мм | Глубина утяжины на заднем торце, мм | Длина заготовки, мм |
|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Опытные прокатки      | 4,8                                   | 3,6                                 | 126,2               |
| Моделирование в QForm | 3,53                                  | 3,16                                | 129,74              |

Из табл.3 видно, что отличие по длине незначительно (примерно 3%). Заметные отличия получили по глубине утяжины на переднем (26%) и заднем торце (12%).

Длина заготовки после опытных прошивок составила 116,64 мм, по результатам компьютерного моделирования в QForm -112,368 мм. Отличие по длине составило 3,6% . Помимо длины сравнили изменение толщины стенки по длине полученной гильзы по результатам опытных прошивок и компьютерного моделирования (рис. 7). По рис. 7 видно, что разница значений не превышает 10%.

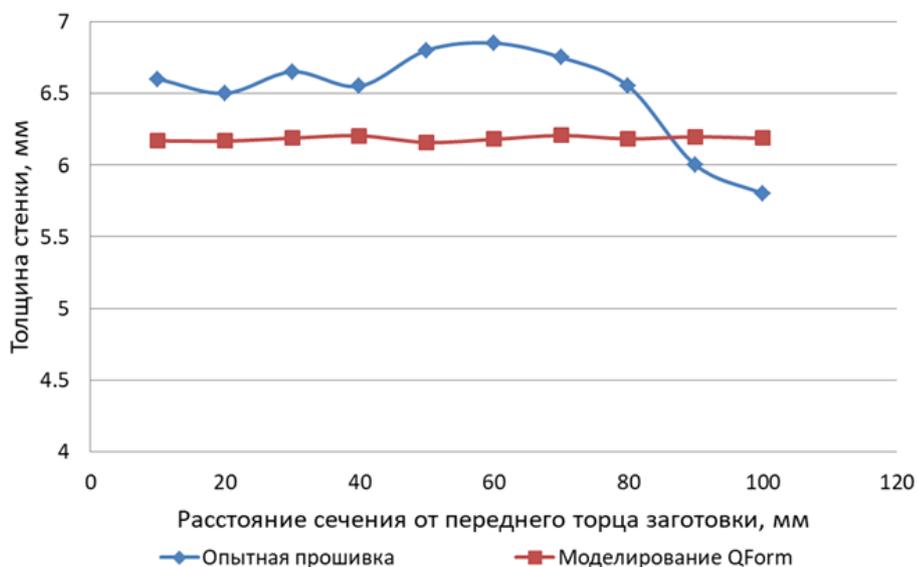


Рисунок 7. Изменение толщины стенки гильзы при опытных прошивках и по результатам компьютерного моделирования.

**В четвёртой главе,** учитывая приемлемую точность результатов компьютерного моделирования опытных прокаток заготовок из пластилина, смоделировали процессы прокатки и прошивки стальных заготовок.

Для моделирования процессов трёхвалковой и четырёхвалковой прокатки создали в SolidWorks модели соответственно валкового узла стана РСП 14-40 и валкового узла действующей модели стана (табл. 4). Созданные в SolidWorks модели загружали в QForm, задавали условия моделирования. Из библиотеки материалов в программе QForm в качестве материала заготовки была выбрана сталь марки 3Х2В8Ф. Температуру нагрева заготовок приняли равной 1200 °С, температуру инструмента — 20 °С.

Длину заготовки приняли минимальной  $l_3 = 100$  мм, но достаточной для формирования полного очага деформации.

Таблица 4. Параметры моделируемых прокаток

| Параметр                            | Трёхвалковая прокатка в стане РСП 14-40 | Прокатка по предлагаемому способу |                       |
|-------------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------|
|                                     |   | Основные валки                    | Вспомогательные валки |
| Рабочие валки:                      |   |                                   |                       |
| - диаметр в пережиме, мм            | 76                                      | 50                                | 36                    |
| - длина бочки, мм                   | 85                                      | 70                                | 70                    |
| Частота вращения, мин <sup>-1</sup> | 60                                      | 60                                | 83                    |
| угол раскатки, град.                | -7                                      | -7                                | +7                    |
| угол подачи, град.                  | 15                                      | 15                                | 15                    |

Теплообмен между заготовкой и инструментом в QForm задавали как «простой». Для пары «валок–заготовка» задавали условие отсутствия проскальзывания, фактор трения задали равным 10 для избежания проскальзывание узлов сетки заготовки вдоль пятна контакта с валками.

С целью оценки точности прутка по диаметру при моделировании в QForm провели измерения диаметра в сечениях, располагающихся друг от друга на расстоянии 15 мм по длине с помощью встроенного инструментария QForm. В каждом поперечном сечении диаметр измеряли через каждые 36 градусов. По результатам пяти измерений получили средние значения наружного диаметра, дисперсию и среднеквадратичное отклонение (табл. 5). На рис. 8 показаны данные, иллюстрирующие изменение диаметра по сечениям прутков, полученных прокаткой в трёхвалковом и четырехвалковом станах.

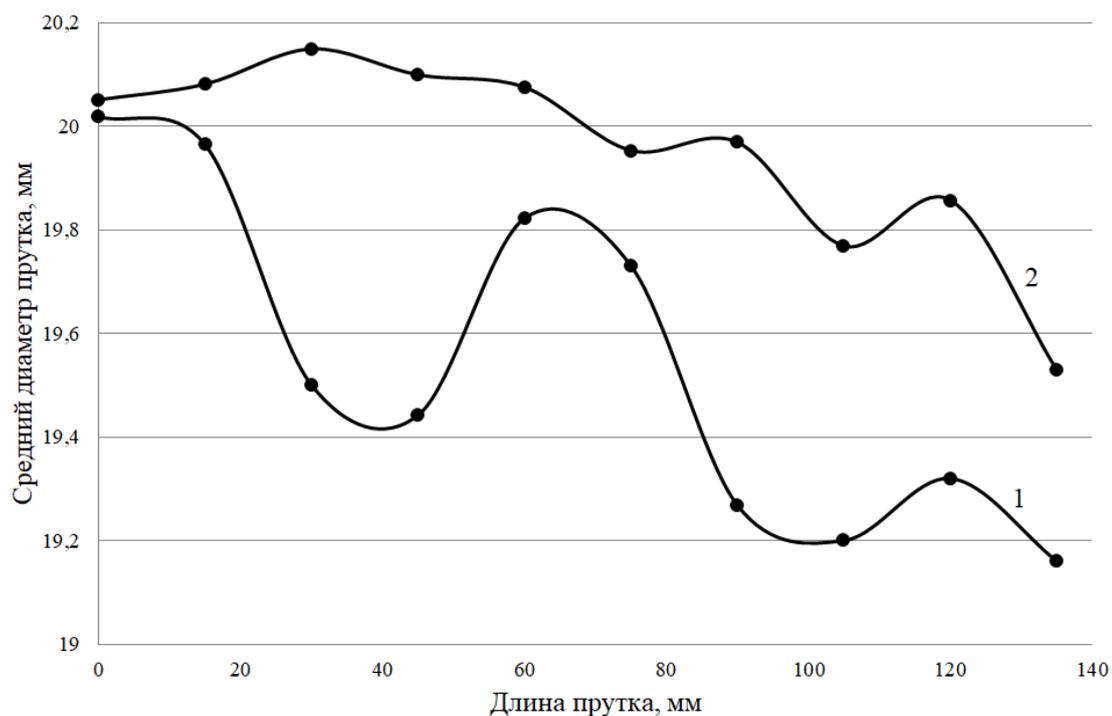


Рисунок 8. Изменение среднего диаметра по длине прутков, полученных при моделировании прокатки в трёх- (1) и четырёхвалковом станах (2)

Таблица 5. Статистические показатели точности прутков по смоделированным схемам

|                          | Среднее значение диаметра заготовки, мм | Дисперсия, мм <sup>2</sup> | Среднеквадратичное отклонение, мм |
|--------------------------|---|----------------------------|-----------------------------------|
| Трёхвалковая прокатка    | 19,54                                   | 0,10                       | ±0,32                             |
| Четырёхвалковая прокатка | 19,95                                   | 0,04                       | ±0,19                             |

Установлено, что прутки, полученные прокаткой в четырехвалковом стане, отличаются большей точностью. При прокатке по трёхвалковой схеме перепад значений диаметра составляет 1,2 мм, при четырёхвалковой схеме –

0,7 мм. Дисперсия диаметра прутка, полученного способом четырёхвалковой прокатки, составляет  $0,04 \text{ мм}^2$ , что в 2,5 раза меньше, чем дисперсия прутка при трёхвалковой прокатке –  $0,10 \text{ мм}^2$ .

По результатам моделирования построили графики усилий на валок для каждого из способов прокатки (рис. 9). Усилие на валок при прокатке в четырёхвалковом стане – как для рабочего, так и для вспомогательного – на 35-40% меньше, чем при прокатке в трёхвалковом стане. Также по результатам моделирования в QForm построили графики работы для каждого из валков в зависимости от времени процесса прокатки (рис. 10).

Согласно данным рис.10 для прокатки в трёхвалковом стане необходимо затратить 17,49 кДж ( $3 \times 5,83 \text{ кДж}$ ), а для прокатки в четырёхвалковом стане – 16,46 кДж ( $2 \times 7,93 + 2 \times 0,3 \text{ кДж}$ ). То есть при прокатке в четырёхвалковом стане энергии для осуществления формоизменения понадобится на 6% меньше, чем при трёхвалковой схеме.

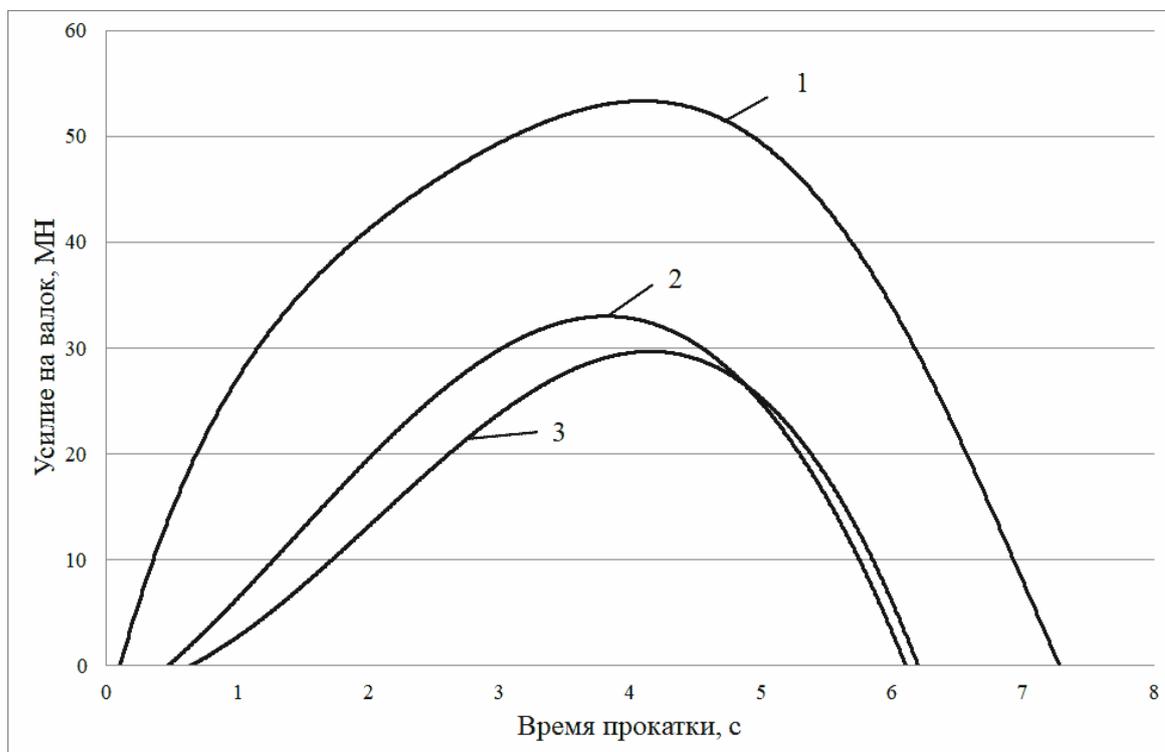


Рисунок 9. Усилия на валок в трёхвалковом стане (1) и четырёхвалковом: на рабочий (2) и вспомогательный (3) валки

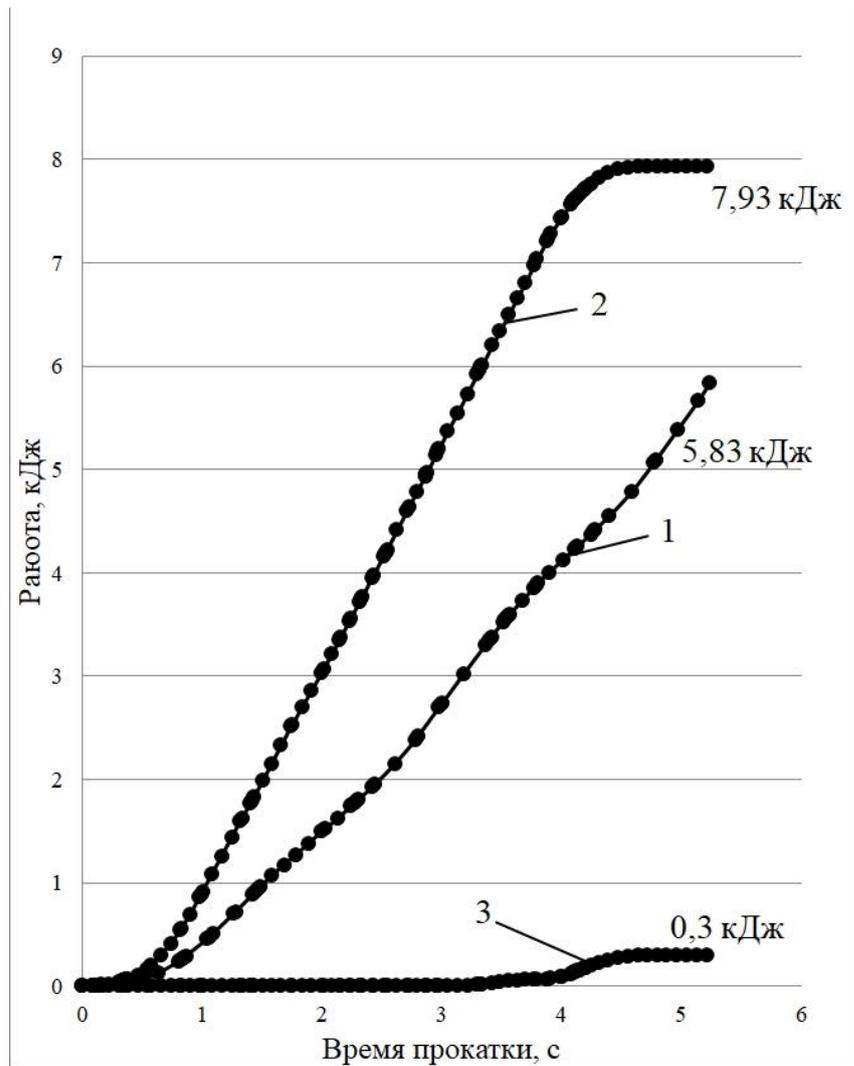


Рисунок 10. Работа на валке для каждой из схем прокатки: 1 – трёхвалковый стан, 2 – основной валок четырёхвалкового стана, 3 – вспомогательный валок четырёхвалкового стана

Для моделирования процессов двухвалковой и четырёхвалковой прошивки создали в SolidWorks модели валкового узла МИСиС-130Д и валкового узла действующей модели стана, при этом учитывались данные, показанные в табл. 6. Созданные в SolidWorks модели загружали в QForm, задавали условия моделирования. Из библиотеки в программе QForm в качестве материала заготовки была выбрана сталь марки 3Х2В8Ф. Температуру нагрева заготовок принимали равной 1200 °С, температура инструмента — 20 °С. Длину заготовки задавали минимальной  $l_3 = 100$  мм, но достаточной для создания полного очага деформации.

Таблица 6. Параметры моделируемых прошивок

| Параметр                                | Двухвалковая прошивка в лабораторном стане МИСиС | Прошивка по предлагаемому способу |                       |
|---|--|-----------------------------------|-----------------------|
|   |  | Основные валки                    | Вспомогательные валки |
| Рабочие валки:                          |  |                                   |                       |
| - диаметр в пережиме, мм                | 140  | 50                                | 36                    |
| - длина бочки, мм                       | 140  | 70                                | 70                    |
| Частота вращения, мин <sup>-1</sup>     | 25   | 60                                | 83                    |
| угол раскатки, град.                    | -7   | -7                                | +7                    |
| угол подачи, град.                      | 15   | 15                                | 15                    |
| Расстояние между валками в пережиме, мм | 22   | 22                                |                       |
| Расстояние между линейками, мм          | 24,2   | -                                 |                       |
| Выдвижение оправки за пережим, мм       | 11,94  | 11,94                             |                       |
| Диаметр оправки, мм                     | 10   | 10                                |                       |
| Длина оправки, мм                       | 33,61  | 26,56                             |                       |
| Коэффициент овализации                  | 1,1  | 1,05                              |                       |

Задавали теплообмен между заготовкой и инструментом. Для пары «валок–заготовка» задавали условие отсутствия проскальзывания для чего фактор трения принимали равным 10.

С целью оценки изменения диаметра и толщины стенки по длине гильзы по результатам моделирования провели измерения в сечениях, располагающихся друг от друга на расстоянии 10 мм по длине с помощью встроенного инструментария QForm. В каждом поперечном сечении диаметр измеряли в 8 точках, а толщину стенки измеряли в 16 точках каждого сечения с шагом 22,5 градуса. По результатам измерений получили средние значения дисперсии и среднеквадратичного отклонения диаметра (табл. 7) и среднее значение, дисперсию и среднеквадратичное отклонение, и толщины стенки (табл. 8).

Таблица 7. Статистические показатели наружного диаметра заготовки по смоделированным схемам

|                              | Среднее значение<br>наружного диаметра<br>полученной заготовки,<br>мм | Дисперсия,<br>мм <sup>2</sup> | Среднеквадрати<br>чное<br>отклонение, мм |
|------------------------------|---|-------------------------------|--|
| Двухвалковая<br>прошивка     | 23,67   | 0,0039                        | ±0,0621                                  |
| Четырехвалкова<br>я прошивка | 22,45   | 0,0014                        | ±0,0372                                  |

Установлено, что гильзы, полученные прошивкой в четырехвалковом стане, отличаются большей точностью размеров. При прошивке по двухвалковой схеме перепад значений диаметра составляет 0,25 мм, при четырехвалковой схеме – 0,13мм. Дисперсия диаметра гильзы, полученной способом четырехвалковой прошивки, составляет 0,0014 мм<sup>2</sup>, что меньше, чем при двухвалковой прошивке – 0,0039 мм<sup>2</sup>.

Таблица 8. Статистические показатели толщины стенки гильзы по смоделированным схемам

|                             | Среднее значение<br>толщины стенки<br>заготовки, мм | Дисперсия,<br>мм <sup>2</sup> | Среднеквадрати<br>чное<br>отклонение, мм |
|-----------------------------|---|-------------------------------|--|
| Двухвалковая<br>прошивка    | 6,87  | 0,0010                        | ±0,0317                                  |
| Четырехвалковая<br>прошивка | 6,27  | 0,0004                        | ±0,0209                                  |

Согласно табл. 8 дисперсия и среднеквадратичное отклонение толщины стенки при четырехвалковой прошивке меньше дисперсии и среднеквадратичного отклонения толщины стенки при двухвалковой прошивки в 2,5 и 1,5 раза соответственно.

По результатам компьютерного моделирования построили графики усилий на валок для каждого из способов прошивки (рис. 11). Усилие на валок при прошивке в четырехвалковом стане достигает 21 кН на основном валке и 14 кН на вспомогательном валке, в то время как при двухвалковой прошивке усилие достигает 69 кН. Согласно табл. 7-8 и рис.11 четырехвалковая прошивка по сравнению с двухвалковой позволяет получать гильзы с большей точностью размеров и меньшим усилием на деформирующий инструмент. Чем меньше усилие на валок, тем меньше износ и дольше срок службы технологического инструмента.

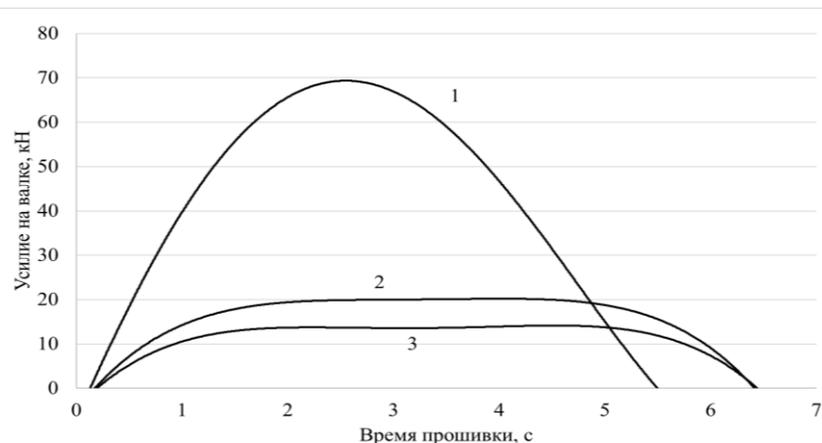


Рисунок 11. Усилия металла на валок в двухвалковом стане (1) и четырёхвалковом на рабочий (2) и вспомогательный валок (3)

**В пятой главе,** на основе компьютерного моделирования в вычислительной среде QForm, определены особенности напряженно-деформированного состояния заготовки при четырёхвалковой прокатке и произведено сравнение параметров напряжённо-деформированного состояния при четырёхвалковой прокатке с двухвалковой и трёхвалковой. Осуществляли моделирование процесса прокатки заготовки из стали 45 с диаметра 25 мм на 20 мм при температуре 1200°C.

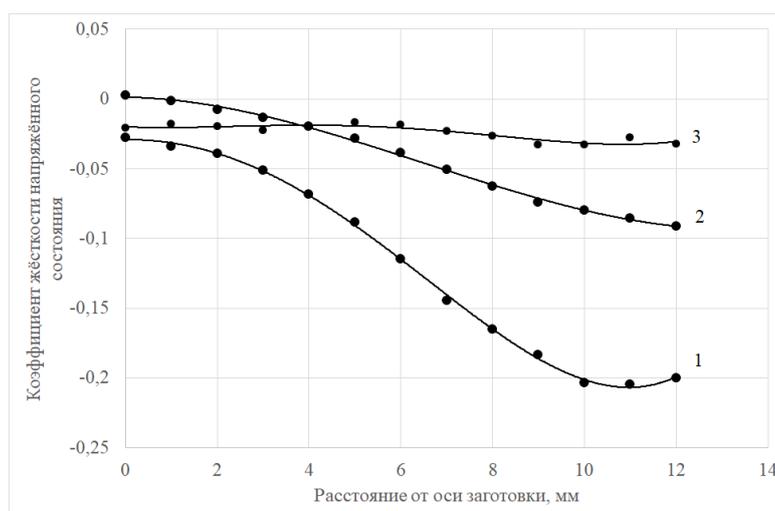


Рисунок 12. Изменение коэффициента жёсткости напряжённого состояния при двухвалковой (1), трёхвалковой (2) и четырёхвалковой (3) прокатке.

По результатам исследований построили изменение коэффициента жёсткости напряжённого состояния по радиусу заготовки в сечении, расположенном на расстоянии 12 мм от переднего торца (рис. 12).

Установлено (рис. 12), что четырёхвалковая схема прокатки позволяет получать наименьший перепад значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния по радиусу заготовки. Это снижает вероятность разрушения заготовки в процессе деформации.

Расчёт значений рис. 12 по традиционной методике сопряжён с существенными временными затратами: после применения постпроцессинговой процедуры в QForm (отслеживание траекторий точек) необходима длительная обработка числовых данных в Excel. Для повышения эффективности расчётов в QForm создали подпрограммы для отображения поля коэффициента жёсткости напряжённого состояния в объёме заготовки и любом её сечении. На рис. 13 показано как при винтовой прокатке круглой заготовки по различным схемам изменяется коэффициент жёсткости в поперечном сечении в пережиме.

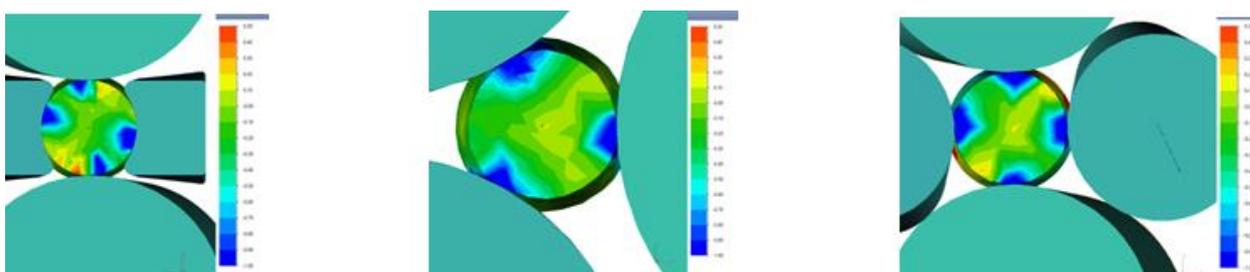


Рисунок 13. Изменение коэффициента жёсткости напряжённого состояния в поперечном сечении в пережиме при прокатке (слева-направо) по двухвалковой, трёхвалковой и четырёхвалковой схемам.

## Основные выводы и результаты работы

1. Проведён анализ существующих способов винтовой прокатки по показателям качества сплошных и полых круглых заготовок, а также по эффективности производства. По результатам анализа обоснована схема четырёхвалковой винтовой прокатки.

2. Установлены схема расположения валков, соотношение их диаметров в пережиме, значения углов подачи и раскатки, что позволяет получить равенство диаметров всех валков на выходе металла из очага деформации для обеспечения равномерности обжатия. Выполнено компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки и прошивки в четырёхвалковом стане и показана возможность осуществления четырёхвалковой винтовой прокатки по разработанной схеме.

3. По результатам компьютерного моделирования создана действующая модель четырёхвалкового стана и проведено формоизменение заготовок из модельного материала, чем подтверждена возможность осуществления четырёхвалковой прокатки и прошивки.

4. Компьютерное моделирование опытных прокаток показало, что отличие результатов моделей, полученных с применением вычислительных сред конечно-элементного анализа, по размерам сплошных и полых круглых заготовок не превышает 10%.

5. По результатам компьютерного моделирования процессов прокатки и прошивки стальных заготовок установлено, что получаемые в четырёхвалковом стане сплошные и полые заготовки имеют более высокую точность размеров: изменение диаметра сплошной заготовки после четырёхвалковой прокатки - 0,7 мм, после трёхвалковой - 1,2 мм, изменение толщины стенки гильзы после четырёхвалковой прошивки — 0,13 мм, после двухвалковой прошивки — 0,25 мм, при этом дисперсия толщины стенки после четырёхвалковой прошивки меньше дисперсии толщины стенки после двухвалковой прошивки в 2,5 раза, а среднеквадратичное отклонение - в 1,6

раза. Суммарное усилие на валки при использовании четырёхвалкового стана при прокатке сплошных заготовок меньше, чем при использовании трёхвалкового на 35-40%, при использовании четырёх валкового стана для прошивки усилие на валках на 65% ниже, чем при использовании двухвалкового стана.

6. Применение компьютерного моделирования позволило установить, что распределение значений коэффициента жёсткости в поперечном сечении заготовок из стали 45 при четырёхвалковой винтовой прокатке заготовок из стали 45 более равномерно, чем при двухвалковой и трёхвалковой прокатке, что снижает риск появления разрушения в процессе деформации. Более равномерное распределение напряжений в объёме заготовки, при четырёхвалковой винтовой прокатке создаются условия для получения более равномерной мелкозернистой структуры по сравнению с существующими способами винтовой прокатки.

7. На основе результатов проведённых исследований представляется целесообразным использование конструкции действующей модели четырёхвалкового стана винтовой прокатки в качестве прототипа при проектировании промышленных и лабораторных станов.

## **Основное содержание диссертации отражено в работах:**

1. Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Чан Ба Хюи, Гладков Ю.А., Гартвиг А.А. Компьютерное моделирование прошивки заготовок в четырёхвалковом стане винтовой прокатки. *Металлург*, №9, 2017, с. 19-24 (Рекомендован ВАК)

2. B. A. Romantsev, M. M. Skripalenko, Tran Ba Huy, M. N. Skripalenko, Yu. A. Gladkov, A. A. Gartvig. Computer Simulation of Piercing in a Four-High Screw Rolling Mill. *Metallurgist*, January 2018, Volume 61, Issue 9–10, pp 729–735 (Web of Science, Scopus, переводная статья из журнала *Металлург*, №9, 2017 г.)

3. Пат. №2635685 РФ, 1МПК В21В 19/04. Способ прошивки в стане винтовой прокатки/Романцев Б.А., Скрипаленко М.М., Чан ба Хюи. – заявл. 02.12.2016 г., опубл. 15.11.2017

4. Романцев Б.А., Чан Ба Хюи, Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н., Гартвиг А.А., Гладков Ю.А. Исследование процесса винтовой прокатки в четырехвалковой клетки методом моделирования. *Металлург*, №7, 2018, с. 21-29 (Рекомендован ВАК)

5. Романцев Б. А., Чан Ба Хюи, Скрипаленко М. М., Скрипаленко М. Н., Гладков Ю. А., Однокозова С. А. Моделирование процесса винтовой прошивки в четырехвалковой клетки. *Сталь*, №8, 2018, с. 32-35 (Рекомендован ВАК).

6. B. A. Romantsev, Tran Ba Huy, M. M. Skripalenko, M. N. Skripalenko, A. A. Gartvig, Yu. A. Gladkov. Investigation of the process of screw rolling in a four-roll stand by simulation. *Metallurgist*, November 2018, Volume 62, Nos. 7-8, pp 618-626 (Web of Science, Scopus, переводная статья из журнала *Металлург*, №7, 2018 г.)