

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

На правах рукописи

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»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

к.т.н., доц.

Скрипаленко М.М.

Москва – 2018

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Аналитический обзор литературы.....	13
1.1 Способы получения сплошных и полых круглых заготовок винтовой прокаткой .....	13
1.2 Компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки .....	24
Выводы по главе 1.....	32
Глава 2. Компьютерное моделирование процесса прошивки в четырёхвалковой клетки .....	33
Выводы по главе 2.....	45
Глава 3. Создание действующей модели и прокатка заготовок из модельного материала .....	46
3.1 Прокатка заготовок в действующей модели .....	46
3.2 Прошивка заготовок в действующей модели .....	53
Выводы по главе 3.....	57
4.1. Компьютерное моделирование прокатки заготовки из легированной стали по трёхвалковой и четырёхвалковой схемам.....	58
4.2. Компьютерное моделирование прошивки заготовки из легированной стали по двухвалковой и четырёхвалковой схемам .....	64
Выводы по главе 4.....	70
Глава 5. Исследование особенностей напряжённо-деформированного состояния при четырёхвалковой винтовой прокатке .....	71
Выводы по главе 5.....	87
Выводы .....	88
Список использованной литературы.....	90
Приложение А. Патент на изобретение № 2635685 .....	99

Приложение Б . Акт о проведении испытания действующей модели четырёхвалкового стана винтовой прокатки .....	100
Приложение В. Акт об использовании в учебном процессе материалов диссертации .....	102

## Введение

Одним из видов изделий, получаемых обработкой металлов давлением являются бесшовные трубы. Данный вид металлопродукции находит широкое применение, в том числе для транспортировки веществ в различных агрегатных состояниях, при строительстве, при добыче природных ресурсов, является элементом конструкции машин и агрегатов и применяется во многих других сферах человеческой деятельности. Бесшовные трубы используют тогда, когда требуется повышенная прочность и надёжность.

Существует несколько способов получения бесшовных труб. Широко применяется винтовая прокатка. Она может использоваться для получения полой трубной заготовки прошивкой на оправке, для уменьшения толщины стенки полой трубной заготовки раскаткой на оправке.

Считается, что впервые процесс винтовой прокатки реализовали братья Маннесманн в 1886 году. По одной из версий они экспериментировали с поворотом оси вращения валков при продольной прокатке и в результате этих исследований появился способ винтовой прокатки.

По прошествии около 130 лет с момента реализации первой винтовой прокатки появилось несколько различных схем. Прокатку и прошивку сейчас осуществляют в двухвалковых станах с направляющими роликами, дисками или линейками, а также в трёхвалковых станах. Помимо прокатки и прошивки в двухвалковых и трёхвалковых клетях также осуществляют раскатку на оправке. Также следует отметить отдельный случай трёхвалковой винтовой прокатки – радиально-сдвиговая прокатка, при которой деформация осуществляется таким образом, что происходит настолько существенное измельчение исходной структуры, что некоторые специалисты иногда предпочитают этот процесс равноканальному угловому прессованию. Также ряд экспериментов проводят с

использованием винтовой прокатки в планетарных станах. За почти полуторавековую историю процессов винтовой прокатки проведено много исследований и реализовано немало различных схем.

Отечественные и зарубежные исследователи отмечают, что не удаётся на данный момент однозначно утверждать о причинах явлений, свойственных винтовой прокатке, например, о причинах разрушения заготовки различного характера. Отмечают, что с точки зрения формоизменения винтовая прокатка является одним из самых сложных процессов, что является одной из причин неоднозначности оценок явлений при винтовой прокатке. Во многом сложность формоизменения обуславливается тем, что траектории перемещения точек заготовки, за исключением находящихся на её оси, можно описать как геликоидальные.

В силу особенностей процесса теоретические и экспериментальные исследования винтовой прокатки, а также прошивки и раскатки осуществлять гораздо сложнее, чем другие процессы ОМД, а иногда некоторые экспериментальные исследования представляются невозможными. В настоящее время благодаря стремительному развитию информационных технологий и вычислительной техники у исследователей появился новый и достаточно эффективный инструмент для изучения процессов винтовой прокатки. Компьютерное моделирование с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа широко применяется в отечественной и зарубежной практике, позволяя получать информацию о процессах винтовой прокатки, о которой раньше никто не знал.

Каждая из применяемых в настоящее время схем винтовой прокатки имеет свои недостатки и преимущества. При этом недостатки достаточно существенны. Среди них овальность и разностенность получаемых труб, неэффективный расход энергии, износ деформирующего инструмента и др.

Оптимизации двухвалковой и трёхвалковой прокаток посвящено большое количество публикаций. По результатам исследований в рамках данной работы, в том числе с применением компьютерного моделирования, предложен способ винтовой прошивки в четырёхвалковой клетки, обладающий рядом преимуществ по сравнению с существующими способами и, что также стоит отметить, не имеющих тех недостатков, которые свойственны двухвалковой и трёхвалковой схемам. В составе клетки две пары валков – рабочие и вспомогательные. Отличительными особенностями разработанного способа являются: более замкнутый, по сравнению с двухвалковой и трёхвалковой схемами, калибр, что повысит точность получаемых гильз; все валки приводные, что позволит рациональнее использовать энергию в очаге деформации; рабочие валки имеют чашевидную форму, а вспомогательные – грибовидную, что позволяет увеличить область контакта прошиваемой заготовки и валков и приведёт к повышению качества получаемых гильз.

#### **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 прошивки 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 прокатками;

- определены интервалы значений нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма, определены по результатам моделирования на стали 45: при двухвалковой прокатке он изменяется от 0 до 0,5, при трёхвалковой прокатке - от 0 до 0,3 и 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 повышения 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 на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС» при выполнении курсовых и дипломных работ студентов, при выборе технологических схем прошивки и прокатки заготовок и проектировании нового оборудования в ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН

### **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.**

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.

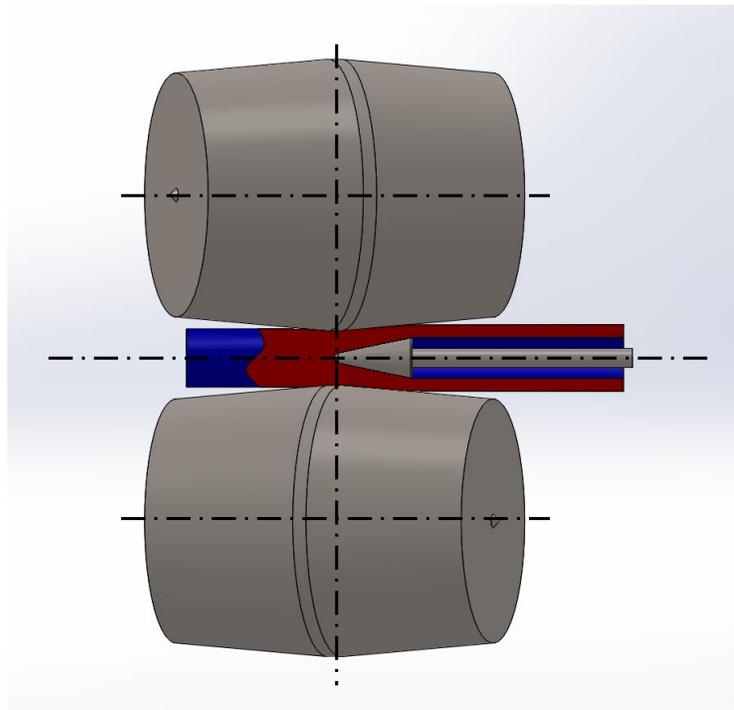
## **Структура и объём диссертации.**

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.

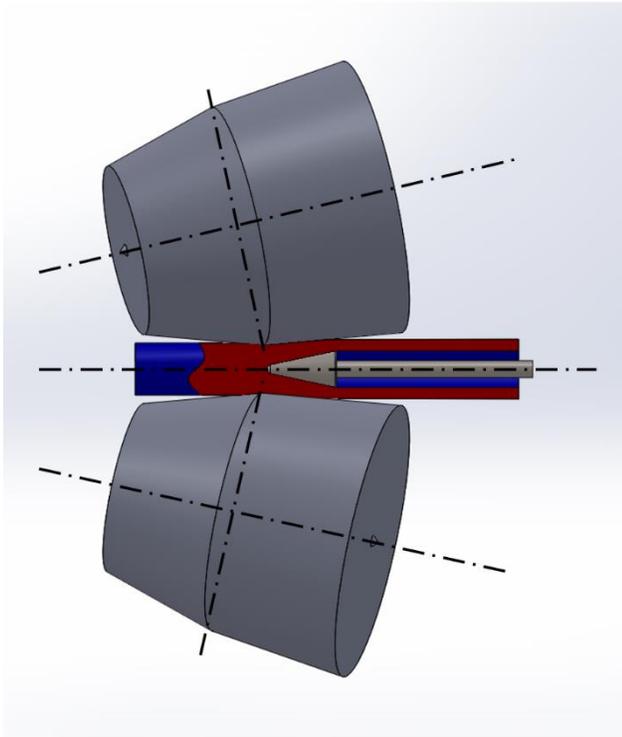
## Глава 1. Аналитический обзор литературы

### 1.1 Способы получения сплошных и полых круглых заготовок винтовой прокаткой

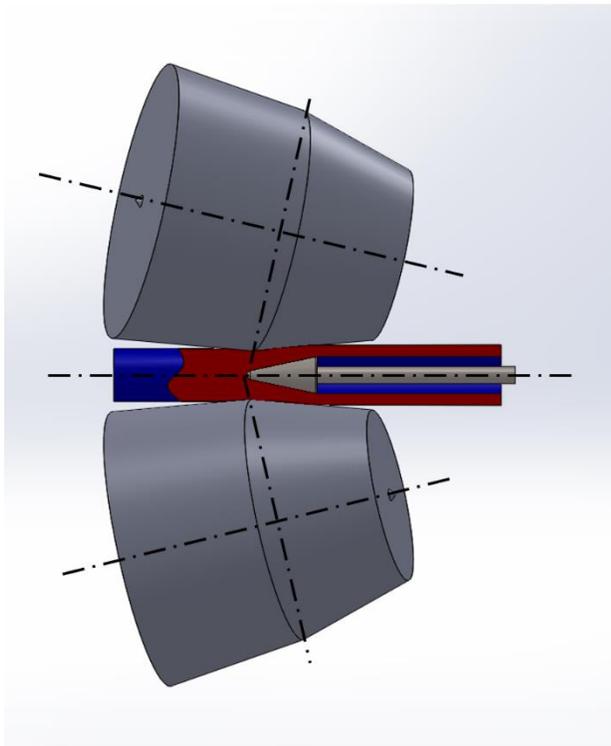
При производстве сплошных и полых круглых заготовок широко применяют различные схемы винтовой прокатки. Распространённой схемой является прокатка в двухвалковом стане с направляющими инструментами. При этом валки могут иметь различную форму и располагаться в клетке по-разному. Для прошивки исходных заготовок в гильзы используют бочковидные, грибовидные, чашевидные и дисковые рабочие валки (рис. 1) [1].



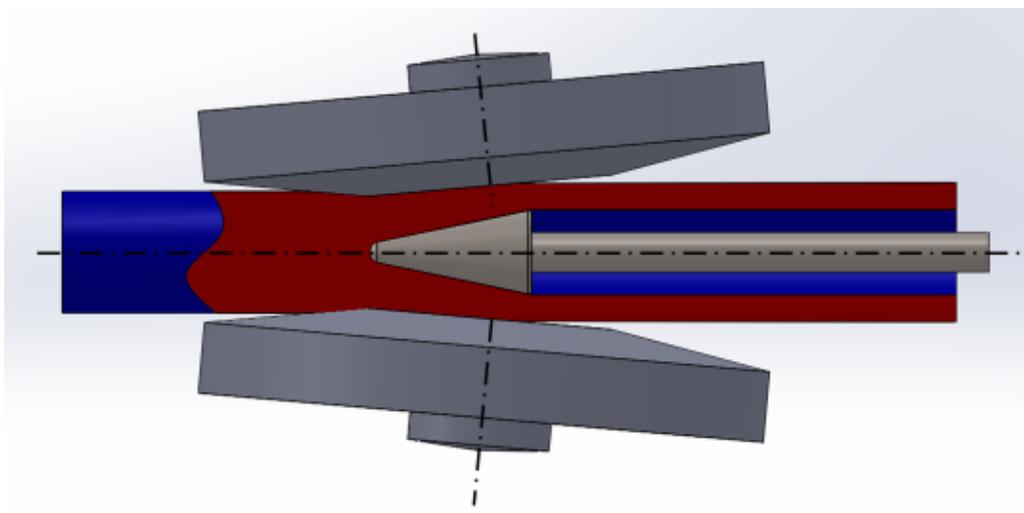
а



6



B

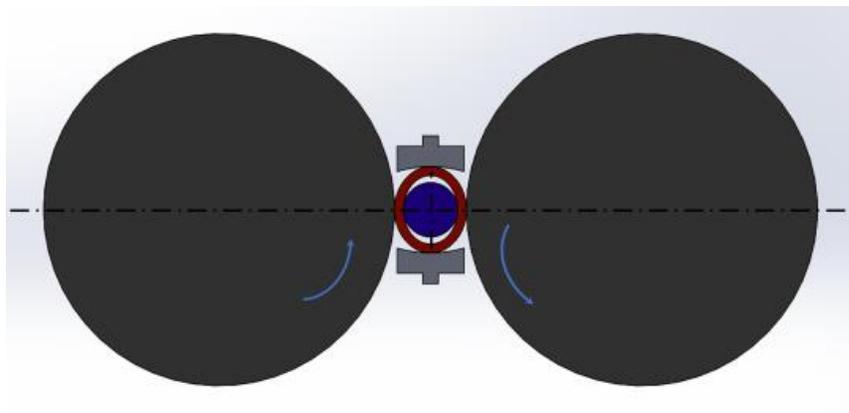


г

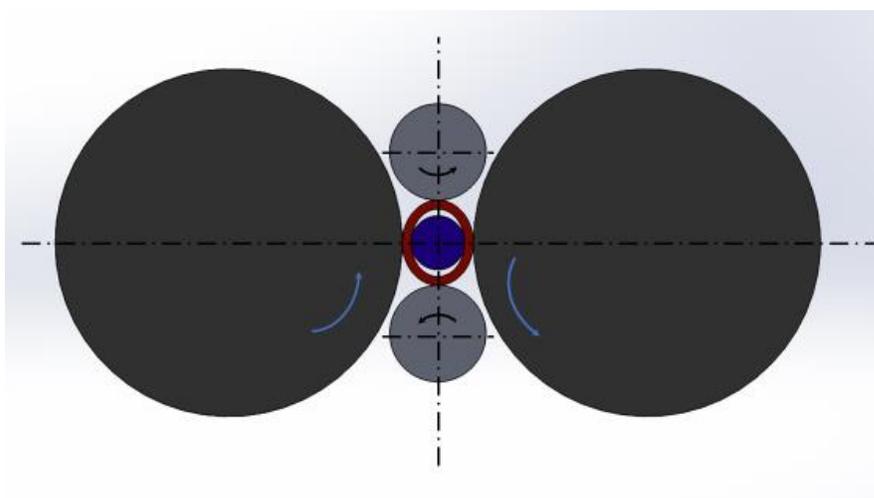
Рисунок 1. Схемы очага деформации при прошивке в станах с бочковидными (а), грибовидными (б), чашевидными (в) и дисковыми (г) валками [1]

Двухвалковые станы винтовой прокатки имеют направляющий инструмент для удержания заготовки в очаге деформации: линейки, ролики, диски (рис. 2). Холостые валки, линейки, приводные и не приводные диски служат для направления и удержания обрабатываемой заготовки в определённом положении относительно валков, а также для ограничения течения металла в тангенциальном направлении [2]. Направляющим инструментом в прошивных станах с грибовидными и дисковидными валками служат неподвижные линейки. В прошивных станах с бочковидными валками используются как ролики, так и неподвижные линейки, а в так называемых «станах Дишера» и приводные диски [3]. Согласно данным работы [4] направляющий инструмент по-разному влияет на характер формоизменения в процессе двухвалковой прокатки. Ролики способствуют поперечной раскатке,

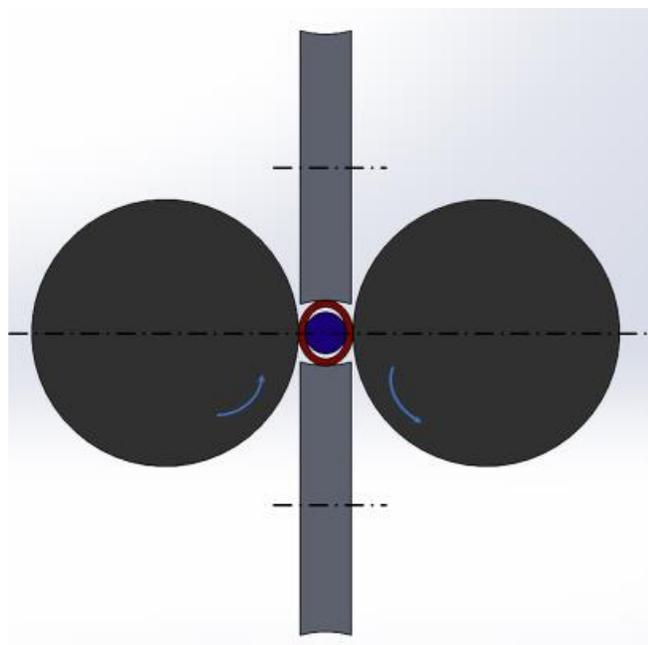
диски, напротив, ограничивают истечение металла в тангенциальном направлении, обеспечивая развитие продольной деформации.



а



б



В

Рисунок 2. Схемы прокатки в двухвалковом стане с линейками (а), роликками (б) и дисками (в) [2]

Особенностью прокатки в двухвалковом стане является осевое разрушение заготовки [5], при этом нет единства во мнении касательно причины появления разрушения подобного рода. Исследователи выделяют несколько факторов, обуславливающих разрушение [6]: неравномерность деформации и определённое соотношение между поперечной и продольной деформацией; число частных обжатий и температурно-скоростные условия; зависимость пластичности металла, определяемой химическим составом, качеством выплавки и структурным состоянием металла, от температуры и времени нагрева заготовки. В работе [7] в зависимости от факторов, вызывающих данное явление, предложено классифицировать разрушение при прошивке в двухвалковом стане на несколько видов. Также в этой работе приведен ряд методик [8-15], которые, как отмечают авторы, имеют

определённую адекватность при прогнозировании осевого разрушения и в значительной степени учитывают факторы, перечисленные в [6].

Отмечают [3], что условия деформации металла в двухвалковых прошивных станах являются крайне неблагоприятными. В осевой зоне заготовки неизбежно возникают поперечные растягивающие напряжения, которые являются причиной нарушения сплошности металла и образования перед оправкой полости с неровной рваной поверхностью. В результате на внутренней поверхности гильз образуются дефекты, что приводит в дальнейшем к браку труб, служит причиной чрезмерно высоких требований, предъявляемых к качеству металла исходных заготовок, затрудняет или даже делает невозможной прошивку ряда легированных и высоколегированных сталей. Указанный недостаток только частично устраняется применением осевого подпора [3].

Долгое время считали, что прошивка в станах винтовой прокатки возможна лишь при наличии в заготовке перед оправкой полости [3]. Однако было установлено, что без предварительного вскрытия полости перед носиком оправки в заготовке не только улучшается качество гильз, но также возрастает стойкость оправок и снижается расход энергии [16].

По результатам исследований процессов винтовой прокатки в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого века появился новый способ - прокатка в трёхвалковых станах. Отмечают [3], что валки при трёхвалковой схеме образуют замкнутый калибр и отсутствует направляющий инструмент, т.е. устранялись недостатки существующих двухвалковых станов.

При прошивке в двухвалковых станах (рис. 3а) в осевой зоне действуют поперечные растягивающие напряжения. Эти напряжения находятся в плоскости, нормальной к линии действия валков. Вопрос о знаке напряжений в плоскости, совпадающей с линией действия валков, является, как следует из

анализа процесса поперечной прокатки, нерешённым. При прошивке в трёхвалковом стане (рис. 3б) в центре заготовки действуют поперечные сжимающие напряжения.

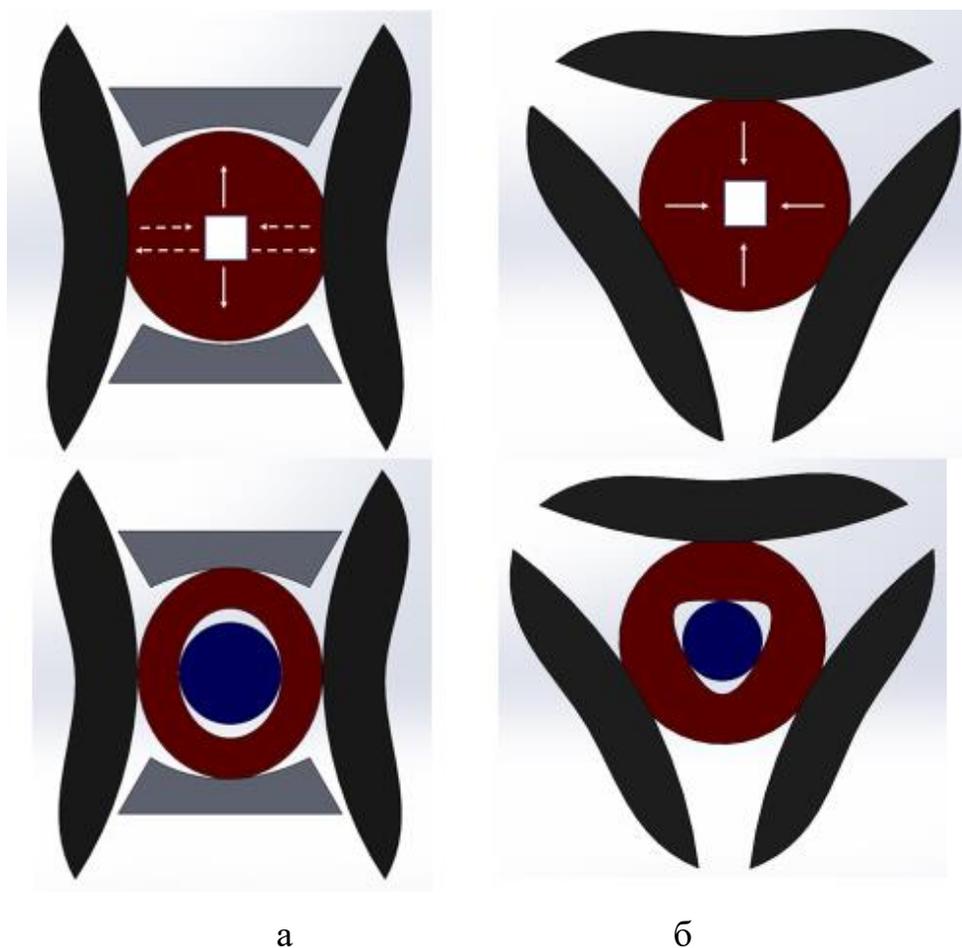


Рисунок 3. Схемы очага деформации и напряженного состояния металла в осевой зоне заготовки [3]: сверху – при прокатке, снизу – при прошивке, а – двухвалковая схема, б – трёхвалковая схема

При прокатке в трёхвалковых станах наблюдали разрушение металла заготовок различного характера. По результатам исследований [3, 17-19] наблюдали кольцевое разрушение и расслоение заготовки. По данным работы [5] осевое разрушение металла происходит как при двухвалковой, так и при

трёхвалковой прокатке, при этом при трёхвалковой прокатке отмечается более высокая вероятность разрушения металла в приповерхностных слоях заготовки и появлении наружных плен [20,21].

В работе [22] проведены комплексные исследования двухвалковой и трёхвалковой схем прошивки, произведено их сравнение по различным параметрам. Показано, что основная доля разностности обусловлена колебаниями оправки и гильзы в очаге деформации. При прошивке в двухвалковом стане оправка благодаря специфике напряжённо-деформированного состояния самоцентрируется в калибре стана и находится в динамическом равновесии на оси прокатки. Эффективным средством повышения точности гильз, как считают большинство исследователей, является уменьшение овальности заготовки-гильзы по длине очага деформации, т.е. создание тесного калибра. Однако при прошивке в стане с линейками овализация менее 1,06 приводит к резкому росту сопротивления перемещения металла и даже нарушению процесса. Исследования трёхвалковой схемы позволили продемонстрировать, что прошивка в трёхвалковом стане характеризуется интенсивным ростом смещающей силы при увеличении коэффициента приведения длины стержня, а также снижением за время прошивки коэффициента запаса устойчивости стержня, что в конечном итоге приводит к его пластическому изгибу и повышенной разностности. Кроме того, осевое усилие металла на оправку в случае прошивки на двухвалковом стане ниже усилия, зафиксированного на трёхвалковом стане. Отсутствие в трёхвалковом стане эффекта самоцентрирования оправки усиливает влияние на разностность гильз неравномерности температурного поля заготовки.

Анализируя результаты описанных выше исследований, в первую очередь работ [1,4,6,22] следует отметить положительные и отрицательные стороны получения трубных заготовок с применением двухвалкового стана и

трёхвалкового стана винтовой прокатки. При двухвалковой схеме при прошивке имеет место самоцентрирование оправки, что способствует повышению точности получаемых полых трубных заготовок. С другой стороны – овализация получаемых заготовок, потеря энергии вследствие трения о неподвижные линейки и неприводные ролики и диски. При трёхвалковой схеме получается более замкнутый, по сравнению с двухвалковой схемой, калибр (рис. 3а), однако нет самоцентрирования оправки, поэтому повышается разностенность по сравнению с двухвалковой схемой, а также металл течёт в зазор между валками (это частично видно на рис. 3б), что приводит к снижению точности получаемых полых трубных заготовок.

Следует отметить две схемы винтовой прокатки, которые имели своей целью совместить в себе преимущества двухвалковой и трёхвалковой схем, при этом избавиться от недостатков, свойственных указанным схемам. Обе схемы предполагают использование четырёх валков. Одна из таких схем описана в работе [23] и реализована на практике. Стан состоит из двух рабочих приводных валков и двух холостых направляющих (рис. 4) Данная схема по сравнению с двухвалковой и трёхвалковой позволяет получить более замкнутый калибр, что создаёт условия для повышения точности получаемых изделий. Однако, вследствие того, что два направляющих (вспомогательных) валка неприводные, вращаются за счёт трения с заготовкой, будет происходить отвод энергии из очага деформации, подобно потере энергии вследствие трения о неподвижные линейки или холостые диски и ролики при деформации в двухвалковых станах.

Возможным усовершенствованием схемы, описанной в [23] может служить схема, представленная в работе [24] (рис. 5-6). Стоит отметить, что эта схема не реализована на практике. Все четыре валка в этой схеме приводные и клеть имеет, так называемую, планетарную конструкцию [24,25]. Валки

разворачиваются только на угол раскатки. Предложенная схема имеет существенное ограничение по скорости вращения ротора стана и существует сложность при конструкции опор валков и узлов их настройки [23].

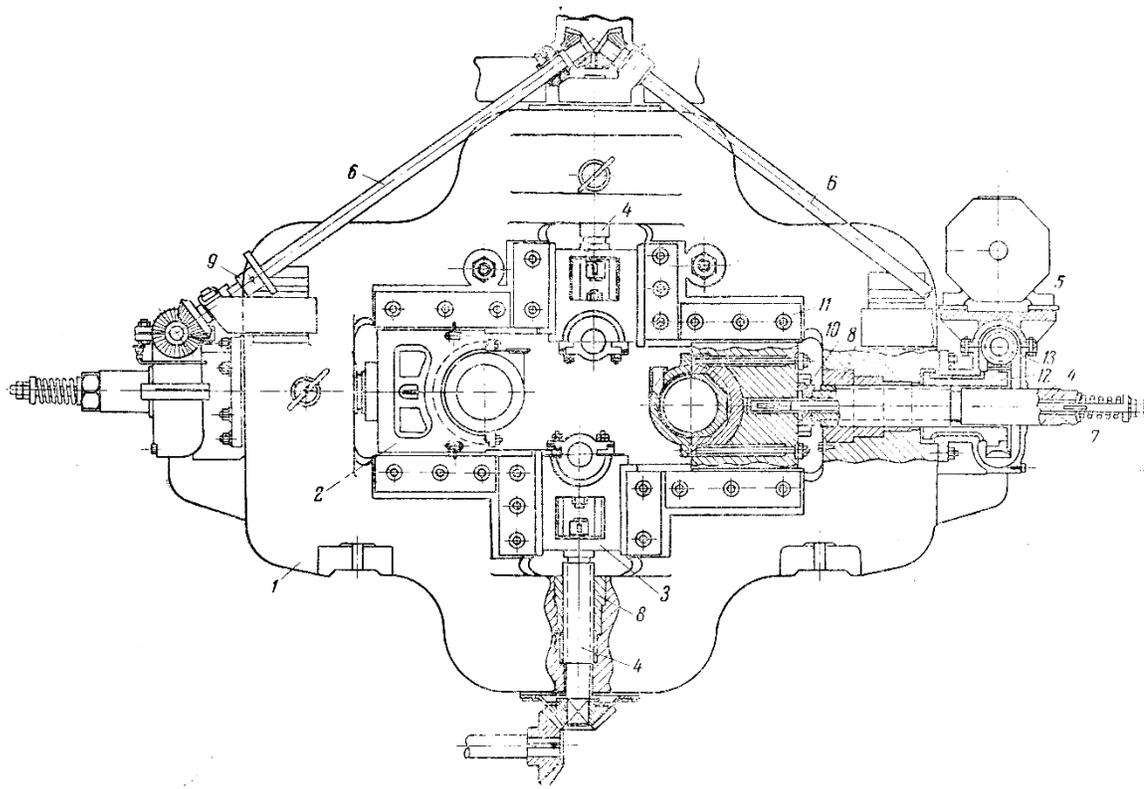


Рисунок 4. Прошивной стане для прошивки слитков [23]: 1 – станина; 2 – подушка рабочего валка; 3 – подушка направляющего валка; 4 – нажимные винты; 5 – электродвигатель; 6 – наклонные валы; 7 – тяга; 8 – нажимные гайки; 9 - муфта; 10 – предохранительный стакан; 11 – наличники; 12 – червячное колесо; 13 - червяк

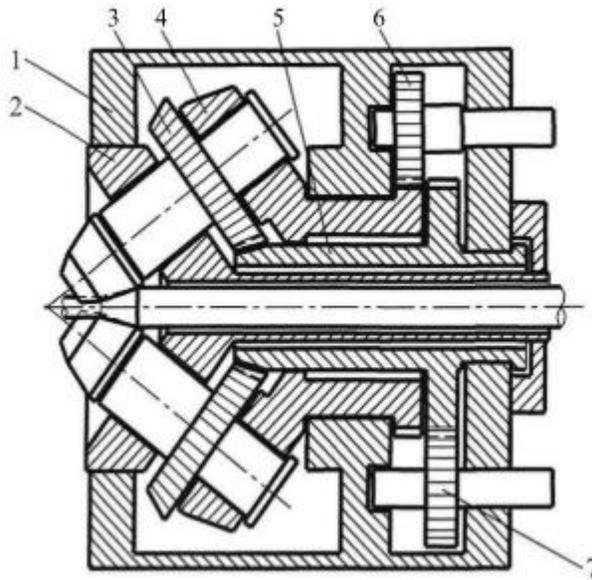


Рисунок 5. Схема четырёхвалкового планетарного стана: 1 – станина; 2,4 – обойма валков (ротор); 3,5,7 – привод валков; 4,6 – привод ротора.

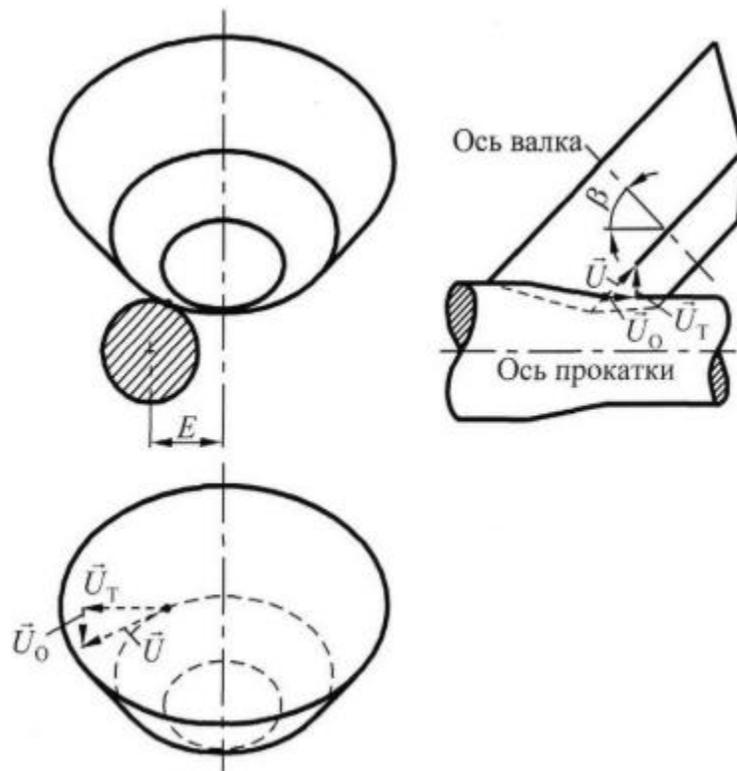


Рисунок 6. Взаимное пространственное положение валка и заготовки

В связи с вышеизложенным представляется актуальной разработка способа винтовой прокатки в стане, который бы не имел недостатков, присущим схемам показанных в работах [23-24], а также практическая реализация разработанного способа. На стадии разработки способа и оборудования для его реализации достаточно эффективным инструментом является компьютерное моделирование.

## **1.2 Компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки**

В силу сложности и особенностей процессов винтовой прокатки не всегда удаётся в ходе экспериментальных исследований оценить изменение того или иного параметра НДС, выяснить причины характерных явлений и др. Несмотря на то, что имеются значительные достижения при исследовании процессов винтовой прокатки на основе экспериментов [1,3,5,6,22,26-27], в последнее время явно обозначилась тенденция применения компьютерного моделирования для исследования процессов винтовой прокатки. При этом используют вычислительные среды конечно-элементного анализа. Основы данного метода изложены в нескольких источниках, например в [28], а первые результаты практического применения данного метода для исследования процессов формоизменения описаны в [29-30].

Компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки применяют главным образом для оценки параметров НДС, энергосиловых параметров и особенностей формоизменения.

Особенностью деформации круглых заготовок в двухвалковых клетях винтовой прокатки является осевое разрушение, или т.н. эффект Маннесманна, который различными способами и с помощью различных вычислительных сред моделировали в работах [31-34].

При моделировании процессов винтовой прокатки используются как отечественные, так и зарубежные вычислительные среды конечно-элементного анализа, большая часть из которых приведена в работе [35].

Наиболее часто компьютерное моделирование применяли для исследований процессов прокатки и прошивки в двухвалковом стане с направляющими линейками, в зарубежной литературе такой стан называют станом Маннесманна. Исследование распределения параметров НДС и особенностей формоизменения при прошивке в таком стане проводили в работе [36] с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа DEFORM. Одной из первых работ, где в трёхмерной постановке решена задача моделирования пластического формоизменения при прошивке в стане с направляющими линейками с помощью метода конечных элементов является [37]. Отечественный программный продукт QForm применяли [38] при моделировании процесса прошивки в стане с направляющими линейками для оценки энергосиловых параметров и точности гильз. Этот же программный продукт применяли в работе [39] при моделировании прошивки слитков в стане Маннесманна. В работе [40] предложен алгоритм, позволяющий сократить время расчёта при моделировании прошивки в двухвалковом стане с направляющими линейками методом конечных элементов и проведена его верификация путём сравнения с данными опытных прошивок. Достоверность результатов при моделировании прошивки в стане Маннесманна с помощью QForm показана в работе [41].

В работе [42] использовали вычислительную среду DEFORM при исследовании влияния угла подачи на формирование осевого разрушения при прокатке и прошивке заготовок в двухвалковом стане с направляющими линейками. Также DEFORM применяли при исследовании прошивки на ТПА (6-12) Северского Трубного Завода [43] (рис. 7).

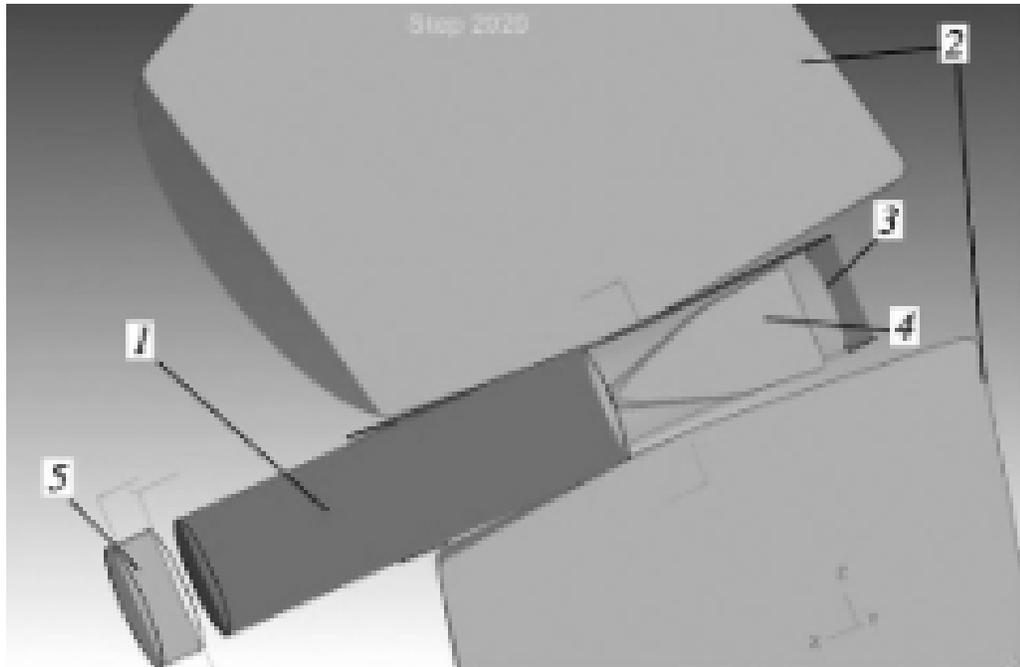


Рисунок 7. Модель в DEFORM для расчёта процесса прошивки в двухвалковом стане с линейками [43]: 1 – заготовка, 2 – валки, 3 – Линейка, 4 – оправка, 5 – толкатель

Особенности НДС при прошивке в стане Маннесманна, изменение температурного поля заготовки (рис. 8) и усилия на оправку и валок исследовались с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа MSC. SuperForm2005 в работе [44]. При этом проводилась оценка адекватности результатов компьютерно моделирования сравнением с результатами опытных прошивок (рис. 9).

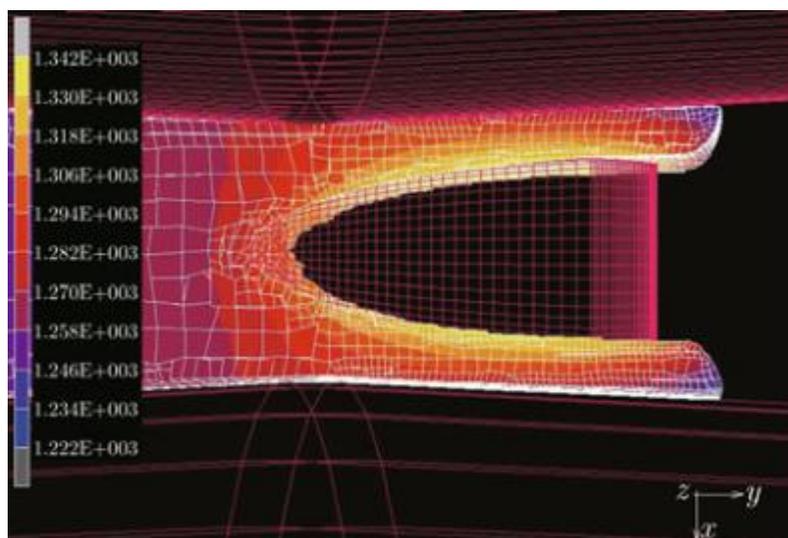


Рисунок 8. Распределение температуры в заготовке при прошивке в двухвалковом стане с линейками, полученное при компьютерном моделировании [44]

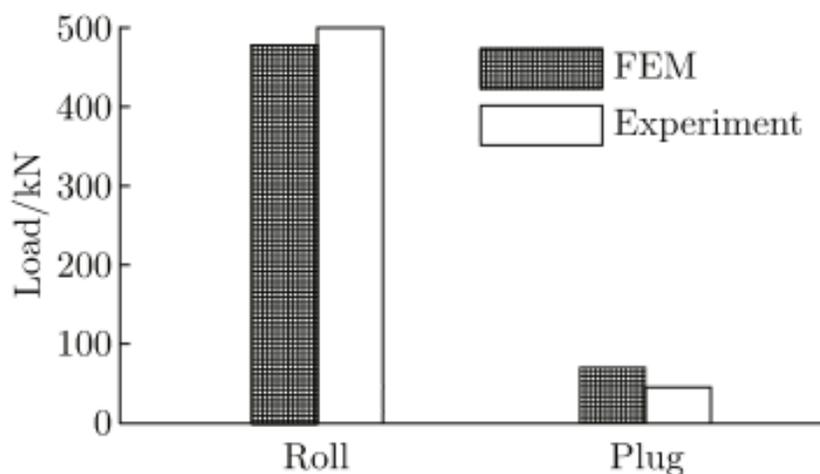


Рисунок 9. Усилие (по вертикальной оси, кН) на валок (Roll) и оправку (Plug) при компьютерном моделировании (FEM) и опытных прошивках (Experiment) [44]

Компьютерное моделирование с помощью вычислительных сред также достаточно эффективно применялось при моделировании прокатки и прошивки

в двухвалковом стане с направляющими дисками, т.н. стане Дишера. При этом применялись различные программные продукты. Например, Abaqus/Explicit 6.9 применяли для расчёта технологических параметров при винтовой прошивке и при этом проводилось сравнение полученных при компьютерном моделировании данных с результатами прошивок на лабораторном и промышленном оборудовании [45]. Исследователи из Польши проводили компьютерное моделирование прошивки в стане Дишера с помощью MSC. SuperForm2005 [46-47] и сравнивали полученные значения усилия на валок и момента на валке и ролике при компьютерном моделировании с результатами опытных прошивок. Отличия не превышали 10%. Также для стана этого типа проводили сравнение усилий на оправку и толщин стенок гильз по результатам опытных прошивок и компьютерного моделирования [48]. По толщине стенки отличие не превышало 5%, а по усилию на оправку – 7%. Исследованию процессов разрушения при прошивке в двухвалковом стане с направляющими дисками посвящена работа [49], в которой применялось компьютерное моделирование в вычислительной среде Forge® 2008.

Исследования процессов прокатки и прошивки в трёхвалковых клетях с помощью компьютерного моделирования, в отличие от исследований с применением вычислительных сред конечно-элементного анализа процессов прошивки и прокатки в двухвалковых клетях, достаточно редко связаны с оценкой энергосиловых параметров. Из таких работ можно отметить [50], когда DEFORM применяли для моделирования процесса прошивки и последующей раскати в т.н. тандем стане, состоящем из двух трёхвалковых клетей, авторы называют данный способ как TSR процесс (рис. 10). При этом сравнивали значения усилия на валки и оправку при компьютерном моделировании и прошивке на лабораторном стане.

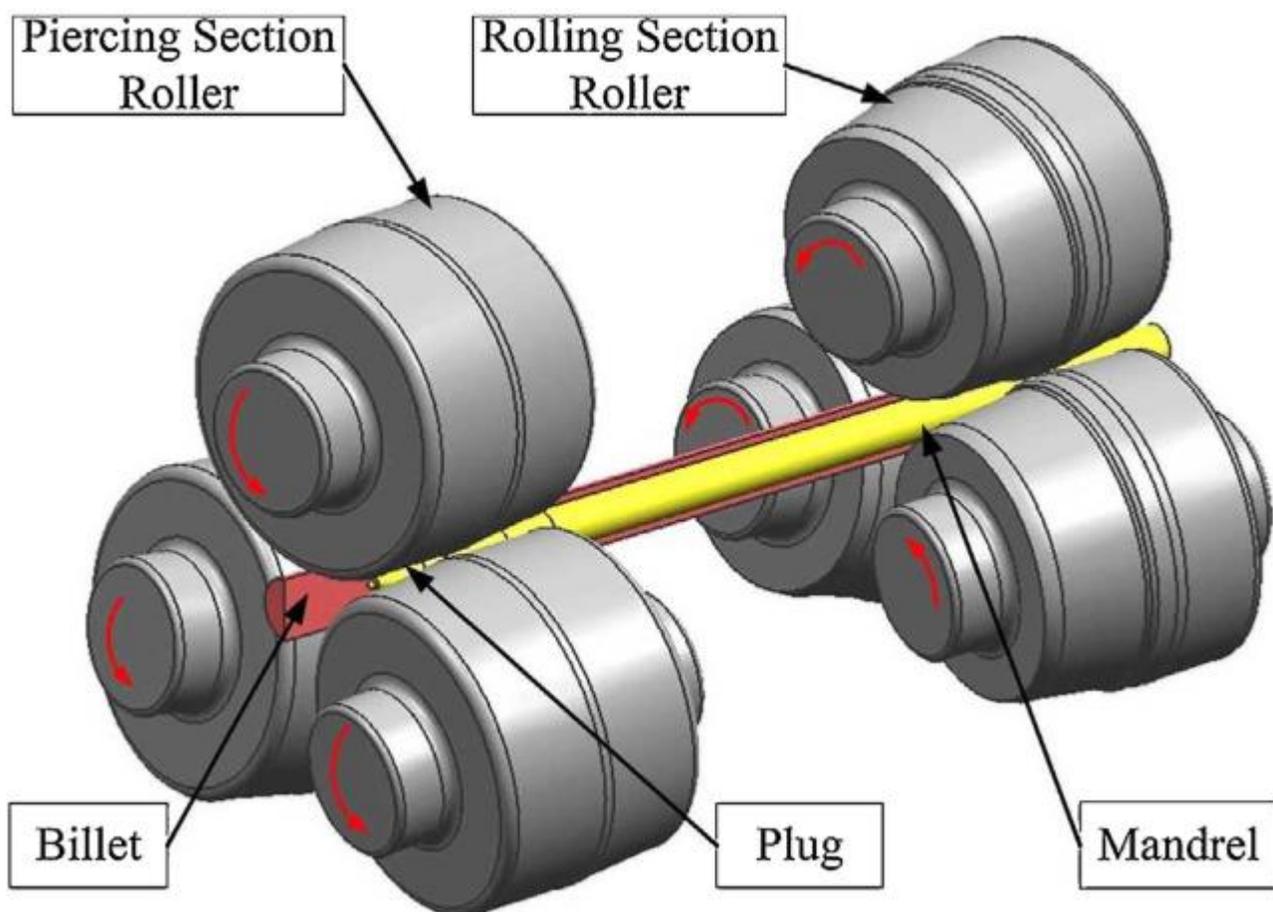


Рисунок 10. Схема TSR процесса [50] (на рисунке показаны прошивная оправка (plug), раскатная оправка (mandrel), заготовка (billet), валок прошивной клетки (Piercing Section Roller) и валок раскатной клеи (Rolling Section Roller))

Также компьютерное моделирование применялось для оценки структуры, свойств и особенностей формоизменения при трёхвалковой прокатке круглой заготовки. В подавляющем большинстве работ моделировали процесс радиально-сдвиговой прокатки (РСП) [1, 6, 51]. Влияние РСП на формирование показателей качества проката исследовали сотрудники Политехнического университета г. Ченстохова (Польша). В работах [52-54] Forge® 2011 применяли при моделировании процесса прокатки заготовки из магниевого сплава AZ31 в трёхвалковом стане РСП. Исследование процесса прокатки

заготовки из титанового сплава для оценки влияния РСП на формирование микроструктуры проводили с помощью компьютерного моделирования в ANSYS LS-DYNA в работе [55]. Исследование процесса трёхвалковой прокатки из другого титанового сплава с целью оценки устойчивости формоизменения осуществляли с применением компьютерного моделирования в DEFORM [56]. Процесс РСП позволяет интенсивно измельчать структуру прокатываемого металла [51], что исследовалось при моделировании с помощью QForm в рамках работы [57] при прокатке медных заготовок. В работе [58] моделировали с помощью Forge®2011 процесс радиально-сдвиговой прокатки заготовки из алюминиевого сплава в стане 14/40 (рис. 11). По результатам исследований сравнивали диаметр полученных заготовок по результатам опытных прокаток и после компьютерного моделирования. Отличие результатов не превышало 5%.

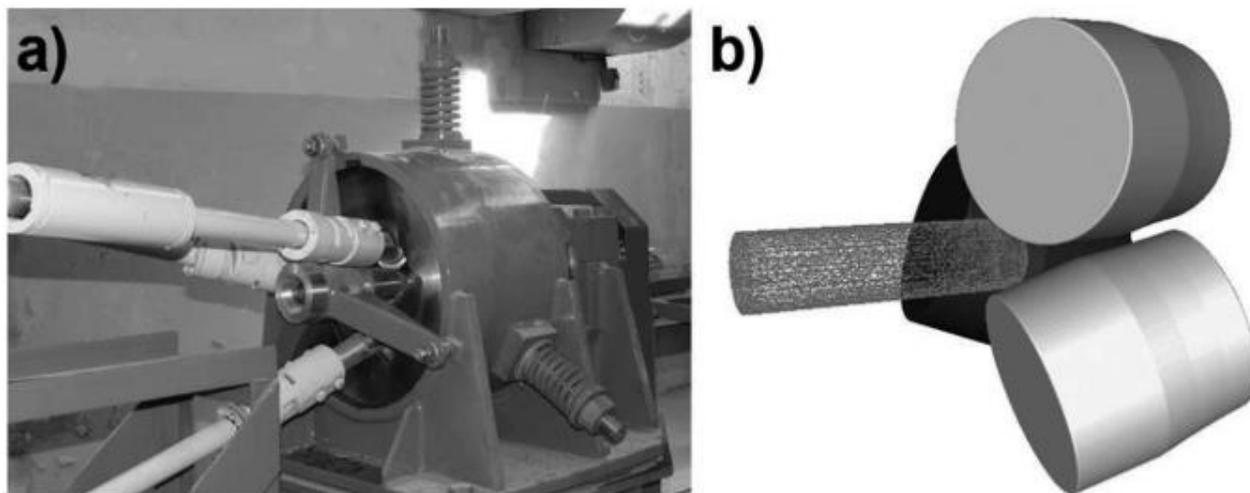


Рисунок 11. Стан РСП 14/40 (а) и модель для расчёта процесса прокатки в Forge®2011

Стан 14/40 и стан 10/30 использовали в работе [59] при прокатке заготовок из титанового сплава ВТ-6. Прокатывали заготовки с

профилированной торцевой частью. Опытные прокатки смоделировали в DEFORM. По результатам исследований сравнивали форму и размеры приторцовых областей получаемых прутков (рис. 12). В работе [60] исследовали влияние прокатки на ТПА-80 ПАО «СинТЗ» на деформированное состояние непрерывнолитой заготовки, а в работе [61] исследовали процесс формирования приторцовых областей заготовки при РСП. При этом для компьютерного моделирования использовали вычислительную среду DEFORM.

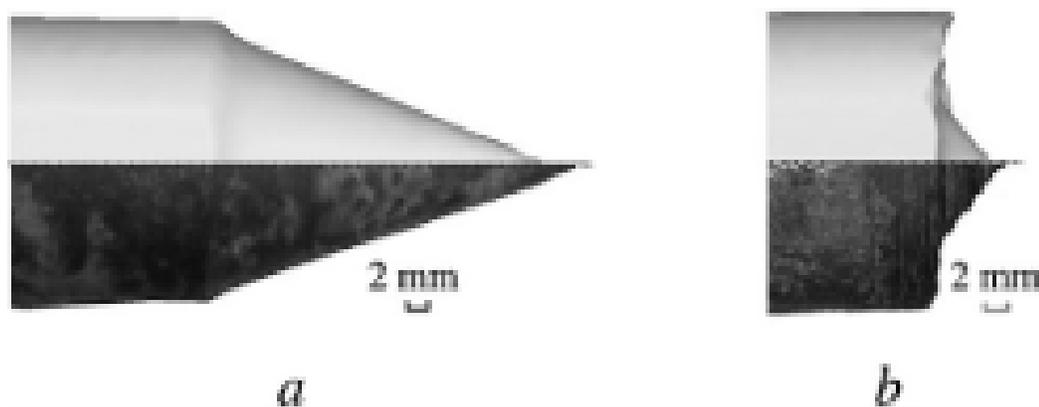


Рисунок 12. Сравнение формы приторцовых областей по результатам опытных прокаток (нижняя половина) и компьютерного моделирования в DEFORM (верхняя половина) для двух различных маршрутов прокатки (а и б) на мини-станах РСП [59]

Проанализированные в данном разделе результаты исследований с применением вычислительных сред конечно-элементного анализа показывают эффективность применения указанных вычислительных сред для исследования процессов винтовой прокатки. Существенная часть работа опубликована в журналах входящих по предметным областям в первую и вторую кварталы электронной реферативной базы данных Web of Science. Проведенные исследования показывают, что компьютерное моделирование позволяет

получать результаты, отличающиеся не более, чем на 10% по энергосиловым параметрам и размерам получаемых сплошных и полых круглых заготовок.

Актуальная задача разработки нового способа винтовой прокатки может быть решена с применением компьютерного моделирования в вычислительных средах конечно-элементного анализа.

## **Выводы по главе 1**

Обзор исследований в области применения различных схем винтовой прокатки для получения сплошных и полых изделий позволил установить, что имеется ряд существенных недостатков как при двухвалковой схеме – осевое разрушение заготовок, овальность получаемых изделий, необходимость применения направляющего инструмента – так и при трёхвалковой схеме – кольцевое разрушение заготовок, течение металла в зазоры между валками. Указанные недостатки отрицательно влияют на показатели качества получаемых изделий, однако эти недостатки могут быть устранены использованием четырёхвалковой схемы винтовой прокатки. На основе изложенного во второй части главы видно, что для исследования существующих схем винтовой прокатки и разработки новых эффективно применение компьютерного моделирования с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа.

Представляется актуальной разработка способа четырёхвалковой винтовой прокатки, который позволяет, за счёт ряда конструктивных параметров, получать изделия с большей точностью геометрических размеров и меньшей неравномерностью деформации по сравнению с существующими схемами.

## Глава 2. Компьютерное моделирование процесса прошивки в четырёхвалковой клетки

По результатам обзора в предыдущей главе предложено разработать новый способ винтовой прокатки для получения сплошных и полых круглых заготовок. Формоизменение по предлагаемому способу [62] предложено осуществлять в клетке с четырьмя валками (рис. 13): двумя одинаковыми рабочими валками чашевидной формы и двумя одинаковыми вспомогательными валками грибовидной формы. При предполагаемой схеме появится возможность получения гильз с меньшей, чем при двухвалковой прошивке овализацией, однако сохранится возможность «наводить» эффект Маннесманна [5,6] для того, чтобы происходило самоцентрирование оправки [6]. При этом не будет возникать кольцевой зоны растягивающих напряжений как при трёхвалковой прокатке и из-за этого будет меньшая разностенность гильз. Отношение диаметра в пережиме чашевидного вала к диаметру в пережиме грибовидного вала 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 10%. Угол подачи  $15^\circ$  согласно данным [65] позволит «смягчить» схему напряженно-деформированного состояния и максимально снизит вероятность осевого разрушения заготовки. Угол раскатки  $-7^\circ$  для чашевидных валков необходим для удобства размещения главного привода и входной стороны стана. Для грибовидных валков угол раскатки  $7^\circ$  также необходим для размещения их главного привода и выходной стороны стана. 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 прошивки 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 изделий. 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.

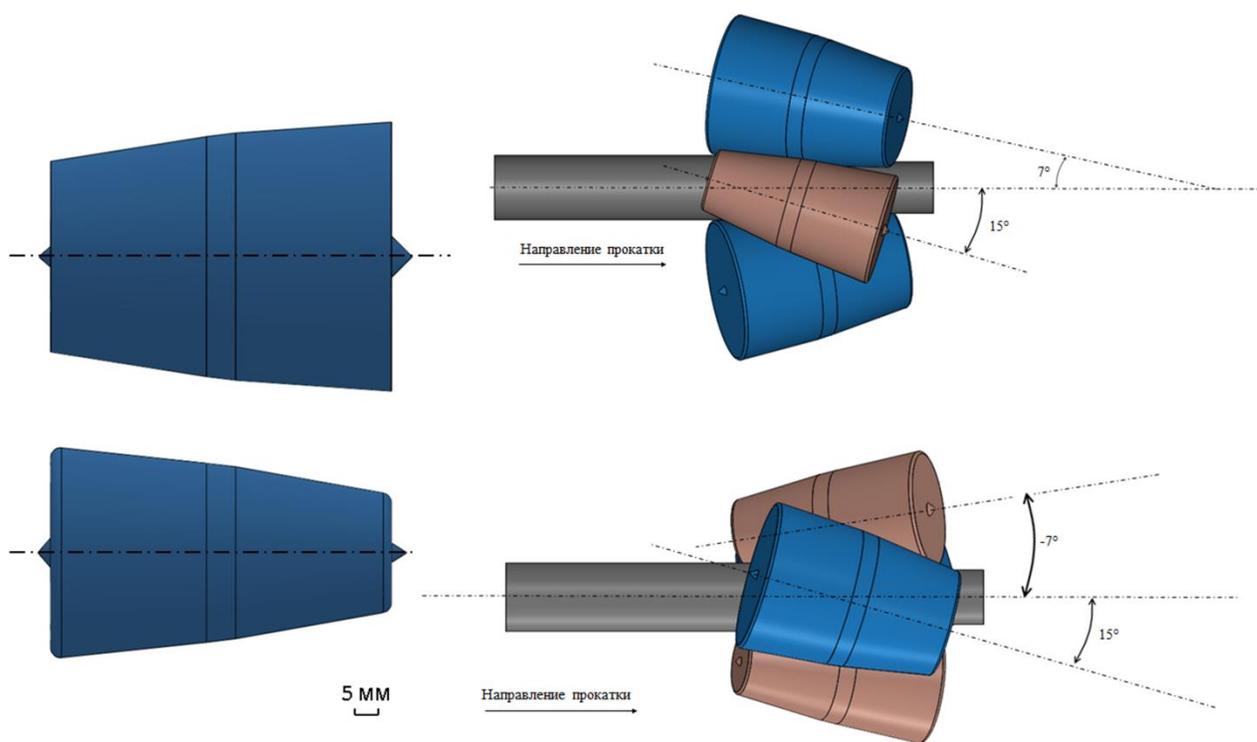


Рисунок 13. Форма валков и их положение при четырёхвалковой схеме винтовой прокатки.

Для того, чтобы продемонстрировать принципиальную возможность реализации предлагаемого способа и сравнить его с двухвалковой и трёхвалковой прошивкой, провели компьютерное моделирование в вычислительной среде конечно-элементного анализа QForm [63].

При подготовке данных для компьютерного моделирования в QForm создали объёмные модели валков, оправок, заготовки и направляющего инструмента с помощью SolidWorks [64]. Для двухвалковой прошивки использовали размеры инструмента стана МИСиС-130Д [6], для трёхвалкового стана – МИСиС-100Т [6]. Сборка для моделирования прошивки в стане без направляющего инструмента представлена на рис. 14. Созданные модели спозиционировали в сборки в SolidWorks, сохранили и загрузили в программу создания конечно-элементной сетки QShape [63].

При задании начальных и граничных условий в QForm приняли температуру исходной заготовки равной 1150°C. Материал заготовки - Сталь 45. Для пары «оправка заготовка» задали фактор трения по Зибелю равным 0,4, а для пары «валок-заготовка» - условие отсутствия проскальзывания. Моделировали прошивку заготовок диаметром 60 мм и длиной 200 мм. Для каждого из трёх моделируемых способов использовали одну и ту же оправку с диаметром калибрующего участка 45 мм. При создании деталей и сборок в SolidWorks и задании условий перед моделированием в QForm учитывали данные, представленные в табл. 1. Теплообмен между заготовкой и инструментами в QForm задавали как «простой», более подробно об этом режиме можно узнать в [63].

Таблица 1. Параметры моделируемых способов прошивки

Параметр	Двухвалковая прошивка в стане с направляющими миллиметровыми	Трёхвалковая прошивка	Прошивка в стане без направляющего инструмента
Рабочие валки:			Рабочие валки /Вспомогательные валки
• диаметр в пережиме, мм	420	140	150 / 110
• длина бочки, мм	320	180	200 / 200
• Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	60	60	60 / 80
Угол:			
• раскатки	0	-5	7 / -7
• подачи	18	18	15 / 15
Обжатие в пережиме, %	13	11	9
Обжатие перед носиком оправки, %	6	6	6

По табл. 1 видно, что среди моделируемых способов при прошивке в четырёхвалковой клети имеет место наименьшее обжатие в пережиме – 9%. При таком значении обжатия создаётся возможность для прошивки малопластичных сталей и сплавов.

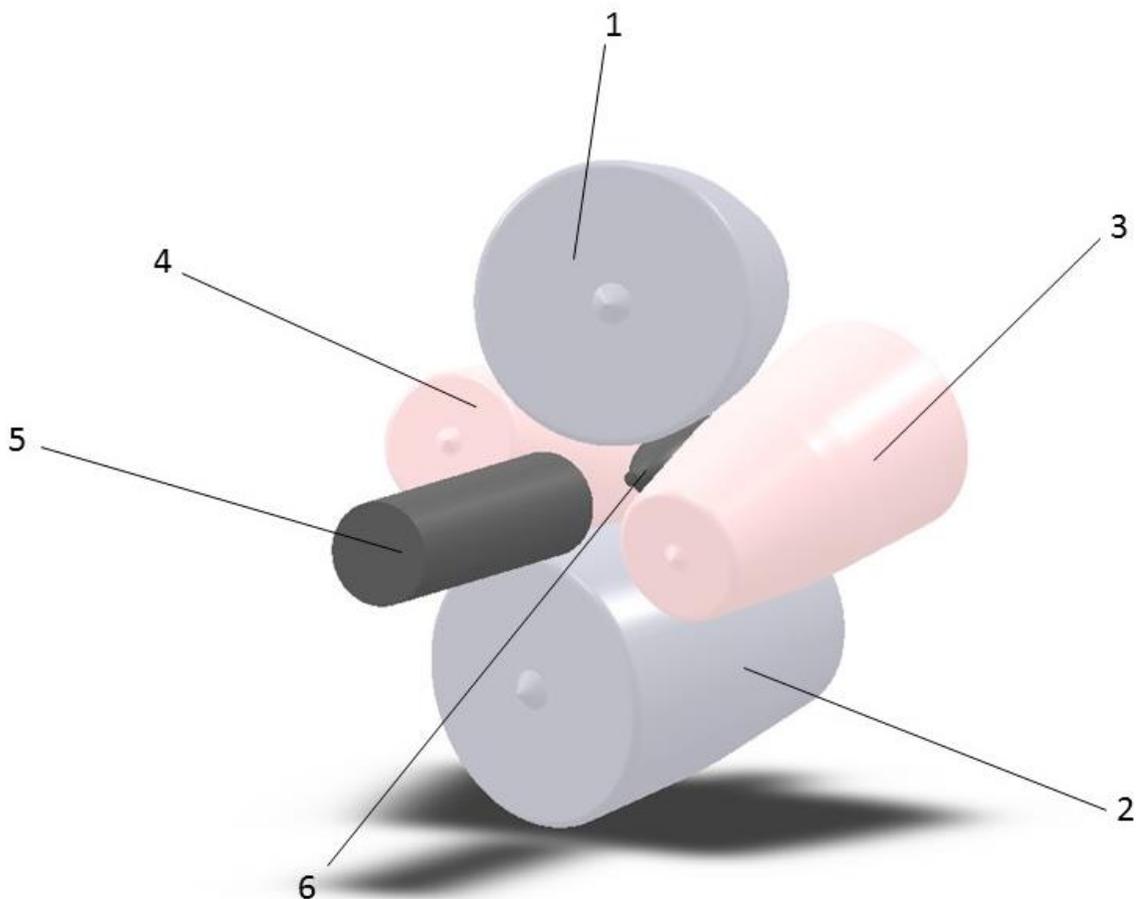


Рисунок 14. Объёмная модель, подготовленная в Solidworks, для компьютерного моделирования в QForm процесса прошивки в стане без направляющего инструмента: 1,2 – рабочие валки, 3,4 – вспомогательные валки, 5 – заготовка, 6 – оправка

По результатам моделирования прошивок в QForm получили модели гильз (рис. 15) и визуально оценили разницу в формоизменении прошиваемых заготовок в очаге деформации в пережиме (рис. 16).



Рисунок 15. Вид гильз со стороны торца после прошивки в двухвалковом стане (а), трёхвалковом стане (б) и стане без направляющего инструмента (в)

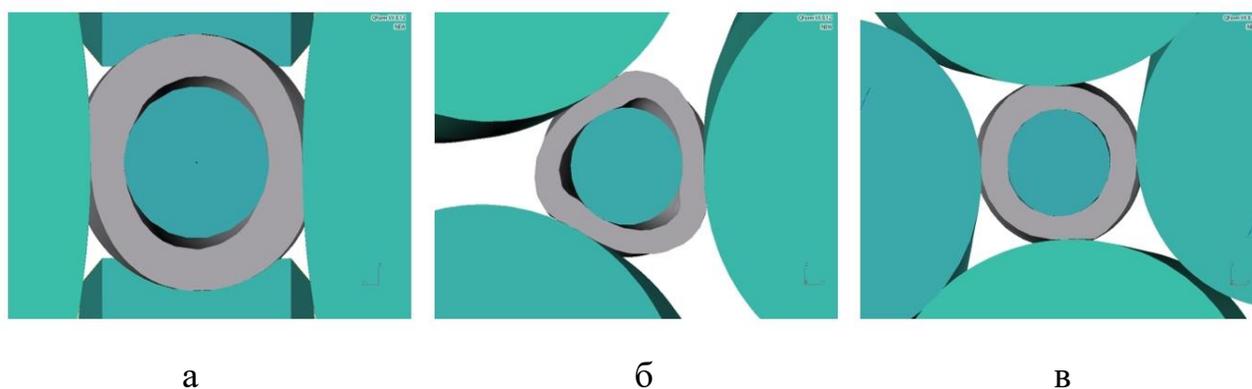


Рисунок 16. Формоизменение в пережиме: а – двухвалковый стан с линейками, б – трёхвалковый стан, в – стан без направляющего инструмента

По рис. 16 видно, что характер формоизменения в пережиме, с точки зрения формирования качества получаемых гильз, наиболее благоприятный при прошивке в стане без направляющего инструмента: меньше овальность и нет течения в зазоры между валками. Если отталкиваться от рис. 15, то сложно установить визуально, насколько отличие характера деформации в пережиме по

предлагаемому способу от двухвалковой и трёхвалковой прошивки сказывается на различии в овальности и разностенности гильз.

С целью количественной оценки овальности и разностенности полученных при моделировании в QForm гильз данные из QForm передали в SolidWorks для проведения измерений. Измеряли диаметр гильз в сечениях, располагающихся друг от друга на расстоянии 20 мм по длине. В каждом сечении диаметр измеряли 8 раз, через каждые 22,5 градуса (рис. 17). По результатам восьми измерений выявляли наибольшее и наименьшее значение наружного диаметра. Вычисляли отношение наибольшего диаметра к наименьшему и принимали его в качестве показателя овальности. На рис. 18 показаны данные по овальности для сечений гильз, полученных прошивкой в двухвалковом, трёхвалковом станах и стане без направляющего инструмента.

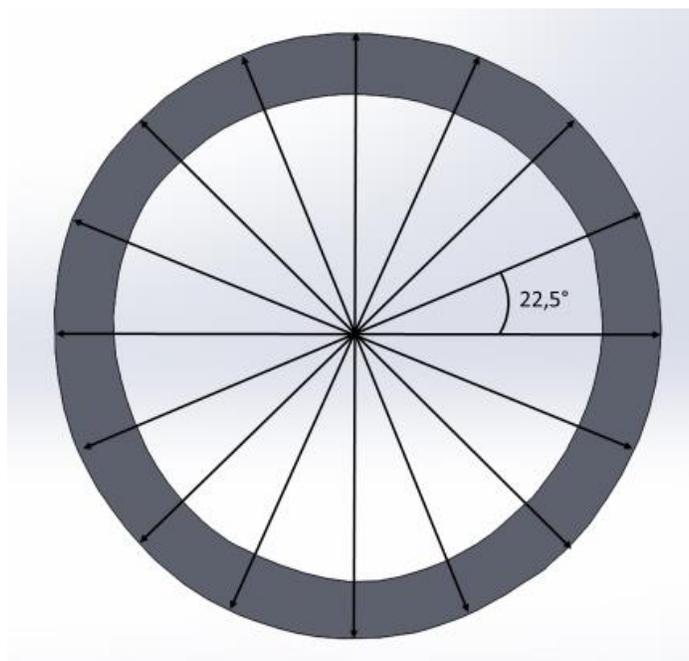


Рисунок 17. Схема измерения наружного диаметра для определения овальности сечения

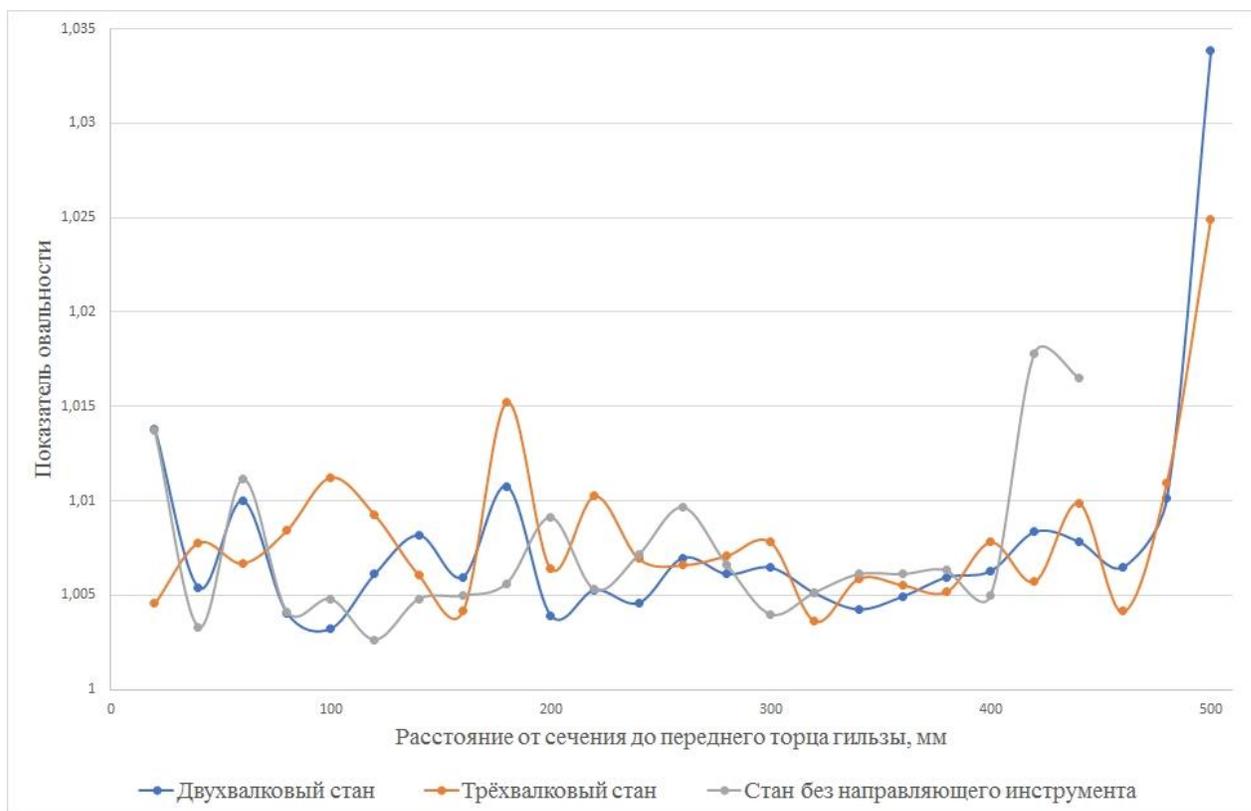


Рисунок 18. Изменение показателя овальности по длине гильз, полученных при моделировании прошивки в станах

По рис. 18 видно, что овальность по предложенному способу как минимум не выше, чем при двухвалковой или трёхвалковой прошивке. Для более детального анализа данные рис. 18 обработали статистически (табл. 2).

Таблица 2. Результаты статистического анализа данных по овальности

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

По табл. 2 и рис. 18 видно, что из всех смоделированных способов прошивка в стане без направляющего инструмента позволяет получать гильзы с наименьшей овальностью, в первую очередь в приторцовых областях гильзы (рис. 18).

Сравнили также изменение толщины стенки по длине прошитых гильз. Схема измерения была аналогичной схеме, представленной на рис. 17. Измеряли толщину стенки в 16 точках каждого сечения с шагом 22,5 градуса. После измерений для каждого сечения выбирали максимальное и минимальное значение толщины стенки и рассчитывали их отношение. На рис. 19 показано как это отношение изменяется по длине гильз после прошивок по различным схемам.

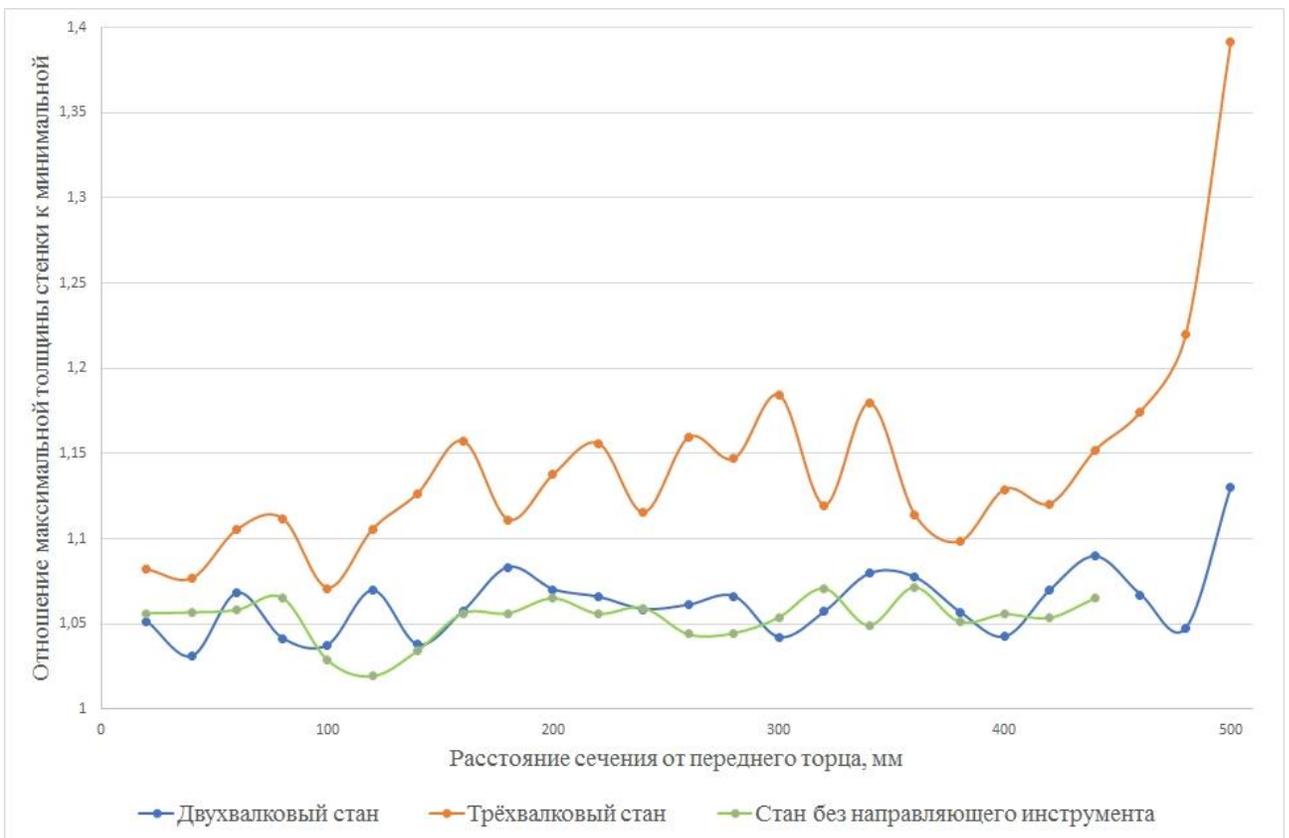


Рисунок 19. Изменение разностенности по длине гильз по результатам моделирования

По рис. 19 видно, что среди трёх смоделированных способов прошивка в стане без направляющего инструмента позволяет получить гильзу с наименьшей разностенностью.

Важным показателем при оценке разных способов получения одного и того же вида металлопродукции являются энергозатраты на деформацию. По результатам моделирования в QForm построили кривые усилия на валках и оценили работу, осуществляемую валками (рис. 20).

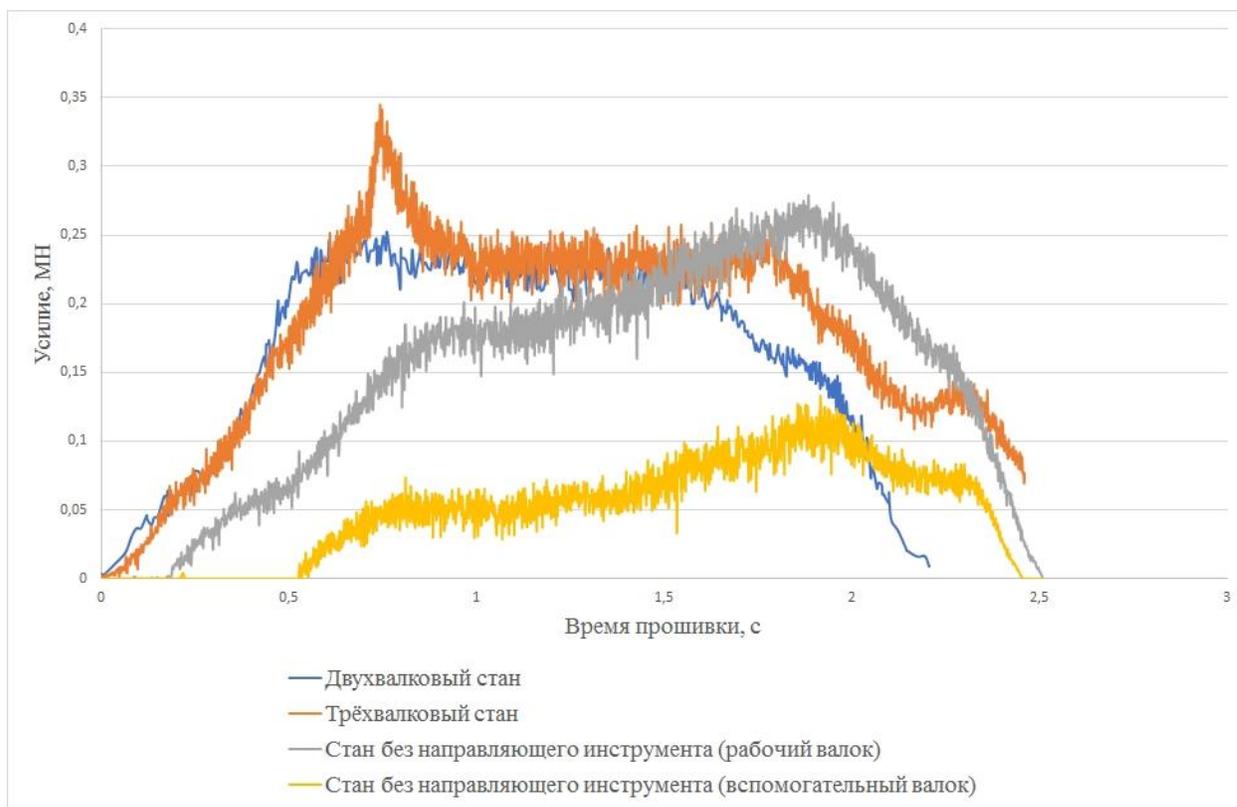


Рисунок 20. Усилие на валок при прошивке по различным схемам

Вследствие разного обжатия в пережиме (табл. 1) непосредственно сравнивать усилия было бы некорректно, есть возможность сопоставить порядок усилий, а также значений работы, осуществляемой валком каждого из станом (табл. 3).

Таблица 3. Энергосиловые показатели смоделированных прошивок

Показатель	Двухвалковая прошивка	Трёхвалковая прошивка	Прошивка в стане без направляющего инструмента	
			Рабочий валок	Вспомогательный валок
Работа, кДж	170,8	199,7	165,0	3,3

Исходя из данных табл.3, и, учитывая, что при прошивке в стане без направляющего инструмента площадь контакта валков и гильзы больше, можно предположить, что по сравнению с двухвалковой и трёхвалковой прошивкой при прошивке в стане без направляющего инструмента энергия будет расходоваться более рационально, при этом усилие деформации будет более равномерно распределяться по поверхности гильзы в очаге деформации. В связи с этим можно ожидать снижения, по сравнению с существующими способами винтовой прошивки, уровня дополнительных и, возможно, остаточных напряжений в получаемых гильзах.

## **Выводы по главе 2**

Таким образом, предложен новый способ прошивки в стане винтовой прокатки без направляющего инструмента. С целью оценки возможных преимуществ разработанного способа провели компьютерное моделирование процессов прошивки в двухвалковом и трёхвалковом станах и стане без направляющего инструмента с помощью вычислительной среды QForm.

Результаты исследований позволили установить, что:

1. При прошивке по предлагаемому способу образуемый валками калибр, по сравнению с двух- и трёхвалковой прошивкой, более замкнут и это позволит получать гильзы с меньшей овальностью и разностенностью. При прошивке в стане без направляющего инструмента показатели овальности идентичны гильзам, полученным прошивкой в двухвалковом и трёхвалковом станах. Гильзы после прошивки в стане без направляющего инструмента имели отношение максимальной толщины стенки к минимальной по длине гильзы не более 1,07. При этом для двухвалковой прошивки это отношение достигало 1,3, а для трёхвалковой – 1,39.

2. Более равномерное распределение усилия по поверхности заготовки и в очаге деформации позволит получать гильзы с лучшим качеством поверхности.

3. Компьютерное моделирование показало возможность реализации прошивки в стане без направляющего инструмента с меньшим, по сравнению с другими способами, обжатием в пережиме, что создаёт условия для прошивки малопластичных материалов.

## **Глава 3. Создание действующей модели и прокатка заготовок из модельного материала**

### **3.1 Прокатка заготовок в действующей модели**

Действующую модель стана создавали исходя из имеющихся возможностей оборудования для изготовления компонент модели и данных из предыдущей главы и работы [66]. Стан 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 от  $15^\circ$ , обжатие в пережиме 8%. Угол подачи  $15^\circ$  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. Для грибовидных валков угол раскатки  $7^\circ$  также необходим для размещения их главного привода. 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.

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.

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.

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.

Модель (рис.21) состоит из рабочей клетки 1, индивидуальных главных приводов рабочих валков - мотор-редукторов 2 и шпиндельных передач 3, входной стороны с обогреваемой проводкой 4 и выходной стороны 5.

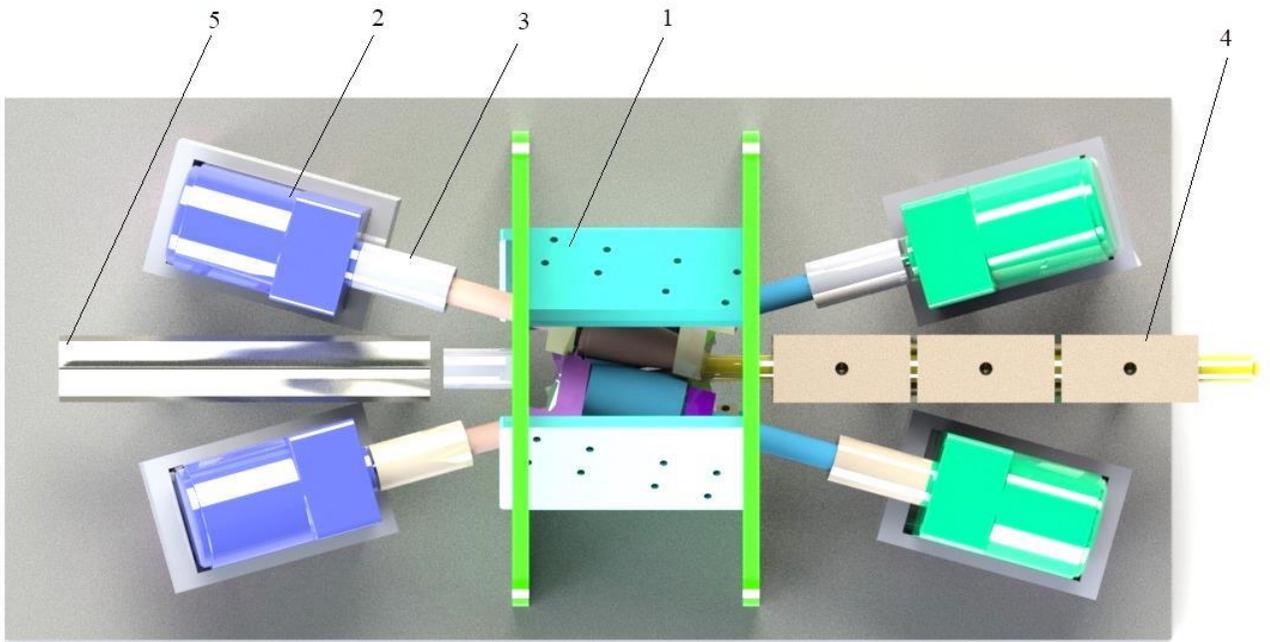


Рисунок 21. Схема расположения основных механизмов и устройств модели: 1 – рабочая клеть, 2 – индивидуальные главные приводы - мотор-редукторы, 3 – шпиндельные устройства, 4 - проводка с входной стороны, 5 – проводка с выходной стороны.

Создали действующую модель стана четырёхвалковой винтовой прокатки (рис. 22) с использованием цифровых технологий изготовления.

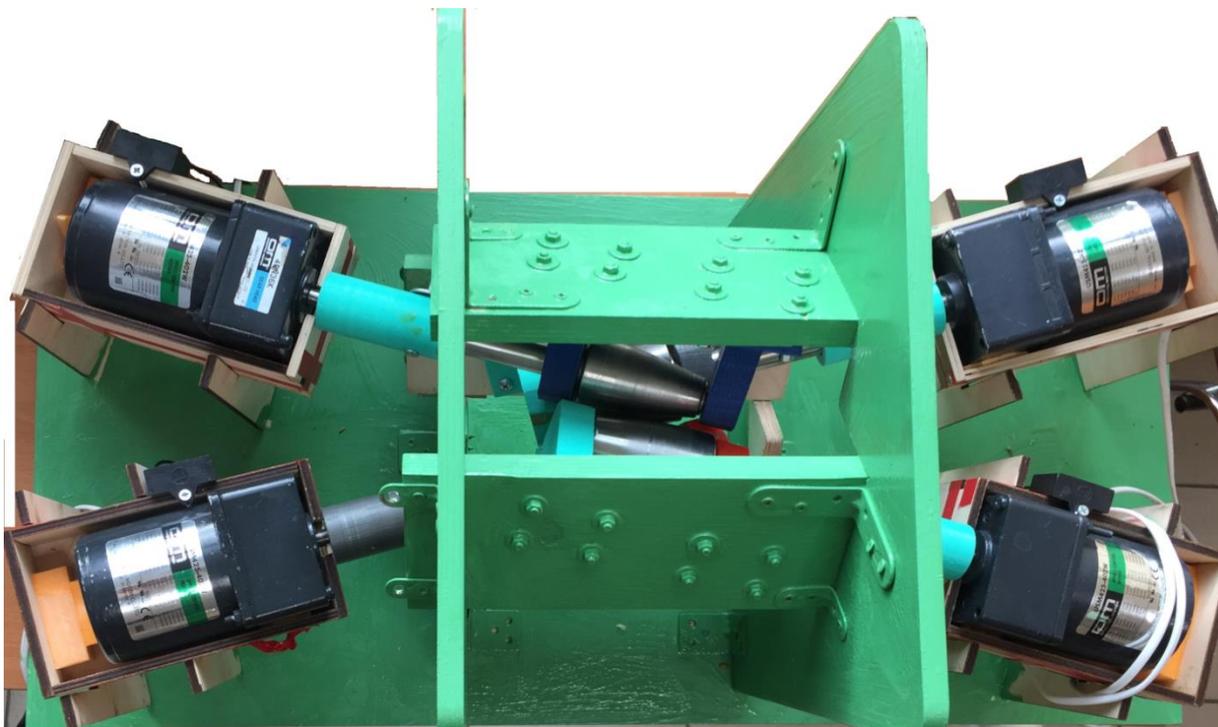


Рисунок 22. Четырёхвалковый лабораторный стан винтовой прокатки  
(действующая модель)

С целью демонстрации возможности 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, составлял 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 [5,59,60] (рис. 23). Также, как и при прокатке по двух- и трёхвалковой схемам чётка видна винтовая линия на поверхности заготовки.



а



б

Рисунок 23. Заготовка из пластилина, прокатанная в четырёхвалковом стане:  
виды на цилиндрическую поверхность (а) и со стороны торца (б)

Для эффективного анализа процессов винтовой прокатки широко применяются различные вычислительные среды конечно-элементного анализа. В работе [66] показана принципиальная возможность компьютерного моделирования четырёхвалковой схемы прокатки с помощью QForm. Моделировали опытные прокатки заготовок из пластилина в лабораторном стане с помощью QForm. Для моделирования предварительно создали в SolidWorks сборку, состоящую из валков, заготовки, направляющих и толкателя (рис. 24). Сборку сохранили в формате .step, загрузили в редактор геометрии

QShare, создали сетку для всех элементов сборки, оси вращения для рабочих и вспомогательных валков. Свойства пластилина, необходимые для расчёта формоизменения заготовки в QForm, задавали в соответствии с данными работы [67] (рис. 25). Смазку в QForm выбирали таким образом, чтобы фактор трения для пар «заготовка-валок» составлял 5 по закону трения Зибеля. Скорость вращения валков, углы подачи и раскатки равнялись соответствующим значениям при опытных прокатках.

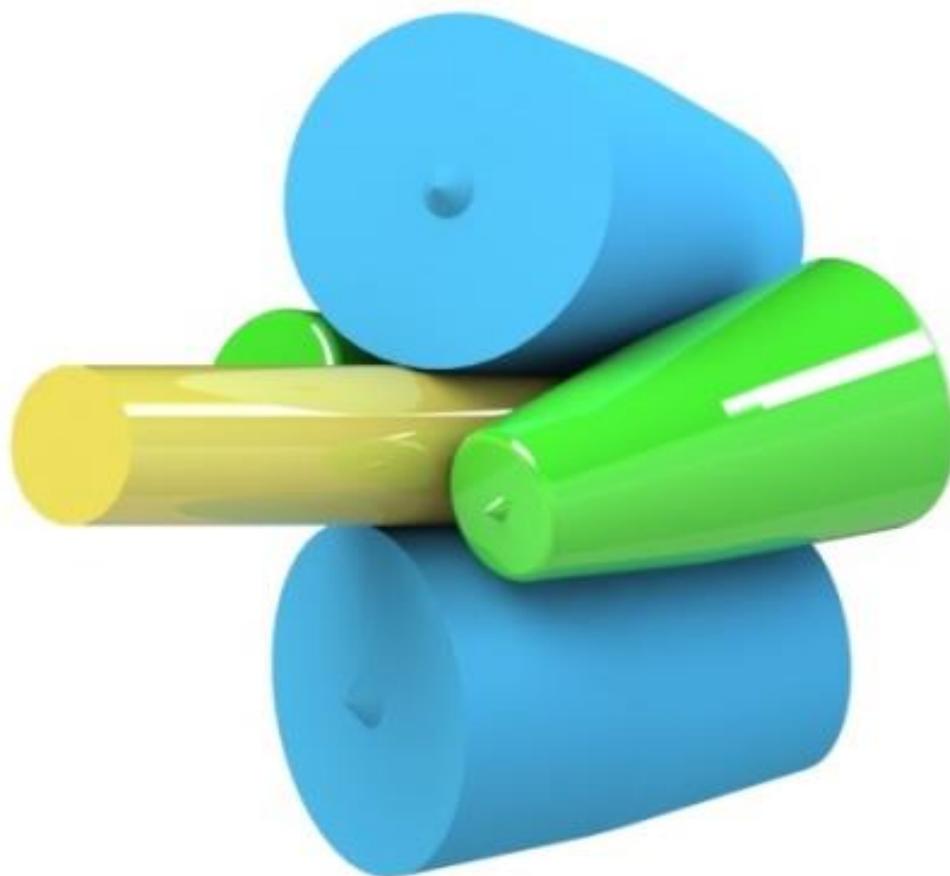


Рисунок 24. Сборка в SolidWorks для последующего моделирования прокатки в четырёхвалковом стане (для удобства отображения не показаны входные и выходные проводки)

Истинное напряжение:

$$\sigma' = F/A = \quad (1)$$

Истинная деформация :

$$\varepsilon' = \int_{L_0}^L dL / L = \ln(L / L_0) \ \& \ L = (1 + \varepsilon)L_0 \quad (2)$$

$$\varepsilon' = \ln(1 + \varepsilon) \quad (3)$$

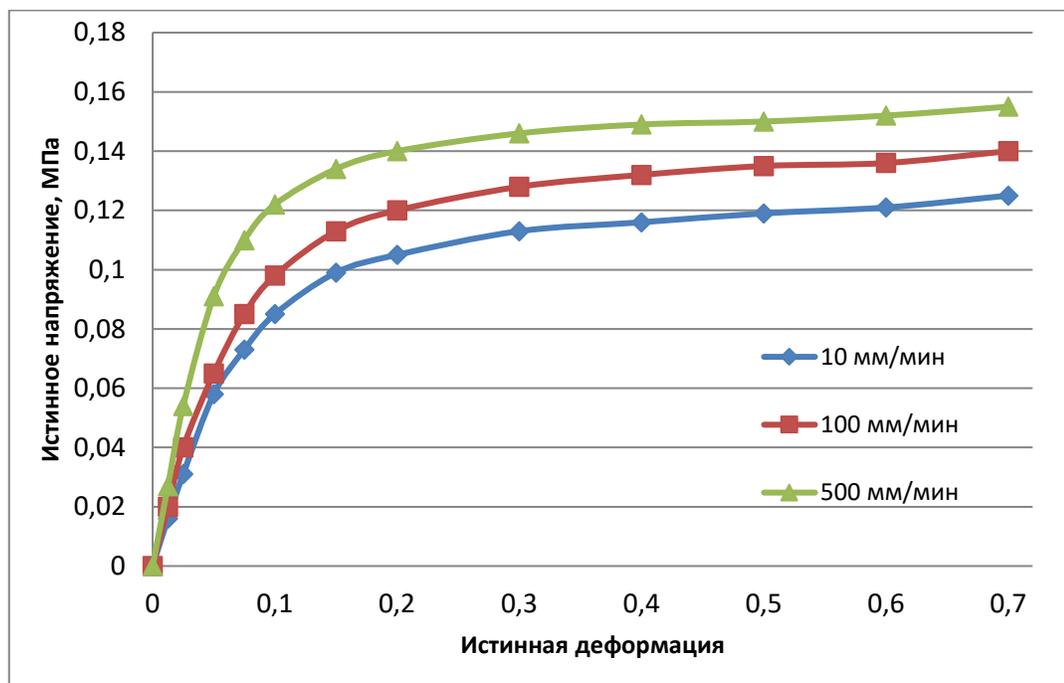


Рисунок 25. Кривые в координатах «истинное напряжение - истинная деформация» для пластилина (Roma Plastilina No. 1) [67] заготовок, использованных при прокатке на лабораторном стане и заданные в пре-процессоре при моделировании в QForm, для разных скоростей сжатия: 1 – 10 мм/мин, 2 – 100 мм/мин, 3 – 500 мм/мин

Сравнили результаты компьютерного моделирования с результатами опытных прокаток (табл. 4)

Таблица 4. 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

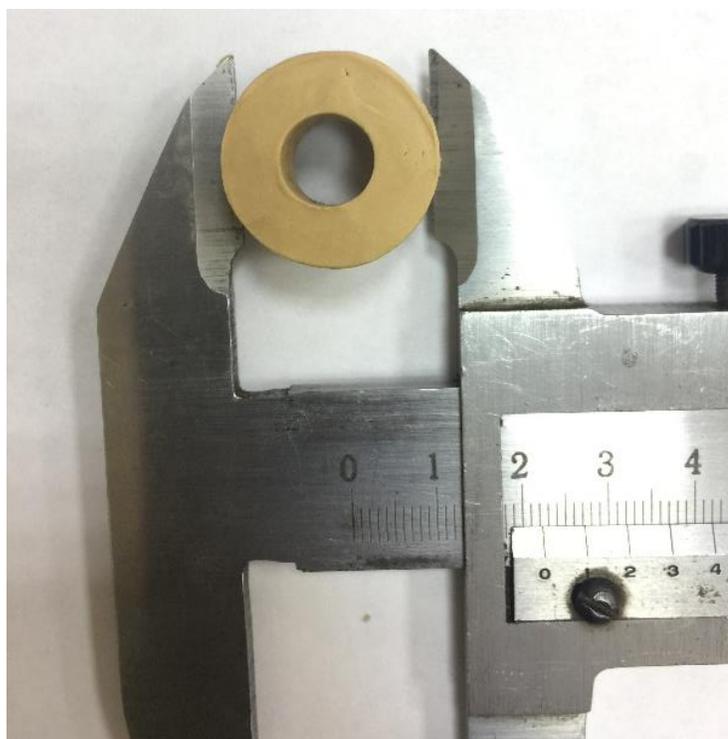
Из табл.4 видно, что отличие по длине незначительно (примерно 3%). Заметные отличия получили по глубине утяжины на переднем (26%) и заднем торце (12%). Отличия подобного рода по глубине утяжины получены при моделировании РСП прокатки в работах [66,68]. Возможной причиной подобных отличий является нестационарность деформации в приторцовых областях заготовки [66].

### 3.2 Прошивка заготовок в действующей модели

С целью демонстрации возможностей четырёхвалковой прошивки осуществили деформацию заготовки из пластилина (Roma Plastilina No. 1, [67]) в действующей модели. Исходная заготовка имела длину 70 мм и диаметр 25 мм. При прошивке калибр, образуемый валками в пережиме, составлял 22 мм. Процесс прошивки протекал стабильно, на поверхности заготовки были видны характерные винтовые линии (рис. 30).



а



б

Рисунок 30. Гильза, полученная прошивкой в действующей модели: а – вид на цилиндрическую поверхность; б – со стороны торца.

Для эффективного анализа процессов винтовой прошивки широко применяются различные программные продукты конечно-элементного анализа. В работе [69] показана принципиальная возможность компьютерного моделирования четырёхвалковой схемы прошивки с помощью QForm. С помощью этой вычислительной среды конечно-элементного анализа смоделировали опытные прошивки заготовок из пластилина. Для моделирования предварительно создали в SolidWorks сборку, состоящую из валков, заготовки, направляющих и толкателя. Сборку сохранили в формате .step, загрузили в редактор геометрии QShape, создали сетку для всех элементов сборки, оси вращения основных и вспомогательных валков. Свойства пластилина, необходимые для расчёта формоизменения заготовки в QForm, задавали в соответствии с данными работы [67]. Смазку в QForm выбирали таким образом, чтобы фактор трения для пар «заготовка-валок» составлял 10 по закону трения Зибеля. Скорость вращения валков, углы подачи и раскатки равнялись соответствующим значениям при опытных прошивках.

Сравнили результаты компьютерного моделирования с результатами опытных прокаток. Длина заготовки после опытных прокаток составляет 116,64 мм, по результатам компьютерного моделирования в QForm -112,368 мм. Видно, что отличие по длине составило 3,6%. Помимо длины сравнили изменение толщины стенки по длине полученной гильзы по результатам опытных прошивок и компьютерного моделирования (рис. 31). По рис. 31 видно, что отличие значений не превышает 10%.

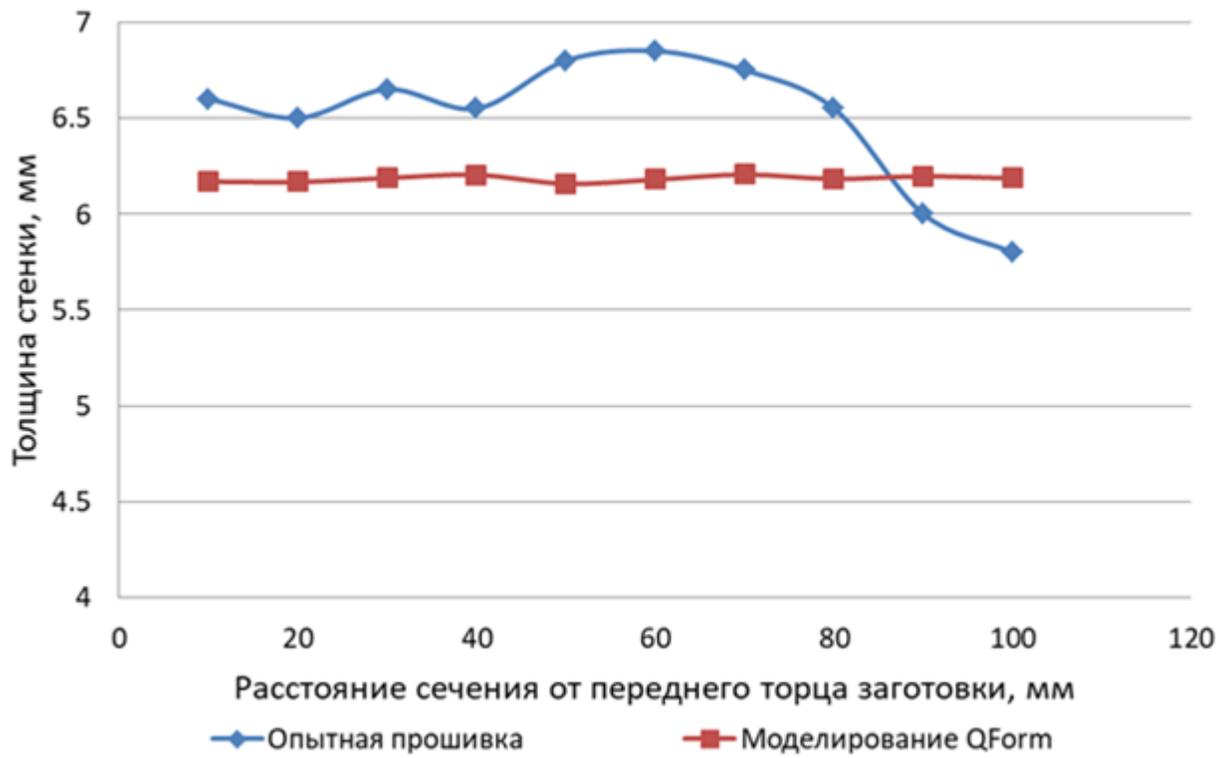


Рисунок 31. Изменение толщины стенки гильзы при опытных прошивках и по результатам компьютерного моделирования.

### **Выводы по главе 3**

Проведены прокатка и прошивка образцов из пластилина на действующей модели, чем продемонстрирована возможность прокатки по четырехвалковой схеме. Прокатку заготовок из пластилина смоделировали в QForm, сравнили с результатами экспериментов. Длина полученных при моделировании четырёхвалковой прокатки заготовок отличается не более, чем на 3%, глубина утяжины не более чем на 26%. Существенное отличие по глубине утяжин, вероятно, объясняется меньшей точностью компьютерного моделирования при исследовании нестационарных стадий винтовой прокатки. Длина полученных при моделировании гильз отличается на 3,6% от длины гильз после опытных прошивок, толщина стенки гильзы при компьютерном моделировании отличается не более, чем на 10% от толщины стенки гильзы, полученной прошивкой в действующей модели. Полученные отличия результатов компьютерного моделирования от результатов опытных прокаток и прошивок пластилиновых заготовок показывают, что применение QForm позволяет с приемлемой точностью прогнозировать размеры изделий, получаемых при использовании четырёхвалковой схемы винтовой прокатки.

## **Глава 4. Компьютерное моделирование процессов прокатки и прошивки по различным схемам**

### **4.1. Компьютерное моделирование прокатки заготовки из легированной стали по трёхвалковой и четырёхвалковой схемам**

Учитывая приемлемую точность результатов компьютерного моделирования процессов винтовой прокатки с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа при расчёте энергосиловых параметров и определению размеров получаемых изделий, в том числе результаты [46], смоделировали процесс прокатки по трёхвалковой и четырёхвалковой схемам с помощью QForm. По результатам моделирования сравнили изменение наружного диаметра заготовки по длине и энергосиловые параметры для двух схем прокатки.

Моделировали процесс прокатки заготовки диаметром 25 мм на диаметр 20 мм из стали 3X2BФ8, так как согласно данным [66] четырёхвалковая схема может проявить свои преимущества именно при прокате легированных сталей с точки зрения энергозатрат.

Для моделирования процессов трёхвалковой и четырёхвалковой прокатки создали в SolidWorks модели соответственно валкового узла стана РСП 14-40 [70] и валкового узла действующей модели стана (табл. 5). Созданные в SolidWorks (рис. 24,32) модели загружали в QForm, задавали условия моделирования. Из библиотеки материалов в программе QForm для заготовки была выбрана марка стали 3X2B8Ф. Температура нагрева заготовок принята равной 1200 °С, температура инструмента — 20 °С. Длину заготовки приняли минимальной  $l_3 = 100$  мм, но достаточной для формирования полного очага деформации.

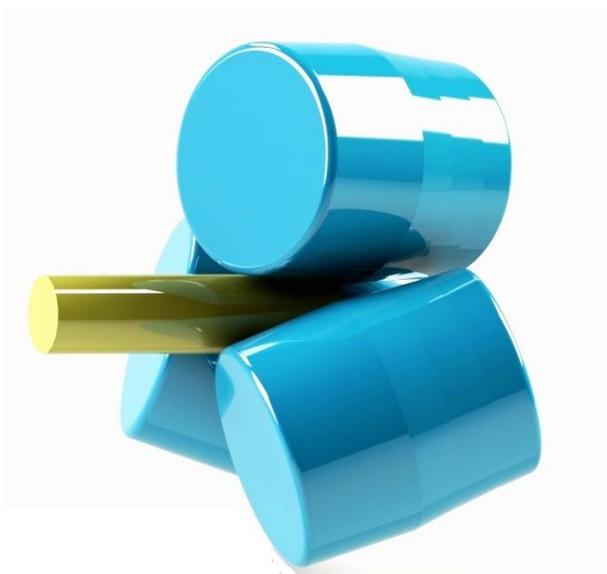


Рисунок 32. Сборка в SolidWorks для последующего моделирования прокатки заготовки в стане РСП 14-40 (для удобства отображения не показаны входные и выходные проводки)

Таблица 5. 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». При этом температура инструмента постоянна за исключением небольшого поверхностного слоя малой толщины. Тепловой поток подводится или отводится от заготовки к поверхностному слою инструмента в зависимости от знака разности температур между заготовкой и инструментом. Температура заготовки изменяется в соответствии с уравнением нестационарной теплопроводности с учетом теплообмена с окружающей средой по свободной поверхности. Более подробно режим описан в [63]. Для пары «валок–заготовка» задавали условие отсутствия проскальзывания, фактор трения по Зибелю задавали равным 10.

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. В каждом поперечном сечении диаметр измеряли 5 раз, через каждые 36 градусов. По результатам пяти измерений получили средние значения наружного диаметра, дисперсию и среднеквадратичное отклонение (табл. 6). На рис. 33 показаны данные, иллюстрирующие изменение диаметра по сечениям прутков, полученных прокаткой в трёхвалковом и четырехвалковом станах.

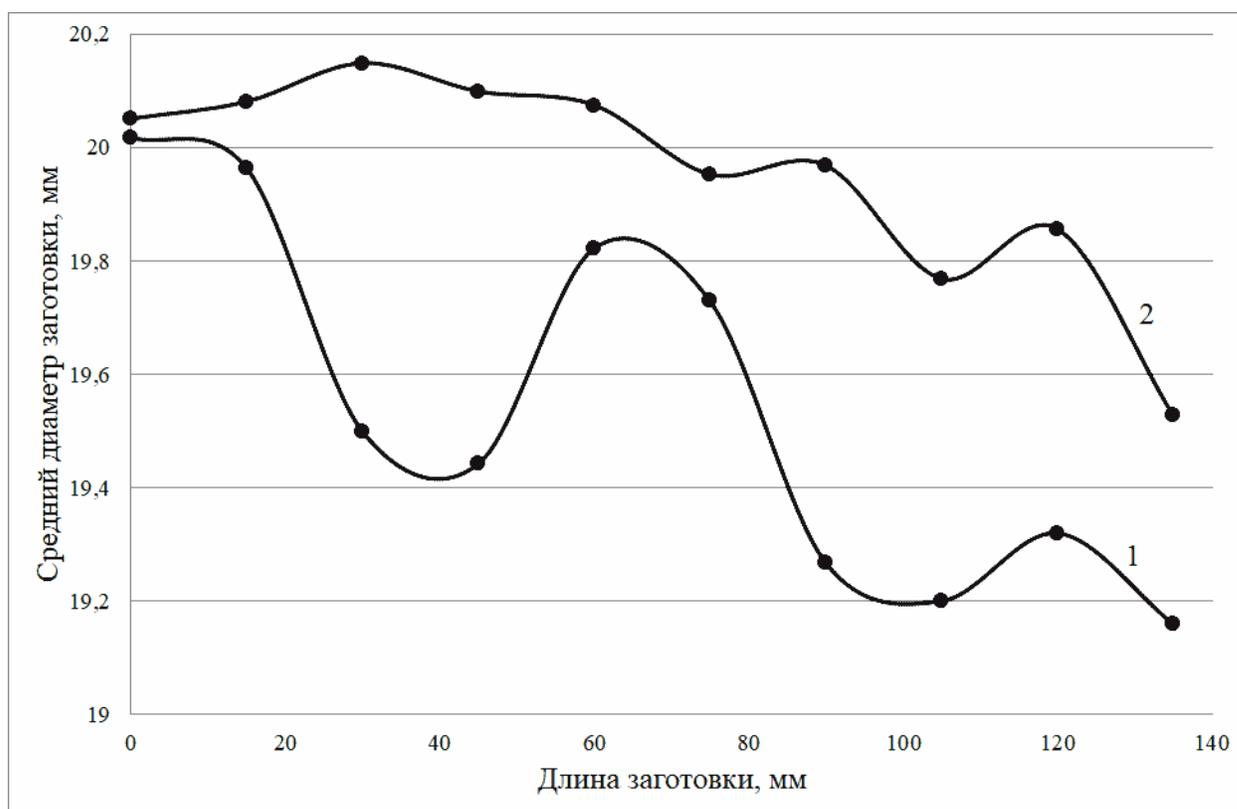


Рисунок 33. Изменение диаметра по длине прутков, полученных при моделировании прокатки в трёх- (1) и четырёхвалковом (2) станах

Таблица 6. Статистические показатели точности прутков по смоделированным схемам

	Среднее значение диаметра полученной 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 мм<sup>2</sup>, что в 2,5 раза меньше, чем дисперсия прутка при трёхвалковой прокатке – 0,10 мм<sup>2</sup>.

По результатам моделирования построили графики усилий на валок для каждого из способов прокатки (рис. 34). 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. 35).

Согласно данным рис.35 для прокатки в трёхвалковом стане необходимо затратить 17,49 кДж (3×5,83 кДж), а для прокатки в четырёхвалковом стане – 16,46 кДж (2×7,93+2×0,3 кДж). То есть при прокатке в четырёхвалковом стане энергии для осуществления формоизменения понадобится на 6% меньше, чем при трёхвалковой схеме.

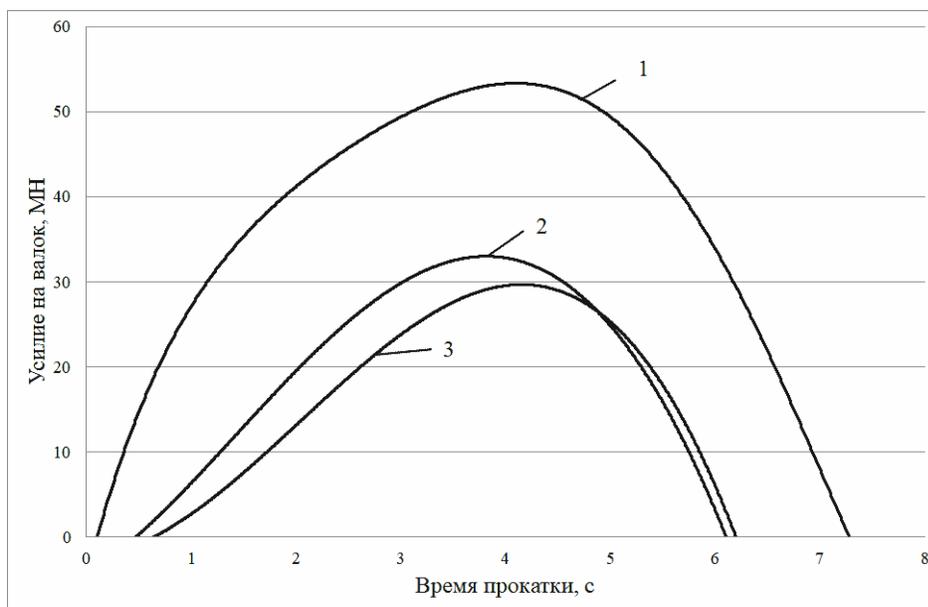


Рисунок 34. Усилия на валок в трёхвалковом стане (1) и четырёхвалковом: на рабочий (2) и вспомогательный (3) валки

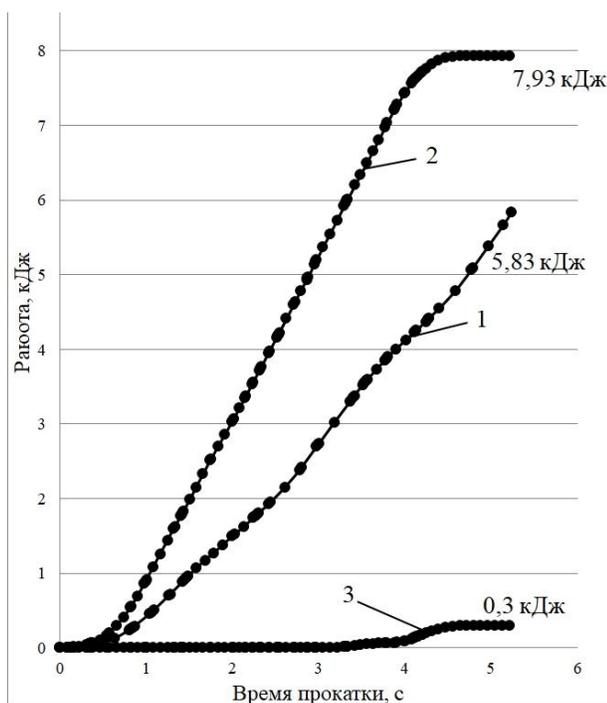


Рисунок 35. Работа на валке для каждой из схем прокатки: 1 – трёхвалковый стан, 2 – основной валок четырёхвалкового стана, 3 – вспомогательный валок четырёхвалкового стана

## 4.2. Компьютерное моделирование прошивки заготовки из легированной стали по двухвалковой и четырёхвалковой схемам

Учитывая приемлемую точность результатов компьютерного моделирования процессов винтовой прошивки с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа, смоделировали процесс прошивки стальной заготовки по двухвалковой и четырёхвалковой схемам с помощью QForm. По результатам моделирования сравнили изменение наружного диаметра и толщины стенки заготовки по длине, значения усилий на валках.

Моделировали процесс прошивки заготовки диаметром 25 мм из стали 3Х2В8Ф, так как согласно данным [69] четырёхвалковая схема может проявить свои преимущества именно при прошивке легированных сталей.

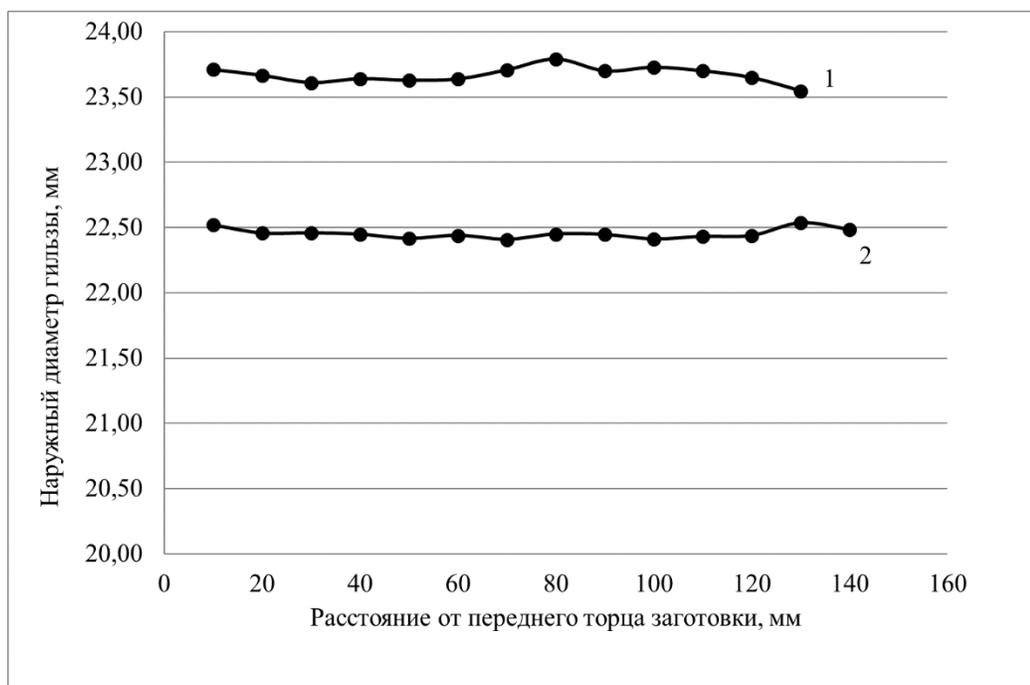
Для моделировании процессов двухвалковой и четырёхвалковой прошивки создали в SolidWorks модели валкового узла двухвалкового лабораторного стана кафедры ОМД НИТУ «МИСиС» и валкового узла действующей модели стана, при этом учитывались данные, показанные в табл. 7. Созданные в SolidWorks модели загружали в QForm, задавали условия моделирования. Из библиотеки материалов в программе QForm для заготовки была выбрана марка стали 3Х2В8Ф. Температура нагрева заготовок принята равной 1200 °С, температура инструмента — 20 °С. Длину заготовки приняли минимальной  $l_3 = 100$  мм, но достаточной для создания полного очага деформации.

Таблица 7. Параметры моделируемых прошивок

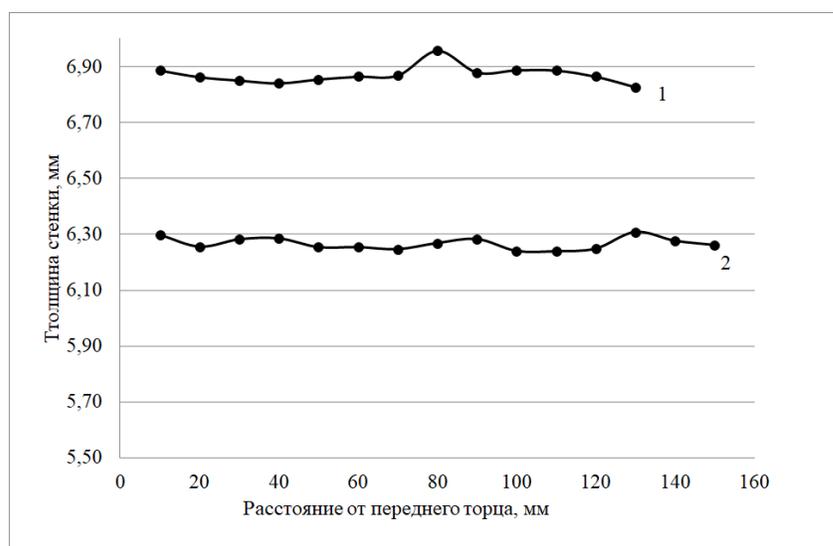
Параметр	Двухвалковая прошивка в лабораторном стане МИСиС	Прошивка по предлагаемому способу	
		Основные валки	Вспомогательные валки
Рабочие валки:			
- диаметр в пережиме, мм	140	50	36
- длина бочки, мм	140	70	70
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	25	60	83
угол раскатки, град.	-7	-7	+7
угол подачи, град.	15	15	15
Расстояние между валками в пережиме, мм	22	22	
Расстояние между линейками, мм	24,2	22	
Выдвижение оправки за пережим, мм	11,94	12,94	
Диаметр оправки, мм	10	10	
Длина оправки, мм	33,61	26,56	
Коэффициент овализации	1,1	1,05	

Теплообмен между заготовкой и инструментом в QForm задавали как «простой» [69,71]. Для пары «валок–заготовка» задавали условие отсутствия проскальзывания, фактор трения задавали равным 10.

С целью оценки изменения диаметра и толщины стенки по длине гильзы по результатам моделирования в QForm провели измерения в сечениях, располагающихся друг от друга на расстоянии 10 мм по длине с помощью встроенного инструментария. В каждом поперечном сечении диаметр измеряли 8 раз, а толщину стенки измеряли в 16 точках каждого сечения с шагом 22,5 градуса. По результатам измерений получили среднее значения наружного диаметра, дисперсию и среднеквадратичное отклонение (табл. 8) и среднее значение, дисперсию и среднеквадратичное отклонение для толщины стенки (табл. 8). На рис. 36 показаны данные, иллюстрирующие изменение наружного диаметра и толщины стенки в сечениях гильз, полученных при компьютерном моделировании прошивки в двухвалковом и четырехвалковом станах.



а



б

Рисунок 36. Изменение наружного диаметра (а) и толщины стенки (б) по длине гильз, полученных при моделировании прошивки в двухвалковом (1) и четырёхвалковом (2) станах

Таблица 8. Статистические показатели точности размеров гильз по смоделированным схемам

Наименование параметра	Схема прошивки	Среднее значение, мм	Дисперсия, мм <sup>2</sup>	Среднеквадратичное отклонение, мм
Наружный диаметр	Двухвалковая прошивка	23,67	0,0039	±0,0621
	Четырёхвалковая прошивка	22,45	0,0014	±0,0372
Толщина стенки	Двухвалковая прошивка	6,87	0,0010	±0,0317
	Четырёхвалковая прошивка	6,27	0,0004	±0,0209

По результатам моделирования 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 четырёхвалковой схеме – 0,13мм. Дисперсия диаметра гильзы, полученной способом четырёхвалковой прошивки составляет 0,0014 мм<sup>2</sup>, что меньше, чем дисперсия гильзы при двухвалковой прошивке – 0,039 мм<sup>2</sup>.

Согласно табл. 8 дисперсия и среднеквадратичное отклонение толщины стенки при четырёхвалковой 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. 37). Усилие на валок при прошивке в четырёхвалковом 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 рис.36-37 четырёхвалковая прошивка по сравнению с двухвалковой позволяет получать гильзы с большей точностью размеров и меньшим усилием на деформирующий инструмент. Чем меньшее усилие на валке, тем меньше износ и дольше срок службы технологического инструмента.

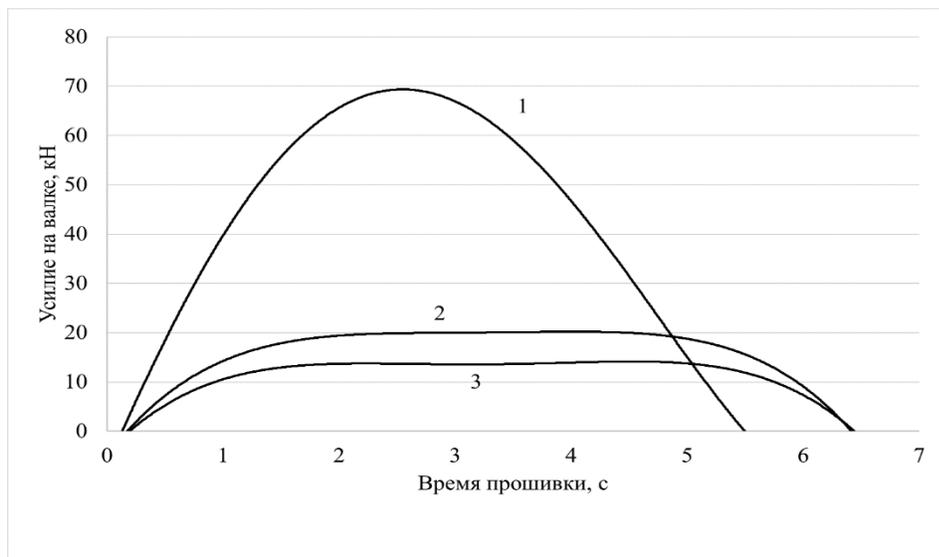


Рисунок 37. Усилия на валок в двухвалковом стане (1) и четырёхвалковом на основном (2) и вспомогательном валке (3)

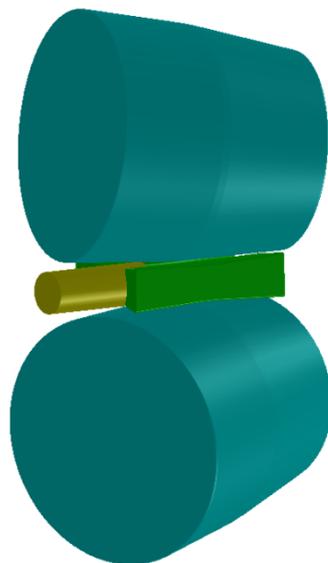
## Выводы по главе 4

Проведённое компьютерное моделирование позволило показать, что прутки, полученный прокаткой в четырехвалковом стане заготовки из стали 3Х2В8Ф отличается большей точностью по сравнению с полученным трёхвалковой винтовой прокаткой: 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 мм<sup>2</sup>, что в 2,5 раза меньше, чем дисперсия прутка при трёхвалковой прокатке – 0,10 мм<sup>2</sup>. Также установили, что при прокатке в четырёхвалковом стане энергии для осуществления формоизменения понадобится на 6% меньше, чем при трёхвалковой схеме.

Сравнение результатов моделирования четырёхвалковой и двухвалковой прошивки заготовки из стали 3Х2В8Ф показало, что полученная четырёхвалковой прошивкой гильза имеет большую точность по сравнению с гильзой полученной двухвалковой прошивкой: при прошивке по двухвалковой схеме перепад значений диаметра составляет 0,25 мм, при четырёхвалковой схеме – 0,13мм. Дисперсия диаметра гильзы, полученной способом четырёхвалковой прошивки составляет 0,0014 мм<sup>2</sup>, что меньше, чем дисперсия гильзы при двухвалковой прошивке – 0,039 мм<sup>2</sup>. Дисперсия и среднеквадратичное отклонение толщины стенки при четырёхвалковой прошивке меньше дисперсии и среднеквадратичного отклонения толщины стенки при двухвалковой прошивки в 2,5 и 1,5 раза соответственно.

## Глава 5. Исследование особенностей напряжённо-деформированного состояния при четырёхвалковой винтовой прокатке

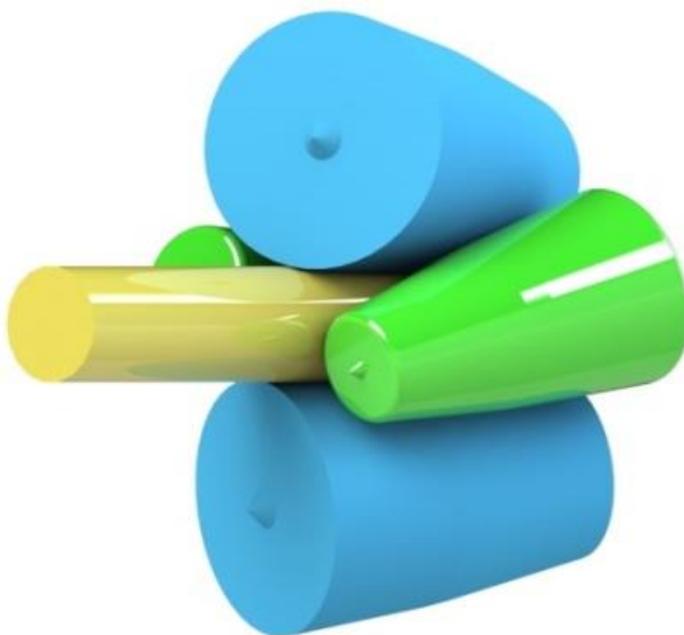
Учитывая расположение валков при четырёхвалковой винтовой прокатке, предположили, что по схеме напряжённо-деформированного состояния заготовки данный процесс скорее будет подобен двухвалковой винтовой прокатке, а не трёхвалковой. Для подтверждения или опровержения данного предположения смоделировали прокатку прутка в двухвалковой, трёхвалковой и четырёхвалковой клетки с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа QForm. Эффективность применения компьютерного моделирования для оценки особенностей напряжённо-деформированного состояния при различных схемах винтовой прокатки показана в работах [69, 72-78].



а



б



в

Рисунок 38. Сборки в SolidWorks для моделирования двухвалковой (а), трёхвалковой (б) и четырёхвалковой прокаток (в)

Осуществляли моделирование процесса прокатки заготовки из стали 45 с диаметра 25 мм на 22 мм при температуре 1200°C. В SolidWorks создали сборки (рис. 38) согласно данным табл. 9. Сборки сохранили в формате .step, загрузили в редактор геометрии QShape. Создали сетку конечных элементов для каждого из элементов сборки, задали оси вращения валкам. Прочие начальные условия.

Таблица 9 -Параметры моделируемых схем прокатки

Параметр	Двухвалковый лабораторный стан МИСиС с направляющими линейками	Трёхвалковая прокатка в стане РСП 14-40	Прокатка по предлагаемому способу	
			Основные валки	Вспомогательные валки
Рабочие валки:				
- диаметр в пережиме, мм	140	76	50	36
- длина бочки, мм	140	85	70	70
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	25	60	60	83
угол раскатки, град.	7	-7	-7	+7
угол подачи, град.	15	15	15	15

По результатам моделирования оценивали изменения значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния [26], аналогично работе [65], в различных сечениях заготовки. Согласно [79], для прогнозирования разрушения целесообразно учитывать взаимосвязь накопленной деформации и коэффициента жесткости напряженного состояния  $\eta$ :

$$\eta = \frac{3\bar{\sigma}}{T}, \quad (4)$$

где  $\bar{\sigma}$  – среднее напряжение,  $T$  – интенсивность напряжений.

В исследованиях иностранных специалистов, например, в [31], упоминается об эффективности применения при прогнозировании разрушения такого параметра как “stress triaxiality”, рассчитываемого по формуле, отличающейся от формулы (4) лишь отсутствием умножения на три [80].

В работах [65,71,81-82] расчёт значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния производился путём обработки данных пост-процессора в Excel и построением соответствующих графических зависимостей.

По результатам компьютерного моделирования в QForm с помощью функции трассирования точек получали данные об изменении коэффициента жёсткости напряжённого состояния. Для дополнительной визуализации написали на языке программирования Lua подпрограмму для QForm с целью отображения поля значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния не только по окончании моделирования, но и непосредственно в процессе расчёта, что позволит заметно повысить функциональность создаваемых моделей. На рис. 39. показано как в QForm, на основе использования созданной подпрограммы, изменяется коэффициент жёсткости напряжённого состояния при прокатке заготовок при различных схемах винтовой прокатки.

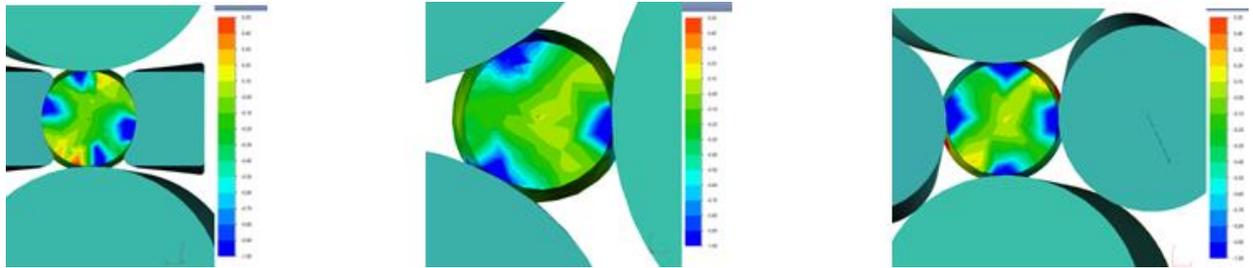


Рисунок 39. Изменение коэффициента жёсткости напряжённого состояния в поперечном сечении в пережиме при прокатке (слева-направо) по двухвалковой, трёхвалковой и четырёхвалковой схемам.

Для детального сравнения особенностей напряжённо-деформированного состояния в заготовке выбрали 13 точек на радиусе заготовки в сечении, находящемся на расстоянии 12 мм от переднего торца заготовки (рис. 40), подобно тому, как рекомендуют авторы [81-82].

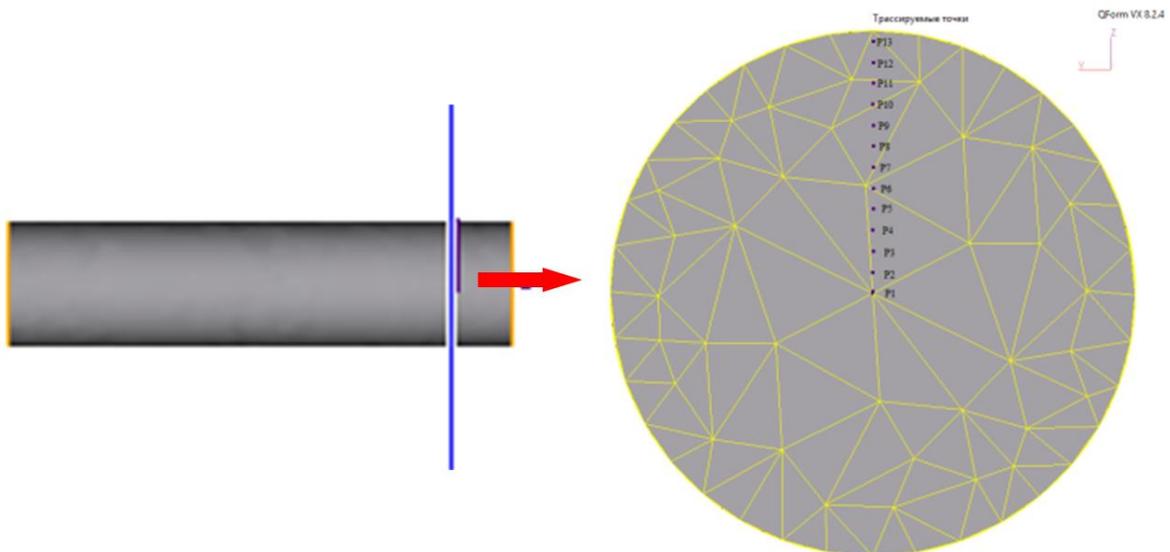


Рисунок 40. Положение точек заготовки, выбранных для расчёта значений накопленной деформации и коэффициента жёсткости, по результатам моделирования в QForm.

Для каждой из выбранных точек построили графики, отображающие изменение накопленной деформации и коэффициента жёсткости напряжённого состояния при удалении от оси заготовки (рис. 41-42). Благодаря возможностям QForm сохраняли данные, в том числе об изменении параметров «Скорость деформации», «Среднее напряжение» и «Интенсивность напряжений», по результатам трассировки точек в формате .xls. Далее полученные файлы открывали в Excel. Для расчёта значений накопленной деформации численно интегрировали по времени параметр «Скорость деформации» (так в QForm отображается интенсивность скорости деформации). Для расчёта коэффициента жёсткости напряжённого состояния делили значение параметра «Среднее напряжение» на значение параметра «Интенсивность напряжений».

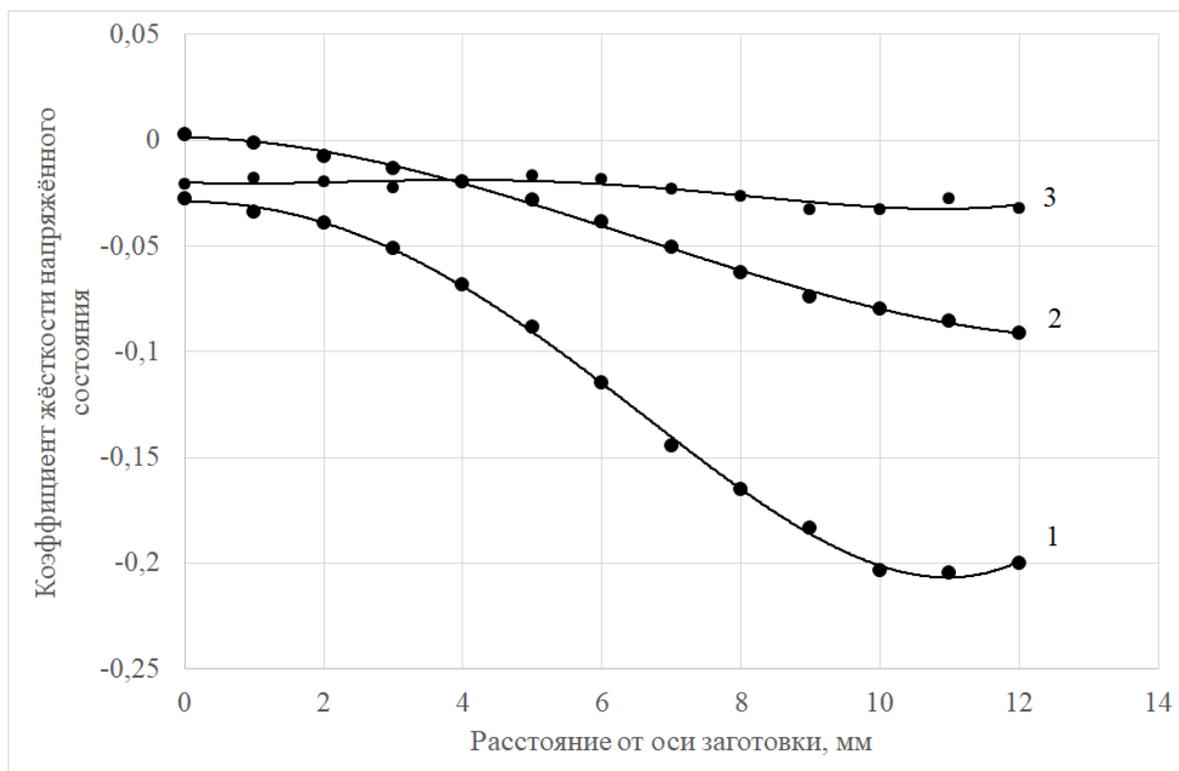
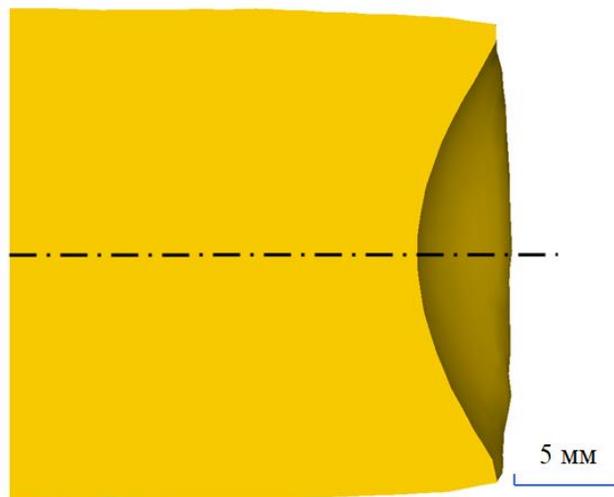


Рисунок 41. Изменение коэффициента жёсткости напряжённого состояния при двухвалковой (1), трёхвалковой (2) и четырёхвалковой (3) прокатке

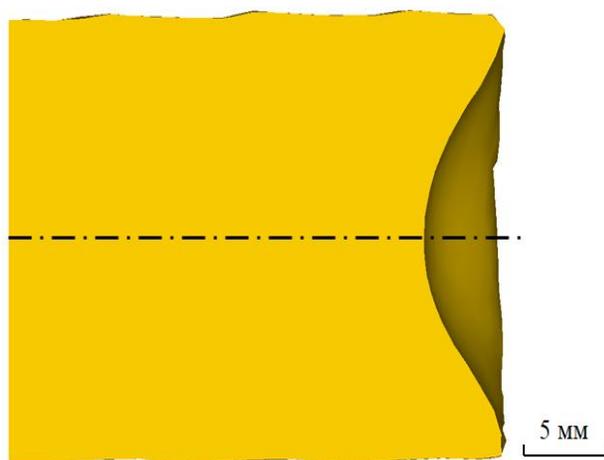
Согласно рис. 42 при четырёхвалковой схеме имеет место наименьший перепад напряжений между поверхностью и осевой зоной заготовки, следовательно, по сравнению с двухвалковой и трёхвалковой прокаткой получается наименьшая неравномерность напряжений, в связи с чем риск появления разрушения также наименьший из всех смоделированных схем.

Двухвалковую, трёхвалковую и четырёхвалковую прокатки заготовки из Стали 45 смоделировали в DEFORM согласно данным табл. 9 с заданием начальных условий, идентичных заданным при моделировании в QForm. Сравнивали различные параметры для выявления отличий и подобий между четырёхвалковой прокаткой и двухвалковой и трёхвалковой прокаткой.

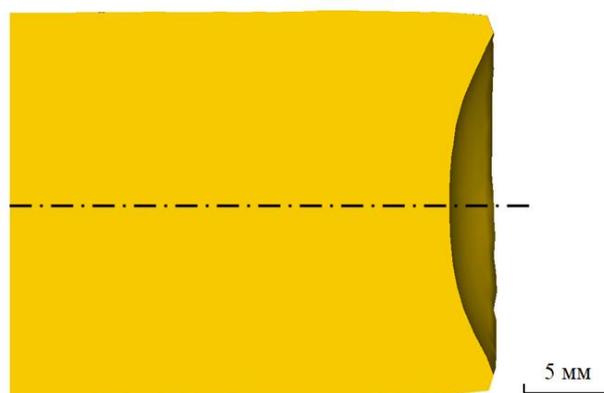
Сравнили форму утяжин на переднем торце заготовок, так как, согласно [59,68,72], форма утяжины может быть связана с характером распределения параметров напряжённо-деформированного состояния в приторцовываемой области. На рис. 42 показаны утяжины для различных схем прокатки по результатам моделирования в DEFORM.



а



б

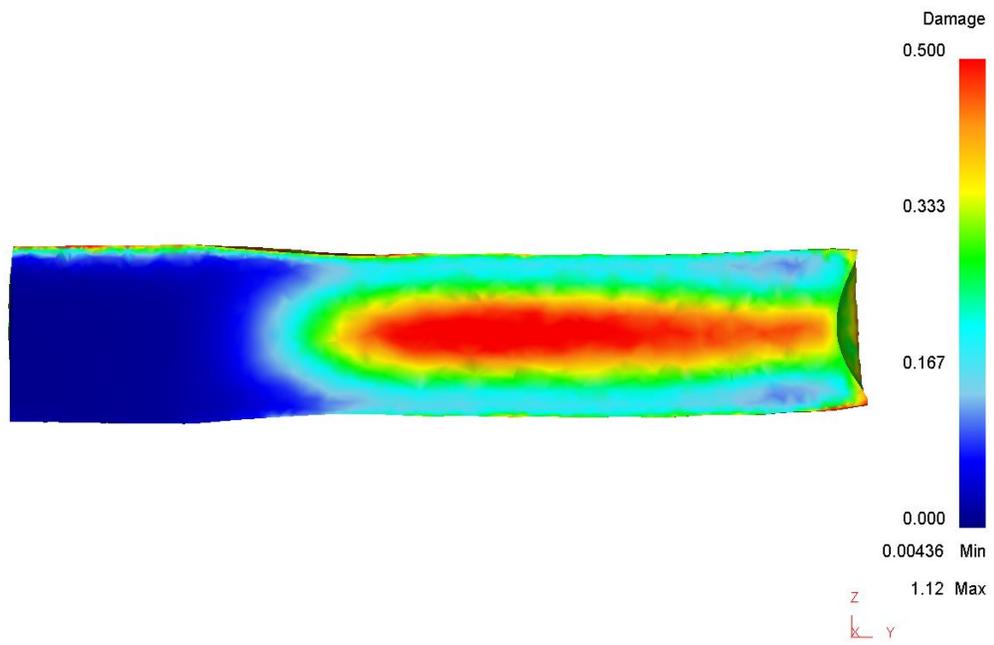


в

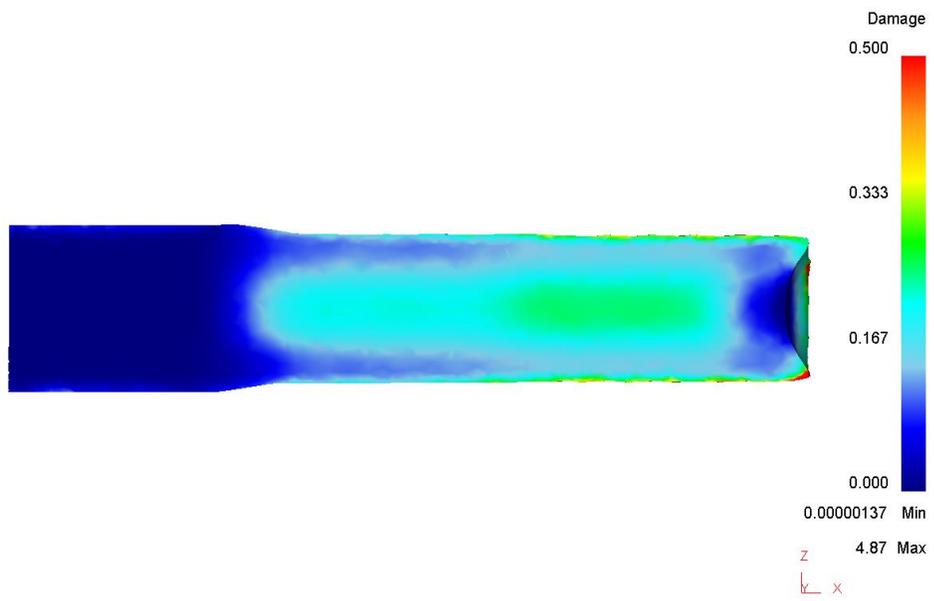
Рисунок 42. Утяжина на переднем торце по результатам моделирования двухвалковой (а), трёхвалковой (б) и четырёхвалковой (в) прокатки в DEFORM

Согласно рис. 42 утяжина при четырёхвалковой прокатке больше похожа на утяжину после двухвалковой прокатки, чем при трёхвалковой.

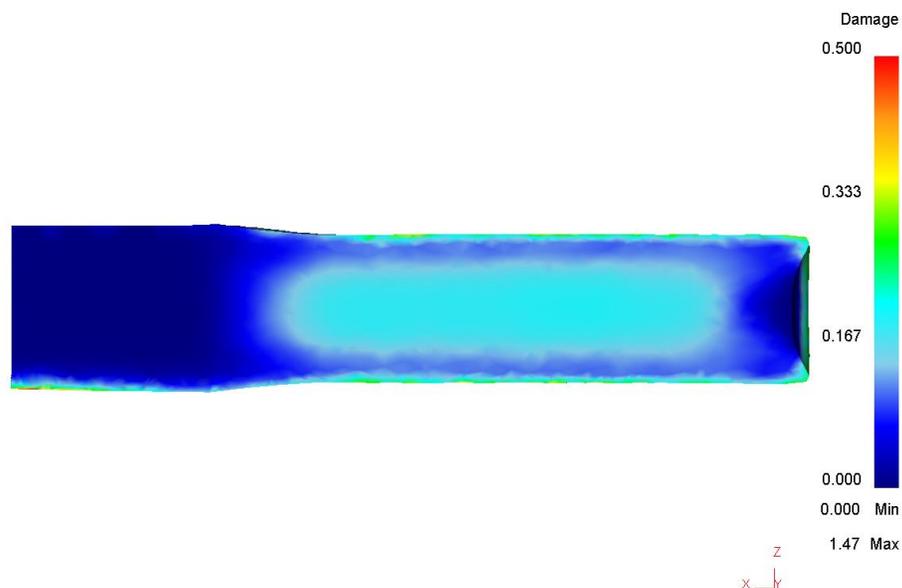
Сравнили распределение значений нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма [65,78,83] по результатам моделирования в DEFORM двухвалковой, трёхвалковой и четырёхвалковой прокаток (рис. 43).



a



b



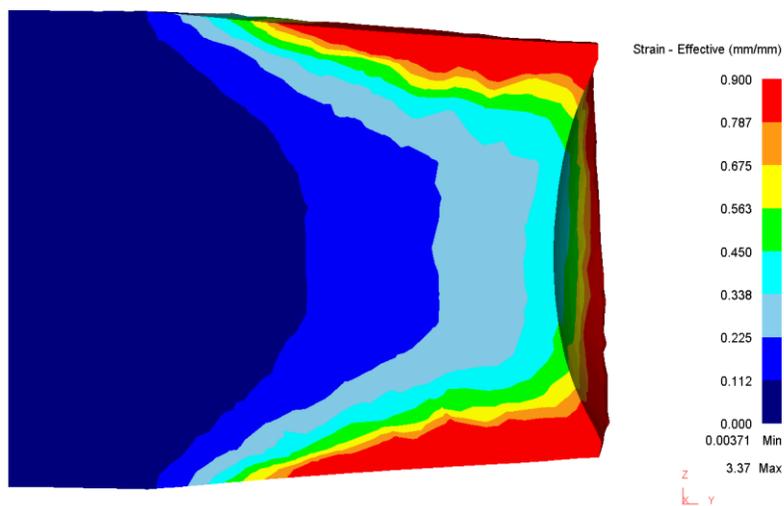
В

Рисунок 43. Распределение значений нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма в продольном сечении заготовки из стали 45 при прокатке в двухвалковом (а), трёхвалковом (б) и четырёхвалковом (в) стане

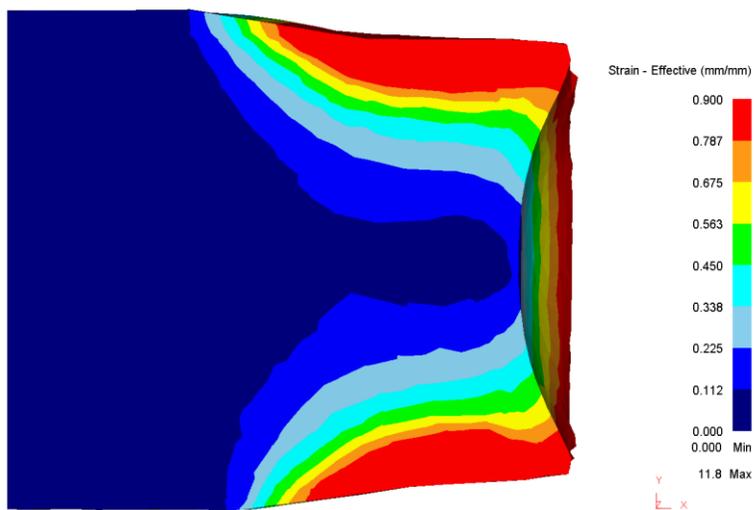
Известно [83], что чем больше значение нормализованного критерия разрушения Кокрофта-Лэтэма, тем вероятнее разрушение. Согласно рис. 43 наиболее вероятно разрушение при двухвалковой прокатке, наименее – при четырёхвалковой. Интервал значений критерия при двухвалковой прокатке от 0 до 0,5, при трёхвалковой от 0 до 0,3, четырёхвалковой – от 0 до 0,2. Исходя из этих интервалов наиболее равномерное распределение деформаций и напряжений имеет место при четырёхвалковой прокатке, что также было ранее показано по результатам моделирования в QForm (рис. 41).

По данным [73] отличия между двухвалковой и трёхвалковой винтовой прокаткой выявляются при оценке распределения интенсивности деформации в продольном сечении на нестационарной стадии [59,68,72], то есть когда

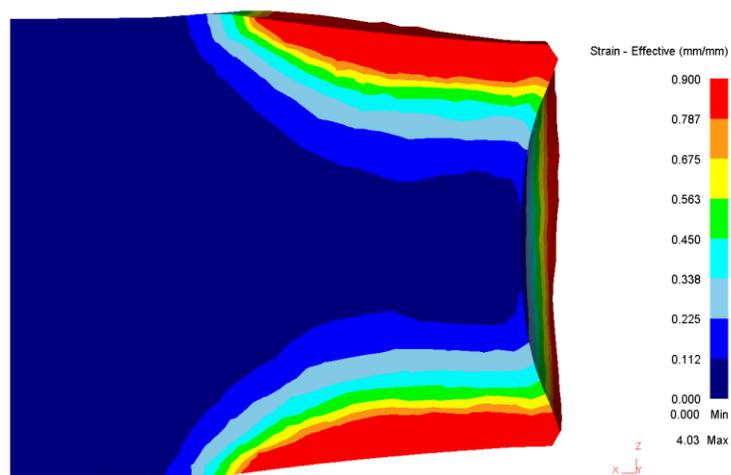
происходит деформация приторцовых областей. По результатам моделирования в DEFORM построили поля распределения значений интенсивности деформации при прокатке приторцовых областей по двухвалковой, трёхвалковой и четырёхвалковой схемам (рис. 44).



а



б

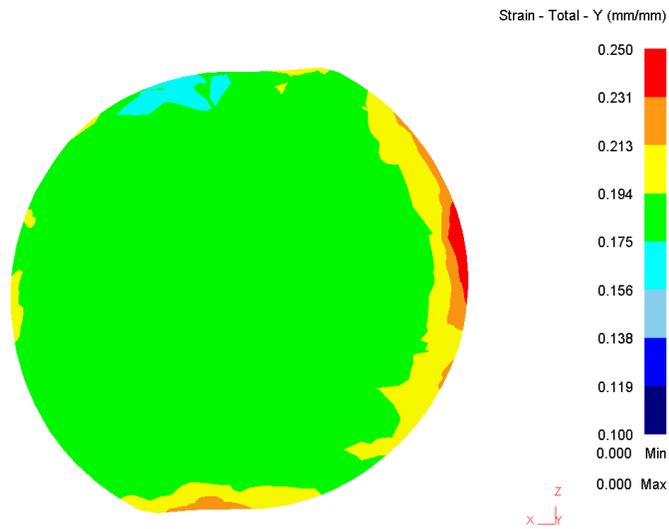


В

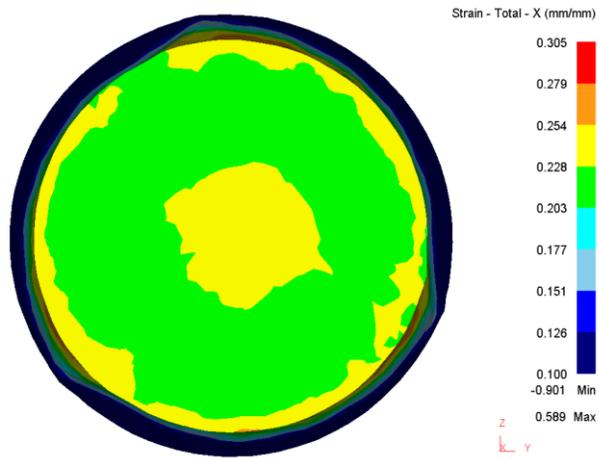
Рисунок 44. Распределение значений интенсивности деформации на нестационарной стадии двухвалковой (а), трёхвалковой (б) и четырёхвалковой (в) прокатки по результатам моделирования в DEFORM.

Согласно рис. 44 есть явное подобие в характере распределения интенсивности деформации четырёхвалковой и трёхвалковой схем, при этом при двухвалковой схеме распределение интенсивности деформации имеет отличный характер. Учитывая выявленное подобие четырёхвалковой схемы и трёхвалковой и отличие четырёхвалковой схемы от двухвалковой, можно предположить, что при прокатке в четырёхвалковом стане осевое разрушение, т.н. эффект Маннесманна, не будет иметь место.

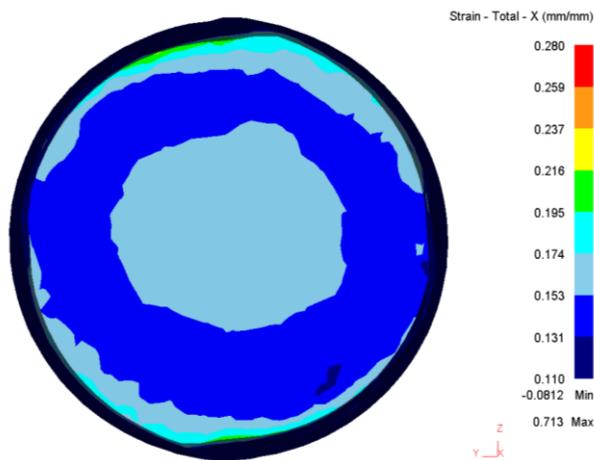
По результатам моделирования в DEFORM оценивали изменение параметров напряжённо-деформированного состояния на стационарной стадии прокатки [84] для исследуемых схем. На рис. 45 показано как меняется компонента деформации, совпадающая по направлению с осью прокатки, в поперечном сечении в очаге деформации на стационарной стадии (прокатывается середина заготовки).



a



б



B

Рисунок 45. Поля распределения значений компоненты деформации, совпадающей с направлением прокатки, в поперечном сечении в очаге деформации на стационарной стадии двухвалковой (а), трёхвалковой (б) и четырёхвалковой (в) по результатам моделирования в DEFORM

Распределение значений деформации (рис. 46) позволило определить, что, в отличие от двухвалковой прокатки, при трёхвалковой и четырёхвалковой прокатке распределение исследуемой компоненты деформации имеет кольцевой характер. В связи с этим можно предположить подобие деформированного состояния при трёхвалковой и четырёхвалковой схемах, что было также установлено при анализе данных рис. 44.

При анализе полей распределения значений параметров напряжённого состояния построили изменение среднего напряжения вдоль радиуса в продольном сечении (рис.46). Для получения данных использовали функции “point tracking” и “state variable between two points” в пост-процессоре DEFORM. Полученные данные экспортировали в Excel и построили графические зависимости, иллюстрирующие изменение среднего напряжения в зависимости от расстояния от оси заготовки (рис. 47).

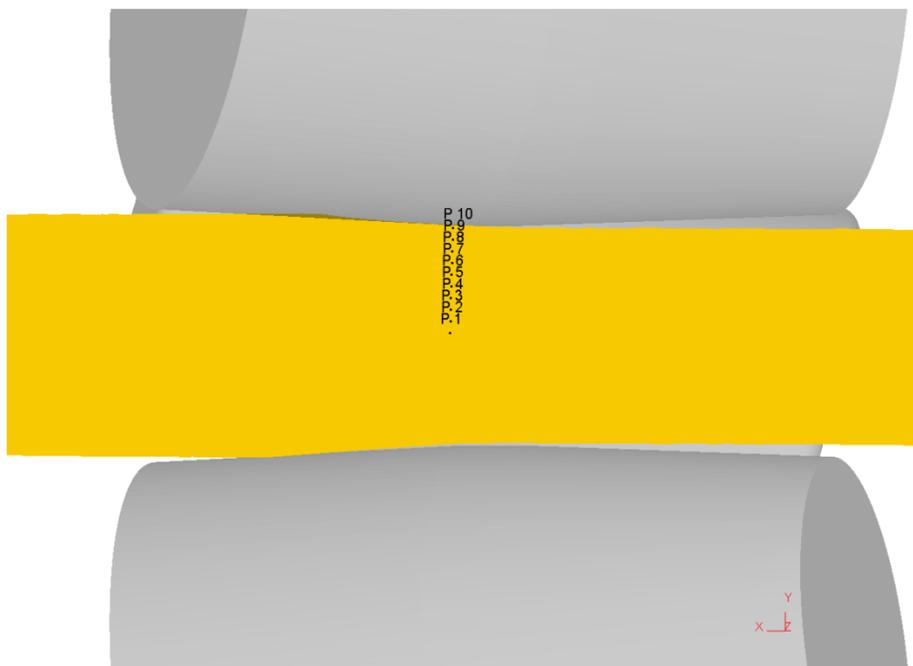


Рисунок 46. Точки вдоль радиуса в продольном сечении заготовки для расчёта изменения среднего напряжения в DEFORM при четырёхвалковой прокатке.

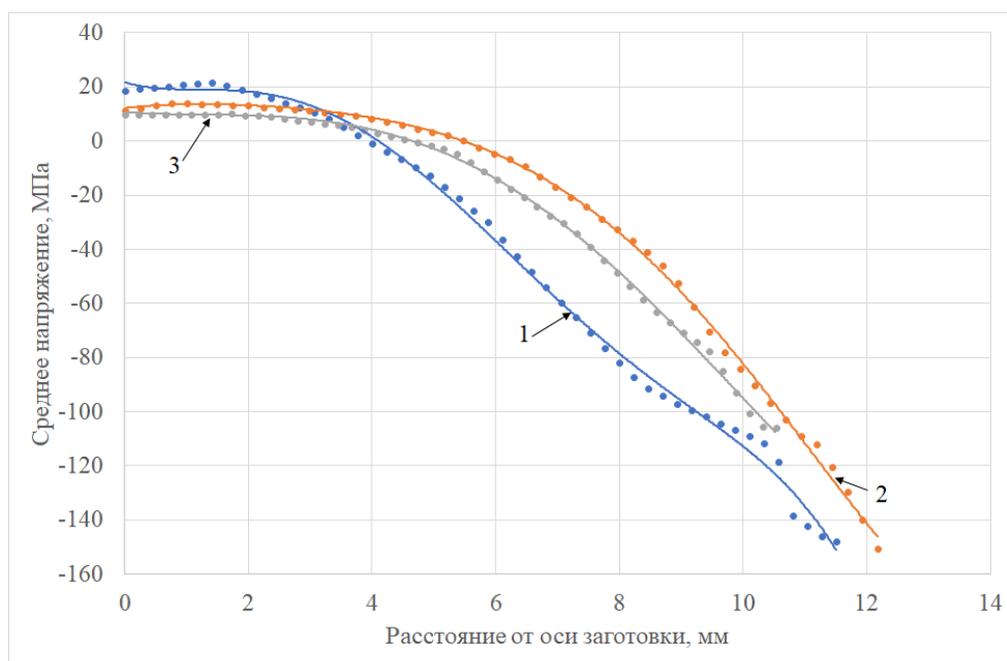


Рисунок 47. Изменение среднего напряжения в очаге деформации в зависимости от расстояния от оси заготовки при двухвалковой (1), трёхвалковой (2) и четырёхвалковой (3) прокатке по результатам моделирования в DEFORM

Согласно рис. 47 характер изменения среднего напряжения при четырёхвалковой прокатке отличается от характера изменения среднего напряжения при двухвалковой прокатке и совпадает с характером изменения среднего напряжения при трёхвалковой прокатке. В связи с этим можно заключить, что и напряжённое состояние при четырёхвалковой прокатке схоже с трёхвалковой прокаткой и отличается от двухвалковой.

## **Выводы по главе 5**

Проведено компьютерное моделирование процесса прокатки заготовки из стали 45 с диаметра 25 мм на диаметр 22 мм в двухвалковом, трёхвалковом и четырёхвалковом станах с помощью вычислительных сред конечно-элементного анализа QForm и DEFORM.

По результатам моделирования в QForm показано, что перепад значений коэффициента жёсткости напряжённого состояния между поверхностью и осевой зоной заготовки при четырёхвалковой прокатки меньше чем при двухвалковой и трёхвалковой прокатке, следовательно, по сравнению с двухвалковой и трёхвалковой прокаткой получается наименьшая неравномерность напряжений, в связи с чем риск появления разрушения при четырёхвалковой схеме наименьший из всех смоделированных схем.

По результатам моделирования в DEFORM показано, что по форме утяжины на переднем торце четырёхвалковая прокатка похожа на двухвалковую. Сравнение характера распределения интенсивности деформации, осевой компоненты деформации в направлении оси прокатки и среднего напряжения позволило установить, что характер напряжённо-деформированного состояния при четырёхвалковой прокатке подобен трёхвалковой прокатке и отличается от двухвалковой прокатки.

## 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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Романцев Б.А., Потапов И.Н., Гончарук А.В., Попов В.А. Изготовление полых профилированных заготовок. – М.: НПО Информ ТЭИ . – 1992. – 263 с.
2. Потапов И.Н., Коликов А.П., Друян В.М. Теория трубного производства. Москва: Металлургия, 1991. – 424 с.
3. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. Москва: Металлургия, 1973. – 368 с.
4. Романцев Б.А., Гончарук А.В., Алещенко А.С. Винтовая прошивка в трубном производстве: учеб. пособие. М.: Изд. Дом НИТУ «МИСиС», 2017. – 262 с.
5. Никулин А.Н. Винтовая прокатка. Напряжения и деформации. М.: Металлургиздат, 2015. 380 с. Ил.
6. Романцев Б.А., Гончарук А.В., Вавилкин Н.М., Самусев С.В. Трубное производство – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – 970 с.
7. Erman E. The effect of processing parameters on the propensity for central fracturing in piercing // Journal of Applied Metalworking. 1987. Т. 4. № 4. С. 331-341.
8. Kocks F. Cross Rolling. Stahl und Eisen, 47, 1927. pp 433-646
9. Siebel R. Fundamental Observations on Cross Rolling. Stahl und Eisen. 47, 1927, p. 1685
10. Siebel R. Deformation in Plastic State. Stahl und Eisen, Dusseldorf, 1932, p. 86.
11. Смурнеоф Н. Occurrence of Internal Cracks in Transverse Forging. Mechanical Engineering Information, No. 3, 1955, pp 49-53.
12. Teterin P.K., Luzin Yu. F. Stal, 1960, №10, p.930.
13. Blazynsky T.Z. Cole I.M. Proceedings of Institute of Mechanical Engineering. 1963-1964, 178, p. 867

14. Fomichev I.A. Stal, (Rolling and Tube Manufacture Suppl.), 1958, p.176.
15. Kirichenko A.N. et al. Effect of Individual Piercing Parameters on Occurrence of Flaws, Stal, August 1961, pp. 594-596
16. Дубровский И.В., Матлахов П.И. Сталь, 1947, №7, с. 626.
17. Тетерин П.К. и др. Сталь, 1959, №12, с. 1102.
18. Тетерин П.К. и др. В сб. «Технический прогресс в трубном производстве» Изд-во «Металлурги», 1965, с. 152.
19. Тетерин П.К. и др. В сб. «Обработка давлением специальных сталей и сплавов» (ЦНИИЧМ), вып. 53, 1967, с. 30.
20. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. М.: Metallurgy, 1990. 344 с.
21. Беришвили Т.К., Жордания И.С., Лежава О.А., Никулин А.Н. Влияние масштабного фактора на пластическое течение металла при поперечно-винтовой прокатке// Сообщ. АН Груз. ССР. 1983. Т. 110. №3. С. 561-564.
22. Романцев Б.А. Полые профилированные заготовки повышенной точности. Технология и конструкция машин: диссертация на соискание степени доктора технических наук по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением. – Москва, 1993 г.
23. Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. Производство стальных труб горячей прокаткой. М.: Metallurgizdat, 1954 г., 616 с.
24. Новиков М.В. Исследование формоизменения для совершенствования режимов деформации и расширения сортаментных возможностей станов винтовой прокатки без направляющего инструмента. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. Москва, МЭИ, 2007.
25. Rolling-mills.ru. (2017). Оборудование для черновой прокатки (обжатия) сортовых заготовок. [online] Available at: [http://www.rolling-mills.ru/equip\\_for\\_roughing.php](http://www.rolling-mills.ru/equip_for_roughing.php) [Accessed 17 Aug. 2017].

26. Белевитин В.А. Разработка и совершенствование методов экспериментальной механики для оптимизации технологических процессов обработки металлов давлением. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. ОАО «Уфалейский завод металлургического машиностроения», г. Верхний Уфалей, Челябинская область, 1997 г.
27. Лисицын А. И. ,Остренко В. Я. Моделирование процессов обработки металлов давлением (Оптические методы). Киев, Техника, 1976. -208 с., ил.
28. Gallagher, R. (1975). Finite element analysis. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
29. Owen, D. and Hinton, E. (1986). Finite elements in plasticity. Swansea: Pineridge Press.
30. Segerlind, L. (1987). Applied finite element analysis. New York: Wiley.
31. Anon, (2017). [online] Available at: [http://paduaresearch.cab.unipd.it/1552/1/Silvio\\_Fanini\\_Tesi\\_Dottorato.pdf](http://paduaresearch.cab.unipd.it/1552/1/Silvio_Fanini_Tesi_Dottorato.pdf) [Accessed 21 Aug. 2017].
32. Chiluveru, S., 2007. Computational Modeling of Crack Initiation in Crossroll Piercing. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 89 p.
33. Berazategui, D., Cavaliere, M., Montelatici, L. and Dvorkin, E. (2006). On the modelling of complex 3D bulk metal forming processes via the pseudo-concentrations technique. Application to the simulation of the Mannesmann piercing process. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 65(7), pp.1113-1144.
34. Joun, M., Lee, J., Cho, J., Jeong, S. and Moon, H. (2014). Quantitative Study on Mannesmann Effect in Roll Piercing of Hollow Shaft. Procedia Engineering, 81, pp.197-202.
35. Skripalenko, M.M. and Skripalenko, M.N. (2013). On choosing software for simulating metal-forming processes. Metallurgist, 57(1-2), pp.3-7.

36. Zhao, Y., Mao, J., Liu, F. and Ma, Z. (2015). Experiments and Simulation on Mannesmann Piercing Process in the Drill Steel Manufacture. *Strength of Materials*, 47(1), pp.29-40.
37. Komori, K. (2005). Simulation of Mannesmann piercing process by the three-dimensional rigid-plastic finite-element method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(12), pp.1838-1853.
38. В.М. Максимов, О.С. Хлыбов. Моделирование процессов прошивки в стане винтовой прокатки с использованием QForm. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. №12, 2016, с. 17-22.
39. Skripalenko, M., Bazhenov, V., Romantsev, B., Skripalenko, M., Huy, T. and Gladkov, Y. (2016). Mannesmann piercing of ingots by plugs of different shapes. *Materials Science and Technology*, 32(16), pp.1712-1720.
40. Digital.library.aist.org. (2017). AIST - 2004 MS&T Conference Proceedings. [online] Available at: <http://digital.library.aist.org/pages/PR-022-137.htm> [Accessed 21 Aug. 2017].
41. Король А.В., Выдрин А.В., Широков В.В. Компьютерное моделирование процесса прошивки в стане винтовой прокатки с бочковидными валками. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2015. Т. 15, №2, с. 68-74.
42. LEE H. и др. PREDICTION OF PLUG TIP POSITION IN ROTARY TUBE PIERCING MILL USING SIMULATION AND EXPERIMENT // *International Journal of Modern Physics B*. 2008. Т. 22. № 31n32. С. 5787-5792.
43. Bogatov A., Nukhov D., Toporov V. Simulation of Rotary Piercing Process // *Metallurgist*. 2017. Т. 61. № 1-2. С. 101-105.
44. Lu L. и др. Simulation of tube forming process in Mannesmann mill // *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2011. Т. 16. № 3. С. 281-285.
45. Yoshida M. и др. 3D FEM Simulation of Rolling Load Working on Piercer Plug in Mannesmann Piercing Process // 2010.

46. Pater Z., Bartnicki J., Kazanecki J. 3D Finite element method (FEM) analysis of basic process parameters in rotary piercing mill. METALURGIJA 51 (2012) 4, pp 501-504.
47. Pater Z., Kazanecki J., Bartnicki J. Three dimensional thermo-mechanical simulation of the tube forming process in Diescher's mill // Journal of Materials Processing Technology. 2006. Т. 177. № 1-3. С. 167-170.
48. Pater Z., Kazanecki J. Complex Numerical Analysis of the Tube Forming Process Using Diescher Mill // Archives of Metallurgy and Materials. 2013. Т. 58. № 3.
49. Pschera R., Klarner J., Sommitsch C. Modelling the Forming Limit during Cross-Rolling of Seamless Pipes Using a Modified Continuum Damage Mechanics Approach // steel research international. 2010. Т. 81. № 8. С. 686-690.
50. Wang F. и др. Explorative study of tandem skew rolling process for producing seamless steel tubes // Journal of Materials Processing Technology. 2014. Т. 214. № 8. С. 1597-1604.
51. Галкин С.П., Романцев Б.А., Харитонов Е.В. Реализация инновационного потенциала универсального способа радиально-сдвиговой прокатки. Черные металлы, 2015, №1. с.23-28.
52. Stefanik A. и др. Application of the three-high skew rolling to magnesium rods production // Materials Testing. 2016. Т. 58. № 5. С. 438-441.
53. Gryc A., Bajor T., Dyja H. the analysis of influence the parameters of rolling process in three high skew rolling mill of AZ31 magnesium alloy bars on temperature distribution // METALURGIJA. 2016. Т. 55. С. 772-774.
54. Stefanik A. и др. Application of the three-high skew rolling to magnesium rods production // Materials Testing. 2016. Т. 58. № 5. С. 438-441.
55. Lopatin N. Effect of hot rolling by screw mill on microstructure of a Ti-6Al-4V titanium alloy // International Journal of Material Forming. 2012. Т. 6. № 4. С. 459-465.

56. Huang G. и др. Research on Stable Forming of Titanium Alloy Bar Using Three-Roll Skew Rolling // *Advanced Materials Research*. 2015. Т. 1095. С. 837-841.
57. Li Wang Y. и др. Gradient structure produced by three roll planetary milling: Numerical simulation and microstructural observations // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Т. 639. С. 165-172.
58. Stefanik A. и др. Theoretical And Experimental Analysis Of Aluminium Bars Rolling Process In Three-High Skew Rolling Mill // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. Т. 60. № 2.
59. Karpov B.V., Skripalenko M.M., Galkin S.P., Skripalenko M.N., Samusev S.V., Tran Ba Huy, Pavlov S.A. Studying the Nonstationary Stages of Screw Rolling of Billets with Profiled Ends // *Metallurgist*. 2017. Т. 61. № 3-4. С. 257-264.
60. Богатов А.А., Павлов Д.А, Исследование деформированного состояния металла при обжатии заготовки в трёхвалковом стане винтовой прокатки. *Металлург*, №4, 2017. с. 66- 70.
61. Богатов А.А. и др. МКЭ-моделирование и оптимизация нового способа обжатия непрерывнолитой заготовки. *Черные металлы*, №11 (983), 2013. с.26-31.
62. 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
63. QForm. Моделирование процессов обработки металлов давлением [Электронный ресурс]. URL: <http://qform3d.ru/> (дата обращения: 25. 05. 2018).
64. 3D CAD Design Software [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solidworks.com/> (дата обращения: 25. 05. 2018).
65. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Галкин С.П., Скрипаленко М.Н., Капуткина Л.М., Чан Б.Х. Прогнозирование разрушения металла при винтовой прокатке в двухвалковом стане. *Металлург*, №11, 2017, с. 11-18.

66. 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
67. Buchely M., Maranon A., Silberschmidt V. Material model for modeling clay at high strain rates // *International Journal of Impact Engineering*. 2016. Т. 90. С. 1-11.
68. Карпов Б.В., Скрипаленко М.Н., Скрипаленко М.М., Ба Хюи Чан, Гартвиг А.А., Гладков Ю.А. Моделирование процесса образования утяжины при трехвалковой винтовой прокатке на мини-станках. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. №1, 2017. с. 19-26.
69. Romantsev B.A., Skripalenko M.M., Tran Ba Huy, Skripalenko M.N., Gladkov Yu.A., Gartvig A.A. Computer Simulation of Piercing in a Four-High Screw Rolling Mill // *Metallurgist*. 2018. vol. 61, number 9-10. p. 729-735.
70. Galkin S.P. Regulating radial-shear and screw rolling on the basis of the metal trajectory, *Steel in Translation*. 2004. Т. 34. № 7. pp 57-60.
71. Skripalenko, M. M., Romantsev, B. A., Galkin, S. P., Skripalenko, M. N., Kaputkina, L. M. and Huy, T. B. Prediction of the Fracture of Metal in the Process of Screw Rolling in a Two-Roll Mill // *Metallurgist*. 2018. Т. 61. № 11-12. С. 925-933.
72. Карпов Б.В., Скрипаленко М.М., Галкин С.П., Скрипаленко М.Н., Самусев С.В., Чан Б.Х., Павлов С.А. Исследование нестационарных стадий радиально-сдвиговой прокатки заготовок с профилированными торцами *Металлург*. 2017. No 4. С. 18-24.
73. S. Z. Li, W. H. Meng, L. W. Hu, and B. Ding. Research on the tendency of inner crack during 3-roll skew rolling process of round billets. *Advanced Materials Research*. 145, pp 238–242 (2011)

74. Ding, X., Shuang, Y., Liu, Q. and Zhao, C. New rotary piercing process for an AZ31 magnesium alloy seamless tube // *Materials Science and Technology*. 2017. Т. 34. № 4. С. 408-418.

75. [Электронный ресурс]. URL: <http://congress.cimne.com/complas2017/admin/files/fileabstract/a15.pdf> (дата обращения: 12. 06. 2018).

76. Lu L., Jia Z. Shear stresses and velocity analysis of piercing process in Diescher's mill using Finite Element Method. *Advances in engineering Research*, volume 113, pp 753-757.

77. 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)

78. В. А. 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.)

79. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во Уральского ГТУ, 2001. – 836с.

80. [Электронный ресурс]. URL: [https://thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform\\_es09\\_mgtu1.pdf](https://thesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es09_mgtu1.pdf) (дата обращения: 13. 06. 2018).

81. Скрипаленко М.М., Романцев Б.А., Капуткина Л.М., Галкин С.П., Скрипаленко М.Н., Чан Ба Хюи. Компьютерное моделирование процессов винтовой прокатки с целью прогнозирования разрушения заготовок. VII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и

наноматериалов». Москва. 7-10 ноября 2017 г./ Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2017, с. 854-855

82. Скрипаленко М.М., Чан Ба Хюи, Хе Чже Сун, Романцев Б.А., Галкин С.П., Капуткина Л.М., Скрипаленко М.Н. Прогнозирование деформируемости заготовок в процессах винтовой прокатки на основе компьютерного моделирования и экспериментальной оценки. IX-я Евразийская научно-практическая конференция «Прочность неоднородных структур» ПРОСТ 2018, Москва, 24-26 апреля 2018 г.

83. М.А. Матвеев. Оценка вероятности разрушения металла при горячей пластической деформации с помощью критерия Кокрофта-Латама. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. Том 23, №2, 2017, с. 109-126.

84. Галкин С.П. Теория и технология стационарной винтовой прокатки заготовок и прутков малопластичных сталей и сплавов. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Москва, 1998, 401 с.

# Приложение А

## Патент на изобретение № 2635685

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2635685

### Способ прошивки в стане винтовой прокатки

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС" (RU)*

Авторы: *Романцев Борис Алексеевич (RU), Скрипаленко Михаил Михайлович (RU), Чан Ба Хюи (VN)*

Заявка № 2016147341

Приоритет изобретения 02 декабря 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 15 ноября 2017 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 02 декабря 2036 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Изrael



## Приложение Б

### Испытания действующей модели четырёхвалкового стана винтовой прокатки



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор НИТУ МИСиС

по науке и инновациям

М. Р. Филонов

2017 года.

АКТ

#### Испытания действующей модели четырехвалкового стана винтовой прокатки

В рамках выполнения инициативной научной работы на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС» создана действующая модель стана для реализации нового способа винтовой прокатки (рис.1), которая реализует новую схему винтовой прокатки малопластичных металлов и сплавов.

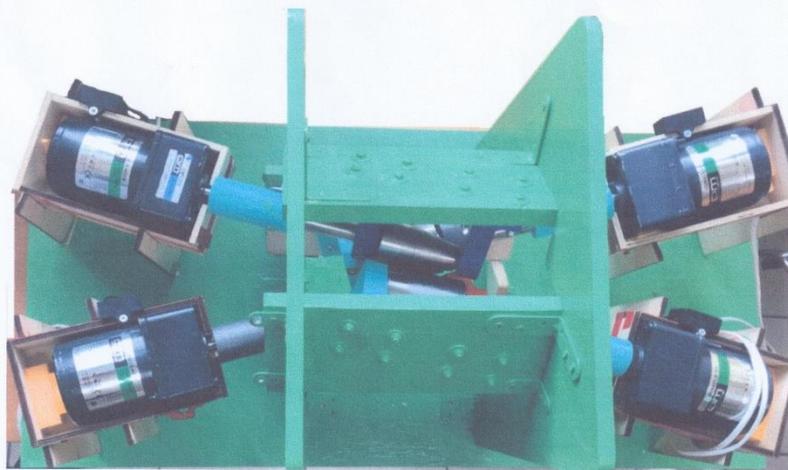


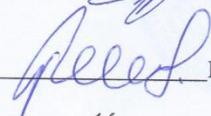
Рисунок 1. Четырёхвалковый лабораторный стан винтовой прокатки (действующая модель)

Модель прокатного стана имеет два рабочих чашевидных валка диаметром 55 мм и два рабочих грибовидных валка диаметром 45 мм с длиной бочки 70 мм, угол подачи рабочих валков -15 град. Рабочие валки выполнены из стали 45

На модели стана, для проверки его работоспособности более прокатаны образцы из модельного пластилина диаметром 25 мм и длиной 200 мм. Процесс прокатки с обжатием по диаметру 20% протекал стабильно, более получены прутки диаметром 20 мм длиной 321 мм. Испытания показали, что выбранная схема компоновки рабочей клетки и главного

привода являются вполне рациональными и могут использоваться при проектировании  
опытно-промышленного образца стана новой конструкции.

Заведующий кафедры ОМД, НИТУ МИСиС  Доц., к.т.н. Алещенко А. С.

 Профессор, д.т.н. Романцев Б. А.

 Аспирант Чан Ба Хюи

## Приложение В

### Акт об использовании в учебном процессе материалов

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
НИТУ «МИСиС»  
В.Л.Петров  
2018 г.



Акт

об использовании в учебном процессе материалов диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук аспиранта кафедры «Обработка металлов давлением» Чан Ба Хюи

Комиссия в составе: директор института Экотехнологий и инжиниринга доцент, к.т.н. А.Я. Травянов, и.о. заведующего кафедрой «Обработка металлов давлением» доцент, к.т.н. А.С. Алещенко составили настоящий Акт о том, что на кафедре ОМД при подготовке бакалавров и магистров используются результаты исследований формоизменения при различных схемах винтовой прокатки и прошивки, действующая модель четырёхвалкового стана винтовой прокатки, компьютерные модели процессов двух-, трёх- и четырёхвалковой прокатки и прошивки.

Указанные материалы используются при чтении лекций, проведении лабораторных и практических занятий по курсам «Компьютерное моделирование технологических процессов ОМД», «Информационные технологии при конструировании машин и комплексов обработки металлов давлением», «Компьютерное моделирование и проектирование узлов и машин ОМД», «Информационные технологии в металлургии и машиностроении», «Информационные технологии в металлургии и металловедении», «Инновационные методы решения инженерных задач теории и технологии прокатного производства», при выполнении КНИР, выпускных квалификационных работ студентов бакалавриата и магистратуры.

И.о. заведующего кафедрой  
«Обработка металлов давлением»  
доцент, к.т.н.



А.С. Алещенко

Директор института  
Экотехнологий и инжиниринга  
доцент, к.т.н.



А.Я. Травянов