

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

На правах рукописи

Лакиза Владислав Андреевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ  
ИЗНОСА ОПРАВОК ПРИ ПРОШИВКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И  
ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ НА ДВУХВАЛКОВЫХ СТАНАХ

Специальность  
2.6.4 – Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
Д.т.н., профессор Романцев Б.А.

Москва – 2024

## Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Литературный обзор.....	10
1.1 Станы винтовой прокатки для прошивки заготовок.....	10
1.2 Производство труб на трубопрокатном агрегате с раскатным станом винтовой прокатки .....	11
1.3 Особенности получения бесшовных труб из титановых сплавов .....	13
1.4 Износостойкость оправок при прошивке заготовок на стане винтовой прокатки .....	15
1.5 Выводы по главе .....	19
Глава 2. Исследование влияния материала прошивной оправки на ее износостойкость ....	21
2.1 Основные параметры проведения эксперимента .....	21
2.2 Анализ результатов эксперимента.....	24
2.3 Выводы по главе .....	34
Глава 3. Исследование влияния основных технологических факторов при прошивке на износостойкость оправки.....	35
3.1 Компьютерное моделирование процесса прошивки заготовок .....	35
3.2 Анализ влияния технологических параметров на износ прошивной оправки .....	37
3.3 Моделирование процесса прошивки при различных варьируемых факторах .....	42
3.4 Выводы по главе .....	44
Глава 4. Исследование осевого усилия металла на оправку при прошивке .....	46
4.1 Влияние угла подачи и диаметра оправки .....	46
4.2 Анализ влияния варьируемых факторов на осевое усилие .....	49
4.3 Разработка методики прогнозирования износа прошивных оправок .....	53
4.4 Выводы по главе .....	54
Глава 5. Исследование технологии изготовления бесшовных труб из сплавов на основе титана в условиях станов МИСИС–130Д и ТПА 70–270 .....	56
5.1 Расчет параметров очага деформации для заданного типоразмера гильзы (трубы) .....	57
5.2 Разработка калибровки рабочих инструментов и схемы очага деформации .....	60
5.3 Проектирование и моделирование очага деформации в программе SolidWorks, моделирование процесса в программе QForm и анализ результатов.....	61
5.4 Физическое моделирование получения труб из сплавов на основе титана ВТ1-0 и ПТ-7М на стане МИСИС-130Д и разработка рекомендаций для получения труб из титановых сплавов на стане ТПА 70–270 с моделированием в QForm 3D .....	71

5.4.1	Методика проведения практического эксперимента .....	71
5.4.2	Анализ результатов экспериментальной прокатки на стане МИСИС-130Д .....	74
5.4.3	Моделирование разработанной технологии получения титановых труб на ТПА 70–270 в программе QForm .....	80
5.5	Прокатка труб из титановых сплавов на ТПА 70-270.....	90
5.5.1	Отработка технологии на заготовках из углеродистой стали .....	90
5.5.2	Опытная прокатка заготовок из титановых сплавов.....	94
5.5.3	Результаты получения труб из титановых сплавов.....	95
5.5.4	Анализ геометрических параметров полученных черновых труб.....	95
5.5.5	Анализ состояния готовых труб из титановых сплавов и используемого инструмента .....	97
5.6	Разработка технических рекомендаций для внедрения процесса изготовления титановых труб из сплавов ВТ1-0 и ПТ-7М .....	99
5.7	Выводы по главе .....	100
	Выводы по работе.....	102
	Список использованных источников.....	104
	Приложение А.....	110
	Приложение Б .....	111
	Приложение В.....	112

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- $\beta$  – Угол подачи рабочих валков;  
 $V_{\text{в}}$  – Частота вращения валков;  
 $U_{\text{о}}$  – Обжатие перед носком оправки;  
 $U_{\text{п}}$  – Обжатие в пережиме валков;  
 $\xi$  – Коэффициент овализации в пережиме;  
 $D_{\text{в}}$  – Диаметр валка в пережиме;  
 $l_{\text{в}}$  – Длина бочка валка;  
 $d_{\text{опр}}$  – Диаметр оправки;  
 $V_{\text{п}}$  – Расстояние между валками в пережиме;  
 $L_{\text{п}}$  – Расстояние между линейками в пережиме;  
 $C$  – Выдвижение оправки за пережим;  
 $D_{\text{г}}$  – Диаметр гильзы после прошивки;  
 $S_{\text{г}}$  – Толщина стенки гильзы;  
 $D_{\text{р}}$  – Диаметр после раскатки;  
 $S_{\text{р}}$  – Толщина стенки после раскатки;  
 $D_{\text{з}}$  – Диаметр заготовки;  
 $l_{\text{з}}$  – Длина заготовки;

## **Введение**

В настоящее время бесшовные трубы применяются в нефтегазовой, машиностроительной и многих других отраслях промышленности. Основным критериям оценки качества бесшовной трубы являются получаемые геометрические параметры, а также качество внутренней и наружной поверхности. Рабочий инструмент является одним из источников получения поверхностных дефектов. В процессе производства бесшовных труб на винтовых станах необходимо тщательно следить за состоянием оправок, так как от их состояния зависят геометрические параметры и качество внутренней поверхности гильзы. Оправки, используемые на станах винтовой прокатки, подвергаются износу в процессе работы, что приводит также к увеличению издержек и снижению производительности оборудования.

В настоящее время недостаточно изучены вопросы износостойкости оправок при прошивке труб из высоколегированных сталей. Для более эффективного изучения вопросов износостойкости оправок при прошивке труб из легированных сталей и сплавов необходимо учитывать не только материалы, из которых изготовлены сами оправки, но и условия эксплуатации и процесса обработки. Важно также анализировать влияние параметров процесса на износ оправок и определять оптимальные режимы работы станов винтовой прокатки. Исследование этой проблемы является актуальной задачей, поскольку это позволит оптимизировать процесс производства и повысить качество готовой продукции. С целью получения обобщённых данных об износоустойчивости оправок и разработки рекомендаций по оптимизации процесса прошивки труб из легированных сталей и сплавов необходимо провести комплексные исследования, включающие как теоретический анализ, так и проведение экспериментов. Проведение теоретических исследований позволяет смоделировать процесс прошивки труб и определить основные факторы, влияющие на износ оправок. Эксперименты же позволят проверить эти теоретические предположения на практике и получить конкретные данные о характере износа оправок при работе на станах винтовой прокатки.

Результаты исследований по износостойкости оправок при прошивке труб из высоколегированных сталей будут полезны производителям оборудования, специалистам в области трубопрокатного производства и научным исследователям. Полученные данные помогут усовершенствовать процесс производства бесшовных труб, оптимизировать расходы, увеличить производительность и улучшить качество продукции.

### **Актуальность темы исследования**

Актуальность исследования, проведенного в рамках данной работы, обусловлена практической значимостью повышения износостойкости прошивных оправок. В связи с тем, что износ оправок приводит к простоям оборудования, снижению качества поверхности получаемых труб и затратам на закупку нового инструмента требуется разработать рекомендации по выбору рациональных способов снижения износа оправок.

### **Цель и задачи работы**

Цель работы - Исследование износостойкости оправок при прошивке заготовок из легированных сталей и титановых сплавов на стане винтовой прокатки.

Для достижения цели необходимо выполнить поставленные задачи:

1. Проанализировать факторы, влияющие на устойчивость рабочего инструмента к износу при прошивке заготовок из легированной стали и титановых сплавов на двухвалковом стане винтовой прокатки;
2. Исследовать износостойкость оправок, изготовленных из различных материалов, при прошивке заготовок из легированной стали и титановых сплавов на стане МИСИС-130Д и трубопрокатном агрегате ТПА 70-270;
3. Установить влияние технологических параметров на износостойкость прошивных оправок на станах винтовой прокатки с помощью моделирования в программном комплексе QForm 3D;
4. Разработать методику оценки износа и повышения износостойкости прошивных оправок;
5. Разработать режимы получения титановых труб на двухвалковых станах винтовой прокатки МИСИС-130Д и ТПА 70-270 и провести анализ износа прошивных оправок при получении данных труб.

### **Научная новизна работы**

1. Установлен характер влияния частоты вращения валков, коэффициента овализации и угла подачи рабочих валков на износ оправки при прошивке заготовок из легированной стали и титановых сплавов на стане МИСИС-130Д;
2. Для исследуемого класса сталей определено влияние углеродного эквивалента на износостойкость оправок при прошивке заготовок;
3. Определены рациональные параметры очага деформации, обеспечивающие повышение износостойкости оправок при прошивке труб из легированной стали и титановых сплавов с помощью моделирования в программном комплексе QForm 3D и

подтвержденные физическим экспериментом;

4. Разработана методика оценки величины износа прошивных оправок, базирующаяся на компьютерном моделировании с учетом данных физического эксперимента;

5. Исследована износостойкость рабочего инструмента при получении труб из стали 20Х13 и титановых сплавов на станах МИСИС-130Д и ТПА 70-270.

#### **Практическая значимость работы** заключается в:

1. Анализе влияния угла подачи рабочих валков, коэффициента овализации и частоты вращения рабочих валков на износ оправки при прошивке заготовок из легированной стали и титановых сплавов;

2. Составлении рекомендаций по выбору материала оправок, применяемых при производстве гильз и труб из легированных сталей, учитывая данные, полученные в ходе экспериментальных прокаток на двухвалковых станах винтовой прокатки, и определение осевого усилия металла на оправку в процессе прошивки заготовок в зависимости от угла подачи рабочих валков и диаметра оправки;

3. Разработке рациональных режимов прокатки, направленных на сокращение машинного времени прошивки, благодаря повышению частоты вращения рабочих валков и увеличению угла подачи;

4. Разработке методики прогнозирования износа прошивных оправок.

5. Разработке технологии получения труб из легированной стали и титановых сплавов на двухвалковых станах МИСИС-130Д и ТПА 70-270.

#### **Методы исследования**

Для изучения процесса изнашивания прошивных оправок во время прокатки заготовок из легированной стали и титановых сплавов на стане винтовой прокатки проведена комплексная работа, включающая моделирование процессов в программном комплексе QForm 3D и проведение экспериментальных исследований на станах ТПА 70–270 и МИСИС–130Д. Построение моделей инструментов и очагов деформаций осуществлялось с применением программных комплексов SolidWorks и КОМПАС-3D. В ходе экспериментальных прокаток использовалось современное измерительное оборудование с целью фиксации усилий металла на оправку, а также измерения размеров и массы прошивных оправок.

**Достоверность полученных результатов** обусловлена использованием передовых

технологий и оборудования, а также применением разнообразных исследовательских методов — как экспериментальных, так и теоретических. Обработка данных с помощью вычислительной техники позволила получить точные результаты, которые затем были успешно проверены в промышленных условиях.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- 1 Закономерности влияния основных технологических параметров на износ оправок при прошивке заготовок из титановых сплавов и легированной стали;
- 2 Закономерность влияния усилия металла на оправку при изменении угла подачи и диаметра оправки;
- 3 Особенности влияния материалов прошивных оправок на их износостойкость при прошивке заготовок из легированной стали;
- 4 Разработка рекомендаций по выбору параметров очага деформации и материала прошивной оправки с целью повышения износостойкости оправки.

#### **Личный вклад**

Основные результаты диссертации были получены автором лично. Он активно работал над определением цели исследования, разработкой плана экспериментов, проведением испытаний и анализом данных. На основе проведённой работы автор сформулировал выводы и подготовил научные публикации.

#### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы были изложены на Международной научно-практической конференции «Трубы-2023» (13-15 сентября 2023, г. Челябинск): «Разработка технологии получения труб из сплавов на основе титана для расширения сортамента ТПА 70–270 АО «ВМЗ» В.А. Лакиза, Ю.В. Гамин, А.С. Алещенко, Е.Н. Обыденнов, А.В. Король.

#### **Публикации**

Основное содержание диссертационной работы отображено в трёх научных статьях, которые опубликованы в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ. По результатам работы получено свидетельств о государственной регистрации ноу-хау.

Статьи, опубликованные в рецензируемых журналах, определенных ВАК:

- 1 Лакиза В.А., Романцев Б.А., Алещенко А.С., Назаров К.И. Исследование износа оправок при прошивке заготовок на стане винтовой прокатки «МИСиС-130Д».



Металлург. 2023, № 11, с. 124–128. (DOI: 10.52351/00260827\_2023\_11\_124).

2 Алещенко А. С., Лакиза В. А., Романцев Б. А., Король А. В. Исследование стойкости оправок при прошивке заготовок из стали 20Х13 на стане винтовой прокатки МИСИС-130Д. Черные металлы. 2023, № 12, с. 70-74. (DOI: 10.17580/chm.2023.12.11).

3 Лакиза В.А., Гамин Ю.В., Алещенко А.С., Король А.В. Компьютерное моделирование и экспериментальное опробование технологии прокатки труб из титанового сплава ВТ1-0. Прокатное производство. Приложение к журналу «Технология металлов». 2023, № 22. с. 1-9. (DOI: 10.31044/1684-2499-2023-0-22-1-9).

Ноу-хау:

4. Алещенко А.С., Лакиза В.А., Романцев Б.А. Методика оценки износа оправок при прошивке заготовок на двухвалковом стане МИСИС-130Д. Зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау НИТУ МИСИС № 14-676-2024 ОИС от 16.10.2024 г.

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности.**

Диссертация по своей тематике целям, задачам, научной новизне теоретической и практической значимости, методологии и методам исследования, положениям, выносимым на защиту, соответствует паспорту специальности 2.6.4 – Обработка металлов давлением по п.1, 2, 7.

#### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, и списка использованных источников из 78 наименований отечественных и зарубежных авторов. Текст научно-квалификационной работа содержит 112 страниц машинописного текста, включающего 37 таблиц и 70 рисунков.

# Глава 1. Литературный обзор

## 1.1 Станы винтовой прокатки для прошивки заготовок

Винтовая прокатка широко используется для производства бесшовных труб, специальных изделий и прутков повышенной точности. При прошивке сплошных заготовок на валковых станках применяются рабочие валки различных конфигураций: бочковидные, грибовидные, чашевидные и дисковые.

В настоящее время чаще всего применяются именно валковые станы с углом подачи  $\beta$  и углом раскатки  $\delta$ . Угол подачи определяет движение металла в процессе прокатки, а угол раскатки влияет на радиус и окружную скорость вала.

Бочковидные валки ( $\delta = 0$ ) универсальны и используются для всех типов гильз и труб [1]. Чтобы удерживать заготовку по оси прокатки на 2-валковых станах, применяются направляющие инструменты, такие как линейки, диски или ролики. При прокатке тонкостенных труб диаметром больше 20–30 мм используют 2 линейки для предотвращения затекания металла в зазоры. Для толстостенных труб не требуется плотное прилегание, поэтому используются диски или ролики.

Основным технологическим фактором является угол подачи, который играет решающую роль в процессе прошивки. Процесс может осуществляться с образованием осевой полости в заготовке или без неё. Советские ученые [2] предложили метод прошивки без образования осевой полости, что позволило улучшить состояние внутренней поверхности труб. Однако в некоторых случаях процесс может сопровождаться дефектами, такими как плены и трещины на внутренней поверхности труб.

Таким образом, винтовая прокатка является важным процессом для производства различных металлических изделий, и выбор оптимального метода прошивки играет ключевую роль в обеспечении высокого качества продукции.

Развитие процесса трубопрокатного производства связано с исследованием новых технологических режимов прокатки в условиях повышенного угла подачи. При этом исключается возможность образования полости при повышенных степенях обжатий.

В Московском институте стали и сплавов под руководством И. Н. Потапова и П.И. Полухина были проведены исследования процесса винтовой прокатки [2], которые показали, что основными факторами, влияющими на механизм разрушения при этом процессе, являются неравномерность деформации, число обжатий и температурно-скоростные условия. Метод испытаний образцов на прошиваемость часто используется для оценки пластических характеристик металла при винтовой прокатке, но для исследования

технологической пластичности при новых условиях деформирования предпочтительнее использовать метод прокатки цилиндров с последующим торможением их в стане. Это позволяет оценить способность металла к деформации при винтовой прокатке.

Одним из основных недостатков метода винтовой прокатки при производстве труб является разрушение металла в центральной части. В научном сообществе нет единого взгляда на то, как оправка влияет на вероятность центрального разрушения металла. Существуют различные научные точки зрения на вопрос о влиянии оправки на риск центрального разрушения металла [3]. Некоторые исследователи считают, что оправка приводит к возникновению усилий, усложняющих вскрытие полости, а другие предполагают, что именно из-за неё происходит скольжение металла с последующим увеличением вероятности разрушения. С целью изучения воздействия различных факторов, включая угол подачи, тип направляющего инструмента, коэффициент овализации и других, на склонность металла к разрушению в центральной части были проведены испытания на стане МИСиС-100Д. В результате экспериментов были установлены определенные параметры настройки стана для оценки прошиваемости. Выявлено, что увеличение угла подачи при винтовой прокатке приводит к улучшению процесса и уменьшению неравномерности деформации заготовок. Направляющие диски обеспечивают лучшую прошиваемость заготовки за счёт ограничения истечения металла в тангенциальном направлении, в отличие от роликов, при использовании которых происходит поперечная деформация. Применение направляющих инструментов значительно сказывается на распределении деформации. В основном, глубина осевой утяжки при использовании дисков меньше, чем при использовании линейек и роликов. По сравнению с линейками, использование дисков улучшает прошиваемость заготовок на 20 %. Коэффициент овализации влияет на процесс прокатки и центральное разрушение металла. Применение различных инструментов, таких как ролики, линейки и диски, позволяет контролировать уровень овализации и улучшить технологическую пластичность материала. Например, применение дисков в качестве направляющего инструмента позволяет даже снизить коэффициент овализации до 1,0 без центрального разрушения металла. Это объясняется тем, что диски действуют как активные деформирующие инструменты, улучшая пластичность и снижая растягивающие напряжения.

## **1.2 Производство труб на трубопрокатном агрегате с раскатным станом винтовой прокатки**

Агрегаты для производства труб, оснащённые раскатными станами для проведения

процесса винтовой прокатки, выпускают относительно малый объём продукции от общего объёма выпускаемых труб — примерно 7–8 %. Однако их значимость велика из-за возможности получения труб с высокой точностью в геометрических размерах (толщина стенки, диаметр трубы), благодаря чему удается значительно сократить потребность в дополнительной механической обработке продукции. Данный вид труб используют для изготовления деталей машин [3]. Трубопрокатные установки, оснащённые раскатным станом для винтовой прокатки, также отличаются высокой маневренностью, что позволяет быстро перестраивать производство на изготовление труб разного размера без необходимости замены оборудования. Существует две схемы таких агрегатов, различающиеся по типу используемых станов - трехвалковые и двухвалковые.

Применение трехвалковых раскатных станов в агрегатах ограничивает возможности получения тонкостенных труб из-за поперечной деформации при прокатке, что приводит к образованию тrefовидных концевых раструбов. В трубопрокатных агрегатах с трёхвалковым станом минимальный диаметр труб ограничен 73–76 миллиметрами из-за конструктивных особенностей оборудования, не позволяющих свести валки на меньший калибр. Использование редукционного стана для продольной прокатки помогает уменьшить диаметр труб. Однако этот метод снижает точность размеров и ограничивает манёвренность процесса.

На специализированном стане Дишера, оснащённом приводными направляющими дисками, можно производить тонкостенные трубы с соотношением  $D/S$  вплоть до 30. Тем не менее, качество поверхности таких труб из легированной стали иногда не соответствует строгим требованиям. Кроме того, рабочая клетка стана требует больше энергии, массы оборудования, и занимает больше места, чем обычная клетка. Разработанный в НИТУ МИСиС технологический процесс на малоэнергоёмком оборудовании предлагает компактное и автоматизированное решение [3]. Оборудование ТПА 70-270 объединено в единую поточную линию, что позволяет работать с различными типами заготовок и повышает производительность процесса.

Рассматриваемая технология позволяет изготавливать трубы с очень высокой точностью и при этом гарантируя высокое качество поверхности. В этом случае используется раскрой прутков на мерные длины при помощи механической пилы, после чего проводится точная зацентровка переднего торца и равномерное распределение вытяжки. Короткая коническая оправка помогает управлять процессом, изменяя толщину стенки и диаметр трубы. Использование неизменной настройки очага деформации для обеих операций (прошивки и раскатки) также является особенностью этой технологии.

Благодаря этому стало возможно осуществлять два процесса на одном стане с

использованием одного нагрева. Прошитая гильза возвращалась на входную сторону, а прошивная оправка заменялась раскатной вместе со стержнем. Данный подход позволяет существенно сократить затраты на производство оборудования, а также его массу и количество.

В трёхвалковом стане винтовой прокатки черновая труба проходит этап калибровки по диаметру, где обжатие по диаметру не превышает 5 %, а угол подачи равен  $12^\circ$ . Это позволяет одновременно выполнять калибрование и правку трубы. Также возможна альтернативная схема процесса, включающая нагрев заготовки, прошивку в гильзу, подогрев гильзы до высокой температуры, раскатку гильзы в трубу, калибрование и контролируемое охлаждение. В любом случае, стойкость направляющих линеек играет ключевую роль в процессе прошивки и раскатки.

Исследования проведенные в лаборатории кафедры ОМД НИТУ МИСИС позволили создать новую конструкцию направляющих линеек из углеродистой стали с наплавкой сплавом на основе никеля. Эти линейки обладают уникальными свойствами и геометрией, что позволяет им выдерживать высокие нагрузки в процессе прокатки полых изделий. Для изготовления большинства линеек применяется бидулоидный чугун, который имеет определенный химический состав. Однако такие линейки подвержены интенсивному износу и образованию разгарных трещин в процессе эксплуатации. Для увеличения износостойкости и предотвращения перегрева в конструкции современных линеек предусмотрены каналы для водяного охлаждения. Использование новых стальных линеек позволяет избежать аварийных поломок, которые характерны для бидулоидных линеек с грубой литой структурой. После окончания срока службы поверхность таких линеек может быть восстановлена повторной наплавкой.

Таким образом, применение усовершенствованной конструкции направляющих линеек из углеродистой стали с наплавкой сплава на основе никеля значительно улучшило качество продукции и долговечность оборудования для производства полых изделий.

Также особое внимание при производстве труб уделяется оправкам в связи с тем, что именно их состояние влияет на качество внутренней поверхности получаемых труб и точность геометрических размеров. Повышенный износ прошивных оправок ведет также к снижению производительности промышленных агрегатов из-за необходимости частой замены.

### **1.3 Особенности получения бесшовных труб из титановых сплавов**

Трубы из титановых сплавов являются важным конструкционным элементом и

ответственными изделиями в различных стратегически значимых отраслях промышленности. Следовательно, тематика, связанная с совершенствованием и разработкой новых методов и технологий для производства таких труб, является актуальной и востребованной. Титан как конструкционный материал достиг выдающегося развития в прошлом веке [4,5]. Титановые сплавы обладают высокой стойкостью к коррозии, высокой прочностью, немагнитностью, высокой удельной прочностью и позволяют существенно снизить вес конструкций, в которых они используются [6]. Потребность в титановых трубах растет год от года благодаря уникальным свойствам этого материала и его разнообразному использованию в различных изделиях и конструкциях [7]. Титановые трубы широко применяются в нефтегазовой и химической промышленности, судостроении, космической и авиационной технике, судостроении и морской добыче нефти [8-10]. Область применения титановых труб постоянно расширяется, что стимулирует разработку новых технологий для их производства [11-15].

Для изготовления труб из титана и его сплавов в различных странах используют разные методы, включая сварку, прессование, горячую и холодную прокатку, а также волочение [11-14]. Эти методы позволяют получать трубы различных размеров и форм, которые могут использоваться в различных отраслях промышленности. В США трубы из технически чистого титана получают путём сварки под слоем флюса с последующим волочением до нужного размера. Сварные трубы в России производятся небольшими партиями. Прессование является основным способом производства товарных и передельных титановых труб в США, Великобритании, Японии, Франции, Канаде, Германии и Италии. Трубы, полученные методом прессования, проходят обточку или шлифовку, а затем проходят контроль качества перед дальнейшей обработкой. Для производства труб из сплавов с высоким содержанием легирующих элементов применяется теплое волочение. Винтовая прокатка широко используется для производства бесшовных труб, специальных изделий и прутков повышенной точности.

В России титановые трубы изготавливают главным образом способом горячей прокатки на трубопрокатных агрегатах с автомат-станом. Этот способ обеспечивает высокую производительность и возможность изготовления труб разного размера и марок сплавов. Для защиты поверхности титановой заготовки часто используются различные покрытия, которые уменьшают налипание и улучшают процесс прокатки путем уменьшения трения в зоне деформации. Согласно исследованию, приведённому в [20], применение линеек с наплавкой во время производства титановых труб из сплава ВТ1-0 посредством двухвалковой винтовой прокатки способствует достижению высокой точности по толщине стенок и минимизирует налипание материала на инструмент.

Технология горячей прокатки используется для изготовления труб малого диаметра, а также передельных труб, диаметр которых не превышает 76 миллиметров. Пилигримовый стан применяется для производства труб большого диаметра — свыше 325 миллиметров, при этом в качестве заготовки используются кованные заготовки или слитки.

Следовательно, производство титановых труб требует тщательного контроля за состоянием инструментов, качеством смазки и другими технологическими операциями для достижения высокого уровня качества и производительности.

Для разработки новых технологий, предварительной проверки расчетов и выбранных режимов в ходе исследования часто используются программные комплексы для моделирования процесса обработки металлов давлением [21-23]. Это позволяет ускорить процесс разработки технологии, снизить стоимость и время на проведение экспериментов.

#### **1.4 Износостойкость оправок при прошивке заготовок на стане винтовой прокатки**

Опыт эксплуатации рабочего инструмента при производстве горячекатаных труб демонстрирует, что износ поверхности инструмента является актуальной и достаточно сложной проблемой современных трубопрокатных агрегатов. Особое внимание уделяется оправкам в связи с тем, что именно их состояние влияет на качество внутренней поверхности получаемых труб и точность геометрических размеров труб [24-30]. Интенсивный износ прошивных оправок приводит к снижению производительности агрегатов, в связи с частой заменой рабочего инструмента [31-33]. Вопрос повышения износостойкости прошивных оправок является актуальной темой в современном производстве и частично рассмотрен в работах [34-36]. С увеличением требований к трубам все более важным становится химический состав металла заготовок и условия работы прошивной оправки.

Качество получаемых гильз, производительность и стоимость продукции во многом зависят от стойкости прошивных оправок. Прошивка заготовок из легированных сплавов и титановых сплавов ухудшает износостойкость оправок, поэтому важно выбрать подходящий материал и технологические параметры для обеспечения стабильной прошивки, а также прогнозировать износ оправок. Оправки для прошивного оборудования имеют различный срок службы в зависимости от прошиваемого материала. При прошивке заготовок из конструкционных углеродистых сталей оправки могут выдержать более тысячи проходов, тогда как при обработке коррозионностойких или высоколегированных сталей их ресурс обычно ограничивается несколькими десятками проходов. [37-40].

Основные причины износа оправок [41]:

1. Износ, задиры и вырывы металла из тела оправки;

Износ может быть вызван трением при деформации металла и неравномерным распределением контактных напряжений.

2. Пластическая деформация носка и рабочей поверхности;

Пластическая деформация не является причиной износа, если на контактной поверхности удельные усилия ниже сопротивления материала.

3. Трещины в виде сетки разгара;

В процессе работы при нагреве и охлаждении могут возникать сетка трещин из-за циклических термических напряжений.

4. Зональные трещины;

Оправка в некоторых зонах испытывает термические напряжения, что приводит к образованию трещин в этих местах.

5. Оплавление рабочей части оправки;

Данная причина износа оправок зачастую наблюдается только у материалов с высокой температурой плавления.

6. Налипание металла заготовки на оправку.

На налипание металла заготовки на оправку влияет материал заготовки. Если заготовка выполнена из нержавеющей стали или тугоплавких металлов, то налипание металла чаще происходит.

Экстремальные условия работы прошивных оправок в станах винтовой прокатки конструкционных и труднодеформируемых сталей требуют мер по снижению их износа. В станах винтовой прокатки процесс прошивки имеет свою особенность, обусловленную различной траекторией движения металла и интенсивностью деформации в различных слоях металла. При прошивке наибольшую интенсивность деформации испытывают внутренние слои металла, что приводит к деформационному разогреву [42] и молекулярному схватыванию с металлом оправки.

С увеличением требований к трубам все более важным становится химический состав металла заготовок и условия работы прошивной оправки. Для уменьшения износа применяют смазки, усовершенствованную калибровку оправок, а также конструктивные решения, а именно изготовление носка оправки из более прочного материала и упрочняющая обработка поверхности оправки (лазерная обработка, защитные покрытия из тугоплавких металлов). Выбор подходящего материала прошивной оправки имеет решающее значение в предотвращении ее пластической деформации [43,44]. Материал, из которого изготавливается оправка, должен обладать высокой прочностью и устойчивостью



к высоким температурам и другими свойствами. Ресурс оправок зависит от марки стали и может достигать различных значений. Важно также учитывать реакцию металлов оправок и деформируемого металла при прошивке. Материал оправки должен обеспечивать минимальную склонность к свариванию с прокатываемым металлом. Свариваемость материала напрямую зависит от его химического состава и определяется показателем углеродного эквивалента [45, 46]. Для предотвращения трещин, вызванных термическими напряжениями, рекомендуется использовать материалы с высокой теплопроводностью и теплостойкостью, а также улучшать режимы охлаждения оправок.

Техника формирования оксидного покрытия на наружной поверхности оправки для предотвращения ее свариваемости и продления срока службы является одним из методов повышения эффективности работы оправок [47]. Сформированная оксидная пленка на поверхности прошивной оправки действует как теплоизоляционный барьер, который предотвращает налипание металла и уменьшает трение при контакте с прокатываемым материалом. Оправки подвергаются специальной термической обработке для формирования плотного слоя оксидов, что улучшает их характеристики [48-50].

Важно сохранять целостность оксидного слоя при транспортировке оправок, чтобы предотвратить их повреждение. Для этого необходимо избегать ударов и механических воздействий на оправки. Исследования также показывают, что использование специальных материалов для носиков оправок может значительно увеличить их износостойкость и предотвратить сваривание с металлом при работе.

Другие методы изготовления оправок, такие как заковка патрубков или точная горячая штамповка, также позволяют получить оправки с высокой стойкостью. Оправки, изготовленные этими методами, имеют оптимальную структуру и могут быть восстановлены для повторного использования [51, 52]. Однако эти методы требуют строгого соблюдения технологии и специального оборудования.

Для увеличения срока службы оправок применяется метод наплавки на их рабочие поверхности жаропрочных материалов [53–56]. Процесс включает в себя плавление присадочного металла, обладающего высокими свойствами, с помощью различных источников тепла и соединение его с основным металлом детали. Слой, полученный в результате наплавки, может существенно улучшить характеристики оправки, такие как твердость и стойкость к износу. Указанный метод даёт возможность сравнительно быстро сформировать слой наплавленного металла необходимой толщины [57]. Применяется также наплавка металлов со специальными свойствами для улучшения твердости и стойкости к износу рабочих поверхностей изделий из конструкционных сталей [58, 59]. Используя технологию наплавки, можно изготавливать биметаллические изделия, сочетая

высококачественный верхний слой с более дешевым внутренним. Это экономит ресурсы и создает детали с требуемыми свойствами. Для прошивного стана рекомендуется иметь отдельные наборы оправок, адаптированные для работы с различными видами сталей. Это включает углеродистые и низколегированные стали, а также высоколегированные стали, изготовленные из разных материалов и по разным технологиям. Такой подход позволяет обеспечить высокую износостойкость оправок и достичь оптимальных результатов при прошивке. Разработка оправок с износостойким покрытием для выполнения операции прошивки заготовок из стали 20X13 также является перспективным направлением исследования.

В то же время, актуальным вопросом является обеспечение охлаждения рабочего инструмента во время пауз между операциями рабочего цикла и в процессе прокатки [60, 61]. Однако для эффективного охлаждения рабочего инструмента важно выбрать оптимальную конфигурацию внутренней полости оправки. Для предотвращения образования паровой пробки и снижения температуры оправки используются специальные инструменты с глухой полостью для охлаждения и отверстиями в носке для выхода пара [62]. Однако, при прошивке высокохромистых сталей попадание влаги на внутреннюю поверхность гильзы нежелательно из-за интенсивного окалинообразования [63]. Поэтому необходимо подходить к организации охлаждения исходя из особенностей процесса и используемого сортамента прошиваемых заготовок. Различные варианты геометрии полости охлаждения могут значительно влиять на время охлаждения, но при этом необходимо учитывать возможное появление опасных температурных напряжений на поверхности оправки.

Распределение и величина износа оправок зависит от их длины и формы рабочего участка. Износ средней части оправки сначала очень сильный, но со временем уменьшается. Попытки увеличить авторами работы [64] длину оправок приводили к нарушению стабильности процесса прошивки из-за заката. В ходе исследований также было установлено, что оправки, которые гарантируют постоянную степень обжатия по всей длине очага деформации, демонстрируют равномерный износ [65].

Увеличение длины оправок приводит к более равномерному распределению износа, что приводит к меньшему износу рабочей части. Например, при использовании оправок с различными длинами на прошивном стане, оправки с более длинной рабочей частью оказались менее изношенными после прошивки, чем оправки с более короткой рабочей частью. Закон распределения обжатий, заданный изначально, можно применять только при использовании новых валков. По мере износа валков необходимо проводить перенастройку стана, что приводит к несоответствию закона изменения обжатий расчётному значению.

Это может отразиться на качестве продукции.

Сферическая форма оправки является наиболее эффективной для изготовления труб в трубопрокатном производстве, так как обеспечивает высокую износостойкость и стабильность процесса прошивки при изменении настройки стана из-за износа валков. Геометрические характеристики сферической части и раскатного участка оправки, а также общая длина оправок имеют важное значение для качества производимых гильз [66].

Расчет длины рабочей части оправки, удовлетворяющей заданным обжатиям перед носком и при пережиме валков, может быть выполнен с использованием простых соотношений [67]. Для соответствия рабочей части заданному закону изменения толщины стенки необходимо определить её профиль, учитывая по всей области деформации изменения характеристик циклического формоизменения. [68-70].

Авторы работы [71], рассматривая устранение дефектов при прошивке непрерывнолитых заготовок большого диаметра как конкретную производственную задачу, предлагают использовать оправку со сложной рабочей частью, выполненной по знакопеременной кривой.

Современные программные комплексы, предназначенные для моделирования, позволяют исследовать износостойкость прошивных оправок и разрабатывать режимы получения готовой продукции, с использованием минимальных затрат, при этом данный процесс исследования позволяет не прерывать процесс производства [72-77]. Ранее с помощью моделирования в QForm уже была проведена оценка уровня износа прошивных оправок промышленного стана винтовой прокатки «МИСИС-130Д» [78]. Проверка результатов моделирования на сходимость с экспериментальными данными подтвердила их достоверность.

Применение стеклосмазок и защитных покрытий помогает предотвратить налипание металла заготовки на оправку. Как показывают исследования, стойкость оправки возрастает, когда сокращается время её прогрева и уменьшается длительность процесса прошивки.

## **1.5 Выводы по главе**

На основе проведенного анализа литературы о производстве горячекатаных бесшовных труб из легированных сталей и сплавов на основе титана на станах винтовой прокатки, а также об износостойкости рабочих инструментов можно сформулировать следующие выводы:

1 Множество научных работ посвящено получению бесшовных труб с

использованием станов винтовой прокатки. Современные технологии обеспечивают высокое качество продукции и возможность быстрого перехода на производство труб разных типоразмеров;

2 Проблема износа рабочих инструментов станов уже давно является предметом исследований. Износ оправок зависит от различных факторов, таких как материал, из которого они изготовлены, и способ их производства;

3 Изношенные оправки приводят к появлению дефектов на трубах, снижая производительность процесса и увеличивая себестоимость продукции, в связи с чем требуется проведение дополнительных исследований и разработка методов для повышения долговечности оправок;

4 Одним из направлений исследований является поиск способов повышения износостойкости оправок прошивного стана. Для повышения долговечности оправок прошивных станов требуется провести исследования по выбору оптимальных режимов прокатки, подбору материалов и разработке методов изготовления, которые обеспечат высокую износостойкость оправок без ущерба для качества производимой продукции.

## Глава 2. Исследование влияния материала прошивной оправки на ее износостойкость

В процессе изготовления бесшовных труб на станах винтовой прокатки играет важную роль состояние оправок, применяемых при прокатке. Качество получаемых труб зависит от износа оправок, при этом износостойкость оправок зависит от множества факторов, включая химический состав заготовок, свойства металла оправок, адгезию и скольжение металла. Для обеспечения качественной прошивки труб важно, чтобы металл оправок имел более высокие прочностные свойства, чем прокатываемая заготовка. Прошивные оправки из низколегированных сталей, таких как 20ХН4ФА, обычно имеют хорошую износостойкость при производстве гильз из углеродистых сталей. Однако, при работе со сталями, такими как 25ХНМ и 15Х1МФ, износостойкость оправок снижается значительно из-за различных факторов, таких как оплавление, накопление металла и дефекты на рабочей поверхности. Для улучшения стойкости оправок часто используют наплавку жаропрочных сплавов на носик и рабочую часть. Данное исследование направлено на изучение износостойкости оправок из легированных сталей при прошивке труб из стали 20Х13 на стане МИСИС-130Д.

### 2.1 Основные параметры проведения эксперимента

Прокатка заготовок осуществлялась на стане МИСИС-130Д. Заготовки длиной 400 мм и диаметром 60 мм были выполнены из стали марки 20Х13. Предварительно концы заготовок были зацентрированы. С целью образования слоя окислов толщиной не менее 0,1 мм на рабочей поверхности оправки предварительно отжигали при 930 °С с выдержкой 60 мин. Параметры очага деформации стана МИСИС-130Д отражены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры настройки стана

$\beta, ^\circ$	$V_B,$ об/мин	$U_o, \%$	$U_n, \%$	$\xi$	$d_{опр}, мм$	$B_n, мм$	$L_n, мм$	$C, мм$
10/14	30	6-8	11-12	1,11-1,12	43,5	53,4	58,6	32

Практика трубопрокатного производства показывает, что для прокатки труб из углеродистых и низколегированных сталей используют в основном, для изготовления оправок, конструкционные стали марок 20Х2Н4А, 20ХН3А, 20ХН4ФА и другие, которые имеют достаточно высокую износостойкость от 500 до 1000 проходов [37]. Однако при

прошивке легированных и высоколегированных сталей износостойкость оправок резко снижается до нескольких проходов, что обусловлено ужесточением температурных и силовых нагрузок. Например, осевое усилие металла на оправку при прошивке заготовок из нержавеющей стали 12Х18Н10Т выше, чем заготовок из стали 45 в 1,8 раз, скольжение металла относительно инструмента возрастает и увеличивается машинное время прошивки [1]. В связи с этим требуется материал оправок, выдерживающий также условия эксплуатации, но при этом стоимость инструмента должна быть экономически оправданной и приемлемой для массового производства. В ГОСТе 5950-2000 «Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия» представлен для изготовления штампов горячего деформирования ряд марок: хромовольфрамованадиевые 4ХСМФ, 4Х5МФС, 4Х5МФ1С, 3Х3М3Ф, и хромовольфрамомолибденованадиевые 4Х3ВМФ, 4Х4МВФС, 4Х2СВ2МФ и 5Х3В3МФС.

В последние годы на большинстве трубопрокатных агрегатов значительную долю сортамента занимают коррозионностойкие трубы из стали 20Х13. Наибольшие сложности технологии прокатки из НЛЗ обусловлены низкой износостойкостью прошивных оправок, традиционно изготавливаемых из сталей марок 20ХН4ФА, 20Х2Н4А, 20ХН3А без выхода воды и пара из внутренней полости оправки во время прошивки.

Для исследования износостойкости прошивных оправок были выбраны шесть легированных марок жаропрочных сталей, применяемые для изготовления штампов горячего деформирования, эксплуатируемых в близких температурно-деформационных условиях: 20Х2Н4А, 4Х5МФС, 3Х2В8Ф, 3Х3М3Ф, 4Х4ВМФС, 5Х3В3МФС. Данные марки стали, имеющие различный химический состав и свойства, были ранжированы по углеродному эквиваленту (таблица 2). В таблице также указана условная стоимость этих сталей относительно стали 20Х2Н4А.

Эксперимент проводился следующим образом:

- 1 Заготовки были зацентрированы на токарном станке, затем нагреты в камерной печи до 1180 °С и выдержаны там в течение 60 минут;
- 2 Каждая заготовка была обработана на новой оправке, которую после процесса охлаждали в воде до комнатной температуры. Вес оправок измеряли до и после процесса, фиксировали изменения в массе и делали фотозаписи;
- 3 Далее последующие партии заготовок обрабатывали на тех же оправках, повторяя процесс взвешивания и фотофиксации после каждой обработки;
- 4 Процесс повторялся для нескольких партий заготовок, пока не проявился явный износ или налипание на оправках;

5 На основе полученных данных строили зависимость изменения массы оправки от количества обработанных заготовок;

6 Для оценки материалостойкости оправок из разных сталей рассчитывали ее по потере массы с использованием формулы:

$$q_{\text{опр}} = \frac{G}{\Delta M}$$

где  $G$  – масса заготовки, кг;

$\Delta M$  – изменение массы оправки, г.

7 Для сравнения материалостойкости сталей анализировали их химический состав, вычисляя углеродный эквивалент по соответствующей формуле:

$$C_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{13} + \frac{V}{14} + \frac{P}{2}$$

Таблица 2 – Химический состав легированных сталей

№	Сталь	Массовая доля элемента, %								$C_э$	Условная стоимость 1 тонны
		C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Ni	V		
1	4X5MΦC	0,32- 0,40	0,8- 1,2	0,15- 0,4	4,5- 5,5	1,2- 1,5	-	-	0,3- 0,5	1,54	1,94
2	4X4BMΦC	0,37- 0,41	0,6- 1,0	0,2- 0,5	3,2- 4,0	1,2- 1,5	0,8- 1,2	-	0,6- 0,9	1,32	1,99
3	5X3B3MΦC	0,45- 0,52	0,5- 0,8	0,3- 0,6	2,5- 3,2	0,8- 1,0	3,0- 3,6	-	1,5- 1,8	1,31	2,5
4	3X3M3Φ	0,27- 0,31	0,2- 0,40	0,3- 0,5	2,8- 3,5	2,5- 3,0	-	-	0,4- 0,6	1,09	2,22
5	3X2B8Φ	0,3- 0,4	0,15- 0,40	0,15- 0,40	2,2- 2,7	-	7,5- 9,0	-	0,2- 0,5	0,95	3,05
6	20X2H4A	0,16- 0,22	-	0,3- 0,6	1,25- 1,65	-	-	3,26- 3,65	-	0,69	1,0

## 2.2 Анализ результатов эксперимента

В процессе исследований прошивали заготовки, диаметром 60 мм, изготовленные из стали 20Х13, прошивали при угле подачи  $10^\circ$ , коэффициенте вытяжки  $\mu = 2,2$  и частоте вращения валков 30 об/мин. Время прошивки составило около 13 секунд. Это время сравнимо с временем, необходимым для производства гильз длиной до 10 м на современных прошивных станах ТПА. На рисунке 1 представлен внешний вид оправок после прошивки. Оправка, изготовленная из стали марки 20Х2Н4А, деформировалась и неравномерно изнашивалась после первого прохода и была признана, по экспертной оценке, непригодной для дальнейшего использования, а на других оправках наблюдали оплавление и деформацию носка различной степени. Длина оправок из-за износа постепенно уменьшалась, при этом наибольшие изменения формы были замечены у оправок из сталей 3Х3М3Ф и 3Х2В8Ф. В процессе эксплуатации на сферической рабочей поверхности оправок образовались следы износа в форме рисок глубиной от 0,5 до 0,7 мм, что затрудняло дальнейшее использование данных оправок. Износ оправок оценивался на основе изменения их массы в процессе прошивки, средняя масса оправок составляла 860 грамм.



Рисунок 1 – Состояние поверхности оправок после прошивки 3-х заготовок в сравнении с изначальным профилем



На рисунке 2 продемонстрированы данные о массе прошивных оправок, полученные после трех операции прошивки. Прошивка осуществлялась при длительном соприкосновении с раскаленным металлом до 1180 °С.

Износостойкость оправок из стали 4Х5МФС гораздо выше, чем у оправок, изготовленных из других материалов. Об этом свидетельствует потеря массы оправок, минимальное значение которой 23 г после прокатки заготовок наблюдается у оправки из 4Х5МФС, потери в пределах 30 - 40 г характерны для других рассматриваемых материалов (рисунок 2а).

Особое внимание уделяется анализу зависимости потери массы оправки от углеродного эквивалента материала, используемого при её изготовлении (рисунок 2б). Показатель углеродного эквивалента отражает свариваемость стали и в какой-то мере может служить оценкой адгезии этой стали к металлу прошиваемой заготовки. Исследование показало, что с ростом углеродного эквивалента в среднем потеря массы во время прошивки становится меньше.

По данным о потере массы оправки рассчитывали материалостойкость оправок из разных марок стали. Результаты сравнений материалостойкостей оправок представлены на рисунке 2в.

Визуальные дефекты и изменение массы оправок после прошивки объясняются адгезионным взаимодействием между металлом и оправкой. Чтобы уменьшить вероятность износа оправок, необходимо использовать материалы, обладающие минимальной склонностью к адгезии с материалом заготовки. Благодаря правильно подобранному материалу возможно продлить срок службы оправок и снизить затраты на их замену.

Анализируя состояние поверхности оправок после использования их при прошивке, можно сделать вывод, что установленное в рамках эксперимента время прошивки является предельным для использованных материалов: после трёх операций прошивки все оправки становятся непригодными к дальнейшему использованию. Важно подчеркнуть, что существенное ограничение было связано с массой прошивных оправок — она была значительно ниже массы оправок, используемых на промышленных прошивных станах. Это, а также увеличенное время прошивки, оказало решающее влияние на износ носка и рабочей поверхности оправок. Однако эти условия позволили наглядно продемонстрировать механизм и степень износа, характерные для промышленных условий с определёнными температурами и временем прошивки.

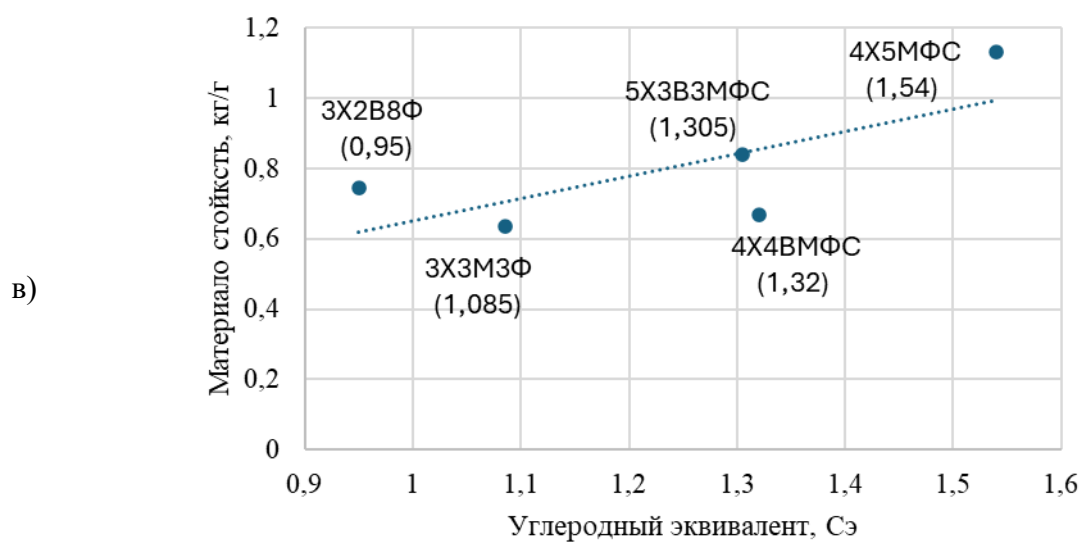
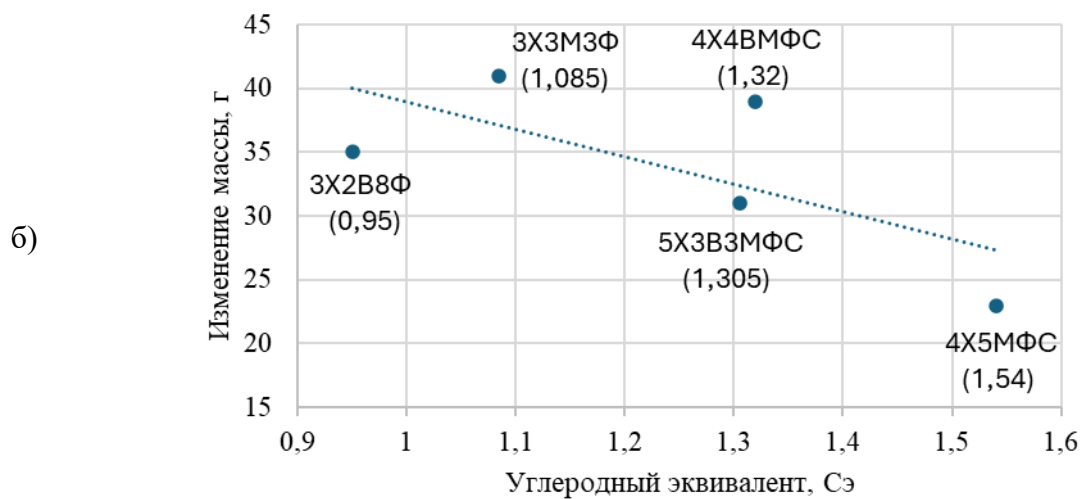
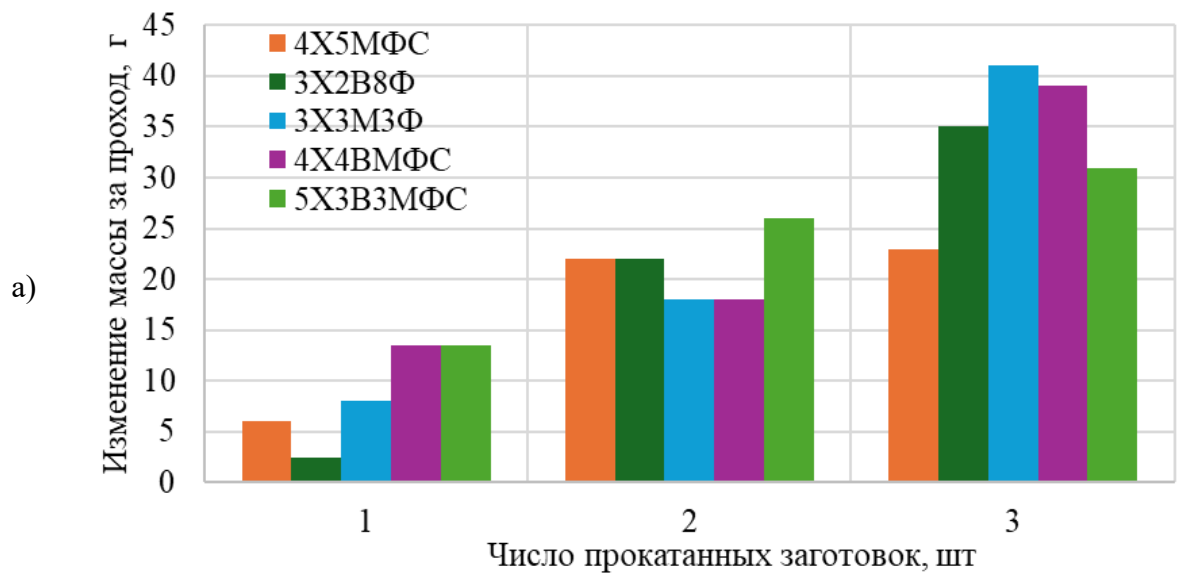


Рисунок 2 – Влияние Сэ на изменение массы оправок и их материалостойкости после 3 прошивок: (а) Изменение массы за проход; (б) Изменение массы за 3 прохода; (в) Материалостойкость

Визуальные дефекты и изменение массы оправок после прошивки объясняются адгезионным взаимодействием между металлом и оправкой. Чтобы уменьшить вероятность износа оправок, необходимо использовать материалы, обладающие минимальной склонностью к адгезии с материалом заготовки. Благодаря правильно подобранному материалу возможно продлить срок службы оправок и снизить затраты на их замену.

Анализируя состояние поверхности оправок после использования их при прошивке, можно сделать вывод, что установленное в рамках эксперимента время прошивки является предельным для использованных материалов: после трёх операций прошивки все оправки становятся непригодными к дальнейшему использованию. Важно подчеркнуть, что существенное ограничение было связано с массой прошивных оправок — она была значительно ниже массы оправок, используемых на промышленных прошивных станах. Это, а также увеличенное время прошивки, оказало решающее влияние на износ носка и рабочей поверхности оправок. Однако эти условия позволили наглядно продемонстрировать механизм и степень износа, характерные для промышленных условий с определёнными температурами и временем прошивки.

С целью снижения машинного времени процесса длины заготовок уменьшили в два раза. Это позволило сократить время процесса до 7,5 секунд и увеличить количество прошивок до 6. Между прошивками поверхность оправки контролировали также на наличие и характер налипания частиц металла заготовки. На рисунке 3 продемонстрированы оправки после прошивки пяти заготовок.

Начальная стадия износа оправок напрямую зависит от химического состава материала и его механических свойств. Эксперимент показал, что оправки из 4X5МФС обладают наибольшей стойкостью несмотря на то, что следы износа на ней были замечены после второй прошивки, развития износа при последующих прошивках не наблюдалось. Оправкам из материалов 20X2Н4А, 3X2В8Ф и 5X3В3МФС характерно зарождение незначительного количества дефектов после трех прошивок. Появление данных дефектов не вызывает проблем с эксплуатационными свойствами. Однако последующие операции прошивки увеличивают общий объем износа материала. У материала оправки из 4X4ВМФС первые следы дефектов поверхности появились только после четвертой прокатки, при этом скорость их развития была самой низкой. После пяти прошивок состояние рабочей поверхности всех оправок ухудшилось, на ней появились дефекты разного рода. Дальнейшую работу после шестой заготовки прекратили и провели сравнительный осмотр оправок. Визуальный осмотр показал, что все оправки остались в своей начальной конфигурации, за исключением одной, изготовленной из стали 20X2Н4А. Полученные результаты представлены на рисунке 4.

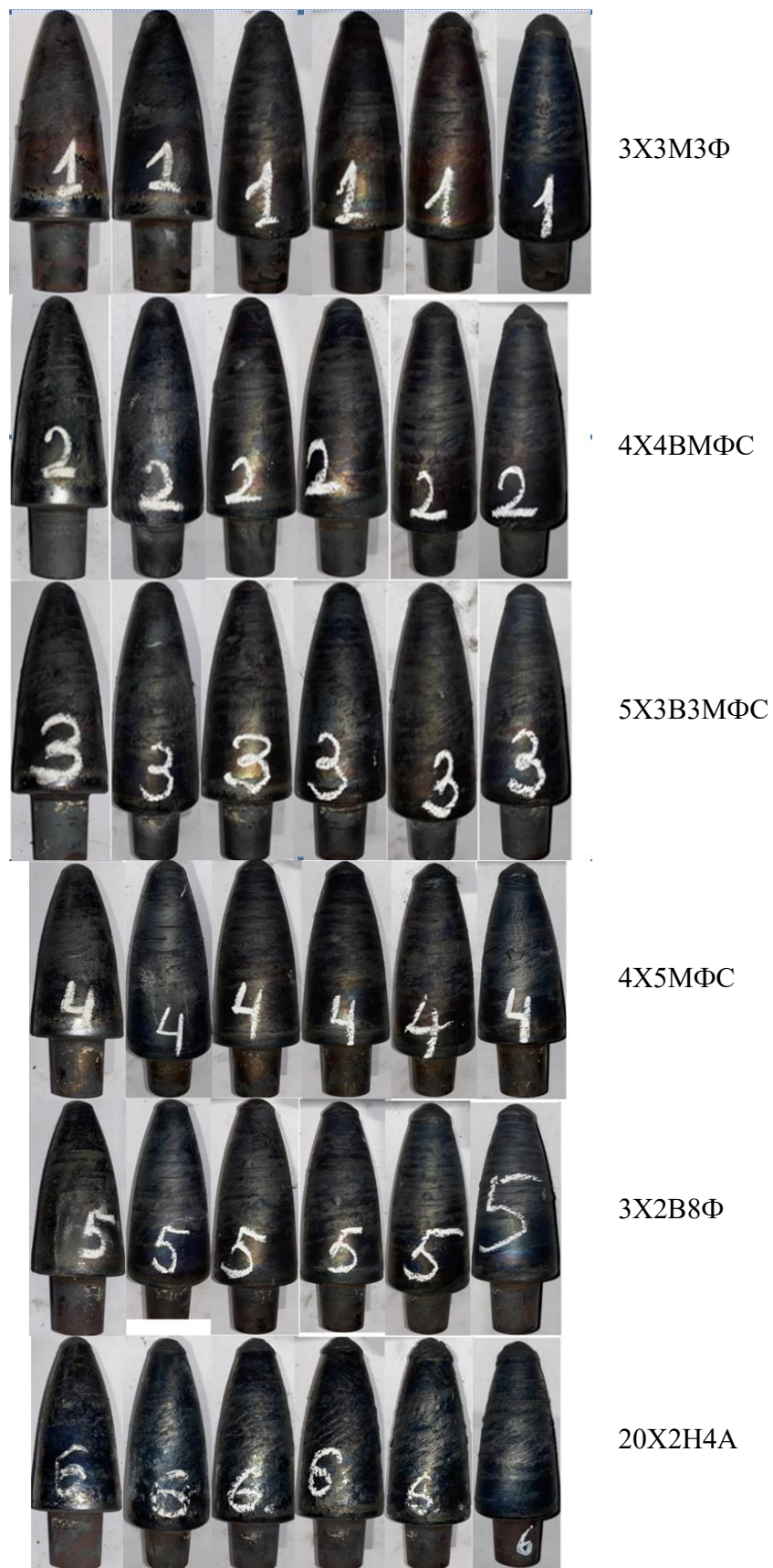


Рисунок 3 – Внешний вид оправок, после прошивки 5 заготовок

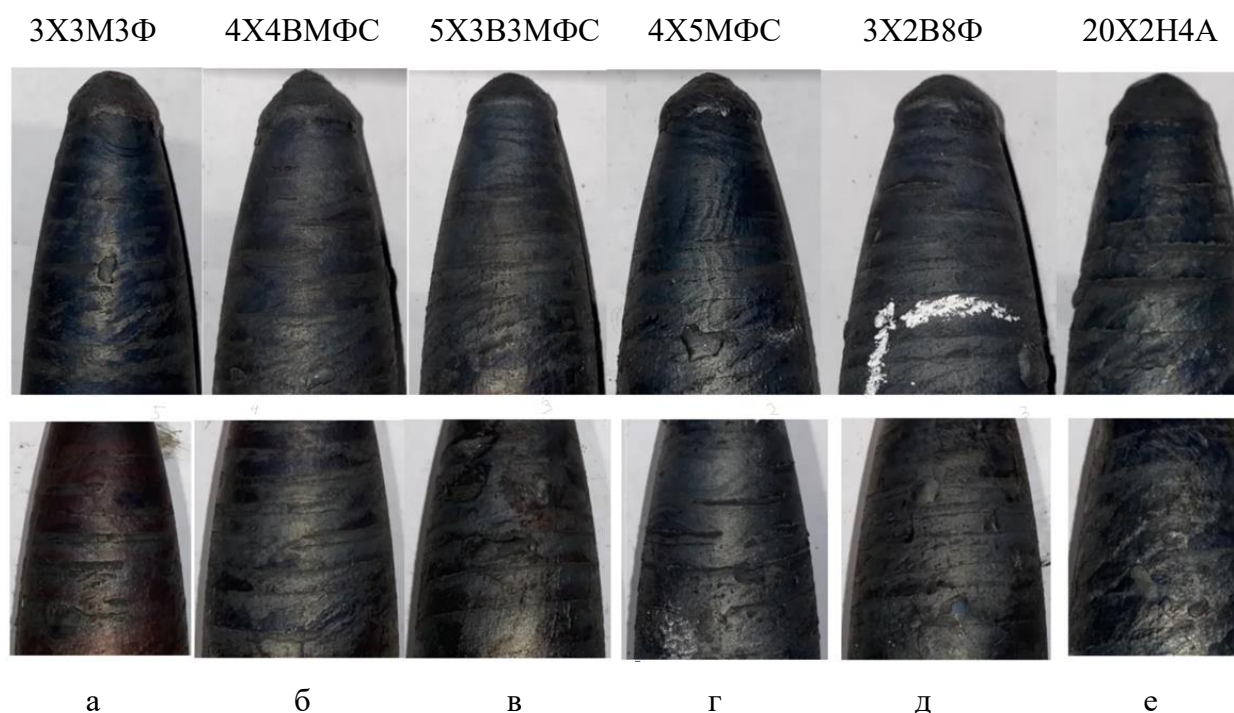


Рисунок 4 – Состояние поверхности прошивной оправки, с фиксацией момента начала налипания металла: (а) 5шт, (б) 4шт, (в) 3шт, (г) 2шт, (д) 3шт, (е) 3шт

В процессе проведения эксперимента было выявлено, что чем выше углеродный эквивалент материала оправки, тем меньше потеря массы в процессе прошивки. Среди рассматриваемых материалов у оправок 4X5MФC обладает наивысшим Сэ, что способствует минимизации потери массы, при этом сокращение массы за одну операцию прошивки составляет менее 5 г. Хотя поверхностные дефекты на оправке из данного материала появились раньше, чем у других оправок, но по мере числа прошивок не наблюдалось резкого развития дефектов и ухудшения состояния поверхности. Углеродный эквивалент материала оправки 4X4BMФC (таблица 1) ниже, чем у 4X5MФC, что приводит к увеличению потери массы до 9 г после шести прошивок. Повышенное количество поверхностных дефектов и более низкий углеродный эквивалент оправки из стали 3X3M3Ф привели к увеличению потери массы в процессе прошивки до 12 г, что отражается в потере профиля (рисунок 5а). Следовательно, при выборе материала для изготовления оправок необходимо обращать внимание на величину потери массы. Эта характеристика напрямую связана с углеродным эквивалентом, отображенным на рисунке 5б, а также со стойкостью материала (рисунок 5в).

Исходя из полученных данных, можно заключить, что среди исследованных материалов сталь марки 4X4BMФC оказалась наиболее подходящей с точки зрения внешнего вида (рисунок 6), а оправка, изготовленная из стали марки 4X5MФC, продемонстрировала лучшие результаты по параметру материалостойкости (рисунок 5в)

процессе эксперимента на стане МИСИС–130Д.

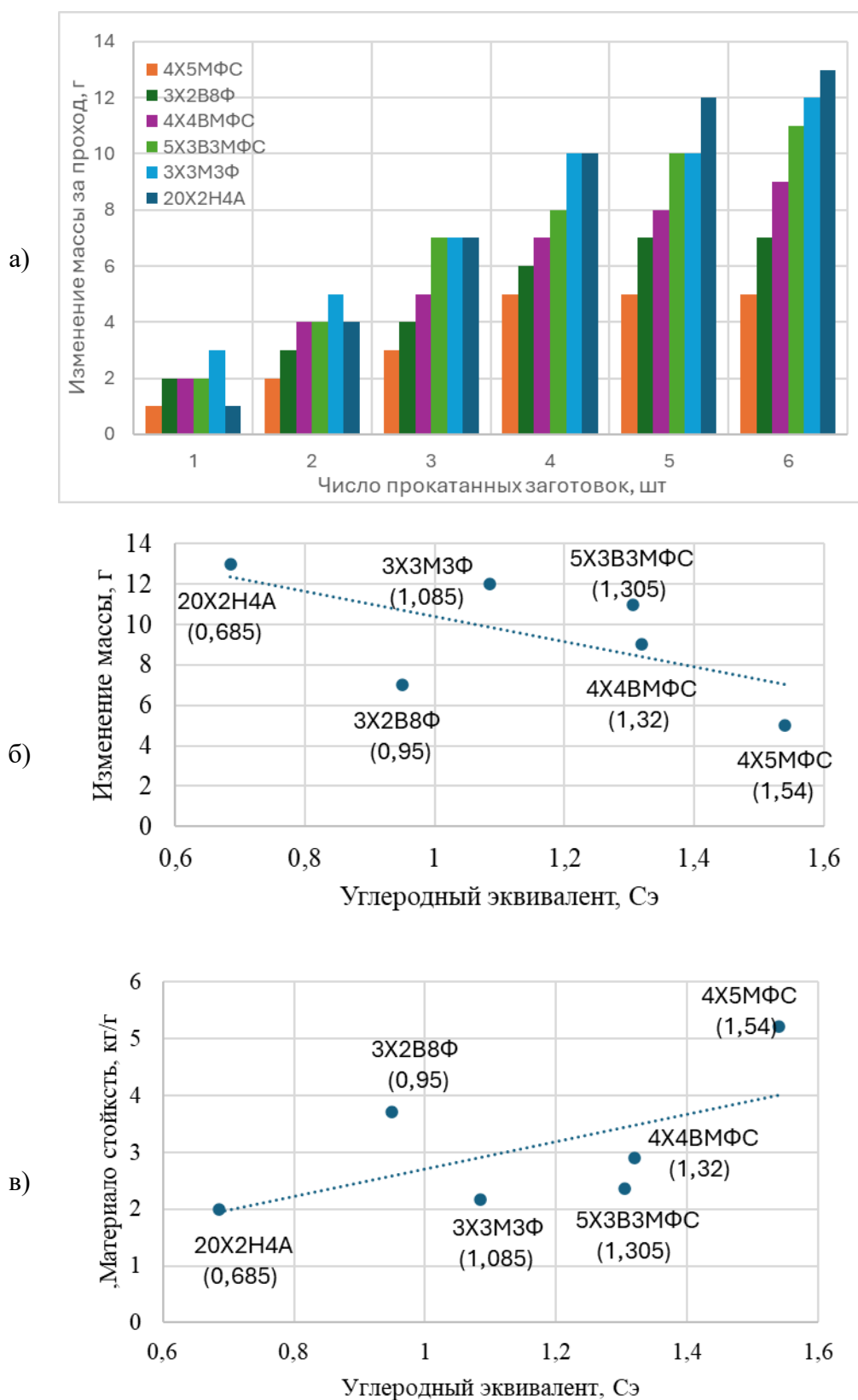


Рисунок 5 – Влияние Сэ на изменение массы оправок и их материалостойкости:

(а) Изменение массы за проход, (б) Изменение массы за 5 проходов, (в) Материалостойкость

Увеличение угла подачи является эффективным методом снижения износа оправок прошивного стана. Изменение данного фактора приводит к уменьшению времени прошивки, однако при этом происходит увеличение частного обжатия и осевого усилия на оправку со стороны металла. В ходе проведения третьего эксперимента время прошивки было сокращено до 6 секунд благодаря увеличению угла подачи до 14°.

Повышение угла подачи до 14°, приводит к увеличению усилия на оправку на 30 % при прошивке. Однако после 5 прошивок существенных дефектов на поверхности оправки не наблюдалось практически у всех рассматриваемых оправках, за исключением оправки из стали 20X2H4A. На данной оправке визуально наблюдаются риски после прошивки 2 заготовок. На рисунке 6 видно, что появление рисок и деформация носка происходит у оправок, изготовленных из 5X3B3MΦC и 4X4BMΦC, после 5 прошивок.

Результаты визуального осмотра согласуются с измерениями потери массы оправки, проведёнными в ходе прошивки (рисунок 7а, 7б). Согласно результатам измерений, потеря массы в среднем уменьшилась на 3–4 грамма, при этом также возросло значение материалостойкости (рисунок 7в). Сокращение времени прошивки при увеличении угла подачи с 10 до 14° стана привело к значительному увеличению износостойкости оправок несмотря на рост осевого усилия на оправку.

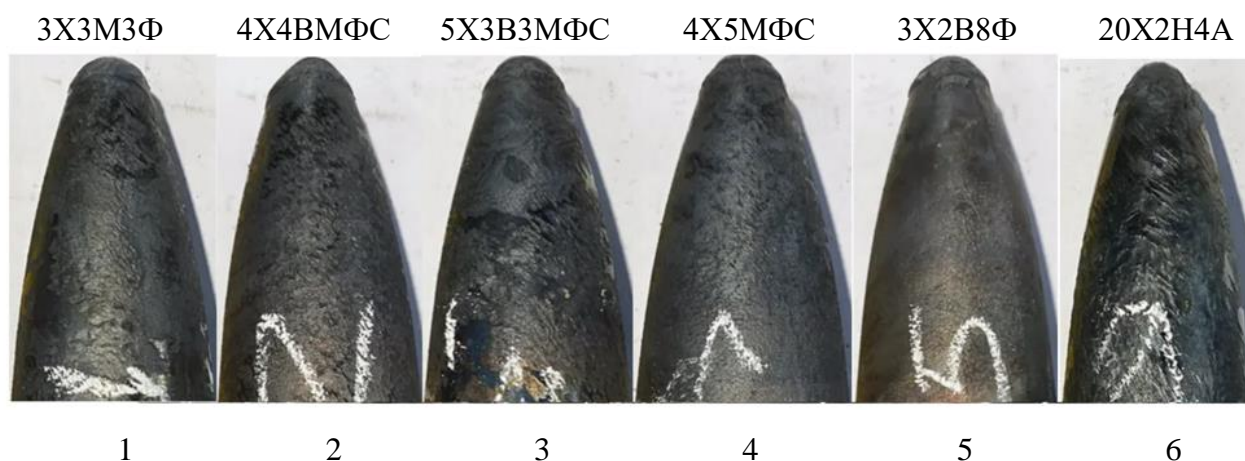


Рисунок 6 – Состояние рабочей поверхности и носка оправок после прошивки пятой заготовки.

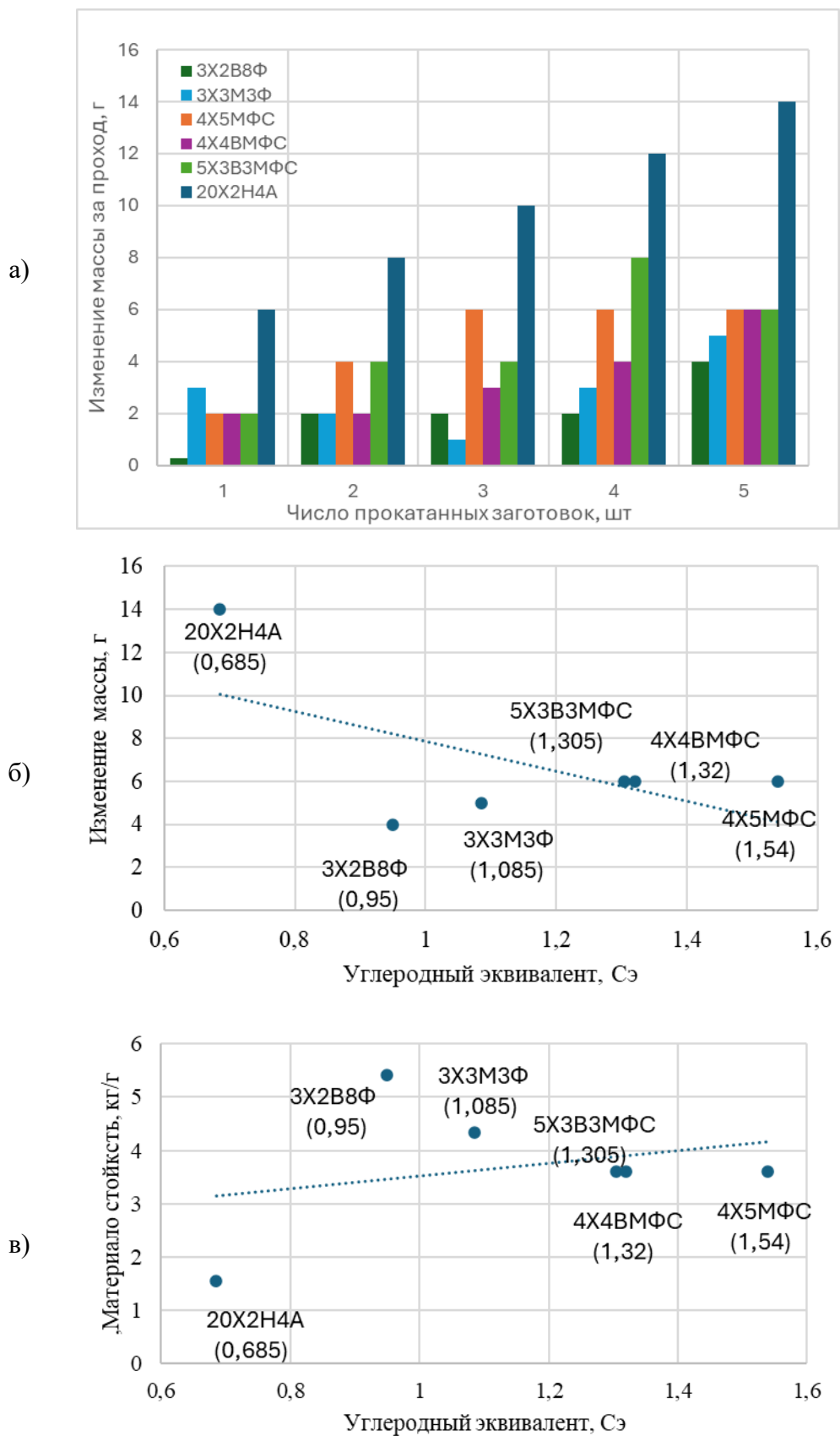


Рисунок 7 – Изменение массы оправок за проход (а), изменение массы оправки суммарно за 5 проходов (б) и материалостойкость (в) после пяти прошивок в зависимости от углеродного эквивалента



Важно также в подведении итогов данного этапа исследования сравнивать экономическую эффективность применения оправок из различных марок стали, в связи с тем, что в производстве конечная стоимость продукции зависит от всех затраченных на ее производство ресурсов, а применение оправок повышенной стоимости без значительной разницы с аналогами повышает ее конечную стоимость.

Принимая во внимание стоимость изготовления оправок механической обработкой резанием одинаковой при изготовлении их из различных сталей можно определить и сравнить экономическую эффективность применения таких сталей:

$$\mathcal{E} = \frac{y}{M_3 \cdot N}, \text{ руб/т, где}$$

где  $U$  – условная стоимость металла для оправки, руб;  $M_3$  – масса заготовки, т;  $N$  – количество прокатанных заготовок.

Однако здесь не учитываются время на замену оправок и потеря производительности стана при замене оправок.

Исходя из стоимости материала оправок и результатов эксперимента, оправки из легированной стали 4X5МФС и 4X4ВМФС показали наибольшую стойкость к износу при этом обладая более низкой себестоимостью относительно других рассматриваемых материалов.

В итоге, после проведения всех экспериментов, можно сказать, что применение в целом легированных инструментальных сталей является хорошим решением при производстве прошивных оправок в связи с набором свойств присущих данным видам сталей.

В состав легированных инструментальных сталей входят добавки молибдена, хрома, ванадия или титана, что способствует тому, что данные стали обладают рядом уникальных свойств, которые делают их незаменимыми в различных отраслях промышленности:

- Хорошая прокаливаемость обеспечивает равномерное распределение твёрдости по всему сечению детали после термической обработки. Это свойство позволяет изготавливать инструменты с высокой точностью и надёжностью;

- Твёрдость легированных инструментальных сталей делает их устойчивыми к износу и позволяет обрабатывать различные материалы, включая закалённую сталь;

- Повышенная износостойкость обеспечивает долговечность инструментов даже при интенсивном использовании;

- Прочность и высокий уровень вязкости позволяют инструментам выдерживать значительные нагрузки без разрушения.

- Теплостойкость и устойчивость к перегреву делают легированные инструментальные стали подходящими для работы в условиях высоких температур.

Эти свойства делают легированные инструментальные стали идеальным выбором для производства рабочих инструментов в различных отраслях промышленности, где требуется высокая прочность и надёжность инструментов.

### **2.3 Выводы по главе**

В ходе исследования было установлено, что:

- 1 Износ оправок в основном обусловлен адгезионными процессами;
- 2 Существенное влияние на износ оказывает машинное время работы стана, сокращение которого приводит к увеличению срока службы оправок;
- 3 В ходе исследования подтверждены результаты моделирования и проанализировано влияние угла подачи на износостойкость;
- 4 Установлено, применение материалов с высоким углеродным эквивалентом при производстве оправок повышает материалостойкость;
- 5 Наиболее износостойкими и менее склонными к налипанию оправками оказались оправки из сталей 4X5МФС и 4X4ВМФС, также данные материалы обладают низкой себестоимостью при производстве относительно других рассматриваемых в данном эксперименте марок стали.

### **Глава 3. Исследование влияния основных технологических факторов при прошивке на износостойкость оправки**

В процессе разработки технологического процесса производства бесшовных труб из легированной стали и титановых сплавов на стане МИСИС-130Д для прошивки заготовок в гильзы использовали бочковидные валки. Исследование влияния различных факторов на процесс прошивки и износостойкость оправок важно для улучшения процесса и получения высококачественных труб.

Чтобы сделать процесс получения тонкостенных труб высокого качества более результативным, стоит использовать двухвалковой стан винтовой прокатки вместе с направляющими линейками. Этот тип стана обеспечивает универсальное формоизменение металла и предоставляет широкие возможности для настройки различных технологических параметров.

На качество конечной трубы влияют следующие факторы:

- угол подачи;
- форма оправки;
- углы конусности рабочей поверхности валков;
- установка валков и оправки.

Проведенные исследования показали, что изменение коэффициента вытяжки, обжатия в пережиме рабочих валков, расстояния между линейками и позволяют увеличить срок службы оправок без ухудшения качества труб.

Угол подачи валков является ключевым фактором в процессе винтовой прокатки, влияющим на стойкость оправок. Эксперименты показали, что благодаря углу подачи, значение которого находится в диапазоне  $10-16^\circ$ , возможно обеспечить более стабильный процесс получения труб высокого качества.

Коэффициент овализации также важен для точности получаемых труб. Оптимальное значение этого коэффициента обычно находится в пределах 1,06–1,2. Изменение этого параметра может влиять на скорость прокатки и точность формоизменения металла. В данной главе рассмотрено влияние технологических факторов, таких как частота вращения валков, угол подачи и коэффициент овализации, на износостойкость оправки с применением современных программ для моделирования QForm и SolidWorks.

#### **3.1 Компьютерное моделирование процесса прошивки заготовок**

Трехмерная модель очага деформации для оценки степени износа прошивной

оправки была построена с помощью программного комплекса SolidWorks для стана МИСИС-130Д, при этом диаметр прошивной оправки 43,5 мм.

В качестве материала заготовки использовали сталь 20Х13, диаметр заготовки 60 мм, а длина 400 мм. Заготовки имели зацентровочные углубления на обоих торцах. После построения очага деформации в SolidWorks модель импортирована в QForm.

В ходе исследования рассматривали несколько вариантов процесса прошивки заготовок с частотой вращения валков 30 и 80 об/мин, при углах подачи 10 и 16 ° и коэффициентами овализации равными 1,1 и 1,2.

В процессе настройки очага деформации для выполнения прошивки на стане МИСИС-130Д было определено, что заготовка будет нагреваться перед прошивкой до 1200 °С. Параметры рабочих инструментов и заготовки отражены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры рабочих инструментов и заготовки

Размеры					Материалы		
D <sub>в</sub> , мм	l <sub>в</sub> , мм	d <sub>опр</sub> , мм	D <sub>з</sub> , мм	l <sub>з</sub> , мм	Валок	Оправка	Линейка
412	320	43,5	60	400	Сталь 45	Сталь 4Х5МФС	Сплав ХН55МБЮ

Частота вращения валков для варьируемых углов подачи и коэффициента овализации составляла 57 об/мин, а значение угла подачи для варьируемой частоты вращения валков и коэффициента овализации составляло 15°.

Расчет износа оправки производился с применением стандартной подпрограммы QForm, которая применяется для процессов горячей обработки металлов давлением. Формула расчета приведена ниже и учитывает скорость скольжения металла, контактное давление, время контакта заготовки с инструментом.

$$W_p = \int_0^t \frac{K_p \cdot P^a \cdot V_\tau^b}{\sigma^a} dt ,$$

где W<sub>p</sub> — износ инструмента от радиальных давлений;

K<sub>p</sub>, a, b — экспериментальные коэффициенты;

P — контактное давление, МПа;

V<sub>τ</sub> — скорость скольжения металла, м/с;

σ — предел текучести материала инструмента, МПа;

t — время контакта заготовки с инструментом, с.

### 3.2 Анализ влияния технологических параметров на износ прошивной оправки

Анализ моделирования показал неравномерный характер износа прошивной оправки. Протяжённость изношенного участка оправки в среднем составляет 100 миллиметров. Глубина износа увеличивается по мере продвижения от точки соприкосновения металла с передней частью оправки до её конического участка, после чего уменьшается к калибровочному участку оправки. В ходе исследования анализировали влияние частоты вращения валков, угла подачи и коэффициента овализации на глубину износа поверхности оправки, результаты отражены на рисунке 9. При прошивке заготовок максимальное значение износа от нормального напряжения достигает 0,044 мм за один проход. В связи с тем, что износ от нормального напряжения показывает более высокое значение, а значит и влияние на поверхность оправки, было принято решение подробнее изучить влияние нормального напряжения на износ поверхности прошивной оправки, а также степень износа оправок в зависимости от нескольких варьируемых факторов. Для визуализации значений износа было построена трехмерная модель, отражающая глубину износа на поверхности оправки в QForm (рисунок 8).

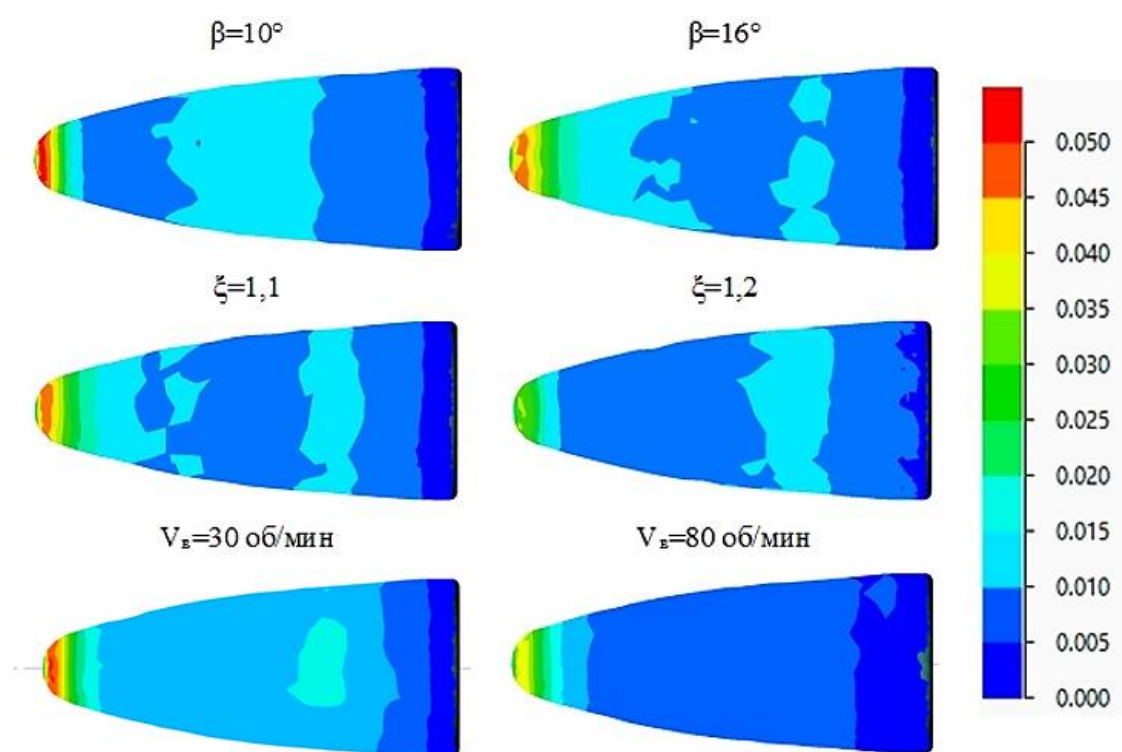


Рисунок 8 – Трехмерная модель, отражающая глубину износа в зависимости от варьируемого фактора, мм

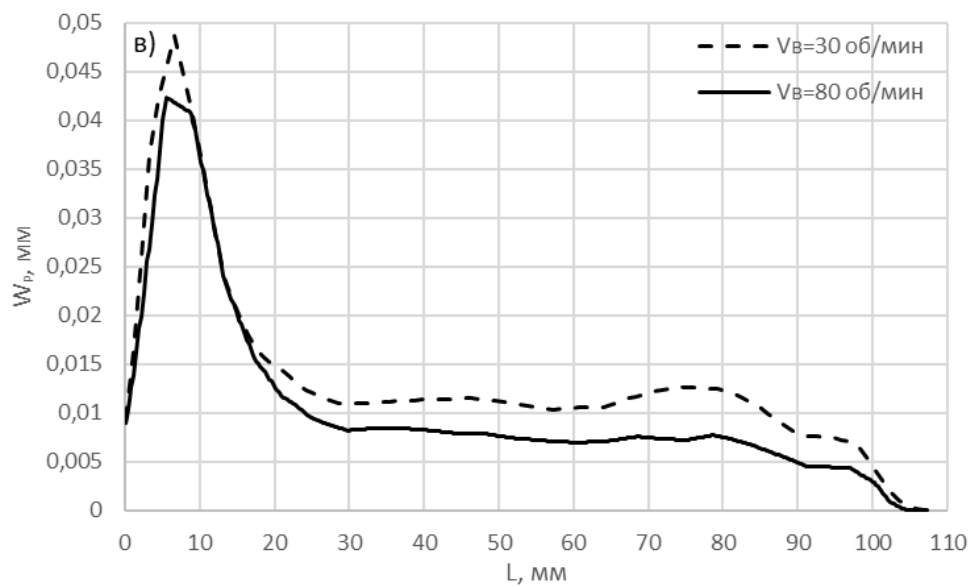
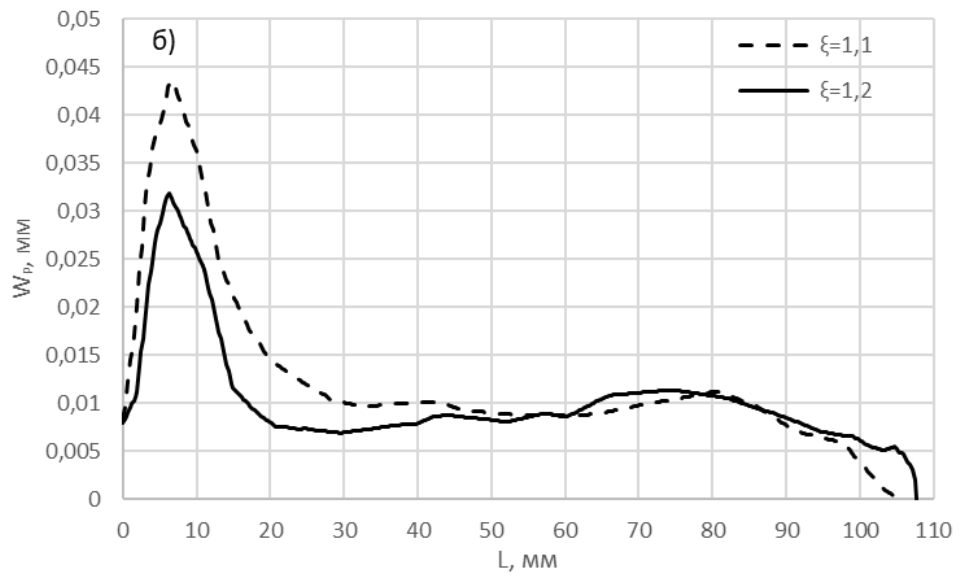
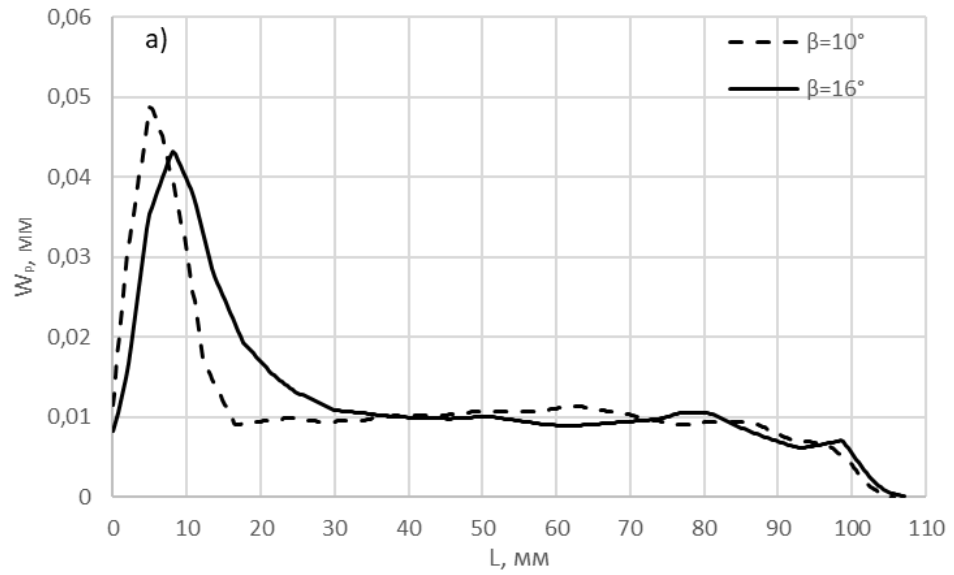


Рисунок 9 – Распределение глубины износа  $W_p$  оправки от радиального давления в зависимости от: (а) угла подачи; (б) коэффициента овализации; (в) частоты вращения валков

Анализ полученных результатов показывает, что снижение износа поверхности оправки наблюдается при сокращении времени прокатки. При увеличении частоты вращения валков снижается время контакта заготовки с оправкой с 3,8 до 2,4 с и, как видно из графиков, повышается износостойкость оправки (рисунок 9в). Значение износа при повышении коэффициента овализации в точке максимального значения износа приводит к увеличению износостойкости на 27 % (рисунок 9б). Повышение угла подачи способствует повышению износостойкости за счет увеличения площади контакта заготовки с прошивной оправкой, значение износа в точке максимального износа сферической части оправки уменьшается на 13 % (рисунок 9а). Поле износа показывает неравномерность степени износа на разных участках оправки в процессе эксплуатации (рисунок 8). Максимальная глубина износа наблюдается в начале сферической части при этом, на торце носика оправки наблюдается минимальный износ, из-за сниженного контакта с металлом. При увеличении угла подачи в сферической части снижается износ, а также уменьшается область повышенного износа в зоне перехода от сферической части к конической. Когда частота вращения валков увеличивается, износ распределяется равномерно от центра сферической зоны оправки до её калибровочной части. Если коэффициент овализации снижается, то глубина износа на сферическом участке оправки возрастает.

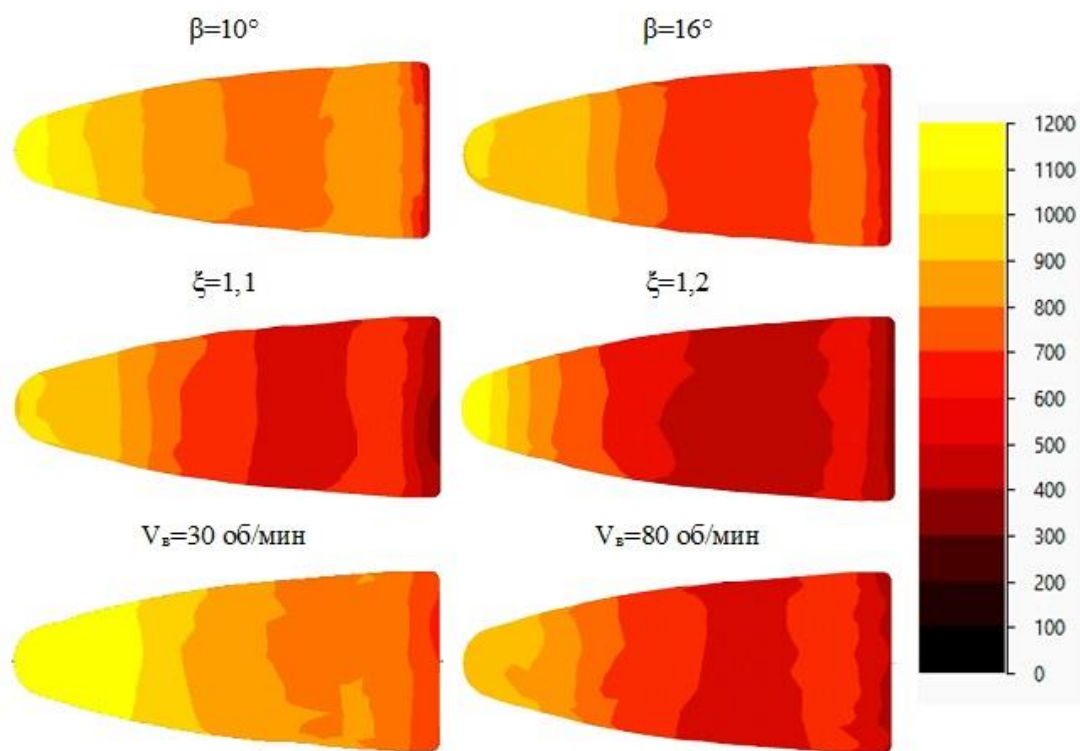


Рисунок 10 – Поле температур в зависимости от варьируемого фактора, °С

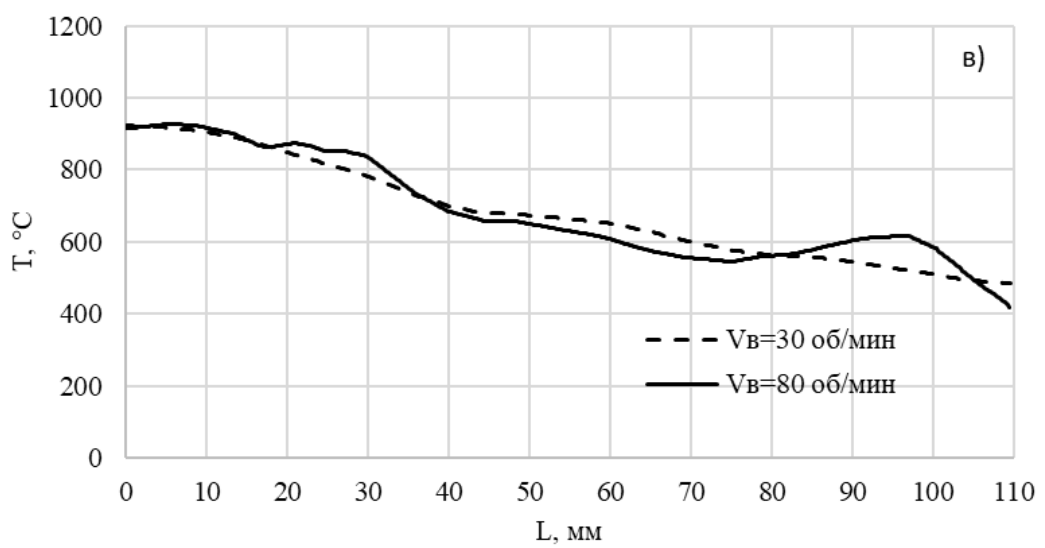
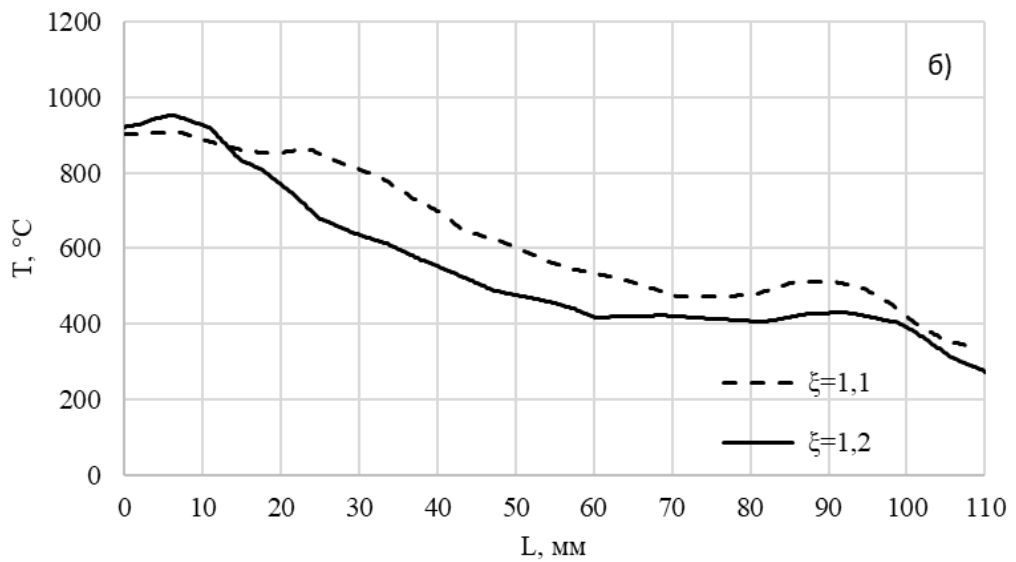
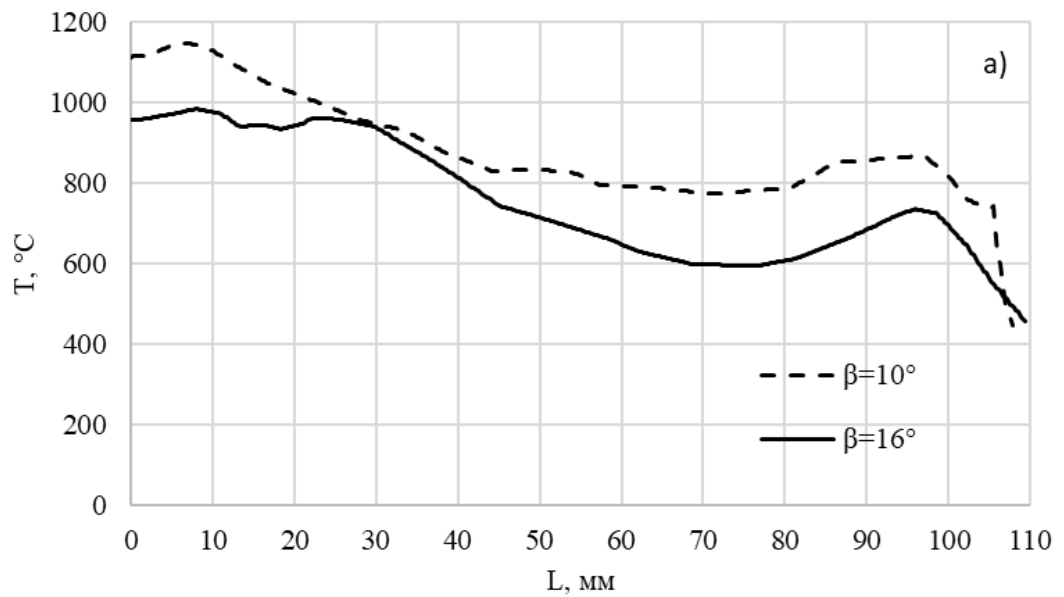


Рисунок 11 – Распределение температуры по длине оправки в зависимости от угла подачи (а), коэффициента овализации (б), частоты вращения валков (в)



В данном исследовании была проанализирована взаимосвязь между износостойкостью оправки и температурой её поверхности после прошивки. На рисунке 11 продемонстрировано распределение температур по длине оправки, на их основе построено поле температур (рисунок 10). В таблице 4 указано время контакта заготовки с оправкой при различных факторах.

Таблица 4 – Длительность контакта оправки с прокатываемой заготовкой

	$\beta=10^\circ$	$\beta=16^\circ$	$\xi=1,1$	$\xi=1,2$	$V_B=30$ об/мин	$V_B=80$ об/мин
Время, с	4,87	3,09	3,82	2,62	6,36	2,34

Представленные графики температур и износа позволяют сделать вывод, что сокращение времени прошивки приводит к уменьшению температуры рабочего инструмента и увеличению его износостойкости.

Следует отметить, что результаты компьютерного моделирования идентичны физическому износу оправки (рисунок 12), зафиксированному при прошивке заготовок из стали 20X13. Фактический износ оправки составляет на наиболее нагруженном участке 0,03–0,05 мм.

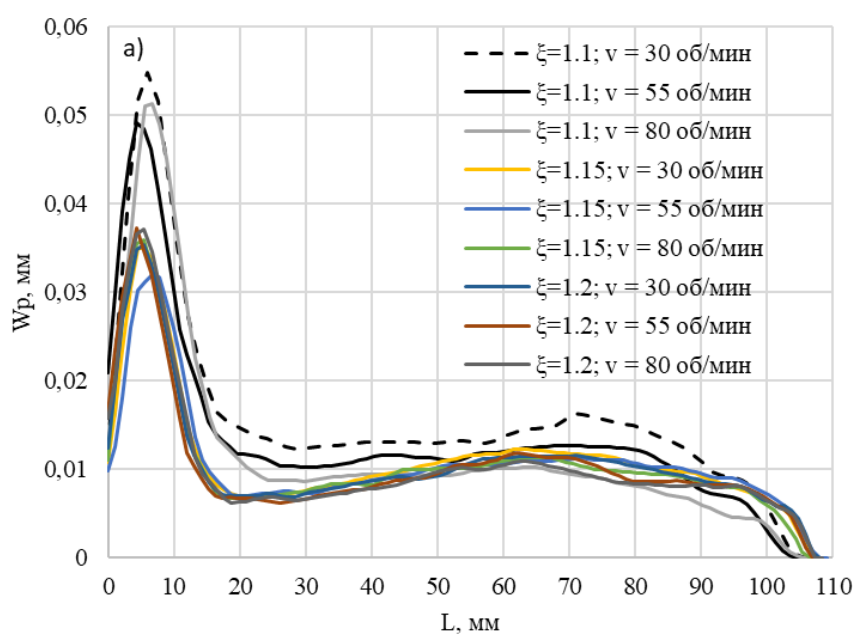


Рисунок 12 – Оправка из стали 4X5МФС после одного прохода

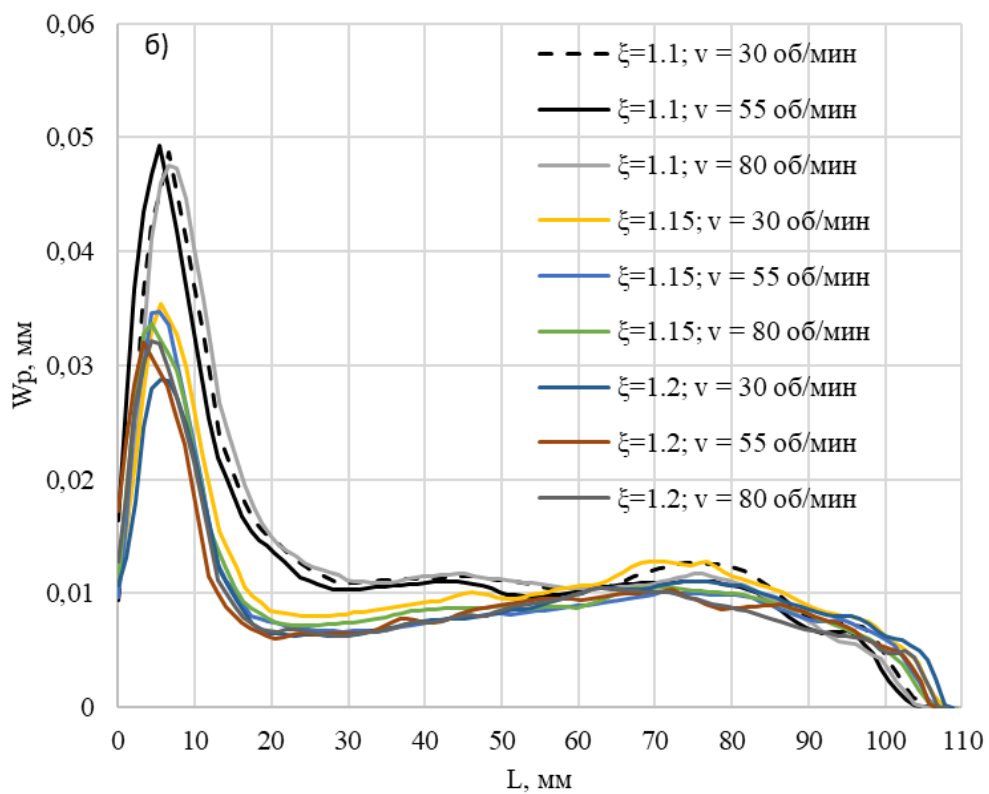
### 3.3 Моделирование процесса прошивки при различных варьируемых факторах

В ходе исследования рассматривали несколько вариантов процесса прошивки заготовок из титанового сплава ВТ1-0 с частотой вращения валков 30, 55 и 80 об/мин, коэффициенте овализации равном 1,1, 1,15 и 1,2 и углах подачи рабочих валков от 12 до 16°.

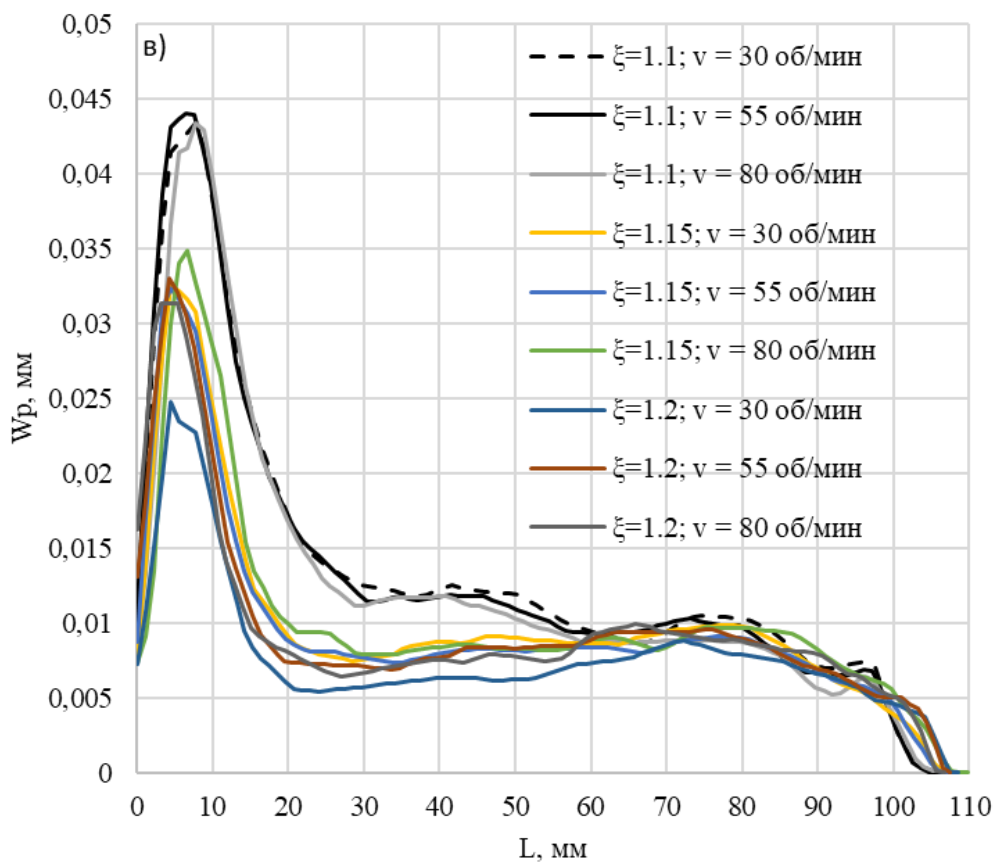
Анализ результатов (рисунок 12) показывает, что уменьшение времени контакта заготовки из сплава ВТ1-0 с оправкой также приводит к уменьшению износа поверхности оправки. Повышение частоты вращения валков способствует увеличению износостойкости прошивной оправки, что подтверждается графиками. Увеличение угла подачи увеличивает площадь контакта заготовки с оправкой, что также способствует повышению износостойкости. Распределение износа (рисунок 13) по длине оправки неоднородно, с максимальным износом в начале сферической части. Увеличение угла подачи в сферической части снижает износ в среднем на 0,005 мм за каждые 2°, а повышение частоты вращения валков обеспечивает равномерное распределение износа. Уменьшение коэффициента овализации приводит к увеличению глубины износа на сферической части оправки. На рисунках 14 представлены трехмерные модели, отражающие глубину износа в зависимости от варьируемых факторов для нескольких случаев. Поля износа также подтверждают влияние рассматриваемых варьируемых факторов на износостойкость оправки.



$$\beta = 12^\circ$$



$\beta = 14^\circ$



$\beta = 16^\circ$

Рисунок 13 – Графики распределения износа по длине оправк

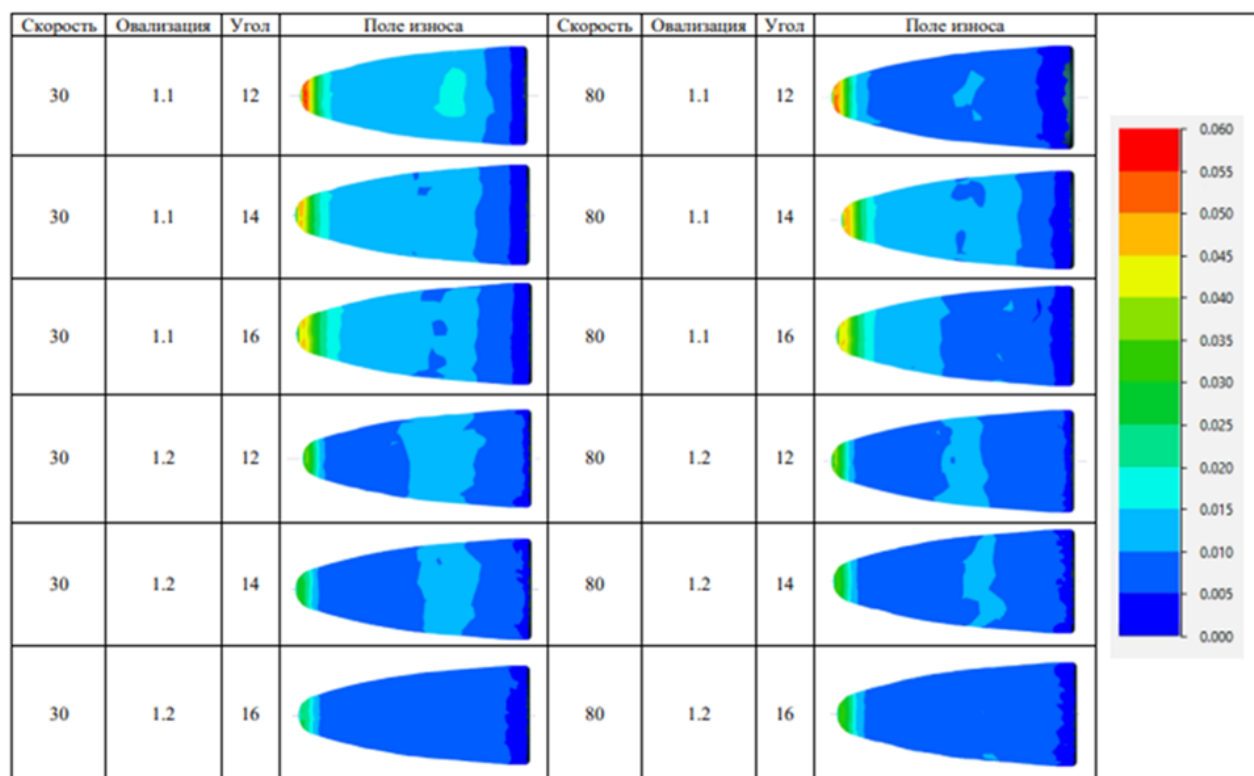


Рисунок 14 – Трехмерные модели, отражающие глубину износа в зависимости от нескольких варьируемых факторов

### 3.4 Выводы по главе

Выполнен анализ износа оправок из стали 4Х5МФС при прошивке заготовок из стали 20Х13 и титанового сплава ВТ1-0, применяемых на стане МИСИС-130Д:

1 Выявлено влияние угла подачи, коэффициента овальзации и частоты вращения валков на износ прошивной оправки с применением программного комплекса QForm. Данный программный комплекс позволяет рассчитывать износ инструмента и получать близкие к реальным условиям значения;

2 В ходе моделирования определено, что увеличение частоты вращения валков позволяет сократить температуру нагрева оправки вследствие уменьшения машинного времени, тем самым увеличивая износостойкость оправки. При увеличении коэффициента овальзации уменьшается время контакта заготовки с оправкой в поперечных сечениях, что приводит к уменьшению степени нагрева поверхности и повышению износостойкости. При увеличении угла подачи снижается температура нагрева заготовки и повышается ее износостойкость. Максимальная глубина износа варьируется в зависимости от рассматриваемых параметров, на наиболее нагруженном участке (носке оправки) изменялась в диапазоне от 0,025 до 0,055 мм;

3 При варьировании трех технологических факторов одновременно, установлено,

что наибольшее влияние оказывает коэффициент овализации, при этом частота вращения валков и угол подачи оказывают меньшее влияние на износостойкость прошивной оправки.

## **Глава 4. Исследование осевого усилия металла на оправку при прошивке**

Угол подачи является одним из основных факторов настройки очага деформации при винтовой прокатке, определяющим производительность стана и качество получаемой продукции. Выбор угла подачи влияет на технологию процесса прокатки. Увеличение угла подачи приводит к сокращению машинного времени, что способствует повышению износостойкости прошивных оправок.

Важнейшим элементом силового взаимодействия оправки с прошиваемой заготовкой является осевое усилие. В ходе исследования было принято решение исследовать влияние угла подачи, диаметра и формы прошивной оправки на значение осевого усилия металла на оправку и сравнить полученные ранее результаты износа со значениями осевого усилия.

### **4.1 Влияние угла подачи и диаметра оправки**

Практические эксперименты проводились на стане МИСИС-130Д.

Исходная заготовка сталь  $\varnothing 70$ , сталь 40Х (рисунок 15). Каждая заготовка была предварительно зацентрирована. Геометрические параметры заготовки указаны в таблице 5. Разностенность заготовки отражает расстояние от наружной поверхности заготовки до зацентровачного отверстия и указана в таблице 6.



Рисунок 15 – Внешний вид заготовок

Таблица 5 – Параметры заготовки

№	Диаметр, мм				Диаметр зацентровки, мм	
1	70,0	70,0	70,1	70,0	17,5	17,9
2	70,0	69,7	69,8	69,7	17,9	17,9
3	69,6	69,8	69,5	69,4	17,5	17,4
4	69,8	69,8	69,7	69,8	17,6	17,7
5	69,9	69,8	70,0	70,1	17,3	17,4
6	70,0	70,0	69,9	69,9	16,2	16,1
7	70,0	69,9	69,9	69,9	17,1	17,4
8	70,1	69,9	69,9	70,0	16,2	16,3
9	70,2	70,1	70,2	70,1	17,4	17,4
10	69,8	69,9	69,9	70,0	16,1	16,1
11	70,0	70,0	70,0	69,9	17,5	17,4
12	70,1	70,2	70,2	70,0	17,3	17,4
13	69,5	69,9	69,5	69,6	17,5	17,7
14	69,4	70,1	70,2	70,0	16,2	16,7
15	70,0	70,1	70,2	69,9	16,1	16,2
16	70,2	70,2	70,2	70,3	15,9	15,9

Таблица 6 – Разностенность зацентровочного отверстия

№	Разностенность, мм				Абсолютное отклонение, мм	Относительное отклонение, %
1	26,4	26,1	27,1	25,2	1,9	7,25
2	25,2	26,8	26,5	25,7	0,3	1,15
3	25,8	26,5	25,3	26,9	1,6	6,12
4	26,1	26,0	25,2	27,3	2,1	8,03
5	25,5	27,1	26,3	25,9	1,6	6,11
6	27,0	27,1	27,0	26,9	0,2	0,74
7	25,7	27,6	26,9	25,7	1,9	7,18
8	26,4	27,4	25,9	26,9	1,5	5,63
9	25,6	27,3	25,3	26,4	2	7,65
10	26,9	26,9	27,3	26,8	0,5	1,85
11	25,1	27,1	26,9	25,2	2	7,67
12	25,8	26,7	25,2	27,4	2,2	8,37

Продолжение таблицы 6

№	Разностенность, мм				Абсолютное отклонение, мм	Относительное отклонение, %
13	26,7	25,7	25,8	26,4	1	3,82
14	26,5	26,8	27,7	26,6	1,2	4,46
15	27,3	26,8	27,0	27,2	0,5	1,85
16	27,1	26,6	26,0	28,0	2	7,43

Абсолютное отклонение не превышает 2,5 мм, относительное отклонение не превышает 8,5 %.

Параметры настройки очага деформации стана МИСИС-130Д перед прошивкой отражены в таблице 7.

Таблица 7 – Параметры настройки очага деформации

Температура заготовки, °С	$V_v$ , об/мин	$B_n$ , мм	$L_n$ , мм	$C$ , мм
1160	57	60	68	60

В ходе данного эксперимента варьировали угол подачи и диаметр оправки, все остальные параметры очага деформации были зафиксированы. Диапазон изменения угла подачи составляет от 12 до 16 градусов, а диапазон изменения диаметра оправки — от 45 до 52 мм.

Внешний вид оправок представлен на рисунке 16.

Диаметр  
оправки  
45 мм





Диаметр  
оправки  
49 мм



Диаметр  
оправки  
52 мм



Рисунок 16 – Внешний вид применяемых прошивных оправок

#### 4.2 Анализ влияния варьируемых факторов на осевое усилие

В ходе эксперимента фиксировалось осевое усилие металла на прошивную оправку с применением датчика (рисунок 17). Датчик был расположен между упорной головкой и упором.

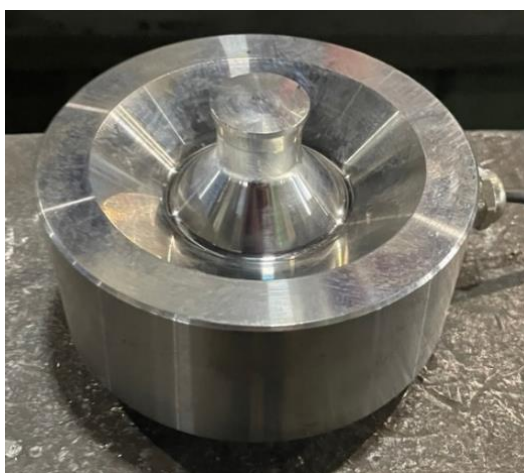


Рисунок 17 – Внешний вид Тензометрического датчика ZETLAB

Результаты эксперимента представлены в таблице 8. В ходе прокатки также фиксировали геометрические параметры получаемых гильз для оценки влияния зацентровки заготовки на конечную толщину стенки.

Таблица 8 – Результаты эксперимента

Гильза №1											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
52	8,0	7,8	7,7	8,1	7,9	7,8	7,8	7,5	13,279		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
12	71,4	71,6	71,6	71,4	570	572	572	569			
Гильза №2											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
52	8,0	8,1	7,8	7,9	7,9	7,7	8,2	7,8	13,469		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
12	71,0	71,4	71,3	71,0	614	615	616	616			
Гильза №3											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
49	9,0	9,1	9,3	8,9	8,8	9,1	8,9	9,0	10,159		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
12	69,4	70,5	70,0	70,0	523	524	520	522			
Гильза №4											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
49	9,0	9,1	9,3	9,0	9,4	9,2	9,0	9,4	11,028		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
12	70,2	70,5	70,3	70,3	521	523	522	521			
Гильза №5											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
45	10,4	10,6	10,3	10,2	10,5	10,5	10,2	10,3	12,432		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
12	69,0	69,4	68,9	69,0	567	572	570	570			
Гильза №6											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
45	10,5	10,6	10,6	10,4	10,6	10,0	10,5	10,6	11,899		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
12	69,5	68,5	68,6	69,0	474	477	478	478			
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
16	68,7	68,2	69,0	69,0	500	500	500	503			

Продолжение таблицы 8

Гильза №7											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
52	7,6	7,6	7,5	7,4	7,4	7,5	7,3	7,4	15,447		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
14	71,0	71,5	71,0	71,0	795	793	794	794			
Гильза №8											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
49	8,8	8,8	8,9	9,0	8,8	8,6	8,6	8,8	10,917		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
14	69,5	70,1	70,4	70,0	520	513	515	520			
Гильза №9											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
45	9,9	10,1	10,2	10,1	9,9	9,8	9,8	9,8	13,221		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
14	68,4	68,1	68,0	68,4	502	505	505	502			
Гильза №10											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
52	7,7	7,9	7,8	7,8	8,0	7,9	7,9	7,7	15,314		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
16	71,0	70,5	71,0	71,5	690	690	689	689			
Гильза №11											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
52	7,8	7,8	7,9	7,8	7,9	7,9	8,0	8,1	15,518		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
16	71,4	71,4	71,4	71,0	656	655	655	657			
Гильза №12											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
52	7,8	8,0	7,9	7,7	7,9	7,7	7,7	7,6	16,625		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
16	70,8	71,3	71,0	71,5	607	605	610	610			
Гильза №13											
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т		
49	9,0	8,8	8,8	8,8	8,8	8,9	8,9	8,7	13,211		
Угол подачи, $\beta^\circ$	Диаметр, мм				Длина, мм						
16	69,9	70,5	70,4	69,8	545	543	540	540			

Продолжение таблицы 8

Гильза №14									
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т
49	9,1	8,8	9,0	8,8	8,8	9,0	8,4	8,6	11,539
Угол подачи, β°	Диаметр, мм				Длина, мм				
16	70,0	69,9	69,9	70,0	545	548	550	548	
Гильза №15									
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т
45	10,0	10,4	9,9	10,4	10,0	9,9	9,9	9,8	14,125
Угол подачи, β°	Диаметр, мм				Длина, мм				
16	68,0	68,2	68,4	67,9	560	560	555	559	
Гильза №16									
Диаметр оправки, мм	Толщина стенки на входе, мм				Толщина стенки на выходе, мм				Усилие, т
45	10,0	9,9	10,2	10,4	9,9	10,1	9,8	10,2	13,755
Угол подачи, β°	Диаметр, мм				Длина, мм				
16	68,7	68,2	69,0	69,0	500	500	500	503	

Внешний вид, полученных в ходе прошивки, гильз показан на рисунке 18. Отклонение зацентровки в ходе прошивки повлияло на полученную толщину стенки гильз. Все полученные гильзы имеют относительное отклонение по толщине стенки не более 5 %, при этом абсолютное отклонение составляет не более 0,5 мм.

На основе анализа полученных в ходе прокатки испытаний следует, что с увеличением угла подачи, при фиксированном диаметре осевое усилие на оправку растет в среднем на 5–10 кН. при фиксированном угле подачи уменьшение диаметра оправки с 52 до 45 мм приводит к снижению осевого усилия на 10–20 кН. Как было отмечено ранее, увеличение угла подачи приводит к снижению износа прошивных оправок, несмотря на рост осевого усилия. Повышение износостойкости объясняется тем, что при росте осевого усилия происходит уменьшение продолжительности прокатки, снижение количества частных обжатий в очаге деформации и сокращение длины контактной поверхности между инструментом и заготовкой.

В результате экспериментов было установлено, что применение оправок без носика позволяет снизить осевое усилие, действующее на оправку, и уменьшить износ, вызванный нормальными и касательными напряжениями, по сравнению с оправками, оснащёнными носком.



Рисунок 18 – Внешний вид полученных гильз

### 4.3 Разработка методики прогнозирования износа прошивных оправок

В ходе экспериментальной прошивки заготовок из стали 40Х с применением тензометрического датчика были получены следующие выводы:

На основе проведенных исследований разработана методика прогнозирования износа прошивных оправок, в которой были учтены следующие параметры:

- 1 Температурные условия работы оправок – моделирование в QForm;
- 2 Анализ износа прошивной оправки с помощью моделирования;
- 3 Данные по изменению массы оправки;
- 4 Анализ износа в зависимости от осевого усилия металла на прошивную оправку.

Для оценки изменения массы оправки в качестве основы была использована формула, предложенная Л.Г. Степанским. Так как износ прошивной оправки неравномерен было принято решение условно разделить оправку на две части, носок оправки (максимальная зона деформации), сферическая и коническая части оправки (зона минимального износа)

$$\Delta M = N \cdot \left( \delta_1 \cdot N_1 \cdot L_1 \cdot \frac{\sigma_{s2}^2}{\sigma_{s1}^2 + \sigma_{s2}^2} + \delta_2 \cdot N_2 \cdot L_2 \cdot \frac{\sigma_{s2}^2}{\sigma_{s1M}^2 + \sigma_{s2}^2} \right),$$

где  $N$  – число прошитых заготовок;  $\delta$  – средняя толщина слоя разрушения адгезионной металлической связи на поверхности оправки. Значение  $\delta_2 \approx 2,5 \cdot 10^{-8}$  м для сферической и конической частей оправки, а  $\delta_1 \approx 7,5 \cdot 10^{-6}$  м для носка оправки, который в процессе прошивки разогревается до 1200 °С и фактически воспринимает

значительную долю осевого усилия;  $H$  – средний путь скольжения металла под нагрузкой, м;  $L$  – текущий размер площадки скользящего контакта инструмента с обрабатываемым металлом в направлении, перпендикулярном направлению скольжения, м;  $\sigma_{s1}$ ,  $\sigma_{s1M}$  – предел текучести материала инструмента  $\sigma_{s2}$  – предел текучести обрабатываемого материала на контактной поверхности.

Расчет текущего размера площадки скользящего контакта инструмента с обрабатываемым металлом рассчитывали по следующим формулам:

$$L_1 = 2 \cdot U \cdot \frac{\pi \cdot r_n \cdot \alpha}{180},$$

$$L_2 = 2 \cdot U \cdot S_{cp} \cdot n,$$

где  $U$  – число оборотов оправки при прошивке одной заготовки;  $r_n$  – радиус носка оправки, м;  $\alpha$  – центральный угол между радиусами носика оправки, град.;  $S_{cp}$  – величина шага винтовой линии, м;  $n$  – количество шагов винтовой линии.

Расчет среднего пути скольжения металла под нагрузкой в соответствии с предложенными формулами:

$$H_1 = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot h,$$

$$H_2 = 2 \cdot (L_{опр} - L_n - L_{ц}) \cdot \frac{2 \cdot r_{оправ}}{B} \cdot \frac{0,35 \cdot L \cdot p_{cp}}{P_{осев}},$$

где  $L_n$  – высота носка оправки, м;  $L_{опр}$  – длина оправки, м;  $L_{ц}$  – длина цилиндрического участка, м;  $r_{оправ}$  – радиус оправки в пережиме, м;  $B$  – расстояние между валками, м;  $P_{осев}$  – осевое усилие металла на оправку, полученное расчетным или экспериментальным путем, кН;  $L$  – длина контактной поверхности металла с валком, м;  $p_{cp}$  – среднее давление металла на валок и оправку, кН.

Предложенная формула (2) позволяет рассчитать объем и массу металла, удаляемого с контактной поверхности оправки при прошивке заготовок вследствие адгезионного разрушения и тем самым прогнозировать ее износостойкость при допустимом равномерном износе, не вызывающем нарушение стабильности процесса прокатки.

Расчеты  $\Delta M$  по предложенной методике для оправок из стали 4X5МФС диаметром 43,5 мм при прошивке заготовок из стали 20X13 на стане МИСИС-130Д для первых трех проходов показали разницу с фактическими замерами в пределах 13–15 %, что следует признать вполне удовлетворительными.

#### 4.4 Выводы по главе

В ходе экспериментальной прошивки заготовок из стали 40X с применением

тензометрического датчика были получены следующие выводы:

1 Установлено, что осевое усилие металла на прошивную оправку увеличивается на 10–18 %, при изменении диаметра оправки на 7 мм, в случае увеличения угла подачи усилие на оправку повышается в среднем на 8 %;

2 Получено, что с ростом осевого усилия уменьшается износ прошивной оправки, это объясняется тем, что сокращаются частные обжатия в очаге деформации;

3 На основе полученных в ходе исследования данных разработана методика прогнозирования износа прошивных оправок.

## **Глава 5. Исследование технологии изготовления бесшовных труб из сплавов на основе титана в условиях станов МИСИС–130Д и ТПА 70–270**

Технология получения труб на стане МИСИС-130Д схожа с той, что применяется для изготовления бесшовных труб на ТПА 70-270 (рисунок 19). В процессе исследования была проанализирована технология производства труб на двухвалковом стане винтовой прокатки, оптимизация которой с учётом условий деформации при прокатке на стане с бочковидными валками может повысить износостойкость инструмента и эффективность процесса получения бесшовных труб.

Производство бесшовных труб на стане ТПА 70-270 выполняется с помощью компактного и энергосберегающего автоматизированного оборудования. Передающие устройства объединяют основное оборудование в единый производственный поток, который позволяет работать с одного нагрева и выполнять операции прошивки, нагрева, раскатки гильзы и калибровки трубы последовательно [3].

Рассматриваемая методика изготовления позволяет получать трубы с высокой точностью и допуском по разностенности до  $(\pm 6)$  %. Таким образом, обеспечивается высокое качество внутренних и наружных поверхностей производимых труб. Благодаря точной резки прутков до нужной длины с помощью механической пилы, что обеспечивает высокое качество торцевых участков.

Для достижения равномерной вытяжки металла в процессе проведения прошивки и раскатки проводилось предварительное обжатие заготовки по диаметру до 6–8 %, перед носком оправки, что способствует надёжному захвату металла и его плавному движению с симметричным утонением стенок. Короткая коническая оправка, применяемая при раскатке, позволяет эффективно регулировать процесс, меняя толщину стенок и диаметр гильзы всего за одну калибровку валков.

Данная технология позволяет объединить процессы прошивки и раскатки на одном и том же оборудовании, применяя одинаковую настройку очага деформации. Исключением являются выдвигание носка оправки за пережим валков и калибровка оправок. Это дает возможность осуществлять процесс прокатки с одного печного нагрева, при этом осуществляется смена оправки одновременно с возвратом гильзы.



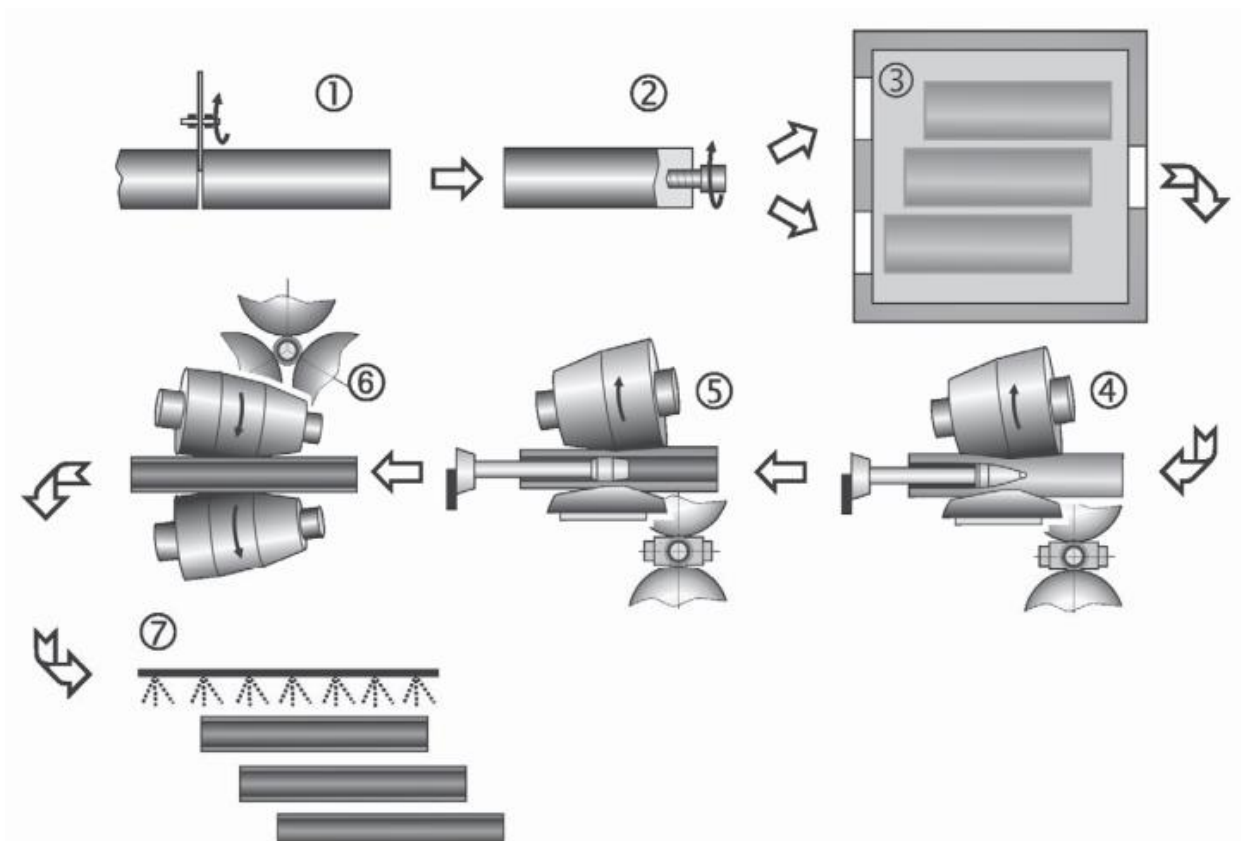


Рисунок 19 – Схема производства труб на ТПА 70-270

В настоящее время существует возможность производить бесшовные трубы и заготовки из титана с помощью трубопрокатного оборудования и прессов. Для обеспечения высокого качества поверхности важно предотвратить налипание деформированного металла на прошивную оправку в процессе прокатки. Это явление может серьезно повлиять на износ рабочих инструментов и производительность оборудования. Одним из методов защиты поверхности титановой заготовки является применение покрытий, которые уменьшают налипание и способствуют более эффективному процессу прокатки за счет снижения трения в зоне деформации.

### 5.1 Расчет параметров очага деформации для заданного типоразмера гильзы (трубы)

На первом этапе работы стояла задача разработать технологию изготовления титановых труб заданного сортамента на ТПА 70–270. Предлагаемая технология позволит расширить сортамент выпускаемой на данном стане продукции и сократить время простоев оборудования. Поскольку очаги деформации на МИСИС-130Д и ТПА 70-270 похожи, то первые опыты проводились на МИСИС-130Д для отработки технологии, а затем

разработанная технология была масштабирована и применена на ТПА 70–270. У стана МИСИС-130Д имеются ограничения, а именно размер прошивных заготовок должен находиться в диапазоне 30–120 мм. В результате геометрические параметры при режиме прокатки для ТПА 70–270 были скорректированы, при этом пропорциональность была сохранена. В качестве параметров, определяющих подобие процесса, были выбраны: соотношение диаметра к толщине стенки ( $D/S$ ), угол подачи валков, степень обжатия в зоне пережима и коэффициент овализации в очаге деформации. Для расчета параметров прокатки на ТПА 70–270 использовались следующие значения: диаметр гильзы - 127,6 мм; толщина стенки - 23 мм; диаметр черновой трубы - 130,9 мм; толщина стенки - 12,8 мм.

Для расчета параметров были выбраны параметры, отраженные в таблице 9.

Таблица 9 – Геометрические параметры для расчета

$B_{п}$ , мм	$L_{п}$ , мм	$D_{г}/S_{г}$	$D_{п}/S_{п}$	$D_{з}$ , мм
112	123	6	10	130

Производим расчёт коэффициента овализации:

$$\xi = \frac{L_{п}}{B_{п}} = \frac{123}{112} = 1,098 = 1,1$$

Определяем обжатие в пережиме заготовки:

$$U_{п} = \frac{D_{з} - B_{п}}{D_{з}} \cdot 100\% = \frac{130 - 112}{130} \cdot 100\% = 13,8\%$$

В результате проведённых исследований были установлены геометрические характеристики зоны деформации стана МИСИС-130Д для работы с заготовкой диаметром 80 мм и длиной 400 мм. Поскольку на ТПА 70-270 угол подачи не подлежит регулированию и составляет  $12^\circ$ , аналогичный угол применяется при прокатке на агрегате МИСИС-130Д. При этом сохраняется равенство диаметров исходной заготовки и готовой гильзы.

Рассчитываем величину стенки при прошивке и раскатке:

$$S_{г} = \frac{80}{6} = 13,33 \text{ мм}$$

$$S_{п} = \frac{80}{10} = 8 \text{ мм}$$

Определяем диаметр прошивной оправки:

$$d_{опр} = D_{г} - (S_{г} \cdot 2) = 80 - (13,3 \cdot 2) = 53,4 \text{ мм}$$

С целью обеспечения зазора между оправкой и гильзой в условиях ограниченности количества оправок принято решение использовать оправку с диаметром 50 мм.

Определяем расстояние между рабочими валками и линейками в пережиме:

$$B_{\Pi} = D_3 - (1 - U_{\Pi} \cdot 100) = 80 \cdot (1 - 0,138) = 68,96 = 69 \text{ мм}$$

$$L_{\Pi} = \xi \cdot B_{\Pi} = 1,1 \cdot 69 = 75,9 = 76 \text{ мм}$$

Рассчитываем коэффициент вытяжки при прошивке и раскатке:

$$\mu_{\text{пр}} = \frac{D_{\Gamma}^2}{4 \cdot S_{\Gamma} \cdot (D_{\Gamma} - S_{\Gamma})} = \frac{80^2}{4 \cdot 13,3 \cdot (80 - 13,3)} = 1,8$$

$$\mu_{\text{р}} = \frac{S_{\Gamma} \cdot (D_{\Gamma} - S_{\Gamma})}{S_{\text{р}} \cdot (D_{\text{р}} - S_{\text{р}})} = \frac{13,3 \cdot (80 - 13,3)}{8 \cdot (80 - 8)} = 1,5$$

В процессе производства для получения стенки толщиной порядка 13 мм устанавливается расстояние выдвижения носка оправки за пережим валков 40 мм. Если расстояние соответствует данному значению, то происходит обжатие заготовки на 9 % перед носком оправки, а это в свою очередь может оказывать негативное воздействие на вторичный захват, а также стать причиной появления дефектов (пен) на внутренней поверхности трубы. Стадия обжатия помогает придать необходимые геометрические параметры заготовке, учитывая ограничения с типоразмерами подобия. После завершения обжатия проводилась оценка результата и корректировка процесса при необходимости.

Программа QForm содержит данные о характеристиках материала BT1-0 при температурах от 700 до 1000 °С. Практический эксперимент проводили при аналогичных температурах, следовательно, на основе данных в QForm смоделировали процесс прокатки BT1-0 для определения наиболее подходящего режима.

На основе анализа данных, полученных в результате предыдущих исследований процесса прокатки титановых сплавов, можно сделать вывод, что для обеспечения качественного процесса заготовки необходимо нагревать до температуры 950 °С непосредственно перед прокаткой. Для сравнения энергосиловых характеристик был проведён дополнительный расчёт — моделирование процесса прокатки при 850 °С, что позволило получить более точные данные.

Параметры прошивки, влияющие на температуру и деформацию обрабатываемого материала, собраны в таблице 10.

Таблица 10 – Основные параметры прошивки

Параметры	Значения
$U_o$ , %	9
$U_{\Pi}$ , %	13,8
$\xi$	1,1
$\mu_{\text{пр}}$	1,8

Продолжение таблицы 10

Параметры	Значения
$\mu_p$	1,5
$V_B$ , об/мин	57
$\beta$ , °	12
$T$ , °C	950(850)

### 5.2 Разработка калибровки рабочих инструментов и схемы очага деформации

В рамках следующего этапа был произведён подбор рабочих инструментов для выполнения прошивки, при этом валки на лабораторном оборудовании не менялись, поэтому потребовалось выбрать подходящие оправки и направляющие линейки. Основные геометрические параметры выбранных инструментов представлены на рисунке 20. На рисунке 21 представлена схема рассчитанного очага деформации.

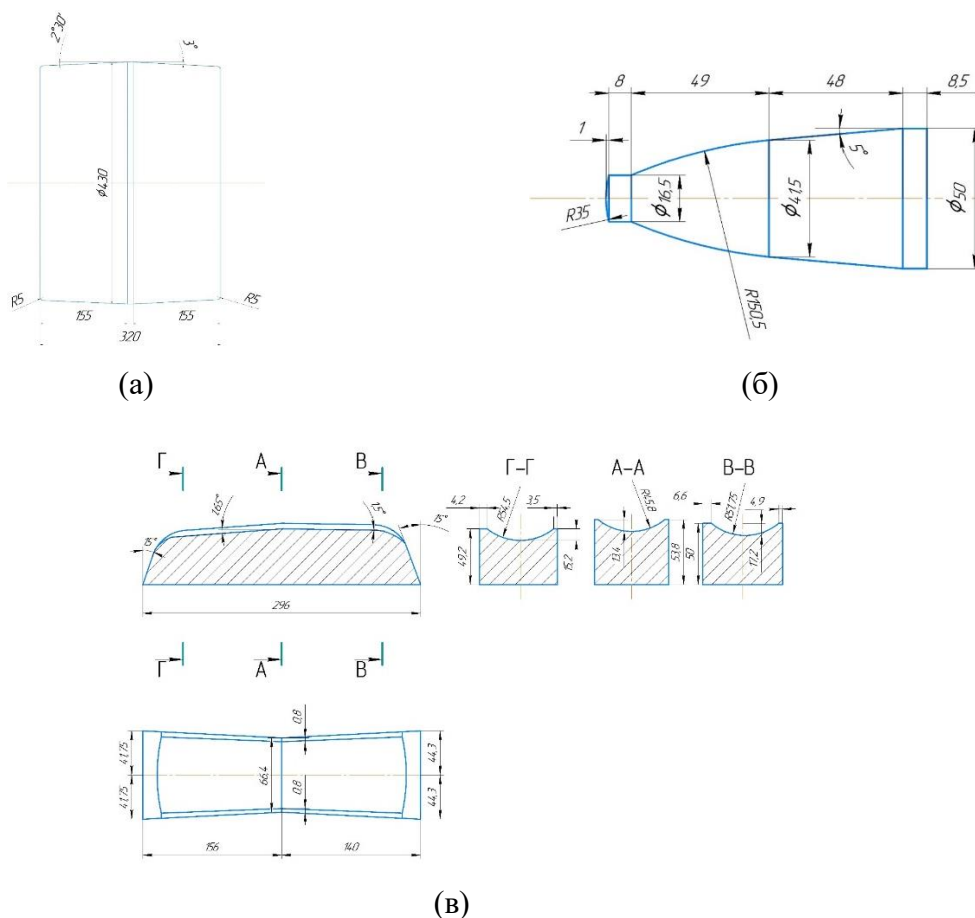


Рисунок 20 – Калибровка рабочих инструментов:  
 (а) рабочий валок МИСиС-130Д;  
 (б) оправка прошивная;  
 (в) направляющая линейка

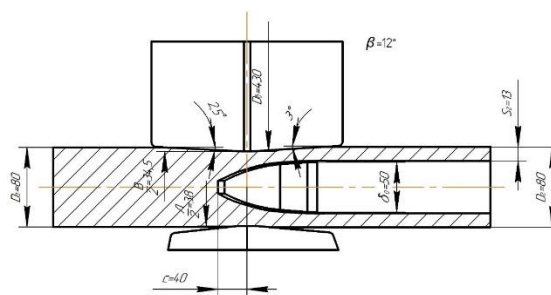


Рисунок 21 – Схема очага деформации

### 5.3 Проектирование и моделирование очага деформации в программе SolidWorks, моделирование процесса в программе QForm и анализ результатов

Следующим шагом было построение 3D модели в SolidWorks (рисунок 22) на основе расчетов и схем основных инструментов.

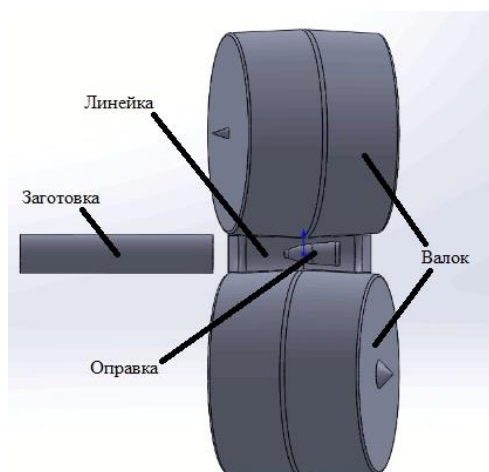


Рисунок 22 – Модель очага деформации

Созданную трехмерную модель перенесли в программу QForm, задали необходимые параметры (таблица 11) и запустили расчет (рисунок 23).

Таблица 11 – Дополнительные данные для моделирования

Материал валков	Материал линейки	Материал оправки	Температура инструмента $T_{и}$ , °C	Фактор трения валков	Фактор трения линеек	Фактор трения оправки
Сталь 45	Сплав ХН55МБЮ	Сталь 4Х5МФС	50	1	0,3	0,3

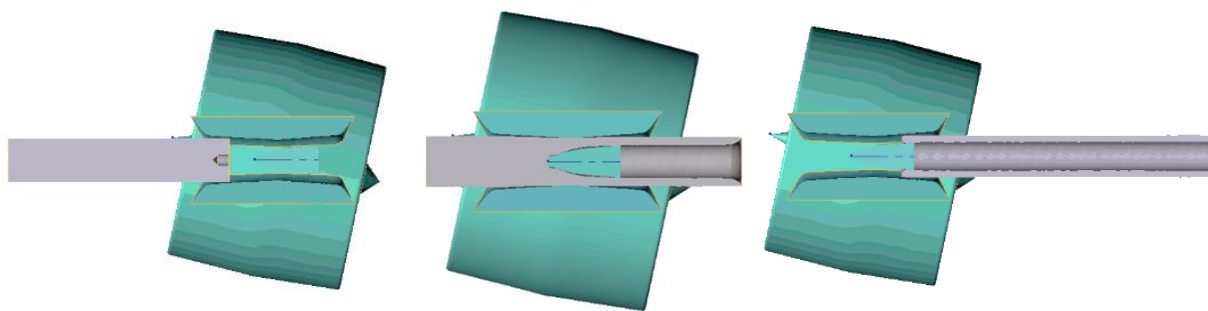


Рисунок 23 – Этапы моделирования процесса прошивки в QForm

В ходе исследования процесса моделирования прошивки заготовок на стане МИСИС-130Д была определена толщина стенки  $S_r$ , конечная длина  $l_k$  и наружный диаметр  $D_r$  гильзы, также на основе измерений рассчитан внутренний диаметр гильзы  $d_r$  (таблица 12).

Таблица 12 – Геометрические параметры гильзы из сплава ВТ1-0 после прошивки (мм)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее значение	Ср. относит. отклонение
$S_r$	12,84	13,18	12,85	13,21	12,89	13,19	12,9	13,09	12,83	13,12	13,01	1,14 %
$D_r$	76,62	77,4	76,31	77,53	76,68	77,42	77,66	77,27	76,69	76,94	77,05	0,52 %
$d_r$	50,94	51,04	50,61	51,11	50,9	51,04	51,86	51,09	51,03	50,7	51,03	0,38 %
$l_k$	595,8	600,8	603,7	607,4	608,5	611,2	609,6	610,9	602,3	606,3	605,7	0,66 %

Использование определённой настройки очага деформации вместе с калибровкой рабочего инструмента позволяет изготавливать гильзы заданных размеров с высокой точностью: максимальное отклонение по толщине стенки — 1,5 %, среднее отклонение по диаметру — 0,5 %.

Прошивку заготовок проводили при 950 °С, для сравнительного анализа была также осуществлена прошивка при 850 °С. На основе выполненных расчетов были построены графики зависимости усилия на валок, момента и мощности от времени (рисунок 24).

Среднее значение усилия на установившейся стадии составляет 150 кН при температуре 920 °С (при температуре 850 °С - 310 кН), момент прокатки – 9 кН·м при температуре 920 °С (при температуре 850 °С - 19 кН·м), а мощность прокатки достигает 55 кВт при температуре 920 °С (при температуре 850 °С - 118 кВт). Среднее значение усилия металла, действующего в осевом направлении, на оправку на установившейся стадии равно 60 кН (при температуре 850 °С - 100 кН).

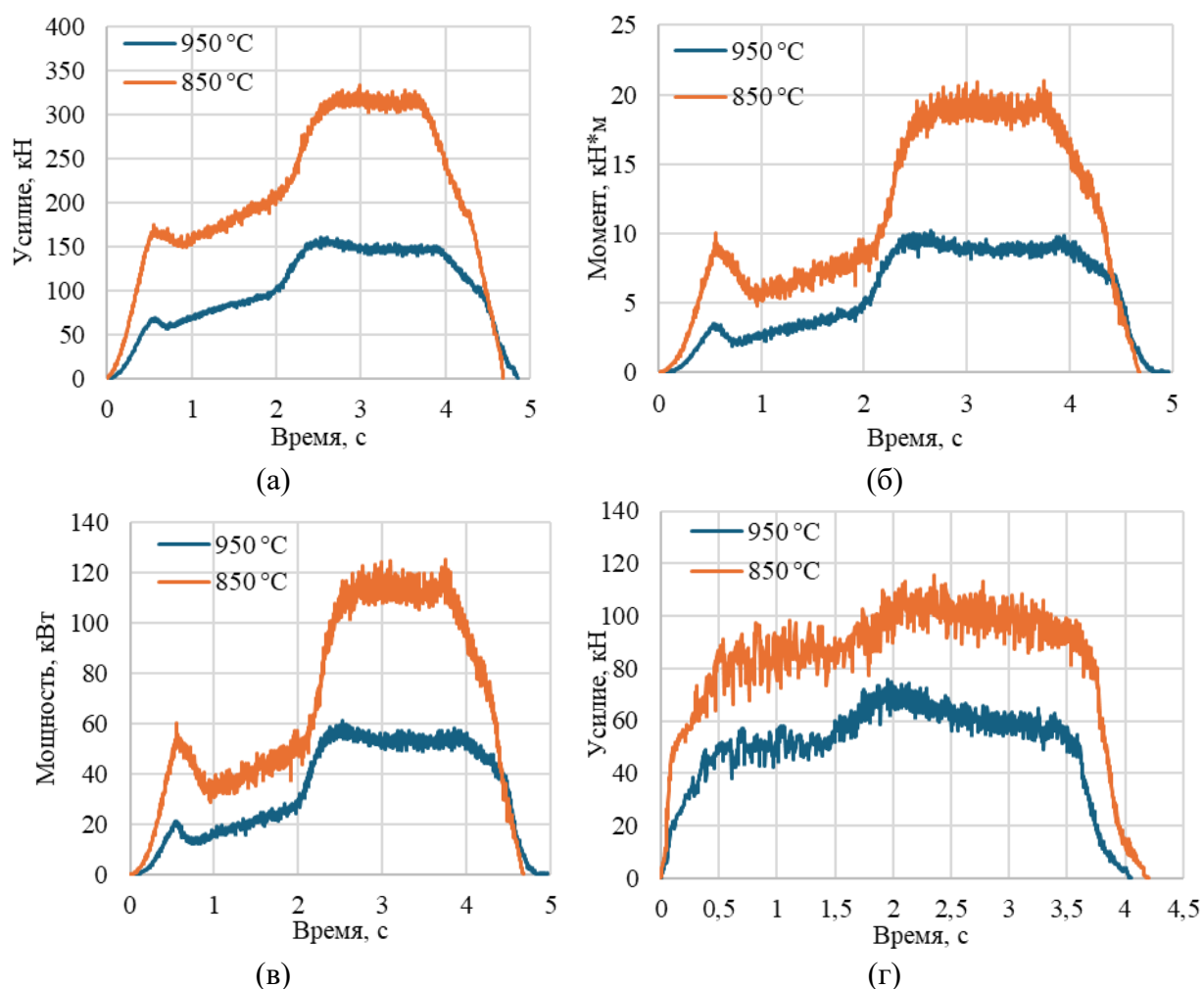


Рисунок 24 – Графики зависимости: (а) усилия на валок; (б) момента прокатки; (в) мощности прокатки; (г) осевого усилия на оправку в процессе прошивки

При анализе графиков, представленных на рисунках 24 делаем вывод, что процесс прошивки протекал стабильно и обеспечивал получения гильзы с заданными параметрами. Заполнение и освобождение очага деформации происходит плавно, без колебаний усилия.

Для дополнительной верификации модели и сравнения с результатами моделирования (рисунок 25) была рассчитана осевая скорость  $V_s$ .

$$V_s = \frac{\pi \cdot D_B \cdot n}{60} \cdot \sin \beta = \frac{\pi \cdot 0.43 \cdot 57}{60} \cdot \sin 12^\circ = 0,2668 \text{ м/с} = 266,8 \text{ мм/с},$$

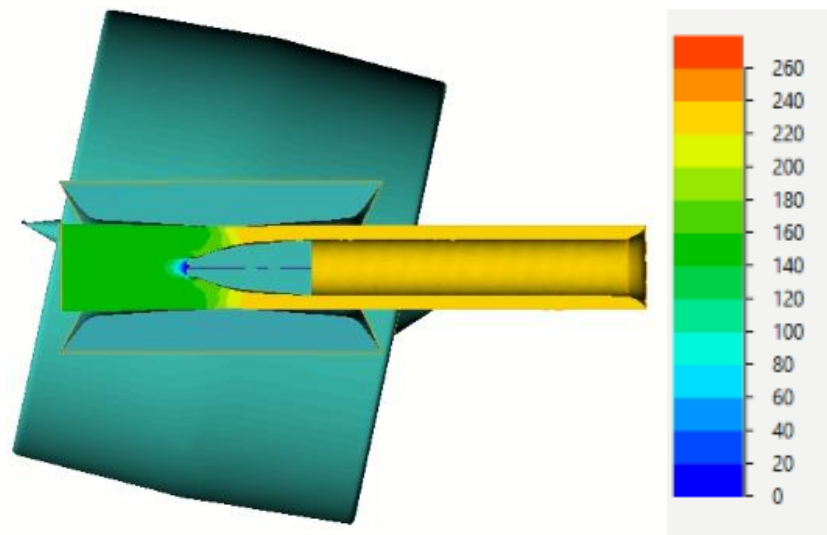


Рисунок 25 – Поле скорости по оси прокатки, мм/с

При анализе расчетных данных и скорости, полученной в процессе моделирования можно сделать вывод, что рассчитанная скорость незначительно превышает полученную в процессе моделирования, в связи с тем, что расчет не учитывает скольжения. Таким образом, возможно определить значение коэффициента осевой скорости как отношение скорости при моделировании к рассчитанной скорости:

$$\frac{V_M}{V_P} = \frac{230}{266,8} = 0,862$$

Следующей задачей было изучение температурного поля заготовки на трех этапах прокатки: в начале, середине и конце соответственно (рисунок 26–28). Перед прошивкой заготовка была нагрета до 950 °С.

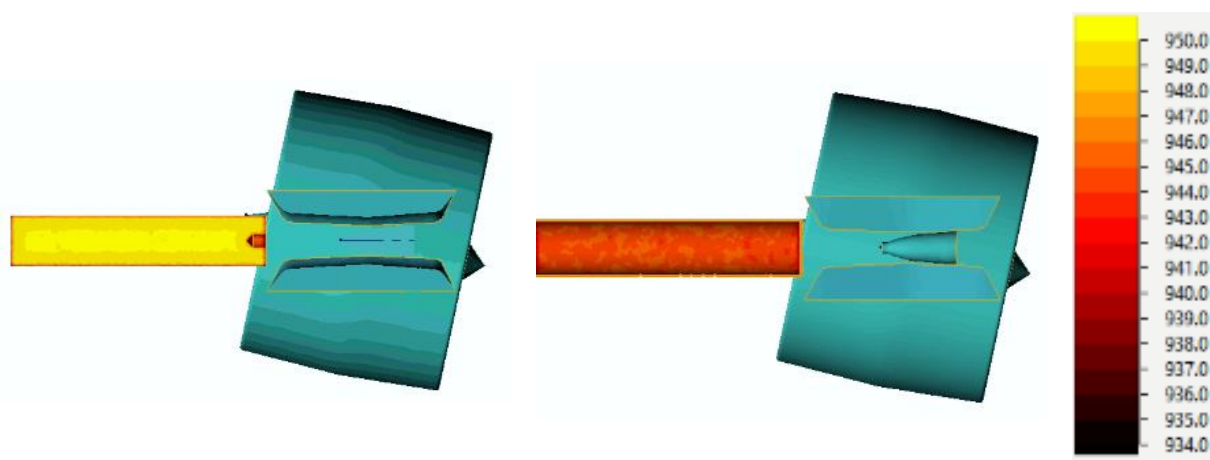


Рисунок 26 – Поле температур в начале прошивки, °С

На начальном этапе прокатки заготовка в центре имеет равномерную температуру



950 °С. На поверхности и прикромочных зонах до контакта с валком температура поверхности заготовки в среднем снижается на 15 °С.

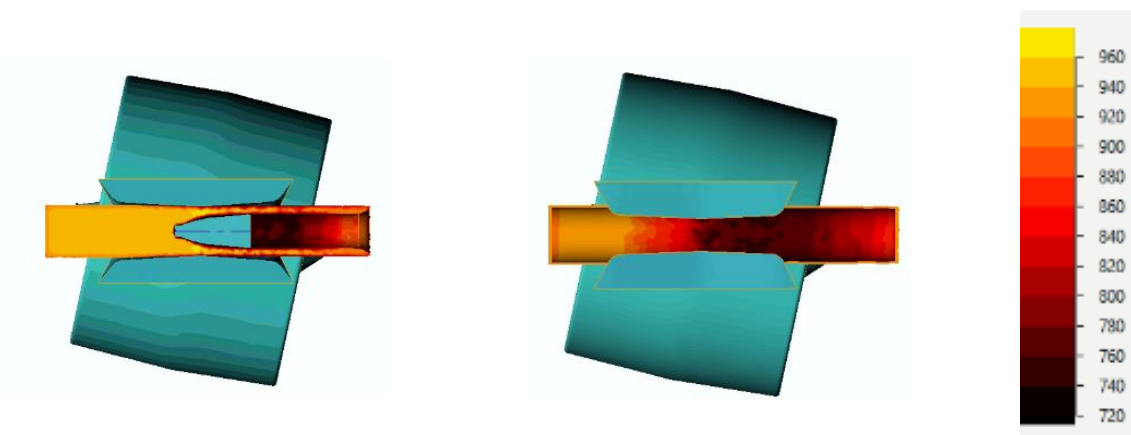


Рисунок 27 – Поле температур заготовки °С при установившемся процессе прошивки

В очаге деформации внутренние слои металла нагреваются до 960 °С в зоне пережима валков и области раскатки на оправке, где локализована деформация. При этом после прошивки внутренняя и внешняя поверхность охлаждается на 150–200 °С. При контакте с инструментами заготовка охлаждается из-за разницы температур (Температура инструментов 50 °С).

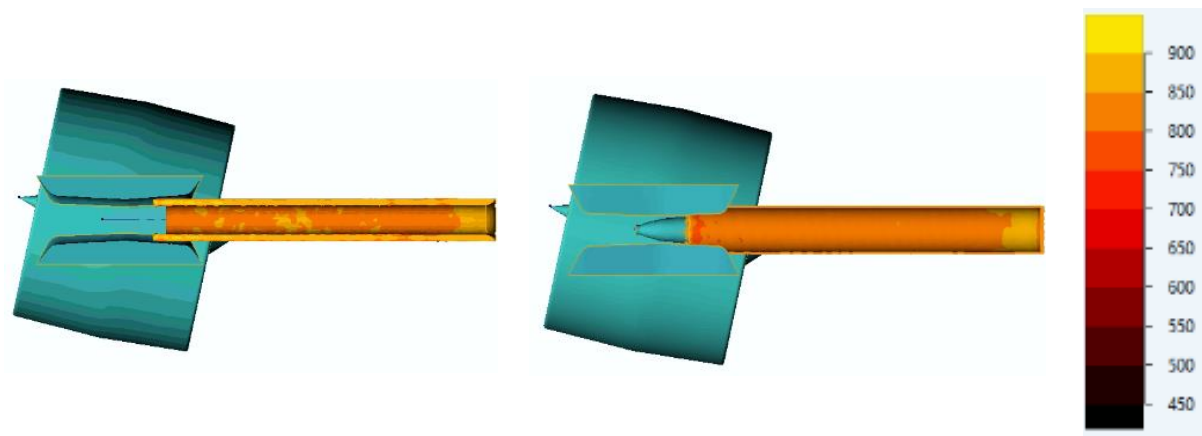


Рисунок 28 – Поле температур в конце прошивки, °С

После окончания процесса прошивки температура полученной гильзы практически равномерна. Температура наружной и внутренней поверхности составляет 800–850 °С, а температура по толщине стенки гильзы от 880 до 920 °С.

В ходе исследования рассматривали также несколько вариантов материалов

прошивной оправки с целью анализа их износостойкости. Для сравнения были выбраны материалы 4X5MФС и 3X3M3Ф из базы данных программы QForm. Расчет износа оправки выполняли с применением стандартной подпрограммы QForm, которая применяется для процессов горячей обработки металлов давлением. Полученные результаты соответствуют ранее полученной информации практического эксперимента, величина максимального износа оправки из стали 4X5MФС составила 0,019 мм, для оправки из стали 3X3M3Ф составила 0,025 м, что отражено на рисунке 29.

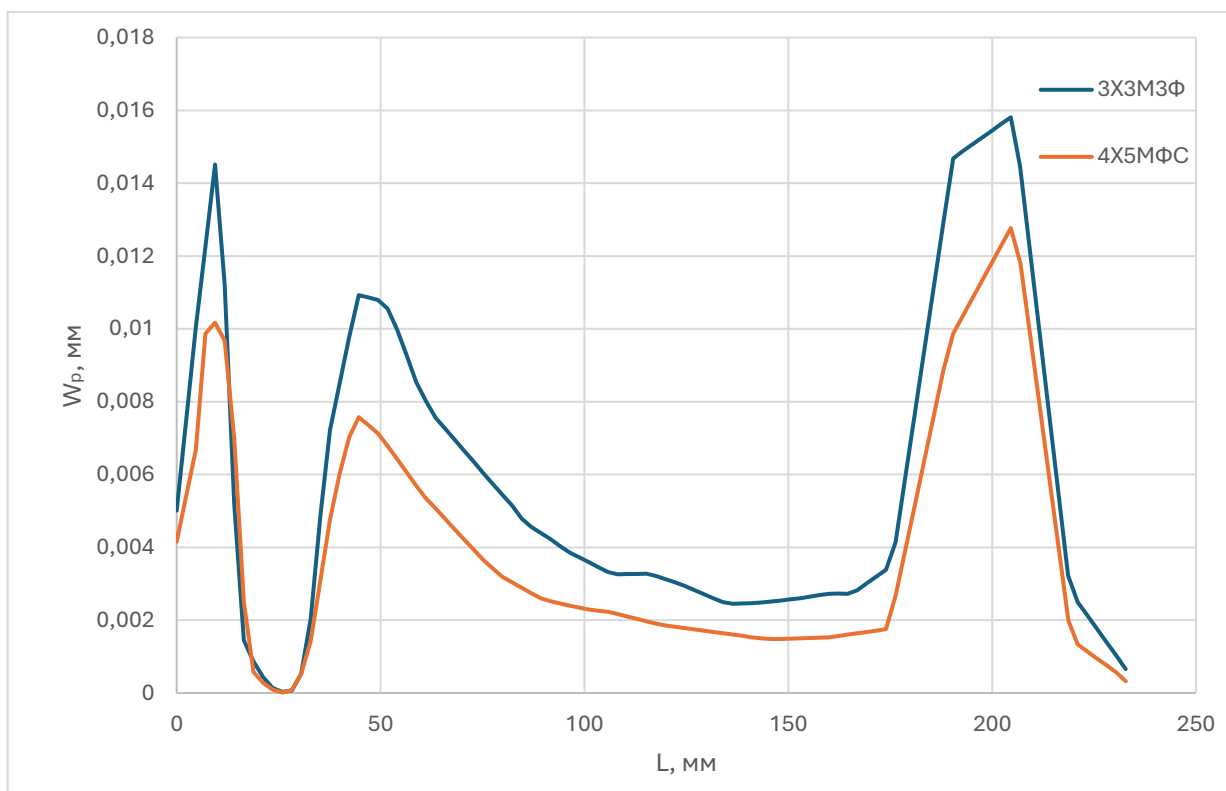


Рисунок 29 – Распределение глубины износа  $W_p$  оправки от радиального давления в зависимости от материала

Также для визуализации полученных результатов были построены поля износа (рисунок 30).

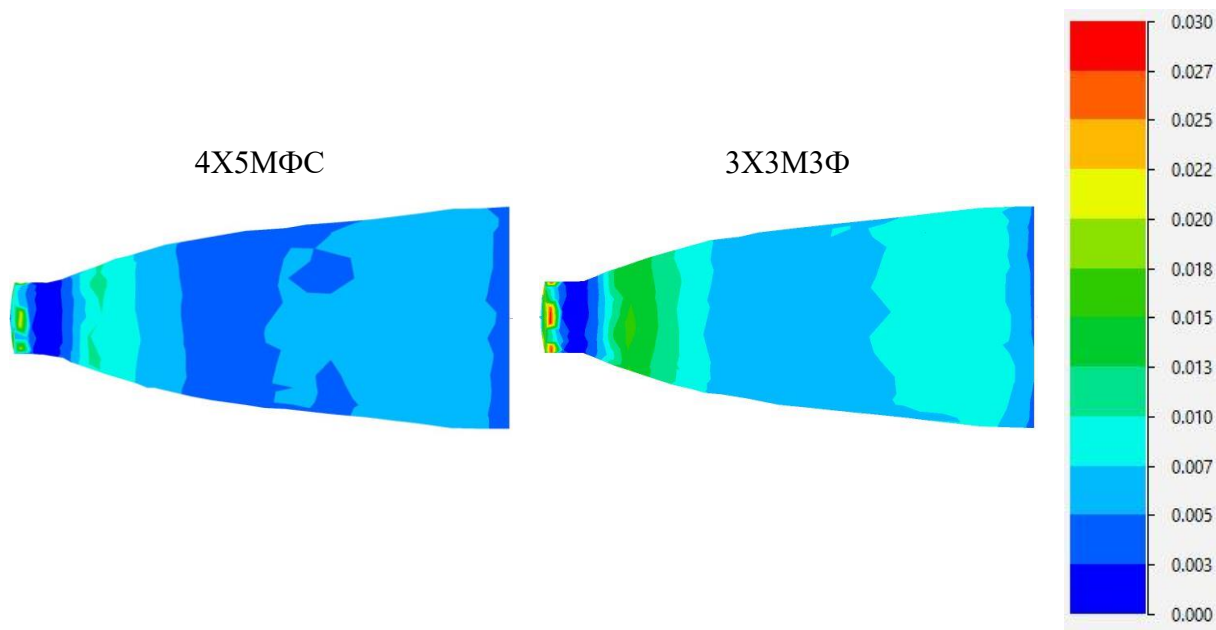


Рисунок 30 – Поле износа оправки в зависимости от материала, мм

Для моделирования процесса раскатки была построена модель раскатной оправки, все остальные инструменты не изменили своего положения и параметров. Расстояние выдвижения носка оправки за пережим рабочих валков составляет 41 мм. На рисунке 31 представлена схема калибровки раскатной оправки.

Положение оправки было выбрано для достижения такого же отношения  $D/S=10$ , что и у выбранного режима из таблицы прокатки ТПА 70–270.

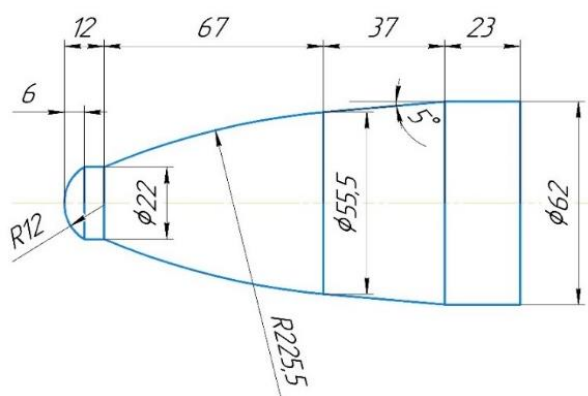


Рисунок 31 – Калибровка раскатной оправки

Параметры расчета для операции раскатки остались прежними (рисунок 32). Предварительно заготовка была нагрета до температуры 920 °С.

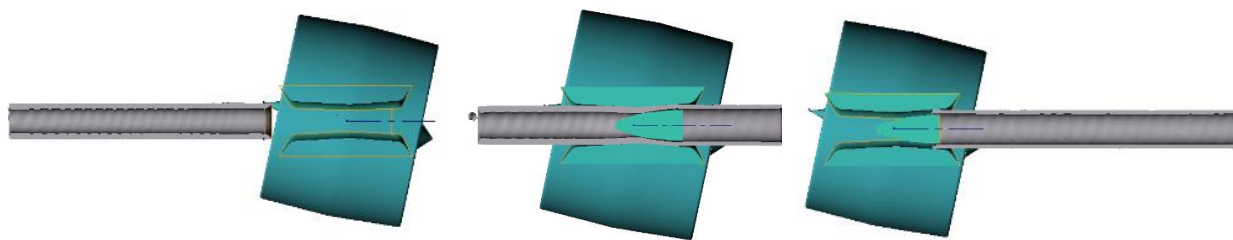


Рисунок 32 – Этапы моделирования процесса раскатки в программе QForm

Во время анализа процесса моделирования прошивки заготовок с помощью стана МИСИС-130Д было проведено измерение толщины стенки  $S_p$ , рассчитали конечную длину полученного изделия  $l_k$  и значение наружного диаметра  $D_p$ , а также проанализировали внутренний диаметр  $d_p$  (таблица 13).

Таблица 13 – Геометрические параметры трубы после раскатки

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее значение	Ср. относит. отклонение
$S_p$	8,12	7,85	8,4	8,11	7,91	8,46	8,37	8,32	8,15	7,92	8,16	2,22 %
$D_p$	82,3	82,6	83,1	82,9	82,5	83,0	83,2	82,9	82,8	82,7	82,81	0,27 %
$d_p$	66,2	66,9	66,3	66,7	66,7	66,1	66,5	66,2	66,5	66,9	66,49	0,36 %
$l_k$	690,9	687,8	683,9	689,6	686,2	690,9	685,3	691,1	690,9	687,9	688,4	0,32 %

Анализируя полученные геометрические параметры черновой трубы, получаем планируемое отношение  $D/S=10$ .

Раскатка гильзы происходила при 920 °С, для сравнительного анализа была также осуществлена раскатка при 850 °С. На основе проведенных расчетов построены графики зависимости усилия на валок, мощности и момента от времени (рисунок 33).

Среднее значение усилия на установившейся стадии составляет 130 кН при температуре 920 °С (при температуре 850 °С - 210 кН), момент прокатки – 10,5 кН·м при температуре 920 °С (при температуре 850 °С - 16 кН·м), а мощность прокатки достигает 63 кВт при температуре 920 °С (при температуре 850 °С - 96 кВт). Среднее значение осевого усилия на установившейся стадии равно 27 кН (при температуре 850 °С - 38 кН).

Анализ полученных данных показывает, что процесс раскатки гильзы протекал стабильно, а заданные параметры расчета обеспечивают получения черновой трубы с расчетными геометрическими параметрами.

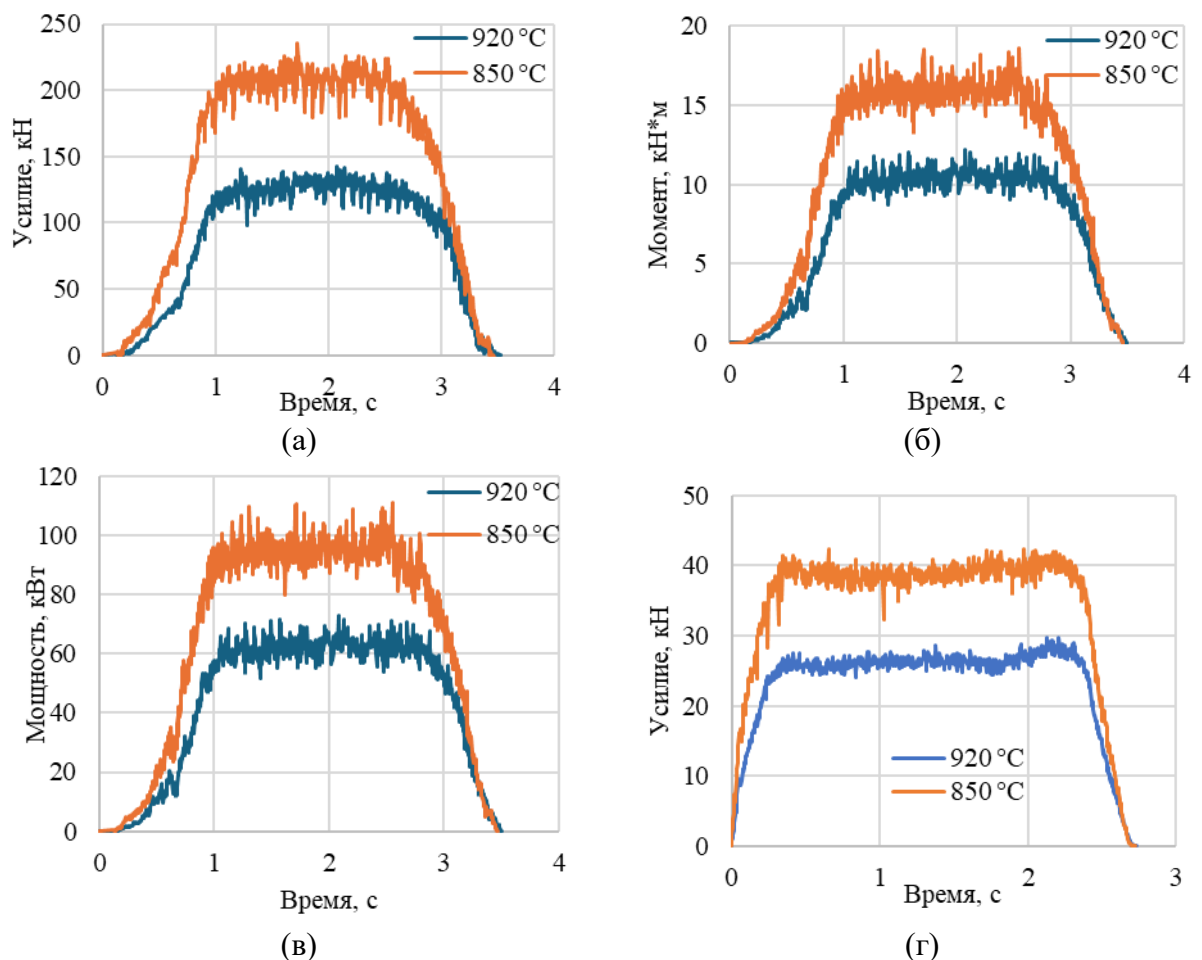


Рисунок 33 – Графики зависимости: (а) усилия на валок; (б) момента прокатки; (в) мощности прокатки; (г) осевого усилия на оправку в процессе раскатки

Для сравнения с результатами моделирования (рисунок 32) была рассчитана осевая скорость при раскатке  $V_s$ .

$$V_s = \frac{\pi \cdot D_B \cdot V_B}{60} \cdot \sin\beta = \frac{\pi \cdot 0.43 \cdot 57}{60} \cdot \sin 12^\circ = 0,2668 \text{ м/с} = 266,8 \text{ мм/с}$$

Согласно рисунку 34, значение скорости, определённое путём расчётов, соответствует значению скорости, которое было получено в результате моделирования процесса раскатки. Это объясняется тем, что при раскатке скольжение, которое не учитывалось при расчете, практически отсутствует, так как во время раскатки меньше сопротивление со стороны оправки.

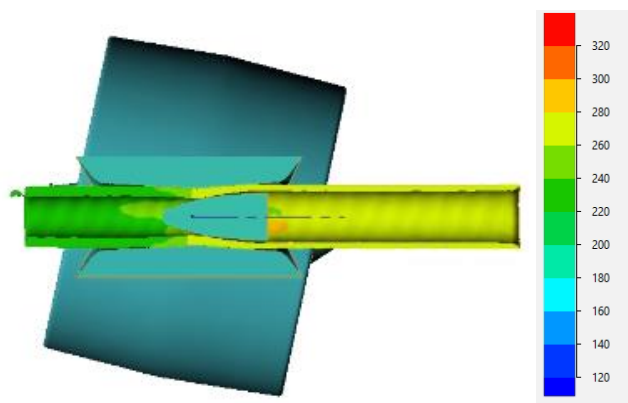


Рисунок 34 – Поле распределения скорости по оси прокатки, мм/с

Далее изучено температурное поле заготовки на трех этапах прокатки (рисунки 35–37).

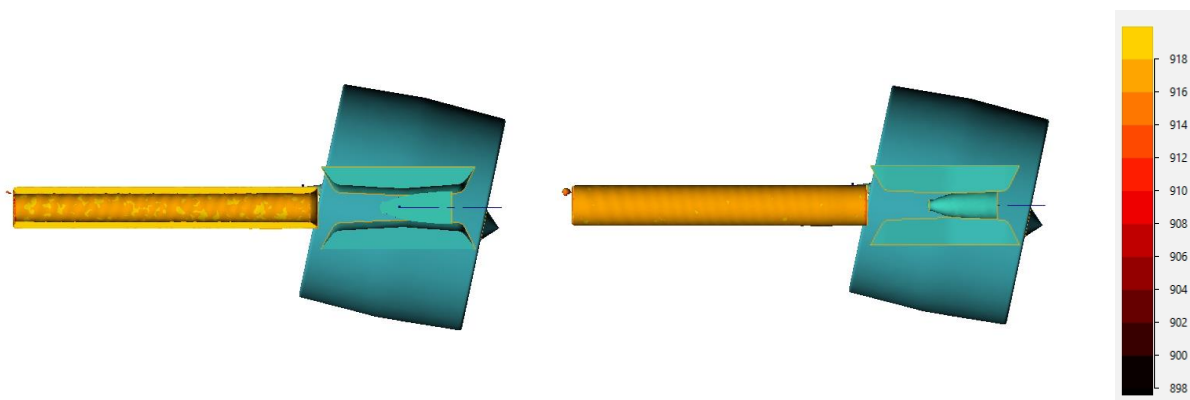


Рисунок 35 – Поле температур в начале прошивки, °С

На начальном этапе прокатки заготовка в центре равномерно нагрета и имеет среднюю температуру 918–920 °С. На поверхности и прикромочной зоне заготовка охлаждается до момента начала прокатки на 5–10 °С.

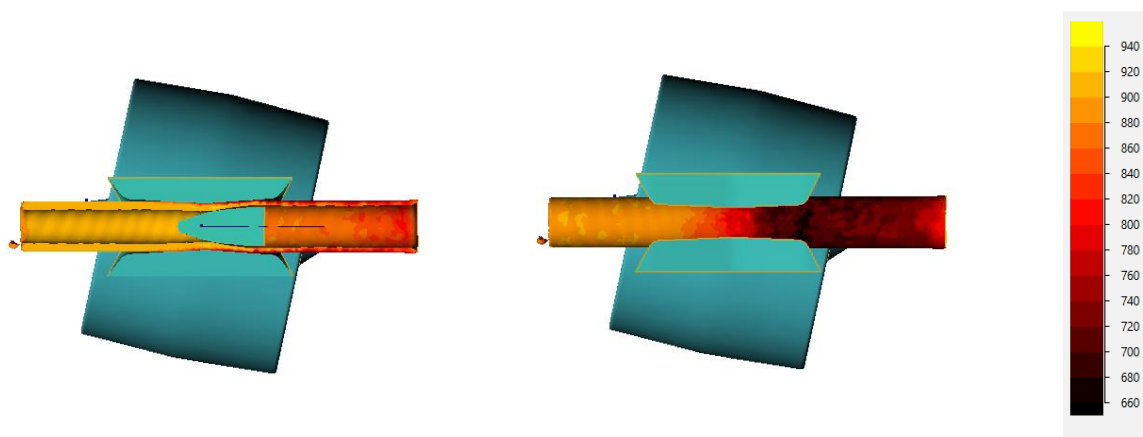


Рисунок 36 – Поле температур заготовки °С при установившемся процессе прошивки

В очаге деформации металл нагревается в среднем до 940 °С, при этом после выхода из очага деформации внутренняя поверхность охлаждается на приблизительно 100 °С, а на наружной поверхности зафиксировано снижение температуры на 200-280 °С.

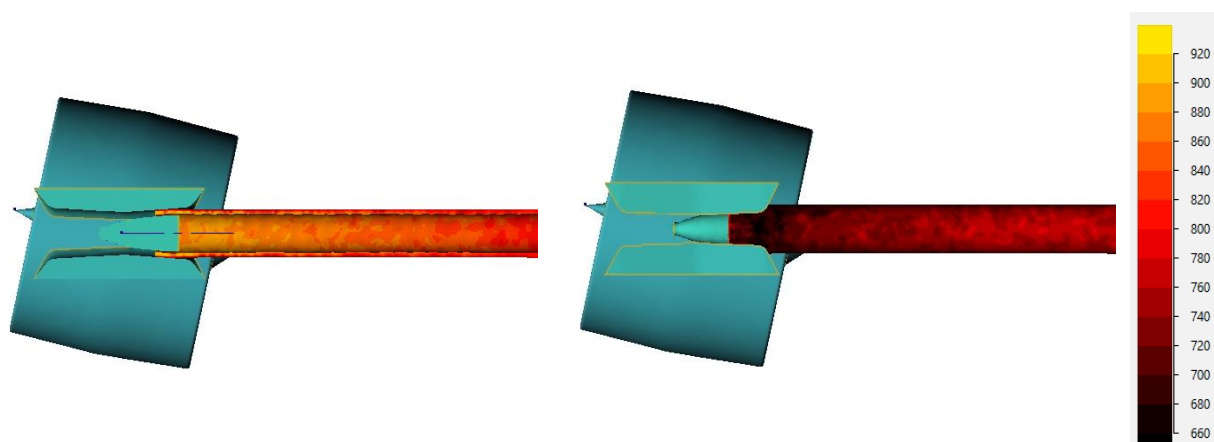


Рисунок 37 – Поле температур в конце прошивки, °С

После раскатки температура полученной черновой трубы на внутренней стенке варьируется от 760 до 860 °С, а температура на поверхности и прикромочной зоне изменяется от 660 до 760 °С.

#### **5.4 Физическое моделирование получения труб из сплавов на основе титана ВТ1-0 и ПТ-7М на стане МИСИС-130Д и разработка рекомендаций для получения труб из титановых сплавов на стане ТПА 70–270 с моделированием в QForm 3D**

##### **5.4.1 Методика проведения практического эксперимента**

Были использованы заготовки, изготовленные из материалов двух типов ПТ-7М и ВТ1-0, для проведения прокатки на 2 стадии практических экспериментов. Прокатку проводили на 2 заготовках каждого вида материала. Однако отличие между заготовками одной марки было в том, что на внешнюю поверхность одной заготовки наносили покрытие «РУСПОЛИМЕТ». Следовательно, это позволило провести анализ влияния данного покрытия на процесс прокатки и качество конечного изделия.

Геометрические размеры заготовки отражены в таблицах 14–15.

Таблица 14 – Диаметр и длина исходной заготовки, мм

Номер измерения	1	2	3	4	Среднее значение	Ср. относит. Отклонение, %	Длина
BT1-0 С покрытием	80,6	80,9	80,7	80,7	80,7	0,11	491
BT1-0 Без покрытия	80,7	80,5	80,7	80,6	80,6	0,09	493
PT-7M С покрытием	81,3	81,2	81	81,2	81,2	0,12	495
PT-7M Без покрытия	81,1	81,1	81,3	81,2	81,2	0,12	498

Таблица 15 – Отклонение зацентровки, мм

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	Среднее значение	Ср. относит. Отклонение, %
BT1-0 С покрытием	30,1	29,7	29,5	31,1	32,1	29,4	30,4	31	30,4	1,95
BT1-0 Без покрытия	30	30,4	30,4	30,5	30,4	29,6	30,8	31,1	30,4	0,79
PT-7M С покрытием	28,4	30,4	31	29,8	30,9	30,5	30,9	31,7	30,5	1,81
PT-7M Без покрытия	30	31,8	28,6	32,4	32,1	28,7	29,6	32,4	30,7	3,84

На рисунке 38 продемонстрировано внешнее отличие заготовок одной марки с покрытием и без него. Покрытие «РУСПОЛИМЕТ» на заготовку было нанесено в 3 слоя.





а)

б)

Рисунок 38 – Исходная заготовка: а) без покрытия; б) с покрытием

Прокатка заготовок ПТ–7М и ВТ1–0 была проведена на стане МИСИС-130Д. Данные заготовки нагревали в течение 80 минут до 960 °С и до 860 °С, соответственно.



Рисунок 39 – Внешний вид стана МИСИС-130Д

Параметры настройки очага деформации при прошивке и раскатке отражены в таблице 16.

Таблица 16 – Параметры настройки стана МИСИС-130Д

Общий $\beta=12^\circ$	Прошивка					Раскатка				
	$V_v$ , об/мин	$V_p$ , мм	$L_p$ , мм	$d_{опр}$ , мм	$C$ , мм	$V_v$ , об/мин	$V_p$ , мм	$L_p$ , мм	$d_{опр}$ , мм	$C$ , мм
ВТ1-0	57	69	76	52	40	57	69	82.5	62.7	60
ПТ-7М						57	69	84	61.5	80

Заготовки из титанового сплава ПТ–7М и ВТ1–0 нагревались в печи в течение 30 минут перед осуществлением операции раскатки до температуры 940 °С и до 830 °С, соответственно.

#### 5.4.2 Анализ результатов экспериментальной прокатки на стане МИСИС-130Д

Процесс прошивки и раскатки характеризовался стабильным захватом заготовки рабочими валками и отсутствием пиковых нагрузок на главном приводе. Во время эксперимента регистрировали токовую нагрузку на основном приводе прокатного стана и машинное время прокатки, полученные данные представлены в таблице 17.

В процессе эксперимента на стане МИСИС-130Д из-за ограничения на выходной стороне произошло явление, известное как закат гильзы. Это привело к тому, что результаты раскатки нельзя считать надёжными по ряду показателей. Чтобы предотвратить повторение ситуации с закатом гильзы для сплава ВТ1-0, была проведена корректировка очага деформации.

Таблица 17 – Длительность процесса прокатки и усреднённое значение силы тока

Параметры	Прошивка		Раскатка	
	Время, с	Токовая нагрузка, А	Время, с	Токовая нагрузка, А
ПТ-7М С покрытием	7,43	337	10,7	286,1
ПТ-7М Без покрытия	8,12	325,4	9,06	280,8
ВТ1-0 С покрытием	7,95	354,9	9,17	354,4
ВТ1-0 Без покрытия	8,44	332,25	9,21	332,5

Анализ результатов эксперимента показал, что применение покрытия «РУСПОЛИМЕТ» позволяет снизить скольжение заготовки в процессе деформации, сокращая машинное время прокатки, однако при этом наблюдается небольшое повышение средней токовой нагрузки – примерно на 2–6 %.

В результате операции прошивки были изготовлены гильзы, внешний вид которых представлен на рисунке 40: часть гильз имели покрытие «РУСПОЛИМЕТ» №1, другая часть — без покрытия №2.

По завершении операции прошивки были произведены измерения геометрических параметров полученной гильзы, средние значения длины, диаметра и толщины стенки представлены в таблицах 18–20.

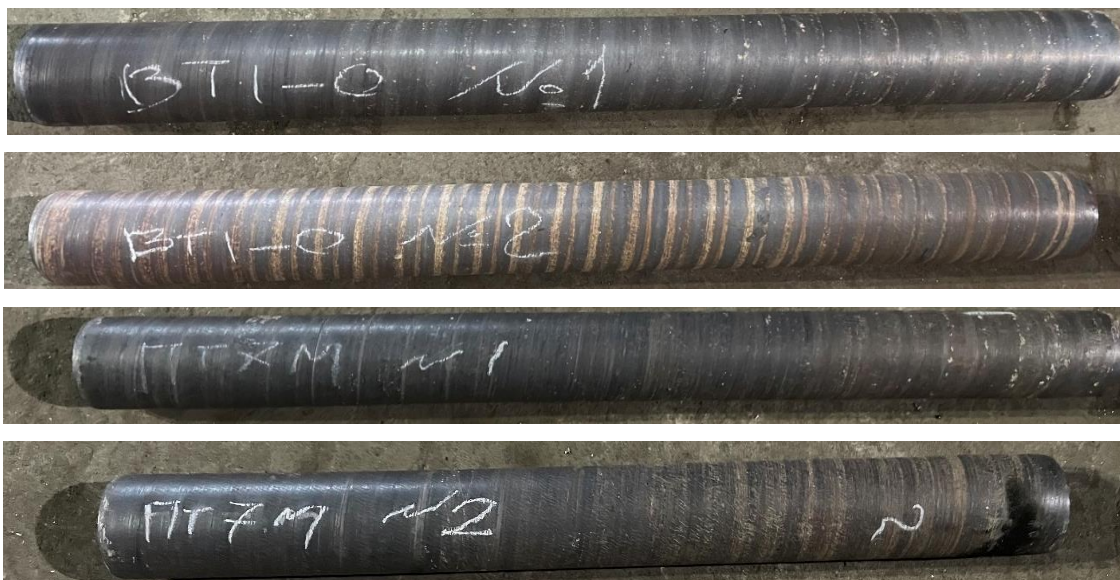


Рисунок 40 – Внешний вид гильз после прошивки

Таблица 18 – Диаметр и длина полученной гильзы, мм

Измерение №	Среднее значение	Длина
ПТ-7М С покрытием	81,5	900
ПТ-7М Без покрытия	81,6	904
BT1-0 С покрытием	80,6	916
BT1-0 Без покрытия	80,5	919

Таблица 19 – Толщина стенки переднего конца гильзы, мм

Название	Среднее значение
ПТ-7М Без покрытия	13,3
ПТ-7М С покрытием	13,4
BT1-0 Без покрытия	13,7
BT1-0 С покрытием	13,5

Таблица 20 – Толщина стенки заднего конца гильзы, мм

Название	Среднее значение
ПТ-7М Без покрытия	13,4
ПТ-7М С покрытием	13,4
ВТ1-0 Без покрытия	13,4
ВТ1-0 С покрытием	13,3

В результате операции раскатки были изготовлены черновые трубы, внешний вид которых представлен на рисунке 41: часть труб имели покрытие «РУСПОЛИМЕТ», другая часть — без покрытия №2.



Рисунок 41 – Внешний вид труб после раскатки

По завершении операции раскатки были произведены измерения геометрических параметров полученных труб, эти данные представлены в таблицах с 21 по 23.

Таблица 21 – Диаметр и длина полученной гильзы после раскатки, мм

Измерение №	1	2	3	4	5	6	7	8	Среднее значение	Δ, %	Длина
ПТ-7М С покрытием	80,5	81,8	81,2	80,8	80,9	81,8	82	81,6	81,3	1,84	1387
ПТ-7М Без покрытия	81,7	82	82	82,2	81,9	82,2	82,1	80,2	81,8	2,45	1356
ВТ1-0 С покрытием	83,5	82,6	82,6	82,1	82,2	82	82,7	81,1	82,4	2,91	1172
ВТ1-0 Без покрытия	84	82	83,2	83	83,5	82,6	81,9	81	82,6	3,63	1162

Таблица 22 – Толщина стенки переднего конца трубы, мм

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	Среднее значение	Ср. относит. Отклонение, %
ПТ-7М С покрытием	8,7	8,5	8,1	8,3	8,7	8,6	8,4	8,6	8,5	7,07
ПТ-7М Без покрытия	8,6	8,1	8,3	8,4	8,2	8,3	8,4	8,2	8,3	6,02
ВТ1-0 С покрытием	8,9	9,2	9	9,1	9,2	9,5	9,4	9,5	9,2	6,5
ВТ1-0 Без покрытия	8,9	9	8,8	9,2	9,4	9,2	9,1	8,9	9,1	5,52

Таблица 23 – Толщина стенки заднего конца трубы, мм

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	Среднее значение	Ср. относит. Отклонение, %
ПТ-7М С покрытием	7,8	7,9	7,9	7,7	7,6	7,7	7,6	7,5	7,7	5,19
ПТ-7М Без покрытия	8,6	8,6	8,7	8,3	8,4	8,4	8,5	8,7	8,5	4,69
ВТ1-0 С покрытием	9,4	9,6	9,3	9,5	9,4	9,8	9,7	9,4	9,5	5,26
ВТ1-0 Без покрытия	9,4	9,2	9,3	9,7	9,6	9,4	9,2	9,3	9,4	5,32

С целью сравнения результатов моделирования и экспериментальной прошивки были выбраны полученные значения диаметров и толщины стенки для сплава ВТ1-0. Для сравнения с результатами раскатки был выбран результат ПТ-7М, так как данные о геометрических параметрах были получены до внесения изменений в настройку очага деформации. При расчете экспериментальных размеров труб приняты средние значения диаметра и толщины стенки для переднего и задних концов. Результаты сравнения размеров гильз и труб отражено в таблице 24.

Таблица 24 – Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментальной прокатки

Параметр	Моделирование	Эксперимент	$\Delta$ , %
$D_{срТ}$ , мм	77,05	80,55	4,34
$S_{срТ}$ , мм	13,01	13,46	3,34
$D_{срТ}$ , мм	82,81	82,5	0,37
$S_{срТ}$ , мм	8,16	8,25	1,09

С учетом того, что при моделировании не учитываются некоторые факторы, разницу

в результатах, полученных в ходе эксперимента и моделирования, составляющую менее 5%, можно считать допустимой.

Во время экспериментальной прокатки анализировалось состояние поверхности гильз и труб. На поверхности рассматриваемой трубы после завершения прокатки появились некоторые дефекты, а именно налипший металл, задиры, канавки. Данные дефекты возникли вследствие прохождения деформации направляющих линеек. Иллюстрации с примерами поверхностных дефектов на трубах представлены на рисунке 42.



Рисунок 42 – Поверхностные дефекты: а) задыр; б) налипание на поверхность металла; в) канавки, образовавшиеся от направляющих линеек

Принимая во внимание, что в процессе производства предусмотрены операции по обработке труб методом обточки и расточки, обнаруженные на поверхности гильз дефекты можно отнести к незначительным и поддающимся устранению, так как они имеют глубину не более 2,5 мм. При разработке модели процесса производства титановых труб посредством ТПА 70–270 следует предусмотреть дополнительный припуск для выполнения последующей механической обработки в целях устранения возможных дефектов на поверхности.

В ходе экспериментальной прокатки также исследовали износ прошивных оправок из различных материалов. В качестве исследуемых материалов были выбраны марки стали 4X5МФС, 3X3М3Ф и 4X4ВМФС. Как и в случае с прошивкой заготовок из коррозионностойких марок стали 20X13, оправка из стали 4X5МФС показала наилучший результат относительно изменения массы оправки, который составляет 50 % от изменения массы оправки 4X4ВМФС и 35 % для оправки из 3X3М3Ф. С целью снижения простоев на замену прошивных оправок рекомендуется использовать оправки из стали 4X5МФС.

### 5.4.3 Моделирование разработанной технологии получения титановых труб на ТПА 70–270 в программе QForm

На основе полученных ранее данных рассчитаны геометрические параметры очагов деформации ТПА 70–270 для прошивки и раскатки. Для того, чтобы получить чистовую трубу  $\varnothing 159 \times 13$  мм из ВТ1-0, ПТ-7М рассмотрено два варианта таблицы прокатки (таблица 26). Моделирование выполнено для варианта №1, как для наиболее «жесткого» с точки зрения допусков и температурных изменений в процессе прокатки.

В качестве исходной заготовки для моделирования использовали заготовку диаметром 160 мм и длиной 500 мм. Прокатка осуществлялась с использованием прошивной и раскатной оправок диаметрами 106 и 126 мм соответственно. Схемы рассчитанных очагов деформации, которые были использованы при прошивке и раскатке, показаны на рисунках 43 и 44.

В таблицах 27 и 28 приведены основные данные о температурных и деформационных параметрах процессов прошивки и раскатки.

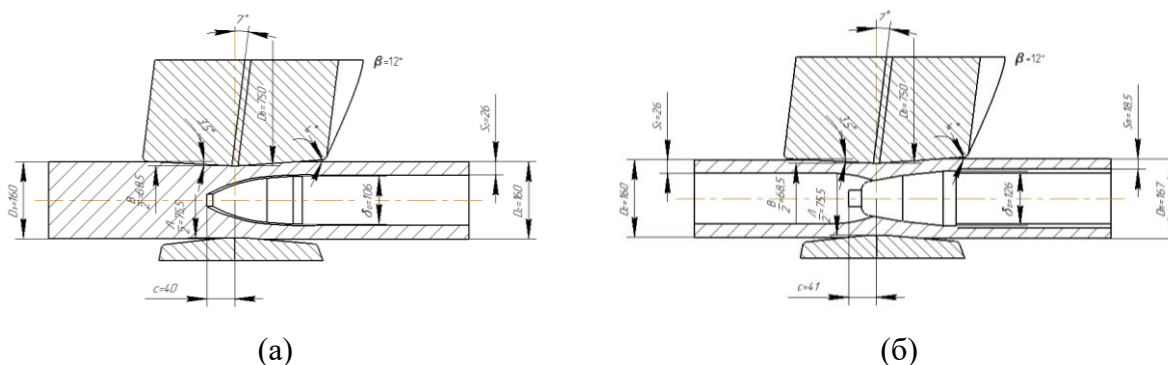


Рисунок 43 – Схема очага деформации по 1 варианту: (а) Прошивка, (б) Раскатка

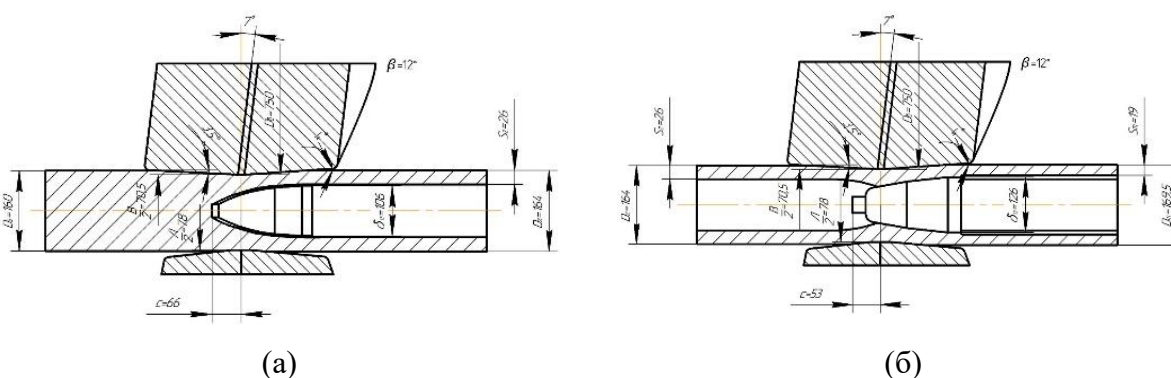


Рисунок 44 – Схема очага деформации по 2 варианту: (а) Прошивка, (б) Раскатка



Таблица 26 – Основные температурно-деформационные параметры прокатки

№	Размеры труб под Мех. Обр				Заготовка			Суммарный коэф. вытяжки	Прошивной стан					Раскатной стан						Калибровочный стан			Размеры труб после Мех. Обр	
	Do	So	Lo	D/S	Dз	Lз max	Mз	Σμ	Dг	Sг	μп	дп	Lг max	Dр	Sp	D/S	μр	др	Lтр max	Dг.т.	μкс	Lг.т. max	D	S
	мм	мм	мм	-	мм	мм	кг		мм	мм		мм	мм	мм	мм	мм	мм		мм	мм	мм		мм	мм
1	164	18,5	4000	8,9	160	1840	279	2,35	160	26	1,84	106	3380	167	18,5	9	1,27	126	4286	165,8	1,01	4000	159	13
2	165	19	4000	8,7	160	1900	279	2,28	164	26	1,78	106	3389	169,5	19	9	1,25	126	4252	166,5	1,02	4000	159	13

Таблица 27 – Основные температурно-деформационные параметры прошивки

№ вар.	Vп, мм	Lп, мм	Uп, %	ξ	C, мм	n, об/мин	β, °	T, °C
1	137	151	14,4	1,1	40	50	12	860
2	141	156	11,8	1,1	66	50	12	860

Таблица 28 – Основные температурно-деформационные параметры раскатки

№ вар.	Vп, мм	Lп, мм	Uп, %	ξ	C, мм	n, об/мин	β, °	T, °C
1	137	151	14,4	1,1	41	50	12	830
2	141	156	11,8	1,1	53	50	12	830

Следующим шагом было построение 3D модели в SolidWorks на основе расчетов и схем основных инструментов. Созданную трехмерную модель перенесли в программу QForm, задали необходимые параметры (таблица 25) и запустили расчет (рисунок 45).

Таблица 25 – Дополнительные данные для моделирования

Материал валков	Материал линейки	Материал оправки	Температура инструмента $T_{и}$ , °C	Фактор трения валков	Фактор трения линеек	Фактор трения оправки
Сталь 45	Сталь 4X5МФС	Сплав ХН55МБЮ	50	1	0,3	0,1

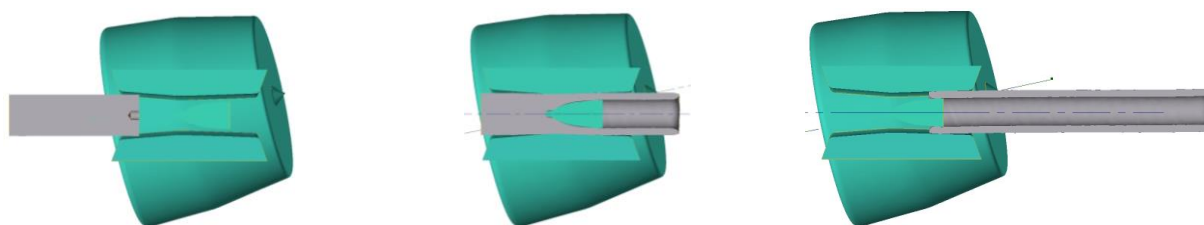


Рисунок 45 – Этапы моделирования процесса прошивки в QForm

При анализе процесса моделирования прошивки на стане ТПА 70–270 были измерены толщина стенки  $S_r$  и наружный диаметр  $D_r$  гильзы, также на основе измерений рассчитан внутренний диаметр гильзы  $d_r$  (таблица 29). Можно видеть, что выбранная настройка очага деформации и калибровка рабочего инструмента обеспечивают получение гильзы требуемых размеров с высокой точностью: отклонение по толщине стенки не превышает 2,29 %, среднее отклонение по диаметру составляет 0,92 %. На основе выполненного расчета были построены графики зависимости усилия на валок, момента и мощности от времени (рисунок 46).

Таблица 29 – Геометрические параметры гильзы из сплава ВТ1-0 после прошивки, мм

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее значение	$\Delta, \%$
$S_r$	26,9	26,79	26,43	26,86	26,79	26,43	26,81	26,29	26,43	26,62	26,64	2,2
$D_r$	160,76	160,31	160,15	160,43	159,9	160,01	160,39	159,73	159,53	161,21	160,24	0,9
$d_r$	106,96	106,73	107,29	106,71	106,32	107,16	106,77	107,15	106,67	107,97	106,97	1,5

Среднее значение усилия на установившейся стадии составляет 1100 кН, момент прокатки – 124 кН·м, а мощность прокатки достигает 650 кВт. Среднее значение осевого усилия на установившейся стадии равно 280 кН.

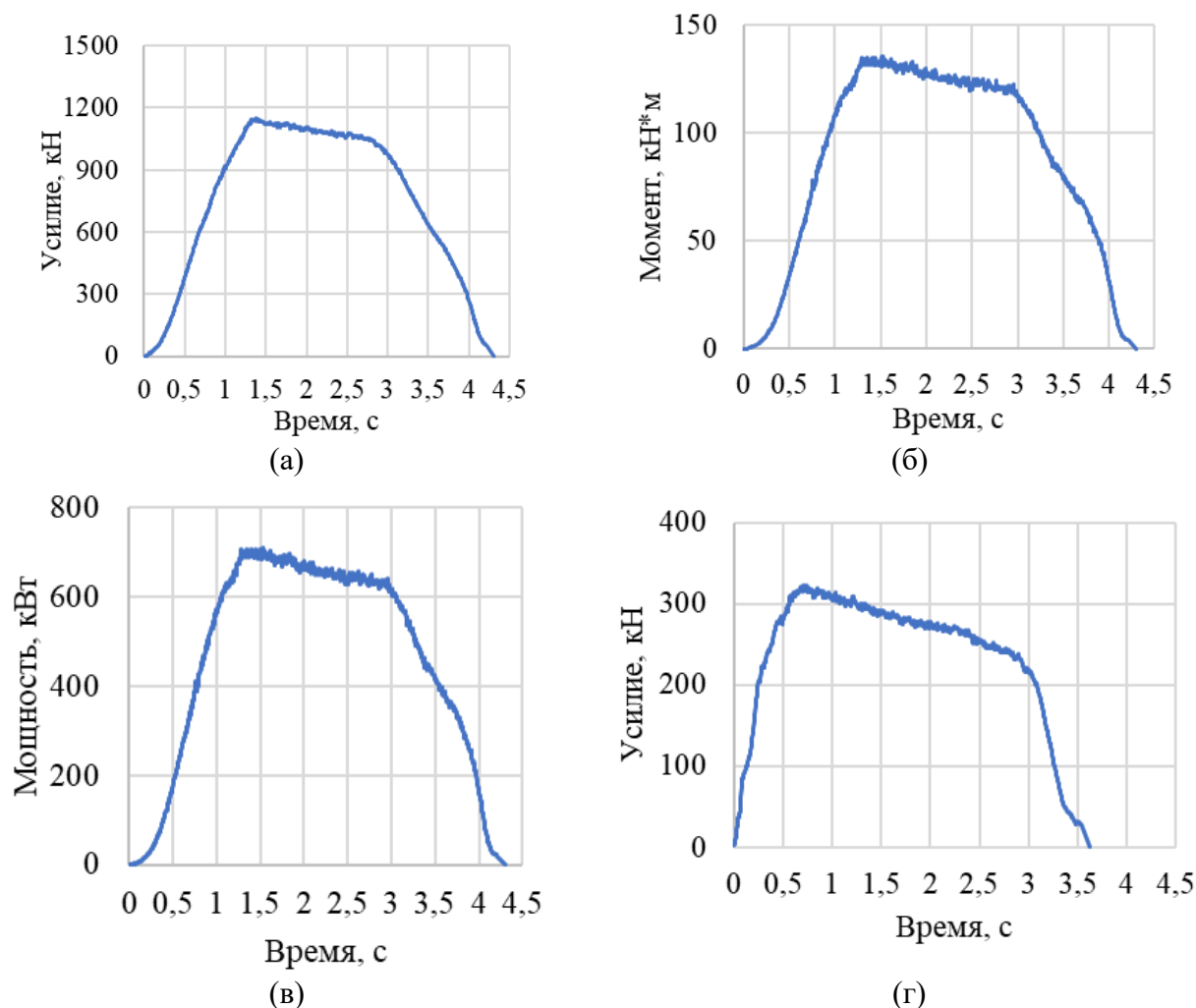


Рисунок 46 – Графики зависимости: (а) усилия на валок; (б) момента прокатки; (в) мощности прокатки; (г) осевого усилия на оправку

При анализе графиков, представленных на рисунке 46 можно сделать вывод, что процесс прошивки протекал стабильно и обеспечивал получения гильзы с заданными параметрами, а энергосиловые параметра находятся в допустимых пределах. Заполнение и освобождение очага деформации происходит плавно, без колебаний усилия. Для дополнительной верификации модели и сравнения с результатами моделирования (рисунок 47) была рассчитана осевая скорость  $V_s$ .

$$V_s = \frac{\pi \cdot D_B \cdot V_B}{60} \cdot \sin\beta = \frac{3,14 \cdot 0,75 \cdot 50}{60} \cdot \sin 12^\circ = 0,4082 \text{ м/с} = 408,2 \text{ мм/с}$$

При анализе расчетных данных и скорости, полученной в процессе моделирования можно сделать вывод, что рассчитанная скорость незначительно превышает полученную в процессе моделирования, в связи с тем, что расчет не учитывает скольжения. Таким образом, возможно определить значение коэффициента осевого скольжения как отношение скорости при

моделировании к рассчитанной скорости:

$$\frac{V_M}{V_p} = \frac{324,6}{408,2} = 0,792$$

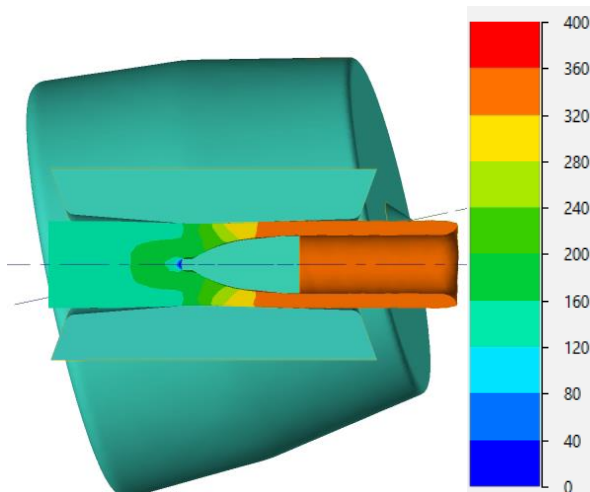


Рисунок 47 – Поле осевой скорости, мм/с

Следующей задачей было изучение температурного поля заготовки на трех этапах прокатки: в начале, середине и конце процесса, соответственно (рисунок 48–50). Перед прошивкой заготовка была нагрета до 860 °С.

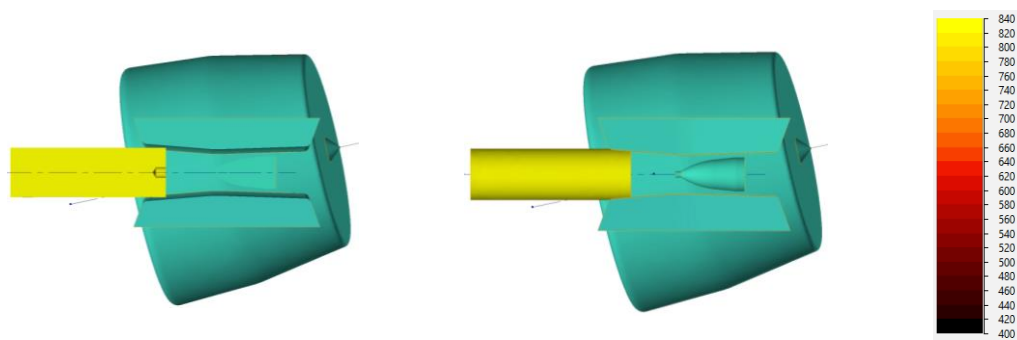


Рисунок 48 – Поле температур в начале прошивки, °С

На начальном этапе прокатки заготовка в центре имеет равномерную температуру 860 °С. На поверхности и прикромочных зонах до контакта с валком температура поверхности заготовки в среднем снижается на 3 °С.

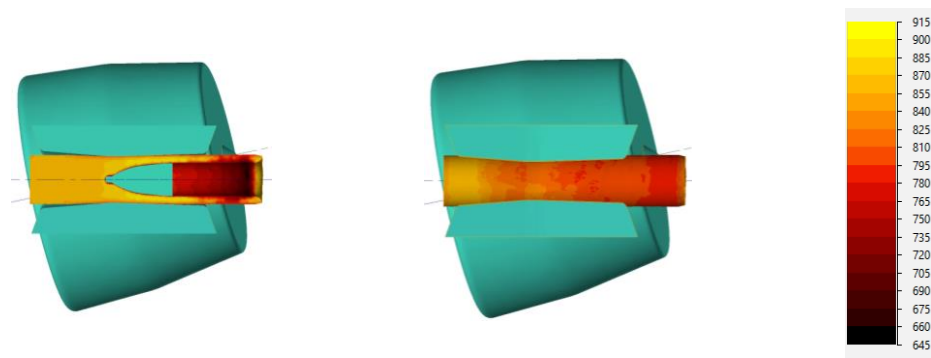


Рисунок 49 – Поле температур заготовки °С при установившемся процессе прошивки

В очаге деформации внутренние слои металла нагреваются до 895 °С в зоне пережима валков и области раскатки на оправке, где локализована деформация. При этом после прошивки внутренняя и внешняя поверхность охлаждается на 50–70 °С. При контакте с инструментом передний конец гильзы охлаждается из-за разницы температур (Температура инструментов 50 °С). Далее в процессе прокатки происходит интенсивный разогрев оправки, благодаря чему скорость охлаждения внутренней поверхности гильзы замедляется.

После окончания процесса прошивки распределение температуры полученной гильзы имеет незначительный градиент. Температура наружной и внутренней поверхности составляет 720–840 °С, а температура по толщине стенки гильзы от 770 до 880 °С.

В ходе исследования были также изучены различные варианты материалов для прошивной оправки с целью анализа их износостойкости. Для сравнения были выбраны материалы 4Х5МФС и 3Х3М3Ф из базы данных программы QForm.

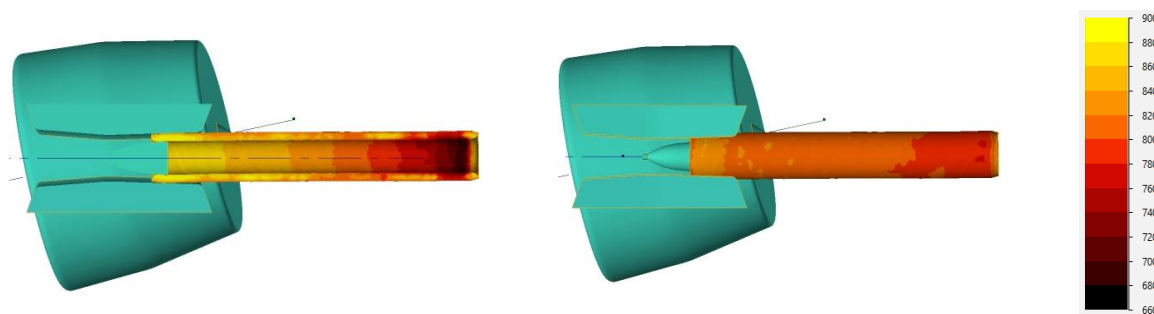


Рисунок 50 – Поле температур в конце прошивки, °С

Износ оправки был рассчитан с использованием стандартной подпрограммы QForm, которая применяется для процессов горячей обработки металлов давлением. Полученные результаты соответствуют ранее полученным данным практического эксперимента. Максимальный износ оправки из стали 4Х5МФС составил 0,013 мм, а из стали 3Х3М3Ф — 0,016 мм. Данные износа по всей поверхности оправки отражены на графиках рисунок 51.

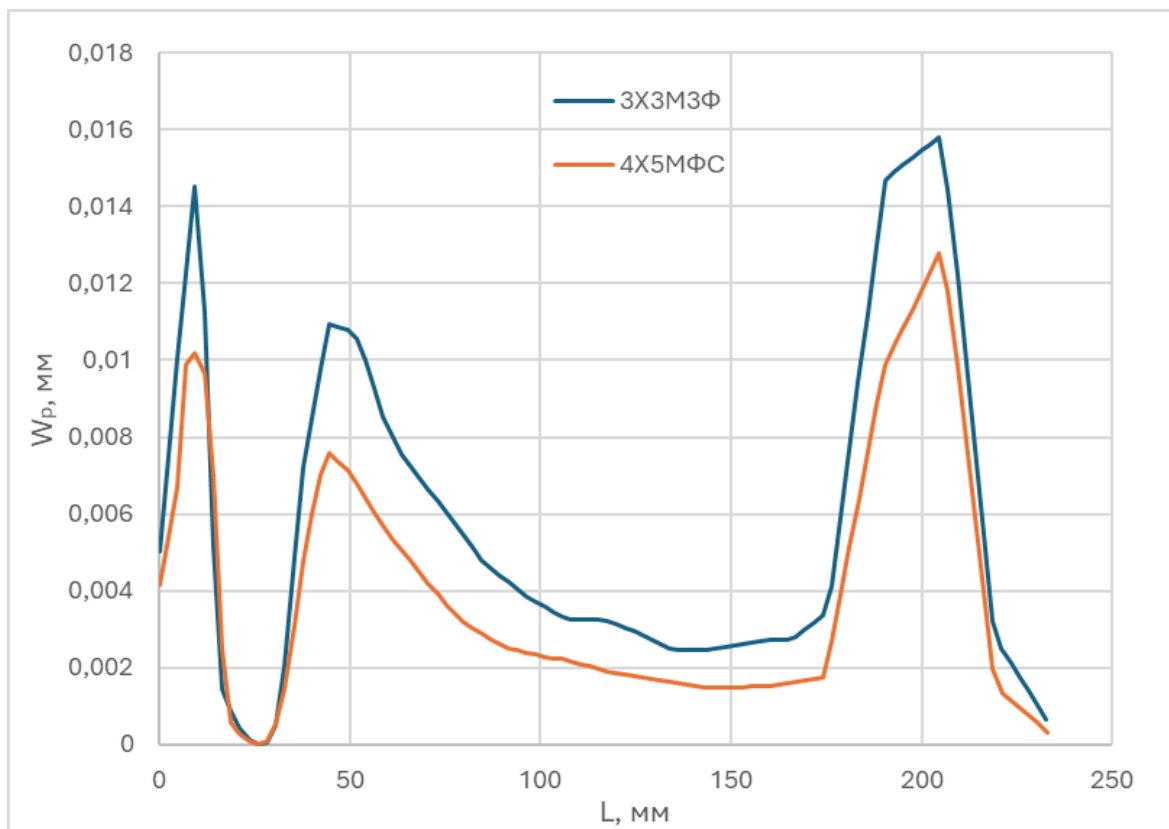


Рисунок 51 – Распределение глубины износа  $W_p$  оправки от радиального давления в зависимости от материала

Для наглядного представления результатов были построены поля износа (рисунок 52).

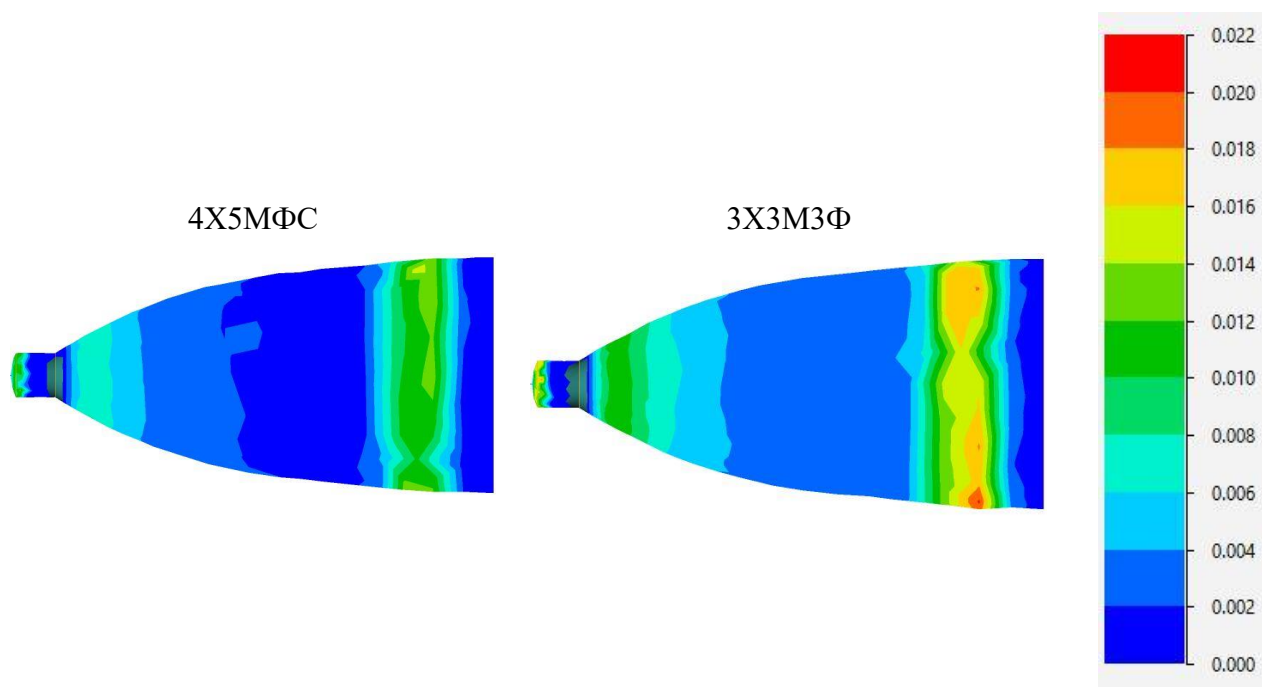


Рисунок 52 – Поле износа оправки в зависимости от материала, мм

С целью анализа процесса охлаждения гильзы в процессе ее транспортировки на входную сторону прошивного/раскатного стана было смоделировано охлаждение полученной гильзы на воздухе ( $T_{в}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в течение 40 с. Было проанализировано изменение температуры на наружной и внутренней поверхности, а также в середине толщины стенки гильзы. Результаты представлены на рисунке 53.

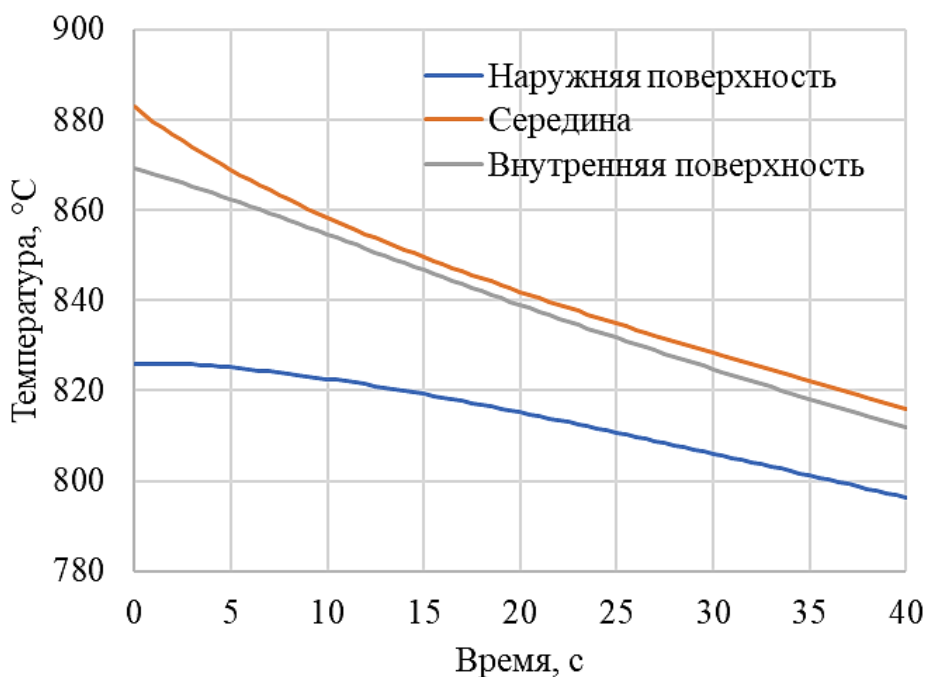


Рисунок 53 – Изменение температуры гильзы при охлаждении

Температура гильзы после охлаждения на воздухе при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течении 40 с снизилась в среднем на  $30\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что является допустимым для дальнейшей прокатки. Также можно отметить, что начальная разница температур гильзы по толщине стенки снижается за счет внутренней теплопередачи и перераспределения тепла и не превышает  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Полученные данные температурного изменения заготовки в процессе прошивки, охлаждения и раскатки являются предварительными и требуют экспериментальной проверки.

Для моделирования процесса раскатки была построена модель раскатной оправки диаметром 126 мм и задано расстояние выдвижения носка оправки за пережим валков равное 41 мм. Основные параметры раскатки занесены в таблицу 28. На рисунке 44 представлена схема рассчитанного очага деформации. Параметры расчета для операции раскатки остались прежними. Гильзу раскатали при температуре  $830\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Процесс раскатки показан на рисунке 54.

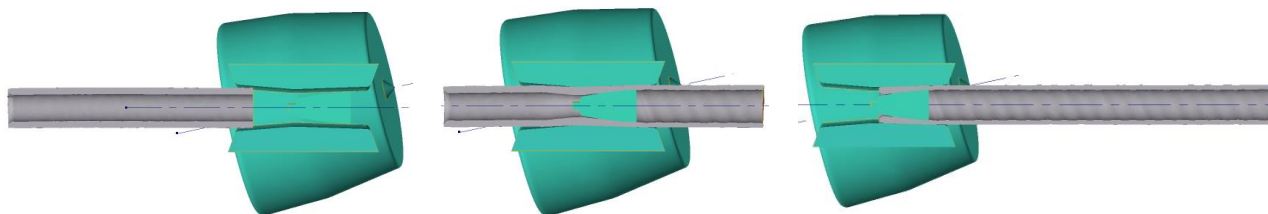


Рисунок 54 – Этапы расчета процесса раскатки в QForm

При анализе процесса моделирования раскатки на стане ТПА 70–270 были получены значения толщины стенки черновой трубы  $S_p$ , наружного диаметра  $D_p$ , а также рассчитан внутренний диаметр  $d_p$  (таблица 30).

Таблица 30 – Геометрические параметры трубы после раскатки

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее значение	$\Delta$ , %
$S_p$	18,64	18,82	18,31	19,05	18,92	18,81	18,93	18,96	19,14	18,85	18,84	4,41
$D_p$	166,65	166,41	166,25	167,08	166,7	166,34	166,6	166,88	168,23	166,26	166,74	1,19
$d_p$	129,37	128,77	129,63	128,98	128,85	128,72	128,84	128,96	129,95	128,56	129,06	0,95

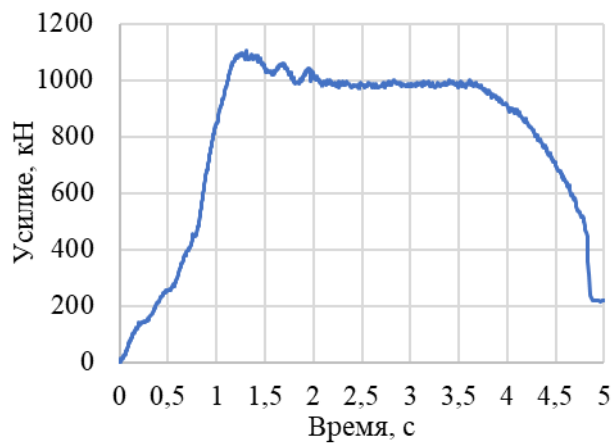
Анализ показывает, что выбранная конфигурация очага деформации в сочетании с калибровкой рабочего инструмента обеспечивают получение гильз с заданными параметрами и высоким уровнем точности. Максимальное отклонение толщины стенки — не более 4,4 %, среднее отклонение по диаметру составляет 1,2 %. На основе проведенного расчета построены графики зависимости усилия на валок, мощности и момента прокатки от времени (рисунок 55).

Среднее значение усилия на установившейся стадии составляет 983 кН, момент прокатки – 134 кН·м, а мощность прокатки достигает 703 кВт. Среднее значение осевого усилия на установившейся стадии равно 202 кН.

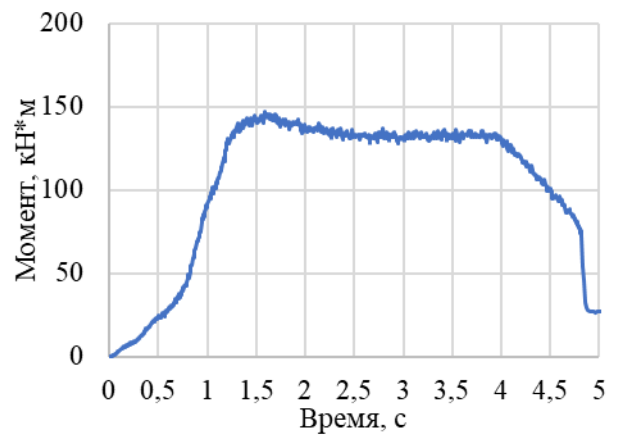
Анализ полученных данных показывает, что процесс раскатки гильзы протекал стабильно, заданные параметры расчета обеспечивают получения черновой трубы с расчетными геометрическими параметрами, а энергосиловые параметры не превышают допустимых.

Далее изучено температурное поле заготовки-трубы на трех этапах прокатки: в начале, середине и конце соответственно (рисунки 56–58).

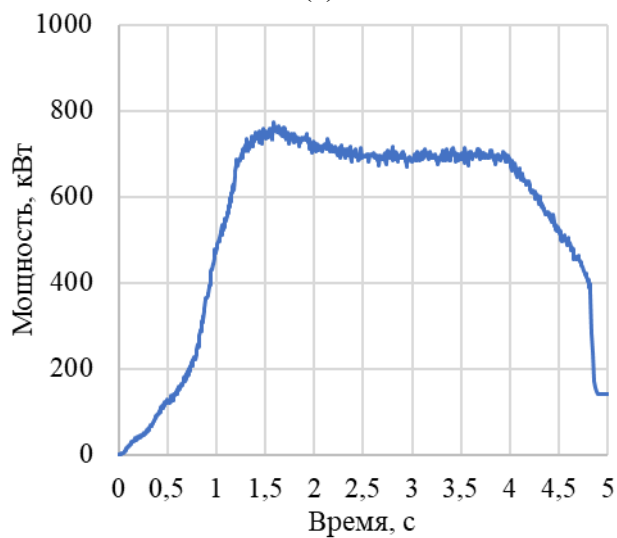




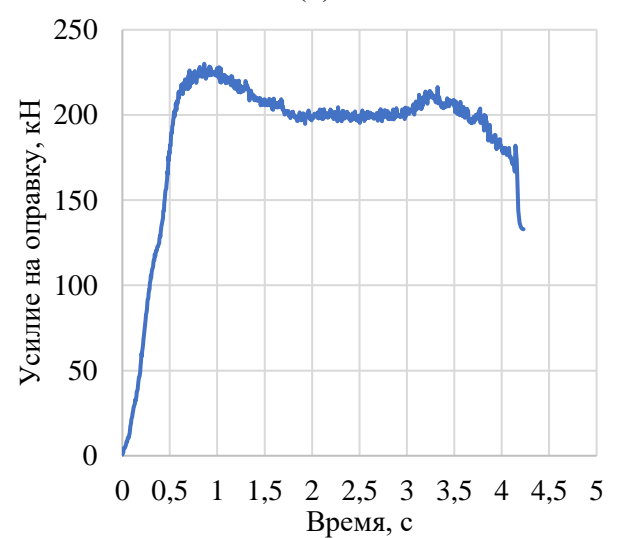
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 55 – Графики зависимости: (а) усилия на валок; (б) момента прокатки; (в) мощности прокатки; (г) осевого усилия на оправку в процессе прошивки

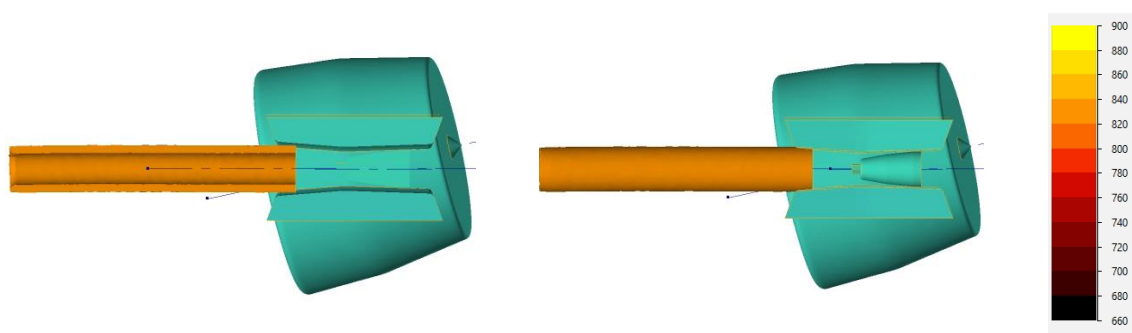


Рисунок 56 – Поле температур в начале раскатки, °С

На начальном этапе прокатки заготовка в центре равномерно нагрета и имеет среднюю температуру 825–830 °С. На поверхности и прикромочной зоне заготовка охлаждается до момента начала прокатки на 5°С.

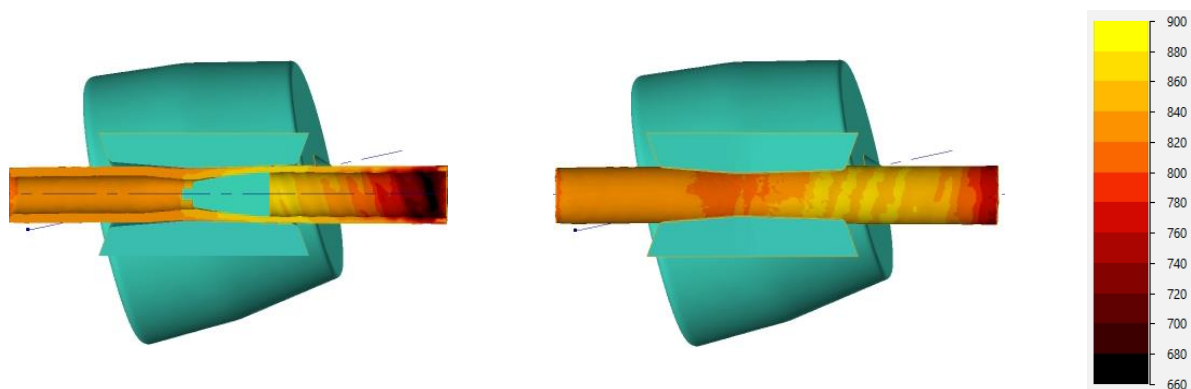


Рисунок 57 – Поле температур заготовки °С при установившемся процессе раскатки

В очаге деформации металл нагревается в среднем до 865 °С, при этом после выхода из очага деформации внутренняя и наружная поверхность трубы начинает охлаждаться до 830-840 °С.

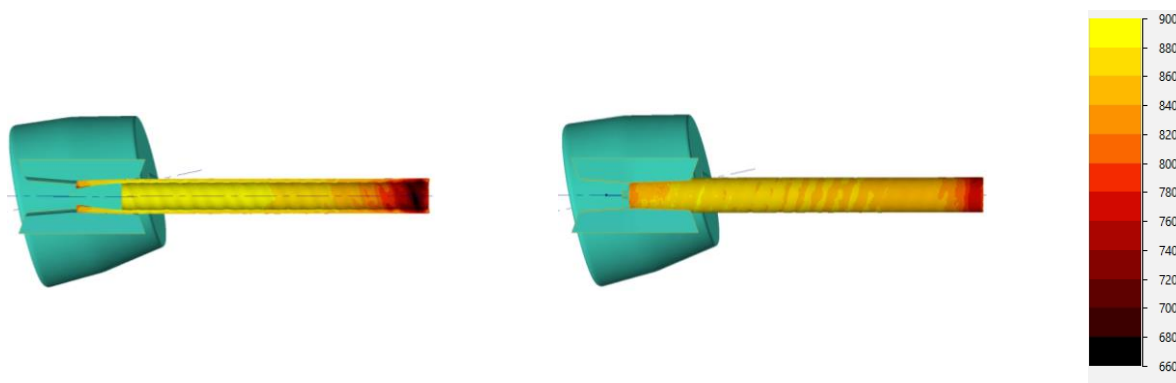


Рисунок 58 – Поле температур в конце раскатки, °С

После раскатки температура полученной черновой трубы варьируется от 820 до 880 °С. Очевидно, что во время дальнейшей транспортировке к правильно-калибровочному стану градиент температуры уменьшится также за счет внутреннего теплообмена.

В общем можно сказать, что полученные данные по температуре заготовки на основных этапах технологического цикла дают возможность заключить, что предложенные температурно-деформационные параметры позволят осуществить процесс производства труб из титановых сплавов в рамках работы на ТПА 70-270.

## 5.5 Прокатка труб из титановых сплавов на ТПА 70-270

### 5.5.1 Отработка технологии на заготовках из углеродистой стали

Для корректировки процесса прокатки и определения оптимальных параметров процесса на стане ТПА 70-270 (рисунок 59) было проведено 5 пробных прокаток заготовок 32Г2

диаметром 160 мм и длиной 2050 мм.

Для производства черновой трубы было выбрано две оправки с прошивным диаметром 106 мм и раскатным диаметром 126 мм. Данный выбор оправок позволит получить черновые трубы с необходимым параметром 165x19 мм.

Анализ процесса прокатки осуществлялся после каждой прокати, в результате чего слегка были скорректированы параметры очага деформации. В таблице 32 продемонстрированы данные изменения параметров после этапов прошивки, раскатки и калибровки.



Рисунок 59 – Вид ТПА 70-270

В таблице 31 отражены данные настройки очага деформации в ходе прокатки заготовок из стали 32Г2 на стане ТПА 70-270.

Таблица 31 – Настройка очага деформации

№ Заготовки	$V_{в}$ , об/мин	$V_{п}$ , мм	$L_{п}$ , мм	$C$ , мм (Прошивка)	$C$ , мм (Раскатка)
1	50	142	161	70	75
2	50	140	161	70	90
3	50	140	161	70	105
4	50	140	159,5	70	95
5	50	140	159,5	70	95

Таблица 32 – Геометрические параметры трубы, мм

№ Заготовки		1	2	3	4	5
D <sub>п</sub> , мм		169	168	167,5	-	-
D <sub>р</sub> , мм		171,5	170,5	169	169	-
Под механическую обработку	l, мм	4100	-	4730	4555	4559
	D, мм	166,2-166,6	-	164,5-165,1	164,9-165,35	164,8-165,3
	S, мм	21,5-23	19,5-21,5	18-20	18-20	18-20,5

На рисунках с 60 по 64 можно увидеть, как выглядят рабочие инструменты после того, как были прошиты пять заготовок.



Рисунок 60 – Состояние поверхности нижней линейки

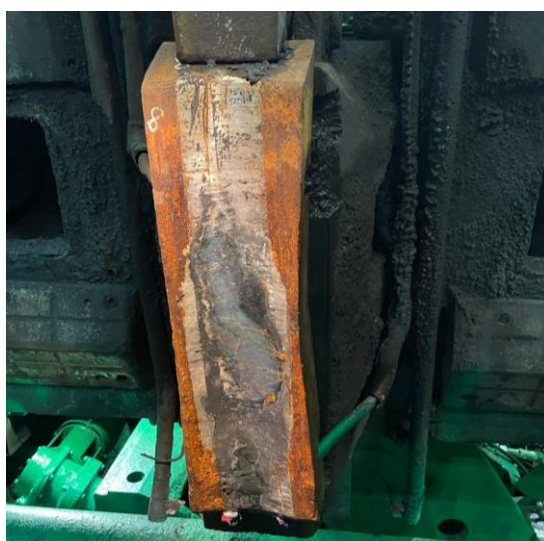


Рисунок 61 – Состояние поверхности верхней линейки



Рисунок 62 – Состояние поверхности прошивной оправки



Рисунок 63 – Состояние поверхности раскатной оправки

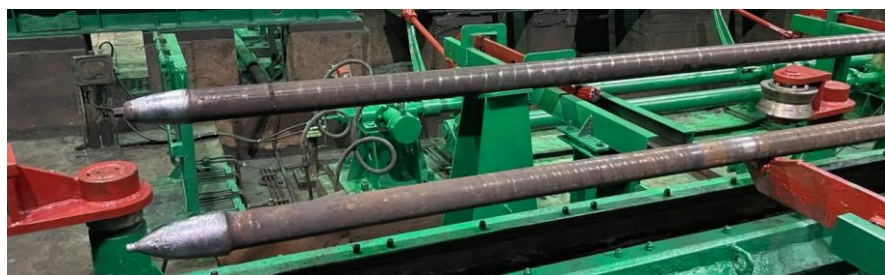


Рисунок 64 – Внешний вид стержней оправок после прокатки

По завершении получения труб из углеродистой стали начался процесс подготовки титановых заготовок к прокатке, предварительно выполнив настройку очага деформации (рисунок 65).



Рисунок 65 – Внешний вид труб из 32Г2

### 5.5.2 Опытная прокатка заготовок из титановых сплавов

В ходе следующего эксперимента проводилась прокатка трех заготовок из титанового сплава ПТ-7М и четырех из ВТ1-0. Исследуемые заготовки представлены на рисунке 66. Перед началом эксперимента проводился визуальный осмотр заготовок, с их поверхности убирали загрязнения и наносили покрытие «РУСПОЛИМЕТ».



Рисунок 66 – Внешний вид заготовок с нанесенным покрытием

В ходе эксперимента использовали заготовки длиной 2085 мм и диаметром 160-162 мм.

После отработки прокатки заготовки из углеродистой стали была проведена очистка пути заготовки от окалины. С помощью сжатого воздуха проводили чистку желоба для выгрузки из печи заготовки. После этого был выстроен подходящий температурный режим печи для прокатки заготовки из титанового сплава.

Выбранные температурные режимы печи отражены в таблице 33.

Таблица 33 – Температурные режимы печи, °С

Материал	Цикл загрузки, с	Температура заготовки	Зона нагрева		
			1	2	3
ПТ-7М	290	980	950	1010	1010
ВТ1-0	290	890	900	920	920

### 5.5.3 Результаты получения труб из титановых сплавов

В таблице 34 отражены данные настройки очага деформации в ходе прокатки заготовок из титанового сплава ПТ-7М на стане ТПА 70-270. В процессе первичной прокатки заготовки ПТ-7М произошёл закат передней части прокатываемой гильзы из-за некорректной фиксации перемещения заготовки датчиками в процессе прокатки. Во избежание повторения данной проблемы последующие работы проводили в режиме ручного управления прокатным станом.

Таблица 34 – Настройка очага деформации

Материал	$V_b$ , об/мин	$V_n$ , мм	$L_n$ , мм	$C$ , мм (Прошивка)	$C$ , мм (Раскатка)
ПТ-7М/ВТ1-0	50	140	159,5	70	90

По аналогии с настройкой очага деформации заготовок ПТ-7М для прокатки на стане ТПА 70–270 проводилась настройка и для заготовок ВТ1-0. При прокатке 4 заготовок ВТ1-0 частота вращения валков отличалась. Для 1 и 2 заготовок частота вращения составляла 40 об/мин, а для 3 и 4 заготовок - 50 об/мин.

В процессе прокатки осуществлялась регистрация токовой нагрузки на основной привод стана (таблица 35). Стоит отметить, что входе эксперимента значение токовой нагрузки вы превышало норму.

Таблица 35 – Токовая нагрузка, А

Материал	Заготовка	Прошивка	Раскатка	Калибровка
ПТ-7М	2	900	806	90
	3	772	730	89
ВТ1-0	1	927	850	74
	2	879	805	69
	3	881	792	73
	4	916	808	71

### 5.5.4 Анализ геометрических параметров полученных черновых труб

В результате прокатки были изготовлены трубы, их внешний вид показан на рисунке 67.



Рисунок 67 – Внешний вид труб из сплава ПТ-7М

По завершении операции прокатки заготовок из ПТ-7М было произведено измерения геометрических параметров полученных труб, эти данные представлены в таблице 36.

Таблица 36 – Геометрические размеры труб из сплава ПТ-7М, мм

Прокатка	2	3
D, мм	166,6-166,8	166,1-166,9
S, мм	19-21	
l, мм	4750	4700

Далее проводили прошивку заготовок из сплава ВТ1-0. Полученные результаты представлены на рисунке 68.

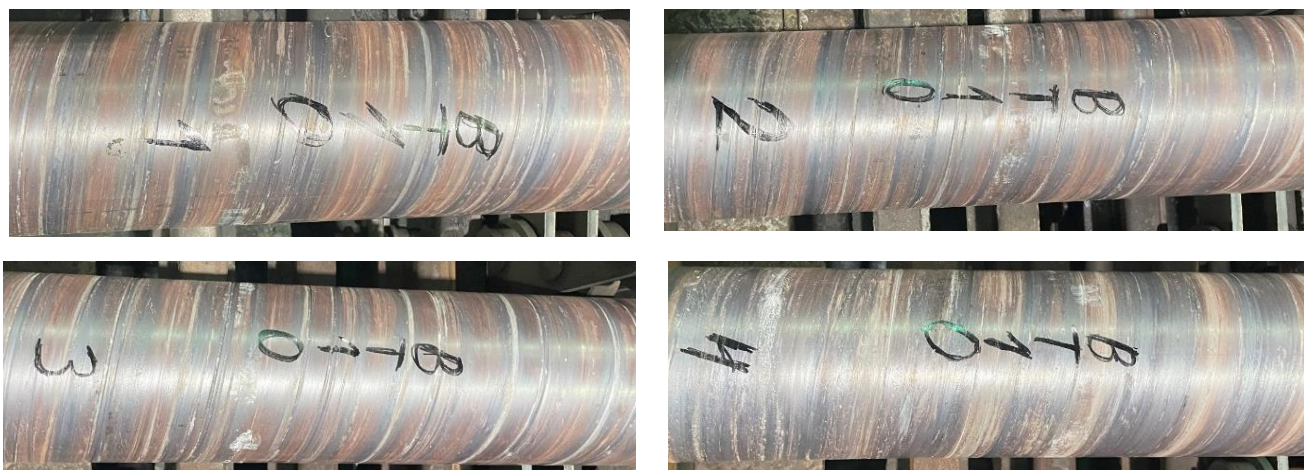


Рисунок 68 – Внешний вид труб из сплава ВТ1-0



По завершении операции прокатки было произведено измерения геометрических параметров полученных труб, эти данные представлены в таблице 37.

Таблица 37 – Размеры труб, изготовленных из сплава ВТ1-0, мм

l	D	S
4790-4840	165-166	19,4-20,4

### 5.5.5 Анализ состояния готовых труб из титановых сплавов и используемого инструмента

В процессе экспериментальной прокатки проанализировали состояние поверхности титановых труб, изготовленных из сплавов ВТ1-0 и ПТ-7М. После операции прокатки на поверхности трубы были обнаружены следующие дефекты — задиры, налипший металл и канавки, образовавшиеся из-за деформации направляющих линеек. При осмотре внутренней поверхности полученных труб был обнаружен небольшой спиралевидный след, образованный оправкой (рисунок 69), который можно исправить в процессе расточки.

В рамках технологического процесса предусмотрена механическая обработка готовых труб, что позволяет считать выявленные дефекты, глубина которых не более 3 мм на поверхности гильз и труб устранимыми, вследствие изначально заложенного технологией припуска на обработку.



Рисунок 69 – Винтовые бороздки на внутренней части трубы

В процессе прокатки на рабочем инструменте происходило налипание металла на поверхность рабочего инструмента (рисунок 70), то незначительно сказывается на качестве продукции и может быть устранено с помощью гидросбива. После операции прошивки титановой заготовки поверхность оправки остаётся без значительных дефектов.



Рисунок 70 – Внешний вид рабочих инструментов после прокатки:

- а) нижняя направляющая линейка;
- б) верхняя направляющая линейка;
- в) прошивная оправка

В ходе экспериментальных прокаток с использованием оборудования ТПА 70-270 был проведен анализ износа прошивных оправок, изготовленных из сплавов 4X5МФС и 4X4ВМФС. В результате чего можно сделать вывод, что более износостойкой оправкой является оправка, произведенная из стали марки 4X5МФС.

### **5.6 Разработка технических рекомендаций для внедрения процесса изготовления титановых труб из сплавов ВТ1-0 и ПТ-7М**

В результате проведенного исследования были составлены рекомендации для внедрения промышленного процесса изготовления титановых труб из материалов ВТ1-0 и ПТ-7М с использованием трубопрокатного агрегата ТПА 70-270:

1 При расчёте размеров исходных заготовок необходимо предусмотреть припуски для последующей механической обработки поверхности трубы в размере не менее 2,5 мм;

2 Для предотвращения окисления поверхности и сокращения продолжительности прокатки исходных заготовок перед их нагревом предлагается использовать защитное покрытие «РУСПОЛИМЕТ»;

3 Для предотвращения попадания окалина на заготовки из титановых сплавов в процессе нагрева необходимо очистить все поверхности, где они могут соприкасаться, включая желоба выгрузки из печей, с помощью сжатого воздуха;

4 Для настройки режима автоматической прокатки заготовки необходимо предварительно провести калибровку датчиков, отвечающих за фиксацию положения и температуры нагретого материала;

5 Для проведения прокатки заготовок ВТ1-0 и ПТ-7М рекомендуется проводить предварительный их нагрев, учитывая время необходимое на транспортировку заготовок от печи к стану, до 890 °С и 980 °С, соответственно;

6 Важно проводить контроль рабочего инструмента в процессе прокатки, чтобы предотвратить налипание металла. Регулярное проведение гидросбива позволяет решить данную проблему;

7 Прокатка исследуемых титановых заготовок на стане ТПА 70–270 можно эффективно проводить с помощью штатного инструмента без использования дополнительных затрат на оборудование;

8 Экспериментальным методом было установлено, что стабильный процесс прокатки наблюдается при использовании следующих параметров: коэффициент овализации 1,1-1,15, частота вращения валков 50 об/мин, степень обжатия в зоне пережима валков 11,5-14 %.

## 5.7 Выводы по главе

На основе проведенного исследования проведена разработка режимов прокатки титановых труб на стане ТПА 70-270:

1 Разработан очаг деформации для получения труб из титановых сплавов в условиях МИСИС-130Д. На основе данных, полученных в ходе моделирования, была спланирована экспериментальная прокатка на стане МИСИС-130Д с применением покрытия «РУСПОЛИМЕТ»;

2 Установлено, что покрытие заготовок перед нагревом специальным составом обеспечивает защиту поверхности заготовок от образования окалины в процессе нагрева и сокращает время прокатки за счет меньшего скольжения в очаге деформации. Также результаты прокатки позволили разработать сборочные модели очагов деформации прошивки и раскатки и температурные параметры прокатки на ТПА 70–270;

3 На основе результатов компьютерного моделирования процессов прошивки и раскатки трубы из сплава ВТ1-0 в программе QForm проведен анализ энергосиловых параметров, геометрических размеров полученных гильз и труб, а также температурных условий деформации. Полученные данные показали, что прокатка титановых сплавов может быть реализована с одного печного нагрева, а энергосиловые параметры не превышают предельно допустимых для главного привода станов ТПА 70-270;

4 Установлено, что выбранная калибровка и заданные настроечные параметры обеспечивают получение гильз и труб требуемых размеров с достаточной точностью по диаметру и толщине стенки. Предложенные очаги деформации возможно реализовать на существующем рабочем инструменте ТПА 70-270;

5 После экспериментальной прокатки на стане ТПА 70-270 с применением покрытия «РУСПОЛИМЕТ» установлено, что выбранная калибровка и заданные настроечные параметры обеспечивают получение гильз и труб требуемых размеров с достаточной точностью по диаметру и толщине стенки. Предложенные очаги деформации, полученные в ходе второго этапа возможно реализовать на существующем рабочем инструменте ТПА 70-270 с учетом внесения незначительных изменений;

6 Установлено, что на данном этапе система автоматизации прокатки требует некоторой доработки в связи с тем, что датчики не видят титановую заготовку имеющую меньшую температуру, чем у стальных заготовок, что приводит к необходимости осуществления прокатки в ручном режиме;

7 Полученные в ходе эксперимента данные доказали, что прокатка титановых сплавов может быть реализована с одного печного нагрева, а энергосиловые параметры не

превышают предельно допустимых для главного привода ТПА 70-270;

8 Установлено, что в целях получения качественной поверхности труб из титановых сплавов необходимо заложить припуск для дальнейшей механической обработки в размере не менее 2,5 мм;

9 Полученные результаты позволяют сделать вывод о необходимости проведения исследования в направлении улучшения качества рабочего инструмента и повышения его износостойкости с целью улучшения качества получаемой продукции.

## Выводы по работе

В данной работе рассмотрен износ оправок при прошивке заготовок из стали 40Х, 20Х13 и титановых сплава ВТ1-0. В ходе исследования также проанализированы режимы получения гильз из легированных марок стали и титановых сплавов. На основе проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1 В ходе анализа износа оправок при прошивке заготовок из легированных сталей и титановых сплавов выявлено влияние угла подачи, коэффициента овализации и частоты вращения валков на износ прошивной оправки с применением программного комплекса QForm 3D.

2 Исходя из оценки внешнего вида оправок после процесса прошивки и анализа изменения их массы следует, что износ связан с адгезией материала инструмента с деформируемым металлом. Поэтому при выборе материала для оправок необходимо учитывать их склонность к адгезии с прокатываемым металлом, оцениваемой углеродным эквивалентом. Из исследованных марок стали наивысшую износостойкость и меньшую склонность к схватыванию коррозионностойкой стали 20Х13 с рабочей поверхностью оправок показали стали 4Х5МФС и 4Х4ВМФС, имеющие высокое значение углеродного эквивалента.

3 В ходе моделирования выявлено, что на износ оправок при прошивке заготовок из легированных сталей и титановых сплавов также влияет температура нагрева прошивной оправки и длительность машинного времени прокатки. Увеличение коэффициента овализации с 1,1 до 1,2 снижает износ прошивной оправки на 27 %, благодаря уменьшению времени контакта металла заготовки с оправкой. При увеличении угла подачи с 10 до 16 град. машинное время прокатки сокращается в 1,57 раз и снижается температура нагрева оправки и повышается ее износостойкость на 13 %.

4 Разработана методика оценки износа прошивных оправок, позволяющая прогнозировать их износостойкость, которая основана на учете:

- температурных условий работы оправок путем моделирования в программном комплексе QForm 3D;
- результатов моделирования износа прошивной оправки;
- экспериментальных данных по изменению массы оправки  $\Delta M$  в процессе прокатки;
- результатов анализа износа в зависимости от осевого усилия металла на оправку.

Разработанная методика позволяет рассчитывать износ оправок с высокой точностью, разница с фактическими замерами в пределах 15 %.

5. Результаты моделирования процесса получения труб из легированных сталей и титановых сплавов в среде программного комплекса QForm 3D коррелируются с

экспериментальными результатами опытных прокаток, что позволяет использовать полученную цифровую модель и минимизировать время и затраты на разработку режимов винтовой прошивки и раскатки труб, которые обеспечивают получение гильз и труб из легированных сталей и титановых сплавов с высокой точностью по диаметру и толщине стенки. Разработаны технологические режимы получения труб из титановых сплавов на станах МИСИС-130Д и ТПА 70-270. В ходе анализа износостойкости прошивных оправок в программном комплексе QForm 3D получено, что оправка из стали 4X5MФС обладает наибольшей износостойкости по сравнению с оправкой из стали 3X3M3Ф.

## Список использованных источников

- 1 Орлов Г.А. Основы теории прокатки и волочения труб: учебное пособие — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 204 с.
- 2 Потапов И.Н., Полухин П.И. Новая технология винтовой прокатки. – М.: Металлургия, 1975. – 173 с.
- 3 Романцев Б.А., Гончарук А.В., Вавилкин Н.М., Самусев С.В. Трубное производство: учеб. – 2-е изд., испр – М. : Изд. Дом МИСиС, 2011. – 970 с.
- 4 Цвикер У. Титан и его сплавы. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
- 5 Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1979. – 512 с.
- 6 Чечулин Б.Б., Ушков С.С., Разуваева И.Н., Гольдфайн В.Н. Титановые сплавы в машиностроение. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
- 7 Федоров А.А., Осадчий В.Я., Сафьянов А.В. Производство труб специального назначения на челябинском прокатном заводе. – Челябинск.: ИП Кох А.В., 2020. – 484 с.
- 8 Moiseyev V.N. Titanium Alloys: Russia Aircraft and Aerospace Application. // Taylor and Francis Group, LLC, 2006. – 214 p.
- 9 Stokke, S. Botker, Iceresistant Platforms for Shtokman Gas Field, Comparison of TLP, Buoy and Spar Concepts and Proposal of a Hybrid TLP Concept // Освоение шельфа арктических морей России. Труды 5-й Международной конференции RAO-01. 11-14 сентября 2001 г. С.-Петербург. – С. 163-167.
- 10 Pengfei Gao, Chao Yu, Mingwang Fu, Lu Xing, Mei Zhan, Jing Guo. Formability enhancement in hot spinning of titanium alloy thin-walled tube via prediction and control of ductile fracture // Chinese Journal of Aeronautics. 2022. Vol. 35. №1. pp. 320-321.
- 11 Патент РФ № 2311978. Способ прошивки слитков и заготовок из сплавов на основе титана в станах поперечно-винтовой прокатки/ А.В. Сафьянов, Федоров А.А., Газетдинов В.И. // Опубликовано 12.12.2017. Бюл. № 36
- 12 Гриценко Б.П., Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Круковский К.В., Гирсова Н.В., Тересов А.Д. Повышение износостойкости технически чистого титана ВТ1-0 и сплава ВТ6// Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 13, №4, 2011. – С. 1009-1013.
- 13 Илларионов А.Г., Космацкий Я.И., Деформация и термическая обработка труб из титановых сплавов. – Екатеринбург.:Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 144 с.
- 14 Патент РФ № 2638266. Способ производства товарных труб размером 273x10 и 219x19 мм из титановых сплавов/ А.В. Сафьянов// Опубликовано 20.11.2017. Бюл. № 31.



- 15 Филяева Е.А., Космацкий Я.И. Технологические особенности изготовления труб из титановых сплавов// Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2017. №2. С. 70-76.
- 16 Zhang Y.Q., Zhan M., Fan X.G., Yang K. Forming of pure titanium tubes by combined spinning-ultrasonic surface rolling process: Microstructure and mechanical properties // Journal of Manufacturing Processes. 2023. Vol. 105. pp. 70-83.
- 17 Yang, Y. , Nan, L., Yang, Y., Qi, Y., Mu, G., Yang, J. // Rare metal materials and engineering. 2014. Vol. 43. № 1. pp. 214-218.
- 18 Tetyukhin V.V., Smirnov V.G., Krasheninnikov D.A. State-of-the-Art Processes of Titanium Tube and Hollow Die-Forging Manufacture by Russian and CIS Companies // Science and Technology. 2007. Vol. 2. pp. 897-901.
- 19 Pumpyanskiy D.A., Illarionov A.G., Volodazkiy F.V., Kosmatskiy Y.I., Popov A.A. Promising titanium alloys for cold-worked pipe manufacture // Metallurgist. 2023. Vol. 67. pp. 25-40.
- 20 Romancev B.A., Goncharuk A.V., Aleshchenko A.S., Gamin Yu.V. Production of Hollow Thick-Walled Profiles and Pipes Made of Titanium Alloys by Screw Rolling // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2015. Vol. 56. № 5. pp. 522–526
- 21 Jiang Z.Q., Yang H., Zhan M., Yue Y.B., Liu J., Xu X.D., Li G.J. Establishment of a 3D FE model for the bending of a titanium alloy tube // International Journal of Mechanical Sciences. 2010. Vol. 52. pp. 1115-1124.
- 22 Dong-sheng Wu, Jiu-ling Huang, Liang Kong, Xue-ming Hua, Min Wang, Hua Li, Shou-tian Liu. Numerical analysis of arc and molten pool behaviors in high-speed tandem TIG welding of titanium tubes // The Nonferrous Metals Society of China. 2023. Vol. 33. pp. 1768-1778
- 23 Heng Yang, Heng Li, Jun Ma, Guangjun Li, Dan Huang. Breaking bending limit of difficult-to-form titanium tubes by differential heating-based reconstruction of neutral layer shifting // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2021. Vol. 166. pp. 1-20.
- 24 Trutnev N.V., Krasikov A.V., Ul'yanov A.G., Lube I.I., Kosmatskii Ya.I., Korsakov A.A. Mastering of production of seamless pipes of type 13 Cr martensite class stainless steel at ТПА 159–426 of JSC VTZ. Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information, 2018, no. 12, pp. 68–71. (In Russ.).
- 25 Чубуков М. Ю., Руцкий Д. В., Зюбан Н. А., Усков Д. П. Исследование влияния технологии изготовления оправок прошивного стана на особенности строения поверхностных и внутренних оксидных слоев // Черные металлы. 2016. № 11. С. 28–32.
- 26 Звонарев Д. Ю., Нерозников В. Л., Трубников К. В. Анализ влияния профиля направляющего инструмента прошивного стана на разнотолщинность получаемых гильз // Трубы. 2018.-С. 102–105.

- 27 Столетний М.Ф., Клемперт Е.Д. Точность труб. *Металлургия*.1975. 240 с
- 28 Romantsev B. A., Goncharuk A. V., Zimin V. Y., Pakhomov V. P., Aleshchenko A. S., Matyko O. K. Introducing seamless-pipe production at OAO Vyksunskii metallurgicheskii zavod // *Steel in Translation*. 2009. Vol. 39(9). P. 803–805.
- 29 Romantsev B. A., Aleshchenko A. S., Goncharuk A. V., Galkin S. P. Mini tube-production unit 40-80 with a three-high reeling mill // *Metallurgist*. 2012. Vol. 55 (11-12). P. 918–924.
- 30 Aleshchenko A. S., Budnikov A. S., Kharitonov E. A. Metal Forming Study during Pipe Reduction on Three-High Rolling Mills // *Steel in Translation*. 2019. Vol. 10(49). P. 661–666.
- 31 Соколов Г. Н., Литвиненко-Арьков В. Б., Лысак В. И. Способы повышения ресурса прошивных оправок трубопрокатных станов // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2011. № 11. С. 10–14
- 32 Серин К., Пехле Х. Й. Повышенная стойкость инструмента горячей обработки при производстве бесшовных труб // *Черные металлы*. 2015. № 3. С. 59–67.
- 33 Romantsev B. A., Aleshchenko A. S., Tsyutsyura V. Y., Tyshchuk I. N., Lube I. I. Features of Piercing Mill TPA 50-200 Working Roll Wear During Rolling Continuously Cast and Hot-Rolled Billets // *Metallurgist*. 2017. Vol. 60(9-10). P. 1062–1069
- 34 Сазоненко И. О., Земцов В. А., Юрчак А. Н. К вопросу повышения стойкости оправок прошивных станов // *Литье и металлурга*. 2012. № 68(4). С. 135–138.
- 35 Коновалов М.С., Шеногин В.П. Исследование стойкости оправки из сплава на основе Ni3Al при прошивке прутков стали марки 08X18H10T-Ш. *Интеллектуальные системы в производстве*. 2017. Т. 15. № 2. С. 39-42.
- 36 Tsubouchi K., Akiyama M., Okuyama T. Development and Optimization of Carbide-Reinforced Tools and Application to Hot Rolling of Stainless Steel // *Journal of Tribology*. 1997. Vol. 119(4). P. 687–693.
- 37 Романцев Б.А., Гончарук А.В., Чже-Сун Хе Получение горячекатаных полых заготовок из легированных сталей // *Производство проката*. 2015. №5. С. 23–26
- 38 Шамилов А.Р., Король А.В., Гончарук А.В. Способы увеличения эксплуатационных характеристик оправок прошивного стана//*Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*.2022. Т. 22, №3. – С. 76-83.
- 39 Македонов С. И., Ермакова Р. В., Козлов В. М. и др. Высокотемпературное оксидирование оправок прошивного стана // *Сталь*. 1989. № 11. С. 68–70.
- 40 Morioka N., Oka H., Simizu T. Development of Manufacturing Technology for High Alloy Steel Seamless Pipe by Mannesmann Process // *Kawasaki steel technical report-english edition*. 1998. Vol. 38. P. 38–46.

- 41 Вавилкин Н.М., Бухмиров В.В. Прошивная оправка. М.: Издательский Дом МИСиС, 2000. - 128 с.
- 42 Галкин С. П., Романцев Б. А., Гончарук А. В., Фадеев М. А. Траекторно – скоростные условия процесса прошивки в станах винтовой прокатки // Производство проката, 2007. № 5. – С. 37-42.
- 43 Lube I.I. et al. Increase of resistance of piercing mill mandrels at seamless pipes production of 13Cr grade martensite class stainless steel at line ТПА 159–426 of JSC VTZ // Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information. 2020. Vol. 76, № 12.
- 44 Коновалов М.С. О выборе материала, конструкции и способа изготовления оправок для прошивки заготовок из коррозионностойких сталей // Инновационная наука. 2015. № 12–2. С. 70–73.
- 45 Д Лебедев В.К., Черненко И.А., Билл В.И. Сварка трением: Справ. Изд. Л.: Машиностроение, 1987. - 236 с.
- 46 Макаров Э.Л. Сварка и свариваемые материалы: В 3х т., т. I, Свариваемость материалов. Справ. Изд. М.: Металлургия, 1991. - 528 с.
- 47 Герасимов Ю.Л., Авдеев С.В., Бобарикин Ю.Л. Исследование влияния особенностей оксидированного покрытия прошивных оправок на их эксплуатационную стойкость. Черные металлы. 2017. № 7. С. 46-49.
- 48 Романцев Б.А., Потапов И.Н., Гончарук А.В., Попов В.А. Изготовление полых профилированных заготовок. – М.: НПО «Информ ТЭИ». – 1992. – 263 с.
- 49 Фартушный Н.И., Романцев Б.А., Кузнецов Е.В. Повышение стойкости инструмента прошивного стана // Производство проката. 2007. №6. С. 22–25.
- 50 Сазоненко И.О., Земцов В.А., Юрчак А.Н. Литье и металлургия. 2012. № 4 (68). С. 135–138.
- 51 Патент на изобретение №2446024. Прошивная и прокатная оправка, способ восстановления этой прошивной и прокатной оправки и технологическая линия для восстановления этой прошивной и прокатной оправки/ Ясуйоси Хидака и др.// Опубликовано 27.03.2012.
- 52 Шапиро И.А., Хавкин Г.О., Бродский В.М. Повышение эффективности использования оправок прошивных станов // Сталь. 2009. №9. С. 75–76.
- 53 Гребеник В.М., Гордиенко А.В., Цапко В.К. Повышение надежности металлургического оборудования. – М.: Металлургия, 1988. – 688 с.
- 54 Соколов Г.Н., Литвиненко-Арьков В.Б., Лысак В.И. Способы повышения ресурса прошивных оправок трубопрокатных станов // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 11. С. 10–14.

- 55 Сазоненко И.О., Земцов В.А., Юрчак А.Н. К вопросу повышения стойкости оправок прошивных станов //Литье и металлургия 4(68), 2012. С. 135 - 138.
- 56 Zorin I. V. Piercing mandrel strengthening by surfacing with nickel aluminide-based alloy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 1(177).
- 57 Литвиненко-Арьков В.Б., Соколов Г.Н., Лысак В.И. Дуговая наплавка раскатной поверхности прошивных оправок // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2010. № 11. С. 79–81
- 58 Соколов Г.Н., Михеев А.Н., Павлов А.А. Электрошлаковая наплавка в секционном кристаллизаторе торцев оправок трубопрошивного стана // Сварочное производство. 2002. № 6. С. 31–34.
- 59 Соколов Г.Н. Структура и свойства переходной зоны между наплавленным инструментальным металлом и конструкционной сталью//Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 12. С. 46–50.
- 60 Вавилкин Н.М., Белевич А.В., Изотов Д.Г., Бодров Д.В., Гончаров В.С. Исследование термонапряженного состояния водоохлаждаемых прошивных оправок // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. №9. С. 35–38.
- 61 Белевич А.В., Матыко О.К., Алещенко А.С., Романцев Б.А., Давыдова Е.А. Анализ теплового и напряженного состояния // 1. Известия вузов. Черная металлургия. 2008. №11. С. 11–14.
- 62 Вавилкин Н.М., Гончаров В.С., Бодров Д.В., Липнягов С.В. Особенности износа водоохлаждаемых оправок при прошивке легированных сталей // Известия вузов. Черная металлургия. 2009. №7. С. 37–40.
- 63 Арзамасов Б.Н. Конструкционные материалы: Справочник. М.: Машиностроение, 1990. – 668 с.
- 64 Орлов. С.И. Пути совершенствования калибровки оправок прошивных станов. В сб. УралНИТИ "Производство сварных и бесшовных труб труб", вып. 4 Металлургия, 1965 г.
- 65 Швейкин. В.В. Рациональная форма оправки прошивного стана. Изв. ВУЗов ЧМ, № 8, 1960 Г.
- 66 Потапов И.Н., Попов В.А., Романцев Б.А. Исследование разностенности передних концов гильз. // Сталь, 1990 г., №X
- 67 Смирнов В.С., Невежин М.Л. Влияние формы оправки и валков на основные параметры процесса прошивки. В сб. "Обработка металлов давлением". Труды ЛПИ, Машгиз, 1959 г., Москва-Ленинград. № 203, с. 58-76.

- 68 Голубчик Р. М., Меркулов Д. В., Чепурин М. В. Особенности циклического формоизменения при прошивке заготовок с различным направляющим инструментом // Производство проката. 2004. № 6. С. 14 - 18.
- 69 Golubchik R. M., Lebedev A. V. New methods piercing mills setting relating to the cyclic forming of hollows // History and future of seamless steel tubes : 7-th Intern. Conf. — Karlovy Vary : 1990. P. 108 - 117.
- 70 Голубчик Р. М. Применение ЭВМ для оптимизации режимов формоизменения при винтовой прокатке // Теория и технология процессов пластической деформации : мат. науч.-техн. конф. — М. : МИСиС, 1997. С. 289 - 294.
- 71 Сазоненко И.О., Земцов В.А., Юрчак А.Н. К вопросу повышения стойкости оправок прошивных станов //Литье и металлургия 4(68), 2012. С. 135 - 138.
- 72 Doremus E., Oudin J. Kinematic element modelling of horizontal two-roll piercing // Journal of Materials Processing Technology, 1994. № 42. – p. 293-310.
- 73 Yvan Chastel, Aliou Diop, Silvio Fanini, P.O. Bouchard, Katia Mocellin. Finite Element Modeling of Tube Piercing and Creation of a Crack // International Journal of Material Forming, 2008. № 1. – p. 355-358.
- 74 Ya Li Wang, Andrey Molotnikov, Mathilde Diez, Rimma Lapovok, Hyoun-Ee Kim, Jing Tao Wang, Yuri Estrin. Gradient structure produced by three roll planetary milling: Numerical simulation and microstructural observations // Materials Science & Engineering A, 2015. № 639. – p. 165-172.
- 75 Gamin Yu. V., Skripalenko M. M., Romantsev B. A., Kadach M. V. PREDICTION OF BILLET FRACTURE AT TWO-HIGH SCREW ROLLING PIERCING // Metallurgist, 2021. Vol. 64 – p. 1020-1028.
- 76 Zhe Zhanga, Dong Liua, Runqiang Zhangc, Yanhui Yanga, Yuhua Pangb, Jianguo Wanga, Hai Wang. Experimental and numerical analysis of rotary tube piercing process for producing thick-walled tubes of nickel-base superalloy // Journal of Materials Processing Tech, 2020. № 279, p. 1-16.
- 77 Koji Yamane, Kazuhiro Shimoda, Koichi Kuroda, Shohei Kajikawa, Takashi Kuboki. A new ductile fracture criterion for skew rolling and its application to evaluate the effect of number of rolls // Journal of Materials Processing Tech, 2021. № 291, p. 1-28.
- 78 Алещенко А. С., Нгуен Куанг. Исследование износа цилиндрических оправок раскатного стана винтовой прокатки// Черные металлы. 2021. № 6. С. 27–31.



**МИСИС**  
УНИВЕРСИТЕТ  
НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

## **СВИДЕТЕЛЬСТВО О РЕГИСТРАЦИИ НОУ-ХАУ**

На основании «Положения о правовой охране секретов производства (ноу-хау) НИТУ МИСИС, утвержденного ректором «15» декабря 2015 г., проведена регистрация секрета производства (ноу-хау), созданного в ходе выполнения трудовых обязанностей:

### **Методика оценки износа оправок при прошивке заготовок на двухвалковом стане МИСИС-130Д**

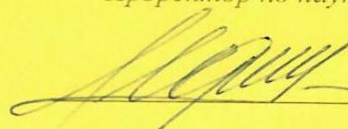
Правообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»*

Авторы: *Алешенко Александр Сергеевич,  
Лакиза Владислав Андреевич,  
Романцев Борис Алексеевич*

Зарегистрировано в Депозитарии ноу-хау НИТУ МИСИС  
№ 14-676-2024 ОИС от “ 16” октября 2024г



Проректор по науке и инновациям

 /М.Р. Филонов/

## Приложение Б

Директор института  
Экотехнологий и инжиниринга  
НИТУ МИСИС  
А.Я. Травянов  
«20» 11 2024

### АКТ

#### о внедрении результатов диссертационной работы Лакизы В.А. в учебный процесс на кафедре ОМД НИТУ МИСИС

Настоящий Акт подтверждает использование в учебном процессе результатов диссертационной работы Лакизы В.А. на тему «Исследование износостойкости и разработка методики оценки износа оправок при прошивке заготовок из легированных сталей и титановых сплавов на двухвалковых станах», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Изложенная в диссертационной работе методика расчета, позволяющая рассчитать объем и массу металла, удаляемого с контактной поверхности оправки при прошивке заготовок вследствие адгезионного разрушения и тем самым прогнозировать ее износостойкость при допустимом равномерном износе, не вызывающем нарушение стабильности процесса прокатки, использована в учебном процессе на кафедре «Обработки металлов давлением» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Металлургия» и «Технологические машины и оборудование».

Заведующий каф. ОМД  
Ученый секретарь каф. ОМД  
Научный руководитель



А.С. Алещенко  
Т.Ю. Сидорова  
Б.А. Романцев

## Приложение В



**ЗАВОД  
ВАКУУМНОЙ  
МЕТАЛЛУРГИИ\***  
СПЛАВ ОПЫТА И ТЕХНОЛОГИЙ

Общество с ограниченной ответственностью  
«Завод вакуумной металлургии» ООО «ЗВМ»  
Почтовый адрес: 607018, Россия, Нижегородская  
обл., г. Кулебаки, ул. Воровского, д. 49а, а/я 17  
e-mail: ooozym@mail.ru, info@zvmet.ru;  
тел. +7 83176 7 93 42

### Акт

#### **о промышленном опробовании технологии получения труб из сплавов на основе титана для расширения сортамента производства титановой продукции**

В рамках выполнения совместной работы НИТУ МИСИС и ООО «Завод вакуумной металлургии» по теме «Разработка технологии прошивки и раскатки заготовок из титановых сплавов для получения титановых бесшовных труб» проведено промышленное опробование технологического процесса производства труб из сплавов на основе титана.

В ходе выполнения работы разработаны настроечные параметры, обеспечивающие получение гильз и труб требуемых размеров с требуемой точностью по диаметру и толщине стенки. Разработаны рекомендации по технологии получения титановых труб из сплавов BT1-0 и ПТ-7М на ТПА 70-270.

Заготовки из титановых сплавов BT1-0 и ПТ-7М диаметром 161 мм с предельным отклонением  $\pm 0,5$  % и длиной 2085 мм произведены ООО «Завод вакуумной металлургии».

На промышленном агрегате ТПА 70-270 проведены экспериментальные работы по винтовой прошивке заготовок из титановых сплавов с применением защитной обмазки, раскатке и калиброванию труб из титановых сплавов.

По разработанным технологическим режимам были получены трубы из титанового сплава BT1-0 диаметром 165,5 мм и толщиной стенки 19,9 мм ( $D/S=8,32$ ). Установлено, что прокатка протекала устойчиво при нагрузках, не превышающих значений технических характеристик оборудования. Полученные значения предельных отклонений труб по наружному диаметру составили не более 0,3 %, а по толщине стенки не более 5 %, что соответствует предъявляемым требованиям.

Полученные черновые трубы были отгружены в ООО «Завод вакуумной металлургии», где в дальнейшем подверглись механической обработке для получения чистовых размеров титановых труб. Проведенные испытания образцов от труб показали высокий уровень механических свойств, превосходящий требования нормативной документации.

Опробование технологического процесса подтвердило возможность эффективного изготовления труб из титановых сплавов методом винтовой прокатки. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности предложенной технологии производства титановых труб и дальнейшей её реализации в рамках металлургических производств.

Технический директор  
ООО «ЗВМ»

А.Л. Яковлев

ООО «ЗВМ», юридический адрес: г. Кулебаки, ул. Восстания, д. 1/15  
ИНН/КПП 5251010677/525101001, ОГРН 1165275043548