

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

На правах рукописи

ЦЮЦЮРА ВЛАДИМИР ЮРЬЕВИЧ



**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ  
НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК И ИЗНОСА ВАЛКОВ  
ПРИ ВИНТОВОЙ ПРОШИВКЕ НА КАЧЕСТВО ТРУБ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
проф., д.т.н.

Романцев Б.А.

Москва – 2020

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Литературный обзор.....	11
1.1 Дефектообразование при винтовой прошивке.....	11
1.2 Качество наружной и внутренней поверхностей труб.....	15
1.3 Износостойкость рабочих валков прошивных станов.....	19
Глава 2. Качество непрерывнолитой заготовки, гильз и труб.....	26
2.1 Особенности непрерывнолитой заготовки.....	26
2.2 Механические свойства металла НЛЗ.....	33
Глава 3. Конструкция испытательной машины и методика технологических испытаний образцов на знакопеременный изгиб в горячем состоянии.....	36
3.1 Обоснование к проведению технологических испытаний на знакопеременный изгиб.....	36
3.2 Конструкция и принцип работы испытательной машины.....	39
3.3 Методика проведения технологических испытаний образцов на знакопеременный изгиб.....	43
Глава 4. Исследование технологической пластичности стальных образцов на знакопеременный изгиб в горячем состоянии.....	46
4.1 Выбор геометрических размеров образцов.....	46
4.2 Исследование технологической пластичности образцов из стали 45, 09Г2С, 12Х18Н10Т и моделирование процесса знакопеременного изгиба.....	52
4.3 Исследование технологической пластичности образцов из металла НЛЗ.....	56
Глава 5. Закономерности износа рабочих валков прошивных станов винтовой прошивки.....	67
5.1 Особенности износа рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426 при прокатке НЛЗ большого диаметра.....	67

5.2 Особенности износа рабочих валков прошивного стана ТПА 50-200 при прокатке непрерывнолитых и горячекатаных заготовок .....	80
5.3 Моделирование износа рабочих валков прошивного стана МИСиС-130Д при прокатке жаропрочных сплавов.....	90
Выводы .....	98
Список использованной литературы.....	99
Приложение А .....	107

## Введение

Современное трубопрокатное производство базируется на непрерывнолитой заготовке (НЛЗ). Непрерывная разливка стали, по сравнению с разливкой в слитки и дальнейшей прокаткой, обеспечивает получение готовой металлопродукции с наименьшими затратами за счёт минимизации числа производственных операций при сохранении уровня качества продукции.

Прошивка заготовок в гильзу в горячем состоянии на стане винтовой прокатки (винтовая прошивка) является наиболее распространенной в трубопрокатном производстве, благодаря получению гильз большой длины и массы на высокопроизводительных прошивных станах. Однако эта операция формоизменения осуществляется в очаге деформации в условиях сложного напряженно-деформированного состояния с циклическим знакопеременным пластическим изгибом всех слоёв металла. Дефекты, которые получаются на гильзах, при последующей пластической деформации на других станах трубопрокатного агрегата, как правило, не устраняются и остаются на готовых трубах, так как в наибольшей мере их появление обусловлено наружными пороками исходной заготовки. С одной стороны, металл для труб должен быть по возможности более дешевым, с другой – качество этого металла должно быть высоким, обеспечивающим минимальную отбраковку труб и высокий выход годного. В связи с этим, к исходным заготовкам предъявляются достаточно жесткие требования по технологической пластичности, зависящей от химического состава, макроструктуры, состояния наружной поверхности, осевой ликвации, пористости и др. Несмотря на такие ужесточения требований к НЛЗ, отбраковка труб по внутренним и наружным плёнам достигает нескольких процентов.

**Актуальность темы исследований**, проведенных в рамках настоящей работы, обусловлена высокой научной и практической значимостью разработки рациональных режимов ведения процессов формоизменения металла при прошивке и раскатке с учётом износа инструмента и технологической пластичности металла, которую целесообразно оценивать специальными

методами, максимально приближенными к условиям на станах винтовой прокатки.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Работы по определению рациональных режимов деформации при прошивке НЛЗ и их влияние на качественные показатели труб являются актуальными и значимыми в связи с развитием нефтегазодобывающей отечественной промышленности.

Исследованиям условий дефектообразования, скручивания и разрушения металла при винтовой прошивке посвящены работы Емельяненко П.Т., Полухина П.И., Потапова И.Н., Фомичева И.А., Данилова Ф.А. и ряда других авторов. Так в работах Потапова И.Н., Полухина П.И. подробно изложены практические исследования формоизменения (пластического изгиба) стенки металла заготовки-гильзы и влияние износа рабочих валков на параметры формоизменения в очаге деформации и качество труб.

В связи с многообразием химических составов трубных сталей, спецификой технологии и оборудования для производства НЛЗ большого диаметра, в настоящее время развиваются основные направления по повышению качества исходной заготовки, однако, ввиду пониженных пластических свойств по сравнению с горячедеформированной выполненной из НЛЗ, вопросы оценки технологической пластичности при прошивке и влияния износа рабочего износа инструмента на стабильность процесса прокатки освещены недостаточно.

### **Цель и задачи работы.**

**Целью** диссертационной работы является исследование влияния технологической пластичности металла НЛЗ больших диаметров (более 300 мм) и износа рабочих валков прошивных станов различного конструктивного исполнения на качество труб и, на основании этих исследований, определение рациональных режимов винтовой прошивки НЛЗ для получения гильз повышенного качества по состоянию поверхности.

Для достижения поставленной цели в работе определены следующие **задачи:**

- выполнить анализ научно-технической литературы по прокатке заготовок в двухвалковых прошивных станах винтовой прокатки;
- провести анализ несовершенств формы поперечного сечения, наружной поверхности, макроструктуры НЛЗ и деформационно-скоростных условий при прошивке заготовок на промышленных двухвалковых прошивных станах винтовой прокатки;
- разработать конструкцию испытательной машины для реализации процесса знакопеременного пластического изгиба образцов в условиях, максимально приближенных к процессам винтовой прокатки;
- разработать методику проведения испытаний стальных образцов в горячем состоянии на знакопеременный изгиб, выполнить испытания технологической пластичности НЛЗ и моделирование процесса знакопеременного изгиба стальных образцов в горячем состоянии;
- провести исследование износа рабочих валков промышленных прошивных станов различного конструктивного исполнения при прокатке непрерывнолитых и горячекатаных заготовок;
- на основании экспериментальных исследований определить рациональные режимы процесса прошивки НЛЗ в гильзы повышенного качества по состоянию поверхности.

**Научную новизну составляют:**

- испытательная машина оригинальной конструкции, обеспечивающая реализацию процесса знакопеременного пластического изгиба образцов в горячем и холодном состоянии (патент на полезную модель № 186293 РФ, МПК G01N 3/32. Установка для испытания образцов на знакопеременный изгиб);
- методика проведения специальных испытаний, на разработанной испытательной машине, образцов на знакопеременный пластический изгиб и его моделирование методом конечных элементов (МКЭ) в программе QForm, позволяющая оценивать технологическую пластичность заготовки в условиях, которые максимально приближены к реальному процессу винтовой прокатки. Установлено, что для получения горячекатаных труб из исходной заготовки с

минимальным уровнем дефектов на наружной и внутренней поверхности гильз, количество циклов в очаге деформации двухвалкового прошивного стана следует ограничить для углеродистых сталей - не более 20, для нержавеющей стали - не более 15;

– результаты исследований износа рабочей поверхности валков прошивных станов винтовой прокатки различного конструктивного исполнения, которые показали, что вне зависимости от калибровки и расположения рабочих валков, глубина износа имеет линейную зависимость от количества прокатанных заготовок. При этом по мере износа рабочих валков вынужденно изменяют настройку стана, что приводит к увеличению цикличности деформации в очаге и ухудшению состояния поверхности гильз и труб. Величина материалостойкости рабочих валков составила: ТПА 159-426 (сталь 50Х) при прокатке НЛЗ диаметром 340 и 410 мм – 4,4 т/см<sup>3</sup>, ТПА 50-200 (сталь 18ХГСА) при прокатке заготовок диаметром от 90 до 260 мм – 2,1 т/см<sup>3</sup>, МИСиС-130Д (сталь 45) при прокатке заготовок из жаропрочных сплавов – 0,4 т/см<sup>3</sup>.

#### **Практическая значимость работы:**

- разработана конструкция и создано оборудование машины для испытания образцов на знакопеременный пластический изгиб;
- разработана методика проведения технологических испытаний образцов на знакопеременный пластический изгиб; выполнены испытания технологической пластичности НЛЗ из различных марок стали;
- определено максимальное число циклов знакопеременного пластического изгиба стенки гильзы в очаге деформации прошивных станов винтовой прокатки для получения горячекатаных труб из исходной НЛЗ с минимальным уровнем дефектов на наружной и внутренней поверхности;
- на основании экспериментальных исследований даны практические рекомендации диапазона наработки рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426 в зависимости от их диаметра и твердости поверхности;
- определена материалостойкость рабочих валков прошивных станов различного конструктивного исполнения и разработана методика определения

величины выделенного показателя износа входного конуса - количества материала валка, затрачиваемого на захват заготовки, в зависимости от количества прошитых заготовок;

– на основании экспериментальных исследований даны практические рекомендации диапазона наработки рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426, обеспечивающие рациональную цикличность деформации в очаге и стабильное качество гильз и труб по состоянию поверхности.

– результаты теоретических и экспериментальных исследований находят отражение при выполнении практических занятий студентами бакалавриата и магистратуры на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС».

#### **Методология и методы исследования.**

Теоретические исследования проведены на основе положений теории обработки металлов давлением. Анализ деформационно-скоростных условий процесса винтовой прошивки, поиск закономерностей износа рабочих валков, качества получаемых гильз и труб осуществлен с использованием статистических данных о работе промышленных прошивных станов винтовой прокатки в условиях АО «ВТЗ» (г. Волжский).

Экспериментальные исследования технологической пластичности стальных образцов на знакопеременный пластический изгиб в горячем состоянии реализованы в условиях «Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (НИТУ «МИСиС», г. Москва) на испытательной машине оригинальной конструкции. Анализ полученных результатов выполнен с использованием регистрирующей аппаратуры, измерительных приборов и применением прикладного программного обеспечения MS Excel и программного комплекса QForm.

Расчеты и разработка конструкции оборудования машины для испытания образцов на знакопеременный пластический изгиб осуществлены на основе полученных экспериментальных данных и общих положений проектирования и конструирования машин с применением прикладного программного обеспечения SolidWorks 3D и КОМПАС-3D.

### **Положения, выносимые на защиту.**

На защиту выносятся следующие разработки, выполненные автором и отличающиеся научной и технической новизной:

- конструкция машины для испытания образцов на знакопеременный пластический изгиб (патент на полезную модель № 186293 РФ, МПК G01N 3/32. Установка для испытания образцов на знакопеременный изгиб) и методика испытания образцов на знакопеременный пластический изгиб;
- методика определения величины выделенного показателя износа входного конуса – количества материала валка, затрачиваемого на захват заготовки, в зависимости от количества прошитых заготовок;
- рациональные режимы винтовой прошивки НЛЗ с ограничением числа циклов деформации для углеродистой и нержавеющей стали.

**Степень достоверности** результатов исследований подтверждается использованием современных методов исследования, включающих моделирование с применением МКЭ в программном комплексе QForm; физические эксперименты, выполненные на оригинальной испытательной машине для реализации процесса знакопеременного пластического изгиба стальных образцов в горячем и холодном состоянии, промышленных прошивных станах ТПА 159-426, ТПА 50-200 и опытно-промышленном прошивном стане МИСиС-130Д с использованием современной регистрирующей аппаратуры, качественным и количественным согласованием результатов виртуальных и физических экспериментов.

### **Апробация работы.**

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

- 52-ой, 53-ей и 54-ой научных конференциях Волгоградского государственного технического университета (Волгоград: ФГБОУВПО «ВолгГТУ»), 2015, 2016 и 2017 гг., соответственно;

– X, XII, XIII и XIV молодежных научно-практических конференциях «Совершенство мысли и творчества» (Волжский: АО «Волжский трубный завод»), 2014, 2016, 2017 и 2018 гг., соответственно);

– X Молодежная научно-техническая конференция Трубной Металлургической Компании, г. Сочи, 2014 г.;

– XXII международной промышленной выставке «Металл-Экспо 2016», премия «Молодые ученые» (Москва: ВВЦ, 2016).

### **Публикации.**

Основное содержание диссертационной работы отражено в 6-ти печатных работах, в том числе в 3-х изданиях, рекомендованных ВАК РФ и в 1 патенте РФ.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, и списка использованной литературы из 77 наименований отечественных и зарубежных авторов. Текст диссертации содержит 107 страниц машинописного текста, включающего 20 таблиц и 70 рисунков.

## Глава 1. Литературный обзор

### 1.1 Дефектообразование при винтовой прошивке

Многолетний опыт непрерывной разливки стали показывает, что при соблюдении технологических режимов выплавки, внепечной обработки и разливки стали, НЛЗ имеет плотную структуру без раковин и центральной пористости. Определенные нарушения технологического процесса сопровождаются появлением дефектов соответствующего вида. К числу основных дефектов НЛЗ относят: поверхностные продольные и поперечные трещины, крупнозернистое строение, внутренние трещины, дефекты сердцевины, поры и участки шлаковых включений, а также дефекты геометрической формы и др. [1, 2, 3].

Дефекты, возникающие в процессе непрерывной разливки стали, можно разделить на устранимые и неустраняемые. Устранимые дефекты можно ликвидировать, например, с помощью локальной зачистки, обточки участков металла с поврежденной поверхностью. Например, при прокатке труб из нержавеющей стали [4, 5], котельных труб, сортовая горячекатаная заготовка поставляется в обточенном виде без поверхностных дефектов с центральной пористостью по ГОСТ Р 53932-2010 [6] не более 2...3 баллов. Неустраняемые дефекты являются наиболее опасными, и заготовку часто отправляют на переплав, потому что их трансформация в трубном переделе может привести к неисправимому браку на готовых трубах. Например, центральная пористость свыше 3-4 баллов [1] (рисунок 1.1) при прошивке приводит к образованию плен на внутренней поверхности гильз и труб (рисунок 1.2), удаление которых чрезвычайно затруднено и трубы с внутренними пленами, как неустраняемый брак, отправляются на переплав.

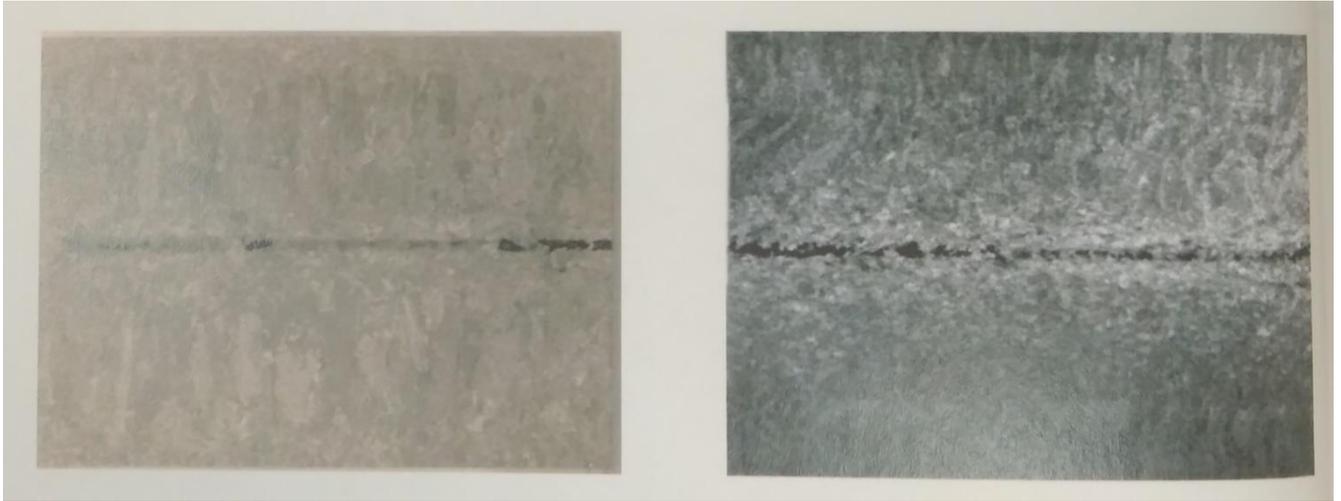


Рисунок 1.1 – Центральная (осевая) пористость на продольных темплетах НЛЗ



Рисунок 1.2 - Плена на внутренней поверхности трубы

Овальность поперечного сечения [1] (рисунок 1.3) определяет устойчивость процесса прокатки, точность получаемых гильз, образование внутренних плен из-за необходимости повышения обжатия заготовки в пережиме валков и перед носком оправки.

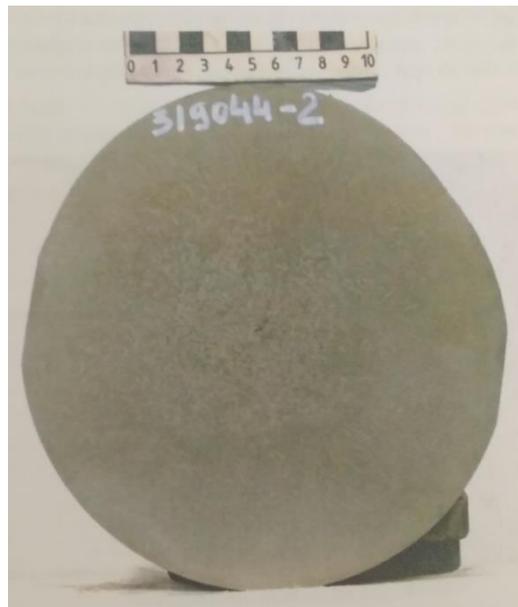


Рисунок 1.3 – Овальность, внешний вид литой круглой заготовки Ø220 мм

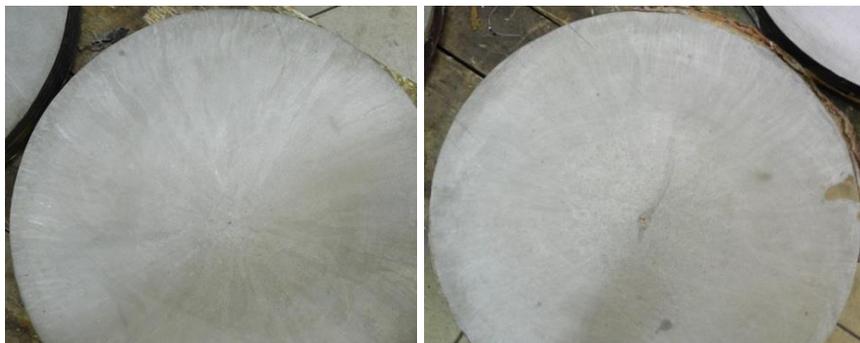
Негативное влияние этих несовершенств на качество готовой продукции частично можно уменьшить за счет корректирования температурных и деформационно-скоростных режимов процессов последующего нагрева и горячей прокатки, но в целом уровень брака металлопроката из НЛЗ существенно выше, чем из горячекатаной заготовки. Например, при прокатке труб на ТПА 30-102 “ПНТЗ” отбраковка по внутренним пленам из НЛЗ составляет 3 - 4 % [7], а из горячекатаной – 0,3...0,4 % [8]. Аналогичная картина по качеству труб из НЛЗ характерна и для других трубных заводов России. Следует отметить, что переход с горячекатаной на НЛЗ практически на всех трубопрокатных агрегатах проходил без изменения температурных и деформационно-скоростных режимов и калибровки технологического инструмента. Последнее обусловлено, по-видимому, отсутствием объективной и достаточной информации о физико-механических свойствах и качестве НЛЗ с точки зрения технологической пластичности в процессах винтовой прокатки: прошивки и раскатки.

Для производства на ТПА 159-426 высокопрочных нефтегазопроводных бесшовных труб групп прочности X52-X80 применяются низколегированные стали с содержанием марганца, ванадия, ниобия которые характеризуются повышенным сопротивлением деформации, низкой технологической пластичностью, наличием “липкой” окалины, более узким температурным

интервалом горячей обработки давлением по сравнению с низкоуглеродистой сталью. В работах [3, 9, 10] показано, что наиболее значимое влияние на улучшение качества поверхности НЛЗ оказали следующие мероприятия: подбор оптимального химического состава стали, стабилизация температурно-скоростного режима разливки, устранение отклонений в работе механизмов качания кристаллизатора установки непрерывной разливки стали, подбор оптимальной марки шлакообразующей смеси, использование чугуна при выплавке стали в электродуговой сталеплавильной печи, вторичное окисление металла во время разливки, а также применение электромагнитного перемешивания (рисунок 1.4 а, б, в).



а



б

в

Рисунок 1.4 - Темплеты НЛЗ Ø410 мм: а – отсутствие выраженного слоя мелкозернистых кристаллов; б – без применения ЭМП; в – с применения ЭМП

Несмотря на непрерывное совершенствование технологии непрерывной разливки в заготовках большого диаметра встречаются центральная пористость (рисунок 1.5), грубая крупнокристаллическая структура.



Рисунок 1.5 - Темплет НЛЗ Ø360 мм из стали марки 28X3CHM1ФА (СП-28)

## 1.2 Качество наружной и внутренней поверхностей труб

Практикой трубoproкатного производства установлено, что наиболее распространенным и трудноустраняемым видом брака бесшовных труб являются внутренние плены и трещины. Прокатное происхождение в основном связано с центральным разрушением металла перед носком оправки во время процесса прошивки заготовок. Дефекты, которые получаются на гильзах, при пластической деформации в последующих станах, как правило, не устраняются и остаются на готовых трубах. Причины и механизм центрального разрушения рассмотрены в работах [8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 и др.].

Авторы работы [18] отмечают, что на качество внутренней поверхности гильз и впоследствии труб существенное влияние оказывают дефекты макроструктуры (осевая рыхлость, V-образная ликвация) и их ориентация относительно оси заготовки.

Ввиду того, что процесс прошивки заготовки в полу гильзу является циклическим, то основным фактором, влияющий на центральное разрушение металла, является количество циклов в очаге деформации, а главным технологическим параметром, влияющим на цикличность процесса прошивки является угол подачи. Величина угла подачи влияет на объем подачи металла,

проходящего через очаг деформации и величина которого обратно пропорциональна количеству циклов деформации (см. рисунок 1.6).

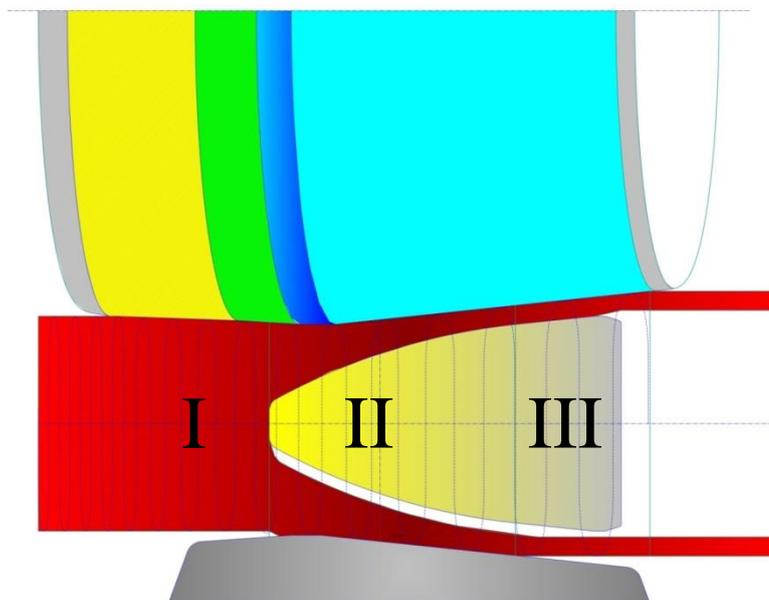


Рисунок 1.6 - Схема очага деформации прошивного стана с направляющими линейками

Количество шагов осевой подачи при прошивке определяется по формуле:

$$C_{\Sigma} = C_I + C_{II} + C_{III} \quad (1.1)$$

где  $C_I$  - на участке первичного захвата заготовки;

$C_{II}$  - при прохождении металла заготовки через носок и сферическую часть оправки;

$C_{III}$  - при прохождении металла заготовки раскатного участка оправки и сходе металла с валков и оправки.

Данные составляющие определяются из геометрии очага деформации и зависят от длины контакта металла заготовки во входном и выходном конусах валка, выдвижения носка оправки, коэффициента вытяжки, шага осевой подачи. Сравнение технологических параметров очага деформации прошивного стана при различных углах подачи представлено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение технологических параметров очага деформации прошивного стана ТПА 159-426

№	Диаметр заготовки, мм	Диаметр гильзы, мм	Толщина стенки гильзы, мм	Коэффициент вытяжки	Обжатие в пережиме, %	Обжатие перед носком оправки, %	Угол подачи, градус-ов	Подсчёт шагов осевой подачи, шт				Время прошивки, с
								I	II	III	сумма	
1	410	506	37,9	2,43	7,3	5,8	7	4,7	10,9	2,6	18,2	22,5
2			38,2	2,41	8,0	7,6	8	5,6	8,7	2,6	16,9	18,0
3			38,2	2,41	8,0	7,6	9	5,0	7,5	2,6	15,1	15,5
4			37,6	2,45	7,6	5,8	10	3,5	6,0	2,6	12,1	13,0*

\*расчёт

Величина подачи при прошивке, является эффективным параметром, влияющим на количество циклов и качество поверхности гильз и труб, изменение которых при различных углах подачи представлено на рисунке 1.7.

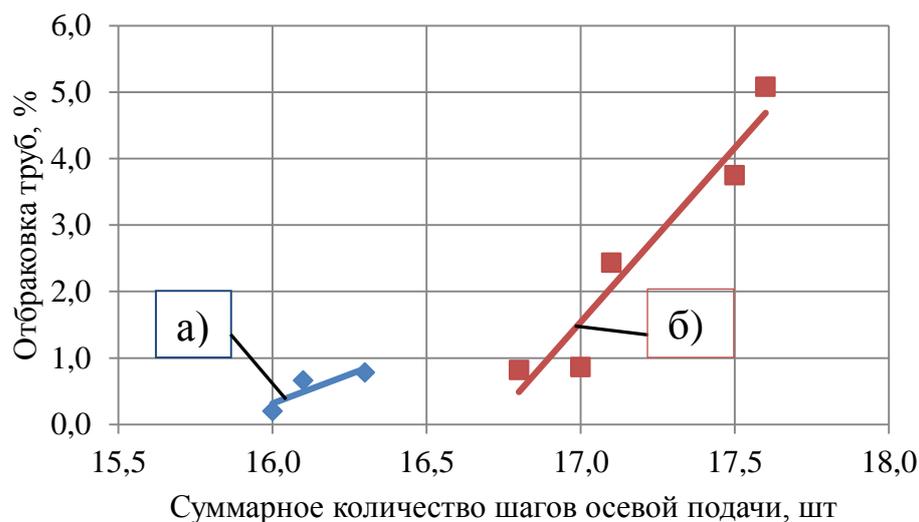


Рисунок 1.7 – Влияние суммарного количества шагов осевой подачи на качественные показатели труб из стали марки 10ГФБЮ НЛЗ диаметром 410 мм при прокатке с установкой различных углов подачи: а – 7 градусов; б – 8 градусов

Однако угол подачи создает момент статического сопротивления на валу двигателя, величина которого прямо пропорциональна току якоря и с его возрастанием произойдет увеличение нагрузки на главные приводы прошивного стана (см. рисунок 1.8).

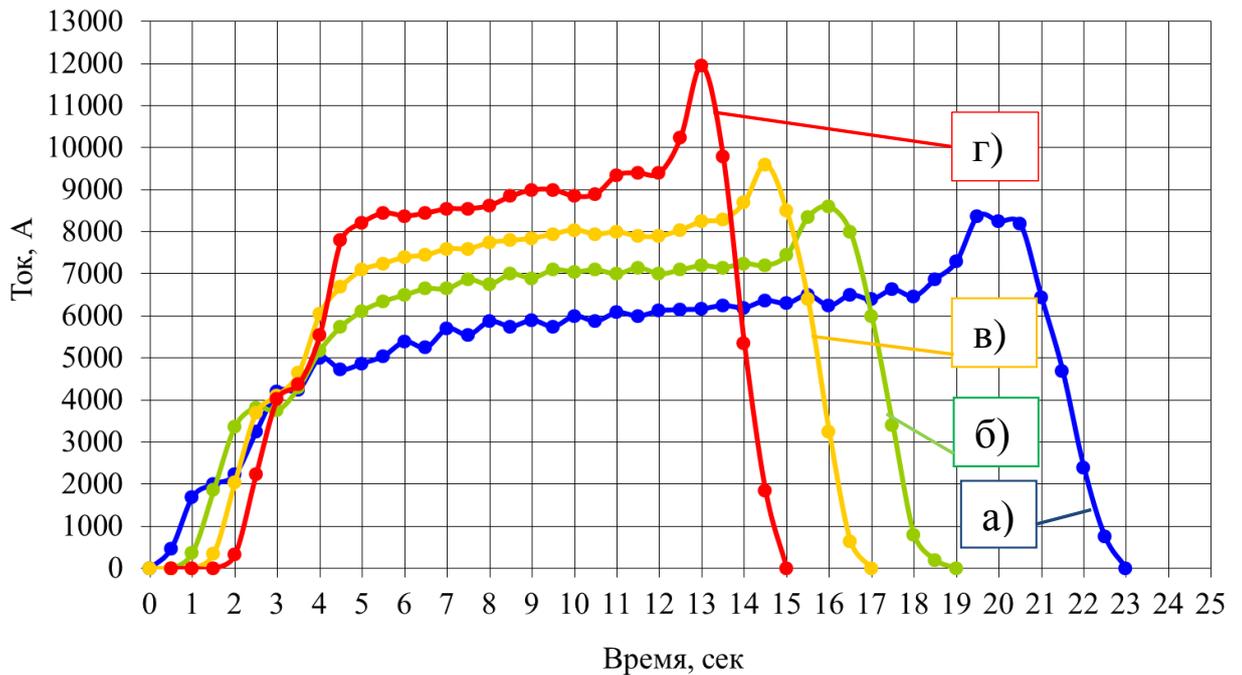


Рисунок 1.8 – Нагрузочная токовая диаграмма электродвигателей главных приводов прошивного стана при различных углах подачи при прошивке заготовки диаметром 410 мм из стали марки 10ГФБЮ: а –  $7^0$ ; б –  $8^0$ ; в –  $9^0$ ; г –  $10^0$  - расчёт

В этой связи в настоящее время прошивка НЛЗ большого диаметра, в особенности с увеличением наружного диаметра гильз относительно диаметра заготовки (“на подъем”), осуществляется с установкой рабочих валков на угол подачи от 8 до 10 градусов.

Рациональный выбор величины обжатия перед носком оправки, угла подачи валков при настройке прошивного стана обеспечивает протекание процесса прошивки без образования центрального разрушения. Известно, что уменьшение обжатий перед носком оправки приводит к уменьшению склонности к центральному разрушению заготовки, однако минимальные обжатия могут вызывать ухудшение первичного захвата, повышенное скольжение металла относительно рабочих валков [8, 12]. Дополнительной причиной образования дефектов на наружной поверхности гильз может являться эффект скручивания металла при прошивке, при этом наиболее значимыми факторами, оказывающими влияние на скручивание, являются угол подачи, схема прошивки и коэффициент вытяжки. В связи с этим процесс прошивки НЛЗ больших диаметров (более 300

мм) из углеродистой и низколегированной стали в двухвалковом стане с направляющими линейками, расположенными в горизонтальной плоскости, необходимо осуществлять при рациональных режимах, исключая образование дефектов на внутренней и наружной поверхности гильз и труб.

### 1.3 Износостойкость рабочих валков прошивных станов

В научно-технической литературе достаточно широко освещены вопросы износостойкости инструмента станов винтовой прокатки, преимущественно оправок прошивного стана [19 - 43], прогнозирования поведения металла в очаге деформации и нагрузки на рабочий инструмент [44 - 47, 77], а также рабочих валков различных прокатных станов: для производства профилей высокой жесткости [48], горячей прокатки полос [49]. В работе [50] проведено моделирование износа калибра чистовой клетки при производстве круглого проката в программном комплексе DEFORM-3D и определен уровень и механизм износа. Полученные результаты качественно и количественно согласуются, как по значениям осевого износа, так и по характеру изменения формы калибра при действующем производстве круглого проката. Применительно к трубопрокатному производству - авторами [51] проведена исследовательская работа по определению профиля износа и тянущей способности валков прошивного стана винтовой прокатки ТПА 159-426 для оценки её влияния на качество внутренней поверхности гильз и труб. Полученная, с применением законов математической статистики, зависимость качества от тянущей способности валков имеет скорее косвенную связь по причинам отсутствия привязок к диаметру исходных заготовок, цикличности процесса прошивки, настройкам очага деформации и состоянию поверхности другого прокатного инструмента станов вышеупомянутого агрегата.

В патенте [52] авторами приведены результаты сравнительных испытаний известного и усовершенствованного рабочих валков стана-элонгатора с накаткой в выходном конусе для снижения осевой скорости гильзы при прокатке её заднего

конца в сопоставлении с качеством наружной поверхности гильз. Полученный результат применим для прокатки гильз-стаканов на станах-элонгаторах, но не согласуется с классическим подходом калибровки рабочего вала для прошивного стана винтовой прокатки, где снижение осевой скорости гильзы является недопустимым.

Учитывая большое разнообразие прошивных станов винтовой прокатки и режимов прошивки можно предположить, что износ инструмента станом винтовой прокатки и его влияние на стабильность процесса прокатки, качество гильз и труб из непрерывнолитой заготовки большого диаметра освещены недостаточно.

Впервые износ инструмента станом винтовой прокатки – валков, оправок и линеек – рассмотрел П.Т. Емельяненко [53]. Исследуя износ валков, автор установил, что по длине бочки вала имеется три зоны максимального износа: 1) в начале конуса прошивки; 2) на участке пережима; 3) в выходном конусе.

Данные о стойкости инструмента прошивных станом приведены также в работах [12, 54, 55 и др.]. В частности, установлено, что зона максимального износа валков соответствует сечению положения носка оправки, что не соответствует современным представлениям об износе валков прошивных станом [8, 56, 57].

Авторы работы [8] подробно исследовали износостойкость валков с винтовой нарезкой. В качестве характеристики износа ими была принята удельная выработка – отношение площади, заключенной между новым и изношенным профилями рабочего вала в меридиональном сечении, к количеству прокатанного металла.

В качестве основного критерия эксплуатационной стойкости валков наиболее часто используют среднее количество металла, прокатанного одним валком за весь срок его службы.

В общем виде износостойкость валков  $U$  зависит от большого числа факторов [8]:

$$U = f(M_b, M_{пр}, t, \tau, K_n \text{ и др.}), \quad (1.2)$$

где  $M_b$  – материал валка;

$M_{пр}$  – материал проката;

$t$  – температура проката;

$\tau$  – длительность контакта, время прокатки;

$K_n$  – степень напряженности рабочего валка.

Большое влияние на износостойкость валков, помимо качества их изготовления, связанного с выбором материала и технологией производства, оказывают условия эксплуатации. В процессе прокатки заготовок рабочие валки прошивного стана контактируют с горячим металлом имеющим температуру поверхности до 1200 °С в течении 7...28 с (прошивной стан ТПА 159-426). Во время прокатки и в паузах рабочая поверхность валков обильно охлаждается водой. На контактной поверхности валков с горячим металлом должен быть достаточно высокий для стабильного протекания процесса коэффициент трения (0,35 и более), при этом такие валки обладают значительной износостойкостью.

Для улучшения тянущей способности валков, во входном конусе валка в зоне, расположенной до встречи металла с оправкой, выполняют профильные кольцевые гребни или специальные пазы. Они могут быть кольцевыми, то есть находится под прямым углом к оси валка (такую калибровку называют кольцевой) (рисунок 1.9, а), или располагаться вдоль образующей валка (так называемая пазовая калибровка) (рисунок 1.9, б). Промежуточное положение занимает так называемая винтовая калибровка, при которой указанные гребни (пазы) располагаются под некоторым углом к оси валка (рисунок 1.9, в). Кольцевая калибровка создает дополнительные подпирющие усилия в осевом направлении, что снижает осевые растягивающие напряжения. Пазовая калибровка благодаря подпирющим тангенциальным усилиям ограничивает растягивающие напряжения в указанном направлении. Винтовая калибровка создает промежуточное напряженное состояние металла заготовки при прошивке [58].

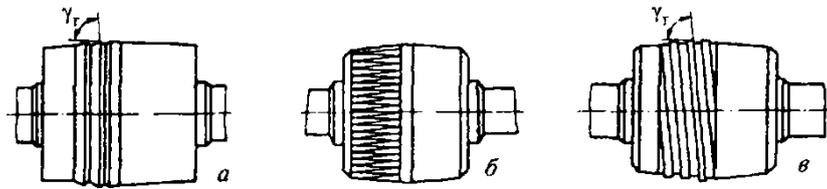


Рисунок 1.9 – Калибровки валков прошивных станов: а – кольцевая; б – пазовая;  
в – винтовая

Для повышения тянущих сил при первичном и вторичном захвате, можно также применять электроискровое легирование (ЭИЛ) участка захвата заготовок протяженностью примерно 25-30 процентов от длины входного конуса. Процесс заключается в обработке упрочняемой поверхности валков с помощью вибрирующего электрода – анода (валок является катодом), в результате которой между поверхностью валка и электродом периодически возникают искровые разряды регулируемой мощности. Кроме того, авторами [59] отмечено, что при прошивке заготовок на валках, обработанных ЭИЛ (см. рисунок 1.10, а), наружные дефекты исходных заготовок в процессе прошивки развития не получают, а износ рабочей поверхности валков уменьшается в 2-3 раза, при этом плотность шипов ЭИЛ должна составлять 7...9 шт на 1 см<sup>2</sup> высотой 0,5...0,8 мм диаметром 2...3 мм. На основании результатов опытных работ по эксплуатации валков прошивного стана ТПА 159-426, поверхность которых обработана ЭИЛ (рисунок 1.10, а), после прокатки 1485 штук заготовок диаметром 340 мм (или 2 478,8 тонн) во входном конусе отсутствовал упрочненный легированный слой (рисунок 1.10, б) и валки были принудительно сняты по причине неудовлетворительного качества рабочей поверхности.



а) исходная, обработанная ЭИЛ



б) после работы

Рисунок 1.10 – Поверхность рабочих валков прошивного стана

Основной причиной выхода рабочего инструмента стана винтовой прокатки из строя является интенсивный износ рабочей поверхности. Известно [8, 53, 58], что износ рабочих валков в большей степени, чем износ остального прокатного инструмента (оправок, направляющих линеек), влияет на стабильность процесса прошивки. Кроме того, технико-экономические показатели эксплуатации ТПА определяются износостойкостью и работоспособностью рабочих валков.

Валки прошивных станов должны обладать высокой износостойкостью против истирания и иметь повышенный коэффициент трения на контактной поверхности валков и прокатываемого металла для улучшения условий первичного и вторичного захвата и уменьшения скольжения. Как правило, валки изготавливают либо с наплавкой рабочей поверхности сварочной проволокой, например Св-18ХГС, либо без наплавки (восстановление рабочей поверхности переточкой) из углеродистых сталей марок 40, 45, 50Х, 55Х (таблица 1.2).

На прошивном стане ТПА 159-426 испытывали валки с рабочей поверхностью, выполненной из износостойкого слоя наплавленного проволокой Нп-18Х1Г1М под флюсом АН-60 (рисунок 1.11, а). После прокатки 2 042 штук заготовок диаметром 410 мм (или 6 090,182 тонн) во входном конусе видны следы наплавленного металла, и отсутствовала исходная накатка глубиной 0,3...1,2 мм выполняемая накатным роликом для улучшения их тянущей способности (рисунок 1.11, б).



локального пятна входного конуса валка, в отличие от ТПА с непрерывным станом типа МРМ (ТПА 159-426) [43, 56], PQF [60] или FQM [61], для которых диапазон диаметров заготовок ограничен двумя или четырьмя типоразмерами.

Известно [11, 62], что формоизменение металла в очаге деформации прошивного и раскатного станов сопровождается значительными знакопеременными деформациями и напряжениями. Например, в прошивных станах с грибовидными валками [15, 63 - 65] скорости прошивки от захвата до выхода заготовки из валков возрастают и заготовка скручивается в одном направлении без переменного изгиба волокон. Недостатком станов с бочковидными валками является то, что волокна металла при прошивке испытывают деформацию изгиба в двух противоположных направлениях, что вызывает повышение напряжений, особенно на поверхности заготовки [63].

Влияние износа рабочих валков на качество труб наглядно показано в работе [8]. Образующиеся вследствие прошивки НЛЗ – плены и раковины на наружной поверхности имеют тенденцию к увеличению количества по мере увеличения наработки валков, что связано с износом рабочей поверхности валков, при этом происходит удлинение контактной поверхности металла с валком выходном конусе очага деформации, повышение скольжения с последующим возрастанием числа частных обжатий - циклов деформации заготовки.

В работе [15] подробно описана методика разработки калибровок технологического инструмента двухвалковых прошивных станов, основанная на рациональном распределении параметров формоизменения очага деформации с учетом обеспечения условий захвата и устойчивого протекания процесса прошивки с одной стороны, и с другой - минимизированного количества циклов деформации металла перед носком оправки, чтобы избежать негативного воздействия цикличности процесса прошивки и исключить образование дефектов внутренней поверхности гильз.

## Глава 2. Качество непрерывнолитой заготовки, гильз и труб

### 2.1 Особенности непрерывнолитой заготовки

Исходная НЛЗ, на которой базируется современное трубопрокатное производство, позволяет достигать минимальных затрат на получение готовой продукции достаточно высокого качества, однако НЛЗ по сравнению с горячекатаной из слитка при их промышленном производстве имеют различного вида несовершенства (см. рисунок 2.1 а, б, в, г, д, е).

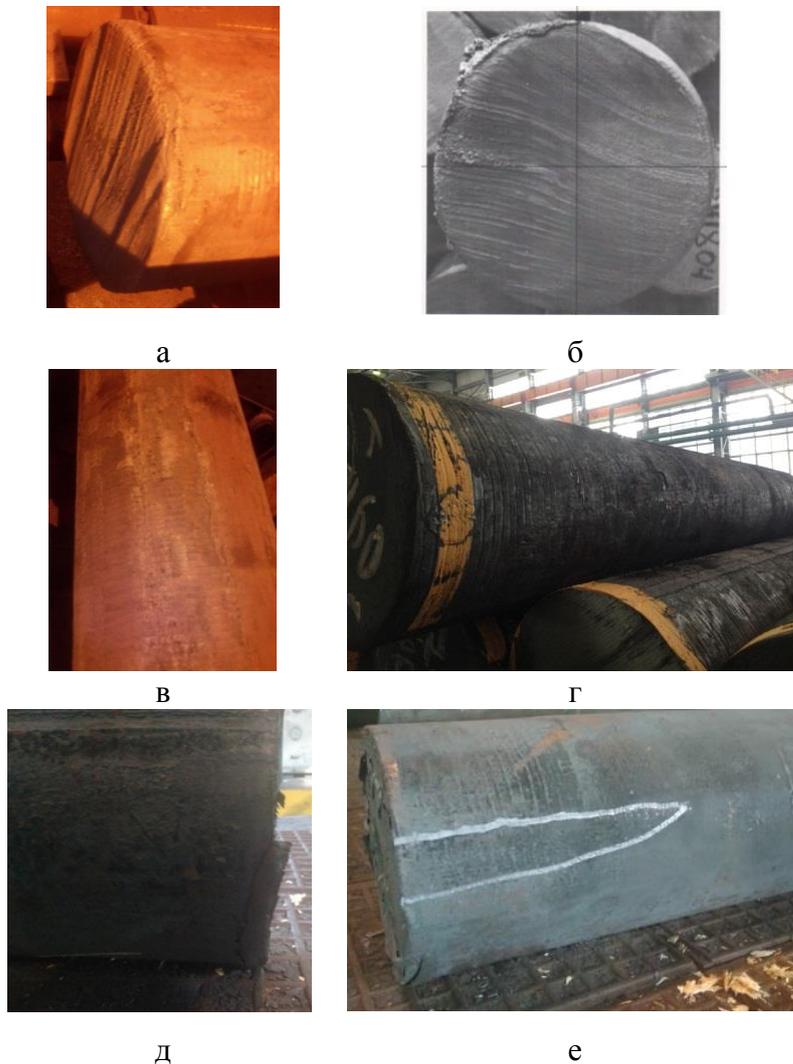


Рисунок 2.1 – Внешний вид НЛЗ Ø410 мм: а - неровный рез торца заготовки после газокислородной резки; б - овальность заготовки; в, г - следы качания кристаллизатора; д, е - облой после газокислородной резки

Вышеперечисленные несовершенства наружной поверхности, по условиям производства не являются браком, однако овальность заготовки (см. рисунок 2.1 б) способствует ее неравномерному обжатию и вращению в очаге деформации прошивного стана, а наличие облоя после газокислородной резки (см. рисунок 2.1 д, е) - проскальзыванию металла в момент ее захвата рабочими валками.

На основании результатов экспериментальных исследований и практики работы ТПА 159-426 установлено, что для стабильного ведения процесса прошивки заготовок из углеродистой и низколегированной марок стали диаметром 260, 340, 360 и 410 мм используются следующие значения обжатия перед носком оправки 5,0...9,3 %. При этом обжатие заготовки в пережиме валков составляет 8,8...19,7 %, угол подачи - 8...11 °. Коэффициент овализации находится в пределах 1,08...1,20. При меньших значениях коэффициента овализации процесс прошивки проходит неустойчиво с нарушением условий первичного захвата. К тому же уменьшение коэффициента овализации сопровождается снижением скорости прошивки и ростом скольжения металла в очаге деформации. Увеличение коэффициента овализации приводит к возрастанию коэффициентов осевой и тангенциальной скорости, однако сопровождается повышенной овальностью поперечного сечения и волнистостью наружной поверхности гильз [8, 59, 66].

Необходимо отметить, что процесс прошивки НЛЗ диаметром 410 мм в гильзу диаметром от 500 до 508 мм (с подъемом более 20 %) производится при следующей настройке очага деформации: обжатие перед носком оправки 5,1 – 5,7 %, обжатие в пережиме валков 9,7 – 10,4 %, что относительно классического подхода к настройке очага деформации существенно меньше [12, 53]. Прошивка заготовок с повышенной овальностью поперечного сечения при такой настройке очага деформации сопровождается повышенным скольжением металла относительно рабочих валков. Расчеты показали, что коэффициент осевой скорости в сечении выхода гильзы из валков составляет 0,70...0,75, обычно же значения  $\eta_0$  находятся в интервале 0,85...0,90.

Большую опасность для процесса прошивки и качества гильз и труб представляет центральная пористость НЛЗ, которая, в первую очередь, сказывается на количестве брака по внутренним плёнам.

Для установления влияния качества исходной НЛЗ диаметром 340 мм из углеродистой стали марки 32ХГА на качество внутренней поверхности гильз и труб размером  $\text{Ø}244,48 \times 10,03$  мм по дефектам “Раковина внутренняя трубопрокатная” и “Плена внутренняя трубопрокатная” произведен анализ данных по качеству труб, изготовленных из 22 плавов объемом 2 719,71 тонн за одну кампанию проката (см. рисунок 2.2).

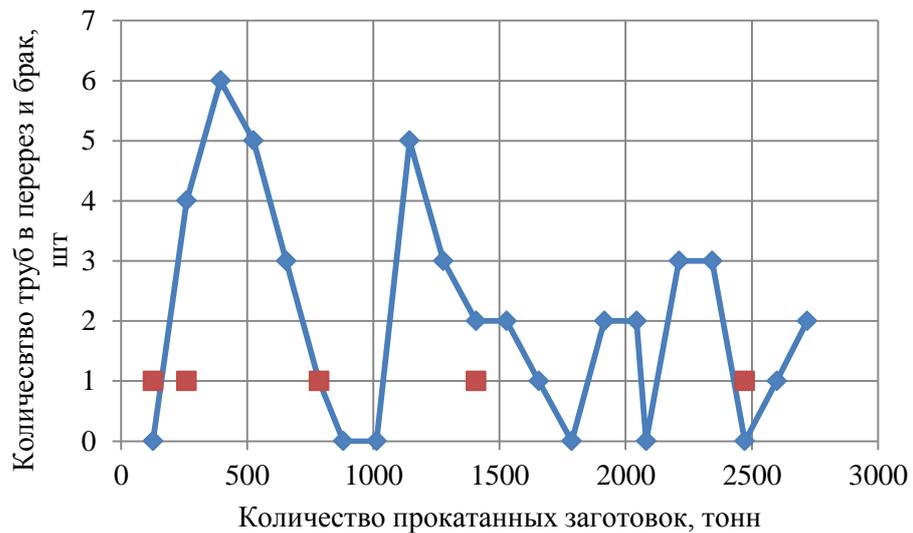


Рисунок 2.2 – Зависимость отбраковки и перереза труб по внутренним пленам и раковинам трубопрокатного происхождения от количества прокатанных тонн заготовок из стали марки 32ХГА  $\text{Ø}340$  мм в трубы  $\text{Ø}244,48 \times 10,03$  мм

На представленном графике зависимости отбраковки и перереза труб по внутренним пленам и раковинам трубопрокатного происхождения от количества прокатанных тонн заготовок, отмечены (квадратами) случаи замены используемых оправок прошивного стана диаметром 253 мм длиной 520 мм с острым носком. Отсутствие регулярной зависимости увеличения отбраковки труб перед каждой заменой прошивной оправки по существу исключает влияние состояния её рабочей поверхности на указанные дефекты.

Следующим этапом стало подробное исследование заторможенной во время прокатки в двухвалковом прошивном стане ТПА 159-426 заготовки-гильзы из 12-й по порядку плавки вышеуказанной кампании проката. Данная заготовка-гильза диаметром 321,5 мм с толщиной стенки 29,5-30,8 мм была размечена, после чего произведено измерение диаметров гильзы в плоскости валков и линеек (см. рисунки 2.3 и 2.4).

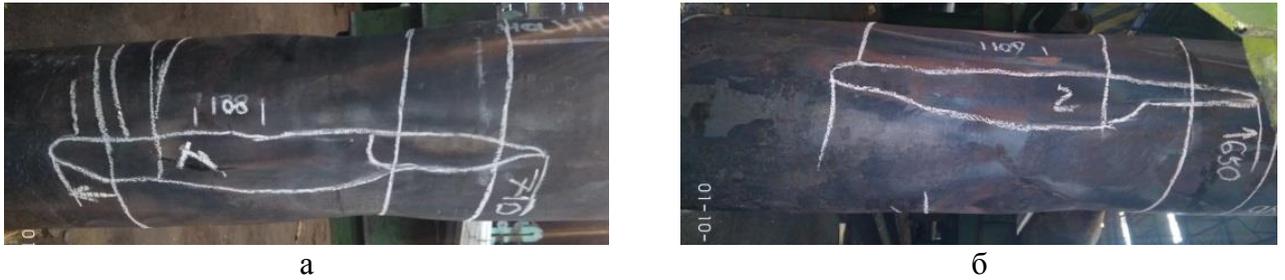


Рисунок 2.3 – Заторможенная заготовка в двухвалковом прошивном стане: а – пятно контакта металла с валком №1; б – пятно контакта металла с валком №2

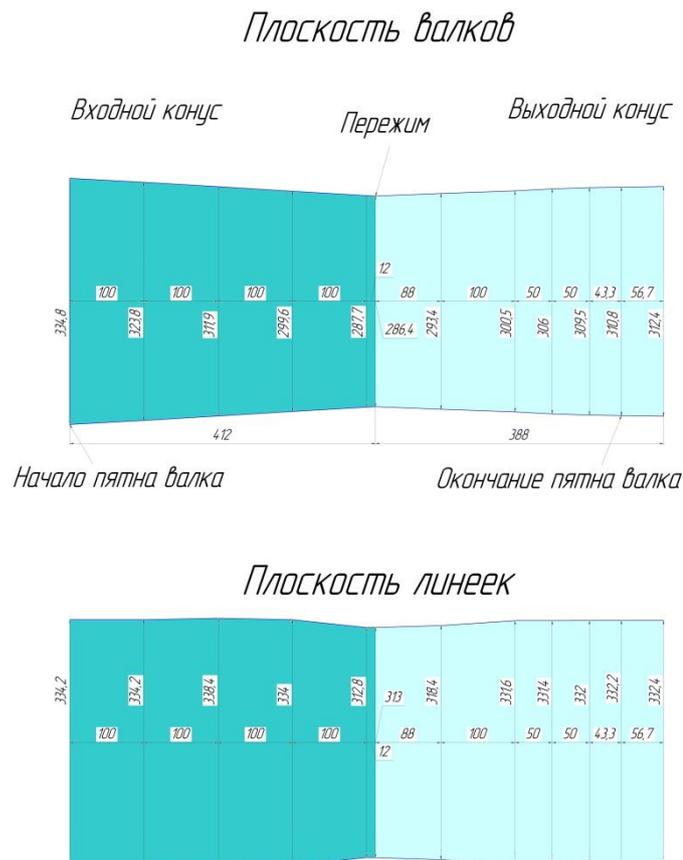


Рисунок 2.4 – Значения замеров диаметров заготовки-гильзы по очагу деформации

Контакт металла заготовки-гильзы сохраняется на 2/3 части длины рабочей бочки валка и на всем протяжении выходного конуса размер гильзы в плоскости валков возрастает, но получаемая гильза меньше размера исходной заготовки. В плоскости линейек размер гильзы в начале конического участка не изменяется, в середине конического участка достигает максимального значения 338,4 мм, а далее, после отрыва металла от поверхности направляющей линейки, остается практически неизменным и равным 332 мм. Кроме того, сечение пережима (минимального диаметра заготовки-гильзы) между направляющими линейками (диаметр 312,8 мм) находится приблизительно на 12 мм ближе к входному конусу, чем сечение пережима между валками (диаметр 286,4 мм). Соответственно, коэффициент овализации в сечении пережима между валками составляет 1,09. Таким образом, на большей части выходного конуса, где происходит раскатка гильзы уже без контакта с оправкой, очаг деформации является открытым, так как направляющие линейки не обеспечивают контакта с заготовкой-гильзой и её поперечное сечение подвергается значительному пластическому изгибу. Еще одной отличительной особенностью данного очага деформации является разница в 60 мм длин пятен контакта металла с валками, а величины площадей пятен контакта составили для первого валка 39 800 мм<sup>2</sup> и второго – 41 595 мм<sup>2</sup>, что можно объяснить незначительным отклонением геометрической оси заготовки-гильзы от оси прокатки.

Изготовленный продольный темплет (см. рисунок 2.5) позволил установить фактические основные настроечные параметры очага деформации и сравнить их с расчетными:



Рисунок 2.5 – Продольный темплет заторможенной заготовки-гильзы

обжатие в пережиме валков фактическое 14,51 %, настроечное - 14,64 %. Установленная разница значений объясняется в различии между размерами диаметров заготовки – холодной фактической (337 мм) и горячей расчётной (344,4 мм). Обжатие перед носком оправки 4,80 %, настроечное - 4,75 %. Фактическое положение носка оправки в очаге деформации меньше на 11 мм по причине уменьшения зазора между оправкой и ниппелем оправочного стержня, упругой деформацией оправочного стержня и выборкой зазоров в механизме подвижной упорной головки.

Анализ диаграммы токовой нагрузки, представленный на рисунке 2.6, позволил установить, что суммарное время первичного и вторичного захвата составило 2,5 секунды, что свидетельствует о недостаточном обжатии заготовки до встречи её торца с оправкой для активного протекания процесса захвата. На новых валках (после переточки) стабильный первичный захват заготовки обеспечивается за счёт наличия накатки, с величиной коэффициента первичного захвата ( $G_f$  [67]) 0,78.

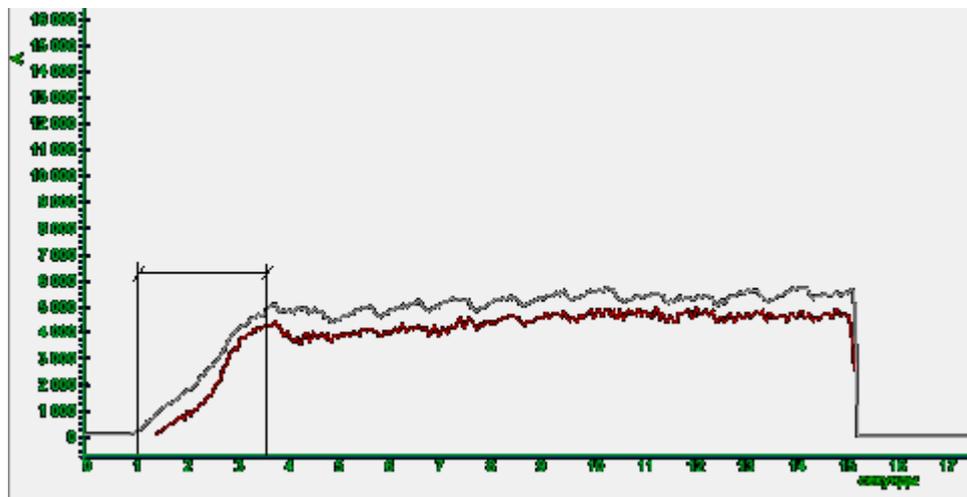


Рисунок 2.6 – Нагрузочная токовая диаграмма электродвигателей главных приводов прошивного стана

В исследованном образце заготовки зафиксирована неудовлетворительная макроструктура: центральная пористость 4 балла при требованиях ГОСТ Р 53932-2010 не более 3 [6]. Остальные параметры в пределах нормы: осевая химическая неоднородность 2 балла; осевые ликвационные полосы 0,5 баллов; трещины и

ликвационные полосы в промежуточной зоне 0 баллов; краевые точечные загрязнения 0 баллов.

На конкретной заторможенной заготовке металл сохраняет свою сплошность на коротком участке перед носком оправки, несмотря на образование центральной пористости, сосредоточенной по оси заготовки. В стенке полученной гильзы деформированный металл имеет плотную однородную структуру, однако выявлен грубый дефект в виде вырыва металла на внутренней поверхности гильзы (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Центральная пористость НЛЗ из стали марки 32ХГА Ø340 мм и дефект на внутренней поверхности гильзы

При недостаточной технологической пластичности металла, наличия развитых дефектов центральной пористости распространяющихся в сторону от оси заготовки, повышенной цикличности в очаге деформации, при раскатке на оправке приведут к образованию плен, глубина залегания которых зависит от множества факторов: технологической пластичности металла, температурных и деформационно-скоростных условий прокатки и др.

Таким образом, проведенные исследования показали, что литая структура НЛЗ оказывает существенное влияние на качество гильз и труб, что хорошо согласуется с данными, изложенными в работе [17], где подробно описаны работы по прошивке НЛЗ диаметром 360 мм на прошивном стане пилигримовой установки 6-12". Очевидно также, что для прокатки труб с высоким качеством внутренней поверхности исходная НЛЗ должна удовлетворять требованиям ГОСТ Р 53932-2010 [6] по центральной пористости и осевой ликвации.

## 2.2 Механические свойства металла НЛЗ

В условиях промышленного трубного производства испытания механических свойств проводятся на образцах вырезанных из патрубков готовых труб, но непрерывнолитую трубную заготовку изготавливают без нормирования и контроля механических свойств [6]. Следует отметить, что хотя механические свойства труб тонкостенного сортамента с  $D/S > 10$ , изготовленных из НЛЗ и горячекатаной заготовок практически одинаковые, знания механических свойств НЛЗ в горячем состоянии весьма актуальны. Например, при расчете усилий металла на инструмент используются данные механических испытаний образцов выполненных из горячекатаных заготовок, поэтому на практике возможно получение непредсказуемых результатов по нагрузке на главные электроприводы. В этой связи проведена работа по отбору темплетов НЛЗ для изготовления образцов из различных марок стали, с целью испытаний на одноосное растяжение на универсальной испытательной машине УМЭ-10Т и определения твердости по поперечному сечению заготовки. Результаты испытаний механических свойств НЛЗ из углеродистой и нержавеющей стали мартенситного класса приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты испытаний механических свойств и твердости металла НЛЗ

Марка стали	Диаметр НЛЗ, мм	Место отбора	$\sigma_{0,2}$ , МПа при 23 °С	$\sigma_b$ , МПа при 23 °С	$\sigma_b$ , МПа при 1200 °С [68]	$\delta$ , % при 23 °С	$\delta$ , % при 1200 °С [68]	Твердость, при 23 °С		
								НВ	HRB	HRC
20	410	- наружная	197,0	400,6	29,4	21,5	64	-	67-69	-
		- середина	190,1	399,4		15,4		-	78	-
		-центр	194,3	369,4		12,2		-	74-76	-
09Г2С	410	- наружная	244,6	410,2	29,4	38,3	105	131	72-76	-
		- середина	-	444,3		30,7		-	77-78	-
		-центр	253,0	431,0		21,3		-	73-78	-
34CrMo4	360	- наружная	610,9	716,1	9,8	2,9	60	241-285	100-103	24,1-25,3
		- середина	682,2	770,4		2,3		-	-	22-24
		-центр	586,0	675,2		1,7		-	-	19-22
08Х13Н4М1Ф (в отпущенном состоянии)	196	середина	670,0	860,0	19,6	12,0	62	255	-	26
10Х13Н3МФБ (в термообработанном состоянии)	190	середина	576,0	793,0	19,6	10,7	58	240	100	24

Анализ данных таблицы 2.1 показывает, что пластические свойства металла центральных слоев НЛЗ большого диаметра из углеродистых марок стали ниже, чем срединных и наружных слоев в 1,5 - 2 раза. Однако такие заготовки успешно используются для горячей прокатки труб на различных трубопрокатных агрегатах, при этом обеспечивается получение труб удовлетворительного качества. Для производства нержавеющей труб мартенситного класса предъявляются повышенные требования по макроструктуре к исходной заготовке ввиду низкой технологической пластичности из-за наличия большого количества специальных карбидов хрома и узкого температурного интервала деформации. Требования к макроструктуре трубных заготовок - НЛЗ и горячедеформированной выполненной из НЛЗ, регламентированы ГОСТ Р 53932-2010 [6]. Однако соблюдение рекомендаций данного ГОСТа затруднительно из-за специфических особенностей технологии изготовления НЛЗ большого диаметра и пониженных пластических свойств по сравнению с горячедеформированной выполненной из НЛЗ, поэтому зачастую на прокат поступает заготовка с большим отклонением, что приводит к снижению качества труб, производимых в промышленных объемах. Однако, и следовательно, данные о механических свойствах металла, полученные при испытаниях образцов на одноосное растяжение в холодном состоянии, не позволяют объективно оценивать качество исходной НЛЗ, деформируемой в стане винтовой прокатки в горячем состоянии при сложном циклическом напряженно-деформированном состоянии [11, 14, 69].

Требуется принять во внимание учёт влияния следующих факторов:

- высокая температура 1100 – 1150 °С;
- значительные знакопеременные пластические изгибы стенки во входном и выходном конусе очага деформации, общее количество которых может достигать 30;
- большие значения скоростей деформации заготовки в очаге деформации.

При этом длительность цикла деформации стенки гильзы в выходном конусе прошивного стана можно определить по уравнению:

$$\tau_{ц} = \frac{60}{4 \cdot \left(\frac{D_B}{D_3}\right) \cdot n_B \cdot \eta_T} \quad (2.1)$$

где  $D_B$  – диаметр бочки валка, мм;

$D_3$  – диаметр заготовки, мм;

$n_B$  – частота вращения валка, об/мин;

$\eta_T$  – коэффициент тангенциальной скорости, принятый 0,95;

4 – количество циклов знакопеременного пластического изгиба.

С учётом вышеизложенного, в таблице 2.2 приведены результаты расчётов деформационно-скоростных условий при прошивке заготовок на промышленных прошивных станах винтовой прокатки.

Таблица 2.2 – Деформационно-скоростные условия при прошивке заготовок на промышленных прошивных станах

ТПА	Диаметр, мм		Переда- точное отноше- ние	Частота вращения валков, об/мин		Длительность одного оборота заготовки, с	Длительность одного цикла деформации, с
	раб. валков	загото- вки		раб. валков	заготов- ки		
159-426	1200	410	2,93	70	194,63	0,308	0,077
		260	4,62	80	350,77	0,171	0,043
50-200	1100	260	4,23	60	241,15	0,249	0,062
		90	12,22	110	1277,22	0,047	0,012

Таким образом, очевидно, что отсутствует объективность оценки качества металла заготовки по результатам механических испытаний холодных образцов на одноосное растяжение и разрыв, что приводит к необходимости создания, разработке соответствующей методики оценки технологической пластичности слоев заготовки и созданию машины для проведения специальных испытаний образцов на знакопеременный изгиб, которые максимально приближены к реальным процессам винтовой прокатки.

### **Глава 3. Конструкция испытательной машины и методика технологических испытаний образцов на знакопеременный изгиб в горячем состоянии**

#### **3.1 Обоснование к проведению технологических испытаний на знакопеременный изгиб**

В практике металлообработки можно встретить различные нестандартные методы испытаний образцов для определения конкретных параметров производственных процессов [70].

Для оценки технологической пластичности металла при винтовой прокатке обычно используется метод испытаний образцов на прошиваемость, который заключается в прокатке цилиндрических заготовок с их принудительным торможением в стане [8, 58]. Однако этот метод является дорогостоящим и трудоемким, особенно при оценке прошиваемости заготовок большого диаметра, например 300...410 мм. Кроме того, испытание на прошиваемость позволяет оценивать в основном склонность металла к центральному разрушению и прогнозировать вероятность образования внутренних плен при прошивке заготовок в гильзы.

Образование дефектов наружной поверхности гильз в виде плен и трещин в основном обусловлено пластическим изгибом стенки гильзы, сопровождающимся знакопеременными напряжениями и деформациями во входном и выходном конусе очага деформации. Известно, что за один оборот заготовки-гильзы в очаге деформации двухвалкового стана (см. рисунок 3.1) происходит четырехкратный пластический изгиб стенки (4 цикла), в ходе которого стенка гильзы испытывает напряжения сжатия со стороны рабочих валков и линеек, а на поверхности гильзы между валками и линейкой создается менее благоприятная схема напряженного состояния с растягивающими деформациями, приводящая к развитию и образованию дефектов на наружной поверхности.

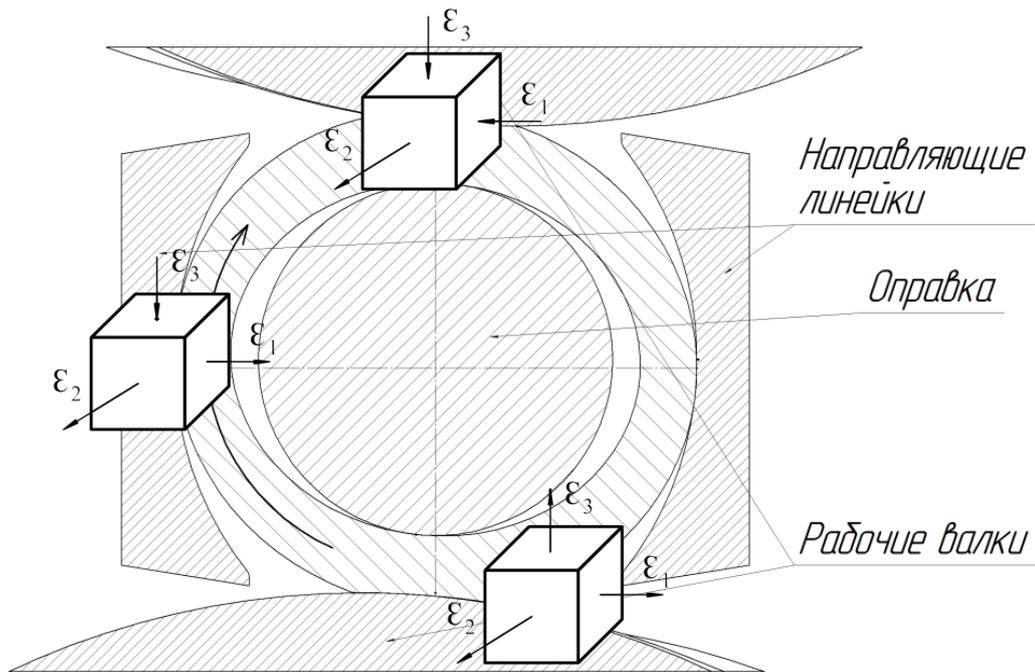


Рисунок 3.1 – Поперечное сечение очага деформации прошивного стана с направляющими линейками на участке раскатки стенки гильзы

Учитывая, что деформирование стенки гильзы при прошивке осуществляется в выходном конусе очага деформации за 4...7 оборотов, общее количество пластических изгибов стенки гильзы может достигать 30. Очевидно, что при недостаточной пластичности металла и наличии даже незначительных дефектов на поверхности исходной заготовки на гильзе будут образовываться трещины и пленки.

Поперечные темплеты, вырезанные из заторможенной в прошивном стане заготовки-гильзы [71] отражают тот факт, что наружные слои металла плавно изгибаются в зазоре между валком и направляющей линейкой на угол 40...90° (рисунок 3.2).

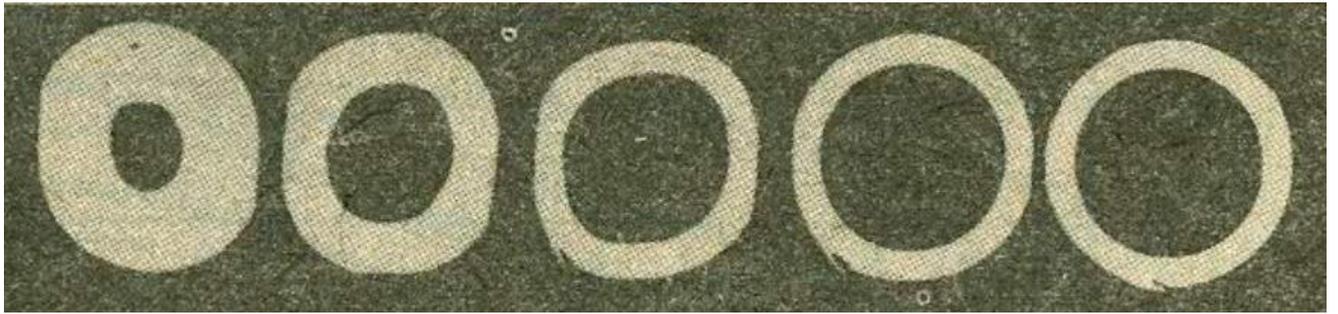


Рисунок 3.2 – Фотография поперечных темплетов гильзы принудительно остановленной во время прошивки

Очевидно, пониженная пластичность [72, 73] металла НЛЗ по сравнению с горячекатаным металлом требует проведения специальных технологических испытаний, которые были бы максимально приближены к условиям реального процесса винтовой прокатки, разработке соответствующей методики оценки технологической пластичности слоев заготовки и созданию машины для испытания образцов на знакопеременный изгиб в горячем состоянии, принцип работы которой основан на сопоставлении углов изгиба наружных слоёв металла с углом изгиба бруса, один конец которого закреплен (рисунок 3.3 а, б).

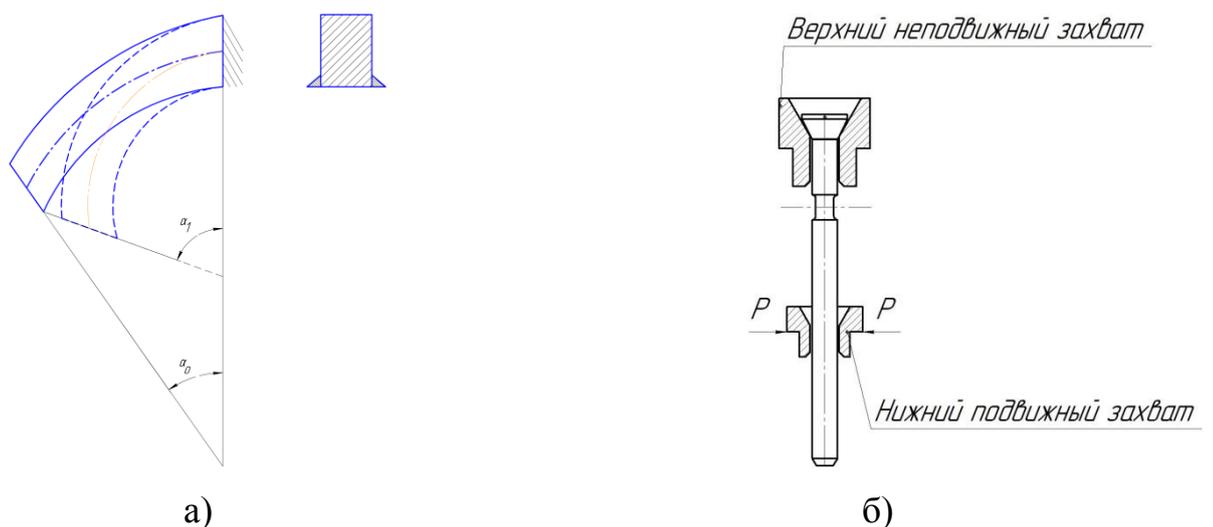


Рисунок 3.3 – Схема изгиба: кривого бруса (а), образца (б)

### 3.2 Конструкция и принцип работы испытательной машины

Для реализации процесса нагружения образцов знакопеременным пластическим изгибом разработана конструкция испытательной машины [74, 75], сущность которой поясняется чертежами на рисунке 3.4 и данными в таблице 3.1.

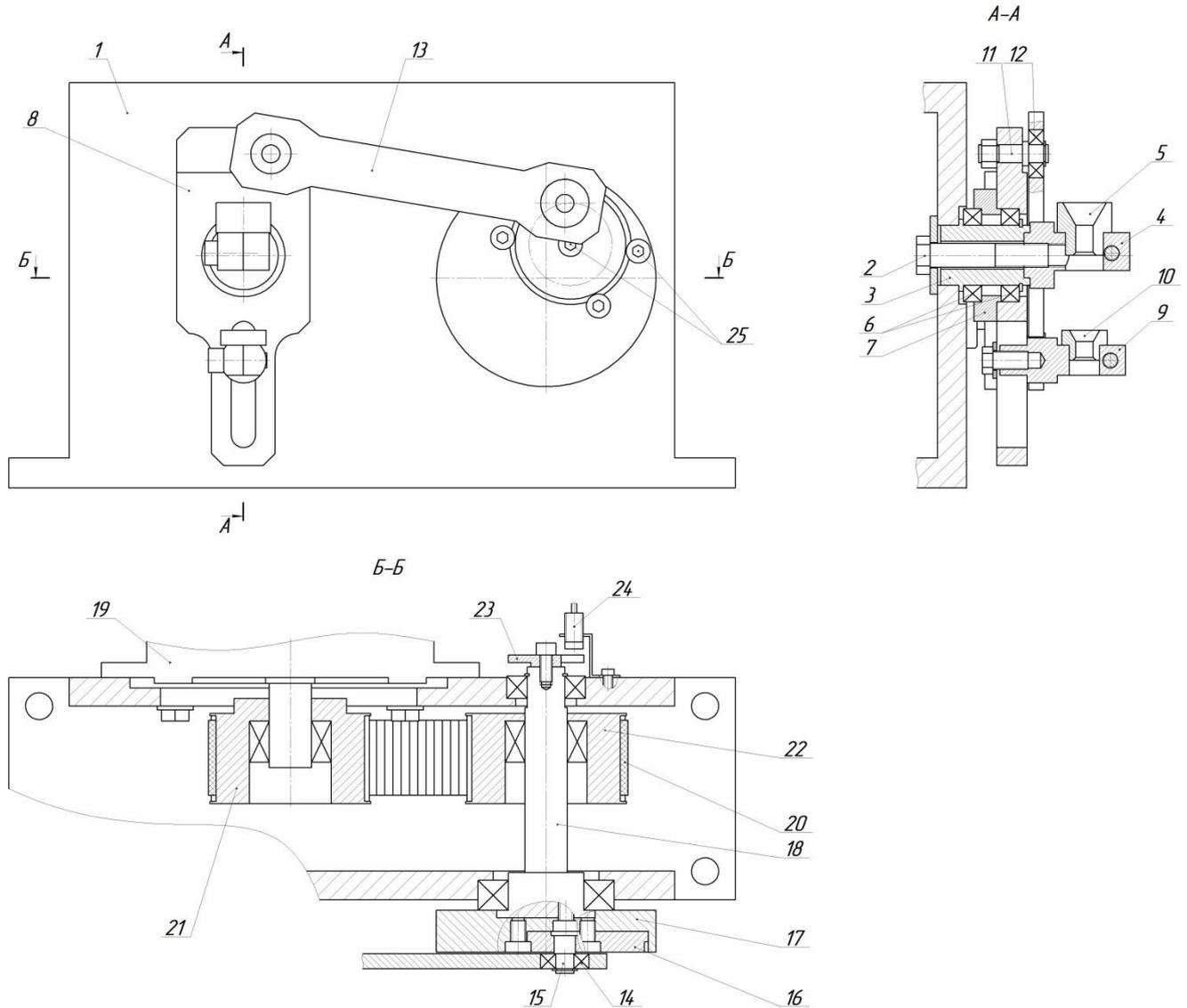


Рисунок 3.4 – Схема испытательной машины:

1 – корпус; 2 – болт; 3 – цилиндрическая втулка; 4 – верхний неподвижный захват; 5 – верхняя воронка; 6 – подшипники; 7 – кольцо; 8 – рычаг; 9 – нижний подвижный захват; 10 – нижняя направляющая воронка; 11 – палец; 12 – подшипники; 13 – шатун; 14 – подшипник; 15 – палец; 16 – диск; 17 – шкив; 18 – вал; 19 – электродвигатель; 20 – ремень; 21 – шкив; 22 – шкив; 23 – фигурная шайба; 24 – бесконтактный (индуктивный) датчик; 25 – винт.

Таблица 3.1 – Краткая техническая характеристика испытательной машины

Параметр	Значение
Мощность привода электродвигателя 100L4y2, кВт	4
Частота вращения вала электродвигателя, об/сек	от 0 до 30
Тип привода	ременный
Тип механизма качания	кривошипно-шатунный
Передаточное отношение	1
Диаметр испытуемых образцов, мм	от 6 до 10
Длина испытуемых образцов, мм	от 60 до 160
Угол пластического изгиба образца, градусов	не более $\pm 52$
Скорость одного цикла деформации, $\text{с}^{-1}$	от 0 до 0,03

Машина для испытания цилиндрических образцов на знакопеременный изгиб в горячем состоянии содержит корпус 1, в наружной части которого закреплен болт 2 с установленными на нем цилиндрической втулкой 3 и верхним неподвижным захватом 4 с направляющей воронкой 5 для крепления верхнего конца образца.

На цилиндрической втулке 3 через подшипники 6 и кольцо 7 закреплен рычаг 8, имеющий в нижней части паз с установленным в нем с возможностью вертикального перемещения нижним подвижным захватом 9 с нижней направляющей воронкой 10 для фиксации нижнего конца образца, а в верхней части – палец 11, на котором через подшипник 12 установлен верхний конец шатуна 13, передающего качательное движение рычагу 8. Нижний конец шатуна 13 закреплен с подшипником 14 на пальце 15 установленном в диске 16.

Диск 16 смонтирован в гнезде шкива 17 с возможностью фиксированного поворота в нем и изменения величины эксцентриситета оси пальца 15 относительно оси вала 18 вращения шкива 17 для задания амплитуды качания рычага 8 (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 – Вид спереди испытательной машины

Вращение шкива 17 осуществляется от электродвигателя 19 посредством размещенной в корпусе 1 ременной передачи 20, передающей вращение со шкива 21 на шкив 22, смонтированном на валу 18 (см. рисунки 3.4, 3.6).



Рисунок 3.6 – Вид сверху испытательной машины

Привод шкива 21 и направление его вращения осуществляется от вала асинхронного электродвигателя, а частота вращения регулируется за счет изменения частоты электрического напряжения от частотного преобразователя. Электропитание установки трехфазное с напряжением в сети 380 В.

На противоположном конце вала 18 установлена фигурная шайба 23 (рисунок 3.7), работающая в паре с бесконтактным (индуктивным) датчиком 24, осуществляющим контроль числа выполненных оборотов/циклов.



Рисунок 3.7 – Фигурная шайба с бесконтактным датчиком

Испытательная машина укомплектована камерной нагревательной печью с силитовыми нагревателями. Для защиты от движущихся частей машины и обломков горячих образцов предусмотрены быстросъемные защитные кожухи (рисунок 3.8).



Рисунок 3.8 – Внешний вид испытательной машины с защитными кожухами

### 3.3 Методика проведения технологических испытаний образцов на знакопеременный изгиб

Перед началом работы осуществляется установка соосности отверстий (см. рисунок 3.4) верхней 5 и нижней 10 воронок путем вращения шкива 22. При этом рычаг 8 принудительно выводится в вертикальное положение. Установка угла отклонения рычага 8 в диапазоне от 0 до 104 ° осуществляется путем ослабления винтов 25 и поворота диска 16 с нанесенной на него шкалой относительно контрольной риски на шкиве 17. Для испытания образцов различных диаметров (10; 8; 6 мм) предусмотрена возможность замены верхней 5 и нижней 10 воронок в верхнем 4 и нижнем 9 захватах, соответственно. Установка требуемой частоты, направления вращения и количества оборотов электродвигателя производится и регистрируется при помощи электронных табло на электрошкафе (на рисунках не показаны).

Цилиндрический образец нагретый до 1100 °С загружают в вертикальном положении в отверстия, выполненные в верхней 5 и нижней 10 воронках, закрепленных в верхнем 4 и нижнем 9 захватах, соответственно (см. рисунок 3.9), затем включают пуск.

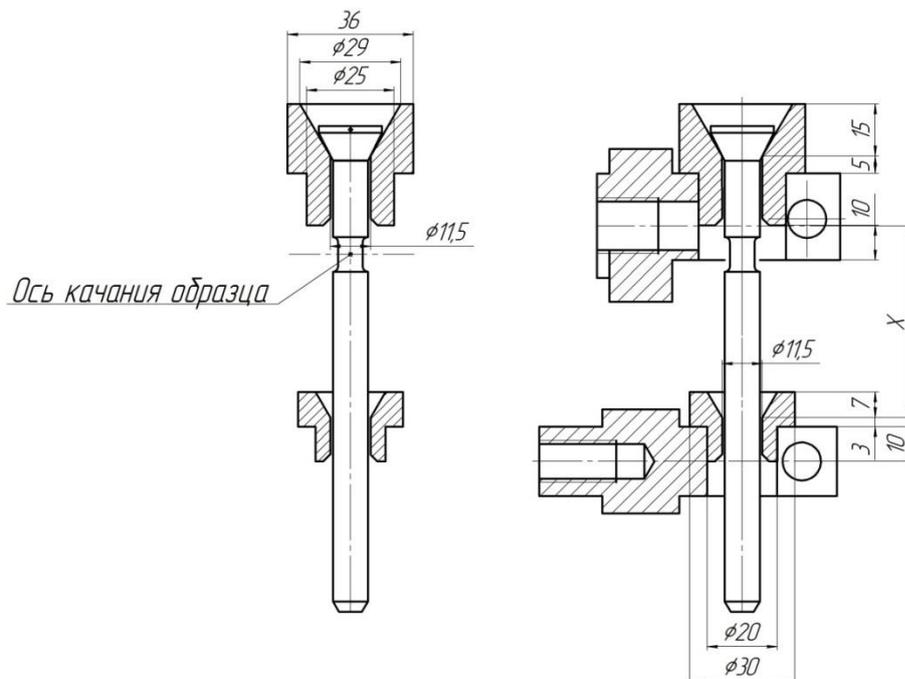


Рисунок 3.9 – Эскизы образца, установленного в захваты

Во время испытания верхний захват неподвижен, а нижний 9 отклоняется относительно вертикальной оси на угол не более  $\pm 52^\circ$ , совершая пластический изгиб образца. Крутящий момент от электродвигателя 19 посредством ременной передачи 20 передается от шкива 21 к шкиву 22, насаженному на вал 18. Вращение вала 18 передается диску 16 установленному в расточке шкива 17. За счет эксцентриситета оси пальца 15 по отношению к оси вала 18 шатун 13 передает качательное движение рычагу 8, который осуществляет знакопеременный изгиб образца (см. рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Фото испытательной машины в процессе работы

Бесконтактный датчик 24, отсчитав заданное количество оборотов фигурной шайбы 23, подает сигнал счетчику импульсов, связанному с частотным преобразователем, для выключения электродвигателя 19 и остановки кривошипно-шатунного механизма. После установки рычага 8 в вертикальное положение, деформированный образец извлекается из верхней 5 и нижней 10 воронок - цикл испытаний завершается. Перед началом нового цикла испытаний, рычаг 8 принудительно выводится в вертикальное положение.

На основании расчетных и экспериментальных данных по определению требуемого усилия для изгиба стального образца, нагретого до температуры  $1150^\circ\text{C}$ , установлено, что при мощности электродвигателя привода равной 4 кВт на рычаге 8 (см. рисунок 3.4) создается крутящий момент  $21 \text{ Н}\cdot\text{м}$  и усилие  $F$  от 9 до 320 Н на нижнем подвижном захвате в зависимости от его положения в рычаге 8.

Это усилие позволяет изгибать образцы диаметром от 6 до 10 мм из различных сталей и сплавов в горячем и холодном состоянии. При этом в шейке образца возникают напряжения, которые можно определить для образца с круглым поперечным сечением по формуле:

$$\sigma_{\text{изг.}} = \frac{F \cdot l}{0,2 \cdot d^3} \quad (3.1)$$

где  $d$  – диаметр поперечного сечения образца, мм;

$l$  – плечо изгиба образца, мм.

Величина отклонения (изгиба) оси образца от исходного положения может составлять  $\pm 52^\circ$  с частотой до 1800 оборотов в минуту, что максимально приближено к условиям протекающим в процессе винтовой прошивки.

Таким образом, испытания образцов в разработанной машине на знакопеременный пластический изгиб можно проводить по различным вариантам:

- в горячем и холодном состоянии;
- с изгибом до разрушения;
- с изгибом на заданное количество циклов.

После испытаний и охлаждения измеряются геометрические параметры образцов для определения относительного удлинения, относительного сужения шейки, оценки формы шейки и др.

## Глава 4. Исследование технологической пластичности стальных образцов на знакопеременный изгиб в горячем состоянии

### 4.1 Выбор геометрических размеров образцов

Одним из этапов исследования явилось определение формы испытуемых образцов. Моделированию в среде QForm на знакопеременный изгиб подвергались образцы трех видов: с лыской, с квадратной и круглой базами, проточками меньшего поперечного сечения, чем основное тело образца (см. рисунок 4.1 а, б, в).

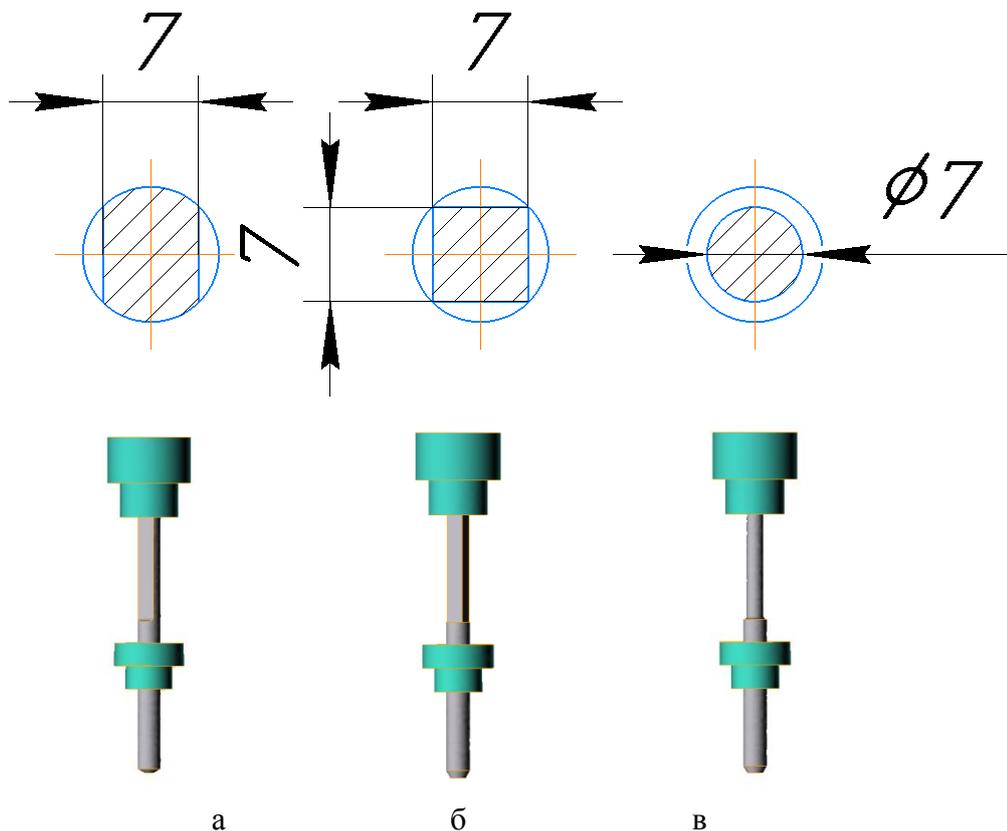


Рисунок 4.1 – Внешний вид исходных образцов с различными базами:

а – с лыской; б – с квадратной; в – с круглой

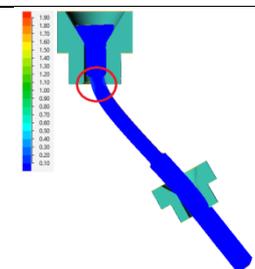
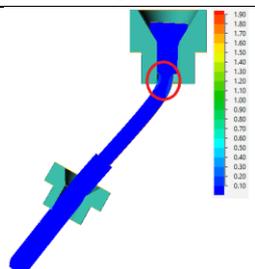
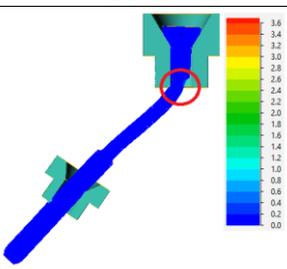
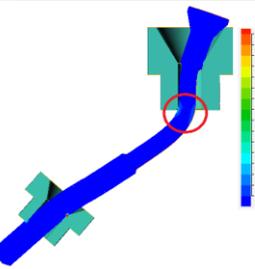
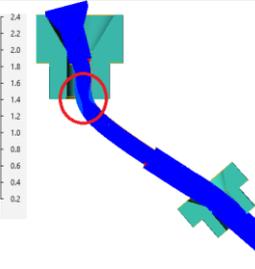
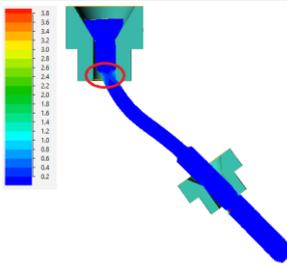
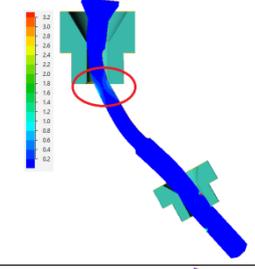
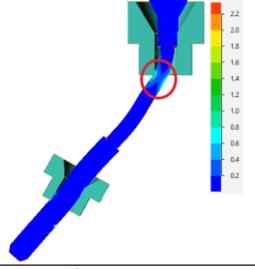
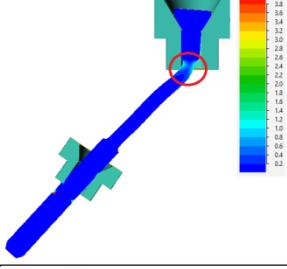
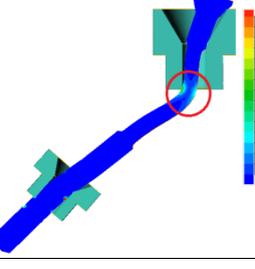
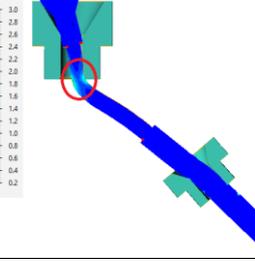
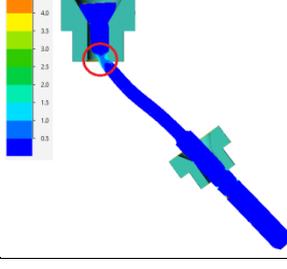
Исходные данные к эксперименту над моделями приведены в таблице 4.1

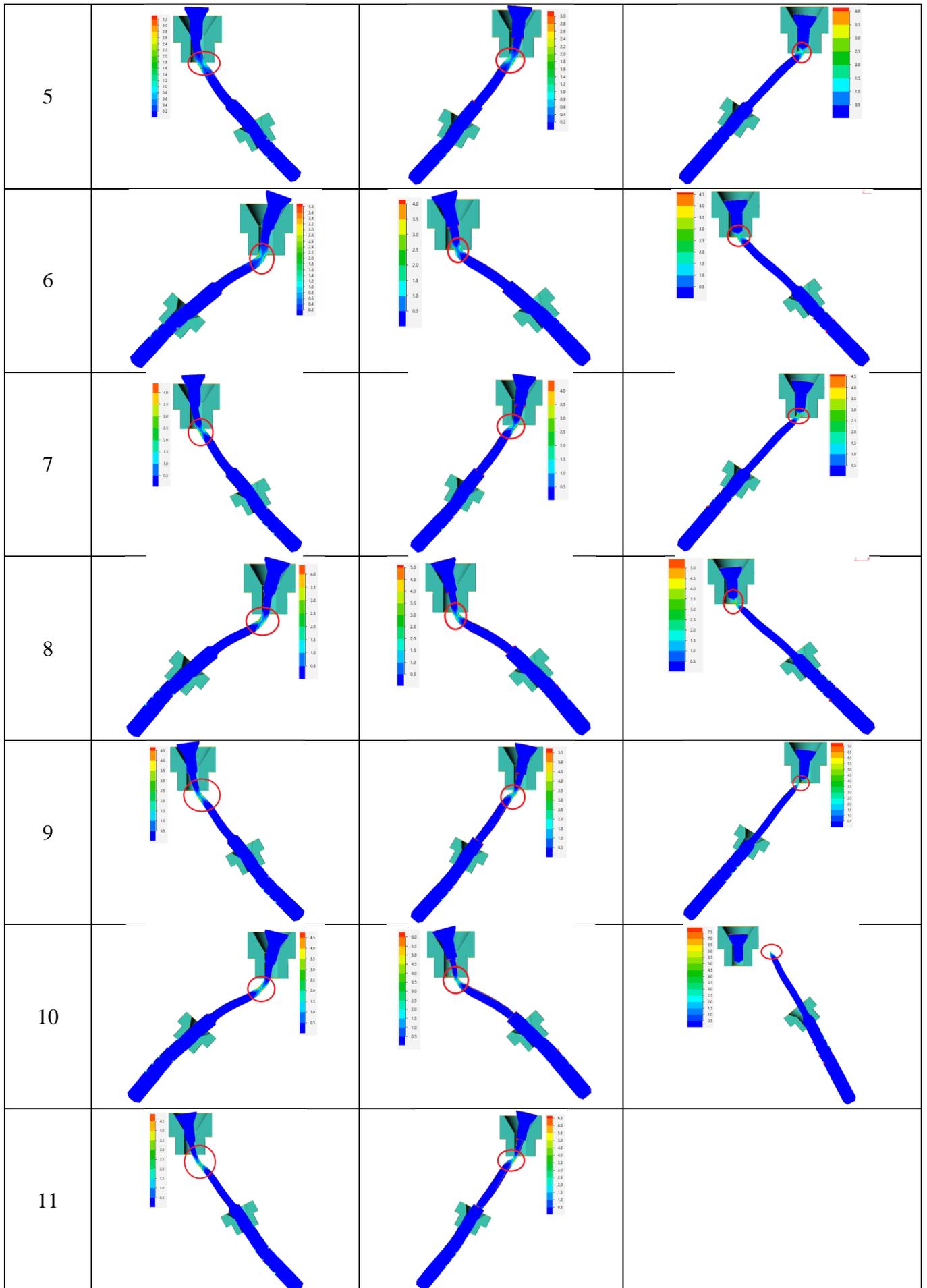
Таблица 4.1 – Исходные данные для модели

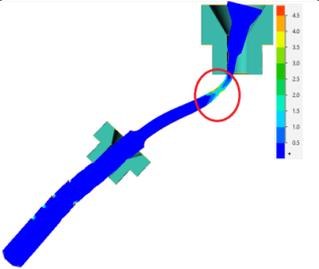
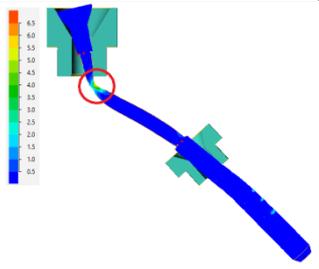
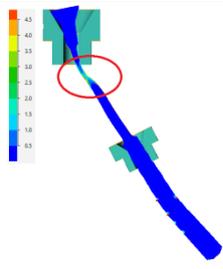
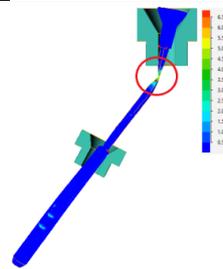
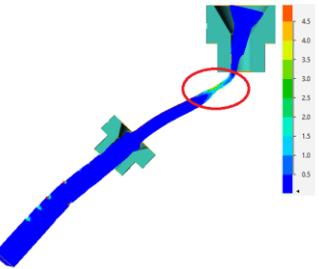
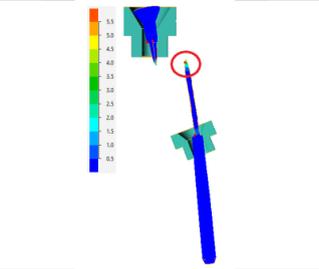
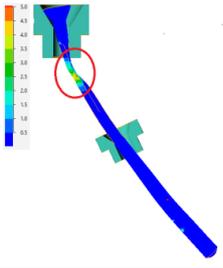
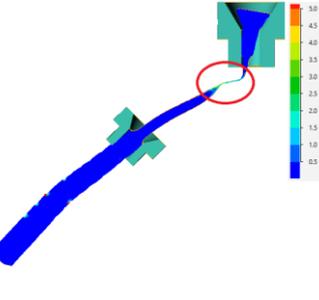
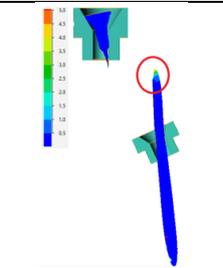
№	Характеристика	Значение
1	Температура заготовки, °С	1100
2	Материал заготовки	Сталь 10
3	Материал инструмента	H12
4	Угол изгиба, градусов	70
5	Частота вращения, об/сек	23

Изменение формы образца, а также интенсивности пластической деформации в процессе изгибов показаны в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Интенсивность пластической деформации образцов с различным поперечным сечением

№ изгиба	Форма поперечного сечения исходных образцов		
	с лыской	квадратная	круглая
1			
2			
3			
4			



12			
13			
14			
15			
16			
17			

Результаты экспериментов с моделями, приведенные в таблице 4.2, показывают, что процесс максимально стабильно протекает в случае использования цилиндрического образца с круглой базой, а именно – его верхняя

часть удерживается в верхней воронке. В этой связи разработан эскиз предварительного варианта образца (рисунок 4.2), а сами образцы изготовлены из прутка стали 45.

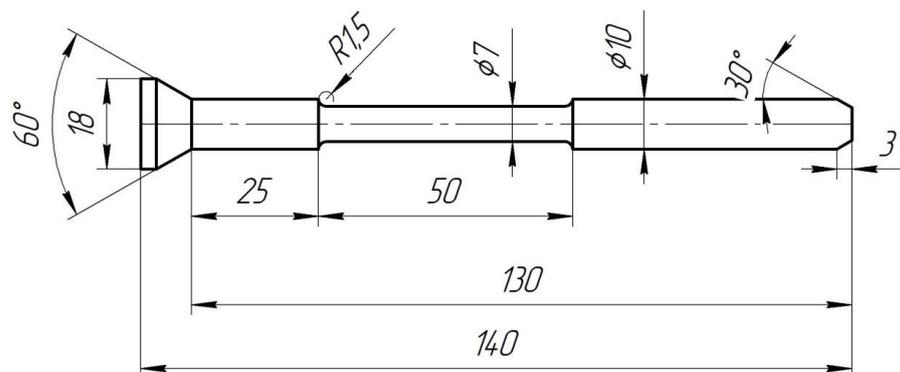


Рисунок 4.2 – Эскиз предварительного варианта образца с базой  $\varnothing 7$  мм длиной 50 мм

Испытания проведены при режимах: суммарный угол отклонения нижнего захвата –  $75^\circ$ ; частота вращения двигателя - 23 об/сек; количество циклов – 20, 30, 40, 50, 60; температура  $1100^\circ\text{C}$ . Внешний вид испытанных образцов представлен на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – Внешний вид образцов из стали 45 после испытаний

Проведенные испытания позволили установить, что шейка, отчетливо выраженная уже на 40 циклах, значительно смещена к верхней части образца.

Очередные испытания, связанные с выбором формы образцов, проведены с аналогичной частотой вращения двигателя, при пониженном угле на  $15^\circ$

отклонения нижнего захвата, количестве циклов – 10, 20, 30, 40. Внешний вид испытанных образцов представлен на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Внешний вид образцов из стали 45 после испытаний

Данные испытания позволили выявить значительное искривление базовой части образца, что создает затруднения при определении её удлинения.

Последующая доработка образца заключалась в уменьшении длины базовой части на 40 мм и её смещении к верхней части образца на 3 мм, но общая длина и диаметральные размеры оставлены без изменений (рисунок 4.5).

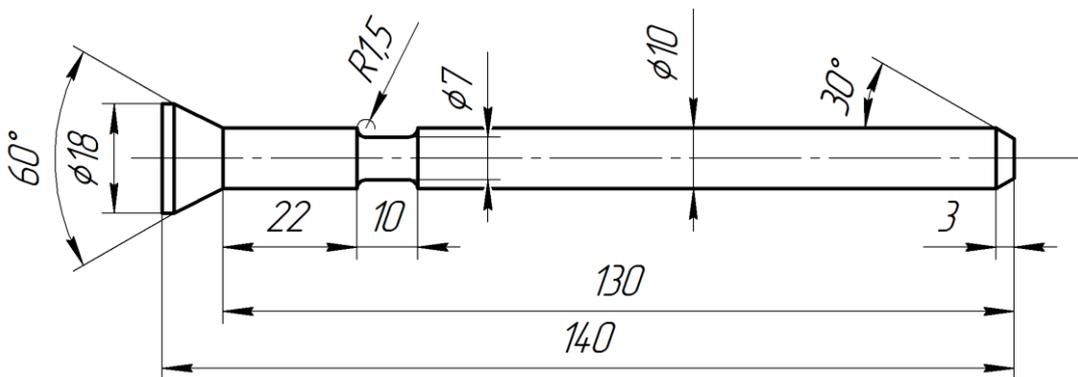


Рисунок 4.5 – Эскиз варианта образца с базой  $\phi 7$  мм длиной 10 мм

#### 4.2 Исследование технологической пластичности образцов из стали 45, 09Г2С, 12Х18Н10Т и моделирование процесса знакопеременного изгиба

Для изготовления образцов применяли горячекатаные прутки из сталей 45, 09Г2С и 12Х18Н10Т. Для сравнения результатов испытаний разных материалов, эксперимент был проведен при одних и тех же параметрах для указанных марок стали. Суммарный угол отклонения нижнего захвата составил  $75^\circ$ , а частота вращения двигателя - 23 об/сек. Для каждой марки стали проведено несколько испытаний с различным количеством циклов. После остывания заготовок были измерены их геометрические размеры. На основании измерений был проведен расчет относительного удлинения базы при изгибе.

Для заготовок из стали 45 было проведено 4 испытания с постепенным увеличением количества циклов до разрушения образца. Общий вид образцов после испытаний представлен на рисунке 4.6.



Рисунок 4.6 – Внешний вид образцов из стали 45 после эксперимента

Результаты измерений представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты испытаний образцов из стали 45 (заготовка - пруток)

Количество циклов, шт	Результат	Длина базы после испытания, мм	Относительное удлинение базы, %
20	Шейка	13,0	30
30	Шейка	14,5	45
40	Шейка	16,5	65
46	Разрушение	17,5	75

В процессе знакопеременного изгиба наибольшей деформации подвергается именно «база» образца. С увеличением количества циклов происходит удлинение «базы», а также ее утонение с образованием шейки. При этом получаемое сечение шейки имеет овальную форму вследствие преимущественной деформации в одном направлении.

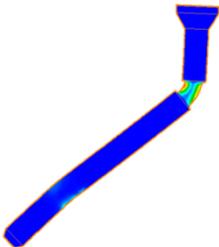
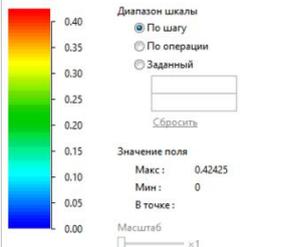
Для более детального изучения поведения металла при изгибе была создана модель процесса и проведено моделирование процесса с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в программе QForm. В качестве основных элементов модели взяты верхний и нижний захват и непосредственно образец. Исходные данные для моделирования представлены в таблице 4.4.

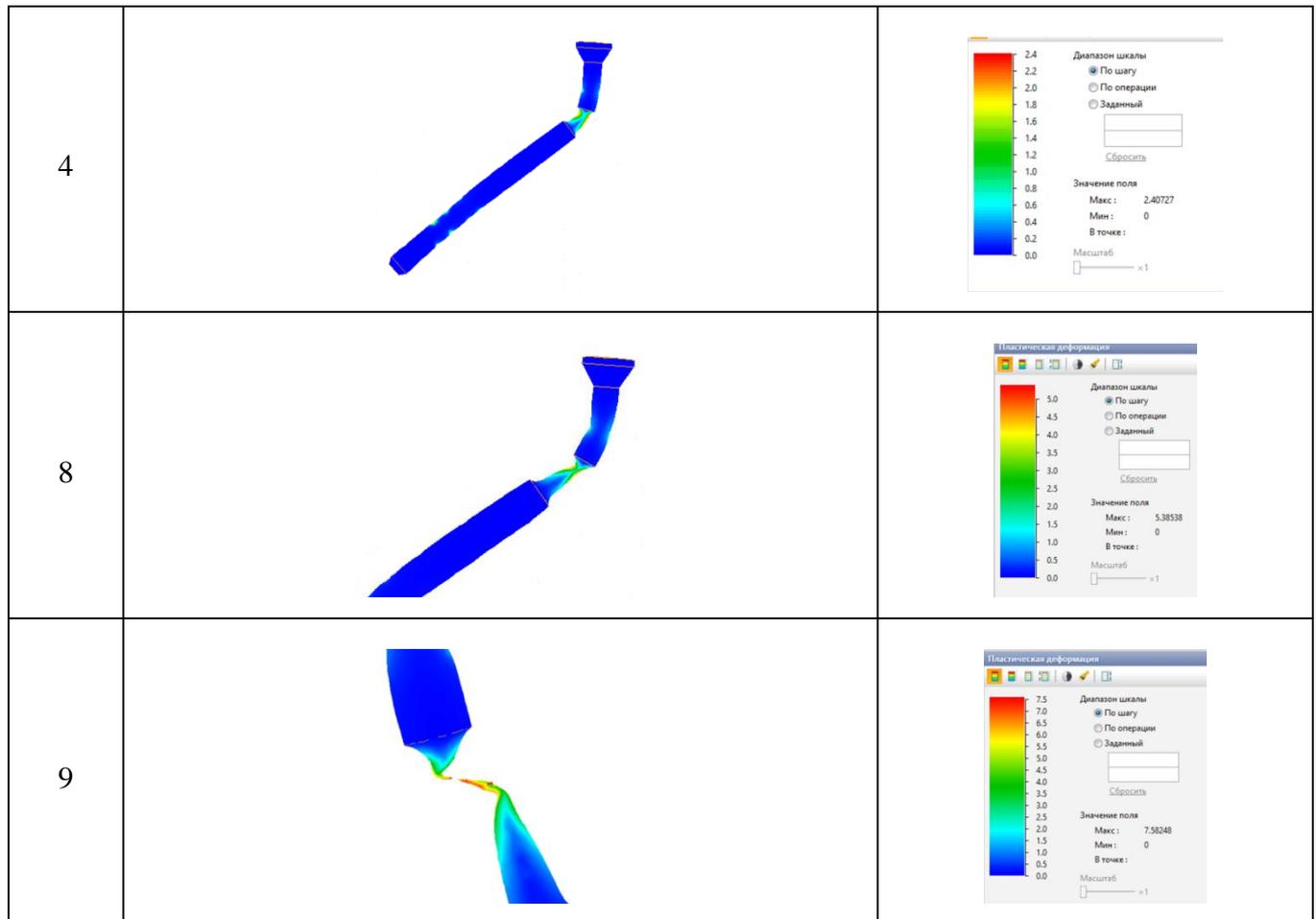
Таблица 4.4 – Исходные данные для моделирования знакопеременного пластического изгиба

№	Характеристика	Значение
1	Температура образца, °С	1100
2	Материал образца	Сталь 45
3	Материал инструмента	H12
4	Угол изгиба, градусов	75
5	Частота вращения, об/сек	23

Изменение формы образца, а также интенсивности пластической деформации в процессе изгиба показаны в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Изменение формы и интенсивности пластической деформации образцов из стали 45

№ изгиба	Форма образца	Пластическая деформация
1		



При моделировании процесса знакопеременного изгиба разрушение образца произошло уже на 10 цикле, в то время как в реальных условиях при тех же настройках испытательной машины количество циклов до разрушения образца из стали 45 превышает 40. Помимо этого, были измерены геометрические размеры образца в процессе изгиба (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Изменение геометрии образца в процессе изгиба

Шаг	Длина образца, мм	Длина базы, мм	Относительное удлинение базы, %	D шейки, мм x мм
0	140,00	10	-	7
1	-	-	-	-
2	143,33	10,53	5	6,49
3	146,75	10,86	9	6,13
4	151,66	11,78	18	5,58
5	156,95	12,55	26	5,03
6	161,63	13,58	36	4,6 x 4,5
7	166,32	14,35	44	4,0 x 3,98
8	170,68	15,35	54	3,58 x 3,39
9	175,11	17,24	72	2,65 x 2,67
10	183,81	26,01	160	0,4 x 0,7

Полученные данные не соответствуют экспериментальным, следовательно, созданная модель требует уточнения. Для заготовок из марки 09Г2С проведено 3 испытания с постепенным увеличением количества циклов до разрушения образца. Общий вид образцов после испытания представлен на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Внешний вид образцов из стали 09Г2С после эксперимента

Результаты измерений представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Результаты испытаний образцов из стали 09Г2С (заготовка - пруток)

Количество циклов, шт	Результат	Длина образца, мм	Длина базы, мм	Относительное удлинение базы, %	Относительное сужение, %
31	Шейка	145	14,5	45	47,4
40	Шейка	147	17,0	70	72,1
44	Разрушение	147,3	17,6	76	75,7

Результаты испытаний образцов из стали 09Г2С схожи с результатами для стали 45. Возможны некоторые различия, которые скорее всего связаны с погрешностью измерения геометрических размеров образцов после испытания. При увеличении количества циклов также наблюдается деформация «базы» образца. Удлинение образца происходит за счет удлинения «базы».

Результаты испытаний образцов из стали марки 12Х18Н10Т явились не такими однозначными. Разрыв образца произошел уже на втором испытании. Однако, для понимания количества циклов, необходимых для разрыва, было проведено еще одно дополнительное испытание. Общий вид образцов после испытания представлен на рисунке 4.8.

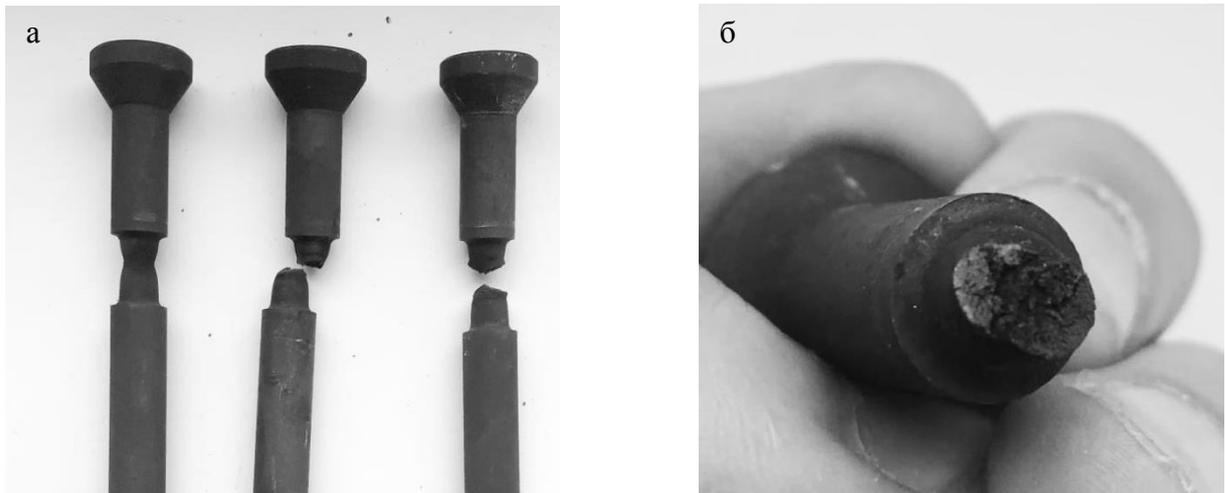


Рисунок 4.8 – Общий вид образцов из стали 12X18H10T после эксперимента (а); место разрыва образца (б)

Результаты измерений представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты испытаний образцов из стали 12X18H10T (заготовка - пруток)

Количество циклов, шт	Результат	Длина образца, мм	Длина базы, мм	Относительное удлинение базы, %	Относительное сужение, %
20	Шейка	141,5	12,6	26	21,4
24	Разрушение	143,5	13,2	32	41,4
30	Разрушение	144,7	13,7	37	45,7

Образцы из стали марки 12X18H10T показали меньшую пластичность по сравнению с низкоуглеродистыми сталями.

#### 4.3 Исследование технологической пластичности образцов из металла НЛЗ

Для проведения опытов, из отобранных темплетов НЛЗ изготовлены специальные заготовки для изготовления образцов. Схемы расположения заготовок сталей 20 и 09Г2С в сечении диаметром 410 мм и марки стали 34CrMo4 (российские аналоги: машиностроительная сталь 30ХМА, трубная сталь 32ХГА) сечение диаметром 360 мм представлены на рисунке 4.9.

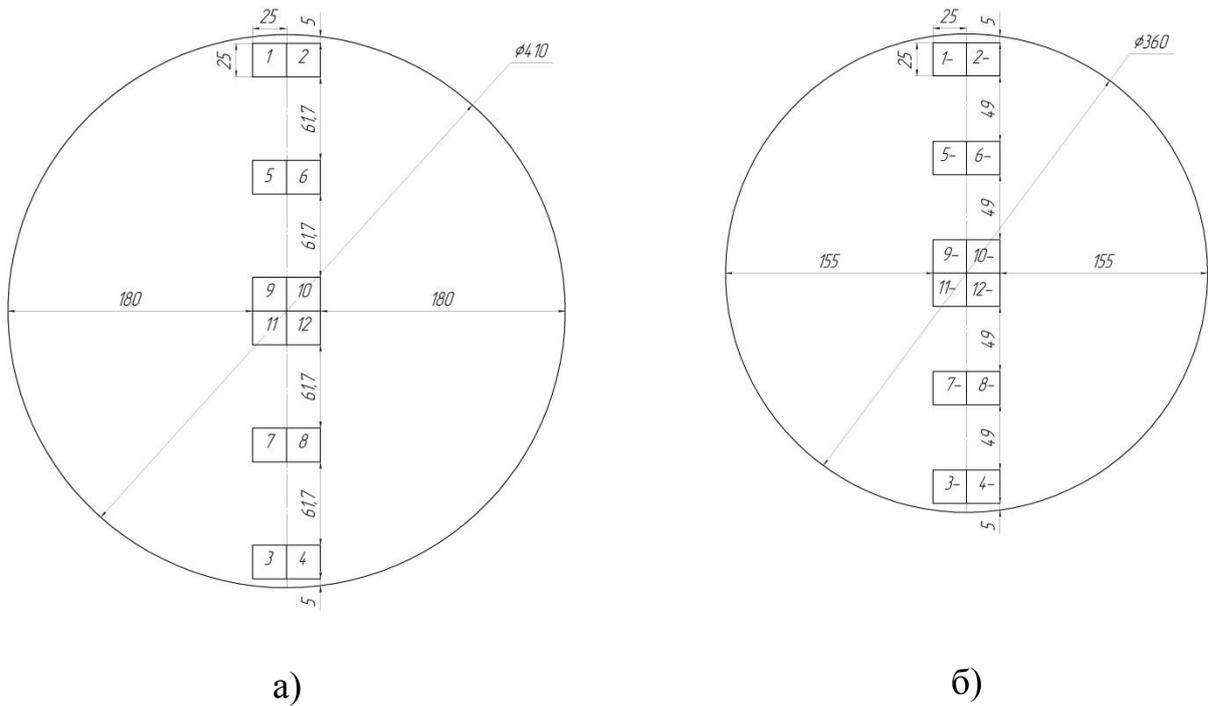


Рисунок 4.9 – Схема расположения заготовок образцов в сечении заготовки Ø410 мм (а) и Ø360 мм (б)

Для того чтобы сравнить результаты испытаний разных материалов, эксперимент был проведен при одних и тех же параметрах: суммарный угол отклонения нижнего захвата составил  $75^\circ$ , частота вращения вала электродвигателя - 23 об/сек; температура 1100 °С. Для каждой марки стали проведено несколько испытаний с различным количеством циклов. После охлаждения образцов измерены их геометрические размеры для определения удлинения базы, сужения в шейке и её фотографирование. Результаты испытаний образцов из стали 20 представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Результаты испытаний образцов из стали 20 (заготовка – НЛЗ Ø410 мм)

№ образца	Расположение образца в НЛЗ	Количество циклов, шт	Относительное удлинение базы, %	Относительное сужение, %	Результат	Внешний вид базы
4	Поверхностные слои	16	24,0	25,7	шейка	

1	Поверхностные слои	20	31,0	28,6	шейка	
2	Поверхностные слои	30	49,0	54,6	шейка	
3	Поверхностные слои	40	65,0	62,5	разруш.	
8	середина радиуса	16	29,0	25,0	шейка	
5	середина радиуса	20	33,0	33,2	шейка	
6	середина радиуса	30	44,5	51,8	шейка	
7	середина радиуса	40	70,5	73,2	шейка	
12	центр	16	22,0	26,4	шейка	
9	центр	20	30,0	28,6	шейка	

10	центр	30	39,5	41,1	разруш.	
11	центр	40	61,0	67,5	разруш.	

Как видно из приведенных в таблице 4.9 данных, наибольшая пластичность и отсутствие случаев разрушений зафиксировано на образцах, отобранных из середины радиуса темплета. Наименьшую пластичность до разрушения и наибольшее число случаев разрушения зафиксировано на образцах, вырезанных из центральной части НЛЗ с присущими им дефектами в виде несплошности металла, явившимися концентраторами разрушений.

Результаты испытаний образцов из стали 09Г2С представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Результаты испытаний образцов из стали 09Г2С (заготовка – НЛЗ Ø410 мм)

№ образца	Расположение образца в НЛЗ	Количество циклов, шт	Относительное удлинение базы, %	Относительное сужение, %	Результат	Внешний вид базы
1	Поверхностные слои	16	24,5	27,1	шейка	
2	Поверхностные слои	20	26,5	31,8	шейка	
3	Поверхностные слои	30	41,5	62,5	шейка	

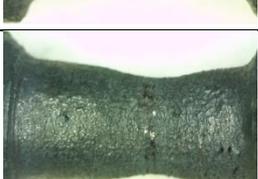
4	Поверхностные слои	40	63,5	65,7	разруш.	
5	середина радиуса	16	14,5	27,9	шейка	
6	середина радиуса	20	28,5	33,2	шейка	
7	середина радиуса	30	43,5	57,5	шейка	
8	середина радиуса	40	65,5	70,7	шейка	
9	центр	16	23,0	27,9	шейка	
10	центр	20	31,0	42,5	шейка	
11	центр	30	40,5	53,2	шейка	
12	центр	40	65,0	68,6	разруш.	

Для образцов из центральной части НЛЗ, аналогично стали 20 с присущими дефектами несплошности металла, установлен единичный случай полного

разрушения. Наибольшая пластичность и отсутствие случаев разрушений характерны для образцов, вырезанных из середины радиуса темплета. Для образцов изготовленных из поверхностных слоёв темплета установлен единичный случай полного разрушения.

Результаты испытаний образцов из стали 34CrMo4 представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Результаты испытаний образцов из стали 34CrMo4 (заготовка – НЛЗ Ø360 мм)

№ образца	Расположение образца в НЛЗ	Количество циклов, шт	Относительное удлинение базы, %	Относительное сужение, %	Результат	Внешний вид базы
1	Поверхностные слои	16	26,5	24,3	шейка	
2	Поверхностные слои	20	29,5	28,9	шейка	
3	Поверхностные слои	30	41,5	53,2	шейка	
4	Поверхностные слои	40	52,5	56,4	разруш.	
5	середина радиуса	16	24,0	21,4	шейка	
6	середина радиуса	20	33,0	27,1	шейка	

7	середина радиуса	30	39,0	44,3	шейка	
8	середина радиуса	40	58,5	66,8	шейка	
9	центр	16	24,5	23,9	шейка	
10	центр	20	25,0	31,4	шейка	
11	центр	30	43,0	49,3	шейка	
12	центр	40	52,5	63,6	разруш.	

Для образцов, отобранных из центральной части НЛЗ стали 34CrMo4, с присущими дефектами несплошности металла, установлен единственный случай полного разрушения. Для образцов изготовленных из поверхностных слоёв темплета установлен единственный случай полного разрушения. Наибольшая пластичность и отсутствие случаев разрушений соответствует образцам, вырезанным из середины радиуса темплета.

Для изучения закономерностей влияния количества циклов на изменение пластических свойств после испытаний каждой марки стали, детальному исследованию подвергали базовую часть образцов, отобранных из поверхностных слоёв (см. рисунок 4.10 а, б), середины радиуса (см. рисунок 4.11 а, б) и центра НЛЗ (см. рисунок 4.12 а, б), на которых зеленым цветом показаны значения,

полученные для стали 09Г2С, синим – для стали 20 и красным – для стали 34CrMo4.

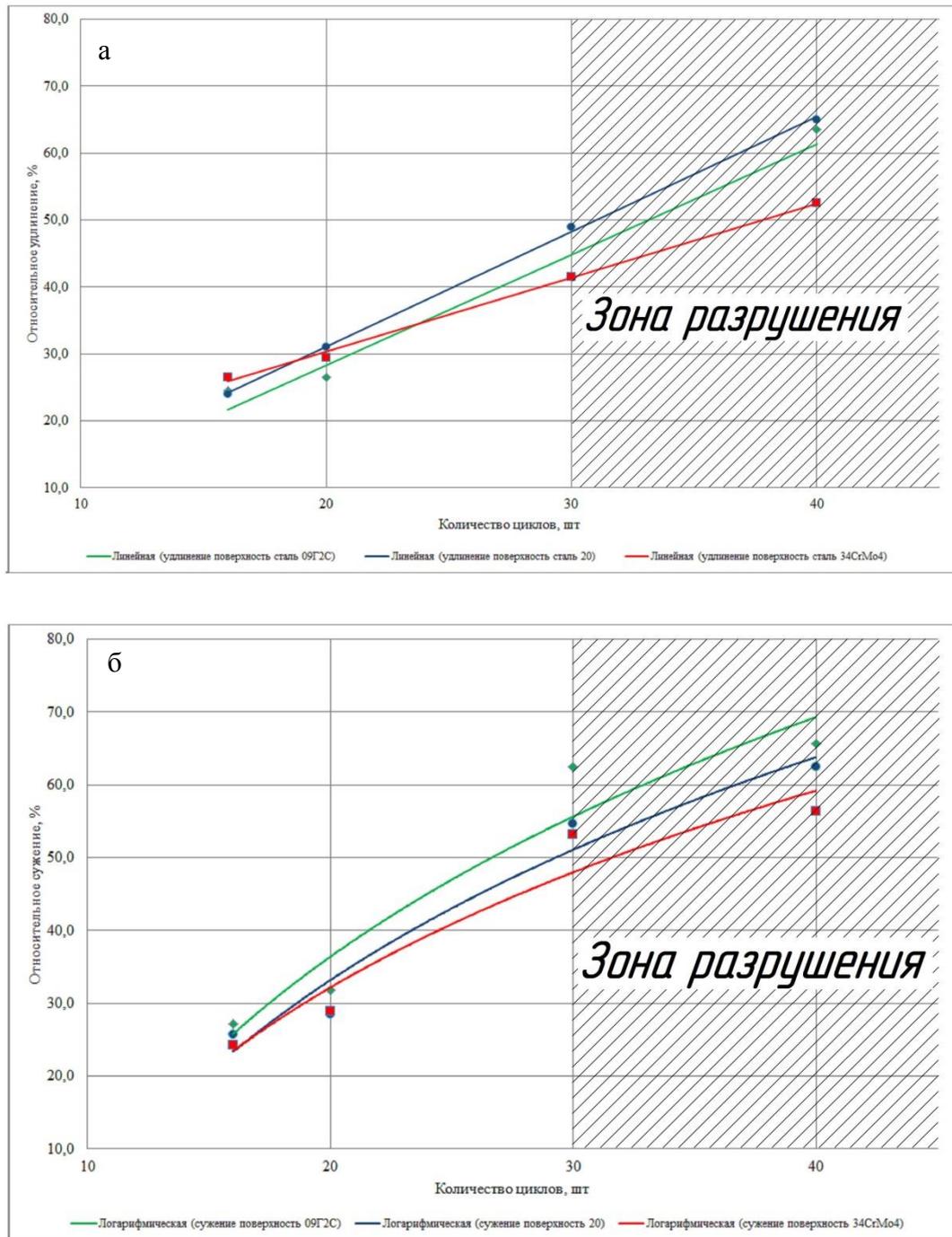


Рисунок 4.10 – Зависимость пластических свойств образцов, вырезанных из поверхностных слоёв НЛЗ: а – относительное удлинение; б – относительное сужение, от количества циклов испытаний

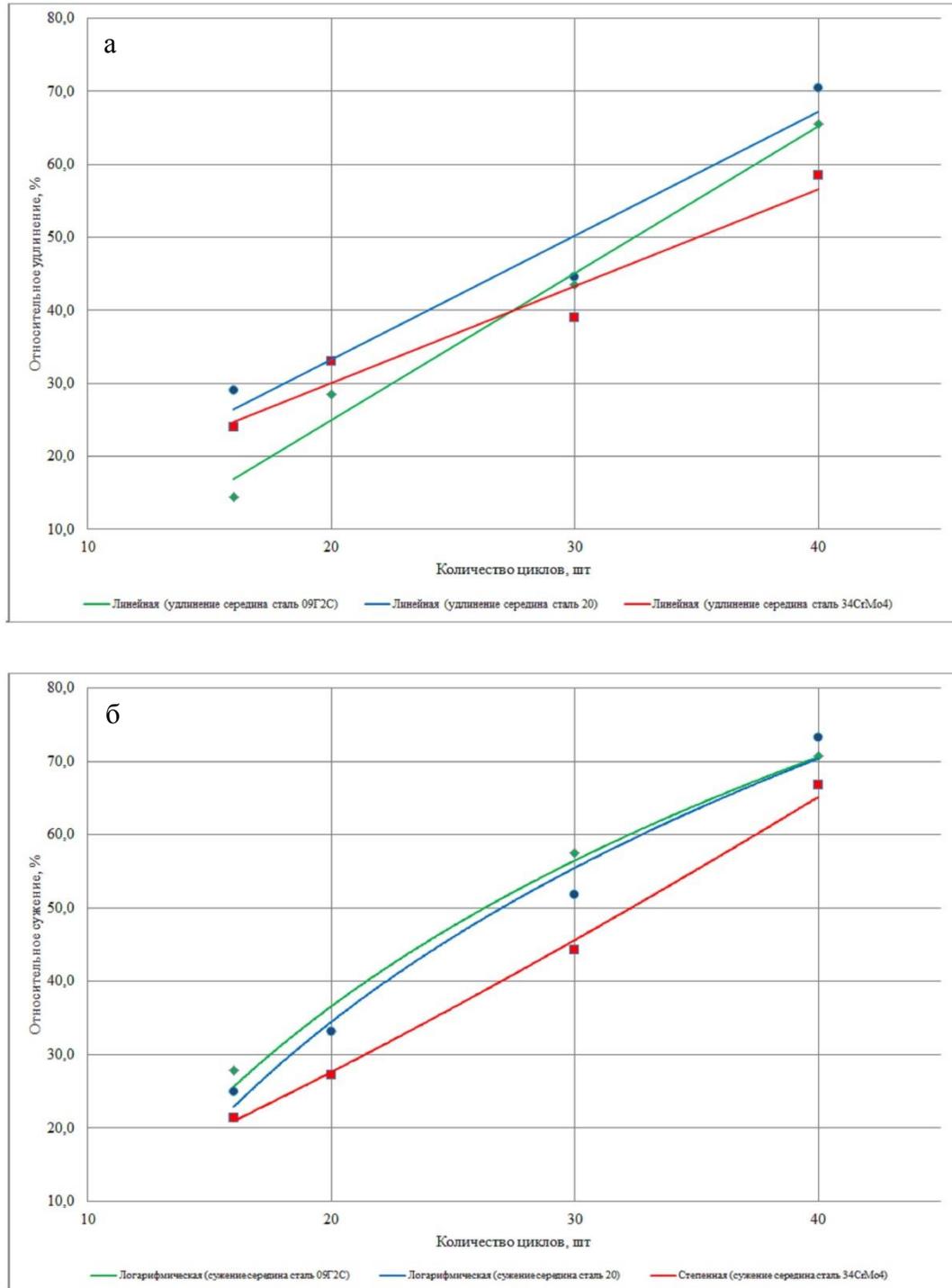


Рисунок 4.11 – Зависимость пластических свойств образцов, вырезанных из середины радиуса НЛЗ: а – относительное удлинение; б – относительное сужение, от количества циклов испытаний

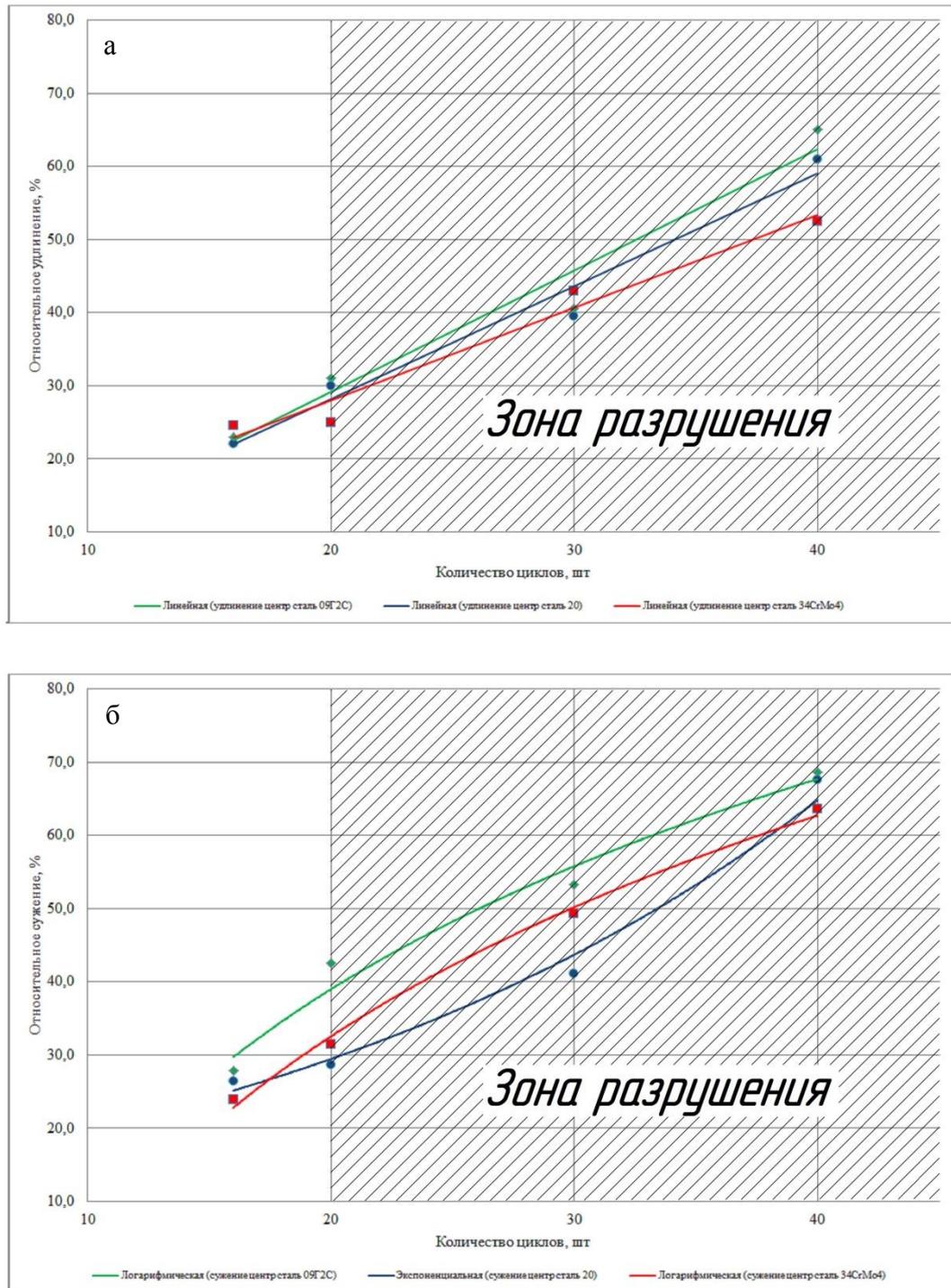


Рисунок 4.12 – Зависимость пластических свойств образцов, вырезанных из центра НЛЗ: а – относительное удлинение; б – относительное сужение, от количества циклов испытаний

Из представленных данных следует, что среди испытанных материалов большее значение пластических свойств достигнуто для сталей марок 20 и 09Г2С, следовательно, являющимися более технологичными. Сталь 34CrMo4 оказалась менее технологична, особенно в части образцов, вырезанных из центральной

части темплета, характеризующегося большей центральной пористостью, несмотря на меньший диаметр НЛЗ.

В таблице 4.12 обобщены результаты испытаний образцов из сталей 20, 45, 09Г2С, 34CrMo4, 12Х18Н10Т, выполненных из горячекатаного прутка и НЛЗ.

Таблица 4.12 – Результаты испытаний образцов из сталей 20, 45, 09Г2С, 34CrMo4, 12Х18Н10Т, выполненных из горячекатаного прутка и непрерывнолитой заготовки

Марка стали	Сталь 20	Сталь 45	Сталь 09Г2С		34CrMo4	12Х18Н10Т
	НЛЗ, центр	пруток	пруток	НЛЗ, центр	НЛЗ, центр	пруток
Количество циклов, шт	16	-	-	16	16	-
	20	20	-	20	20	20
	<b>30</b>	30	31	30	30	<b>24</b>
	<b>40</b>	40	40	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>30</b>
	-	<b>46</b>	<b>44</b>	-	-	-

Следует отметить, что количество циклов до разрушения образцов (значения выделены жирным шрифтом) из горячекатаных прутков выше, чем из НЛЗ. Наибольшие пластические свойства зафиксированы на образцах, отобранных из середины радиуса темплета, а наименьшие – на образцах из центральной части темплета. Поверхностные и центральные части НЛЗ менее пластичны и более склонны к разрушению при знакопеременном изгибе.

Таким образом, с использованием моделирования и опытным путем выбраны рациональные геометрические параметры образцов для испытаний на машине, позволяющей осуществлять знакопеременный изгиб с максимальным приближением условий деформации к условиям процесса винтовой прошивки.

Для снижения вероятности образования дефектов наружной и внутренней поверхности гильз, разрушения металла НЛЗ при прошивке, цикличность в очаге деформации двухвалкового прошивного стана следует ограничить для углеродистых сталей – не более 20 циклов, а для нержавеющей стали – до 15 циклов.

## **Глава 5. Закономерности износа рабочих валков прошивных станов винтовой прошивки**

### 5.1 Особенности износа рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426 при прокатке НЛЗ большого диаметра

Очевидно, что износ технологического инструмента прошивного стана, его своевременная замена оказывают значительное влияние на качество продукции и производительность трубопрокатного агрегата (ТПА).

На трубопрокатном агрегате (ТПА) 159-426 для получения горячекатаных труб используется непрерывнолитая заготовка (НЛЗ) собственного производства из углеродистой и легированной стали диаметрами 260; 340; 360; 410 мм. Прошивка НЛЗ ведется в двухвалковом стане винтовой прокатки с использованием бочковидных валков, расположенных вертикальной плоскости, оправок и направляющих линеек.

Максимальный диаметр бочки рабочих валков прошивного стана составляет 1200 мм. Восстановление рабочей поверхности осуществляется путем их переточки с уменьшением диаметра на величину до 12 %, при этом количество переточек одного валка составляет от 6 до 14. Новые валки, изготовленные из стали 50Х, имеют твердость 196–215 НВ, однако по мере их переточек твердость рабочей поверхности уменьшается до 155–167 НВ.

Анализ данных за период с сентября 2014 по август 2015 года по выводу 67 возможных пар валков из работы по причинам перевалок, ППР, дефектов рабочей поверхности, поломок, достижения минимального диаметра позволяет сделать вывод о том, что чаще всего рабочие валки прошивного стана заменяют и перетачивают на меньший диаметр в связи с проведением перевалки других станов трубопрокатного агрегата.

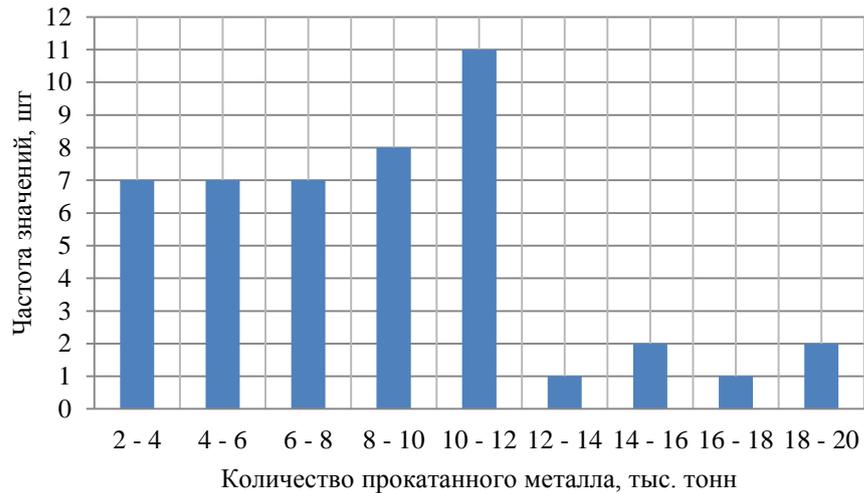


Рисунок 5.1 – Зависимость частоты переточек валков от количества прокатанного металла

Наибольшая частота переточек валков происходит при достижении наработки 10-12 тыс. тонн прокатанного металла (см. рисунок 5.1). Однако 21 пара валков имела наработку в диапазоне 2 – 8 тыс. тонн прокатанного металла. Очевидно, валки не вырабатывали своего ресурса. Вместе с тем 6 пар валков имели наработку в диапазоне от 12 до 20 тыс. тонн прокатанного металла.

Анализ причин нарушений процесса прокатки за 11 месяцев производства с января по ноябрь 2015 году, соотнесенный с количеством прокатанного металла на валках примерно одного диаметра, позволил выявить, что после прошивки 11...12 тыс. тонн НЛЗ ухудшаются условия первичного и вторичного захвата из-за снижения тянущей способности валков.

В процессе исследования изучался износ рабочих валков трех видов калибровки для прошивки заготовок диаметром 340 и 410 мм в гильзы различного диаметра (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Параметры калибровки рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426

Калибровка №	Диаметр НЛЗ, мм	Диаметр гильзы, мм	Угол подачи, градусов	Углы наклона образующей конуса, градусов		
				прошивки		раскатки
				$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$
1	340	314-345	10	2	3,5	2,5
2	410	420-430	9	2	3,5	3
3	410	500-508	8	2	3,5	6

Глубину износа конусов прошивки и раскатки рабочих валков определяли с помощью шаблона, размеченного с шагом 11,5 мм и щупа с точностью до 0,1 мм. Так же портативным твердомером проводился контроль твердости рабочей поверхности с интервалом 30 мм по длине бочки валка за исключением участков накатки во входном конусе (см. рисунок 5.2 а, б).



Рисунок 5.2 – Внешний вид входного конуса изношенных валков: а – нижний валок после прокатки 3205 тонн; б – верхний валок после прокатки 17364 тонн

Установлено, что, как и на других прошивных станах [8, 53], наиболее интенсивное изнашивание происходит в месте встречи заготовки с валками в основном в результате механического повреждения валка острыми кромками торца заготовки, не вращающейся в момент подачи толкателем в стан. В связи с этим под термином «износ валков» подразумевается глубина износа входного конуса, которая изменяет исходную калибровку валков.

Следует отметить, что заготовки диаметром 340, 360 и 410 мм максимальной длины 4,8 м массой до 5 тонн снаружи покрыты слоем окалины, которая препятствует вращению заготовки в желобе прошивного стана в момент захвата ее рабочими валками, вызывает проскальзывание заготовки относительно валков и их заполировку. Кроме того, НЛЗ имеют значительную овальность поперечного сечения (см. рисунки 1.3, 2.1 б), которая ухудшает условия вращения

заготовки. Анализ диаграмм токовых нагрузок электродвигателей главных приводов показывает, что время первичного захвата заготовок часто составляет 1,5-2 секунды, тогда как, продолжительность первичного захвата заготовок диаметром 150...200 мм на прошивном стане ТПА 50-200 находится в пределах 0,2-0,3 секунд.

Особенно интенсивно валки изнашиваются в начальный период эксплуатации. Износ валков в этот период на участке прошивки происходит равномерно, захват заготовок благодаря наличию накатки глубиной 0,3...1,2 мм осуществляется стабильно. Постепенно интенсивность роста глубины максимального износа уменьшается. При этом сечение максимального износа перемещается в направлении прокатки, например: при прошивке 1790 тонн заготовок диаметром 340 мм оно находится на расстоянии 103,5 мм от торца валка, а после прошивки 17365 тонн – на расстоянии 233 мм (см. рисунок 5.3), при этом значительно увеличивается длина контактной поверхности металла с валком в выходном конусе, из-за чего возрастает пластический изгиб стенки гильзы.

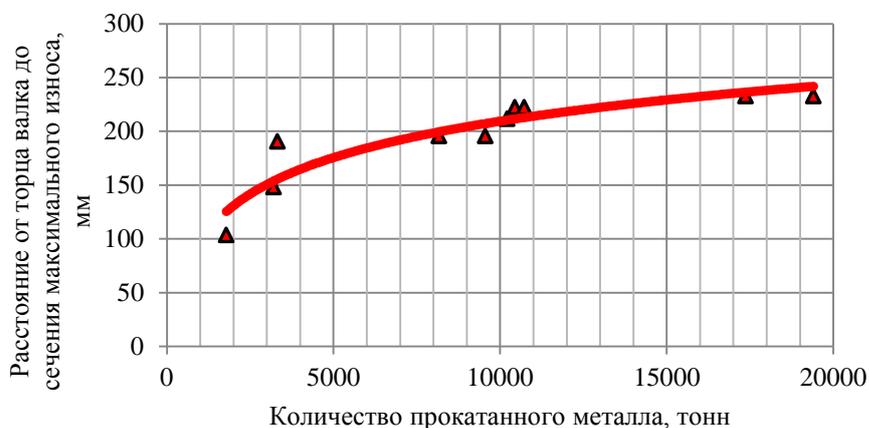


Рисунок 5.3 – Зависимость расстояния от торца рабочих валков калибровки №1 до сечения максимального износа от количества прокатанного металла

В начале эксплуатации сечение выработки имеет форму треугольника, одну из сторон которого составляет первоначальный профиль поверхности, а другую -

выработанный профиль с незначительной обратной конусностью. Зона максимальной выработки является третьей стороной треугольника.

По мере выработки валков сокращается расстояние от сечения захвата заготовки валками до носка оправки, из-за чего ухудшаются условия первичного и особенно вторичного захвата. Данное обстоятельство требует корректировки настройки прошивного стана [8].

Для осуществления устойчивого процесса прошивки необходимо уменьшать расстояние между валками, увеличивая тем самым обжатие в пережиме с 7,3 % до 8,4 % и более, сохраняя заданный коэффициент овализации. А для сохранения геометрических параметров получаемых гильз уменьшают выдвижение носка оправки за пережим, отодвигая оправку по ходу прошивки (см. рисунок 5.4 а-г).

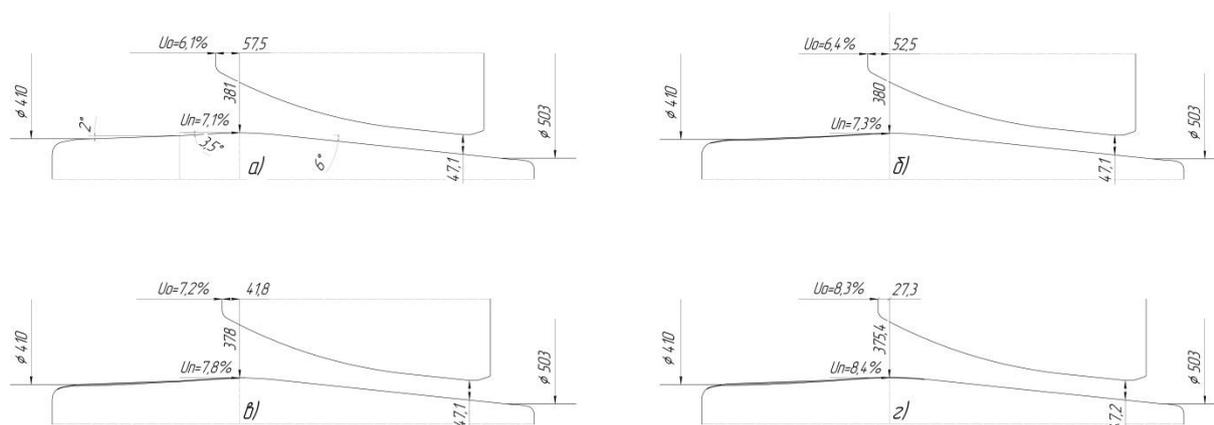


Рисунок 5.4 – Схема влияния износа валков на изменение настройки прошивного стана при прошивке НЛЗ Ø410 мм в гильзу размером Ø503x47 мм: а – исходная настройка очага деформации; б – после прокатки 4855 тонн; в – после прокатки 6090 тонн; г – после прокатки 9745 тонн

Увеличение обжатия перед носком оправки приводит к возрастанию числа шагов осевой подачи на участках II и III (см. рисунок 1.6) и, как следствие, увеличению количества циклов знакопеременных изгибов стенки, в связи с этим износ рабочих валков и качество гильз ограничиваются объемом прокатанного металла.

В ходе исследований анализировали зависимости объема износа входного конуса верхних и нижних валков от суммарной длины прошитых НЛЗ (см. рисунок 5.5).

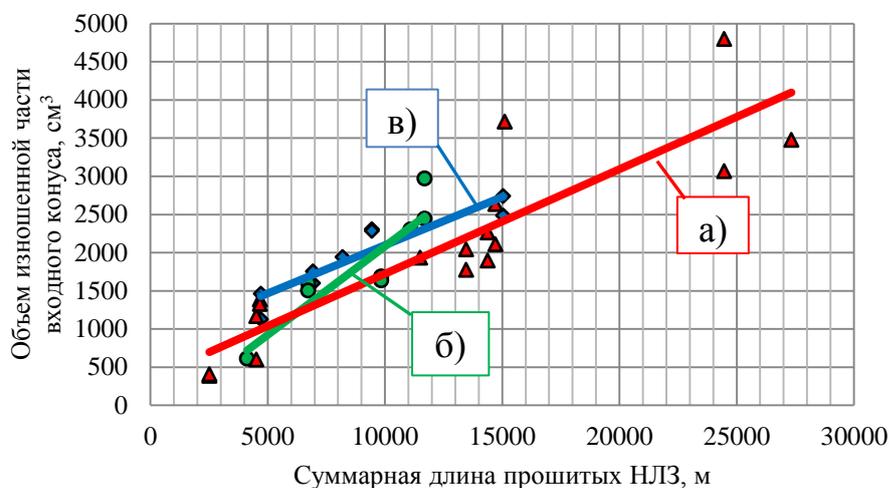


Рисунок 5.5 – Зависимость объема изношенной части входного конуса рабочих валков от суммарной длины прошитых НЛЗ: а – Ø340 мм калибровка №1; б – Ø410 мм, калибровка №2; в – Ø410 мм, калибровка №3

Как видно из приведенного графика на рисунке 5.5, между объемом изношенной части валка и суммарной длиной прошитых заготовок также как и количеством прокатанного металла [8] существует практически линейная зависимость.

Анализ данных по износу 12 пар валков с различными калибровками и параметрами прошивки показал, что материалостойкость рабочих валков из стали 50Х прошивного стана винтовой прокатки ТПА 159-426 составляет  $3,91...4,86$  т/см<sup>3</sup>, что значительно ниже материалостойкости валков прошивного стана ТПА 30-102 [8], которая находится в интервале  $4,8...5,4$  т/см<sup>3</sup>. По-видимому, это обусловлено повышенным скольжением металла относительно рабочих валков при прошивке НЛЗ большого диаметра, в особенности с увеличением наружного диаметра гильз относительно диаметра заготовки (“на подъем”).

Для изучения закономерностей изменения глубины максимального износа детальному исследованию подвергали верхние и нижние валки всех трех

вышеперечисленных видов калибровок в ходе их эксплуатации (см. рисунок 5.6). Несмотря на большой объем статистических данных однозначного влияния вида калибровки валков (см. таблицу 5.1) на глубину их износа не выявлено.

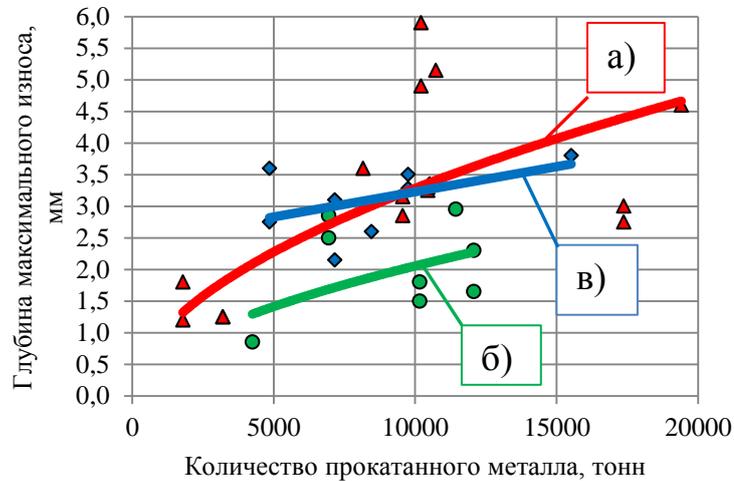


Рисунок 5.6 – Влияние калибровки валков на характер их износа: а – калибровка №1; б – калибровка №2; в – калибровка №3

Объем изношенной части рабочего профиля валка  $V_{\Sigma}$  состоит из суммы объемов изношенных частей входного конуса  $V_{вх.к}$  и выходного конуса  $V_{вых.к}$ :

$$V_{\Sigma} = V_{вых.к} + V_{вх.к} \cdot \quad (5.1)$$

Наибольший износ рабочего профиля валка происходит во входном конусе вследствие влияния:

1) абразивного изнашивания в момент захвата заготовок, и характеризуется суммарным количеством прошитых НЛЗ ( $\Sigma N_{НЛЗ}$ ):

$$V'_{вх.к} = f(\Sigma N_{НЛЗ}), \quad (5.2)$$

2) механического изнашивания от прошиваемых заготовок, и характеризуется их суммарной длиной ( $\Sigma L_{НЛЗ}$ ):

$$V''_{вх.к} = f(\Sigma L_{НЛЗ}), \quad (5.3)$$

тогда объем изношенной части входного конуса:

$$V_{вх.к} = V'_{вх.к} + V''_{вх.к} . \quad (5.4)$$

Выходной конус валка не участвует в захвате НЛЗ, но оказывает влияние на формирование геометрии гильзы, которое осуществляется при скольжении металла относительно его рабочей поверхности, поэтому имеет место влияние механического изнашивания, характеризуемого суммарной длиной прошитых гильз  $\Sigma L_{\Gamma}$ :

$$V_{вых.к} = f(\Sigma L_{\Gamma}) \quad (5.5)$$

Однако ввиду того что преобладающее действие на износ входного конуса оказывает абразивное изнашивание, то целесообразно выделить показатель абразивного износа материала валка, затрачиваемого на захват НЛЗ.

Необходимо учесть, что длина гильзы соотносится с длиной НЛЗ через коэффициент вытяжки, а работа входного конуса валка затрачивается на удлинение НЛЗ с учетом усредненного коэффициента вытяжки по длине входного конуса. С целью корректировки выделенного показателя износа входного конуса от общей длины НЛЗ было принято соотношение коэффициентов вытяжки на выходе гильзы из очага деформации  $\mu_{\Sigma}$  к усредненному значению коэффициента вытяжки во входном конусе валка  $\mu_{вх.к}$ :

$$K = \frac{\mu_{\Sigma}}{\mu_{вх.к}} \quad (5.6)$$

Для рассмотренных вариантов калибровок и получаемых гильз значения данных коэффициентов составили: 2,13; 2,66; 2,30 соответственно.

В окончательном виде формула выделенного показателя износа входного конуса  $V'_{вх.к}$  вследствие влияния абразивного износа имеет вид:

$$V'_{вх.к} = V_{вх.к} - \left( \frac{V_{вх.к} \cdot \mu_{вх.к}}{\mu_{\Sigma}} - V_{вых.к} \right). \quad (5.7)$$

В связи с вышеизложенным из объема набранных данных по износу

входного и выходного конусов рабочих валков прошивного стана построен график зависимости объема изношенной части валка от количества прошитых НЛЗ (рисунок 5.7).

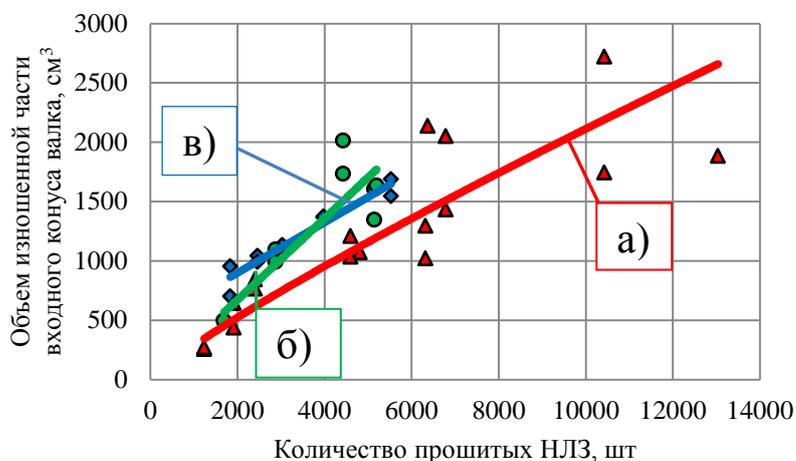


Рисунок 5.7 – Зависимость объема изношенной части входного конуса от количества прошитых НЛЗ: а – Ø340 мм, калибровка №1; б – Ø410 мм, калибровка №2; в – Ø410 мм, калибровка №3

Как видно из приведенного графика на рисунке 5.7, между объемом изношенной части входного конуса валков калибровок №1, 2, 3, вследствие абразивного износа, и количеством прошитых НЛЗ существует практически линейная связь.

Для рассмотренных вариантов калибровок отношение объема изношенной части валка к объему изношенной части входного конуса, затраченного на захват НЛЗ, в зависимости от их количества,  $\frac{V_{\Sigma}}{V'_{\text{ВХ.К}}}$  составил: калибровка № 1 – 1,8; 1,5 – для калибровки № 2; 1,7 – калибровка № 3.

На рисунке 5.8 представлена обобщенная зависимость расхода материала входного конуса верхних и нижних рабочих валков калибровок №1, 2, 3 от количества прокатанных НЛЗ.

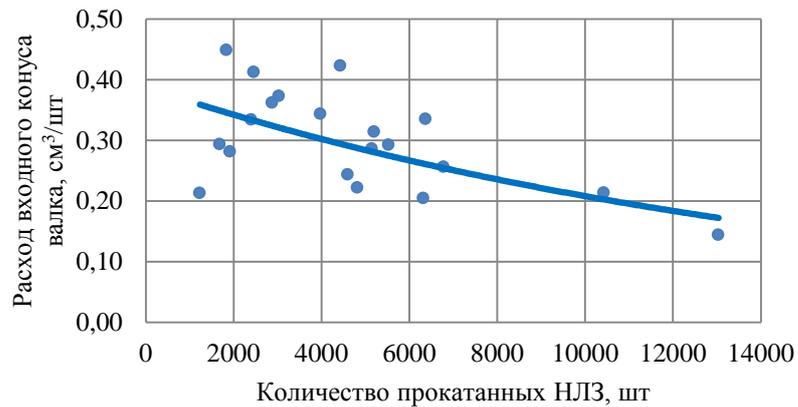


Рисунок 5.8 – Зависимость расхода материала входного конуса от количества прокатанных НЛЗ

Из графика видно, что данная зависимость имеет тенденцию к непрерывному снижению, которую можно объяснить упрочнением материала валка, образующегося в месте максимального износа. Значения расхода изношенной входной части валка изменяются от 0,45 см<sup>3</sup>/шт при прошивке 1837 шт НЛЗ до 0,14 см<sup>3</sup>/шт при прошивке 13036 шт НЛЗ. Среднее значение величины расхода материала входного конуса валка, вследствие абразивного износа, составляет 0,3 см<sup>3</sup> на 1 заготовку.

Необходимо отметить, что по мере увеличения количества прокатанных заготовок увеличивается твердость в месте максимального износа валков (см. рисунок 5.9), что приводит к заполировке рабочей поверхности, потере тянущей способности валков, при этом происходит незначительное увеличение материалостойкости.

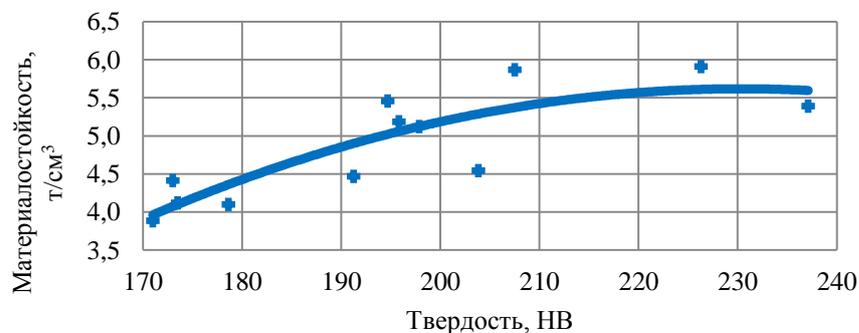


Рисунок 5.9 – Влияние твердости рабочей поверхности валков в месте максимального износа на материалостойкость

За период с сентября 2014 по август 2015 года измерений и исследования износа рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426 особое внимание привлёк единичный случай, а именно выход из строя нижнего рабочего валка из пары диаметром 1129 мм. Валок полностью не выработал своего ресурса, однако его дальнейшая переточка и эксплуатация оказались невозможными. После кампании проката в объеме 9745,61 тонн или 3979 штук заготовок диаметром 410 мм в гильзы для последующей раскатки в трубы размером  $\text{Ø}426 \times 9-20$  мм и  $\text{Ø}377 \times 9$  мм (86 плавов) сечение максимального износа глубиной 3,5 мм находится на расстоянии 135 мм от торца валка, на поверхности валка отсутствуют забоины и сколы, однако установлено наличие продольной сквозной трещины вдоль бочки (см. рисунок 5.10).



Рисунок 5.10 – Трещина бочки нижнего валка прошивного стана ТПА 159-426

Анализ сведений по качеству прокатанных труб позволил установить зависимость количества труб отложенных на ремонт дефектов наружной поверхности трубопрокатного происхождения, образующихся вследствие прошивки НЛЗ – трубопрокатных наружных плен (рисунок 5.11).

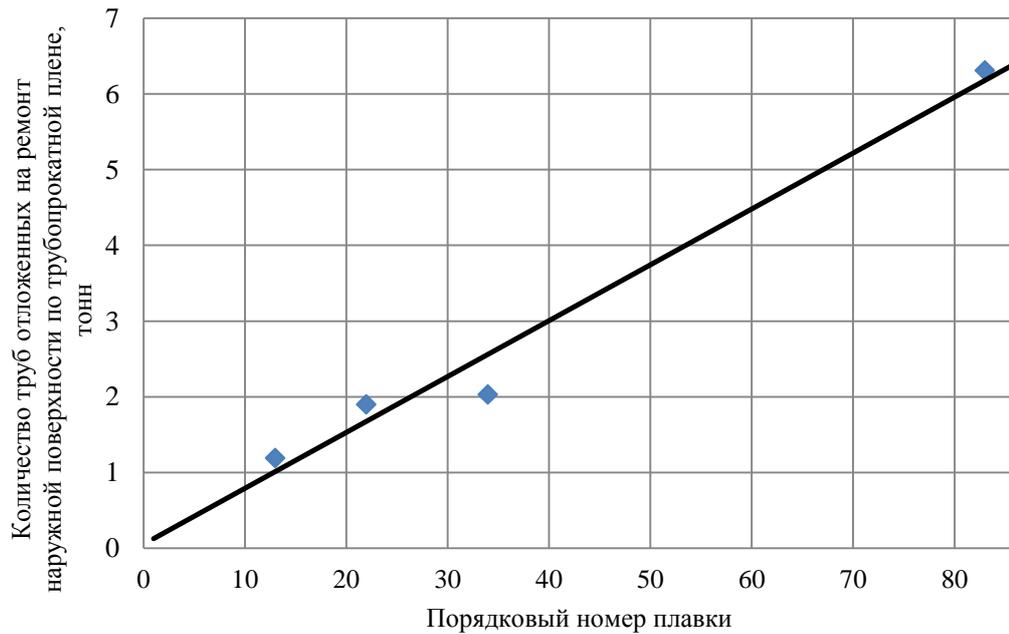


Рисунок 5.11 – Количество труб отложенных на ремонт по наружной трубопрокатной плене за кампанию проката

Причиной появления дефектов “плена наружная” являются пороки непрерывнолитого металла, которые в совокупности с процессом прошивки на "подъем" преобразуются в расслоения металла, вызывая тем самым появление плен на поверхности гильз и труб.

Подробный анализ сведений 37 плавков по качеству труб тонкостенного сортамента  $\varnothing 426 \times 9-10$  мм, из сталей марок С440, 20КТ, 13ХФА, 20, 09Г2С прокатанных в начальный период кампании, позволил выделить косвенную зависимость износа рабочих валков с перерезом труб (рисунок 5.12).

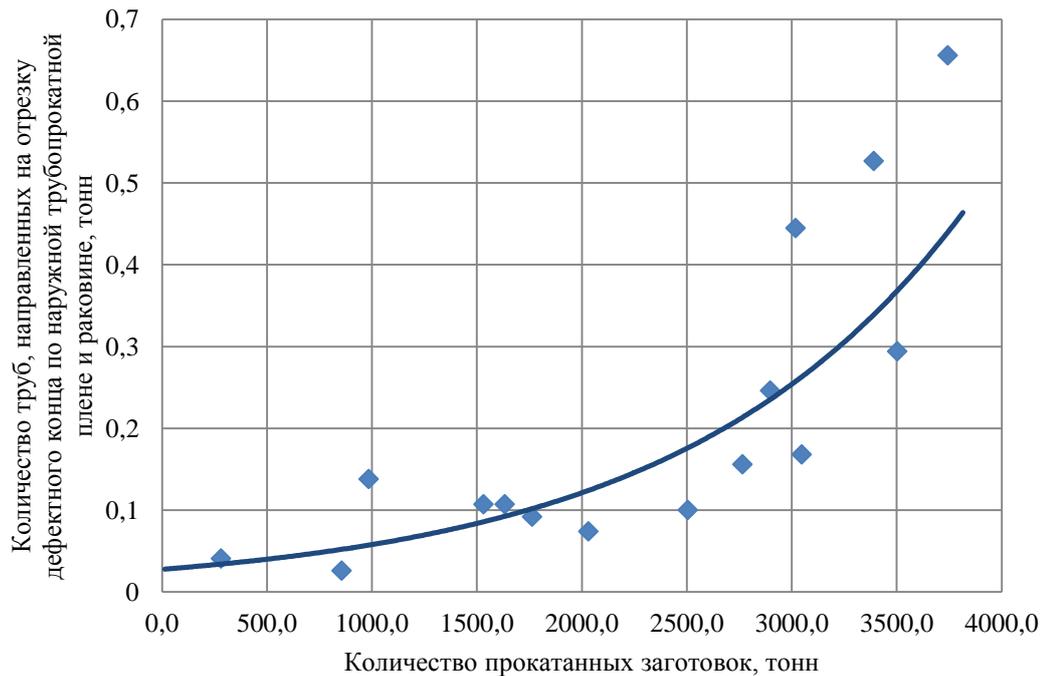


Рисунок 5.12 – Влияние износа рабочих валков на качество труб

Следует отметить, что продольная трещина на рабочей поверхности валка оказалась недостаточно широкой, чтобы прокатываемый металл смог заполнить её пространство, поэтому не оказала явного влияния на качество наружной поверхности гильз и труб.

Таким образом, исследован механизм износа рабочих валков прошивного стана винтовой прокатки ТПА 159-426 при прошивке НЛЗ больших диаметров (340 и 410 мм). Описаны основные механизмы, влияющие на износ рабочей поверхности валков: абразивное изнашивание, возникающее в момент захвата заготовок и характеризующееся количеством прошитых НЛЗ; механическое изнашивание, возникающее от прошиваемых заготовок во входном конусе и гильз в выходном. Выделен показатель абразивного износа входного конуса в зависимости от количества прокатанного металла. Выполнен анализ зависимости качественных показателей труб от поверхностных дефектов, связанных с износом валков и количеством прокатанных заготовок.

В результате проведенных исследований износа рабочей поверхности валков из стали 50X для прошивного стана винтовой прокатки ТПА 159-426 установлено:

- 1) средняя величина материалостойкости для рассмотренных калибровок валков № 1, 2, 3 составила  $4,4 \text{ т/см}^3$ , при этом, было прокатано от 1787,7 до 17364,8 тонн заготовок до переточки валков;
- 2) в процессе работы валков сечение максимального износа перемещается в направлении прокатки, однако скорость этого перемещения непрерывно падает, при этом возрастает длина контактной поверхности металла с валком в выходном конусе и увеличивается пластический изгиб стенки гильзы;
- 3) зависимость расхода изношенной входной части валков от количества прошитых НЛЗ имеет тенденцию к непрерывному снижению от  $0,45 \text{ см}^3/\text{шт.}$  при прошивке 1837 шт. НЛЗ до  $0,14 \text{ см}^3/\text{шт.}$  при прошивке 13036 шт. НЛЗ. Среднее значение величины расхода материала входного конуса вала вследствие абразивного износа составляет  $0,3 \text{ см}^3$  на 1 заготовку.

Установлено, что для повышения эффективности использования рабочих валков прошивного стана винтовой прокатки ТПА 159-426, в программе загрузки производства цеха рекомендуется сократить количество замен валков прошивного с наработкой прокатанного металла: 1) менее 8000 тонн, близком к минимальному диаметру (твердость 155–167 НВ); 2) менее 12000 тонн, близком к максимальному диаметру (твердость 196–215 НВ). Работа на валках с наработкой более 12 000 тонн приведёт к необходимости корректировки настроечных параметров, увеличению обжатия перед носком оправки, увеличению количества циклов в выходном конусе очага деформации.

5.2 Особенности износа рабочих валков прошивного стана ТПА 50-200 при прокатке непрерывнолитых и горячекатаных заготовок

Материалостойкость рабочих валков мало зависит от их калибровки и настройки прошивного стана [8], что позволяет провести анализ закономерностей

износа валков для прошивки непрерывнолитых и горячекатаных заготовок из углеродистой и легированной стали диаметром от 90 до 260 мм, длиной от 1,4 до 4,3 м, используемых для получения горячекатаных труб на ТПА 50-200.

Прошивка заготовок на ТПА 50-200 ведется в двухвалковом стане винтовой прокатки с использованием бочковидных либо чашевидных валков, расположенных в горизонтальной плоскости, и направляющих линеек. Максимальный диаметр бочки рабочих валков составляет 1100 мм. Восстановление рабочей поверхности валков из стали 45 осуществляется путем их переточки с уменьшением диаметра на величину до 14 %, число переточек – от четырех до восьми. Новые валки имеют твердость 190–210 *НВ*, однако по мере их переточки твердость рабочей поверхности уменьшается до 145–157 *НВ*. Также применяется процесс восстановления рабочих валков путем наплавки рабочей поверхности порошковой проволокой марки 18ХГСА. По сравнению с валками из стали 45 наплавленные валки имеют бóльшую твердость (230–245 *НВ*), по мере их переточек твердость рабочей поверхности снижается до 150–170 *НВ*.

На основе практики работы ТПА 50-200 установлено, что для стабильного ведения процесса прошивки заготовок из углеродистых сталей используются значения обжатия перед носком оправки до 7,0 %, для легированных сталей – 4,0–5,0 %. При этом обжатие заготовки в пережиме чашевидных валков составляет 11–31 % [76], для бочковидных валков 9–16 %, при углах подачи 10–14 ° (рисунок 5.13). Коэффициент овализации находится в пределах 1,09–1,11.

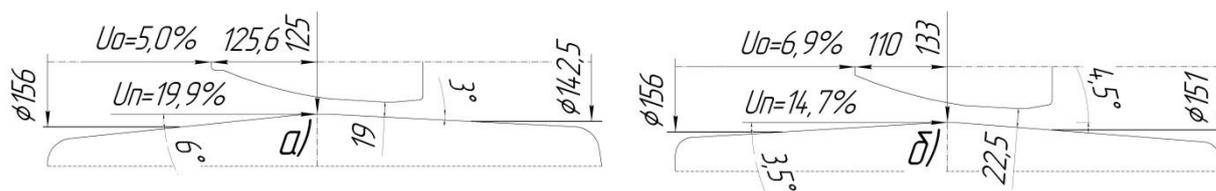


Рисунок 5.13 – Схема очага деформации при прошивке заготовок  $\phi 156$  мм с использованием валков: а – чашевидных (гильза  $\phi 142,5 \times 19$  мм); б – бочковидных (гильза  $\phi 151 \times 22,5$  мм)

Процесс прошивки заготовок с использованием чашевидных валков ведется с получением гильзы меньшего диаметра по сравнению с заготовкой (см. рисунок 5.14) до 24 % [76]. Использование чашевидных валков успешно реализовано на ТПА 50-200 при прошивке заготовок из углеродистых, легированных, в том числе подшипниковых сталей.



Рисунок 5.14 – Внешний вид заготовок-гильз, заторможенных в прошивном стане с использованием чашевидных (а) и бочковидных (б) валков

Анализ значений коэффициентов вытяжки  $\mu$  при получении гильз большей части сортамента ТПА с отношением диаметра к толщине стенки 5,5–6,7 позволил установить, что в большинстве случаев прошивка заготовок на чашевидных валках осуществляется при больших значениях  $\mu = 2,6$  и с большим скольжением металла относительно рабочей поверхности валков, чем на бочковидных валках, где  $\mu = 1,8$ .

Анализ данных за период с февраля по апрель 2016 г. по выводу 12 пар валков из работы (на плановые ремонты, из-за дефектов рабочей поверхности, достижения минимального диаметра бочки) позволяет сделать вывод о том, что чаще всего рабочие валки прошивного стана ТПА 50-200 заменяют и перетачивают на меньший диаметр в связи с достижением регламентированного числа прокатанных заготовок.

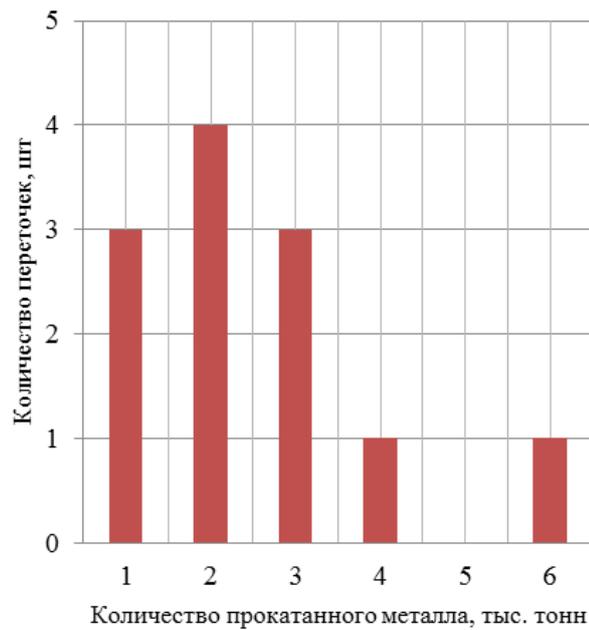


Рисунок 5.15 – Зависимость частоты переточек наплавленных рабочих валков от количества прокатанного металла

Наиболее частая переточка валков происходит при достижении наработки до 2000 тонн прокатанного металла (см. рисунок 5.15). Однако три пары валков имели наработку от переточки до переточки в диапазоне до 1000 тонн, вместе с тем одна пара валков имела наработку от 5000 до 6000 тонн прокатанного металла.

В процессе исследования изучался износ чашевидных и бочковидных рабочих валков (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Параметры калибровки рабочих валков прошивного стана ТПА 50-200

Тип рабочих валков	Диаметр, мм		Угол подачи, градусов	Углы наклона образующей конусов очага деформации, градусов	
	заготовок	гильз		входной $\varphi_1$	выходной $\varphi_2$
Чашевидные	150–230	114–223	13–14	6,0	3,0
Бочковидные	90–260	91–259	10–12	3,5	4,5

Глубину износа рабочих валков в конусе прошивки и раскатки определяли с помощью шаблона, размеченного с шагом 15 мм и щупа с точностью до 0,1 мм. Кроме того, проводили контроль твердости рабочей поверхности с интервалом 15 мм по длине бочки валка (см. рисунки 5.16, 5.17).

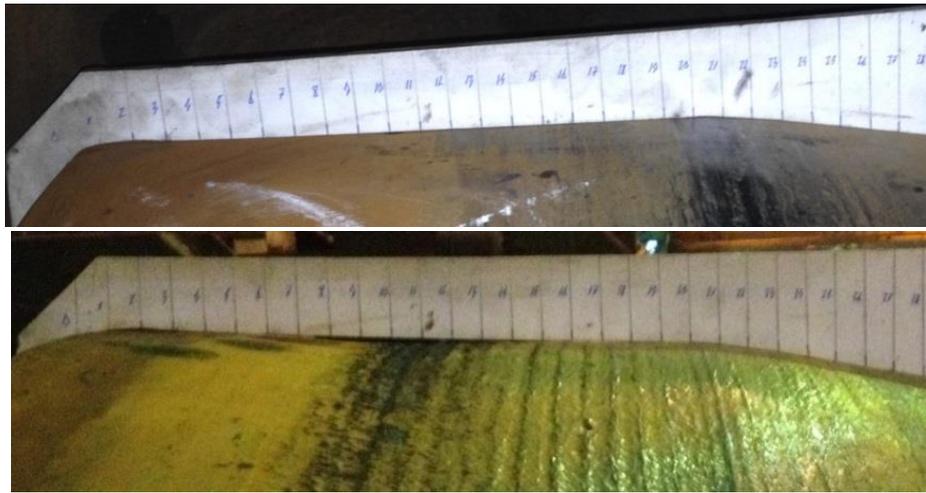


Рисунок 5.16 – Внешний вид входного конуса изношенных чашевидных валков:  
а – левый валок после прокатки 723 тонн; б – правый валок после прокатки 1529 тонн



Рисунок 5.17 – Внешний вид входного конуса изношенных бочковидных валков:  
а – левый валок после прокатки 196 тонн; б – правый валок после прокатки 5818 тонн

Установлено, что, как и на других прошивных станах [8, 53, 56], наиболее интенсивное изнашивание происходит в месте захвата заготовки рабочими валками, в основном в результате механического повреждения валка острыми кромками торца заготовки, не вращающейся в момент подачи толкателем в стан.

Следует отметить, что на прошивном стане ТПА 50-200 заготовки диаметром 240...260 мм максимальной длиной 4,4 м и массой до 1,8 тонн покрыты слоем печной окалины, которая осыпается в приемном желобе прошивного стана, препятствует вращению заготовки в момент захвата ее

рабочими валками, что вызывает проскальзывание заготовки относительно валков и их заполировку.

Особенно интенсивно валки изнашиваются в начальный период эксплуатации. Износ валков в этот период во входном конусе происходит практически равномерно по длине, захват заготовок благодаря наличию накатки во входном конусе глубиной 0,5 мм осуществляется стабильно. Постепенно рост глубины максимального износа замедляется. При этом сечение максимального износа  $h_{\max}$  рабочих валков перемещается в направлении прокатки. Например, при прошивке 723 тонн заготовок различных диаметров на чашевидных валках  $h_{\max}$  находится на расстоянии 135 мм от торца валка, а после прошивки 2062 тонн – на расстоянии 165 мм; при прошивке 196 тонн заготовок различных диаметров на бочковидных валках  $h_{\max}$  находится на расстоянии 210 мм от торца валка, а после прошивки 5818 тонн – на расстоянии 225 мм (см. рисунок 5.18).

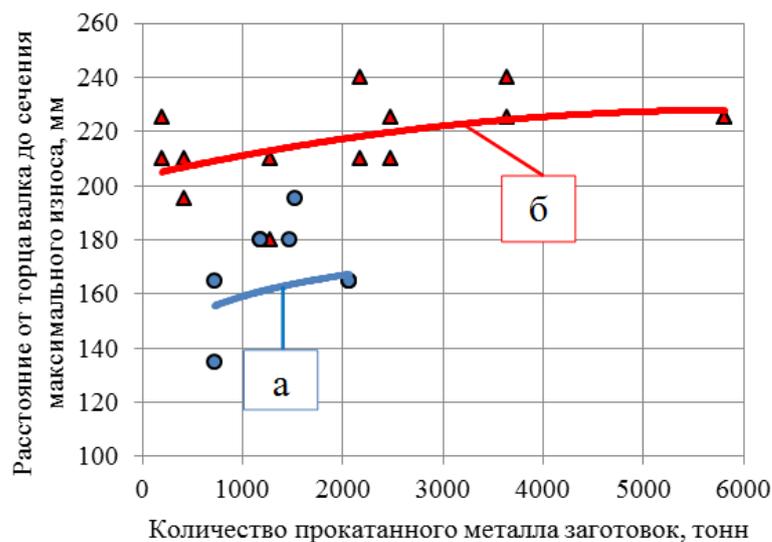


Рисунок 5.18 – Зависимость расстояния от торца рабочих валков до сечения максимального износа от количества прокатанного металла заготовок: а – чашевидные валки; б – бочковидные валки

С целью определения величины выделенного показателя износа входного конуса – количества материала валка, затрачиваемого на захват заготовки, – в зависимости от количества прошитых заготовок, была использована методика, изложенная в параграфе 5.1. В ходе исследований анализировали также

зависимости объема износа входного конуса рабочих валков от суммарной длины прошитых заготовок на ТПА 50-200.

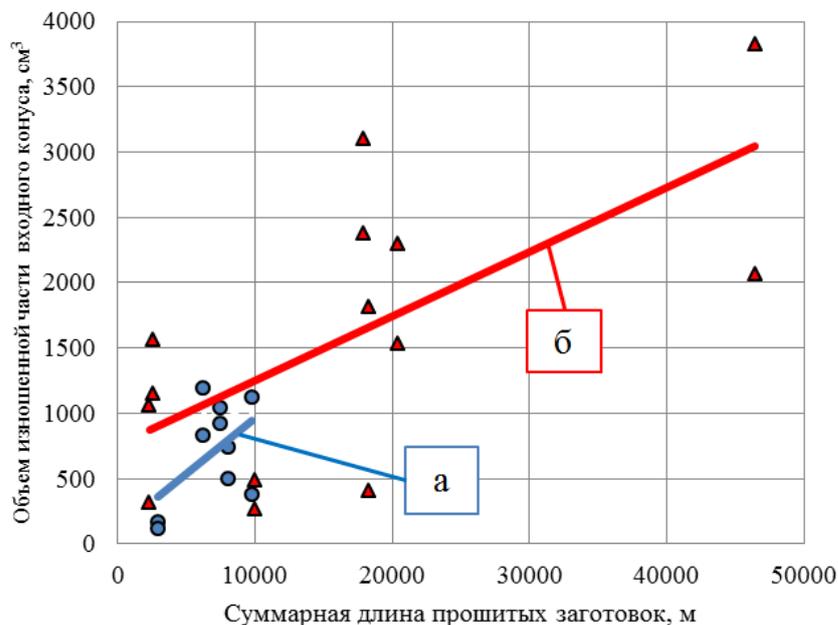


Рисунок 5.19 – Зависимость объема изношенной части входного конуса рабочих валков от суммарной длины прошитых заготовок: а – чашевидные валки; б – бочковидные валки

Как видно из приведенного на рисунке 5.19 графика, между объемом изношенной части валка и суммарной длиной прошитых заготовок, как и количеством прокатанного металла существует практически линейная зависимость.

Анализ данных по износу 12 пар чашевидных и бочковидных валков двух калибровок показал, что материалостойкость наплавленных рабочих валков прошивного стана винтовой прокатки ТПА 50-200 составляет  $0,17-5,52 \text{ т/см}^3$ , среднее значение составляет  $2,1 \text{ т/см}^3$ , что значительно ниже материалостойкости валков прошивных станом ТПА 30-102 [8] и ТПА 159-426 [56]. По-видимому, это обусловлено влиянием большого количества типоразмеров прошиваемых заготовок и большим углом входного конуса ( $6^\circ$ ) на чашевидных валках.

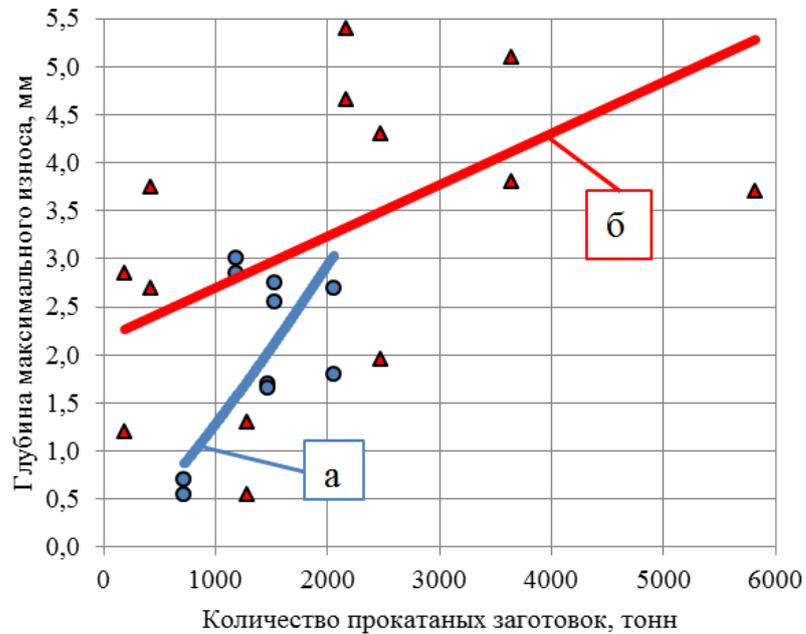


Рисунок 5.20 – Влияние калибровки валков на характер их износа: а – чашевидные валки; б – бочковидные валки

Исходя из анализа большого объема статистических данных, можно сделать вывод, что глубина максимального износа чашевидных валков в начальный период эксплуатации в 2,5 раза меньше глубины максимального износа бочковидных валков (см. рисунок 5.20). Однако по мере увеличения количества пролитых заготовок, интенсивность роста глубины максимального износа чашевидных валков значительно выше, чем у бочковидных валков.

Используя зависимость выделенного показателя износа входного конуса вследствие влияния абразивного износа, затрачиваемого на захват заготовок [56], из объема набранных данных по износу входной и выходной части рабочих валков прошивного стана, построен график зависимости объема выделенной изношенной входной части валка от количества пролитых заготовок (см. рисунок 5.21).

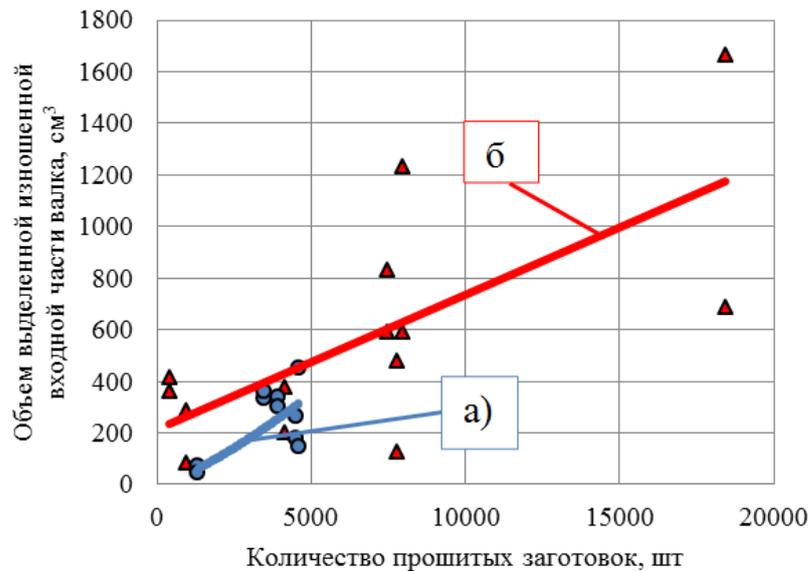


Рисунок 5.21 – Зависимость объема выделенной изношенной входной части валка от количества прошитых заготовок: а – чашевидные валки; б – бочковидные валки

Анализ зависимости, представленной на рисунке 5.21, позволяет установить, что между объемом изношенной части входного конуса валков и количеством прошитых заготовок существует линейная связь.

Для рассмотренных вариантов калибровок отношение объема изношенной части валка к объему изношенной части входного конуса, затраченного на захват заготовок, в зависимости от их количества, составило: для чашевидных валков – 3,0; для бочковидных валков – 3,4.

На рисунке 5.22 представлена зависимость расхода материала изношенной входной части правых и левых чашевидных и бочковидных валков от количества прокатанных заготовок.

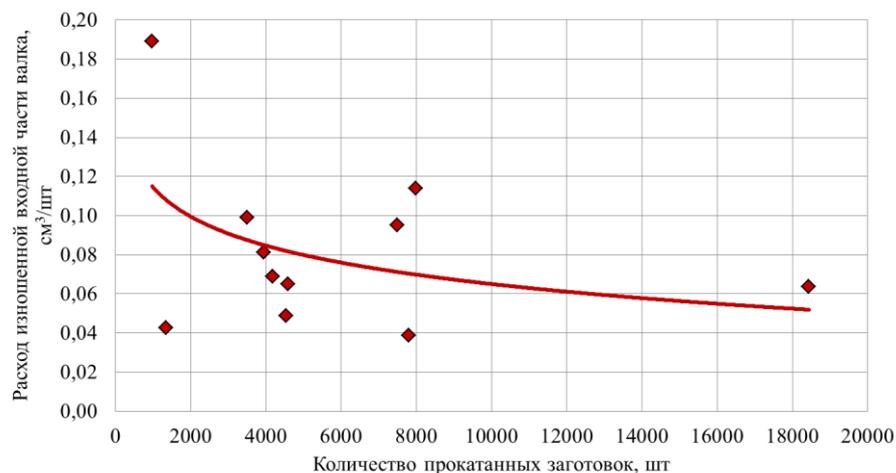


Рисунок 5.22 – Зависимость расхода материала входного конуса валков от количества прокатанных заготовок

Очевидно, что данная зависимость имеет тенденцию к непрерывному снижению, что можно объяснить упрочнением материала валка на участке максимального износа. Значения расхода изношенной входной части валка изменяются от 0,19 см<sup>3</sup>/шт при прошивке 969 шт заготовок до 0,06 см<sup>3</sup>/шт при прошивке 18439 шт заготовок. Среднее значение величины расхода вследствие абразивного износа, составляет 0,08 см<sup>3</sup> на 1 прошитую заготовку.

Необходимо отметить, что по мере увеличения количества прокатанных заготовок, увеличивается твердость в месте максимального износа валков, при этом происходит незначительное увеличение материалостойкости (рисунок 5.23).

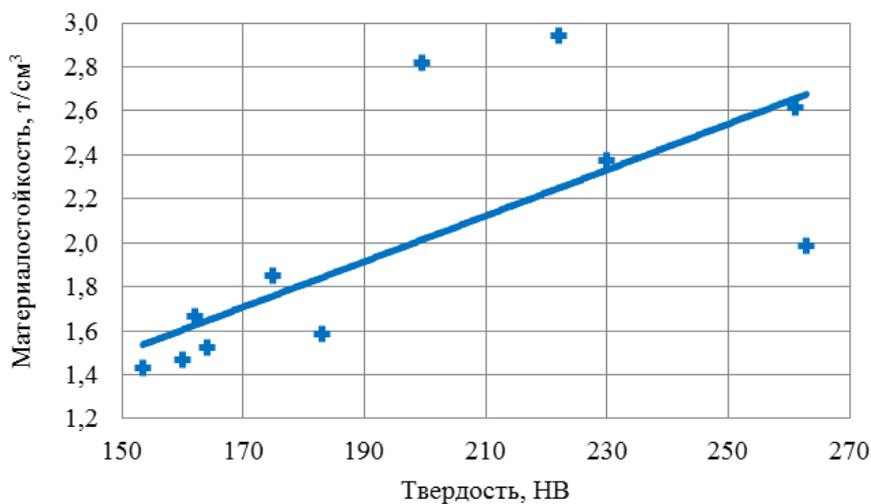


Рисунок 5.23 – Влияние твердости рабочей поверхности валков в месте максимального износа на материалостойкость

В результате исследований износа рабочей поверхности валков прошивного стана винтовой прокатки ТПА 50-200 установлено следующее:

- средняя величина материалостойкости чашевидных и бочковидных валков составила 2,1 т/см<sup>3</sup>, при этом было прокатано от 196 до 5818 тонн заготовок до переточки валков;
- в процессе работы сечение максимального износа чашевидных и бочковидных рабочих валков перемещается в направлении прокатки, однако скорость этого перемещения непрерывно снижается;
- глубина максимального износа чашевидных валков в начальный период эксплуатации в 2,5 раза меньше глубины максимального износа бочковидных

валков. По мере увеличения количества прокатанного металла заготовок интенсивность роста глубины максимального износа чашевидных валков выше, чем бочковидных;

– зависимость расхода изношенной входной части валков от количества прошитых заготовок имеет тенденцию к непрерывному снижению от 0,19 см<sup>3</sup>/шт при прошивке 969 заготовок до 0,06 см<sup>3</sup>/шт при прошивке 18439 заготовок. Среднее значение величины расхода материала входного конуса валка вследствие абразивного износа составляет 0,08 см<sup>3</sup> на одну прошитую заготовку.

Таким образом, исследован механизм износа чашевидных и бочковидных рабочих валков прошивного стана винтовой прокатки ТПА 50-200 при прошивке заготовок диаметром от 90 до 260 мм. Выделен показатель абразивного износа входного конуса в зависимости от количества прокатанного металла, который составляет 0,08 см<sup>3</sup> на одну прошитую заготовку.

### 5.3 Моделирование износа рабочих валков прошивного стана МИСиС-130Д при прокатке жаропрочных сплавов

В процессе исследования также изучали износ рабочих валков прошивного стана МИСиС-130Д на основании проведенного компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM-3D. Для проведения моделирования построен очаг деформации (рисунок 5.24). Исходная заготовка 4 установлена с входной стороны очага деформации и находится во входной проводке 2, при этом передний торец расположен рядом с рабочими валками 6; толкатель 1 контактирует с задним торцом заготовки. Входная 2 и выходная 7 проводки соосны с осью прокатки. В качестве направляющего инструмента установлены линейки 3.

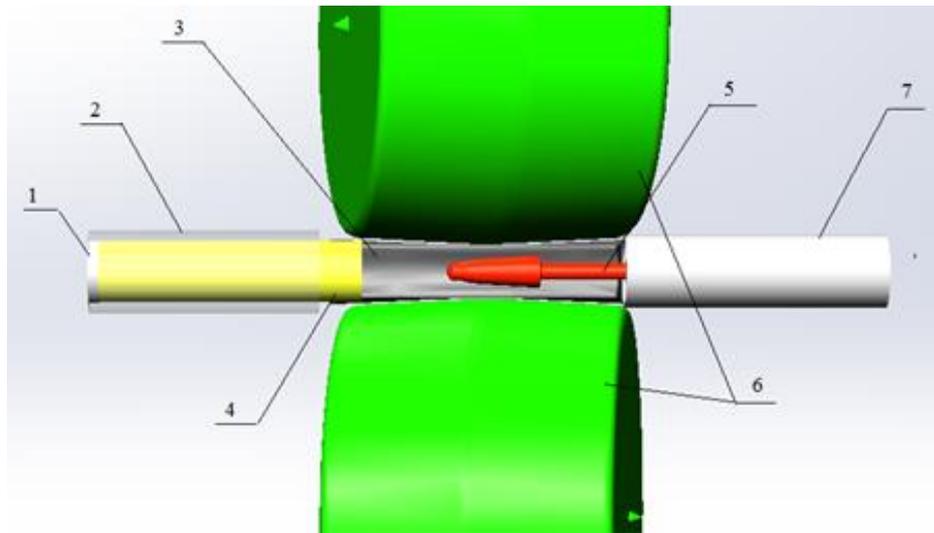


Рисунок 5.24 – Очаг деформации прошивного стана МИСиС-130Д в программе SolidWorks:  
1 – толкатель; 2 – входная проводка; 3 – направляющие линейки; 4 – заготовка; 5 – оправка; 6 –  
рабочие валки; 7– выходная проводка

Исходные данные, принятые в качестве граничных условий при моделировании представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Параметры процесса прошивки и калибровки рабочих валков опытно-промышленного стана винтовой прокатки МИСиС-130Д

Наименование параметра	Значение
Диаметр валка в пережиме, мм	420
Длина бочки валка, мм	320
Угол подачи, градусов	14
Углы наклона образующей входного конуса очага деформации, градусов	3
Углы наклона образующей выходного конуса очага деформации, градусов	3,5
Частота вращения рабочих валков, об/мин	75
Твердость рабочих валков по Бринеллю, НВ	180...190
Направляющий инструмент	Линейки
Диаметр исходной заготовки, мм	55
Размеры прошиваемой гильзы, мм	52,8
Обжатие заготовки в пережиме, %	14
Обжатие заготовки перед носком оправки, %	8
Коэффициент овализации очага деформации	1,1
Температура нагрева заготовки, °С	1150
Материал исходной заготовки	INCONEL-625
Фактор трения (по Зибелю):	
- между заготовкой и рабочими валками	1
- между заготовкой и линейкой	0,3
- между заготовкой и оправкой	0,7
Тип конечных элементов	Тетраэдры

В программе DEFORM-3D зависимость напряжения от деформации описывается уравнением:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T) \quad (5.8)$$

где  $\bar{\sigma}$  - предел текучести материала, МПа;

$\bar{\varepsilon}$  - деформация, мм/мм;

$\dot{\bar{\varepsilon}}$  - скорость деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;

$T$  - температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

Данная зависимость представлена в графическом виде на рисунке 5.25 и определяется в зависимости от температуры и скорости деформации.

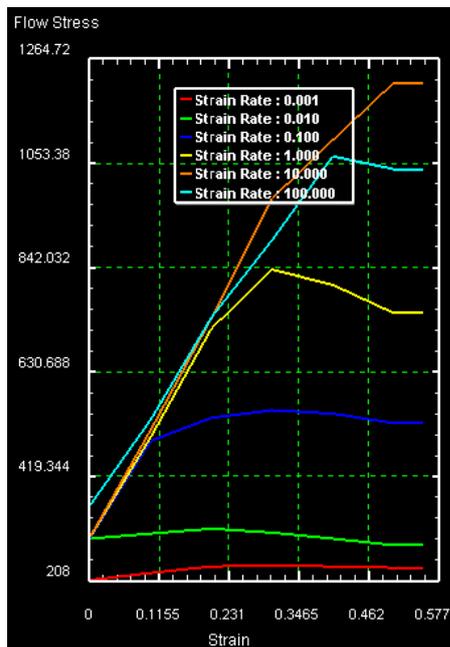


Рисунок 5.25 – Графики зависимости напряжение-деформация для сплава INCONEL-625

Для расчета износа инструмента в DEFORM-3D выбрана модель Арчарда, которая объективна для процессов горячей деформации, где абразивный износ является доминирующим:

$$W = \int K \frac{p^a v^b}{H^c} dt. \quad (5.9)$$

где  $p$  – контактное давление, МПа;

$v$  – скорость скольжения, м/с;

$H$  – твёрдость материала инструмента, HRC;

$t$  – продолжительность контакта, с;

$a, b, c, K$  – экспериментально определяемые коэффициенты (для стального инструмента  $a$  и  $b$  обычно берут равными 1,  $c = 2$ ).

Данная формула определяет скорость износа инструмента и учитывает влияние контактных напряжений, твердость поверхности инструмента, время контакта заготовки и инструмента и скольжение.

На одних рабочих валках было прокатано 5 заготовок. Анализ показывает, что после прокатки первой заготовки износ левого и правого валков неодинаков (рисунок 5.26). Вероятно, это связано с тем, что во время осевой подачи заготовки во вращающиеся валки происходит контакт сначала с левым валком, а затем с правым.

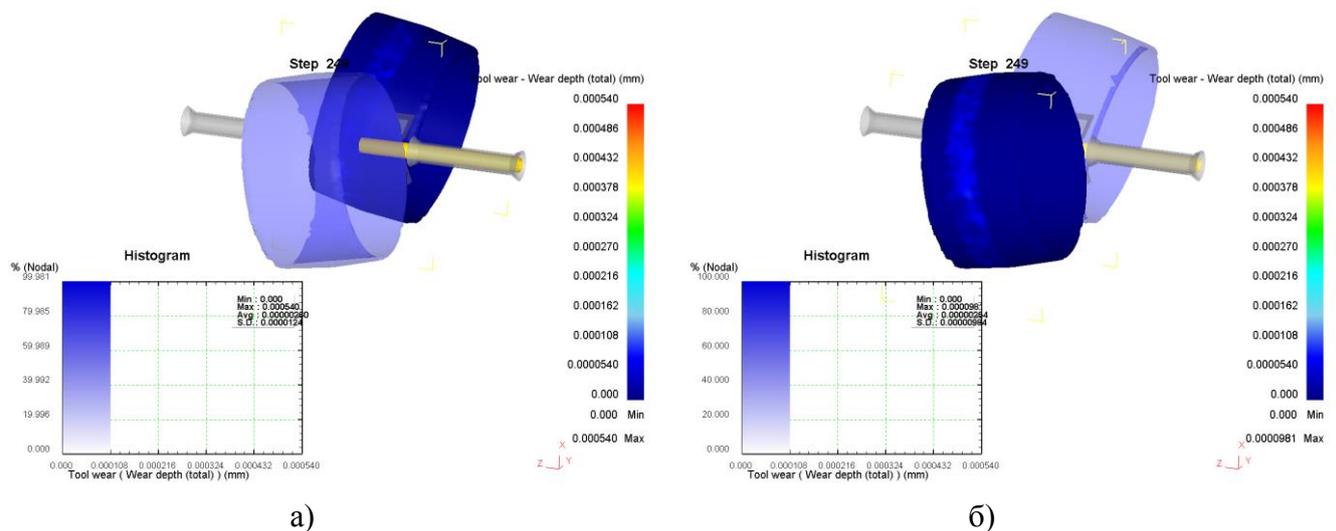


Рисунок 5.26 – Графическое отображение результатов моделирования износа входного конуса рабочих валков после прокатки первой заготовки: а – левый валок по ходу прокатки, максимальная глубина износа  $0,540 \cdot 10^{-3}$  мм; б – правый валок по ходу прокатки, максимальная глубина износа  $0,0981 \cdot 10^{-3}$  мм

После прокатки пяти заготовок максимальная глубина износа валков составила  $0,749 \cdot 10^{-3}$  мм для левого валка и  $0,384 \cdot 10^{-3}$  мм – для правого (см. рисунок 5.27). Основная зона изнашивания появилась на входном конусе валка от точки первичного захвата до середины бочки валка (участка пережима). Максимальная величина износа входного конуса левого и правого валков после прокатки пяти заготовок оказалась примерно равная и составила для левого валка 4,858 % и для правого – 4,862 % от общего числа узлов.

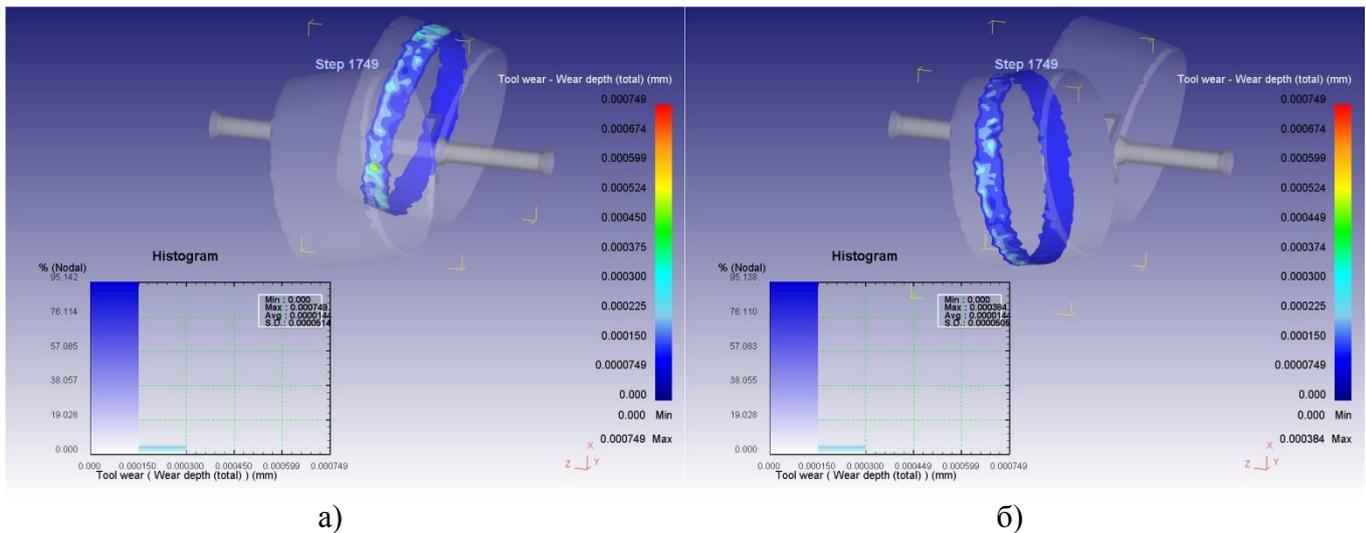


Рисунок 5.27 – Графическое отображение результатов моделирования износа входного конуса рабочих валков после прокатки пяти заготовок: а – левый валок по ходу прокатки, максимальная глубина износа –  $0,749 \cdot 10^{-3}$  мм; б – правый валок по ходу прокатки, максимальная глубина износа –  $0,384 \cdot 10^{-3}$  мм

На основании результатов моделирования были построены графики зависимости средней и максимальной глубины износа входного конуса левого и правого валков от количества прокатанных заготовок (рисунок 5.28).

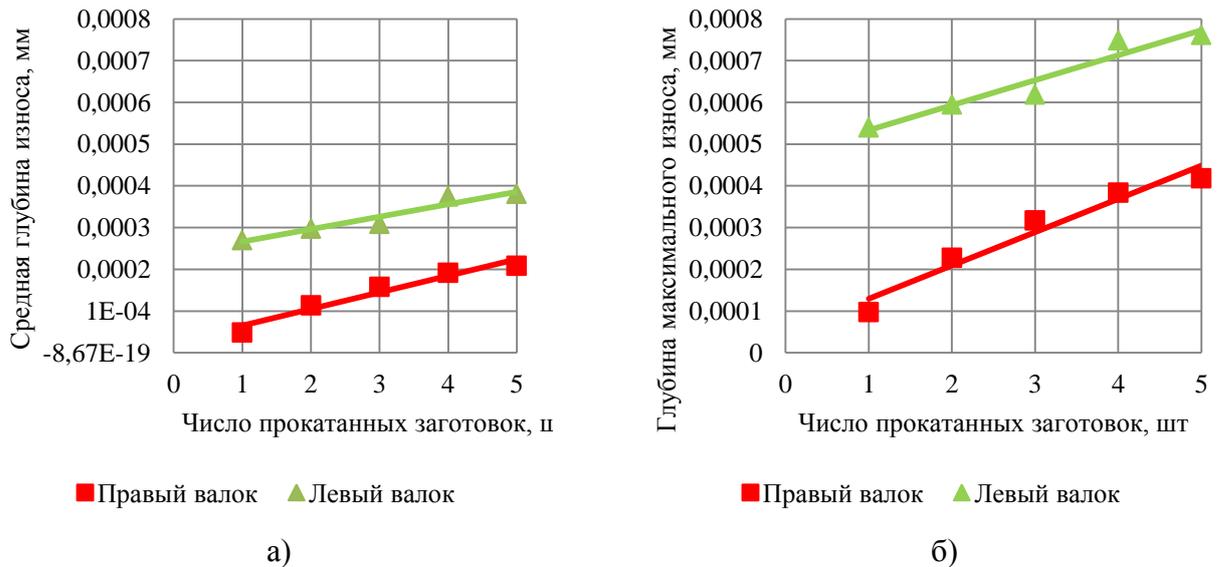


Рисунок 5.28 – Зависимость изменения средней (а) и максимальной (б) глубины износа рабочих валков стана винтовой прокатки МИСиС-130Д полученная при помощи моделирования в DEFORM-3D

Как видно из приведенных на рисунке 5.28 графиков, между средней и максимальной глубиной износа и числом прокатанных заготовок существует линейная зависимость. Благодаря этому возможно предположить ресурс работы валков прошивного стана до следующей переточки или замены.

С целью сопоставления полученных моделированием данных с износом реальных валков глубину износа определяли с помощью шаблона с разметкой валка с шагом 20 мм и щупа с точностью до 0,1 мм. Материалостойкость рабочих валков опытно-промышленного прошивного стана МИСиС-130Д при прошивке жаропрочных сплавов в объеме 150 т составила  $0,4 \text{ т/см}^3$ . Масса одной заготовки из сплава INCONEL-625 диаметром 55 мм и длиной 400 мм составляет 8,08 кг. Исходя из этих данных и линейных зависимостей глубины износа от количества прошитых заготовок, полученных по результатам моделирования, спрогнозирован износ валков после прошивки 150 т заготовок (18500 шт).

Представленное ранее в параграфах 5.1 и 5.2 изучение износа рабочих валков промышленных станов винтовой прокатки позволило установить, что наиболее интенсивное изнашивание происходит в месте встречи заготовки с валками в результате механического повреждения валка острыми кромками торца заготовки, не вращающейся в момент подачи толкателем в стан. Аналогично

максимальный износ рабочей поверхности рабочих валков стана МИСиС-130Д наблюдается во входном конусе (рисунок 5.29).



Рисунок 5.29 – Выработка исходного профиля рабочего валка стана винтовой прокатки МИСиС-130Д во входном конусе

Аналогично схеме измерения глубины износа на валках в лабораторных условиях были выполнены измерения на валках по результатам моделирования.

Графики изменения глубины износа по длине бочки левого и правого рабочих валков, полученные путём измерения и моделированием после прокатки 150 тонн заготовок, приведены на рисунке 5.30.

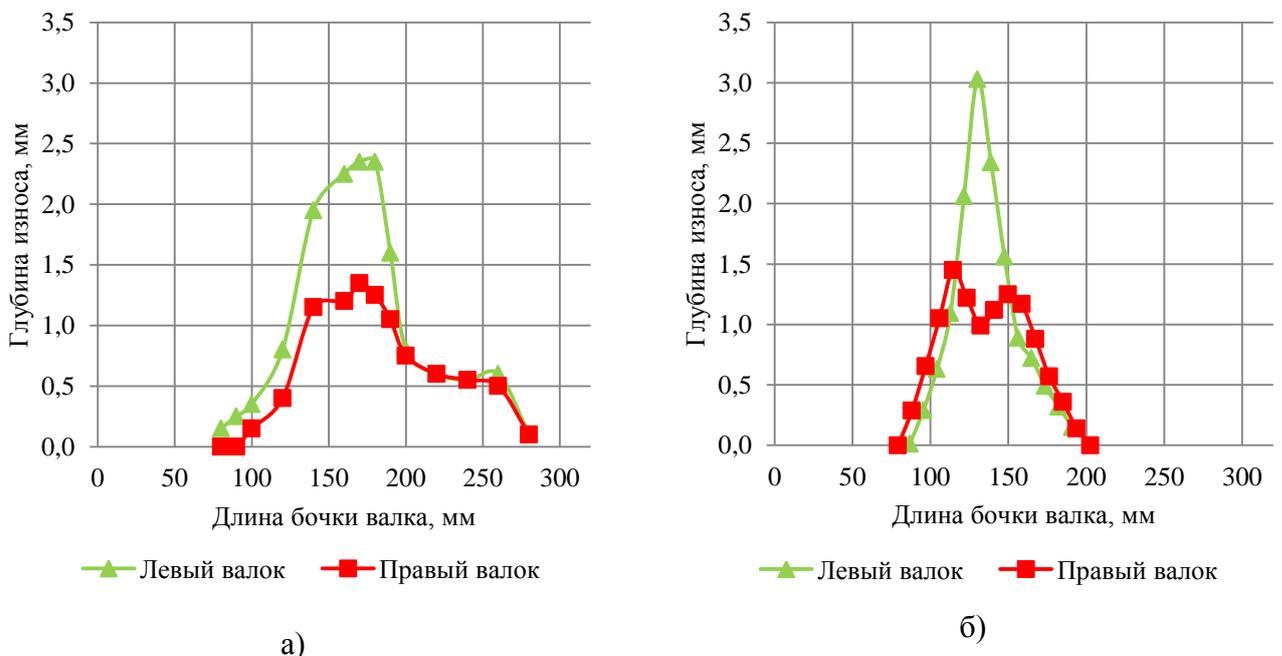


Рисунок 5.30 – Графики изменения глубины износа рабочих валков опытно-промышленного стана винтовой прокатки МИСиС-130Д на основании измерений (а) и на основании моделирования (б)

Из представленных графиков видно, что в обоих случаях характер износа левого и правого рабочего валков одинаковый, но имеет разную величину. Основной зоной на длине бочки валка, подверженной интенсивному изнашиванию, является участок входного конуса валка от точки касания заготовки с валком до его пережима. При этом глубина износа для левого валка на 42,55 % (на основании измерений) и 52,02 % (на основании моделирования) выше, что связано со спецификой первичного захвата заготовки при прокатке в двухвалковом стане. Достаточно большую разницу до 9,09 % (правый валок) и 24,07 % (левый валок) в полученных значениях износа по результатам измерения и моделирования можно объяснить некоторыми различиями радиального истечения металла в реальном процессе и при моделировании в DEFORM-3D.

Таким образом, исследованы особенности износа рабочих валков прошивных станов различного конструктивного исполнения ТПА 159-426, ТПА 50-200, МИСиС-130Д при прокатке НЛЗ больших диаметров, стальных горячекатаных заготовок и заготовок из жаропрочных сплавов. Наиболее интенсивное изнашивание происходит в месте встречи заготовки с валками в результате механического повреждения валка острыми кромками торца заготовки, не вращающейся в момент подачи толкателем в стан. Проведенные исследования показали, что материалостойкость и глубина износа рабочего инструмента имеет линейную зависимость от количества прокатанных заготовок.

Использование компьютерного моделирования при исследовании процесса прошивки в стане винтовой прокатки может быть эффективным инструментом для прогнозирования износа рабочего инструмента. Это позволяет оценить примерный ресурс работы для валков прошивных станов винтовой прокатки, используемых в промышленности.

## Выводы

1. Создана оригинальная испытательная машина (патент на полезную модель № 186293 РФ, МПК G01N 3/32. Установка для испытания образцов на знакопеременный изгиб) для реализации процесса знакопеременного пластического изгиба образцов в горячем и холодном состоянии.

2. Разработана методика испытания технологической пластичности образцов и на её основе проведены испытания стальных образцов в горячем состоянии и моделирование процесса знакопеременного изгиба, а также исследования по определению технологической пластичности НЛЗ из сталей различных марок.

3. На основании экспериментальных исследований установлено, что поверхностные и центральные части НЛЗ менее пластичны и более склонны к разрушению при знакопеременных изгибах. Цикличность в очаге деформации следует ограничить для углеродистых сталей – не более 20 циклов, для нержавеющей стали – до 15 циклов.

4. Проведено исследование износа рабочих валков прошивных станов различного конструктивного исполнения ТПА 159-426, ТПА 50-200, МИСиС-130Д и определена их материалостойкость. Разработана методика расчета показателя абразивного износа входного конуса валка в зависимости от количества прокатанного металла.

Даны практические рекомендации по диапазону наработки рабочих валков прошивного стана, обеспечивающие рациональную цикличность деформации в очаге и стабильное качество гильз и труб по состоянию поверхности.

Результаты работы использованы АО «Волжский трубный завод» в качестве практических рекомендаций диапазона наработки рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426, при корректировке таблиц прокатки и разработке настроечных параметров, обеспечивающих рациональные режимы процесса прошивки непрерывнолитых заготовок в гильзы повышенного качества по состоянию поверхности.

### Список использованной литературы

1. Дефекты стальных заготовок и металлопродукции Белорусского металлургического завода. Справочник-атлас под общей ред. А.Н. Савенка - Жлобин. 2013. - 326 с.: ил.
2. Правосудович В.В. Дефекты стальных слитков и проката: справочное издание / В.В. Правосудович, В.П. Сокуренок, В.Н. Данченко и др. - М.: Интермет Инжиниринг, 2006. - 384 с.: ил.
3. Зимовец В.Г. Современное производство стальных труб. Волжский, 1998. - 516 с.
4. Романцев Б.А, Гончарук А.В., Чже-Сун Хе Получение горячекатаных полых заготовок из легированных сталей // Производство проката. 2015. №5. С. 23–26.
5. Романцев Б.А., Гончарук А.В., Алещенко А.С., Минтаханов М.А. Получение горячекатаных труб из стали X18H10T на станах винтовой прокатки // Производство проката. 2014. №8. С. 14–17.
6. ГОСТ Р 53932-2010. Заготовка трубная. Общие технические условия. М., 2011. 23 с. (Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии).
7. Винтовая прокатка непрерывнолитых заготовок из конструкционных марок стали: учебное пособие / А.А. Богатов, Д.А. Павлов, Д.Ш. Нухов. - Екатеринбург. Изд-во Урал. Ун-та, 2017. - 164 с.
8. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. 2-е изд., доп. и перераб. - М.: Металлургия, 1990. - 334 с.
9. Колбасников Н.Г., Матвеев М.А., Зотов О.Г., Мишин В.В., Мишнев П.А., Никонов С.В. Физическое моделирование горячей пластичности микролегированной трубной стали при непрерывной разливке и горячей прокатке // Сталь. 2014. № 2. С. 59–64.
10. Неклюдов И.В., Усков Д.П., Корнев Ю.Л., Морозов В.В., Палатов И.С., Чубуков М.Ю. Совершенствование технологии разливки НЛЗ Ø410 мм из перитектических марок стали // Сборник трудов XIII Международного

конгресса сталеплавильщиков (12-18 окт. 2014 г., г. Полевской) - Полевской, 2014.

11. Фомичев, И.А. Косая прокатка / И.А. Фомичев – Харьков: Metallurgy, 1963. – 262 с.
12. Данилов Ф.А. Горячая прокатка и прессование труб / Данилов Ф.А., Глейберг А.З., Балакин Г.В. – М.: Metallurgy, 1972. – 591 с.
13. Чикалов С.Г. Производство бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки // Волгоград; комитет по печати и информации, 1999. 416 с.
14. Тетерин П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки. – М. : Metallurgy, 1971. – 368 с.
15. Алещенко А.С. Исследование и разработка методики проектирования технологического инструмента станов винтовой прокатки гильз и труб: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.05 – «Обработка металлов давлением». – Москва, 2010 г.
16. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочности твердых тел. М.: Metallurgy, 1971. 264 с.
17. Генкин В.Я., Есаулов А.Т., Староселецкий М.И., Пикус М.И., Журавлев В.А. Непрерывнолитые круглые заготовки. М.: Metallurgy, 1984. 143 с.
18. Минаев А.А., Захур М., Коновалов Ю.В. Специфика использования катаной и непрерывнолитой заготовки для производства труб // Производство проката.– 2005.– № 4.– С. 29-37.
19. Вавилкин Н.М., Белевич А.В., Бодров Д.В. Исследование теплового поля прошивной водоохлаждаемой оправки // Изв.вузов. Черная металлургия. 2010. №3. С.41–44.
20. Вавилкин Н.М., Бухмиров В.В. Прошивная оправка. М.: Издательский Дом МИСиС, 2000.128 с.
21. Романцев Б.А., Матыко О.К., Гончарук А.В., Алещенко А.С., Поливец А.В. Повышение износостойкости оправок прошивного стана // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – М. : МИСиС, 2008. №10. С. 16–19.

22. Фартушный Н.И., Романцев Б.А., Кузнецов Е.В. Повышение стойкости инструмента прошивного стана // Производство проката. 2007. №6. С. 22–25.
23. Сазоненко И.О., Земцов В.А., Юрчак А.Н. К вопросу повышения стойкости оправок прошивных станов // Литье и металлургия. 2012. № 4 (68). С. 135–138.
24. Патент № 2446024РФ, МКИВ21 В25/00. Прошивная и прокатная оправка, способ восстановления этой прошивной и прокатной оправки и технологическая линия для восстановления этой прошивной и прокатной оправки / Хидака Ясуйоси, Симода Казухиро, Накаике Коудзи, Хирасе Наоя, Хигасида Ясуто, Инаге Такатеру, Нагакита Дзюн, Накамори Масахару, Йосикава Фумихито, Хаяси Йосихико, Айсак Такаюки – заявл. 20.10.2008 г., опубл. 27.03.2012 г.
25. Шапиро И.А., Хавкин Г.О., Бродский В.М. Повышение эффективности использования оправок прошивных станов // Сталь. 2009. №9. С. 75–76.
26. Гребеник В.М., Гордиенко А.В., Цапко В.К. Повышение надежности металлургического оборудования. – М.: Металлургия, 1988. – 688 с.
27. 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.
28. Литвиненко-Арьков В.Б., Соколов Г.Н., Лысак В.И., Кязымов Ф.А. Расчет режима дуговой наплавки колеблющимся электродом оправок трубопрокатного стана // Сварка и диагностика. 2010. № 5. С. 20–24.
29. 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.
30. 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.

31. 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.
32. Белевич А.В., Матыко О.К., Алещенко А.С., Романцев Б.А., Давыдова Е.А. Анализ теплового и напряженного состояния оправки при прошивке // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. №11. С. 11–14.
33. 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.
34. Касьян В.Х., Мазур С.В. Влияние температурно-силовых условий деформации на стойкость прошивных оправок // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2003. №2. С. 57–61.
35. Чубуков М.В., 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. №1. С. 28–32.
36. Король А. В., Звонарев Д. Ю., Курятников А. В., Худяков Н. К., Сапунов С. Ю. Анализ стойкости оправок на прошивном стане Дишера // Сталь. 2011. №2. С. 59-61.
37. Serin K., Pehle H.J. Improved service life of hot forming tools in seamless tube plants // Stahl und eisen. 2014. No. 11. P.1–34.
38. Чубуков М.Ю., Руцкий Д.В., Усков Д. П., Зюбан Н. А., Палаткина Л. В. Влияние длительности эксплуатации оправок прошивного стана на структуру и состав поверхностных слоев // Черные металлы. 2016. № 11. С. 26–30.
39. Коновалов М.С., Шеногин В.П. Исследование стойкости прошивных оправок малого диаметра из сплава на основе  $Ni_3Al$  // Сб. матер. конф. «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке». – Ижевск. 2016. С. 44–50.

40. Ohnuki A., et al. Surface behavior and temperature of plug piercing of seamless steel pipe // *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1986. No. 7. P. 450–457.
41. Манегин Ю.В., Анисимова И.В. Стекло смазки и защитные покрытия для горячей обработки металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 224 с.
42. Чучвага А.П., Фискин Б.М., Фролочкин В.В., Баландина Л.А. Повышение стойкости оправок стана пресс-валковой прошивки ТПА 159-426 // *Сталь*. 2000. №2. С. 51–52.
43. Романцев Б.А., Алещенко А.С., Гамин Ю.В., Цюцюра В.Ю., Лубе И.И., Орлов М.М. Особенности износа оправок прошивного стана ТПА 159-426 при прошивке непрерывнолитых заготовок большого диаметра // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2017. №4. С. 22–31.
44. Man-soo J., Jangho L., Jae-min C., Seung-won J., Ho-keun M. Quantitative study on Mannesmann effect in roll piercing of hollow shaft // *Procedia Engineering*. 2014. № 81. P. 197–202. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.09.150.
45. Kazutake Komori, Minoru Suzuki Simulation of deformation and temperature in press roll piercing // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. № 169. pg. 259–257.
46. Ghiotti A., Fanini S., Bruschi S., Bariani P.F. Modelling of the Mannesmann effect // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2009. № 58. pg. 255–258.
47. Pater Z., Kazanecki J., Bartnicki J. Three dimensional thermo-mechanical simulation of the tube forming process in Diescher's mill // *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. № 177. pg. 167–170.
48. Шемшурова Н.Г., Антипанов В.Г., Хачин Д.В. Особенности характера износа валков и его влияние на качество профилей высокой жесткости // *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2014. №20. С. 283–290.
49. Бояршинов М.И., Заверюха В.Н., Анцупов В.П. Прогнозирование износа рабочих валков при горячей прокатке // *Сталь*. 1978. №06. С. 531–532.

50. Рычков С.С., Кинзин Д.И. Моделирование износа валков методом конечных элементов при прокатке в калибрах простой формы // Калибровочное бюро (Эл.научный журнал). 2013. Вып. 1. С. 29–43.
51. Корсаков А.А., Михалкин Д.В., Шеркунов В.Г., Никляев А.В., Ульянов А.Г. Исследование зависимости качества гильз и труб от характера износа и тянущей способности валков прошивного стана // Производство проката. 2016. №1. С. 39–43.
52. Патент SU 1796307 A1 СССР. Валок для поперечно-винтовой прокатки / Павловский Б.Г., Дюмин В.А., Ильницкий А.А., Головачук А.А., Ратнер А.Г., Уланов О.Д., Марченко И.П., Чикалов С.Г., Беломестнов А.К., Зорин Ю.А. – заявл. 08.01.1991 г., опубл. 23.02.1993 г.
53. Емельяненко П.Т. Теория косо́й и пилигримовой прокатки / Емельяненко П.Т. – М.: Металлургиздат, 1949. – 491 с.
54. Данилов Ф.А., Глейберг А.З., Балакин В.Г. Производство стальных труб горячей прокаткой. – М. : Металлургиздат, 1954. – 616 с.
55. Шевакин Ю.Ф., Глейберг А.З. Производство труб. М.: Металлургия, 1968. 440 с.
56. Романцев Б.А., Алещенко А.С., Цюцюра В.Ю., Лубе И.И. Особенности износа рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426 при прокатке непрерывнолитых заготовок большого диаметра // Производство проката. 2016. № 6. С. 20–26.
57. Romantsev V. A., Aleshchenko A. S., Tsyutsyura V. Yu, Tyshuk 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. Issue 9–10. P. 1062–1069. DOI 10.1007/s11015-017-0408-x.
58. Чекмарев, А.П. Прошивка в косовалковых станах / Чекмарев А.П., Ваткин Я.Л., Ханин М.И., Биба В.И., Кирвалидзе Н.С. – М.: Металлургия, 1967. – 240 с.

59. Романцев Б. А., Потапов И. Н., Гончарук А. В., Попов В. А. Изготовление полых профилированных заготовок. – М.: НПО «Информ ТЭИ». – 1992. – 263 с.
60. Ершов Ю.Л., Тартаковский Б.И. PQF/MPM – особенности проектирования непрерывного оправочного стана // Теория и практика металлургии. 2009. № 5/6. С. 3–14.
61. Голубчик Р.М., Меркулов Д.В., Медведев Е.К. и др. Эффективные режимы прошивки заготовок в станах различного конструктивного исполнения // Сталь. 2011. № 3. С. 41–43.
62. 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.
63. Рокотян Е.С. Прокатное производство. Справочник. Том II. М.: Металлургиздат, 1962.с.
64. Меркулов Д.В., Топоров В. А., Чепурин М. В. Особенности режимов прошивки непрерывнолитых заготовок на станах винтовой прокатки // Черные металлы. 2013. № 1. С. 18–24.
65. Голубчик Р.М., Меркулов Д.В., Медведев Е.К., Чепурин М.В., Татаркин И.А. Эффективные режимы прошивки заготовок в станах различного конструктивного исполнения // Сталь. – № 3. – 2011.– С. 41–43.
66. Романцев Б. А., Гончарук А. В., Вавилкин Н. М., Самусев С. В. Обработка металлов давлением: Учебник. – М.: Изд. Дом МИСиС. – 2008. – 960 с.
67. Dr. Krahn. Прошивка на косовалковом стане – основы и технология. SMS Meer, Германия, 2007. – 48 с.
68. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.
69. Никулин А.Н. Напряженно – деформированное состояние при винтовой прокатке и совершенствование технологии производства труб и сорта / А.Н. Никулин. – Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук – Москва, 2010 г.

70. Швечков Е.И. Нестандартные методы испытаний на трещиностойкость изделий аддитивного производства // Технология легких сплавов. 2018 № 1. С.5–9.
71. Винтовая прошивка в трубном производстве: учебное пособие / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, А.С. Алещенко. – Изд. дом НИТУ “МИСиС”, 2017 - 262 с.
72. Cabrera J.M., Mateo A., Llanes L., Prado J.M., Anglada M. Hot deformation of duplex stainless steel // Journal of Materials Processing Technology. 2003. V. 143-144. P. 321-325.
73. Galkin S.P., Romantsev B.A., Kharitonov E.A. Putting into practice innovative potential in the universal radial shear rolling process // CIS Iron and Steel Review. 2014. No. 1. P.35–39.
74. Патент на полезную модель № 186293 РФ, МПК G01N 3/32. Установка для испытания образцов на знакопеременный изгиб / Романцев Б.А., Цюцюра В.Ю., Даненко В.Ф., Алещенко А.С., Бондарь С.М. – заявл. 27.09.2018 г., опубл. 15.01.2019 г.
75. Цюцюра В.Ю., Андрианов К.А., Романец В.А. Испытательная машина для исследования влияния цикличности процесса прошивки непрерывнолитых заготовок на уровень образования дефектов поверхности горячекатаных труб. Труды XII международного конгресса прокатчиков (том 1) Сборник статей. - Москва: Грин Принт, 2019. С. 133-139.
76. Марченко К.Л., Поляков К.А, Романцев Б.А. Прошивка непрерывнолитой заготовки при повышенном обжатии // Производство проката. 2005. № 2. С. 14–17.
77. Reggio M., McKenty F., Gravel Luc, Cortes J., Morales G., Ladronde Guevara M.- A. Computational analysis of the process for manufacturing seamless tubes. Applied Thermal Engineering, 2002, № 22, 459–470.

## СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Цюцоры Владимира Юрьевича по теме «Исследование влияния технологической пластичности непрерывнолитых заготовок и износа валков при винтовой прошивке на качество труб», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.05 «Обработка металлов давлением»

Ввиду широкой области применения непрерывнолитых заготовок, одним из актуальных векторов направления развития металлургии является производство высокопрочных нефтегазопроводных бесшовных горячекатаных труб на трубопрокатных агрегатах, имеющих в своём составе высокопроизводительные прошивные станы. Винтовая прошивка осуществляется в очаге деформации в условиях сложного напряженно-деформированного состояния с циклическим знакопеременным пластическим изгибом всех слоёв металла. Дефекты, которые получаются на гильзах, при последующей пластической деформации на других станах трубопрокатного агрегата, как правило, не устраняются и остаются на готовых трубах, так как в наибольшей мере их появление обусловлено пороками исходных заготовок. К непрерывнолитой заготовке предъявляются достаточно жесткие требования по технологической пластичности, зависящей от химического состава, макроструктуры, состояния наружной поверхности, осевой ликвации, пористости и др., однако несмотря на это, отбраковка труб по внутренним и наружным плёнам достигает нескольких процентов. Наряду с совершенствованием технологии непрерывной разливки и химического состава стали, оптимальным вектором повышения уровня качественных показателей труб является ведение процессов формоизменения металла при прошивке и раскатке при рациональных режимах с учётом износа инструмента и технологической пластичности металла, которую целесообразно оценивать специальными методами, максимально приближенными к условиям на станах винтовой прокатки.

В работе Цюцоры В.Ю. были рассмотрены несовершенства формы поперечного сечения, наружной поверхности, макроструктуры непрерывнолитых заготовок используемых в промышленности, выполнены испытания механических свойств металла. Большое внимание уделено описанию механизма износа поверхности рабочих валков прошивных станов различного конструктивного исполнения и его влияние на настроечные параметры очага деформации и качество внутренней поверхности труб. С учётом полученных данных по влиянию цикличности процесса прошивки непрерывнолитых заготовок на уровень образования дефектов поверхности горячекатаных труб определено максимальное число циклов.

Полученные в диссертационной работе Цюцоры В.Ю. результаты были использованы АО «ВТЗ» в качестве практических рекомендаций диапазона наработки рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426, при переработке таблиц прокатки и разработке опытных настроечных параметров с учётом результатов экспериментальных исследований по определению рациональных режимов процесса прошивки непрерывнолитых заготовок в гильзы с повышенным качеством.

Главный инженер АО «ВТЗ»



Трутнев Н.В.

10.12.19