

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«МИСиС»

ОРЛОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДВОЙНОЙ ПРОШИВКИ
ЗАГОТОВОК НА СТАНАХ ВИНТОВОЙ ПРОКАТКИ**

05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Гончарук Александр Васильевич

Москва – 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время актуальной задачей для трубопрокатных заводов России является модернизация действующих и ввод в эксплуатацию новых высокотехнологичных трубопрокатных агрегатов (ТПА) для прокатки труб нефтяного сортамента с высокой производительностью, а также производства труб специального назначения расширенного размерно-марочного сортамента небольшими партиями. Помимо этого, в современных экономических условиях возрастает потребность в трубах с повышенными характеристиками по точности и качеству из непрерывнолитых заготовок круглого сечения унифицированных по диаметру, благодаря чему достигается существенное снижение себестоимости бесшовных труб. Отсюда возникает необходимость в разработке альтернативных схем производства труб, которые отличаются высокой технологической гибкостью, маневренностью, надежностью, меньшими капитальными затратами при строительстве.

Одним из эффективных методов получения труб широкого сортамента из углеродистых и легированных сталей является технологический процесс с использованием двойной прошивки. Достоинством технологии двойной прошивки на двухвалковых станах винтовой прокатки является возможность реализации различных схем деформирования заготовки: с «посадом», «размер в размер» и «подъемом» наружного диаметра гильзы как при первой, так и при второй стадии процесса, благодаря чему реализуется максимальная унификация диаметров исходных заготовок.

На большинстве трубопрокатных агрегатов, в особенности при производстве тонкостенных труб, прошивка заготовок осуществляется с высоким коэффициентом вытяжки за одну операцию, что негативно сказывается на качестве гильз. Особенно актуальным является снижение коэффициента вытяжки при винтовой прошивке заготовок с пониженной исходной пластичностью из высоколегированных марок стали и сплавов.

Единственным агрегатом в России, где прошивка заготовок осуществляется за две операции в одной клети винтовой прокатки, является ТПА 70-270 АО «ВМЗ», изготовленный ОАО «ЭЗТМ» в 2008 г. На прошивном стане в качестве направляющего инструмента используются линейки из низкоуглеродистой стали с наплавкой рабочей поверхности износостойким жаропрочным материалом. Процесс двойной прошивки осуществляется при неизменной настройке очага деформации за исключением сменяемых между операциями оправок. Поэтому при такой схеме прокатки необходимо уделять особое внимание износостойкости линеек, так как направляющий инструмент испытывает повышенные термоциклические нагрузки.

Основной продукцией ТПА 70-270 являются трубы – муфтовые заготовки. До настоящего времени в производстве этих труб для получения требуемого комплекса механических свойств использовалась дорогостоящая предварительно деформированная заготовка из-за относительно невысоких суммарных коэффициентов вытяжки, в пределах 2,5-3,5. Сквозной расходный коэффициент металла (РКМ) при производстве муфт в большой степени зависит от точности геометрических размеров и качества внутренней и наружной поверхности труб. Себестоимость производства в значительной мере обусловлена РКМ и стоимостью исходных заготовок, в связи с чем для повышения эффективности является актуальным переход на более дешевую непрерывнолитую заготовку при условии использования технологии, обеспечивающей достижение заданных механических свойств.

Цели и задачи работы.

Целью работы является совершенствование режимов прокатки при двойной прошивке заготовок на основании комплексных исследований процесса, позволяющее повысить качество бесшовных труб.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

– провести теоретические и экспериментальные исследования геометрических, температурных, энергосиловых и кинематических параметров технологии двойной прошивки;

– разработать рекомендации по распределению коэффициентов вытяжки между первой и второй прошивкой для обеспечения минимальной разностенности труб;

– разработать калибровки технологического инструмента и режимы прокатки труб из непрерывнолитых заготовок, позволяющие при относительно невысоких суммарных коэффициентах вытяжки, проработать литую структуру по всей толщине стенки и обеспечить уровень механических свойств, необходимый для муфтовых труб;

– разработать технические решения по увеличению износостойкости направляющих линеек прошивного стана и снижению дефектов наружной поверхности труб.

Научная новизна работы.

Получены следующие результаты, имеющие научную новизну:

– разработан новый способ прокатки заготовок на основе рационального распределения деформации между операциями первой и второй прошивки при заданном суммарном коэффициенте вытяжки;

– установлено влияние распределения деформации между операциями двойной прошивки на разностенность гильз;

– разработаны режимы прокатки толстостенных труб из непрерывнолитых заготовок стали марки Д при относительно невысоких суммарных коэффициентах вытяжки ($\mu_{\Sigma} = 3,46 \dots 4,17$), позволяющие проработать литую структуру заготовок и получить заданные механические свойства;

– для повышения износостойкости инструмента разработан и апробирован способ прошивки с подачей охладителя на рабочую поверхность линеек непосредственно в процессе деформации;

– выполнено компьютерное моделирование формоизменения металла в очаге деформации при использовании линеек новой конструкции, результаты которого подтверждены экспериментально.

Практическая значимость и реализация работы.

Проведено промышленное опробование технологических режимов прокатки труб и калибровок технологического инструмента, позволяющих повысить точность проката, снизить энергосиловые параметры процесса при производстве максимального типоразмера труб в условиях ТПА 70-270 АО «ВМЗ».

На основании теоретических и экспериментальных исследований определены условия ведения двойной прошивки заготовок с сохранением необходимого уровня температуры гильз перед последующими стадиями деформации.

Проведены опытные прокатки труб из НЛЗ двух типоразмеров, в результате которых получен заданный уровень механических свойств после прокатного нагрева без дополнительной термообработки.

Разработана и апробирована новая конструкция линеек прошивного стана, позволяющая повысить их износостойкость и снизить уровень дефектов наружной поверхности гильз.

Методы исследования и достоверность результатов

Выводы, рекомендации и разработанные технологии, представленные в работе, имеют теоретическое и практическое значение, основанное на экспериментальных прокатках в промышленных условиях, а также статистической обработке экспериментальных данных и компьютерном моделировании.

Измерение геометрических параметров гильз и труб осуществлялось поверенным контактным мерительным инструментом. Измерение температурных параметров осуществлялось бесконтактным способом при помощи тепловизора. Анализ результатов экспериментального исследования включает данные по настройке прошивного стана, замерам разностенности гильз после первой и второй стадий деформации, показателям энергосиловых параметров, полученных с частотных преобразователей главного привода, фотоматериалы. Исследование микроструктуры образцов от труб проводили на инвертированном микроскопе «AxioObserver D1m» с программным обеспечением «ThixometPro».

Компьютерное моделирование технологии двойной прошивки проводилось в программе QFORM 3D. Проверка адекватности результатов компьютерной модели осуществлялась на основании результатов экспериментальных прокаток в промышленных условиях на ТПА 70-270 АО «ВМЗ».

Вычислительные операции осуществлялись, при помощи программ MS Excel и ibaAnalyzer.

Апробация работы.

Результаты работы были представлены и обсуждены на XII международном конгрессе прокатчиков (Выкса, 2019); XI научно-практической конференции молодых специалистов ОМК (Выкса, 2018); XII научно-практической конференции молодых специалистов ОМК (Выкса, 2019); третьей международной научно-технической конференции "Павловские чтения" (Москва, 2021); VIII региональной межвузовской научно-практической конференции (Выкса, 2021).

Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС». Методика расчета параметров двойной прошивки, построения очага деформации используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлениям 15.03.02 «Технологические машины и оборудования», 22.03.02 «Металлургия» и магистров по направлениям 15.04.02 «Технологические машины и оборудования», 22.04.02 «Металлургия» на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС».

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 13 печатных работ, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ. Опубликованные статьи входят в реферативные и библиографические базы данных РИНЦ и Scopus. По результатам работы, получено четыре патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений, изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков, 23 таблицы, библиографический список из 83 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности работы, поставлена её цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна, практическая значимость, указаны основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор научно-технической литературы, связанный с точностью геометрических размеров гильз после прошивки и трансформацией разностенности гильз при последующих операциях деформирования. Представлены основные результаты и выводы ранее проводимых исследований по влиянию коэффициента вытяжки при прошивке на качество гильз, скоростные и энергосиловые параметры процесса. Рассмотрены особенности прошивки непрерывнолитой заготовки. Приведен обзор различного вида направляющего инструмента двухвалковых станов винтовой прокатки и его влияние на параметры процесса прошивки и качество гильз, а также отмечены основные способы повышения износостойкости направляющих линеек.

Анализ научно-технической литературы по винтовой прошивке в двухвалковом стане позволил сделать следующие выводы:

1. Теоретические и экспериментальные исследования свидетельствуют о негативном влиянии увеличения коэффициента вытяжки при прошивке на качество наружной и внутренней поверхности гильз, стойкость технологического инструмента и энергосиловые параметры процесса.

2. На практике увеличение коэффициента вытяжки при прошивке свыше 3 приводит к резкому возрастанию уровня отбраковки труб по наружным пленам. Тем не менее, на многих трубопрокатных агрегатах при производстве тонкостенных труб применение больших коэффициентов вытяжки при прошивке является вынужденной мерой.

3. В научно – технической литературе технология двойной прошивки освещена недостаточно. Однако, ее применение с теоретической и практической точек зрения очевидно позволит решить ряд актуальных проблем трубопрокатного производства.

4. Несомненный интерес представляет изучение возможности проработки литой структуры металла при производстве толстостенных труб с относительно малыми суммарными коэффициентами вытяжки.

5. На качество наружной поверхности гильз, стабильность ведения процесса прошивки и эффективность использования оборудования существенное влияние оказывает стойкость направляющего инструмента прошивного стана, при этом в технической литературе опубликовано мало исследований, посвященных износу направляющих линеек.

Во второй главе представлена методика проектирования технологического инструмента и очагов деформации при двойной прошивке заготовок в одной клетки винтовой прокатки с помощью разработанных в системе трехмерного моделирования параметрических моделей прокатного инструмента и параметрической 3D сборки очага деформации прошивного стана ТПА 70-270, а также методика компьютерного моделирования двойной прошивки в программе QFORM 3D.

Использование разработанных параметрических моделей, позволяет:

- оперативно проектировать новый технологический инструмент прошивного стана и разрабатывать рациональные режимы деформирования при прошивке;
- проектировать 3D твердотельные сборки очага деформации для последующего моделирования методом конечных элементов.

Методика решения задач с помощью компьютерного моделирования, включает:

- разработку модели процесса двойной прошивки в QFORM 3D;
- проведение исследования реального объекта моделирования;
- проверку адекватности результатов компьютерного моделирования;
- исследование формоизменения металла и различных параметров процесса при двойной прошивке с применением нового технологического инструмента и режимов деформирования.

Для проверки адекватности модели выбраны:

- геометрические параметры гильз и параметры формоизменения металла в очаге деформации;
- энергосиловые параметры процесса;
- машинное время операций первой и второй прошивки.

Проверка адекватности компьютерного моделирования процесса двойной прошивки в QFORM осуществлялась путем сравнения параметров реального процесса с параметрами компьютерного моделирования согласно ГОСТ 57412-2017. Для проверки адекватности модели осуществлена экспериментальная прокатка труб размером 194,5x15,9 мм из стали 45 с различным распределением коэффициентов вытяжки между операциями двойной прошивки на прошивном стане ТПА 70-270 АО «ВМЗ».

В процессе прокатки фиксировали энергосиловые параметры процесса и геометрические параметры гильз, аналогичные параметры выбирали при анализе результатов компьютерного моделирования.

На рисунке 1 представлены параметры процесса прошивки заготовки диаметром 190 мм в гильзы размером 178x50 мм для дальнейшего передела в трубы 194,5x15,9 мм.

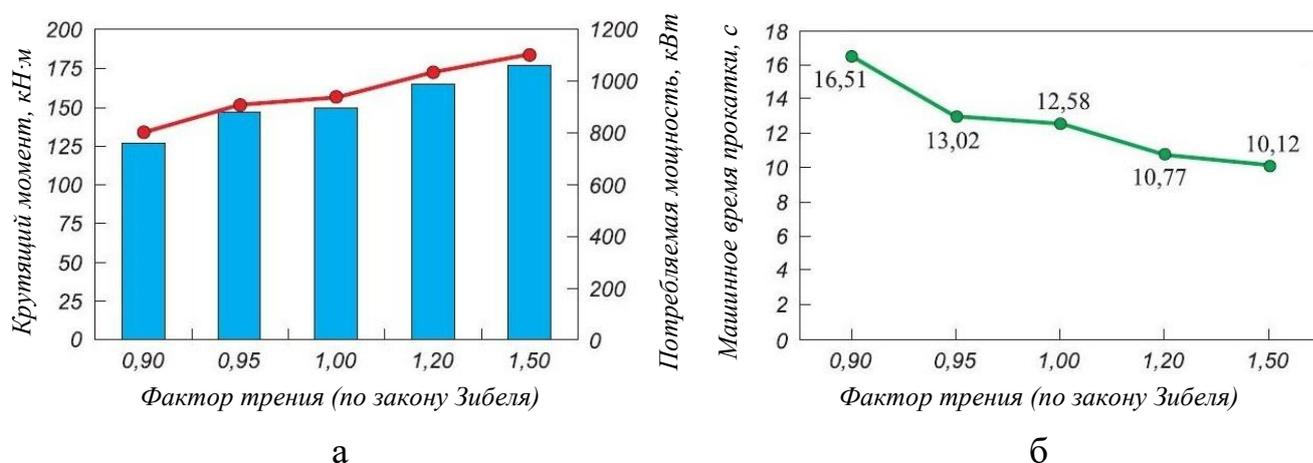


Рисунок 1 – Зависимость изменения параметров прошивки от фактора трения:

а – крутящего момента (■) и потребляемой мощности (—);

б – машинного времени прошивки (—).

Установлено, что изменение условий трения между рабочим инструментом и заготовкой при моделировании существенно влияет на значение энергосиловых параметров и время прошивки. Следовательно, достоверность результатов расчета, в особенности при проведении количественного анализа, во многом зависит от граничных условий, реальную величину которых определить затруднительно (флуктуация температуры нагрева, величину износа и реальный коэффициент трения на границе металл - инструмент и др.). Поэтому для получения результатов расчета с приемлемой точностью, необходима верификация разработанной модели путем сопоставления параметров процесса моделирования с результатами опытных прокаток в промышленных условиях.

Разработка калибровок технологического инструмента и новых режимов прошивки на ТПА 70-270 в дальнейшем осуществлялась с помощью верифицированной модели.

В третьей главе описаны: методика проведения и результаты экспериментального исследования геометрических, температурных, энергосиловых и кинематических параметров процесса двойной прошивки предварительно деформированных заготовок на ТПА 70-270 АО «ВМЗ».

Для оценки величины разностенности и теплового состояния гильз, энергосиловых и кинематических параметров процесса при прокатке труб ранее указанного размера из стали марки Д, деформирование вели по пяти различным маршрутам при одинаковом расстоянии между валками и линейками:

- обжатие заготовки в пережиме, $U_{\Pi} = 11,5\%$;
- обжатие заготовки перед носком оправки, $U_0 = 5\%$;
- коэффициент овализации в пережиме, $\xi = 1,13$.

В рамках эксперимента изменяли распределение коэффициента вытяжки между первым и вторым проходами, используя оправки различного диаметра при первой прошивке. Суммарный коэффициент вытяжки был равен 2,76. При прошивке заготовок для первой группы труб коэффициент вытяжки составлял 1,35 в первом проходе и 2,05 во втором. Последующие группы труб прокатывали с увеличением коэффициента вытяжки в первом проходе, соответственно

коэффициент вытяжки во втором проходе уменьшали. Последняя группа труб была изготовлена за одну операцию прошивки с коэффициентом вытяжки 2,76.

В рамках эксперимента было прокатано 42 трубы и произведено 2320 измерений толщины стенки на различных стадиях процесса. Результаты измерений обрабатывали по методике М.Ф. Столетнего и Е.Д. Клемперта, которая включает определение статистических характеристик и позволяет оценить влияние деформационных параметров на точность труб.

На рисунке 2 представлена диаграмма вклада составляющих в общую относительную разностенность труб, прокатанных по различным маршрутам прокатки.

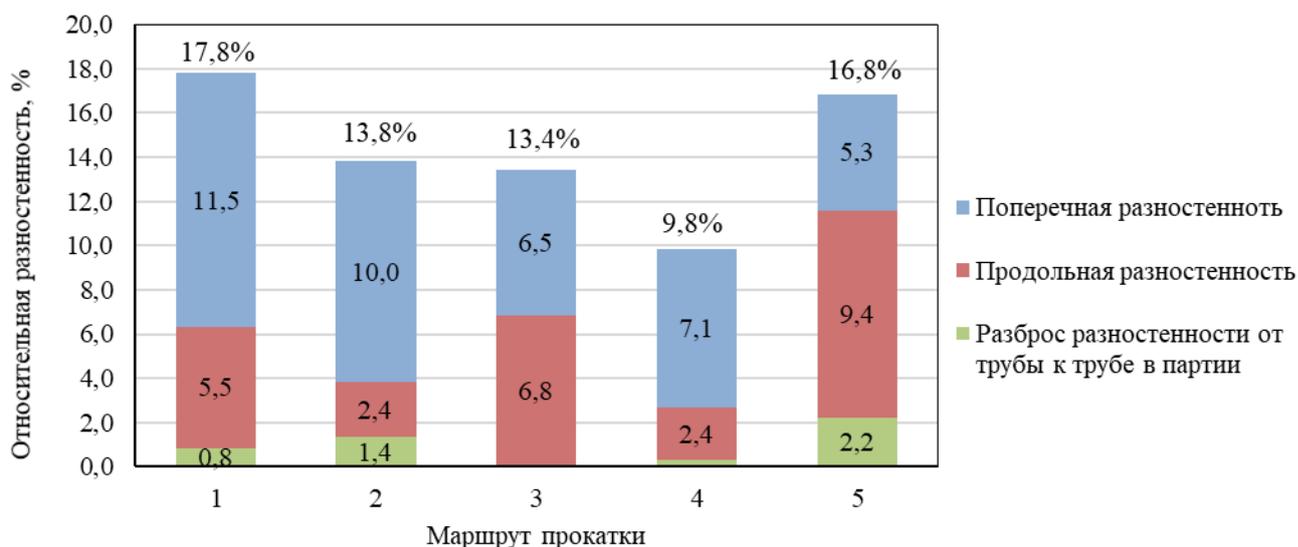


Рисунок 2 – Вклад отдельных составляющих в общую относительную разностенность труб, прокатанных по различным маршрутам прокатки.

Анализ диаграммы, свидетельствует о существенном снижении разностенности труб, прокатанных по 4 маршруту прокатки с двойной прошивкой при отношении $\mu_1/\mu_2 = 1,38$. Относительная разностенность труб, прокатанных по этому варианту, составляет 9,8%. Для сравнения относительная разностенность труб, полученных за одну операцию прошивки (5-ый маршрут), составляет 16,8%.

Большинство исследователей едины во мнении, что величина отклонении толщины стенки проката при последующих операциях, на которых происходит ее

деформация, определяется двумя одновременно происходящими процессами. С одной стороны, происходит частичный перенос исходной разностенности, полученной в результате предыдущей операции. С другой, возникают новые отклонения, связанные с особенностями и спецификой текущего технологического процесса (наведенная разностенность).

Величина наведенной разностенности, образующаяся при второй прошивке, рассчитывается по формуле (1):

$$\delta_k = \sqrt{\delta_{\Delta S}^2 - (\psi^2 / \psi_0^2) C^2 \delta_{\Delta S_0}^2}, \quad (1)$$

где $\delta_{\Delta S} = \Delta S / S$ и $\delta_{\Delta S_0} = \Delta S_0 / S_0$ – относительная поперечная разностенность гильз после второй и первой прошивок соответственно;

ψ, ψ_0 – коэффициенты, зависящие от доли гранености в поперечной разностенности гильз после второй и первой прошивок соответственно;

C – коэффициент переноса, вычисляемый по формуле (2):

$$C = \frac{(D_0/S_0) - 2}{(D/S) - 2} \frac{(D/S) - 1}{(D_0/S_0) - 1} \left[\frac{1 - u}{k^2} \frac{(D/S) - 1}{(D_0/S_0) - 1} + u \right], \quad (2)$$

где $k = \bar{S}_0 / \bar{S}$ – коэффициент уменьшения толщины стенки;

u – коэффициент, учитывающий долю участков, получивших одинаковую вытяжку.

В результате обработки экспериментальных данных, относительная поперечная разностенность, наведенная после первой прошивки составила от 4,45 до 5,70%. При этом ее зависимость от коэффициента вытяжки не линейна, а минимум наблюдается при прокатке труб, полученных с $\mu_1 = 1,81$, по 3 маршруту. Относительная поперечная разностенность гильз после второй прошивки, на основании обработки экспериментальных данных, увеличилась и составила от 4,84 до 7,00%.

Результаты расчета относительной поперечной разностенности представлены на рисунке 3.

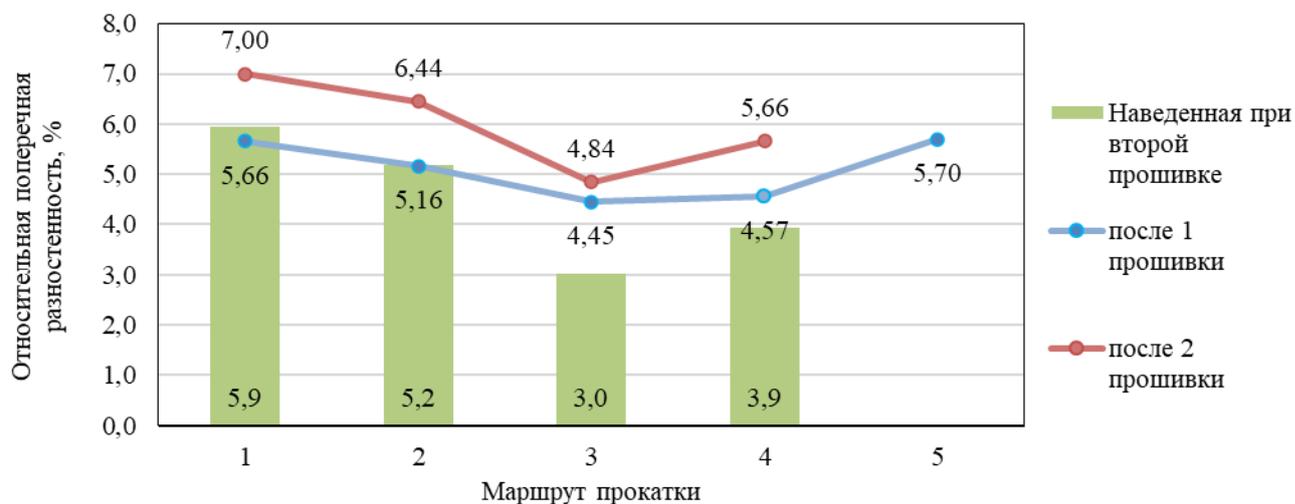


Рисунок 3 – Результаты расчета относительной поперечной разностенности для гильз после первой и второй прошивки и вклада наведенной разностенности.

Согласно методике М.Ф. Столетнего и Е.Д. Клемперта, окончательная поперечная разностенность гильз, прокатанных по третьему маршруту равная 4,84%, получена в результате суммирования наведенной разностенности при второй прошивке и частично перенесённой исходной разностенности, которые равны 3,0% и 1,84% соответственно.

В результате проведенных исследований установлено, что двойная прошивка заготовок приводит к снижению разностенности гильз по сравнению с прошивкой за одну операцию. Для минимизации разностенности гильз предложен способ двойной прошивки заготовок на основе расчета рационального распределения деформации между операциями с использованием заданного суммарного коэффициента вытяжки.

Поскольку двойная прошивка осуществляется без подогрева гильзы между проходами расчет параметров формоизменения необходимо выполнять с учетом реальной температуры металла до и в ходе прокатки.

Для оптимизации температурного режима в процессе двойной прошивки выполняли исследования температурного состояния гильз.

Исследования проводили с использованием настроенного и верифицированного тепловизора MIKRON M7604F, температуру при двойной прошивке фиксировали на трех стадиях:

- заготовки в момент передачи ее на входную сторону прошивного стана;
- гильзы после первой прошивки на входной стороне перед вторым проходом;
- гильзы после второй прошивки на выходной стороне прошивного стана.

В группе, состоящей из трех гильз, каждую из них прокатывали с различной частотой вращения валков прошивного стана 40,50 и 60 об/мин.

На рисунке 4 представлены результаты измерения температуры гильзы после первой прошивки, прокатанной при частоте вращения валков 60 об/мин из третьей группы.

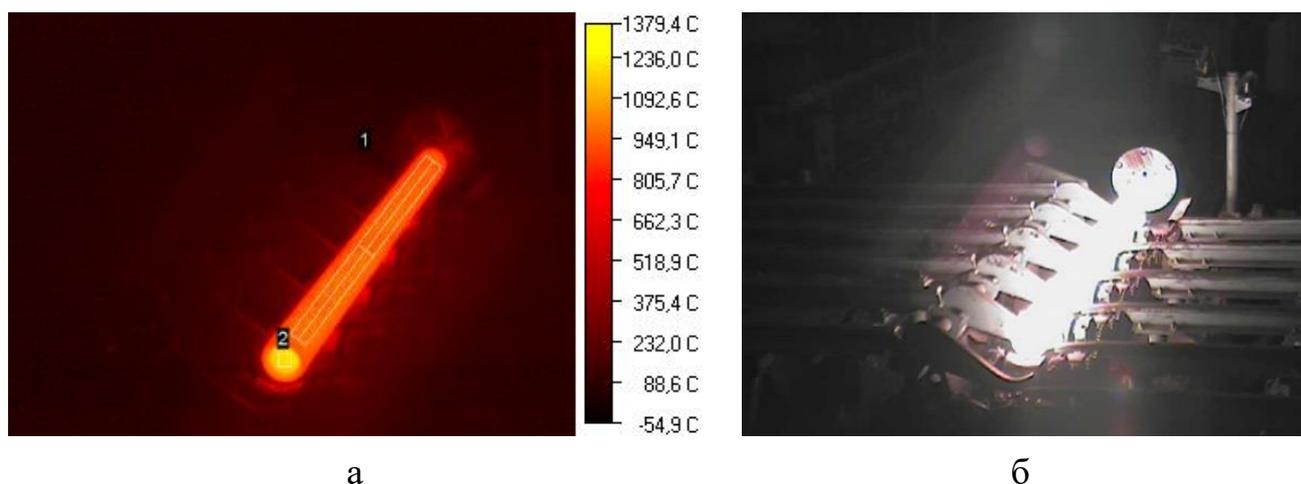


Рисунок 4 – Тепловое состояние гильзы:

- а – тепловое изображение;
- б – визуальное изображение.

На рисунке 5 представлены графики температуры наружной поверхности гильз после второй прошивки для 1 – 4 группы и прошивки в один проход для 5 группы труб в зависимости от частоты вращения валков. На графиках указан временной промежуток между моментом выхода заготовки из печи и временем фиксации температуры.

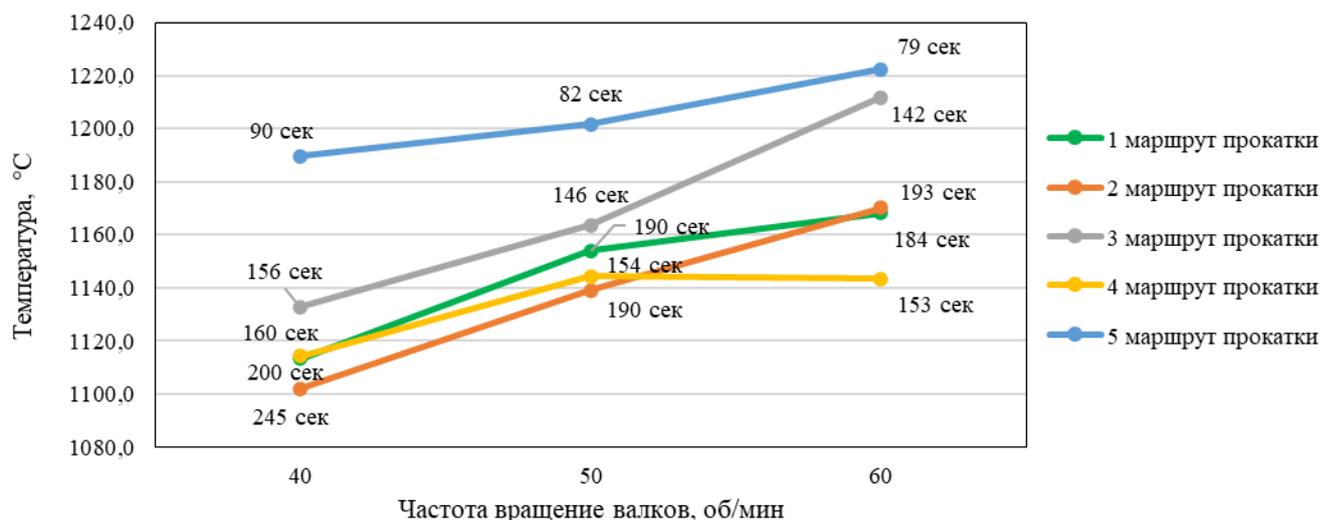


Рисунок 5 – Температура наружной поверхности гильз после второй прошивки для 1 – 4 групп и после прошивки в один проход для 5 группы:

На основании экспериментальных данных определены условия ведения процесса двойной прошивки с одного нагрева с сохранением необходимого уровня температур гильз перед последующими стадиями деформирования. На основе результатов исследования температурного состояния металла установлено, что увеличение частоты вращения валков является эффективным способом повышения температуры гильз. Также следует отметить, что деформационный разогрев может полностью компенсировать вынужденные потери тепла в процессе двойной прошивки за счет интенсификации процесса деформирования, рационального распределения коэффициентов вытяжки между проходами, а также снижения тепловых потерь при вспомогательных операциях.

При исследовании технологии двойной прошивки заготовок проводилась оценка кинематических и энергосиловых параметров прокатки.

Расход энергии главного привода прошивного стана рассчитывали, как интеграл по времени от мгновенной мощности по формуле (3):

$$W = \int_{t_0}^{t_1} N dt, \quad (3)$$

где N – мгновенная мощность главного привода.

На рисунке 6 представлены графики мощности двух асинхронных двигателей главного привода и расход энергии при прокатке трех гильз, прокатанных по второму маршруту прокатки.

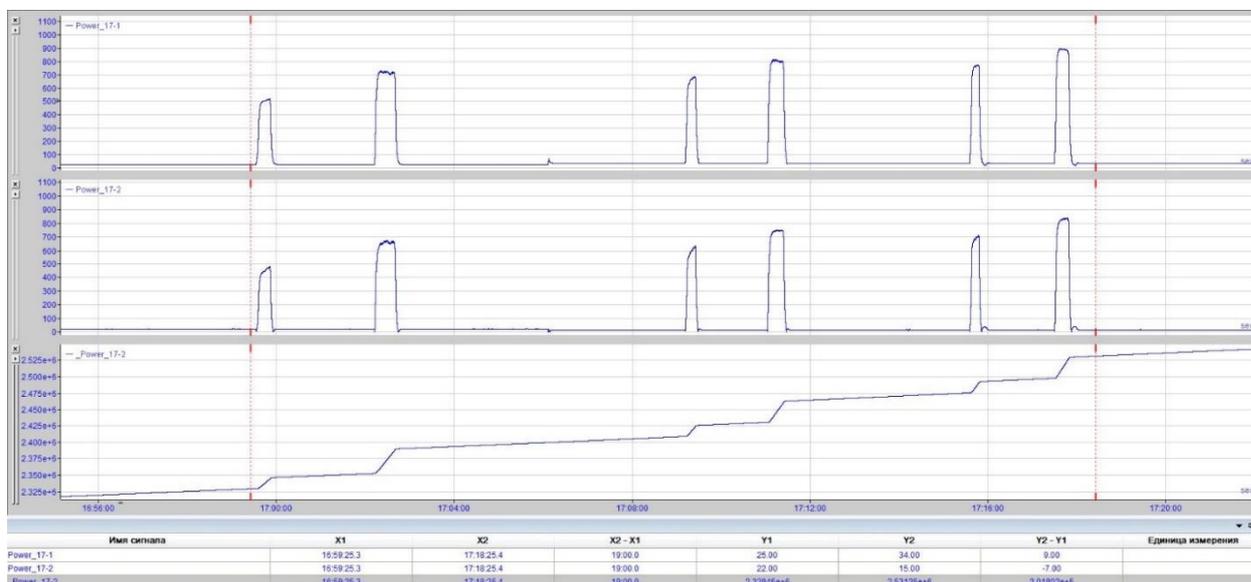


Рисунок 6 – Потребляемая мощность главного привода при прокатке гильз по второму маршруту прокатки с двойной прошивкой.

В таблице 1 приведены результаты расчета удельного расхода энергии для гильз, прокатанных по различным маршрутам прокатки.

Таблица 1 – Результаты расчетов потребляемой мощности.

Маршрут прокатки	1	2	3	4	5
Удельный расход энергии a , кВт·ч/тн	41,6	41,5	42,7	39,3	31,9

Для оценки скоростных условий процесса прошивки при различной частоте вращения валков определяли условный коэффициент осевой скорости, который не уменьшался при повышении частоты вращения валков и в среднем составил 0,82, что свидетельствует об отсутствии повышения скольжения металла в осевом направлении при увеличении частоты вращения валков в исследуемом диапазоне как при первой, так и при второй прошивке.

На основе проведенных исследований в промышленных условиях разработаны режимы прокатки с рациональным распределением коэффициентов вытяжки между проходами при двойной прошивке и получен патент «Способ винтовой прошивки» номер 2741037 от 22.01.2021 г.

В четвертой главе представлены результаты промышленного опробования новых режимов прокатки труб из непрерывнолитых заготовок, позволяющие при относительно невысоких суммарных коэффициентах вытяжки проработать литую структуру по всей толщине стенки и обеспечить высокий уровень механических свойств труб.

Для проработки литой структуры и снижения растягивающих напряжений перед носком оправки была разработана технология двойной прошивки в одной клетке винтовой прокатки применительно к ТПА 70-270 АО «ВМЗ» (рисунок 7).

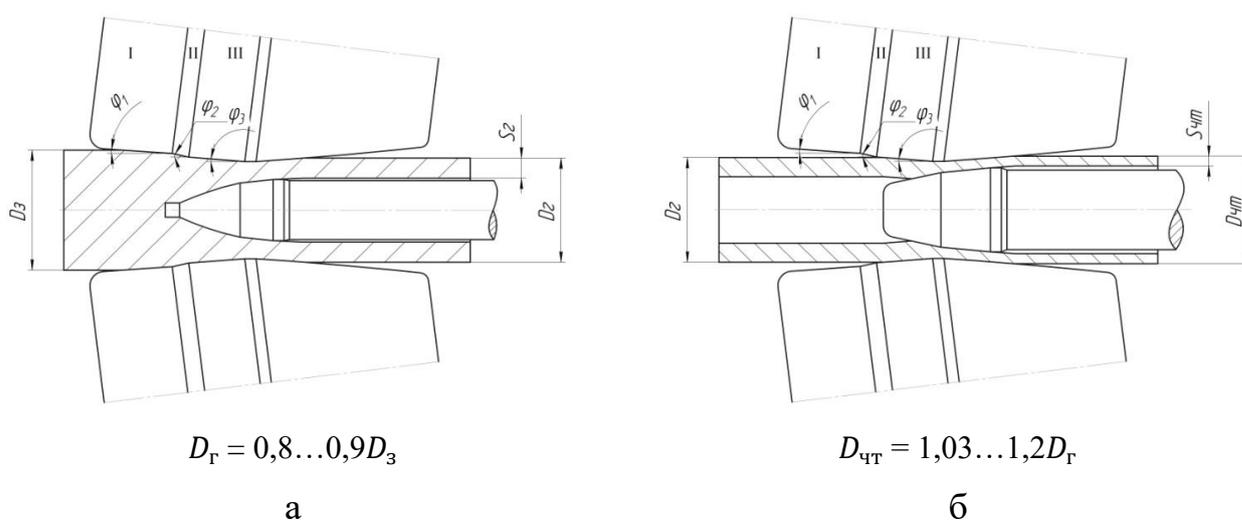


Рисунок 7 – Схема очагов деформации:

а – при первой прошивке;

б – при второй прошивке.

Для реализации нового способа прокатки был спроектирован технологический инструмент: рабочие валки, оправки и разработана таблица прокатки.

Первая прошивка осуществляется с существенным «посадом» заготовки по диаметру. Вторую прошивку, напротив, осуществляют с «подъемом» диаметра

гильзы для увеличения накопленной степени деформации и устранения литой структуры металла.

Для реализации разработанной технологии входной конус валков снабжен тремя участками. Первый участок с углом наклона образующей $\varphi_1 = 2^\circ 30'$ обеспечивает стабильный первичный захват заготовки при первой прошивке. Второй участок с $\varphi_2 = 12^\circ$ предназначен для интенсивного обжатия заготовки по диаметру. Третий участок входного конуса валков с $\varphi_3 = 4^\circ$ предназначен для обеспечения стабильного захвата гильзы при второй прошивке, соответственно первый и второй участок при этой технологической операции не используются.

Разработанная технология включает в себя следующие параметры:

- “посад” гильзы после первой прошивки по диаметру на 13...14 %, при величине обжатия заготовки в пережиме валков $U_{\text{п}} = 19...20\%$;
- обжатие перед носком оправки U_0 не превышает 5%, что при угле подачи $\beta = 12^\circ$ способствует минимизации растягивающих напряжений в центре заготовки и уменьшает склонность металла НЛЗ к центральному разрушению перед носком оправки;
- “подъем” черновой трубы после второй прошивки по диаметру относительно диаметра гильзы равный 3...9%, при величине обжатия гильзы в пережиме валков $U_{\text{п}} = 7\%$;
- коэффициент овализации составляет 1,10;
- проработка структуры происходит благодаря увеличению суммарного коэффициента вытяжки за две операции и увеличенной накопленной степени деформации;
- оправка для второй прошивки выполнена с удлиненным раскатным конусом, что способствует повышению точности черновых труб перед калиброванием и уменьшению глубины винтового следа;
- распределение деформаций между операциями способствует повышению точности труб и выглаживанию наружной и внутренней поверхности.

Опробование разработанной технологии проводилось на ТПА 70-270 при экспериментальных прокатках труб двух типоразмеров:

- 166,0x16,9 мм, из НЛЗ диаметром 196 мм, $\mu_{\Sigma} = 3,73$;
- 187,7x17,0 мм, из НЛЗ диаметром 220 мм, $\mu_{\Sigma} = 4,08$.

На рисунке 8 и в таблице 2 представлены результаты лабораторных исследований макроструктуры исходных непрерывнолитых заготовок.



а



б

Рисунок 8 – Фото образцов НЛЗ после глубокого травления:

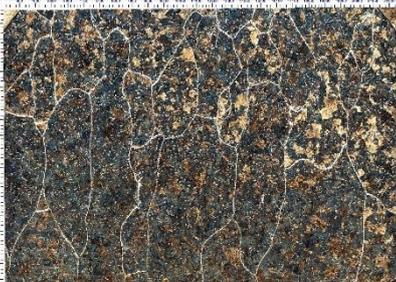
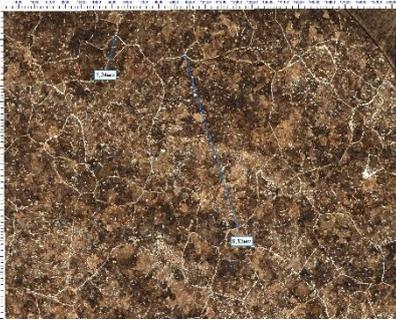
а – диаметр 196 мм; б – диаметр 220 мм.

Таблица 2 – Дефекты макроструктуры НЛЗ

Дефекты макроструктуры, согласно ГОСТ Р 58228-2018		Диаметр заготовки, мм	
		196	220
Центральная пористость	Балл	0,5	0,5
Осевая ликвация		0	0,5
Ликвационные полосы и трещины по сечению		0	0
Ликвационные полосы и трещины осевые		0	0
Светлая полоса (контур)		0	0
Краевое точечное загрязнение		0	0

В процессе металлографических исследований НЛЗ было выявлено три зоны, характерные для непрерывнолитой заготовки (таблица 3).

Таблица 3 – Микроструктура исходных НЛЗ.

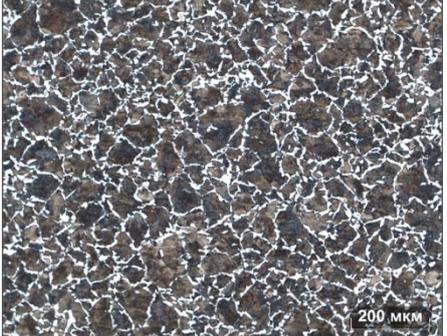
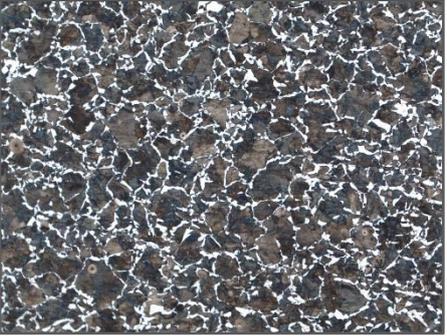
	Ø 196,0 мм, сталь марки 35ГС		Ø 220,0 мм, сталь марки 40Г	
	Фото (x25)	Размер зерна	Фото (x25)	Размер зерна
Ø		от 0,41 мм до 3,54 мм		от 0,21 мм до 1,24 мм
1/4 Ø		по длине: от 4,24 мм до 10,90 мм; по ширине: от 1,31 мм до 4,79 мм		по длине: от 0,81 мм до 7,97 мм; по ширине: от 0,41 мм до 2,32 мм
1/2 Ø		от 1,24 мм до 9,13 мм		от 1,04 мм до 6,04 мм

Интенсивное охлаждение заготовок в кристаллизаторе способствует образованию зоны мелких, хаотично ориентированных кристаллитов, формирующих поверхностный слой. В результате усадки и отхода заготовки от стенок кристаллизатора с образованием зазора, скорость затвердевания уменьшается что способствует росту кристаллов. Эти кристаллы растут перпендикулярно наружной поверхности, образуя зону столбчатых кристаллов крупного размера. По мере роста крупных дендритов направленный теплоотвод в центральных частях заготовок ослабевает, что способствует интенсивному росту кристаллов в разных направлениях. Появляется центральная зона крупных разноориентированных кристаллов.

Проведенные экспериментальные прокатки свидетельствуют о стабильности ведения процесса по разработанной технологии с получением труб высокой точности, допускаемые отклонения по диаметру – $\pm 0,5\%$, по толщине стенки – $\pm 6\%$.

Благодаря калибровкам технологического инструмента и режимам прокатки удастся проработать литую структуру заготовки (таблица 4), при суммарных коэффициентах вытяжки $\mu_{\Sigma} \approx 4$, что в свою очередь позволяет получать высокий уровень механических свойств труб (таблица 5, 6).

Таблица 4 – Микроструктуры горячекатаных труб из сталей марки Д.

	166,0x16,9		187,7x17,0	
	Фото (x100)	Балл зерна	Фото (x100)	Балл зерна
Наружная Поверхность		6,7		5,6
Середина толщины стенки		5,6		5,6
Внутренняя поверхность		6,7		5,6

Структура НЛЗ по всей толщине стенки обоих образцов проработана, величина зерна составляет 5, 6, 7 номер.

Таблица 5 – Значения механических свойств труб из НЛЗ сталей марки Д при испытании образцов на растяжение.

Типоразмер труб, мм	Временное сопр. разрыву σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
166,0x16,9	730	430	23
187,7x17,0	780	475	21

Таблица 6 – Значения механических свойств труб из НЛЗ стали марки Д при испытании образцов на ударный изгиб.

Типоразмер труб, мм	Поглощенная энергия KV, Дж			
	1	2	3	Ср. поглощ. энергия
166,0x16,9	30	27	28	28
	27	23	23	24
187,7x17,0	24	24	24	24
	25	25	22	24

Полученные трубы соответствуют группам прочности K55 и Д согласно ГОСТ 31446-2017 и ТС 05757848-56-2015 (акт о внедрении НИР).

С целью снижения себестоимости производства муфтовых труб технология и калибровки технологического инструмента предложены к внедрению в промышленное производство в условиях ТПА 70-270 АО «ВМЗ».

В пятой главе представлены результаты промышленного опробования новой конструкции направляющих линеек и исследования процесса прошивки с их применением методом конечных элементов.

Для повышения износостойкости и снижения склонности к налипанию металла на рабочую поверхность разработана новая конструкция направляющих линеек с подачей охладителя непосредственно на рабочую поверхность инструмента в процессе прокатки (рисунок 9). Для подачи охладителя вдоль продольной оси линеек выполнен паз равномерной глубины со смонтированной в нем подающей трубкой с отверстиями. На второй половине линеек по ходу

вращения заготовки выполнена наклонная плоскость шириной 25 мм для плавного контакта металла при его вращении в процессе прокатки, перепад рабочих поверхностей относительно паза составил 5 мм.

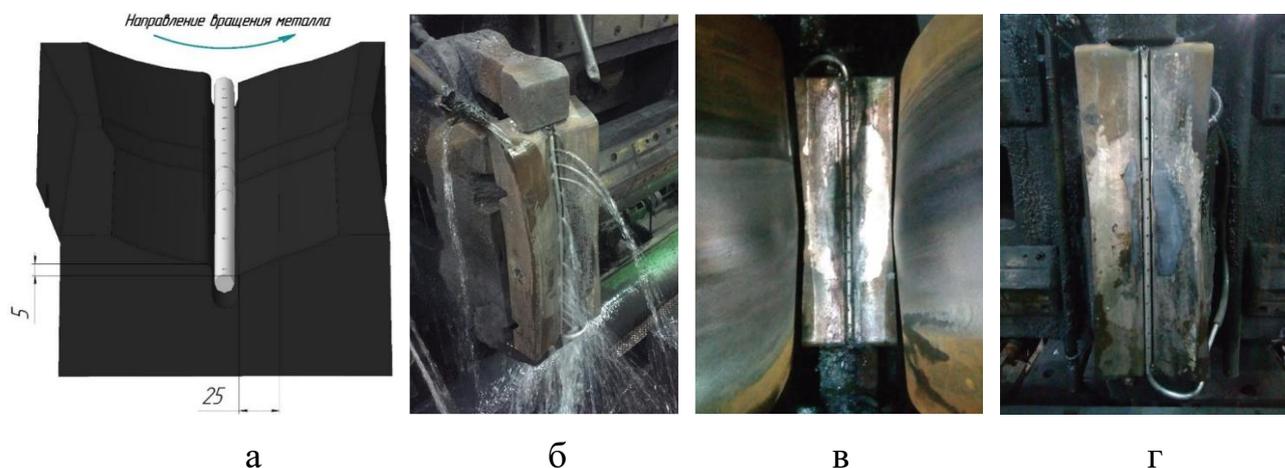


Рисунок 9 – Конструкция направляющих линеек с подачей охладителя непосредственно на рабочую поверхность инструмента в процессе прокатки:
 а – 3D сборка; б – верхняя линейка до проведения экспериментальных прокаток;
 в, г – нижняя и верхняя линейки после прокатки 50 труб

Экспериментальное опробование новой конструкции линеек проводили при прокатке труб размером 194,5x15,9 мм из стали 35Г2.

Настройка очага деформации была следующая:

- диаметр заготовки $D_3 = 190$ мм;
- обжатие заготовки в пережиме $U_{п} = 10\%$;
- обжатие заготовки перед носком оправки $U_0 = 5\%$;
- коэффициент овализации в пережиме $\xi = 1,10$;
- угол подачи рабочих валков $\beta = 12$ градусов.

По результатам анализа полученной в промышленных условиях опытной партии труб разработанная конструкция направляющих линеек подтвердила свою работоспособность. На контактирующих поверхностях не наблюдалось налипшего металла. Дефектов поверхности гильз не выявлено. Трубы были приняты по первому предъявлению.

В верифицированной ранее модели QFORM проводилась оценка формоизменения металла и исследование влияния новой конструкции линеек на параметры процесса прошивки по сравнению с применяемыми линейками.

В результате моделирования было установлено:

- отсутствие затекания металла в пазы;
- геометрические параметры гильзы при использовании линеек новой конструкции не изменились;
- на 2,5% выросла осевая скорость прошивки;
- площадь контакта металла с линейками за счет паза уменьшилась приблизительно на 20%.

С помощью стандартной подпрограммы QFORM выполнен расчет износа линеек на основе модели Арчарда по формулам (4, 5):

$$W_p = \int_0^t \frac{K_p \cdot p^a \cdot V_\tau^b}{\bar{\sigma}^a} dt; \quad (4)$$

$$W_\tau = \int_0^t \frac{K_\tau \cdot \tau \cdot V_\tau}{\bar{\sigma}} dt, \quad (5)$$

где W_p и W_τ – износ линейки от нормальных давлений (pressure) и от касательных напряжений (traction), соответственно;

K_p и K_τ – эмпирические коэффициенты;

a и b – эмпирические коэффициенты;

V_τ – окружная скорость контактного узла заготовки относительно линейки, м/с;

p – нормальное давление в точке контакта заготовки с линейкой, МПа;

τ – касательное напряжение в точке контакта заготовки с линейкой, МПа;

$\bar{\sigma}$ – предел текучести материала линейки, МПа;

t – время контакта заготовки с линейкой, сек.

Сравнительная оценка зоны и интенсивности износа линеек свидетельствует о сопоставимых результатах (рисунок. 10). Следует отметить, что в рамках моделирования не решалась тепловая задача для линеек. Температура

направляющего инструмента в обоих случаях в процессе деформации и по его окончанию была идентичной.

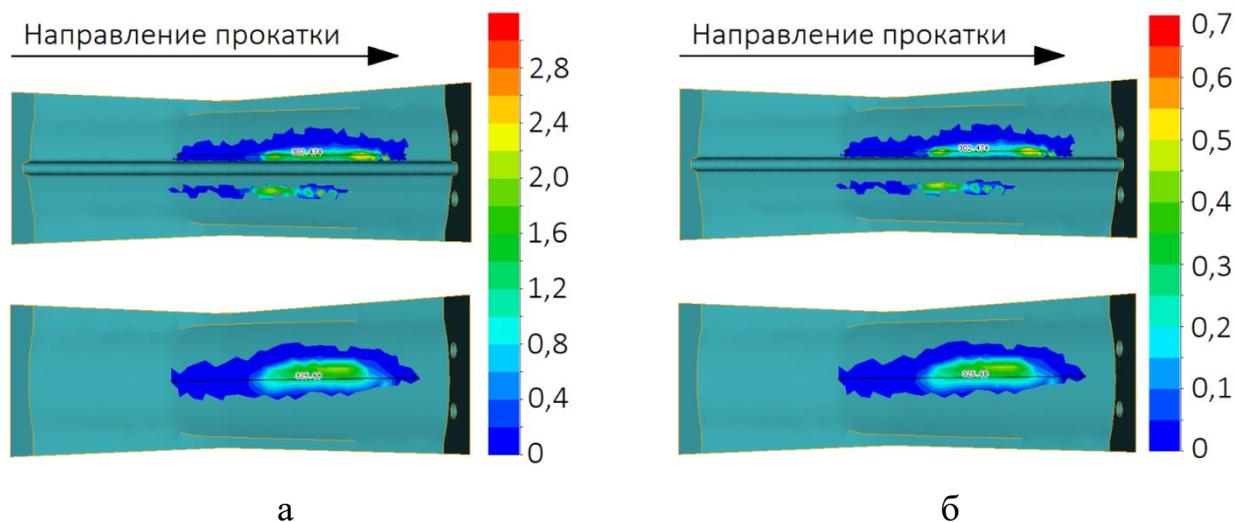


Рисунок 10 – Износ линеек от нормального давления (а) и касательных напряжений (б) для линеек с пазом и без паза

За счет снижения температуры рабочей поверхности предполагается увеличение износостойкости направляющих линеек новой конструкции.

По разработанной технологии прошивки с применением новой конструкции направляющих линеек получен патент «Способ винтовой прокатки заготовки в гильзу» номер 2735436 от 02.11.2020 г.

Основные выводы и результаты работы.

1. В результате комплексных исследований процесса двойной прошивки разработаны и внедрены новые режимы деформации и технологический инструмент, снижающие относительную разностенность труб на ТПА 70-270 в среднем на 3%. Двойная прошивка заготовок с суммарным коэффициентом вытяжки 2,7 и более позволяет снизить относительную разностенность гильз на 7% по сравнению с прошивкой за одну операцию.

2. Предложен новый способ прошивки на основе разработанной методики расчета рационального распределения деформации между операциями первой и

второй прошивки с использованием заданного суммарного коэффициента вытяжки.

3. На основании теоретических и экспериментальных исследований определены условия ведения процесса двойной прошивки с одного нагрева с сохранением требуемого уровня температуры гильз для последующей деформации. Определены мероприятия по снижению тепловых потерь гильз в условиях ТПА 70-270. Предложено вести процесс двойной прошивки при максимальной частоте вращения валков, уменьшив длительность вспомогательных операций.

4. Выполнено исследование энергосиловых и кинематических параметров процесса двойной прошивки, установлено, что по сравнению с прошивкой в один проход, момент прокатки снижается в среднем на 15%.

5. Разработаны режимы и технологический инструмент для двойной прошивки НЛЗ в одной клетки винтовой прокатки, позволяющие при суммарных коэффициентах вытяжки $\mu_{\Sigma} \approx 4$ проработать литую структуру заготовки по всей толщине стенки, тем самым обеспечить высокий уровень механические свойства труб из марок стали типа 40Г на уровне $\sigma_{\text{в}} \approx 750$ МПа, $\sigma_{\text{т}} \approx 450$ МПа, $\delta_5 \approx 22\%$, средняя поглощенная энергия удара KV при температуре испытания $21^{\circ}\text{C} \approx 24$ Дж. Предложенная технология прокатки НЛЗ прошла промышленное опробование при производстве труб двух типоразмеров и проходит внедрение в производство на ТПА 70-270.

6. Разработана, исследована и апробирована новая конструкция направляющих линеек с подачей охладителя непосредственно на рабочую поверхность инструмента в процессе прокатки, позволяющая повысить их износостойкость и снизить склонность к налипанию прокатываемого металла.

Список публикаций по теме диссертации

1. **Д.А. Орлов**, Ю.В. Гамин, А.В. Гончарук, Б.А. Романцев Разработка и исследование процесса прошивки с использованием охлаждаемых направляющих линеек // *Металлург* №4 (2021) с. 26-32. **D. A. Orlov**, Yu. V. Gamin, A. V. Goncharuk, B. A. Romantscev Development and Investigation of Piercing Process Using Cooled Guide Shoes // *Metallurgist*. 2021; 65(3):389-399. (Scopus, ВАК).

2. **Д.А. Орлов**, А.В. Гончарук, О.А. Кобелев, О.Г. Комарницкая, Н.С. Буниц Анализ особенностей процесса прошивки труб на ТПА 70-270 с применением метода конечных элементов // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. Т. 63. № 10 (2020) с. 848-855. **D.A. Orlov**, A.V. Goncharuk, O.A. Kobelev, O.G. Komarnitskaya, N.S. Bunits Analysis of pipe piercing on PRP 70-270 with FEM modeling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(10):848–855. (In Russ.) (Scopus, ВАК).

3. А.В. Гончарук, Б.А. Романцев, **Д.А. Орлов**, Ю.В. Гамин, Влияние режимов деформации на точность бесшовных труб // *Технология металлов* № 1. (2020) с. 50-54.

4. **Д.А. Орлов**, Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, А.С. Алещенко Разработка и освоение технологии производства заготовок муфт насосно-компрессорных труб на ТПА 70-270 в ОАО "Выксунский металлургический завод" // *Производство проката* № 8 (2017) с. 29-33. (ВАК).

5. **Д.А. Орлов**, Б.А. Романцев, А.В. Гончарук Освоение новой технологии прокатки муфтовых заготовок диаметром 270 мм на ТПА 70-270 ОАО "Выксунский металлургический завод" // *Производство проката* №10 (2016) с. 26-29. (ВАК).

6. Пат. 2741037 Российская федерация. Способ винтовой прошивки В21В 19/04 В21В 37/56 **Орлов Д.А.**, Гончарук А.В., Романцев Б.А. № 2020119835; заявл. 16.06.20; опубл. 22.01.21, Бюл. № 3. – 5 с. (ВАК)

7. Пат. 2735436 Российская федерация. Способ винтовой прошивки заготовки в гильзу В21В 19/04 **Орлов Д.А.**, Гончарук А.В., Романцев Б.А., Алещенко А.С.,

Серов Д.А., Гамин Ю.В. № 2020118347; заявл. 25.05.20; опубл. 02.11.20, Бюл. № 31. – 9 с. (ВАК)

8. Пат. 2635207 Российская федерация. Способ изготовления бесшовных труб диаметром менее 120 мм винтовой прокаткой В21В 19/00 Романцев Б.А., Гончарук А.В., Алещенко А.С., Корзун Н.Б., **Орлов Д.А.**, Степанов П.П. № 2017103023; заявлена 30.01.2017; опубл. 09.11.2017, Бюл. № 31. – 6 с. (ВАК)

9. Пат. 2630188 Российская федерация. Линейка прошивного стана В21В 19/04 Романцев Б.А., Гончарук А.В., Гамин Ю.В., Алещенко А.С., **Орлов Д.А.**, Корзун Н.Б. № 2016147342; заявлена 02.12.2016; опубл. 05.09.2017, Бюл. № 25. – 9 с. (ВАК)

10. **Д.А. Орлов**, А.В. Гончарук, Ю.В. Гамин Влияние режимов деформации при прошивке на точность бесшовных труб и энергосиловые параметры прокатки // труды XII конгресса прокатчиков Том 2 (2020) с. 240-245.

11. **Д.А. Орлов** Производство бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки на ТПА 70-270 в условиях ТЭСЦ-3. XI Научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК. Сборник докладов конференции. 2018 С. 83-84.

12. **Д.А. Орлов** Влияние режимов деформации на энергосиловые параметры прокатки и точность готовых бесшовных труб. XI Научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК. Сборник докладов конференции. 2018 С. 81.

13. **Д.А. Орлов** Освоение производства бесшовных труб из легированных марок сталей и сплавов в условиях ТПА 70-270. XII Научно-практическая конференция молодых специалистов ОМК. Сборник докладов конференции. 2019 С. 51.