

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

На правах рукописи

ОРЛОВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Гончарук Александр Васильевич

Москва – 2021

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Литературный обзор.....	12
1.1. Точность геометрических размеров.....	12
1.1.1. Разностенность гильз после прошивки.....	12
1.1.2. Изменение разностенности гильз при последующих операциях деформирования	16
1.2. Степень деформации при прошивке заготовок	18
1.3. Особенности прокатки труб из непрерывнолитой заготовки	24
1.4. Направляющий инструмент станов винтовой прокатки.....	34
1.4.1. Влияние направляющего инструмента на качество наружной поверхности гильз	37
1.4.2. Износостойкость направляющего технологического инструмента	38
1.5. Выводы и постановка задач исследования.....	43
Глава 2. Теоретическое исследование.....	46
2.1. Параметрическая модель очага деформации прошивного стана.....	46
2.2. Моделирование процесса двойной прошивки	50
Глава 3. Экспериментальное исследование.....	56
3.1. Технология изготовления труб на ТПА 70-270	56
3.2. План проведения экспериментальных исследований	58
3.3. Исследование точности гильз в процессе двойной прошивки.....	60
3.4. Исследование температурного состояния гильз в процессе двойной прошивки.....	73
3.5. Исследование кинематических и энергосиловых параметров в процессе двойной прошивки	85
Глава 4. Технология производства бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки	91
4.1. Разработка режимов деформирования и калибровок прокатного инструмента	91

4.2. Промышленное опробование технологии производства труб из непрерывнолитой заготовки в условиях ТПА 70-270	94
Глава 5. Разработка и исследование процесса прошивки с использованием охлаждаемых направляющих линеек	105
5.1. Разработка новой конструкции направляющих линеек	105
5.2. Экспериментальное опробование новой конструкции направляющих линеек.	106
5.3. Моделирование процесса прошивки с использованием линеек новой конструкции	108
Выводы	116
Список литературы	118
Приложение А	127
Приложение Б	130
Приложение В	131
Приложение Г	133

Введение

Актуальность темы.

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 [1]. 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. и введенный в эксплуатацию в 2009 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.

Степень разработанности.

Исследования технологии с двойной прошивкой заготовок на станах винтовой прокатки до настоящего времени проводились только в период плановой экономики СССР, когда на первом месте стояла производительность трубопрокатных агрегатов, а технология непрерывного литья трубной заготовки еще не получила широкого распространения. Рекомендации по распределению коэффициентов вытяжки между стадиями процесса двойной прошивки сводились к согласованию темпов прокатки последовательно расположенных клеток [2].

Влияние распределения степени деформации между стадиями процесса двойной прошивки на качественные показатели гильз в технической литературе не освещено.

Совершенствование процесса двойной прошивки заготовок в работе осуществлено таким образом, чтобы производство труб необходимого сортамента не требовало существенных изменений в оборудовании ТПА 70-270 АО «ВМЗ». Ключевым способом снижения разностенности гильз и труб является перераспределение степени деформации между стадиями прошивки. Повышение качества наружной поверхности в большей степени достигается за счет применения направляющих линеек новой конструкции. Снижение себестоимости труб достигается за счет применения непрерывнолитой заготовки и снижения РКМ.

Цель работы: на основании комплексных исследований разработать режимы двойной прошивки заготовок, позволяющие повысить качество бесшовных труб.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи исследования:**

- 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.

- выполнить промышленное опробование разработанных технических решений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 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.

Теоретическая и практическая значимость 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.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров кафедры ОМД НИТУ «МИСиС».

Методы исследования.

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 «AxioObserverD1m» 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.

Достоверность полученных результатов подтверждена опытно-промышленными опробованиями разработанных режимов прокатки и технологического инструмента, а также внедрением в производство некоторых из них при изготовлении бесшовных труб в условиях ТПА 70-270 АО «ВМЗ».

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты теоретического и экспериментального исследования геометрических, температурных, энергосиловых и кинематических параметров процесса двойной прошивки заготовок в стане винтовой прокатки;
- новый способ прокатки заготовок на основе рационального распределения деформации между операциями первой и второй прошивки при заданном суммарном коэффициенте вытяжки;
- разработанная технология прокатки труб на ТПА 70-270 из непрерывнолитых заготовок;
- разработанная конструкция направляющих линеек прошивного стана, с подачей охладителя на рабочую поверхность непосредственно в процессе прокатки;
- результаты опытно-промышленных прокаток на ТПА 70-270.

Реализация результатов работы.

На основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны и внедрены усовершенствованные режимы деформации в условиях ТПА 70-270, обеспечивающие меньшую разностенность труб.

Разработана, опробована и предложена к внедрению новая конструкция направляющих линеек прошивного стана с повышенной износостойкостью.

Разработаны, опробованы и внедряются режимы прокатки и технологический инструмент прошивного стана ТПА 70-270, для производства труб из непрерывнолитых заготовок.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров кафедры ОМД «ННТУ «МИСиС».

Личный вклад:

- спланированы и осуществлены экспериментальные исследования технологии двойной прошивки заготовок на ТПА 70-270, произведена обработка полученных результатов;
- выполнено компьютерное моделирование процесса двойной прошивки заготовок;

- разработана, исследована и апробирована в промышленных условиях новая конструкция направляющих линеек прошивного стана с повышенной износостойкостью;
- разработан новый способ прокатки труб в условиях ТПА 70-270 из непрерывнолитых заготовок;
- разработаны калибровки валков и оправок прошивного стана ТПА 70-270, позволяющие осуществлять прокатку труб из непрерывнолитых заготовок;
- спланирована и осуществлена опытно-промышленная прокатка труб двух типоразмеров на ТПА 70-270 из непрерывнолитых заготовок по разработанной технологии с получением труб, результаты испытаний которых свидетельствуют о проработке литой структуры и получении необходимого уровня механических свойств.

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.

Глава 1. Литературный обзор

1.1. Точность геометрических размеров

1.1.1. Разностенность гильз после прошивки

В связи, со спецификой напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации, способствующей самоцентрированию оправки, двухвалковая винтовая прошивка обладает существенным преимуществом в части точности получаемых гильз по сравнению с другими известными способами прошивки заготовок (прессование, пресс-валковая прошивка, прошивка в трехвалковых станах винтовой прокатки) [3].

Наиболее обширно тематика точности гильз и труб отражена в работе М.Ф. Столетнего и Е.Д. Клемперта [4]. Все разнородные факторы, находящиеся в постоянном взаимодействии друг с другом и влияющие на разностенность гильз, авторы делят на три группы:

- 1) факторы, связанные с самой природой прошивки в стане винтовой прокатки;
- 2) технологические факторы;
- 3) факторы, связанные с конструкцией прошивного стана.

На основании анализа результатов многочисленных измерений толщины стенки гильз А.П. Чекмарев и Я.Л. Ваткин пришли к выводам, что толщина стенки по образующим гильзы изменяется неравномерно, и характер этого изменения приближается к некоторой периодически изменяющейся кривой, напоминающей синусоиду. По длине гильзы разностенность изменяется по спирали и в большинстве случаев вызвана эксцентricностью наружного и внутреннего диаметров. Также следует отметить, что на концах гильз разностенность наибольшая и возникает в ходе неустановившейся стадии процесса прошивки [4].

Большинство исследователей едины во мнении, что разностенность гильз после прошивки, уменьшаясь по абсолютной величине с ростом деформации при последующих технологических операциях, не может быть полностью устранена.

Поэтому изготовление высокоточных труб невозможно без получения точных гильз.

Появление разностенности при прошивке гильз объясняют сложным движением оправки в очаге деформации под действием на нее смещающих сил со стороны деформируемого металла и стержня [4].

К технологическим факторам, влияющим на отклонение оправки от оси заготовки в очаге деформации, а следовательно, и на разностенность гильз, относятся: перпендикулярность и форма торцов заготовки и ее овальность, зацентровка переднего и заднего торца, равномерность нагрева, скорость вращения валков, калибровка технологического инструмента, настроечные параметры прошивного стана, износ технологического инструмента.

В работе [5], исследована технология получения профилированных трубных заготовок на трехвалковом стане винтовой прокатки и их прошивка. Авторы указывают на существенное повышение точности гильз по толщине стенки при применении заготовок с волнообразным профилем наружной поверхности.

Качество торца заготовки оказывает существенное влияние на условия захвата ее валками прошивного стана и особенно на образование при этом концевой разностенности [4]. По этой причине на большинстве современных ТПА порезку заготовок на мерные длины производят дисковыми пилами.

Для создания достаточных тянущих сил перед вторичным захватом заготовки валками прошивного стана и уменьшения разностенности переднего конца гильзы на передний торец заготовки наносят центрирующее углубление. Особенно актуально нанесение центрирующего углубления при прошивке заготовок из высоколегированных сталей и сплавов, а также НЛЗ с низкой исходной пластичностью по режимам деформирования с уменьшенным обжатием заготовки перед носком оправки [11].

В настоящее время центрирующее углубление на переднем торце заготовки в основном выполняют в горячем состоянии в технологическом потоке перед прошивным станом пневматическим зацентровщиком, однако такой способ имеет недостатки в части точности и отсутствия возможности ее контроля. На ТПА 70-

270 АО «ВМЗ» для повышения соосности центрирующее углубление наносят механическим способом до задачи заготовки в нагревательную печь.

В работах [7 -10] исследовано влияние центрирующего углубления на точность гильз и труб. В работе [11] решалась оптимизационная задача формы центрирующего углубления.

Для повышения точности труб необходимо, чтобы нагрев всех заготовок был одинаковым, равномерным по сечению и длине. Влияние равномерности нагрева заготовок перед прошивкой освещено в работах [4, 12, 16]. Из которых ожидаемо следует, что неравномерный и несимметричный нагрев заготовки повышает поперечную разностенность гильз. К сожалению, количественной оценки этой зависимости не приводится, по-видимому, из-за технической сложности достоверного определения распределения температуры по длине и сечению заготовки перед прокаткой.

Неравномерность нагрева связана с отсутствием кантовки заготовок в кольцевых печах, подстуживанием металла при нагреве в зоне выдачи, конструкцией самой печи (водоохлаждаемые балки, расположение горелок относительно металла, расстояние между нагреваемыми заготовками и т.д.), нарушением нормального режима нагрева из-за изменений темпа прокатки, перехода к нагреву заготовок другого диаметра или другой марки стали.

Флуктуация температур по сечению заготовки приводит к неравномерной пластичности металла, из-за чего оправка при прошивке стремится в более пластичные области, в большинстве случаев отклоняясь в сторону от оси заготовки, что приводит к разнотолщинности поперечного сечения гильзы [4]. Исправить неравномерность нагрева настройкой стана или еще какими-то мероприятиями невозможно, и единственным способом является улучшение качества самого нагрева.

Для повышения точности толщины стенки гильзы необходимо создать такое распределение температуры по сечению, когда наиболее пластичная область находится в геометрическом центре заготовки.

В работе [6], для снижения неоднородности деформации по сечению,

вызванной диссипацией напряжений, проводилось исследование влияния подстуживания заготовки, с целью получения меньшего сопротивления деформации в центральных слоях заготовки. Авторами было установлено, что после охлаждения заготовки диаметром 580 мм на воздухе в течение 150 секунд с температуры нагрева 1280°C , температура наружной поверхности заготовки снизится до 1150°C , а глубина проникновения неоднородности сопротивления деформации составит 60 мм. Для получения более равномерного перепада температур по сечению и проникновения анизотропии свойств ближе к оси заготовки, авторы рекомендуют замедлить теплообмен на поверхности. Осуществить данное мероприятие в промышленных условиях возможно за счет совершенствования режимов нагрева заготовок перед прокаткой, а именно посредством поддержания различных температур по зонам нагревательной печи. В свою очередь охлаждение наружной поверхности заготовки во время транспортирования ее от печи к прошивному стану также может способствовать улучшению распределения температуры по сечению при условии равномерного подстуживания поверхностных слоев.

Значительное влияние на точность гильз оказывает группа технологических факторов, связанных с настройкой прошивного стана и калибровкой технологического инструмента [4].

Изменение углов подачи в широком интервале существенно влияет на точность гильз, что вызвано возникающей при этом непараллельностью образующих раскатных конусов валков и калибрующего участка оправки.

Исследования И.Н. Потапова показали, что при больших углах подачи соответствующим изменением калибровки инструмента можно обеспечить получение гильз, точность которых не будет уступать гильзам, прокатанным при обычных ($8 - 10^{\circ}$) углах подачи [13].

Важным технологическим параметром, влияющим на разностенность получаемых гильз, является коэффициент овализации. С увеличением этого параметра увеличивается возможность смещения оправки в плоскости направляющего инструмента. При меньшем развитии поперечной деформации у

гильзы уменьшается ее овальность и увеличивается точность как по наружному диаметру, так и по толщине стенки. Поэтому процесс прошивки предлагают вести при уменьшенном коэффициенте овализации и при более тесном калибре по направляющему инструменту [21], особенно при получении тонкостенных гильз.

Увеличение протяженности калибрующего участка оправок до 1,5 – 2 полушагов подачи повышает точность гильз.[4]

К основным факторам, связанным с конструкцией прошивного стана, относятся: точное центрирование заготовки, соосность оси стержня и оси прошивки, достаточная величина жесткости стержня. Влиянию устойчивости стержня с оправкой во время прошивки в литературе уделено большое внимание [3, 4, 13, 15, 22, 23]. В работах [22, 23] подробно исследован процесс колебания стержня, определена форма и собственная частота колебаний, и на основании этого проведены исследования по устойчивости стержней в станах винтовой прокатки.

Недостаточная жесткость оправочного стержня приводит к повышенной разностенности заднего конца гильз. Так как при увеличении жесткости системы разностенность гильз резко снижается, необходимо создать условия для уменьшения вибраций системы во время прошивки путем удержания заднего конца заготовки и стабилизации положения стержня с оправкой с помощью центрователей [4]. Следует принимать меры для увеличения жесткости стержней прошивного стана и снижения воспринимаемых ими усилий. Важно, чтобы первый центрователь на выходной стороне прошивного стана располагался как можно ближе к очагу деформации [25].

1.1.2. Изменение разностенности гильз при последующих операциях деформирования

Раскатку гильзы в черновую трубу осуществляют либо на станах продольной прокатки (автоматические, непрерывные, пилигримовые, реечные), либо на станах поперечно-винтовой прокатки (трехвалковые раскатные, двухвалковые с тянущими дисками – станы Дишера). Разностенность труб, полученных

продольной прокаткой, в 2 – 3 раза превышает разностенность труб со станов винтовой прокатки. Это связано прежде всего с условиями деформации в круглых и овальных калибрах, с неизбежной неравномерностью деформации по периметру трубы, которая усугубляется неравномерностью температуры и разностью линейных скоростей различных участков калибров [3,4].

Частично разностенность труб является следствием разностенности гильз, однако в некоторых случаях даже из геометрически правильной цилиндрической гильзы все же получаются трубы с большей или меньшей (в зависимости от способа раскатки гильзы) разностенностью. Так, по данным М.Ф. Столетнего и Е.Д. Клемперта, трубы, прокатанные в круглых калибрах автоматического стана из обточенных гильз правильной формы, приобретают разностенность 18 – 22%. Точность труб, полученных из геометрически правильных гильз, лишь несколько выше точности труб, изготовленных на этой установке из гильз обычной точности [4].

Для уменьшения продольной разностенности при раскатке гильз на короткой оправке в трудах [17-19] предлагают уменьшать флуктуацию температуры по длине гильзы. Уменьшение градиента температур достигается [11]:

- выравниванием температуры по длине гильзы за счет спрейерного охлаждения ее с нарастающей интенсивностью в процессе прошивки непосредственно за рабочей клетью прошивного стана [17];

- прошивкой и последующей прокаткой гильзы с переменной толщиной стенки, меньшей на более холодном переднем ее конце, с целью взаимной компенсации изменений температуры металла и обжатия по толщине стенки [18];

- уменьшением разницы температуры благодаря интенсификации режимов прошивки за счет увеличения угла подачи и частоты вращения валков [19].

Снижение наводимой разностенности труб, прокатанных на агрегатах с непрерывным раскатным станом достигается за счет применения различных калибровок валков, настройки пространственного положения технологического оборудования непрерывного раскатного стана относительно оси прокатки. [24]

Особый интерес представляет изменение разностенности гильз при их

раскатке в станах винтовой прокатки.

На основании экспериментальных исследований закономерностей изменения относительной поперечной разностенности в двухвалковых станах винтовой прокатки О.А. Пляцковский и Б.Г. Павловский показали, что независимо от калибровки валков и наличия в очаге деформации оправки при прокатке полых разностенных заготовок происходит значительное уменьшение исходной относительной поперечной разностенности [4].

В результате прокатки обточенных, геометрически правильных гильз в стане Асселя были получены трубы с разностенностью 3 – 6%, в то время как величина разностенности труб, прокатанных из обычных гильз, составляет 6 – 8% [4].

В единичных случаях, применяют повторную прошивку гильз или раскатку толстостенных стаканов на станах удлинителях, которые также являются станами винтовой прокатки. В процессе такой прокатки разностенность гильз изменяется главным образом в зависимости от отношения D/S и исходной разностенности.

При второй прошивке особо тонкостенных гильз большого диаметра на агрегате 350 с уменьшением абсолютной разностенности относительная поперечная разностенность возрастает [2].

Применение длинной плавающей оправки и валков с цилиндрическим пояском длиной до 100 мм для раскатки гильз в двухвалковом прошивном стане обеспечивает по данным И. Ю. Коробочкина значительное повышение точности толщины стенки по сравнению с раскаткой на неподвижной оправке в валках обычной калибровки благодаря 2–3-кратному обжатию каждой точки сформированной стенки гильзы на цилиндрическом участке.

1.2. Степень деформации при прошивке заготовок

Большое влияние на производительность и качество гильз оказывает правильный выбор коэффициента вытяжки при прошивке. В зависимости от марки стали и размеров труб авторы работы [2] приводят следующие параметры деформации: для труб из углеродистых и низколегированных сталей $\mu_{пр} = 1,3 – 5,3$;

для труб из высоколегированных сталей $\mu_{\text{пр}} = 1,5 - 3,5$. Максимальный коэффициент вытяжки при прошивке на агрегатах с одним прошивным станом не должен превышать $4,5 - 4,7$ [2,27].

Согласно экспериментальным данным И. Н. Потапова, П. И. Полухина и других исследователей с увеличением коэффициента вытяжки происходит перераспределение обжатия в очаге деформации: в конусе прошивки частные обжатия уменьшаются, а в конусе раскатки увеличиваются, повышается несоответствие скоростей металла и валков по длине очага деформации. Это приводит к уменьшению коэффициента осевой скорости в конусе прошивки, а следовательно к увеличению цикличности перед носком оправки [13, 27], что приводит к большей вероятности преждевременного вскрытия полости перед носком оправки и образованию внутренних плен, в особенности при прошивке заготовок из малопластичных сталей и НЛЗ.

При увеличении коэффициента вытяжки существенно повышается удельное давление на валки и мощность, расходуемая на формоизменение металла в очаге деформации.

Возрастание времени прошивки с ростом коэффициента вытяжки, как правило, сопровождается существенным увеличением шагов винтовой линии на наружной поверхности гильзы [13]. Увеличение машинного времени прокатки приводит к снижению стойкости технологического инструмента.

В трубной промышленности известны ТПА, в составе которых имеется два, последовательно расположенных прошивных стана. Такое техническое решение применяется для прокатки тонкостенных гильз большого диаметра из предварительно катанной или кованной заготовки с последующей их раскаткой в автоматическом стане продольной прокатки [2,28,29]. Наличие второго прошивного стана в составе ТПА 350 обусловлено типоразмером выпускаемых труб. Получение тонкостенных гильз большого диаметра из высоколегированных сталей в одну операцию потребовало бы создания мощного и громоздкого стана, при этом значительно усложнилась бы технология получения труб большого диаметра, так как пришлось бы использовать катаную или кованую заготовку с

малой степенью укова. Наличие двух последовательно расположенных станов винтовой прокатки, благодаря прошивке на обоих с подъёмом диаметра гильзы позволяет применять заготовку диаметром на 10 – 15% меньше, чем при использовании одного прошивного стана [2].

В трубном производстве двойная прошивка не нашла широкого распространения, исключением составляет ТПА 70-270 АО «ВМЗ» с двойной прошивкой заготовок в одной двухвалковой клетки винтовой прокатки.

Для агрегатов с двумя прошивными станами рекомендуется для первой прошивки $\mu_{пр1} = 1,25 - 2,0$, для второй $\mu_{пр2} = 1,25 - 3$ [2]. Подъем гильзы в первом проходе может достигать 10% и 15% при второй прошивке. Настройка прошивных станов, схема прошивки и калибровка технологического инструмента наряду с сортаментом труб оказывают решающее влияние на соотношения D_3/D_T .

По мнению авторов работы [2] распределение коэффициентов вытяжки между двумя прошивными станами должно быть таким, чтобы обеспечить максимальную производительность агрегата. Для этого необходимо стремиться к равенству машинного времени прокатки двух прошивных станов. Обычно для тонкостенных труб 50 – 60% деформации от суммарной для двух прошивных станов приходится на первый. Однако, рекомендованное распределение вытяжек основано на повышении производительности агрегата и синхронизации машинного времени по клетям. В свою очередь оценки качественных показателей при различном распределении деформации между станами винтовой прокатки в литературе не приводится.

Авторы работы [2] приводят данные о применении в трубной промышленности формально технологии с тройной прошивкой заготовок. В Японии на заводе фирмы «Син ниппон сэйтэцу» эксплуатировался агрегат с автоматическим раскатным станом. Квадратная НЛЗ прошивается на пресс-валковом прошивном стане, далее деформируется в двух последовательно расположенных станах винтовой прокатки – элонгаторах и в автоматическом стане. Технологическая схема производства агрегата представлена на рисунке 1.

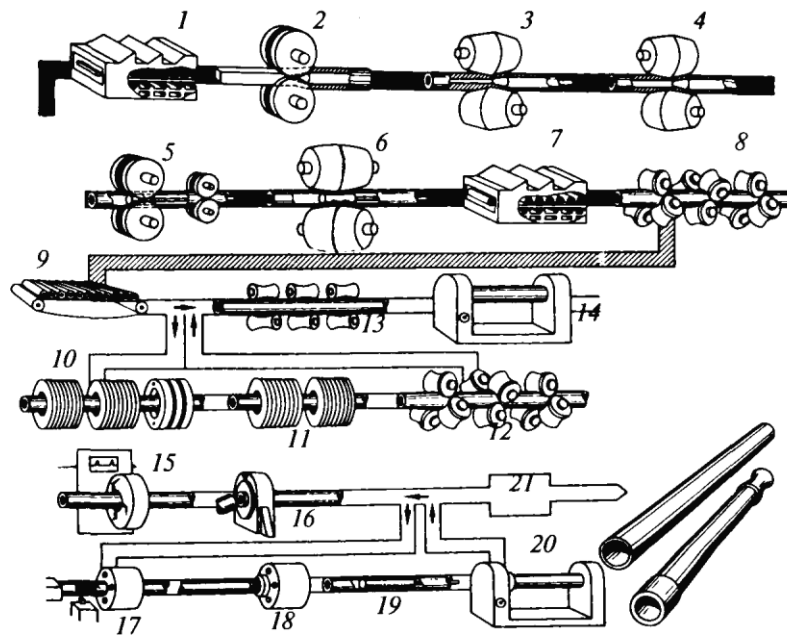


Рисунок 1 – Технологическая схема ТПА с автоматическим раскатным станом фирмы «Син ниппон сэйтэцу» (Япония):

1 – нагрев квадратных заготовок; 2 – прошивка на пресс-валковом стане; 3, 4 – раскатка стаканов на элонгаторе № 1 и № 2; 5 – прокатка гильз на автоматическом стане; 6 – обкатка труб на двухвалковом риллинг-стане; 7 – подогрев труб перед калиброванием; 8 – калибрование труб в трехвалковом 12-клетевом стане; 9 – охлаждение труб.

Однако, такой состав оборудования горячей части в современных условиях и уровне развития технологий изготовления исходных заготовок и прокатного оборудования, является избыточным и неэффективным. Двух последовательно расположенных станов винтовой прокатки вполне достаточно, для производства гильз высокого качества любой тонкостенности. Кроме того, прошивка заготовок на пресс-валковом стане характеризуется повышенной разностенностью гильзы и высокими энергосиловыми параметрами процесса [30]. По этим и другим причинам, как в России так и за рубежом, агрегаты с пресс-валковым прошивным станом были подвергнуты реконструкции. Прошивку заготовок стали осуществлять на станах винтовой прокатки, а соответственно сами заготовки стали круглого сечения.

Операции первой и второй прошивки заготовок при изготовлении как

толстостенных, так и тонкостенных гильз на станах винтовой прокатки может осуществляться по трем схемам: «на посад», «размер в размер» и «на подъем».

Достоинством такого разнообразия деформационных режимов прошивки на двух последовательно расположенных станах является высокая гибкость процесса и наличие маневренности при распределении деформации между операциями.

А.А. Богатов, Д.А. Павлов и Д.Ш. Нюхов представили уникальные фактические данные по уровню отбраковки труб по наружным пленам в зависимости от коэффициента вытяжки при прошивке заготовок на стане винтовой прокатки [26]. В работе был проведен сравнительный анализ с использованием заготовок различных поставщиков и при прокатке труб на различных ТПА, раскатка гильз на которых производится различными способами. В таблице 1 представлены данные зависимости брака по наружным пленам при прокатке труб от коэффициента вытяжки при прошивке только на одном агрегате, исключая другие влияющие факторы.

Таблица 1 – Отбраковка труб из стали марки 20, прокатанных на ТПА 220.

Коэффициент вытяжки при прошивке	Наружные плены, %	
	Поставщик заготовки	
	№1	№2
$\geq 4,0$	—	25,5
3,5 – 3,99	12,4	21,9
3,0 – 3,49	11,6	21,4
2,5 – 2,99	5,0	8,5
2,0 – 2,49	3,4	8,2
$\leq 1,99$	3,3	2,3

Авторы работы пришли к выводам, что чем больше коэффициент вытяжки при прошивке, вне зависимости от других факторов, тем больше образуется дефектов на наружной поверхности труб.

Как видно из таблицы 1, увеличение коэффициента вытяжки при прошивке свыше 3 приводит к кратному возрастанию дефектов наружной поверхности труб. Эта тенденция сохраняется для различных поставщиков металла.

На основании полученных данных авторы считают целесообразным снижать степень деформации при прошивке за счет увеличения толщины стенки гильзы и уменьшения исходного диаметра заготовки (вести процесс прошивки с уменьшением D_3/D_r). Возможности первого пути, как на исследуемом агрегате, так и применительно к любым ТПА с раскатными станами продольной прокатки, крайне ограничены, так как для получения заданного типоразмера труб потребуются увеличение степени деформации на раскатных станах, лимитированной как технологическими параметрами, так и техническими характеристиками оборудования.

Влияние отношения D_3/D_r на количество труб с наружными пленами по мнению авторов носит различный характер в зависимости от тонкостенности гильзы. Зависимость доли наружных плен от отношения D_3/D_r представлено на рисунке 2.

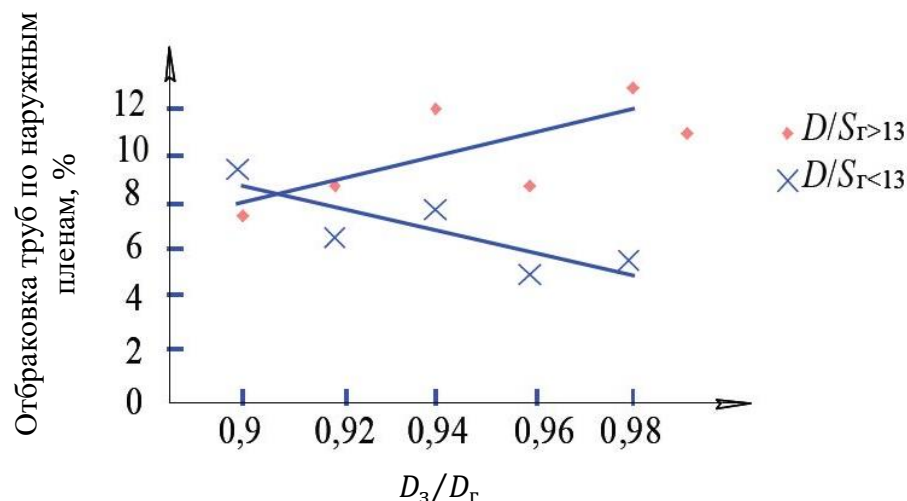


Рисунок 2 – Зависимость дефектности труб от отношения D_3/D_r

При прокатке толстостенных гильз с $D_r/S_r < 13$, увеличение отношения D_3/D_r положительно сказывается на качестве наружной поверхности труб, при $D_r/S_r > 13$ зависимость противоположная.

1.3. Особенности прокатки труб из непрерывнолитой заготовки

Основополагающее развитие технологии производства бесшовных труб неразрывно связано с такими выдающимися отечественными учеными как И.А. Фомичев, А.Ф. Лисочкин, В.В. Швейкин, В.С. Смирнов, П.Т. Емельяненко, Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.А. Балакин, П.К. Тетерин, П.И. Полухин, И.Н. Потапов. Благодаря этим исследователям качество бесшовных труб удалось вывести на абсолютно новый уровень.

В качестве исходной заготовки для получения бесшовных труб до 70-ых годов двадцатого века использовались катаные или кованые заготовки. При этом для производства труб из высоколегированных сталей и труб ответственного назначения заготовки обтачивали по наружной поверхности. По причине значительных трудностей получения подката крупного сечения при производстве труб большого диаметра на агрегатах с пилигримовыми раскатными станами использовались более дешевые слитки. По состоянию наружной и внутренней поверхности, трубы из литого металла имели гораздо худшее качество. При прошивке литого металла с целью улучшения схемы напряженно-деформированного состояния для операции прошивки вместо двухвалковых станов винтовой прокатки стали использовать прессы с последующей раскаткой толстостенного стакана на трехвалковых станах элонгаторах [31].

По причине широкого использования более качественной предварительно деформированной заготовки совершенствование процесса прошивки в первую очередь было направлено на недопущение образования внутренних плен прокатного происхождения посредством уменьшения растягивающих напряжений в центре заготовки при винтовой прокатке в двухвалковых станах. Для этого уменьшалось обжатие и цикличность деформации перед носком прошивной оправки. Советские ученые И.А. Фомичев, А.Ф. Лисочкин, В.В. Швейкин, В.С. Смирнов, П.Т. Емельяненко и др. предложили осуществлять процесс прошивки с уменьшением суммарного обжатия и выдвижением носка оправки за пережим валков. П.И. Полухин и И.Н. Потапов руководили разработкой новой технологии

прошивки заготовок при повышенных значениях угла подачи [3].

Новый виток развития трубной промышленности основан на освоение технологии непрерывного литья заготовки. По сравнению со слитком, за счет отсутствия прибыльной и донной части, подлежащих обрезке перед трубным переделом, сквозной расходный коэффициент металла при производстве труб из НЛЗ удалось снизить на 8 – 15% [3], кроме того, повысилась производительность и улучшились условия труда.

Получение трубной заготовки из исходной НЛЗ или слитка посредством прокатки на станах продольной или винтовой прокатки с определенным коэффициентом вытяжки значительно улучшает качество трубной заготовки как по состоянию наружной поверхности, так и макроструктуре осевой зоны, даже при неполной проработке литой структуры. Однако включение в технологическую схему горячего передела повышает стоимость трубной заготовки и снижает эффективность ее применения для изготовления труб. Поэтому наиболее предпочтительными являются технологии трубного производства, использующие непосредственно непрерывнолитую заготовку [32].

По мере развития технологии выплавки и разлива стали более дешёвая НЛЗ практически полностью вытеснила дорогостоящую, предварительно деформированную заготовку из трубной промышленности. Современные трубопрокатные агрегаты как в России, так и за рубежом трубы общего назначения, нефтегазовой отрасли выпускают из НЛЗ. Предварительно деформированные заготовки используются только для прокатки труб ответственного назначения, а также труб из высоколегированных, дорогостоящих коррозионностойких, жаростойких, жаропрочных сталей и сплавов на различной основе.

Однако до настоящего времени качество НЛЗ не может обеспечить всего комплекса свойств, предъявляемых при трубном переделе.

Непрерывнолитая заготовка имеет характерные дефекты формы в виде овальности и кривизны. Но наиболее опасны для качества производимых труб, внутренние дефекты: центральная пористость, осевая ликвация, краевые точечные загрязнения, ликвационные полосы и трещины, подкорковые пузыри,

неметаллические включения, а также дефекты поверхности: продольные и поперечные трещины, пояс, механические повреждения (риска), складки и поры.

Непрерывнолитой металл по своей природе имеет по всей длине заготовки усадочную раковину сосредоточенную или рассредоточенную. Улучшают макроструктуру осевой зоны микролегированием, магнитным перемешиванием стали и обжатием выходящей из МНЛЗ не полностью закристаллизовавшейся заготовки роликами [32].

Известно, что внутренние плены являются наиболее трудно устранимым видом брака бесшовных труб. Плены возникают при винтовой прошивке заготовок с низкой исходной пластичностью, а также с дефектами макроструктуры осевой зоны металла, в особенности при малых углах подачи рабочих валков [32].

Стандартами на поставку круглой непрерывнолитой заготовки нормируется качество макроструктуры, состояние наружной поверхности, а также количество и размеры неметаллических включений. Требования к макроструктуре НЛЗ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Требования к макроструктуре НЛЗ согласно ГОСТ 34636 - 2020

Класс стали	Допустимые дефекты макроструктуры НЛЗ, балл, не более				
	Центральная пористость	Краевое точечное загрязнение	Светлая полоса (контур)	Осевая ликвация	Ликвационные полосы
Легированная	2	1	3	2	1
Нелегированная	3	2	3	3	2

Оценку макроструктуры трубной НЛЗ согласно ГОСТ Р 58228 - 2018 проводят на протравленных темплетах без применения увеличительных приборов. На рисунке 3 представлены изображения поперечных образцов согласно степени развития центральной пористости, определяемой по бальной шкале.

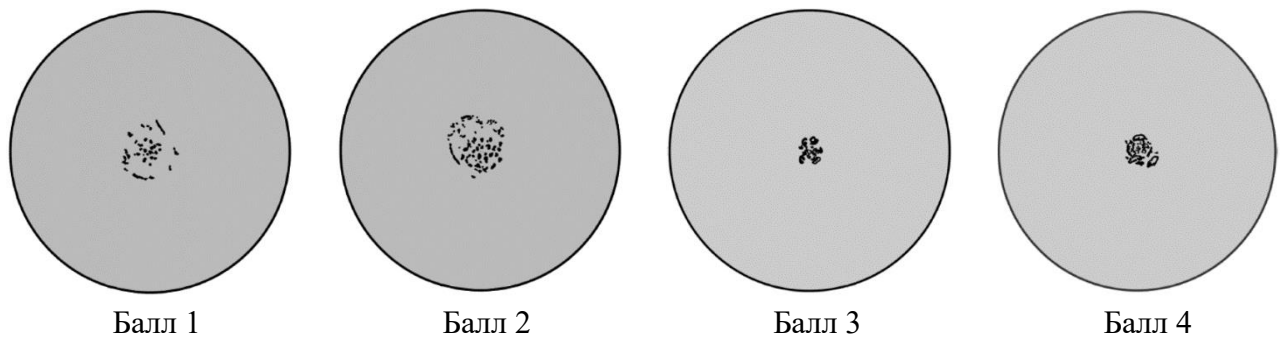


Рисунок 3 – Степень развития центральной пористости:

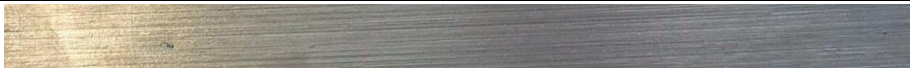
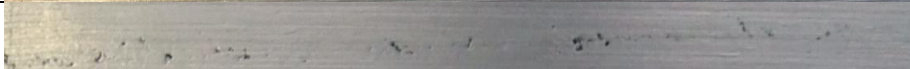
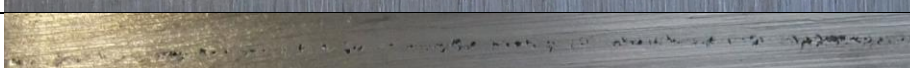
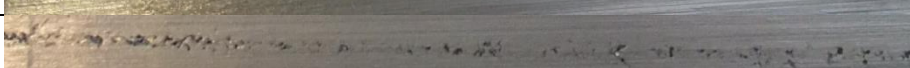
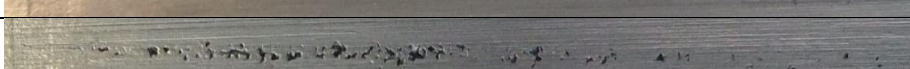
- 1 балл – повышенная травимость в центре и поры диаметром не более 1 мм;
- 2 балл – пористость в виде мелких точек-пор диаметром не более 2 мм;
- 3 балл – отдельные поры диаметром не более 3,0 мм;
- 4 балл – поры диаметром более 3,0 мм.

Межгосударственный стандарт ГОСТ 34636 – 2020 на трубную заготовку и национальный стандарт ГОСТ Р 58228 – 2018 на методы контроля и оценки макроструктуры были разработаны и утверждены относительно недавно. До их создания основным национальным стандартом на поставку трубной заготовки был ГОСТ Р 53932 - 2010, оценка макроструктуры осуществлялась по ОСТ 14-1-235-91 [34-37]. При обновлении нормативной документации произошло некоторое послабление в части присвоения осевой пористости для 1-го и 2-го баллов.

Авторами работы [38], производилась оценка фактического уровня качества макроструктуры НЛЗ из низкоуглеродистых и низколегированных марок стали, анализ уровня, условий и степени выполнимости предъявляемых требований уже устаревшего на данный момент ГОСТ Р 53932-2010 различными производителями. Выявлено несоответствие по первичным испытаниям в зависимости от периода 10 – 25% металла по центральной пористости. Следует отметить, что требования нормативной документации, допускают аттестацию заготовки после проведения повторных испытаний на удвоенном количестве образцов. Для исправления ситуации были разработаны и опробованы различные технологические мероприятия, направленные на повышение качества макроструктуры НЛЗ в части центральной пористости. Однако они не принесли существенных изменений. Для оценки достоверности и воспроизводимости результатов, контроль

макроструктуры осуществили на продольных образцах длиной 300 мм (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты контроля макроструктуры НЛЗ диаметром 150 мм на продольных образцах.

Плавка – Ручей	Балл	Фото продольных образцов
1 – 4	1	
2 – 4	1	
3 – 3	1	
4 – 3	1	
3 – 2	2	
3 – 4	2	
2 – 2	3	
4 – 4	3	
1 – 2	4	
2 – 3	4	
1 – 3	4	
4 – 2	4	

Испытания продольных образцов показали, что НЛЗ некоторых плавков при одинаковых условиях разливки имеют центральную пористость как 1-го, так и 4-го баллов.

На основании исследования были сделаны выводы, что несоответствие металла по первичным испытаниям до 25% носит устойчивый характер. Вне зависимости от производителя и гарантируемого им уровня качества всегда в объеме поставки может быть найдена заготовка с участком, на котором величина центральной пористости превышает 2 балл [38].

Авторы работы [39], исследовали развитие дефектов макроструктуры НЛЗ при прошивке в двухвалковом стане винтовой прокатки по грибовидной схеме. В результате проведенной работы было установлено, что при наличии центральной

пористости и осевой ликвации более 2-го балла согласно шкалам ОСТ 14-1-235-91, на внутренней поверхности гильзы образуются плены. Зачастую они имеют незначительные размеры и плотно прижаты к поверхности гильзы, но на последующих переделах при раскатке и особенно при редуцировании вскрываются.

Авторы работы [40], обжимали НЛЗ диаметром 150 мм в линии трубопрокатного агрегата с раскатным станом Асселя до диаметра 115 мм. Часть деформации, а именно 3 – 5 мм приходилась на прокатку в прошивном двухвалковом стане с направляющими линейками без оправки при максимальных углах подачи. Основная часть деформации величиной 20% приходилась на трехвалковый стан винтовой прокатки с углом подачи 12 градусов. В результате экспериментальной прокатки было выявлено, что обжатие НЛЗ более 2% в двухвалковом стане приводит к развитию дефектов макроструктуры в центральной части заготовки. Центральная пористость с 1-го балла увеличилась до 2 – 4-го балла. Исследование макроструктуры поперечных образцов после суммарного обжатия свидетельствовало о проработке структуры НЛЗ только в периферийной части, в осевой зоне заготовки структура осталась непроработанной.

О вскрытии полости при деформации НЛЗ 2 – 3% на двухвалковом стане винтовой прокатки указано и в работе [32]. Небольшая величина критической деформации свидетельствует о повышенной чувствительности литой структуры к знакопеременным нагрузкам металла в отличие от катаного, вскрытие полости у которого происходит при 8 – 12 %.

В работах ученых под руководством И. Н. Потапова было установлено, что процесс радиально - сдвиговой прокатки (РСП) при увеличении обжатия обеспечивает глубокую проработку структуры материала за счет развития интенсивной сдвиговой деформации. При этом в отличие от других способов деформации при винтовой прокатке путем изменения угла подачи можно влиять на интенсивность проработки структуры стали. В экспериментальных прокатках коэффициент вытяжки изменяли от 1,3 до 4,5, а угол подачи от 5 до 32 градусов. На рисунке 4 показана макроструктура деформированных заготовок с коэффициентом вытяжки $\mu = 4,5$ при различных углах подачи.

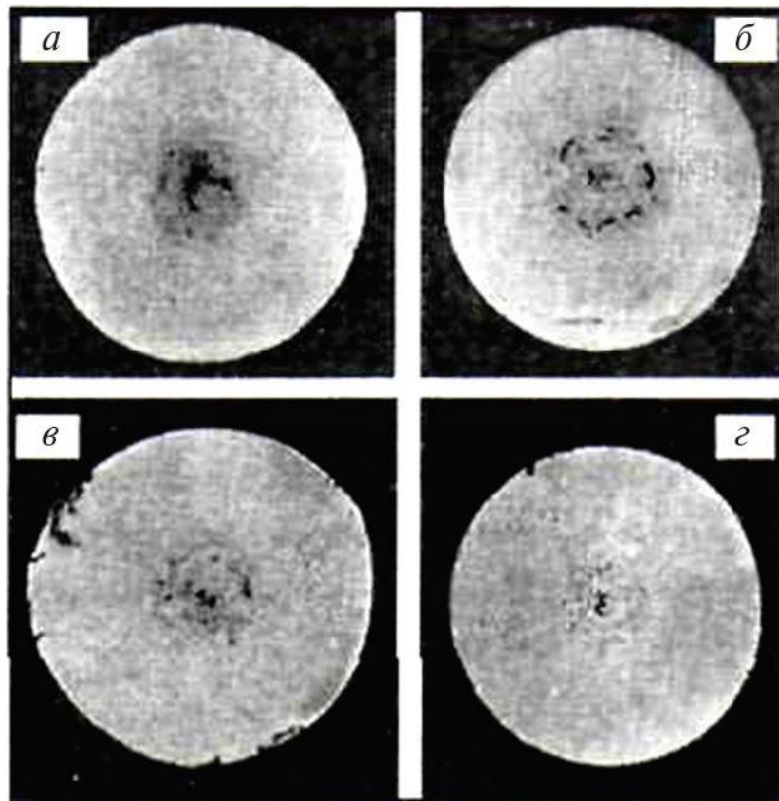


Рисунок 4 – Макроструктура деформированных заготовок при $\mu = 4,5$:

a – при $\beta = 5^\circ$; $б$ – при $\beta = 7^\circ$; $в$ – при $\beta = 15^\circ$; $г$ – при $\beta = 25^\circ$

При малых углах подачи в осевой зоне заготовки наблюдается вскрытие полости и развитие осевой рыхлости металла. При углах подачи $\beta = 25^\circ$ добиваются значительного уменьшения осевой пористости (не более 0,5 балла). Аналогичная закономерность выявлена при образовании высокодисперсной зеренной структуры. При малых углах подачи и коэффициентах вытяжки зона с мелкими зернами располагается в периферийной зоне поперечного сечения, а в осевой зоне наблюдаются крупные зерна. С увеличением угла подачи и коэффициента вытяжки разноструктурность исчезает [26].

При изучении микроструктуры металла труб и заготовок из марки стали 32ХГ в условиях Синарского трубного завода было установлено, что применение радиально-сдвиговой прокатки перед прошивкой способствует уменьшению неоднородности деформации, интенсивной проработке крупнозернистой дендритной структуры, уменьшению пористости в осевой зоне литой заготовки и повышению технологических характеристик металла [26]. Микроструктура заготовок представлена на рисунке 5.

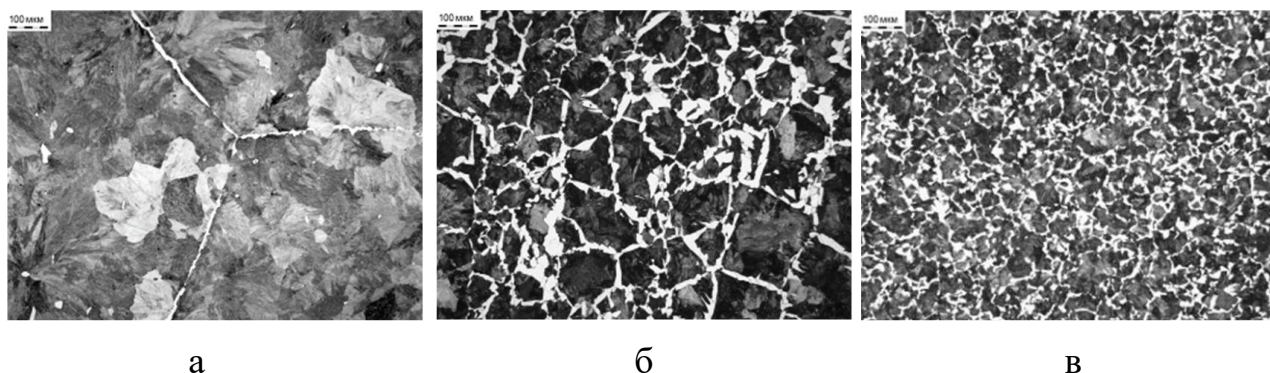


Рисунок 5 – Микроструктура заготовки:

а – непрерывнолитая; б – деформированная в стане продольной прокатки;
в – непрерывнолитая после РСП.

Размер зерна непрерывнолитой заготовки после РСП меньше размера зерна катаной заготовки. Размер зерна металла готовых труб, изготовленных из непрерывнолитой заготовки после РСП, составляет 40 – 70 мкм, а из катаной заготовки 100 – 200 мкм. Исследования механических свойств труб из стали 32ХГ показали, что дисперсия механических свойств труб, полученных по технологии с РСП, уменьшилась в среднем на 10 % по сравнению с дисперсией механических свойств труб, полученных с использованием катаной трубной заготовки. Благодаря этому повысилась надежность обеспечения требуемого уровня качества труб по новой технологии и уменьшился выпуск труб второго сорта из-за несоответствия уровня механических свойств требованиям стандартов [26].

В тоже время при прокатке толстостенных труб непосредственно из НЛЗ имеются остатки литой структуры в толщине стенки гильз, что отрицательно сказывается на их механических свойствах, решение этой проблемы требует дальнейших исследований [32].

Для обеспечения гарантированного уровня механических свойств продукции из НЛЗ при продольной прокатке коэффициент вытяжки должен составлять не менее 10, при ковке и прессовании $\mu = 6 - 8$, исследования в области влияния винтовой прокатки на проработку структуры свидетельствуют о возможности преобразования литой структуры при $\mu \geq 4$ [40, 41]

Более высокие механические свойства металла при винтовой прокатке

заготовок объясняются развитой поперечной деформацией, которая за счет макро сдвигов способствует лучшей проработке литой структуры.

Наибольшее количество работ, посвященных изучению проработки литой структуры при прошивке в двухвалковых станах винтовой прокатки и теоретическому описанию распределения доли поперечной деформации, параметрам циклического формоизменения, определения удельной объемной работы деформации (УОРД), накопленной степени деформации сдвига (параметр Одквиста) принадлежит Голубчику Р.М. и его соавторам [41 – 46]. Необходимо отметить, что деформационные параметры при прошивке рассматривались по двум направлениям. УОРД анализировали в наиболее опасном сечении перед носком оправки с точки зрения недопущения образования внутренних дефектов на гильзе. Вторым направлением являлся анализ накопленной степени деформации за всю операцию прошивки с целью проработки литой структуры НЛЗ. Так, в работах [42, 46], проводился анализ деформационных параметров двух подобных трубопрокатных агрегатов: ТПА 140 Первоуральского Новотрубного завода (ПНТЗ) Россия и Южнотрубного завода (ЮТЗ) г. Никополь, Украина. В результате анализа были сделаны выводы о том, что при прошивке непрерывнолитых заготовок проработка литой структуры металла выше на стане ПНТЗ. Поэтому прошивку для получения тонкостенных гильз из низкоуглеродистых НЛЗ предпочтительнее вести на данном агрегате.

Для катаных заготовок из высоколегированных сталей более предпочтительными являются меньшие величины ОРД до носка оправки, что делает режимы ЮТЗ более надежными.

В публикации [43] оценивалось влияние положения оправки при прошивке заготовок на параметры циклического формоизменения и долю поперечной деформации при каждом единичном обжатии. По результатам расчета в математической модели было установлено, что при расположении оправки преимущественно в конусе раскатки проработка литой структуры выше.

В работе [46] было установлено, что уменьшение диаметра заготовки и работа «на подъем» способствует большей поперечной деформации, благоприятно

влияя на проработку литой структуры НЛЗ. Изменение параметров циклического формоизменения по длине очага деформации показало, что до носка оправки с уменьшением диаметра заготовки воздействие на структуру снижается, что должно благоприятно повлиять на отсутствие образования внутренних плен на гильзах.

В связи с увеличением проработки структуры (параметр Одквиста), в работе [45], процесс прошивки рекомендуют осуществлять по грибовидной схеме.

Следует отметить, что рекомендации по режимам прокатки направленные на повышение накопленной степени деформации необходимо анализировать на предмет их соответствия общепринятым представлениям о благоприятных условиях протекания процесса.

Так, повышение прошиваемости заготовки, стабильный захват и освобождение очага деформации при прошивке порой вступают в противоречия с предложенными мероприятиями, например, снижением уровня поперечной деформации [47].

С.П. Галкин предложил оригинальный метод определения показателя поперечной деформации при прошивке через коэффициенты истинной деформации по трем осям [48].

Авторы работы [49] считают, что чем меньше доля поперечной деформации, тем более эффективен процесс формоизменения.

Поперечное истечение металла повышает расход энергии на передел в целом. Металл, интенсивно вытесняемый в поперечном направлении, стремится затечь в зазоры между валками и направляющим инструментом. В этой связи, в качестве направляющего инструмента можно использовать только линейки, которые создают плотно замкнутый калибр. В большинстве случаев высокая доля поперечной деформации отрицательно сказывается на деформируемости заготовок, особенно заготовок с пониженной исходной пластичностью (непрерывнолитых и из легированных марок). Сильное растяжение периметра повышает опасность возникновения поверхностных дефектов [49].

Авторы работы [49], также приводят обоснованное опровержение существующего мнения, что станы с грибовидными валками в связи с нарастанием

окружной скорости по длине очага деформации предпочтительнее станов чашевидного и бочковидного типа. И.Н. Потапов, П.М. Финагин, А.В. Гончарук, Б.А. Романцев, С.П. Галкин и другие представители школы МИСиС считают, что прошивка по грибовидной схеме способствует вскрытию дефектов наружной и внутренней поверхности. Грибовидные валки способствуют натяжению металла в очаге деформации. Это отрицательно сказывается на качестве наружной поверхности гильз.

1.4. Направляющий инструмент станов винтовой прокатки.

Выбор типа направляющего инструмента двухвалкового прошивного стана обусловлен размерным и марочным сортаментом труб, объемом производства и экономической целесообразностью использования того или иного типа направляющего инструмента. Принципиальные схемы очагов деформации с использованием различного направляющего инструмента представлены на рисунке 6 [50].

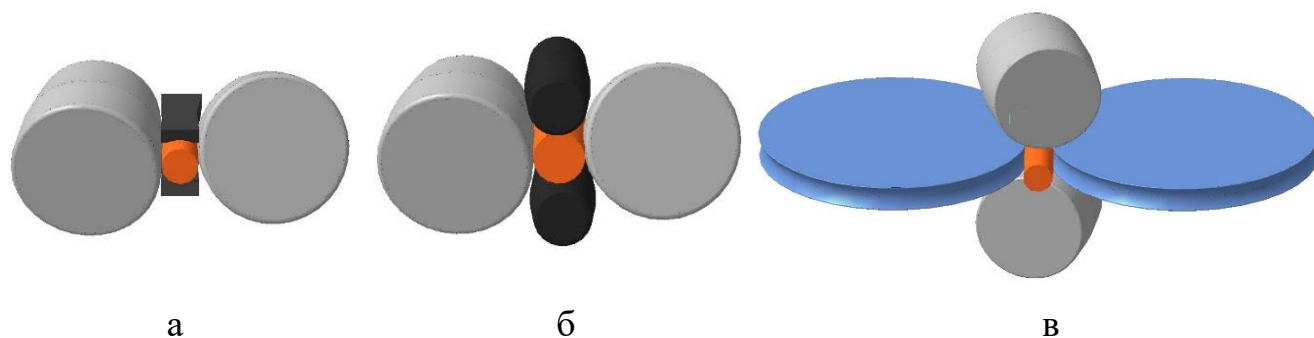


Рисунок 6 – Виды очагов деформации двухвалковых станов винтовой прокатки:

а – с линейками; б – с роликами; в – с дисками

Трубопрокатные агрегаты, введенные в эксплуатацию в двадцатом веке, как правило, имеют в своем составе прошивной стан винтовой прокатки с горизонтальным расположением рабочих валков и линейками, расположенными в вертикальной плоскости. При производстве толстостенных гильз большого

диаметра, в качестве направляющего инструмента используются холостые ролики. Первые эксперименты по использованию направляющих дисков при прошивке были проведены в лабораторных (МИСиС) и промышленных условиях (Первоуральский новотрубный завод) Б.А. Романцевым в 1969 - 71 г.

В современных прошивных станах новой конструкции, разработанных зарубежными компаниями, очаг деформации образован рабочими валками, расположенными в вертикальной плоскости и приводными дисками, расположенными горизонтально [49]. Идея использования в качестве направляющего инструмента дисков не нова, так за рубежом еще в середине двадцатого века на раскатных станах Дишера направляющим инструментом служили именно приводные диски [51]. Однако между современными прошивными станами с дисками и раскатными станами Дишера имеются принципиальные различия как в части кинематики процесса, так и функций направляющего инструмента.

Мощность привода дисков современных прошивных станов для прокатки гильз среднего диаметра, составляет приблизительно 2×200 кВт, при диаметре дисков 2500 мм. В свою очередь мощность главного привода прошивного стана больше в 20 раз и составляет 2×4100 кВт. Соответственно, функция привода дисков задать им начальную частоту вращения при запуске производства и сохранять угловую скорость в паузах между прокатками, тем самым согласовать осевую скорость движения металла и диска в момент захвата заготовки. В свою очередь принципиальная функция дисков Дишера при раскатке заключалась в интенсификации процесса прокатки, так как линейная (окружная) скорость вращения дисков при прокатке была выше осевой составляющей вектора скорости рабочих валков в три-четыре раза [13, 50]. Диски Дишера с высокой энерговооруженностью служили как активно деформирующий технологический инструмент, существенно влияя на коэффициенты осевой и тангенциальной скорости прокатки, распределение осевой и поперечной деформации. Станы Дишера сейчас мало распространены из-за сложности их конструкции, а также из-за длительности и сложности смены дисков при переходе на прокатку труб другого

типоразмера. Аналогичными недостатками обладают и современные прошивные станы с направляющими дисками. Кроме того, применение дисков большого диаметра вынудило конструкторов применять схему с вертикальным расположением рабочих валков, что негативно сказывается на габаритах и массе клетки прошивного стана и главных приводов, сложности его обслуживания и условиях работы нижнего валка, так как на него в процессе прокатки льется большое количество воды с окалиной.

Известна новая конструкция стана винтовой прокатки, где в качестве направляющего инструмента применяется диск-сектор [52, 53]. Принцип его работы представлен на рисунке 7.

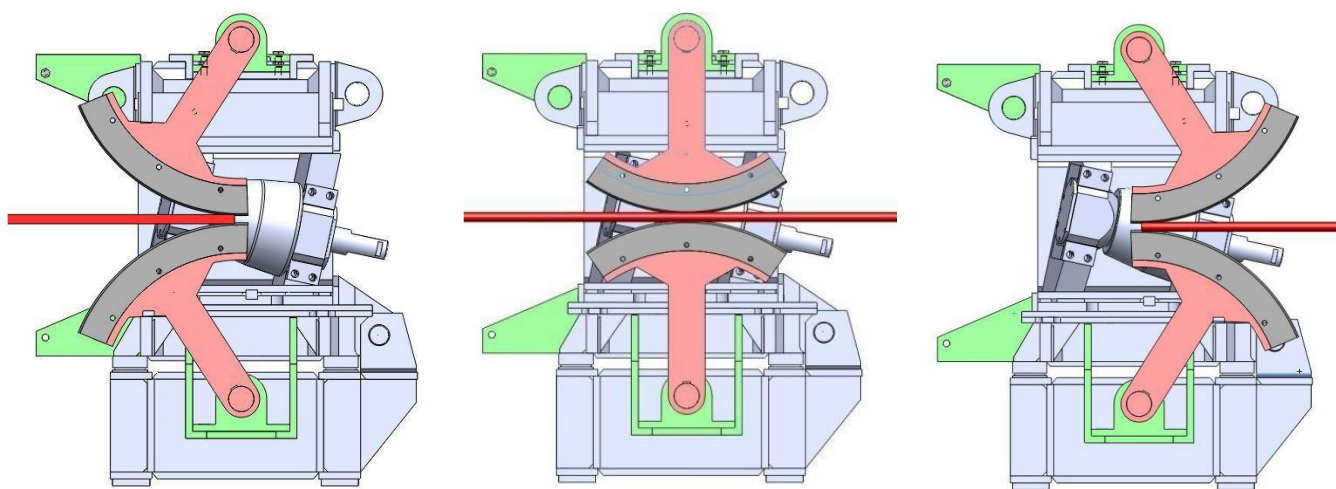


Рисунок 7 – Принцип работы диск-сектора

В начале прокатки исходной заготовки направляющий инструмент находится в начальном положении, при котором он повернут на начальный угол в сторону входной проводки. Во время прокатки направляющий инструмент поворачивается на рабочий угол в свое конечное положение. В паузах между прокатками диск-сектор с помощью привода отводится в исходное положение [53].

Время соприкосновения каждого участка рабочей поверхности бандажа с горячим металлом составляет около 0,5 с. За это время диск-сектор, обладающей большой массой, не успевает нагреться. Кроме того, бандаж и диск-сектор постоянно охлаждаются водой. Все это способствует повышению износостойкости

инструмента, что в свою очередь является залогом высокого качества труб.

Применение такого типа направляющего инструмента, с одной стороны, сохраняет преимущества свойственные дискам, а именно высокая износостойкость и отсутствие сил трения в продольном направлении при прокатке, а также устраняет ряд конструктивных недостатков. Меньшие габариты позволяют использовать более рациональную схему с горизонтальным расположением валков. Кроме того, существенным достоинством заявленного устройства, является возможность вписать его в действующие станы винтовой прокатки с направляющими линейками. Конструкция была разработана под руководством Б.А. Романцева на кафедре обработки металлов давлением НИТУ «МИСиС», а ее опробование в лабораторных условиях показало свою жизнеспособность и подтвердило наличие существенных технологических и конструктивных преимуществ.

Сравнительный анализ различных видов направляющего инструмента ранее проводился под руководством И.Н. Потапова на лабораторном стане МИСиС, а также в промышленных условиях на трубопрокатном агрегате 30-102 Первоуральского новотрубного завода и трубопрокатного агрегата 400 Никопольского Южно-трубного металлургического завода [50].

1.4.1. Влияние направляющего инструмента на качество наружной поверхности гильз

При прошивке наблюдается значительный пластический изгиб стенки заготовки-гильзы, оказывающий наряду с числом циклов деформации существенное влияние на качество ее наружной поверхности [11, 50]. Для уменьшения растягивающих напряжений рационально выполнять калибр стана замкнутым и оказывающим минимальное сопротивление истечению металла в осевом направлении. В большей степени этому требованию отвечают направляющие линейки и диски.

Направляющие ролики не могут образовать замкнутый калибр с валками и к

тому же способствуют поперечной раскатке, что при прокатке тонкостенных гильз приводит к резкому возрастанию овальности и затеканию металла в имеющиеся зазоры.

Установлено, что кривизна заготовки-гильзы на входе металла в валки (в тангенциальном направлении) практически одинакова для рассмотренных видов направляющего инструмента и незначительно возрастает с увеличением угла подачи. Иная картина наблюдается на выходе металла из валков. В этом случае при прокатке с роликами кривизна значительно больше, чем при прокатке с линейками и дисками.

Как уже отмечалось, угол подачи оказывает влияние на пластический изгиб стенки гильзы на выходе из валков, хотя степень этого влияния при прошивке с различным направляющим инструментом неодинакова. Очевидно, кривизна при прокатке с линейками и дисками, особенно в области больших углов подачи, значительно меньше, чем с роликами. Следовательно, образование дефектов при прошивке в стане с роликами более вероятно. Об этом свидетельствует тот факт, что паз, выполненный на заготовке, при прошивке с роликами раскрывается в грубую плену. При прошивке же с линейками и дисками этот паз раскатывается в риск.

Таким образом, с точки зрения формоизменения металла при прошивке и качества наружной поверхности гильз в области больших углов подачи наиболее рационально использование в качестве направляющего инструмента дисков и линеек. Применение направляющих роликов вызывает интенсивную поперечную раскатку заготовки, способствующую образованию поверхностных дефектов.

1.4.2. Износостойкость направляющего технологического инструмента

Износ технологического инструмента оказывает значительное влияние на качество продукции, а также на коэффициент эффективного использования оборудования. За критерий износостойкости принимается количество прокатанного на стане металла в рамках срока эксплуатации одного комплекта

направляющего инструмента.

В России и за рубежом на трубопрокатных агрегатах с двухвалковыми прошивными станами винтовой прокатки в качестве направляющего инструмента широко используются линейки. Направляющие линейки являются самым теплонагруженным инструментом трения, так как одни и те же точки их рабочей поверхности находятся в контакте с деформируемым металлом на протяжении машинного времени прошивки, что вызывает значительный местный разогрев (до 800-900°C) [13, 49, 58]. В паузах между прокатками линейки обычно обильно охлаждаются водой. Такой температурный режим приводит к высоким термическим напряжениям, в результате чего на рабочей поверхности линейек появляется характерная сетка разгара. Износ инструмента в процессе эксплуатации приводит к изменению овализации заготовки-гильзы в очаге деформации, к ухудшению качества поверхности гильз и труб и, в некоторых случаях, к нарушению процесса прошивки [49, 59].

Следует отметить, что причиной выхода из строя линейек является не только физический износ их рабочей поверхности и образование сетки разгара, но и налипание металла прокатываемых заготовок на рабочую поверхность. На рисунке 8 представлены фото линейек ТПА 70-270, отлитых из экспериментального химического состава после прошивки двух заготовок.



Рисунок 8 – Налипание прокатываемого металла на рабочую поверхность линейек

При прокатке труб, в особенности из легированных сталей и сплавов, склонных к налипанию, происходит сваривание частиц заготовки с рабочей поверхностью линеек, в результате чего на поверхности гильз возникают дефекты наружной поверхности, такие как «винтовая риска», «вкатанная металлическая частица» [65]. Как известно, на возникновение точек сваривания влияет химический состав контактирующих металлов, давление и температура [66].

Эффективным методом повышения стойкости технологического инструмента является снижение температуры его поверхности, что достигается за счет уменьшения времени контакта с металлом путем повышения угла подачи, увеличения частоты вращения валков, увеличения коэффициента осевой скорости [60, 61]. Однако в промышленных условиях наблюдается явление, когда с увеличением скорости деформации происходит более интенсивное налипание металла на линейки. Объяснить это можно тем, что несмотря на снижение времени контакта металла с инструментом, происходит более интенсивный разогрев металла поверхности заготовки и рабочей поверхности линеек за счет скольжения, в результате чего более активно образуются узлы схватывания.

В большинстве случаев износостойкость линеек повышают применением более жаропрочных материалов. Ограниченно на практике применяются водоохлаждаемые линейки с системой внутренних каналов [67, 68]. Однако выполнить каналы равноудаленными от многоконусной рабочей поверхности линеек не представляется возможным. Как правило, каналы охлаждения проходят параллельно основанию линейки, соответственно наиболее теплонагруженные участки (пережим и начало выходного конуса) являются в такой конструкции наиболее удаленными от теплоотводящей поверхности.

Как правило, в составе крупных производителей бесшовных труб имеется литейный цех по производству линеек. Для большинства прошивных станков, эксплуатирующихся в России, линейки отливают из высоколегированного сплава «бидулоидного чугуна», химический состав которого, может отличаться. В настоящее время известно применение импортных линеек, химический состав которых основан на легировании высокоуглеродистой стали хромом, никелем,

вольфрамом.

В таблице 4 представлен химический состав материалов, используемых отечественными и зарубежными фирмами для изготовления линеек прошивных станов [13, 72].

Таблица 4 – Химический состав материала отечественных и зарубежных линеек прошивных станов

Производитель	Химический состав, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	S	P
Отечественные заводы (бидулоид)	1,7-2,0	0,3-0,5	0,3-0,5	29,0-33,0	4,0-6,0	-	≤0,05	≤0,05
	1,8-2,1	0,3-0,6	0,8-1,2	30,0-34,0	4,0-6,0	-	≤0,45	≤0,45
«SMS MEER», Germany	0,75-0,85	0,5	1,5	27,0-29,0	49,0-51,0	4,0-5,5	-	-
Ambridge PA, USA	0,7-0,9	0,4-0,5	1,0	26,0-28,0	14,0-19,0	-	-	-

Впервые на ТПА 70-270 АО «ВМЗ» были внедрены водоохлаждаемые линейки, изготовленные из низкоуглеродистой стали, с наплавкой рабочей поверхности жаропрочной проволокой ЭП 567 или ВЖ 98. Успешный опыт эксплуатации этого агрегата, показывает сопоставимую износостойкость линеек такой конструкции.

Для линеек любого типа, причиной выхода из строя является интенсивный износ их рабочей поверхности и сетка разгара. Размеры и форма пятна износа зависят в основном от настройки калибра стана. Максимальная глубина выработки достигает 7 – 8 мм.

Износостойкость линеек также зависит от состояния рабочей поверхности валков. В первые часы работы новых валков наблюдается наиболее интенсивный износ линеек, который объясняется интенсивным истиранием их поверхности прокатываемыми заготовками, имеющими следы повышенной шероховатости валков. По мере износа входного конуса валков износостойкость линеек

возрастает. Уменьшение износа направляющих линеек в конце кампании валков связано также с изменением настройки калибра стана, обусловленным выработкой рабочих валков.

На износостойкость линеек большое влияние оказывают параметры настройки очага деформации, такие как коэффициент овализации и смещение оси прокатки. При уменьшении расстояния от оси прокатки рабочей поверхности инструмента возрастает действующее на нее усилие металла, уменьшение коэффициента овализации очага деформации также сопровождается снижением скорости прошивки и ростом скольжения металла относительно инструмента в очаге деформации. Увеличение площади контакта металла с линейкой при одинаковом усилии металла приводит к более равномерному ее износу [13]. Достигается это уменьшением угла конусности на участке раскатки и радиуса в пережиме.

В условиях трубопрокатного агрегата 350 с двумя последовательно расположенными прошивными станами Никопольского Южно-трубного завода проводились исследования влияния направляющего инструмента на качество труб. Авторами работ было определено, что условия деформации второй прошивки значительно отличаются от первой в части скоростных, силовых параметров и стабильности процесса [28]. В большей степени это связано с отсутствием участка сплошной заготовки в очаге деформации. В работе отмечается, что использование роликов при первой прошивке возможно при отношении диаметра гильзы к толщине стенки $D/S < 9$. При второй прошивке критическое отношение D/S зависит от размера исходной заготовки и степени деформации. Практические результаты свидетельствовали об улучшении качества труб и уменьшении расхода направляющего инструмента при использовании роликов вместо линеек. По-видимому, за критерий качества принято уменьшение на гильзах поверхностных дефектов, связанных с налипанием металла на линейки при прокатке высоколегированных сталей.

Радикальным решением проблемы износостойкости направляющего инструмента является применение дисков.

Если в качестве направляющего инструмента служат диски, время контакта любой точки рабочей поверхности с деформируемым металлом составляет примерно 0,1 с. Длина рабочей поверхности диска в десятки раз больше, чем линейки, что значительно улучшает условия теплоотвода. В итоге разогрев рабочей поверхности диска уменьшается в несколько раз и не превышает 100°С.

За последнее время публикуется все больше результатов исследований износа валков и оправок при винтовой прошивке [62-64]. Однако практически нет исследований, посвященных износу направляющих линеек.

1.5. Выводы и постановка задач исследования

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

1. Снижению разностенности гильз и труб посвящено большое количество исследований, которые систематически проводились на протяжении развития технологии для прошивки заготовок и продолжаются до настоящего времени, что несомненно говорит о высокой актуальности данной задачи. Определены многочисленные факторы, влияющие на геометрические отклонения проката, однако при двойной прошивке такие исследования не проводились.

2. 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.

3. На практике увеличение коэффициента вытяжки при прошивке свыше 3 приводит к существенному 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.

4. В научно – технической литературе технология двойной прошивки освещена недостаточно. Отсутствуют данные по влиянию распределения степени

деформации между проходами на качественные характеристики гильз и параметры протекания процессов деформирования. Очевидно, что применение технологии двойной прошивки с теоретической и практической точек зрения позволит решить ряд актуальных проблем трубопрокатного производства.

5. На качество гильз и впоследствии качество труб существенное влияние оказывают дефекты макроструктуры заготовки. При прошивке НЛЗ, которая характеризуется пониженной исходной пластичностью и чувствительностью к знакопеременным нагрузкам следует создавать благоприятные условия деформирования, обеспечивающие снижение растягивающих напряжений как в центре, так и в периферийных слоях заготовки.

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

7. На качество наружной поверхности гильз, стабильность ведения процесса прошивки и эффективность использования оборудования существенное влияние оказывает стойкость направляющего инструмента прошивного стана.

8. Наиболее распространенным и универсальным направляющим инструментом, являются линейки. Их преимущества возрастают при изготовлении тонкостенных гильз, производстве труб небольшими партиями широкого размерно-марочного сортамента. Однако в технической литературе опубликовано мало исследований направленных на решение основных недостатков такого типа инструмента, низкую износостойкость и склонность налипания металла на рабочую поверхность.

На основе выполненного анализа поставлены следующие задачи исследования:

1. Провести теоретические и экспериментальные исследования геометрических, температурных, энергосиловых и кинематических параметров технологии двойной прошивки.

2. Разработать рекомендации по распределению коэффициентов вытяжки между первой и второй прошивкой для обеспечения минимальной разностенности труб.
3. 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.
4. Разработать технические решения по увеличению износостойкости направляющих линеек прошивного стана и снижению дефектов наружной поверхности труб.
5. Выполнить промышленное опробование разработанных технических решений.

Глава 2. Теоретическое исследование

2.1. Параметрическая модель очага деформации прошивного стана

Очаг деформации прошивного стана образуют рабочие валки, оправка и направляющий инструмент.

Калибровка технологического инструмента прошивного стана и его расположение в пространстве должны обеспечивать:

- захват заготовки валками, стабильное ведение процесса прошивки и его окончание;
- получение гильзы заданных размеров;
- высокое качество наружной и внутренней поверхностей гильзы;
- заданную производительность.

Выполнение перечисленных требований достигается благодаря рациональной калибровке, конструкции и высокой износостойкости инструмента прошивного стана, рациональными настроечными параметрами. Следует отметить, что если хотя бы одно из перечисленных требований не выполняется, то процесс прошивки протекает неудовлетворительно [3].

При проектировании калибровок технологического инструмента, освоении технологии изготовления новых видов продукции, а также совершенствовании процесса прокатки рядовых типоразмеров труб, одним из основных этапов является проектирование очага деформации. Разработка калибровок валков, оправок, направляющего инструмента и их расположение в пространстве, необходимо осуществлять согласованно друг с другом, поскольку они образуют единый очаг деформации. Данная задача усложняется искажением очага деформации за счет разворота валков на угол подачи.

Особенностью ТПА 70-270 является двойная прошивка в одной клети винтовой прокатки. Так как перенастройка очага деформации после первой операции, осуществляется лишь за счет смены оправки в калибре, образованном валками и линейками без изменения их положения, процесс проектирования инструмента и разработка режимов деформации дополнительно требует

согласования двух операций. По этой причине, для получения гильз высокого качества и рационального распределения деформации между проходами, процесс проектирования носит вариативный характер с многочисленным внесением корректировок (рисунок 9).

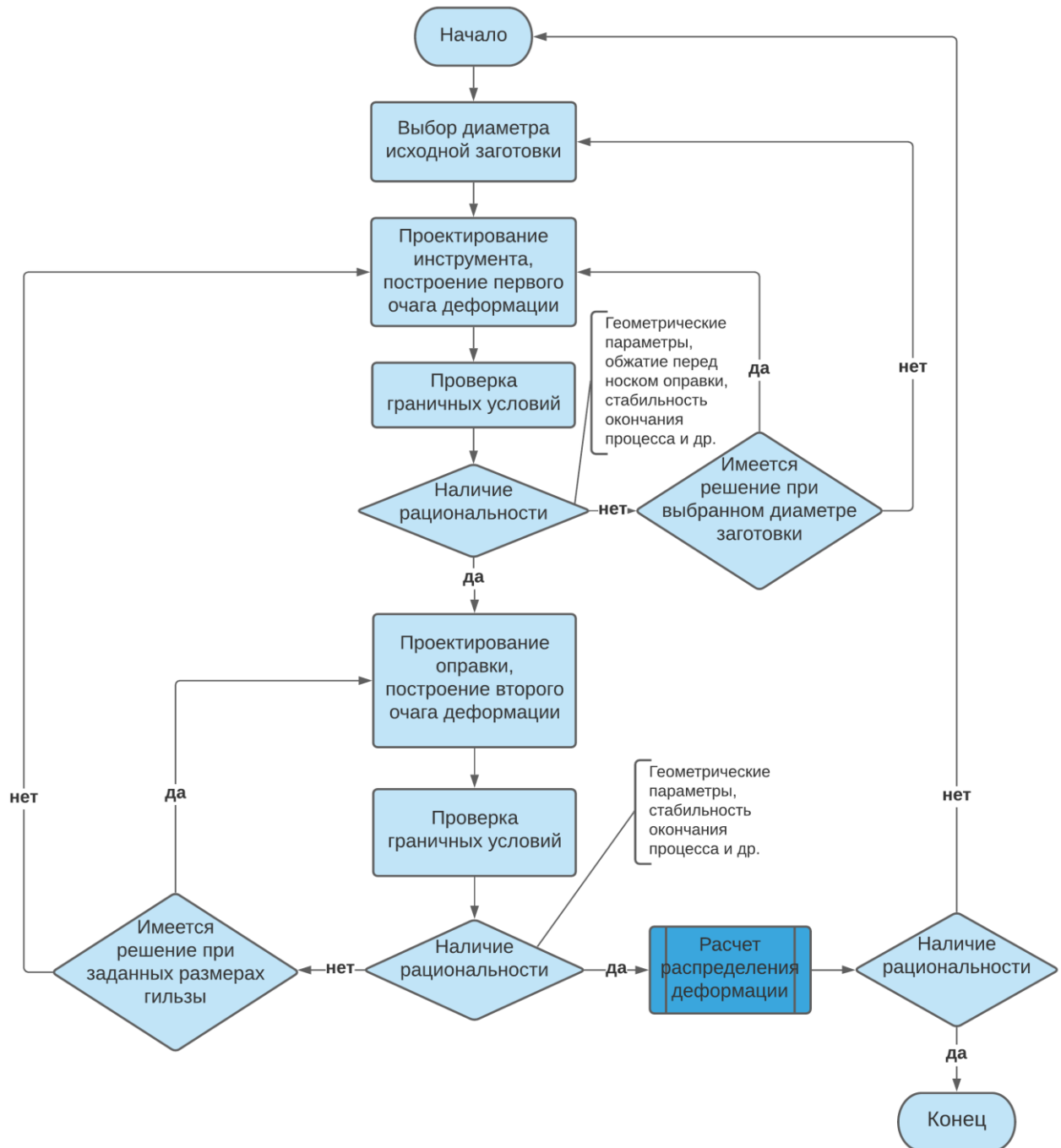


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма проектирования технологического инструмента и разработки технологии двойной прошивки заготовок в одной клети винтовой прокатки

Для оперативного внесения корректировок, в графических редакторах существуют специальные инструменты, с помощью которых можно задать связи между отдельными элементами в модели или между моделями в 3D сборке, что позволяет при последующем проектировании типовых деталей и конструкций не проектировать все заново, а изменить лишь несколько числовых параметров в разработанном ранее объекте. Параметризация разрешает использовать построенную один раз модель многократно и существенно сокращает время на формирование новых ее вариаций.

В рамках настоящего исследования представляет интерес создание параметрических моделей как всего прокатного инструмента по отдельности, так и параметрической 3D сборки очага деформации прошивного стана ТПА 70-270. В качестве инструмента проектирования была выбрана система трехмерного моделирования КОМПАС-3D.

На рисунке 10 представлена параметрическая 3D модель прошивных оправок.

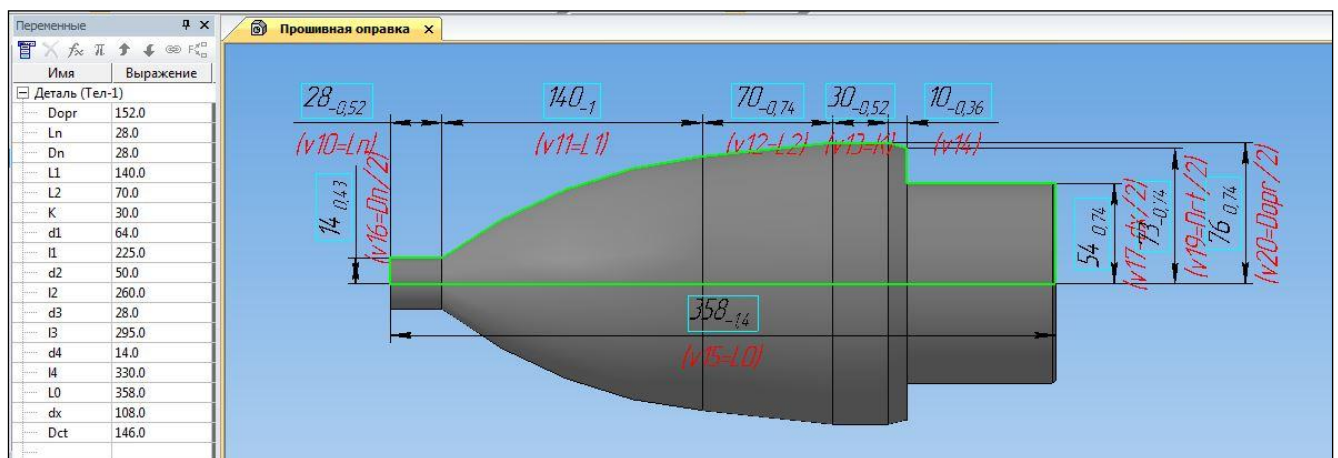


Рисунок 10 – Параметрическая 3D модель прошивных оправок.

Модель включает в себя не только профиль рабочей части, но и имеет внутренние каналы для циркуляции охладителя.

Аналогичные параметрические 3D модели спроектированы для валков и линеек.

На основе разработанных моделей технологического инструмента, спроектирована параметрическая сборка всего очага деформации (рисунок 11).

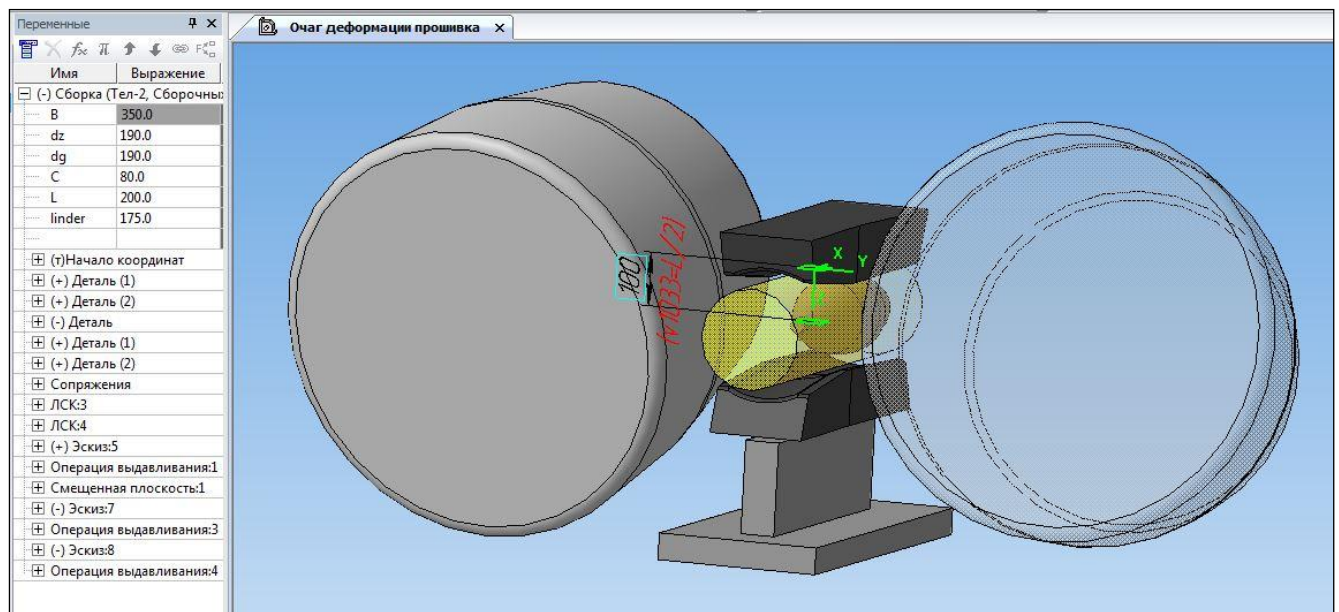


Рисунок 11 – Параметрическая сборка очага деформации прошивного стана ТПА 70-270 в КОМПАС-3D

Использование разработанных параметрических моделей позволяет в кратчайшие сроки решать целый спектр прикладных задач: проектирование нового технологического инструмента, разработка рациональных режимов деформации при освоении новых видов продукции (НВП), разработка соединений оправка-стержень, определение толщины компенсирующих прокладок между нижней линейкой и линейкодержателем и др.

Благодаря параметрическим моделям, была разработана и освоена технология промышленной прокатки труб из углеродистых, низколегированных и высоколегированных сталей, а также сплавов на основе цветных металлов целого ряда новых типоразмеров: 88,9x14,9 мм; 108,0x17,1 мм; 114,0x15,5 мм; 120,6x17,7 мм; 127,0x12,0 мм; 132,1x17,2 мм; 153,7x21,3 мм; 166,0x20,0 мм; 180,0x21,0 мм; 187,7x20,0 мм; 194,5x20,0 мм; 260,0x28,0 мм; 260,0x50,0 мм; 269,9x25,0 мм; 273,0x24,0 мм; 273,0x61,5 мм и др. Многочисленные опытные прокатки показали высокую точность прогнозирования геометрических размеров гильз.

Вторым направлением использования параметрических моделей является создание 3D твердотельных сборок очага деформации для последующего моделирования методом конечных элементов.

2.2. Моделирование процесса двойной прошивки

В настоящее время при исследовании процессов ОМД широко применяются современные программные комплексы для моделирования, основанные на методе конечных элементов [73-74]. Они позволяют на первоначальном этапе, без экономических потерь, провести оценку принимаемых решений, проанализировать формоизменение металла при использовании новых калибровок инструмента, оценить энергосиловые параметры. В то же время адекватность результатов расчета во многом зависит от граничных условий, достоверность которых сложно определить, например флуктуацию температуры нагрева, неравномерное охлаждение заготовки водой поступающей в очаг деформации в процессе прокатки, величину износа и реальный коэффициент трения на границе металл - инструмент и др. Поэтому для каждого процесса необходима верификация полученных результатов путем их сопоставления с результатами опытных прокаток. Несмотря на все сложности, результаты многочисленных исследований, опубликованные в периодических научных изданиях, подтверждают обоснованность и перспективность применения программ для моделирования процессов ОМД, в том числе и операции прошивки заготовок на станах винтовой прокатки [75-77].

Моделирование технологии двойной прошивки осуществлялось в QFORM 3D в полном соответствии с реальными размерами рабочего инструмента прошивного стана и параметрами настройки очагов деформации [78].

В зависимости от изменения фактора трения между рабочими валками и заготовкой анализировались изменения энергосиловых параметров (ЭСП) и размеров получаемых гильз, а также время прокатки. Для проведения моделирования были созданы трехмерные модели очагов деформации в соответствии с выбранными параметрами настройки, один из которых представлен на рисунке 12.

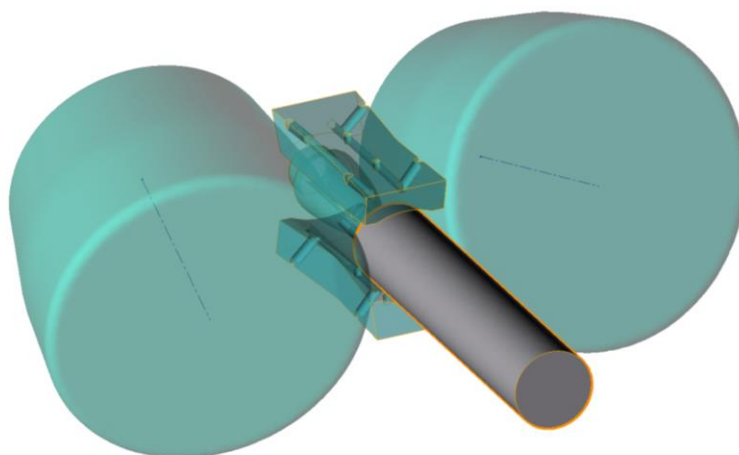


Рисунок 12 – Трехмерная модель очага деформации прошивного стана

Основные исходные параметры, принятые при моделировании, представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Исходные данные для моделирования процесса прошивки

Параметр	Значение
Материал заготовки	Сталь 45
Температура нагрева заготовки, °C	1180
Размеры исходной заготовки, мм – диаметр – длина	190 2110
Материал рабочих валков	40X
Материал оправки и линейек	4X5МФС
Температура инструмента, °C	50
Частота вращения рабочих валков, об/мин	60
Угол подачи, град	12
Угол раскатки, град	-7
Условия трения между валками и заготовкой	var (по закону Зибеля)
Условия трения между оправкой и заготовкой (фактор трения)	Без смазки (0,8 по закону Леванова)
Условия трения между линейками и заготовкой (фактор трения)	Без смазки (0,8 по закону Леванова)

На входе и выходе из очага деформации имеются виртуальные проводки, обеспечивающие удержание заготовки и гильзы на оси прокатки. Изначально для сравнения выбрано три разных фактора трения при прошивке: 0,9; 1,0 и 1,5. Далее, исходя из полученных результатов, добавлялись промежуточные варианты значений фактора трения (0,95 и 1,2). Для анализа полученные параметры сведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты измерения параметров процесса первой прошивки в зависимости от фактора трения (прошивка на оправке диаметром 76 мм)

Фактор трения (по Зибелю)	Крутящий момент, кН·м	Потребляемая мощность, кВт	Размеры гильзы, мм		Время прошивки, с
			<i>D</i>	<i>S</i>	
0,90	126,4	800	176,95	49,72	16,51
0,95	146,8	907	178,11	50,37	13,02
1,00	149,6	940	178,83	50,42	12,58
1,20	164,9	1034	178,18	49,89	10,77
1,50	177,0	1100	178,89	49,75	10,12

Стоит отметить, что заготовка полномасштабной модели очага деформации, использованной для моделирования, имеет более 100 тыс. элементов, что необходимо для получения приемлемой точности расчетов. В связи с этим, расчет одного варианта на компьютере средней производительности может занимать порядка 25 – 60 ч. Поэтому для сокращения временных затрат необходимо правильно задавать исходные условия задачи и иметь данные о предпочтительных значениях параметров, оказывающих значительное влияние на результат.

Как видно, изменение условий трения между рабочим инструментом и заготовкой при моделировании существенно влияет на значение энергосиловых параметров и время прошивки. Наиболее близкие значения момента и мощности прошивки при моделировании и проведении экспериментальной прокатки получены при факторе трения 0,9. Однако при этом время прошивки при

моделировании составило 16,51 с, что на 2,5 с больше. Наиболее близкое время прошивки при моделировании (13 с) и проведении эксперимента в промышленных условиях (14 с) получено при факторе трения 0,95, но в то же время происходит повышение момента прокатки на 20,4 кН·м и мощности на 107 кВт. Дальнейшее увеличение фактора трения приводит к росту момента и мощности, а также уменьшению времени прошивки (рис. 13).

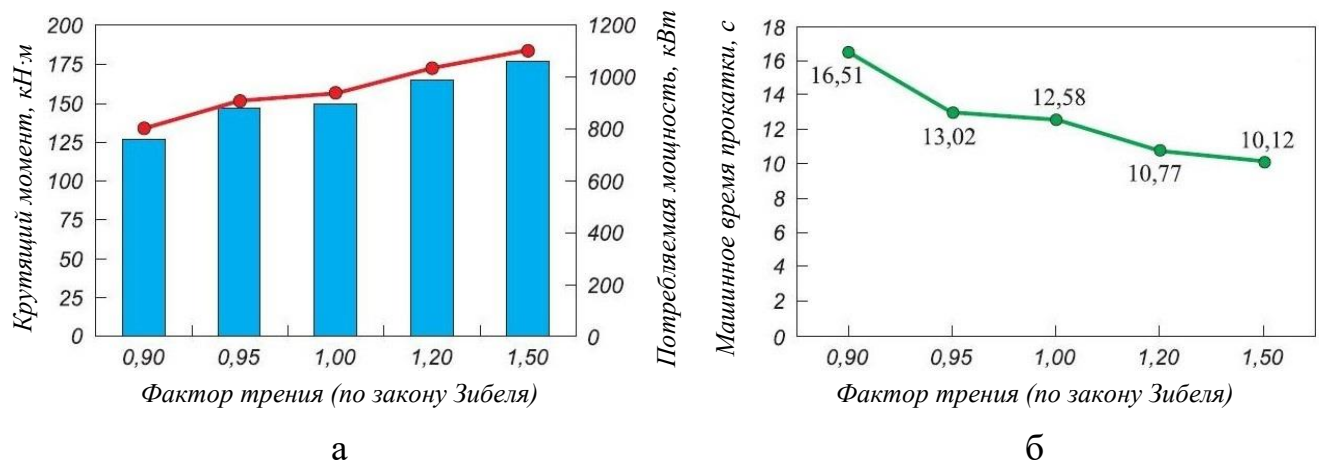


Рисунок 13 – Зависимость изменения параметров прошивки от фактора трения:

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

б – машинного времени прошивки (—).

Измерения размеров гильз, полученных после моделирования прошивки, показали, что фактор трения не оказывает существенного влияния на геометрические параметры. Максимальная разница по наружному диаметру D составила менее 2 мм, а разница по толщине стенки S не более 0,7 мм. Разница в размерах объясняется механизмом перестроения сетки конечных элементов при расчете и может быть снижена при помощи увеличения количества конечных элементов сетки заготовки.

Различие в размерах полученных гильз при проведении экспериментальных прокаток и при моделировании более существенное и составляет по диаметру до 6 мм, по толщине стенки до 2,5 мм. По результатам моделирования гильза после прошивки имеет меньший диаметр и большую толщину стенки. Таким образом,

существует разница в условиях радиальной раскатки гильзы на конусе оправки и в выходном конусе вала. Отличия в размерах возможно объяснить различиями в температурных условиях модели и реального процесса. Для сокращения времени расчета при моделировании задано «простое» условие теплообмена между заготовкой и инструментом, т. е. на контакте с инструментом решается упрощенная совместная тепловая задача. При этом изменение температуры инструмента рассчитывается только на контактирующей с заготовкой поверхности.

После завершения моделирования процесса первой прошивки полученная гильза импортировалась на следующую стадию второй прошивки для моделирования прокатки на оправке диаметром 162 мм. При этом температурное поле гильзы не сохранялось, начальная температура нагрева была задана равной 1180°C , что соответствует условиям эксперимента в промышленных условиях.

Время второй прошивки, практически совпадающее с реальным процессом, получено при факторе трения 0,8. Однако значения момента и мощности прокатки оказались заниженными в 2 – 2,5 раза относительно экспериментальных данных, полученных на стане. Такие различия, по-видимому, связаны с тем, что диаметр гильзы после первой прошивки в QFORM меньше реального, что привело к уменьшению площади контакта между валком и заготовкой.

При прошивке в один проход на оправке диаметром 162 мм значительно возрастает длина очага деформации и сопротивление осевому перемещению заготовки со стороны оправки, поэтому можно предположить, что потребуется более высокий показатель трения для стабильного протекания процесса прошивки. Действительно, во всем диапазоне изменения фактора трения 0,9 – 1,5 при вторичном захвате наблюдалось проскальзывание заготовки и отсутствие осевого перемещения.

При факторе трения 3,0 процесс прошивки протекал стабильно. Полученные значения момента и мощности прошивки находятся в диапазоне значений, зафиксированных системой мониторинга ЭСП при опытной прокатке. При этом время прошивки составило примерно 19,5 с, что на 4,5 с меньше, чем в реальном процессе.

Размеры гильзы также незначительно отличаются от полученных в условиях производства: разница в наружном диаметре составила 2 мм, по толщине стенки – 0,7 мм.

Для приближения к реальному процессу по параметру времени прошивки фактор трения был уменьшен до 2,5. Однако в данном случае с момента начала освобождения очага деформации гильза начала вращаться без осевого перемещения вдоль оси прокатки, поэтому дальнейший расчет не продолжался.

Таким образом 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. Поэтому для получения результатов расчета с приемлемой точностью, в обязательном порядке необходима верификация разработанной модели путем сопоставления параметров процесса моделирования с результатами опытных прокаток в промышленных условиях.

Глава 3. Экспериментальное исследование

3.1. Технология изготовления труб на ТПА 70-270

Экспериментальные исследования проводились на ТПА 70-270 в промышленных условиях АО «ВМЗ». Технологическая схема производства труб представлена на рисунке 14.

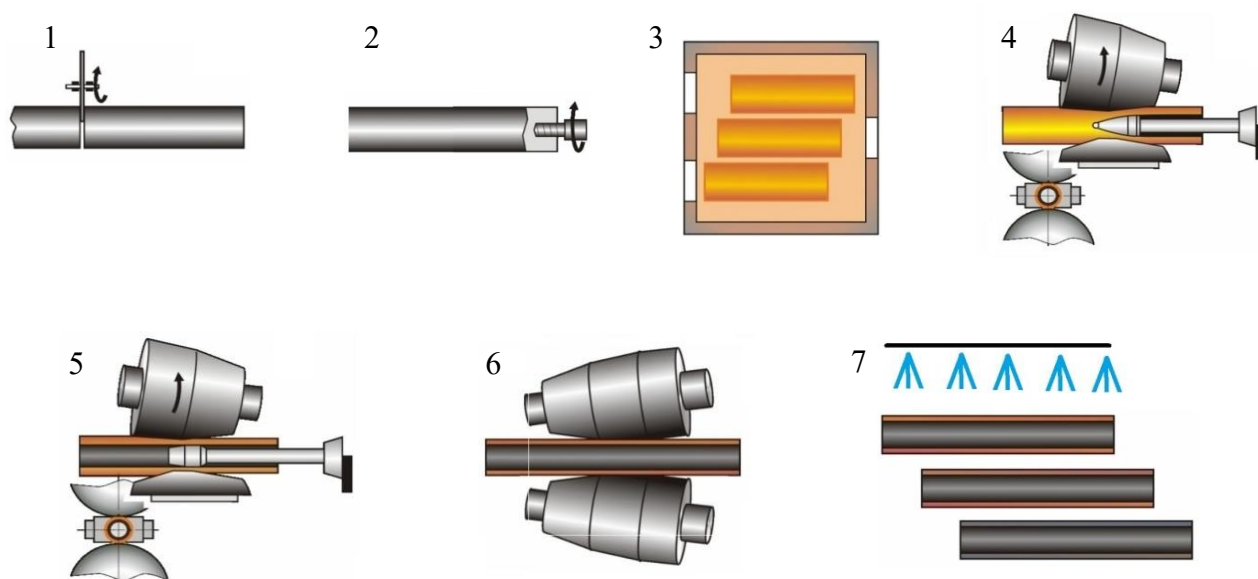


Рисунок 14 – Технологическая схема производства труб на ТПА 70 – 270.

В основу технологического процесса, положен метод первой и второй прошивки заготовки в двухвалковом стане винтовой прокатки с направляющими линейками. Технологическая схема производства бесшовных труб, включает следующие технологические операции:

- 1 – раскрой штанг на мерные длины дисковой пилой;
- 2 – нанесение на передний торец заготовки центрирующего углубления в холодном состоянии операцией сверления;
- 3 – нагрев заготовки в газовой печи до температуры прокатки;
- 4 – первую прошивку заготовок в гильзы на двухвалковом стане винтовой прокатки по чашевидной схеме с направляющими линейками;
- 5 – вторую прошивку гильзы в той же клети на короткой оправке;

6 – правку и калибрование черновой трубы в трехвалковом стане винтовой прокатки;

7 – контролируемое охлаждение труб.

Перестройка калибра прошивной клетки между проходами осуществляется посредством замены стержней с оправками путем перемещения в направлении прокатки относительно рабочих валков и линеек без изменения их положения.

Разработанный технологический процесс реализуется на компактном малоэнергоёмком автоматизированном оборудовании, на котором предусмотрена как возможность производства труб с одного нагрева, так и технология включающую в себя повторный нагрев гильз после первой прошивки для последующего деформирования. Фото прокатного оборудования представлено на рисунке 15.



а

б

Рисунок 15 – Прокатное оборудование ТПА 70-270 АО «ВМЗ»:

а – выходная сторона прошивного двухвалкового стана;

б – трехвалковый калибровочный стан.

Процесс первой и второй прошивки осуществляется рабочими валками при постоянном угле подачи 12° , угле раскатки 7° по чашевидной схеме. Калибрование черновой трубы по диаметру, производится в трехвалковом стане винтовой прокатки с грибовидными валками при угле подачи 10° , угле раскатки 6° и обжатии по диаметру до 5%, что позволяет совместить процессы калибрования трубы и правки.

При разработке технологии специалистами НИТУ «МИСиС» и строительстве агрегата, для повышения точности труб был принят комплекс конструктивных решений:

1. Раскрой заготовок дисковой пилой позволяет получать торцевую поверхность высокой точности, ее вертикальное отклонение не превышает 2% от величины диаметра.
2. Нанесение центрирующего углубления механическим способом в холодном состоянии, обеспечивает высокую точность операции и возможность ее контроля.
3. Нагрев в газовой печи с шагающим подом сопровождается вращением заготовок вокруг своей оси, что благоприятно сказывается на распределении температуры по сечению заготовки.
4. Последовательная деформация винтовой прокаткой с дозированной величиной обжатия, снижает поперечную разностенность.

3.2. План проведения экспериментальных исследований

Для оценки величины разностенности и температурного состояния гильз, энергосиловых и кинематических параметров процесса при прокатке труб размерами 194,5x15,9 мм 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

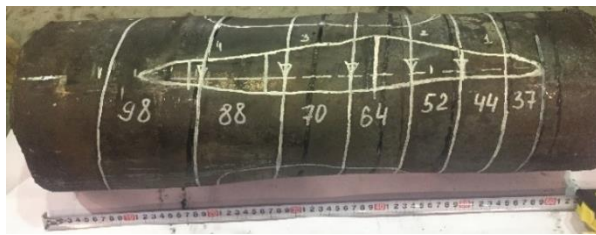
коэффициент вытяжки во втором проходе уменьшали. Последняя группа труб была изготовлена за одну операцию прошивки с коэффициентом вытяжки 2,76. План эксперимента представлен в таблице 7.

Таблица 7 – План эксперимента

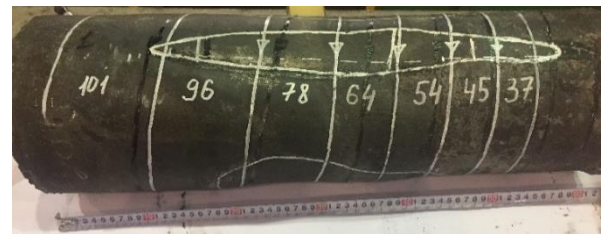
Маршрут прокатки		1-ый	2-ой	3-ий	4-ый	5-ый
1-ая прошивка	Диаметр оправки, мм	76	96	124	136	162
	Диаметр гильзы, мм	183	187	193	196	203
	Толщина стенки, мм	47,9	40,0	29,6	26,0	16,5
	Коэффициент вытяжки	1,35	1,49	1,81	1,98	2,76
2-ая прошивка	Диаметр оправки, мм	162				—
	Диаметр гильзы, мм	203				—
	Толщина стенки, мм	16,5				—
	Коэффициент вытяжки	2,05	1,91	1,57	1,44	—
Суммарный коэффициент вытяжки		2,76				
Соотношение коэффициентов вытяжки между операциями прошивки		0,64	0,78	1,15	1,38	—

В рамках экспериментальных прокаток исследовались очаги деформации при помощи «торможенки», полученных в результате принудительного отключения главного привода прошивного стана в процессе прошивки. На рисунке 16 представлена «торможенка» при прокатке гильзы по 5-му маршруту за одну прошивку.

Длина шага винтовой линии по ходу очага деформации увеличилась точно на величину коэффициента вытяжки 2,76, заложенного при проектировании режима деформации.



а

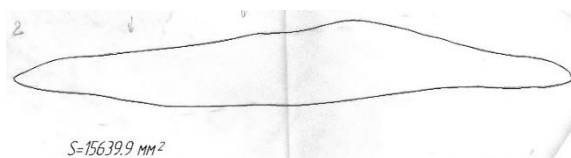


б

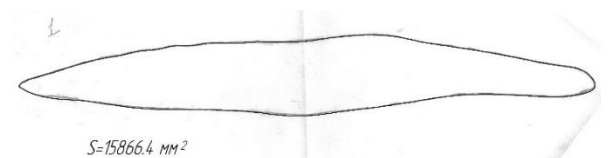
Рисунок 16 – «торможенка» полученная при прокатке гильзы по 5-му маршруту прокатки:

а – пятно контакта с левым валком; б – пятно контакта с правым валком.

На рисунке 17 представлена площадь пятна контакта заготовки-гильзы с валками.



а



б

Рисунок 17 – площадь пятна контакта заготовки-гильзы при прокатке по 5-му маршруту:

а – с левым валком; б – с правым валком.

Разница в площади контакта с валками составила 1,5%, что входит в пределы погрешности измерений. Полученные данные при исследовании «торможенки» применялись при проверке адекватности результатов моделирования процесса прошивки в QFORM 3D

3.3. Исследование точности гильз в процессе двойной прошивки

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 [79]. На рисунке 18 представлена схема проведения замеров.

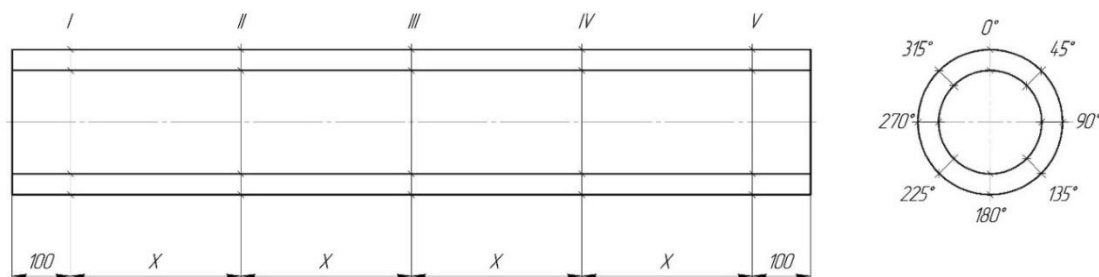


Рисунок 18 – Схема проведения замеров толщины стенки.

Толщину стенки замеряли ультразвуковым толщиномером «ВЗЛЕТ УТ» с погрешностью измерения 0,01 мм в пяти сечениях по длине и восьми точках по сечению. Сечения по длине труб распределяли равномерно, отступая от концов труб по 100 мм. На рисунке 19 представлены гильзы и трубы, прокатанные по 3-му маршруту.



а



б

Рисунок 19 – Проведение замеров толщины стенки труб, прокатанных по 3-му маршруту:

а – гильз после первой прошивки;

б – труб после второй прошивки и калибрования.

Результаты измерений толщины стенки и характеристики точности труб, прокатанных с одного нагрева приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты замеров толщины стенки труб, прокатанных с одного нагрева и рассчитанные дисперсии по группам

№ маршрута.	№ трубы	№ сечения	Угол в сечении от начала отсчета								$\bar{S}$	S_{max}	S_{min}	ΔS	σ_s^2
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°					
1	1	I	16,67	16,16	16,39	16,63	17,06	17,40	17,63	16,80	16,84	17,63	16,16	1,47	0,30
		II	16,74	17,42	17,52	17,54	17,35	17,77	17,75	16,84	17,37	17,77	16,74	1,03	
		III	17,27	17,18	16,88	16,88	17,36	17,48	17,25	17,42	17,22	17,48	16,88	0,60	
		IV	17,80	17,85	16,91	16,88	16,31	16,42	17,42	17,82	17,18	17,85	16,31	1,54	
		V	17,73	16,43	17,00	17,70	17,22	18,30	18,62	18,62	17,70	18,62	16,43	2,19	
	2	I	16,95	16,47	16,72	16,81	16,09	16,79	17,15	17,19	16,77	17,19	16,09	1,10	
		II	16,90	16,53	16,96	17,40	17,93	17,86	18,24	17,49	17,41	18,24	16,53	1,71	
		III	17,77	17,77	17,65	17,44	17,39	17,53	16,88	17,46	17,49	17,77	16,88	0,89	
		IV	17,12	17,17	17,02	17,32	17,26	17,54	17,05	17,27	17,22	17,54	17,02	0,52	
		V	17,35	17,43	18,31	18,47	17,94	17,33	17,80	17,80	17,80	18,47	17,33	1,14	
	3	I	16,44	15,55	15,63	16,22	16,64	17,21	17,94	17,13	16,60	17,94	15,55	2,39	
		II	16,64	16,97	17,10	17,32	17,28	17,20	17,07	16,71	17,04	17,32	16,64	0,68	
		III	16,76	16,66	17,09	17,39	17,64	17,49	17,04	17,15	17,15	17,64	16,66	0,98	
		IV	16,93	16,94	16,82	17,07	17,39	17,04	17,21	16,65	17,01	17,39	16,65	0,74	
		V	17,91	17,99	17,28	17,11	17,33	18,03	17,35	16,96	17,50	18,03	16,96	1,07	
2	1	I	18,41	17,60	18,00	17,40	16,50	17,01	17,60	17,97	17,56	18,41	16,50	1,91	0,22
		II	17,80	17,76	17,37	17,40	17,22	17,30	17,44	17,84	17,52	17,84	17,22	0,62	
		III	17,70	18,15	18,02	17,76	18,06	17,25	17,10	17,28	17,67	18,15	17,10	1,05	
		IV	17,22	17,48	17,36	17,41	17,21	17,60	17,40	17,93	17,45	17,93	17,21	0,72	
		V	18,45	17,32	16,52	16,66	17,09	17,40	16,80	18,00	17,28	18,45	16,52	1,93	
	2	I	16,69	16,69	16,87	16,83	16,99	17,00	17,02	17,01	16,89	17,02	16,69	0,33	
		II	17,60	16,72	17,29	17,02	17,58	18,01	18,15	17,40	17,47	18,15	16,72	1,43	
		III	17,42	17,82	17,60	17,01	17,02	17,01	17,50	17,55	17,37	17,82	17,01	0,81	
		IV	16,97	17,60	17,26	17,60	17,55	17,84	17,20	17,33	17,42	17,84	16,97	0,87	
		V	17,03	17,10	17,07	17,17	16,73	17,70	17,82	18,00	17,33	18,00	16,73	1,27	
	3	I	16,32	16,23	16,73	17,01	16,67	16,93	17,01	16,95	16,73	17,01	16,23	0,78	
		II	17,22	16,90	17,16	16,84	17,10	17,23	17,70	17,50	17,21	17,70	16,84	0,86	
		III	17,15	16,80	16,85	16,90	17,26	17,55	17,12	17,28	17,11	17,55	16,80	0,75	
		IV	17,62	17,25	16,91	16,46	17,26	16,90	17,23	17,61	17,16	17,62	16,46	1,16	
		V	17,85	17,40	16,07	16,65	18,05	17,34	18,05	18,35	17,47	18,35	16,07	2,28	
3	1	I	17,70	17,56	17,65	17,43	17,54	17,17	17,26	17,60	17,49	17,70	17,17	0,53	0,18
		II	18,25	18,20	18,18	17,70	18,16	17,96	17,96	18,10	18,06	18,25	17,70	0,55	
		III	17,80	17,81	17,51	17,90	17,69	18,26	18,20	18,00	17,90	18,26	17,51	0,75	
		IV	18,10	18,35	18,51	17,92	18,33	17,93	17,38	17,62	18,02	18,51	17,38	1,13	
		V	17,50	17,84	17,48	17,62	17,05	16,20	16,76	17,45	17,24	17,84	16,20	1,64	
	2	I	17,40	17,83	17,84	17,56	17,36	17,48	16,80	17,60	17,48	17,84	16,80	1,04	
		II	18,48	18,20	18,44	17,80	18,12	17,76	17,60	17,85	18,03	18,48	17,60	0,88	
		III	18,40	18,43	17,58	17,80	18,23	17,75	17,77	17,75	17,96	18,43	17,58	0,85	
		IV	17,70	18,20	17,50	17,80	17,86	18,00	18,00	17,63	17,84	18,20	17,50	0,70	
		V	17,62	17,70	18,02	17,09	17,82	17,80	16,80	17,00	17,48	18,02	16,80	1,22	
	3	I	17,24	17,24	17,10	17,20	17,34	17,64	17,16	17,38	17,29	17,64	17,10	0,54	
		II	17,70	18,06	18,03	18,10	18,00	18,19	18,09	17,90	18,01	18,19	17,70	0,49	
		III	17,90	18,46	18,20	18,13	17,90	17,83	17,65	18,37	18,06	18,46	17,65	0,81	
		IV	17,70	17,75	17,67	17,84	17,92	17,57	18,10	18,30	17,86	18,30	17,57	0,73	
		V	17,80	16,82	16,96	17,60	16,99	16,93	17,47	17,80	17,30	17,80	16,82	0,98	

Продолжение таблицы 8

№ маршрута.	№ трубы	№ сечения	Угол в сечении от начала отсчета							$\bar{S}$	S_{max}	S_{min}	ΔS	σ_s^2
			0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°					
4	1	I	16,40	16,52	17,02	16,35	16,94	17,03	16,57	16,52	16,67	17,03	16,35	0,68
		II	16,41	16,95	17,27	17,10	17,34	16,80	16,83	16,20	16,86	17,34	16,20	1,14
		III	17,43	16,80	17,00	16,21	16,24	16,51	16,96	17,28	16,80	17,43	16,21	1,22
		IV	16,98	17,17	16,40	16,44	16,60	16,27	16,84	16,44	16,64	17,17	16,27	0,90
		V	15,93	16,23	15,80	16,30	16,69	17,14	16,02	15,90	16,25	17,14	15,80	1,34
	2	I	16,57	16,44	16,71	16,36	16,00	15,96	16,20	16,54	16,35	16,71	15,96	0,75
		II	17,05	16,48	16,37	16,36	16,08	16,50	17,05	17,10	16,62	17,10	16,08	1,02
		III	16,28	16,10	16,20	16,12	16,80	17,00	17,20	17,14	16,61	17,20	16,10	1,10
		IV	16,62	16,46	16,71	16,60	16,58	16,72	17,02	16,50	16,65	17,02	16,46	0,56
		V	16,58	16,70	15,75	15,82	15,82	16,03	16,43	16,43	16,20	16,70	15,75	0,95
	3	I	15,95	16,46	16,35	16,44	16,50	16,25	16,65	16,82	16,43	16,82	15,95	0,87
		II	17,00	17,04	16,70	16,35	16,34	16,60	16,77	17,01	16,73	17,04	16,34	0,70
		III	16,90	16,50	16,67	15,95	16,67	17,00	16,88	16,80	16,67	17,00	15,95	1,05
		IV	17,00	16,33	16,06	16,35	16,60	16,46	17,10	16,68	16,57	17,10	16,06	1,04
		V	16,50	16,47	16,40	16,02	16,15	16,44	15,76	16,25	16,25	16,50	15,76	0,74
5	1	I	16,46	16,26	15,70	16,30	16,19	16,23	16,20	16,74	16,26	16,74	15,70	1,04
		II	16,96	17,18	17,16	17,31	16,92	16,48	16,17	16,14	16,79	17,31	16,14	1,17
		III	17,02	16,48	16,46	16,29	16,59	16,76	17,04	16,86	16,69	17,04	16,29	0,75
		IV	16,69	16,86	16,94	16,73	17,05	16,73	16,51	16,47	16,75	17,05	16,47	0,58
		V	17,79	17,37	16,51	17,16	17,34	17,03	17,17	17,97	17,29	17,97	16,51	1,46
	2	I	17,16	16,96	16,60	16,30	16,15	16,45	17,00	17,06	16,71	17,16	16,15	1,01
		II	17,06	17,11	17,04	17,56	17,44	17,30	16,83	17,20	17,19	17,56	16,83	0,73
		III	17,11	17,57	16,00	17,20	16,90	17,06	16,96	16,75	16,94	17,57	16,00	1,57
		IV	17,26	17,07	17,00	17,63	17,63	17,57	17,26	17,60	17,38	17,63	17,00	0,63
		V	17,84	18,09	18,46	18,27	17,36	18,45	18,58	18,15	18,15	18,58	17,36	1,22
	3	I	16,16	16,30	16,50	16,59	16,60	16,81	16,66	16,31	16,49	16,81	16,16	0,65
		II	17,24	16,97	16,80	16,82	17,00	17,05	16,84	16,98	16,96	17,24	16,80	0,44
		III	16,50	16,56	16,64	16,84	17,80	17,32	17,20	16,46	16,92	17,80	16,46	1,34
		IV	17,00	17,04	16,74	16,54	16,43	17,10	17,48	17,18	16,94	17,48	16,43	1,05
		V	18,32	18,30	17,26	17,85	17,90	18,35	17,73	17,83	17,94	18,35	17,26	1,09

16,00 – значения замеров, не вошедших в доверительный интервал

Доверительный интервал вычисляли по формуле (1):

$$\bar{S} - 3\sigma_s < S < \bar{S} + 3\sigma_s, \quad (1)$$

где $\bar{S}$ – среднее значение толщины стенки;

σ_s – среднеквадратичное отклонение толщины стенки.

Отклонение рассчитанного математического ожидания от номинального размера характеризует в основном точность настройки стана, которая как правило, легко корректируется вмешательством технологического персонала, за исключением отклонений, вызванными нестационарными стадиями процесса. В

рамках эксперимента преследовалась цель создать идентичные условия базовых режимов деформации, таких как обжатие заготовки в пережиме валков и перед носком оправки, коэффициент овализации, поэтому расстояния между линейками и валками не корректировали по ходу всего эксперимента.

В общем виде для определения математического ожидания и дисперсии, полученными на основании измерений толщины стенки в отдельных точках применяли формулы (2, 3):

$$\hat{M}[S] = \bar{S} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l S_{ijk}; \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_s^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l (S_{ijk} - \bar{S})^2, \quad (3)$$

где S_{ijk} – толщина стенки, измеренная на i -ой трубе в j -ом сечении в k -ой точке;

$N = n \cdot m \cdot l$ – общее число измерений в n партии труб, в m сечениях по длине трубы с l измерениями в каждом сечении.

На рисунке 20 представлены диаграммы распределения средних толщин стенок по длине гильз, прокатанных по четвертому и пятому маршруту прокатки.

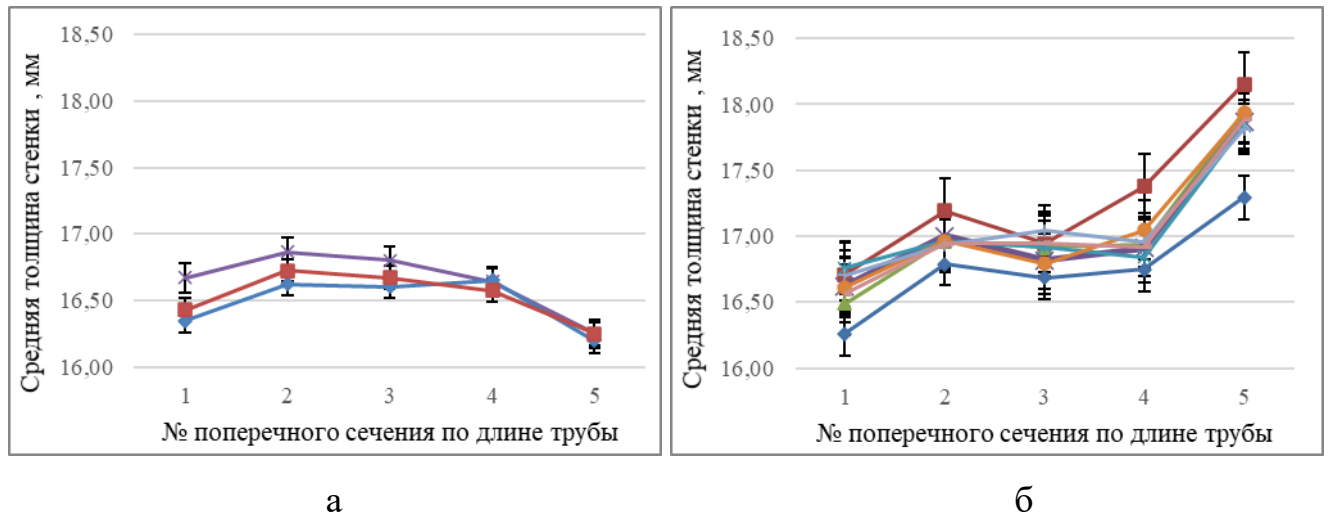


Рисунок 20 – Распределение средних толщин стенок в сечениях по длине труб:

а – для труб, прокатанных по 4-му маршруту с отношением $\mu_1/\mu_2 = 1,38$;

б – для труб, прокатанных по 5-му маршруту за одну операцию с $\mu = 2,76$.

При прокатке труб за одну операцию прошивки (рисунок 20 б) наблюдается повышенная продольная разностенность, возникающая за счет значительных

изменений средних толщин стенок при неустановившихся стадиях процесса, при этом на переднем конце наблюдается уменьшение толщины стенки, а на заднем конце утолщение по сравнению с номинальными значениями. Характер изменения продольной средней разностенности полученных гильз по 4 маршруту прокатки (рисунок 20 а) выглядит более предпочтительным для последующей деформации в виду меньшей усредненной толщины стенки по концам гильз, которые при транспортировке охлаждаются более интенсивно, чем тело трубы и соответственно имеют большее сопротивление деформации.

Для труб, прокатанных по маршрутам 1-3, графики средних толщин стенок по длине труб имеют промежуточный характер.

Все факторы, влияющие на величину толщины стенки, можно условно разделить на 3 группы:

1. факторы, вызывающие отклонения от среднего значения в каждом поперечном сечении;
2. факторы, влияющие на изменение средних значений в каждом сечении в зависимости от того, где по длине трубы взято это сечение;
3. факторы, вызывающие разброс значений толщин стенок отдельных труб в партии.

Для выделения отдельных компонентов дисперсии используются следующие формулы (4 - 7):

$$\bar{\sigma}_{sl}^2/\hat{\sigma}_s^2 + \bar{\sigma}_{sm}^2/\hat{\sigma}_s^2 + \hat{\sigma}_{sn}^2/\hat{\sigma}_s^2 = 1, \quad (4)$$

Отношение $\bar{\sigma}_{sl}^2/\hat{\sigma}_s^2$ показывает какую долю вносит поперечная разностенность в сечениях в общую разностенность партии труб;

Отношение $\bar{\sigma}_{sm}^2/\hat{\sigma}_s^2$ показывает вклад продольной разностенности труб в общую разностенность партии;

Отношение $\hat{\sigma}_{sn}^2/\hat{\sigma}_s^2$ показывает отклонение средних размеров труб в партии, вызванное тем, что каждую трубу прокатывают в различных условиях.

$$\bar{\sigma}_{sl}^2 = \frac{1}{nml} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l (S_{ijk} - \bar{S}_{ij})^2; \quad (5)$$

$$\bar{\sigma}_{sm}^2 = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\bar{S}_{ij} - \bar{S}_i)^2; \quad (6)$$

$$\hat{\sigma}_{sn}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{S}_i - \bar{S})^2, \quad (7)$$

На рисунке 21 представлены результаты расчета вклада отдельных компонентов дисперсии в общую разностенность труб, прокатанных по нескольким маршрутам прокатки.



Рисунок 21 – Вклад составляющих в общую разностенность труб, %:

- а – для труб, прокатанных по третьему маршруту с отношением $\mu_1/\mu_2 = 1,15$;
- б – для труб, прокатанных по четвертому маршруту с отношением $\mu_1/\mu_2 = 1,38$;
- в – для труб, прокатанных по пятому маршруту за одну прошивку с $\mu = 2,76$.

Таким образом установлено, что для труб прокатанных по 3-му маршруту, с приблизительно равными коэффициентами вытяжки между проходами (рисунок 21 а) вклад продольной и поперечной разностенности приблизительно одинаков и составляют около 50 %. Для труб прокатанных по 4-му маршруту (рисунок 21 б) наибольший вклад 73%, вносят колебания толщин стенок в поперечных сечениях. Для труб, прокатанных за одну операцию прошивки (рисунок 21 в), наибольшее влияние на точность оказывает продольная разностенность, которая составляет 56% всех отклонений, что коррелируется с расчетом средних толщин стенок по длине труб, представленных на рисунке 20.

На рисунке 22 представлена диаграмма вклада составляющих в общую относительную разностенность труб, прокатанных по всем исследованным маршрутам прокатки.

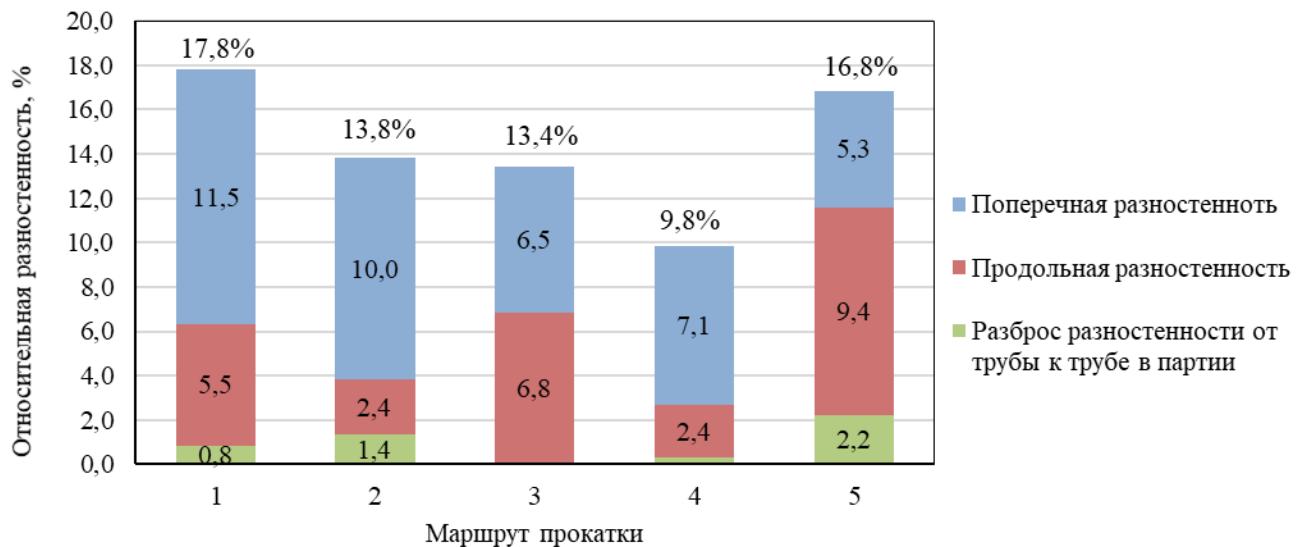


Рисунок 22 – Вклад отдельных составляющих в общую относительную разностенность труб, прокатанных по различным маршрутам прокатки.

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%.

Сравнивая 4-ый и 5-ый маршрут прокатки, можно предположить, что причиной повышенной разностенности труб, прокатанных по пятому маршруту с одной прошивкой, является вклад продольной разностенности при неустановившихся стадиях процесса начала и окончания прокатки.

Для оценки точности труб при установившейся стадии процесса, были построены графики распределения плотности значений толщины стенки без учета первого и последнего сечения (рисунок 23).

Плотность вероятности нормального распределения Гаусса для толщины стенки, рассчитывается по формуле (8):

$$\varphi(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} e^{-\frac{(S-\bar{S})^2}{2\sigma_s^2}}, \quad (8)$$

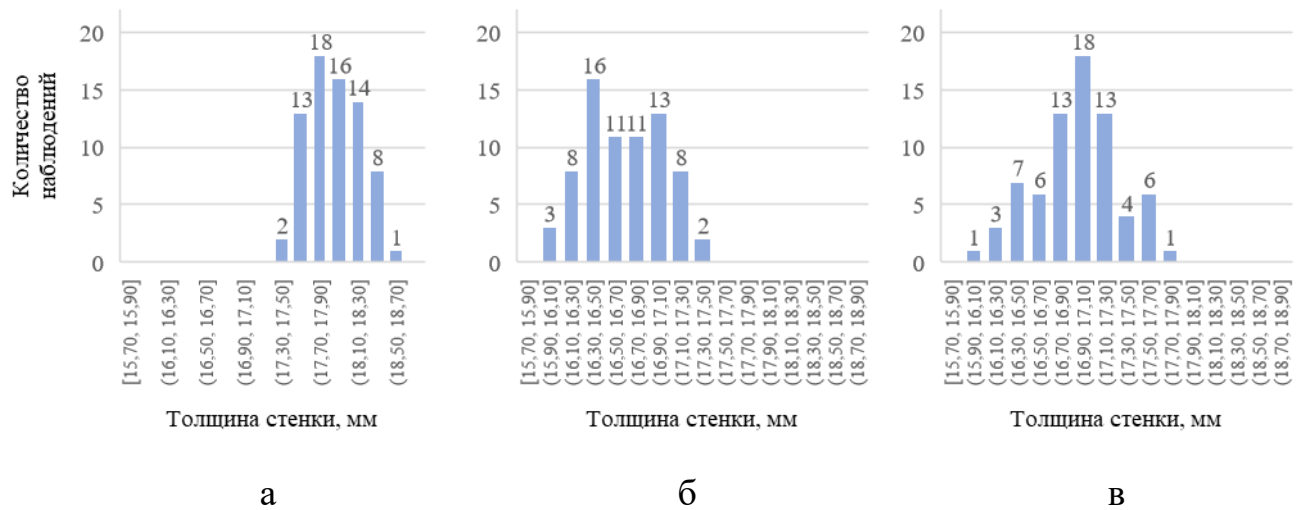


Рисунок 23 – Частота распределения толщины стенок труб, прокатанных по различным маршрутам прокатки:

- а – для труб, прокатанных по 3-му маршруту с отношением $\mu_1/\mu_2 = 1,15$;
- б – для труб, прокатанных по 4-му маршруту с отношением $\mu_1/\mu_2 = 1,38$;
- в – для труб, прокатанных по 5-му маршруту за одну прошивку с $\mu = 2,76$.

Наиболее близкое распределение значений толщины стенки при стационарной стадии процесса прошивки к нормальному распределению Гаусса выявлено для труб, прокатанных по 3-му маршруту (рисунок 23 а).

В таблице 9 представлены рассчитанные дисперсии для всех групп труб без учета первого и последнего сечений.

Таблица 9 – Результаты расчета дисперсии для труб при установившейся стадии процесса

Маршрут прокатки	1-ый	2-ой	3-ий	4-ый	5-ый
Дисперсия	0,15	0,13	0,07	0,13	0,14

Наименьшая разностенность труб при установившейся стадии процесса наблюдается при прокатке труб, где коэффициенты вытяжки между проходами приблизительно равны. Наибольшие отклонения выявлены при прокатке труб по первому маршруту с преобладающей деформацией за вторую прошивку и по

пятому маршруту за одну операцию прошивки.

ТПА 70-270, как и любой трубопрокатный агрегат, реализует технологическую последовательность операций. 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). Отсюда следует, что для получения необходимой точности труб необходимо знать, какая часть исходных погрешностей переносится на трубу после предыдущей операции и какие отклонения обусловлены, самой природой процесса. Это позволяет, во-первых, сформулировать обоснованные требования к точности труб после промежуточных операций и во-вторых, определить возможности совершенствования самого процесса.

При второй прошивке, конечную толщину стенки можно представить (9):

$$\bar{S} = \bar{S}_0 / \bar{k}, \quad (9)$$

где $\bar{S}_0$ и $\bar{S}$ – средние начальная и конечная толщина стенки соответственно;

$\bar{k}$ – средний коэффициент деформации.

В таблице 10 представлены результаты расчета среднего коэффициента деформации стенки.

Таблица 10 – Результаты расчета изменения толщины стенки при второй прошивке

Маршрут прокатки	1-ый	2-ой	3-ий	4-ый	5-ый
$\bar{S}_0$	47,98	40,49	36,78	26,97	17,07
$\bar{S}$	17,22	17,31	17,73	16,55	
$\bar{k}$	2,79	2,34	2,07	1,63	1

При постоянном значении k , пользуясь теоремой о числовых характеристиках случайных величин, можно записать (10, 11):

$$\sigma_S^2 = \sigma_{S_0}^2 / k^2, \quad (10)$$

Или

$$\sigma_S = \sigma_{S_0} / k, \quad (11)$$

Это означает во сколько раз уменьшается толщина исходной стенки, во столько раз уменьшается и ее среднеквадратичное отклонение.

На рисунке 24 представлена диаграмма фактической абсолютной разностенности гильз после первой и второй прошивки и рассчитанная разностенность гильз после второй прошивки (пропорционально k).

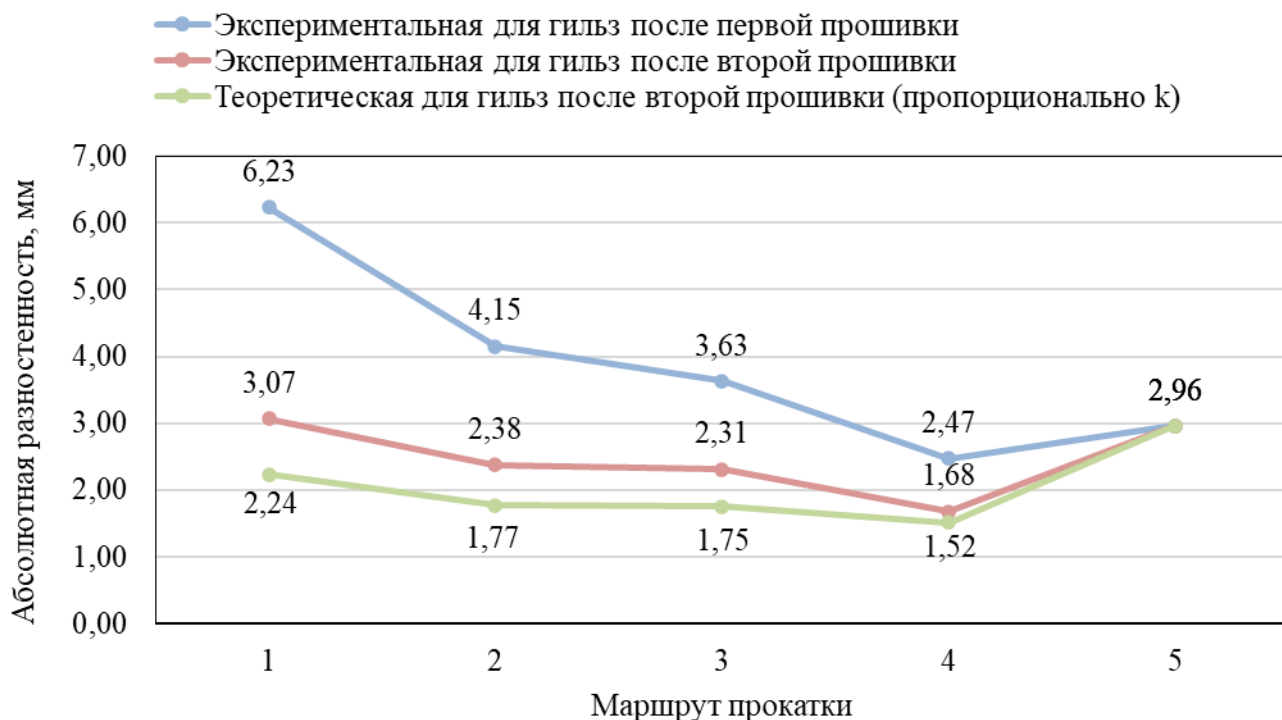


Рисунок 24 – Изменение абсолютной разностенности.

Одинаковый характер изменения эмпирических кривых и рассчитанной разностенности для труб, прокатанных за две операции прошивки, свидетельствует о пропорциональной зависимости абсолютной разностенности и коэффициента k .

В действительности колебания толщины стенки после последующих деформаций зависят не только от исходных отклонений, но также и от других параметров и вычисляются по формуле (12):

$$\sigma_S^2 = (1/k^2)[1 - 2\bar{S}_0(\partial\bar{k}/\partial S_0)/\bar{k}]^2 \sigma_{S_0}^2 + (\bar{S}_0^2/\bar{k}^4) \sigma_k^2 - 2(\bar{S}_0/\bar{k}^3) \sigma_{S_0} \sum_i (\partial\bar{k}/\partial x_i) r_{S_0 x_i} \sigma_{x_i}, \quad (12)$$

где $r_{S_0 x_i}$ – коэффициенты корреляции между исходной толщиной стенки и прочими факторами.

Зависимость коэффициентов вариации конечной (v_S) и исходной (v_{S_0}) толщины стенки вычисляется по формуле (13):

$$v_S^2 = C^2 v_{S_0}^2 + v_k^2, \quad (13)$$

где v_k – наведенная разностенность;

C – коэффициент переноса, вычисляемый по формуле (14):

$$C = \frac{(D_0/S_0) - 2}{(D/S) - 2} \frac{(D/S) - 1}{(D_0/S_0) - 1} \left[\frac{1 - u}{k^2} \frac{(D/S) - 1}{(D_0/S_0) - 1} + u \right], \quad (14)$$

где u – коэффициент, учитывающий долю участков поперечного сечения, получивших одинаковую вытяжку в процессе деформации, для поперечно винтовой прокатки вычисляется по формуле (15):

$$u = (\pi/n)(\operatorname{tg}\beta) D/l_k, \quad (15)$$

где n – число рабочих валков;

β – угол подачи;

D – диаметр гильзы на выходе из стана;

l_k – длина калибрующего участка (вторая прошивка производилась на одной и той же оправке, где длина конического участка составляла 80 мм).

Наведенная разностенность при второй прошивке рассчитывается по формуле (16):

$$\delta_k = \sqrt{\delta_{\Delta S}^2 - (\psi^2/\psi_0^2) C^2 \delta_{\Delta S_0}^2}, \quad (16)$$

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;

Результаты расчета относительной поперечной разностенности представлены на рисунке 25

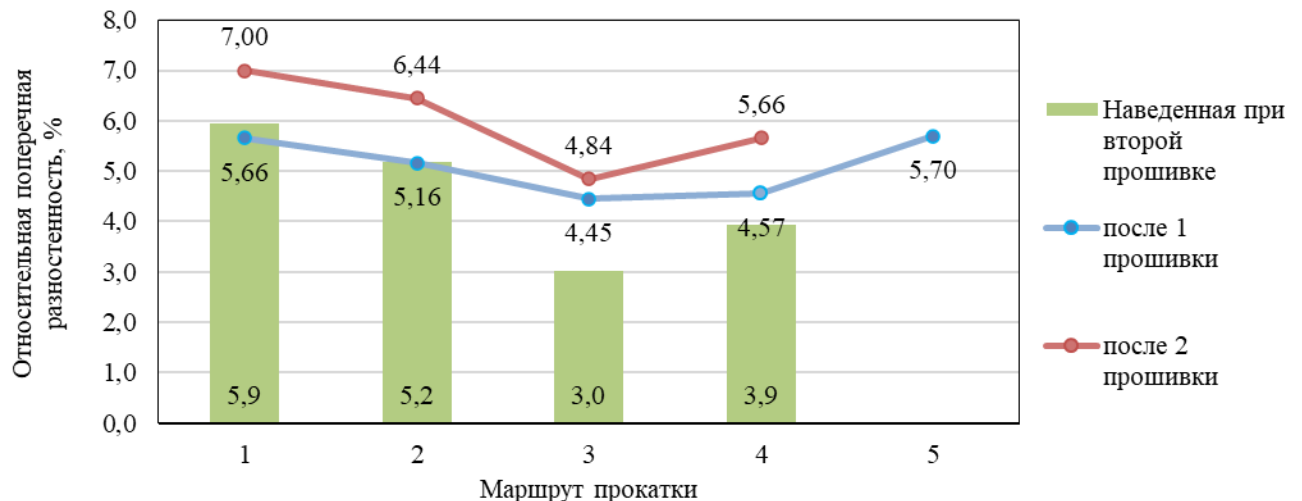


Рисунок 25 – Результаты расчета относительной поперечной разностенности для гильз после первой и второй прошивки и вклада наведенной разностенности.

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.

Величина наведенной поперечной разностенности в результате расчетов составила 3 – 6%. Такие же значения наведенной разностенности приводят Е.Д. Клемперт и М.Ф. Столетний при раскатке гильз на трехвалковом стане винтовой прокатки. Можно предположить, что полученные значения — это предельная точность процесса второй прошивки, которую экспериментально можно определить путем прокатки подготовленных полых заготовок, имеющих нулевую поперечную разностенность.

Во всех случаях получения гильз за две операции относительная поперечная разностенность гильз после второй прошивки увеличивалась, от 0,4% до 1,3%.

Анализ экспериментальных данных разностенности гильз, полученных с промежуточным нагревом (применительно к ТПА 70-270) перед второй прошивкой, свидетельствует о негативном влиянии промежуточного нагрева на поперечную разностенность. В среднем по группам труб поперечная разностенность увеличилась на 9,8%.

В результате проведенных исследований установлено, что двойная прошивка заготовок с превалирующей степенью деформации за первую операцию приводит к снижению разностенности гильз по сравнению с прошивкой за одну операцию. Для минимизации разностенности гильз с учетом нестационарных стадий начала и окончания процесса предложен способ двойной прошивки заготовок на основе расчета рационального распределения деформации между операциями с использованием заданного суммарного коэффициента вытяжки. Для определения коэффициента вытяжки при первой прошивке в двухвалковом стане винтовой прокатки предложена формула (17) [80].

$$\mu_1 = \frac{\mu_\Sigma}{\ln \mu_\Sigma \cdot \sqrt{2}}, \quad (17)$$

где μ_1 – коэффициент вытяжки при первой прошивке;

μ_Σ – суммарный коэффициент вытяжки за первую и вторую прошивки.

3.4. Исследование температурного состояния гильз в процессе двойной прошивки

Черная металлургия является наиболее крупным потребителем топливно-энергетических ресурсов. В прокатном и трубопрокатном производствах расходуется около 10 % топлива, потребляемого в черной металлургии, и 16 % электроэнергии. Структура энергопотребления в прокатном производстве такова: затраты на топливо при нагреве заготовок в нагревательных печах составляют 57,5 % от всех энергозатрат, электроэнергия — 38,6 %, другие виды энергии — 3,9 % [54].

Исходная температура нагрева заготовок перед прошивкой обусловлена допустимым интервалом горячей обработки давлением конкретных марок сталей и

сплавов. Чаще всего, с целью снижения сопротивления деформации и уменьшения нагрузок на узлы агрегата, температура соответствует верхней границе температурного интервала. Кроме того, любой ТПА — это цепь последовательно расположенных станов, поэтому труба, особенно тонкостенная, при транспортировке к последним этапам деформирования может иметь температуру ниже допустимого интервала. В свою очередь чрезмерно высокая температура нагрева металла перед прокаткой приводит к повышенному угару металла и интенсивному росту зерна, что в результате приводит к снижению пластичности. Перегрев особенно опасен при прошивке заготовок на станах винтовой прокатки из-за дополнительного деформационного разогрева.

Идеальным процессом выпуска металлургической продукции по мнению авторов [54] следует считать такой, при котором металл нагревается один раз при выплавке и вся дальнейшая обработка (прокатка, прессование, ковка) в горячем состоянии выполняется с плавильного нагрева.

Промежуточный нагрев или подогрев гильз может оказывать негативное влияние не только на ресурсосбережение, но и как показало исследование точности гильз при двойной прошивке, может повышать поперечную разностенность проката. Кроме того, дополнительное нагревательное устройство усложняет процесс эксплуатации агрегата за счет возможности возникновения дополнительных мест образования дефектов наружной поверхности, а также остановки всей технологической цепочки при возникновении в нем неисправностей.

Двойная прошивка, вне зависимости от того будет ли процесс осуществлен на одном стане винтовой прокатки с возвратом гильзы после первой прошивки на входную сторону, или на двух последовательно расположенных, потребует больших временных затрат по сравнению со стандартной технологией, поэтому исследование температурного состояния гильз является актуальной задачей.

Исследование температурного состояния проводилось с использованием тепловизора MIKRON M7604F, фото которого представлен на рисунке 26



Рисунок 26 – Тепловизор MIKRON M7604F.

Основные характеристики тепловизора представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Технические характеристики тепловизора MIKRON M7604F

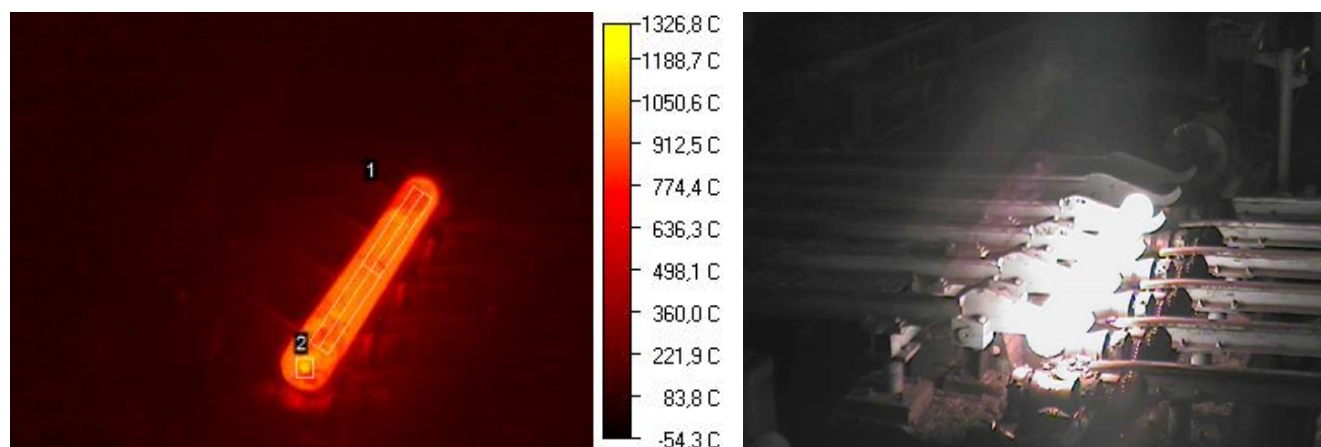
Температурный диапазон	Диапазон 1: -40 °С до 120 °С Диапазон 2: 0 °С до 500 °С Диапазон 3: 400 °С до 1600 °С
Точность измерения	$\pm 2\%$ от показания или $\pm 2^\circ\text{C}$
Угловое поле зрения	21° (H) x 16° (V)
Диапазон фокусировки	от 30 см до бесконечности
Коррекция коэффициента излучения	0.10 до 1.00 (с шагом 0.01)
Коррекция окружающей среды	Предусмотрена (включая интервал NUC)
Коррекция фона	Предусмотрена
Рабочая температура	От -15 °С до 50 °С, относительная влажность не более 90% (без конденсата)
Степень защиты	IP 54 (EC60529)

Температурное состояние при двойной прошивке фиксировалось на трех стадиях:

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

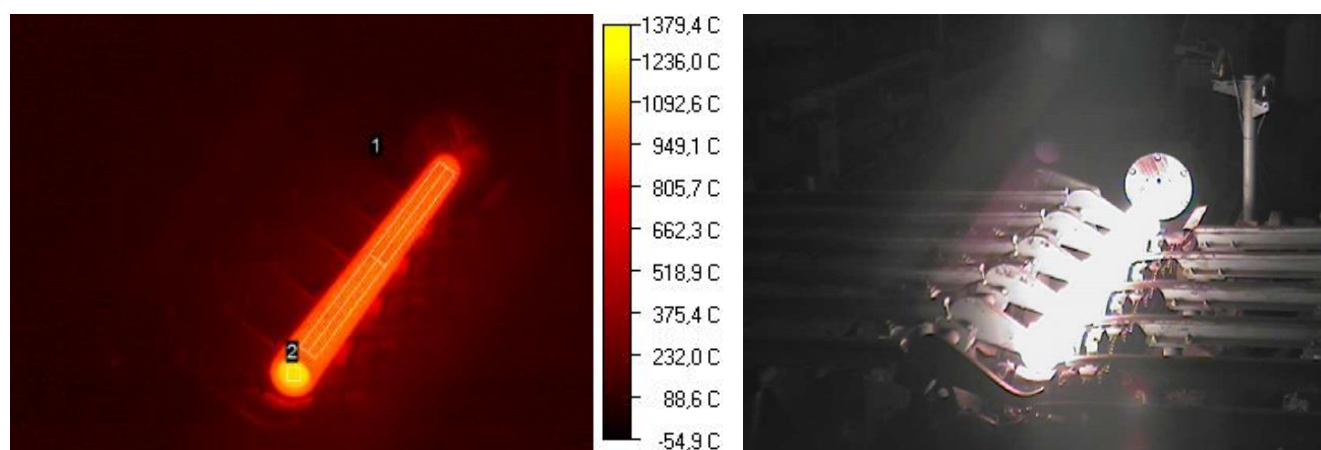
В каждой из групп, состоящих из трех гильз, каждая из них прокатывалась с различной частотой вращения валков прошивного стана 40,50 и 60 об/мин

На рисунке 27 представлены результаты замеров температуры заготовки после нагрева и гильзы между стадиями деформации, прокатанной при частоте вращения валков 60 об/мин из 3 группы.



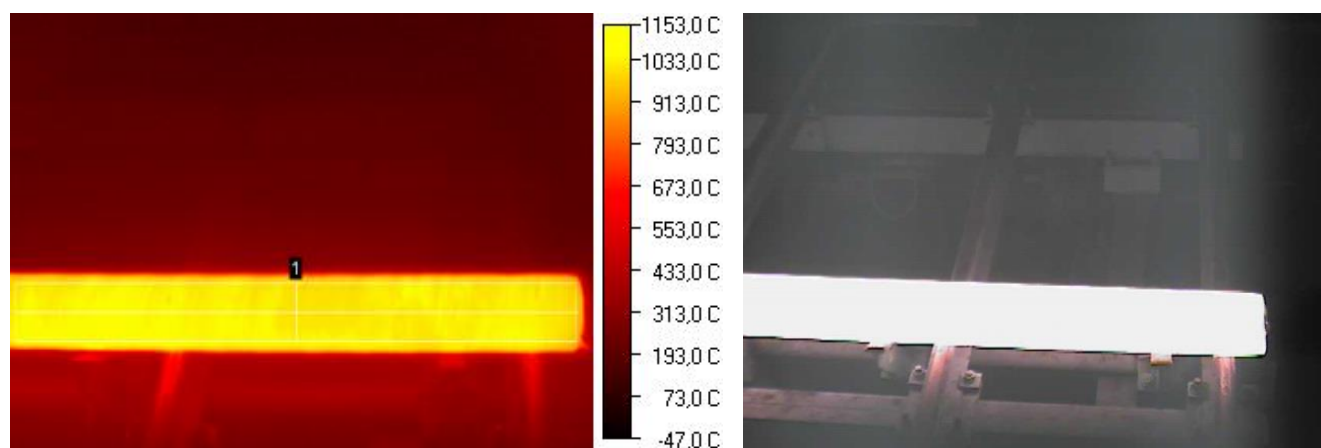
	Emissivity	Average	Minimum	Maximum
1	0,88	969,7	831,9	1065,9
2	0,93	963,1	778,3	1134,4

a



	Emissivity	Average	Minimum	Maximum
1	0,80	1076,3	995,6	1118,2
2	0,93	1182,3	1154,4	1195,8

б



	Emissivity	Average	Minimum	Maximum
1	0,80	1143,2	1026,3	1211,8

в

Рисунок 27 – Температурное состояние:

а– заготовка;

б – гильза после первой прошивки;

в – гильза после второй прошивки.

Верификация показаний тепловизора и подбор коэффициента излучения осуществляли в рамках программы определения качества усовершенствованных режимов нагрева металла в печи с шагающим подом путем определения фактической температуры заготовок контактным способом при помощи термопар.

В виду отсутствия в технологической линии установки гидросбива окалины, ее наличие на заготовках (рисунок 27 а) препятствует проведению достоверных замеров температуры бесконтактным способом. В процессе нагрева заготовок в печи с вращением вокруг оси и при передаче нагретого металла к входной стороне прошивного стана, часть окалины отделяется от наружной поверхности, часть остается на заготовке.

В результате замеров, температура всех 15 заготовок перед прокаткой составила $1150 \pm 20^\circ\text{C}$.

В таблице 12 приведены результаты замеров температурного состояния всех гильз после деформации.

Таблица 12 – Результаты замеров температурного состояния гильз всех групп.

№ группы (маршрут прокатки)	Частота вращения валков, об/мин	Этап деформации	Время фиксирования, относительно выдачи заготовки из печи, ч:мин:с	Температура, °С
1 группа	40	После 1 прошивки	0:01:36	1173,5
		После 2 прошивки	0:03:20	1113,3
	50	После 1 прошивки	0:01:34	1194,0
		После 2 прошивки	0:03:10	1154,1
	60	После 1 прошивки	0:01:31	1203,8
		После 2 прошивки	0:03:06	1168,3
2 группа	40	После 1 прошивки	0:02:49	1079,4
		После 2 прошивки	0:04:05	1102,0
	50	После 1 прошивки	0:01:43	1190,9
		После 2 прошивки	0:03:10	1139,0
	60	После 1 прошивки	0:01:41	1190,2
		После 2 прошивки	0:03:13	1170,1
3 группа	40	После 1 прошивки	0:01:40	1154,1
		После 2 прошивки	0:02:36	1132,8
	50	После 1 прошивки	0:01:34	1189,9
		После 2 прошивки	0:02:26	1163,6
	60	После 1 прошивки	0:01:29	1195,8
		После 2 прошивки	0:02:22	1211,8
4 группа	40	После 1 прошивки	0:01:46	1125,2
		После 2 прошивки	0:02:40	1114,2
	50	После 1 прошивки	0:01:44	1118,8
		После 2 прошивки	0:02:34	1144,4
	60	После 1 прошивки	0:01:41	1136,6
		После 2 прошивки	0:02:33	1143,5
5 группа	40	После единственной прошивки	0:01:30	1189,7
	50		0:01:22	1201,7
	60		0:01:19	1222,4

Как известно, температура деформируемого металла зависит от исходной температуры нагрева, тепловых потерь и деформационного разогрева [55].

Тепловые потери обусловлены излучением за счет передачи нагретой заготовкой лучистой энергии через газовую среду, конвекцией, теплопроводностью при контакте с деформирующим инструментом и с охлаждающей жидкостью.

Повышение температуры или разогрев во время пластической деформации может достигать, в зависимости от условий процесса и свойств металла, нескольких сотен градусов. Формула для его расчета [56] может быть получена согласно первому закону термодинамики при пластической деформации (18):

$$\Delta T_p = \frac{\eta T \Lambda}{c_r}, \quad (18)$$

где η — доля тепла, остающаяся в теле;

T — интенсивность касательных напряжений;

Λ — степень деформации сдвига;

c — удельная теплоемкость;

ρ — плотность.

Согласно источнику [56] 90–80% тепла при деформационном разогреве остается в теле, остальные 10 – 20 % отводятся теплопроводностью через контактные поверхности с валками, оправкой и в окружающую среду.

Произведение $T\Lambda$ (диссипативная функция) равно работе пластической деформации, а удельная теплоемкость металла или сплава c определяет повышение температуры единицы массы тела при осуществлении работы пластической деформации $T\Lambda$.

На рисунке 28 представлены графики зависимости температуры внутренней поверхности гильз после первой прошивки от частоты вращения валков при деформации. На графиках указан временной промежуток между моментом выхода заготовки из печи и временем фиксации температуры.

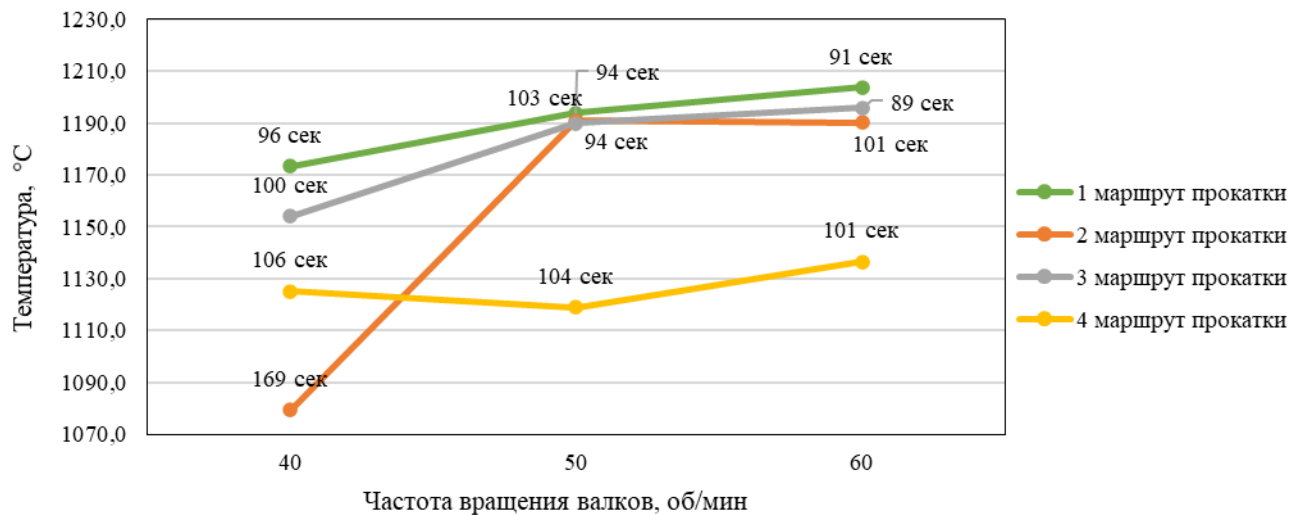


Рисунок 28 – Температура внутренней поверхности гильз после первой прошивки

Анализ графиков свидетельствует, что на температуру (ее снижение) наибольшее влияние оказывает продолжительность операций передачи гильзы на вторую прошивку, а также тонкостенность гильзы и связанные с этими факторами потери тепла излучением и конвекцией. Так наименьшую температуру имела гильза из второй группы с отношением $D/S = 4,7$ при частоте вращения валков 40 об/мин. Причиной столь низкой температуры является задержка (более 60 сек) при извлечении стержня с оправкой и передачи гильзы на вторую стадию деформации, за счет чего гильза потеряла порядка 100°C . При сопоставимых временных промежутках, наиболее низкие температуры после первой прошивки во всем диапазоне частоты вращения валков, имели гильзы с наибольшим отношением $D/S = 7,5$ (4 маршрут прокатки).

На рисунке 29 представлены графики температуры наружной поверхности гильз после второй прошивки для 1-4 группы и единственной прошивки для 5 группы труб.

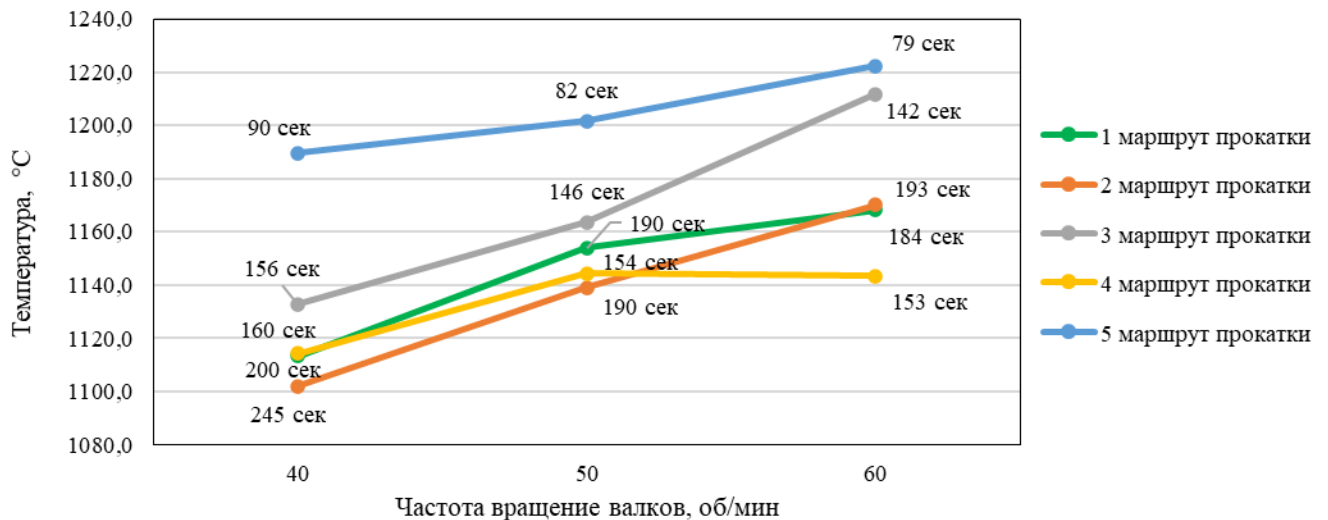


Рисунок 29 – Температура наружной поверхности гильз: после второй прошивки для 1-4 групп и единственной прошивки для 5 группы.

Анализ графиков свидетельствует, что максимальную температуру при всем диапазоне частоты вращения валков, имели гильзы полученные за одну операцию прошивки (5 группа). Однако, гильза из третьей группы, прокатанная при частоте вращения валков 60 об/мин имела температуру 1212°C, что на 10°C ниже гильзы полученной за одну операцию прошивки. Наибольшая температура этой гильзы при двойной прошивке обусловлена минимальным временем проведения операции 142 секунды.

С помощью математической модели, разработанной в теплотехнической лаборатории АО «ВМЗ», был произведен расчет снижения температуры каждого типоразмера гильз за счет отвода тепла в окружающую среду конвективной теплопередачей и излучением.

Снижение температуры в модели описано дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье-Кирхгофа, записанное для цилиндрической стенки (19) [6].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (19)$$

где ρ — плотность материала;

c — удельная теплоемкость материала;

λ — теплопроводность материала;

T — температура тела;

t — время;

r — координата тела, показывающая удаленность точки от оси;

z — координата тела, показывающая положение точки по длине;

Уравнение (19) решается методом конечных разностей при граничных условиях третьего рода (когда задан закон теплообмена на границе стенки) по явной разностной схеме. В записи закона теплообмена на границе стенки используется уравнение теплоотдачи Ньютона-Рихмана (20) [81]:

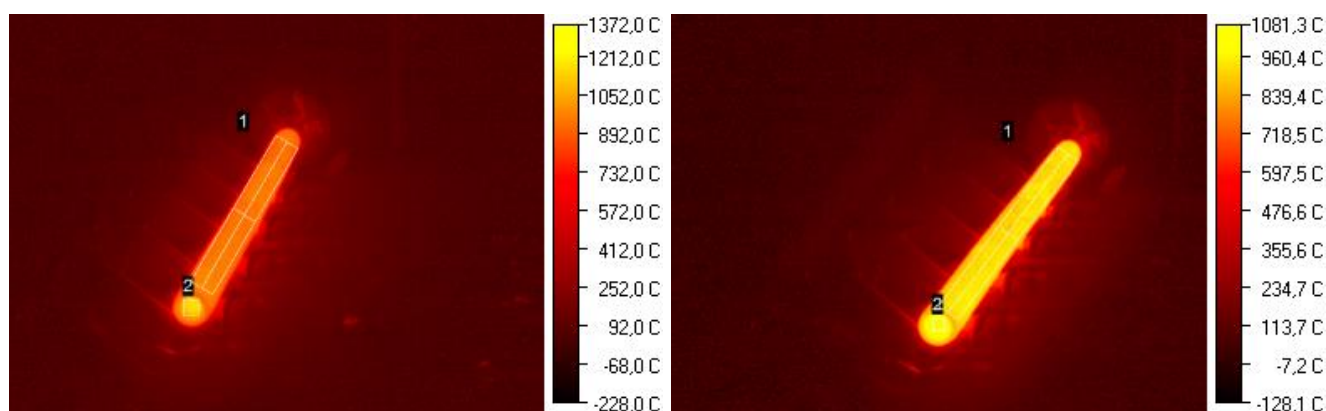
$$\alpha(t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}) = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)_{r=0}, \quad (20)$$

где α — суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

$t_{\text{ст}}$ — температура на поверхности стенки в данный момент времени;

$t_{\text{ж}}$ — температура окружающей среды;

На рисунке 30 представлены экспериментальные данные замеров температурного состояния двух гильз для проверки адекватности математической модели расчета снижения температуры.



	Emissivity	Maximum
1	0,80	1103,7
2	0,93	1173,5

	Emissivity	Maximum
1	0,80	1070,4
2	0,93	1163,6

Рисунок 30 – Экспериментальные данные температурного состояния двух гильз размерами 183x47,9 мм.

На рисунке 31 представлены результаты расчета в математической модели снижения температуры наружной и внутренней поверхности гильз размерами 183x47,9 мм и экспериментальные данные замеров, полученных при помощи тепловизора.

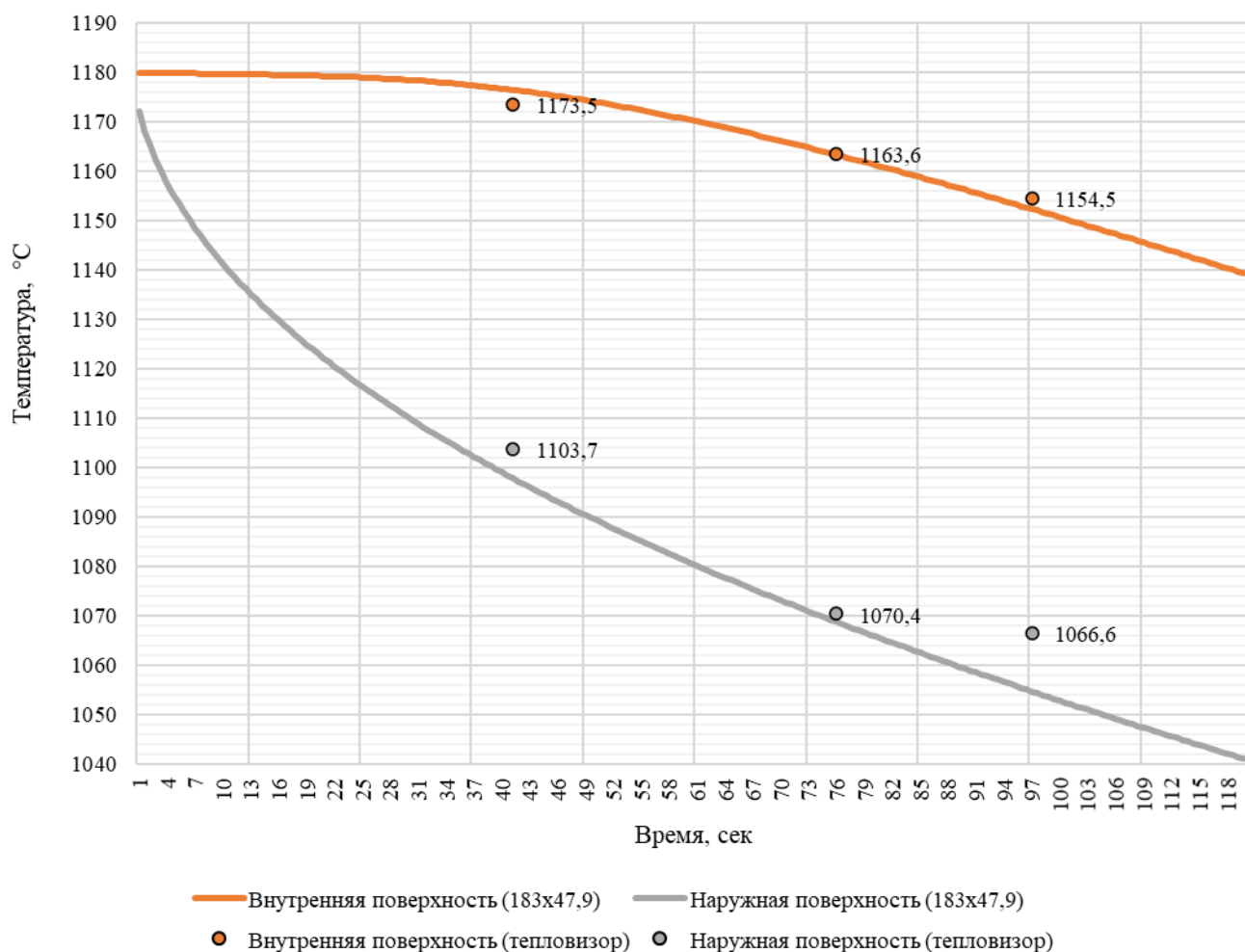


Рисунок 31 – Сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Анализ диаграммы показывает высокую сходимость теоретических и экспериментальных данных. Отклонения экспериментальных замеров температуры внутренней поверхности гильз в трех точках с различным временем охлаждения, не превышают 3°C от расчётных значений.

На рисунке 32 представлены результаты расчета снижения температуры при охлаждении на воздухе всех типоразмеров гильз в исследуемом диапазоне.

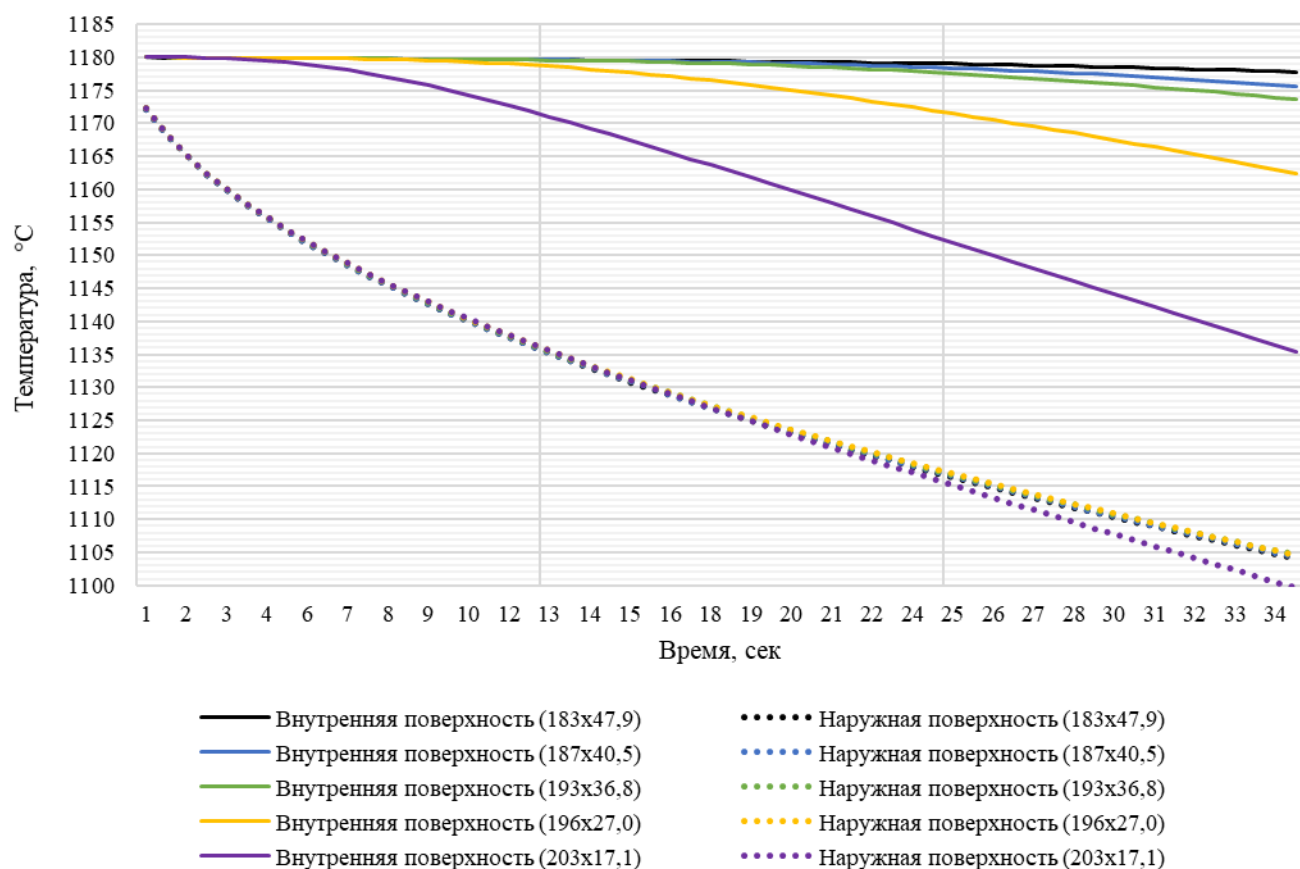


Рисунок 32 – результаты расчета снижения температуры гильз в математической модели в исследуемом диапазоне типоразмеров.

На основании расчетов в математической модели для того, чтобы температура наружной поверхности самых тонкостенных гильз в исследуемом диапазоне типоразмеров не снижалась ниже 1100°C , время передачи гильз на последующие стадии деформирования не должно превышать 35 сек.

На основании теоретических и экспериментальных данных определены условия ведения процесса двойной прошивки с одного нагрева с сохранением необходимого уровня температур гильз перед последующими стадиями прокатки. 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 внедрении технологии двойной прошивки в линии ТПА с раскатными станами продольной прокатки, более существенное влияние на снижение температуры гильз будет оказывать продолжительность их передачи на последующие стадии деформирования.

3.5. Исследование кинематических и энергосиловых параметров в процессе двойной прошивки

При исследовании процесса двойной прошивки заготовок, проводилась оценка кинематических и энергосиловых параметров прокатки. План эксперимента, типоразмер заготовок и настройка очага деформации представлены в разделе 3.1.

Обработка экспериментальных данных производилась с помощью программного обеспечения ibaAnalyzer, предназначенного для сбора, записи, анализа и обработки технологических данных, поступающих из контроллеров оборудования в том числе главного привода прошивного стана.

Расход энергии главного привода прошивного стана рассчитывали, как интеграл по времени от мгновенной мощности по формуле (21):

$$W = \int_{t_0}^{t_1} N dt, \quad (21)$$

где N – мгновенная мощность главного привода.

Средний темп прокатки при проведении эксперимента составлял 10 труб в час или 6 мин на одну заготовку. На основании этого, при расчете расхода электроэнергии, интервал времени брался равный 19 мин для всех групп труб. То есть в этот временной промежуток входило время прокатки трех гильз и время холостого хода между деформациями.

На рисунке 32 представлены графики мощности двух асинхронных двигателей главного привода и расход энергии при прокатке трех гильз, прокатанных по второму маршруту прокатки.

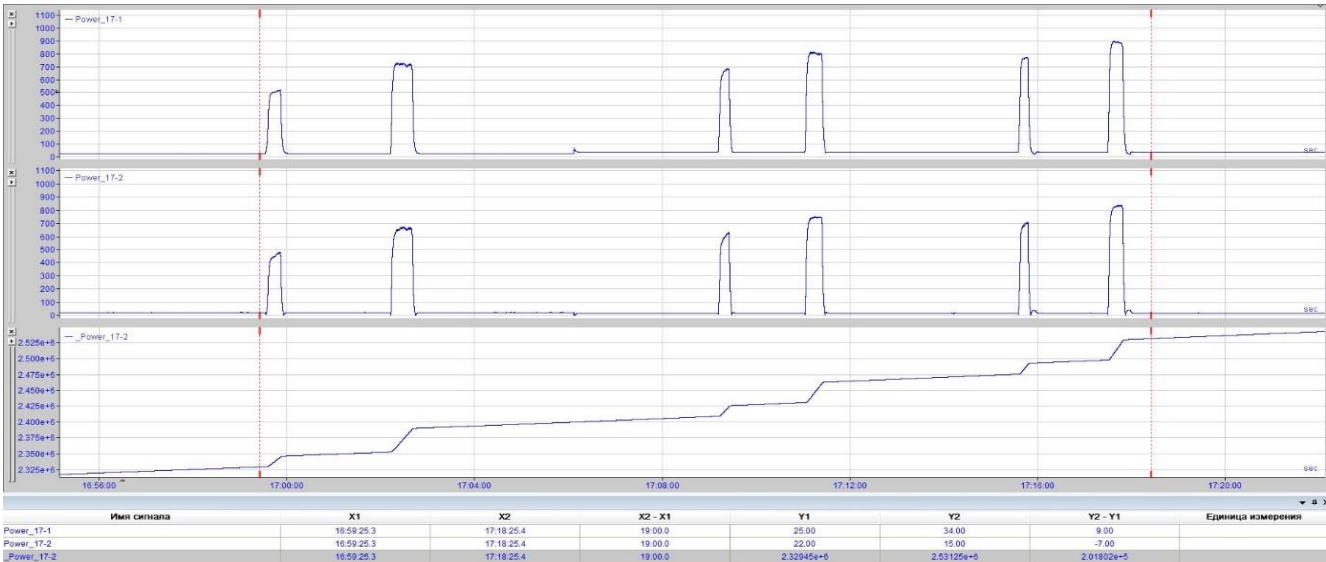


Рисунок 32 – Потребляемая мощность главного привода при прокатке гильз по второму маршруту прокатки с двойной прошивкой.

На рисунке 33 представлены аналогичные графики при прокатке трех гильз, прокатанных по пятому маршруту прокатки, за одну операцию прошивки.

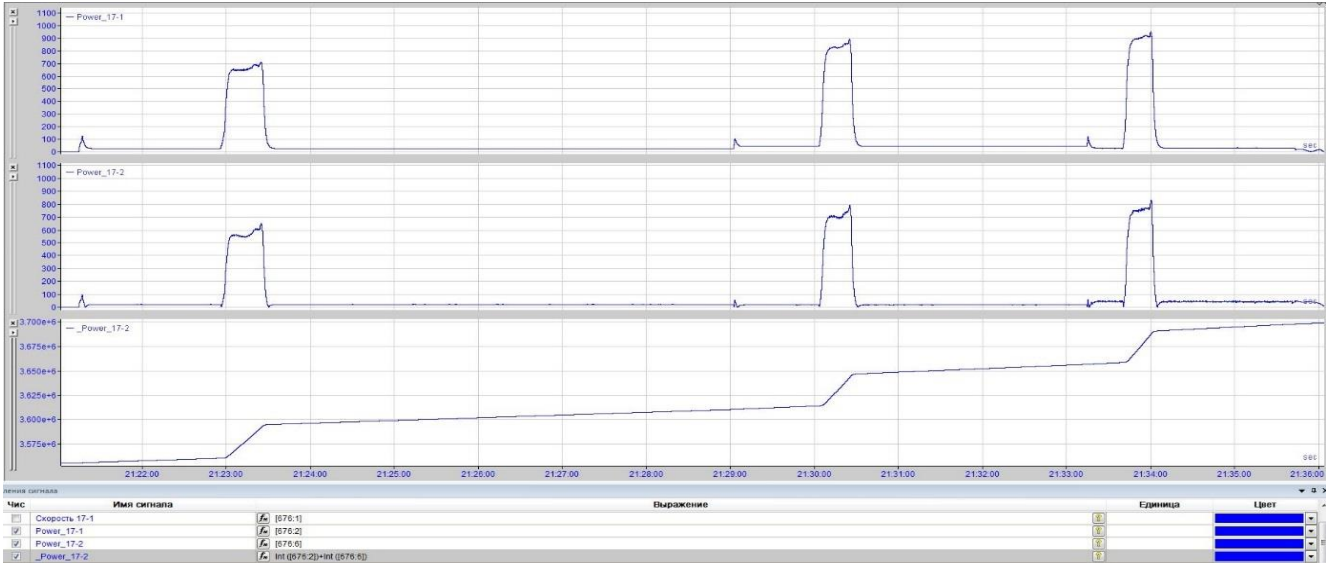


Рисунок 33 – Потребляемая мощность главного привода при прокатке гильз по пятому маршруту с одной прошивкой

Удельный расход энергии рассчитывали, как отношение расходуемой энергии к массе прокатанного металла (22):

$$a = \frac{W}{q} \quad (22)$$

где q – масса трех заготовок (1350 кг).

В таблице 13 приведены результаты расчета удельного расхода энергии для гильз, прокатанных по различным маршрутам прокатки.

Таблица 13 – 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

Двойная прошивка по четвертому маршруту прокатки в рамках эксперимента привела к увеличению удельного расхода электроэнергии на 23 %. Следует уточнить, что на энергосиловые параметры при получении гильз одного и того же типоразмера, существенное влияние оказывает настройка очага деформации и калибровка технологического инструмента. В первую очередь на удельный расход энергии оказывает влияние температура металла при деформировании. За время передачи гильз для второй прошивки, их температура снизилась в среднем на 50°C. В рамках эксперимента не преследовалась цель снижения удельного расхода электроэнергии при двойной прошивке.

При проектировании новых и эксплуатации существующих станов винтовой прокатки необходимо знать усилия, действующие со стороны металла на валки в поперечном, радиальном и осевом направлениях, а также крутящий момент на бочке валков. Момент прокатки – важный параметр, определяющий мощность привода прошивного стана, валковых узлов и клетки, от чего зависит масса прокатного оборудования. Двойная прошивка относительно стандартной технологии имеет существенное преимущество, заключающееся в меньших разовых энергосиловых параметрах. Так на основании экспериментальных прокаток было установлено, что максимальный крутящий момент на валу двигателя при установившейся стадии процесса прошивки 5-ой группы труб (за одну операцию прошивки) составляет 15,75 кН·м, при получении аналогичных

гильз за две операции прошивки по 4-му маршруту прокатки максимальный крутящий момент за первую операцию составил 13,57 кН·м и 12,68 кН·м за вторую.

Как уже было сказано ранее, каждая из гильз в группах, прокатывалась с различной частотой вращения валков прошивного стана 40,50 и 60 об/мин.

Для оценки скоростных условий процесса прошивки при различной частоте вращения валков определяли условный коэффициент осевой скорости (23):

$$\eta_o^y = \frac{u_\phi}{u_T^y}, \quad (23)$$

где u_ϕ – фактическая скорость прошивки

u_T^y – теоретическая осевая скорость прошивки в пережиме валков, которая вычислялась по формуле (24):

$$u_T^y = \frac{\pi D_\Pi n}{60} \cos \beta, \quad (24)$$

где D_Π – диаметр валков в пережиме;

n – частота вращения валков, об/мин;

β – угол подачи валков (12°)

Фактическая скорость прошивки вычислялась как отношение длины гильзы к времени прошивки при установившейся стадии процесса, определяемого по токовым нагрузкам привода (рисунок 34).

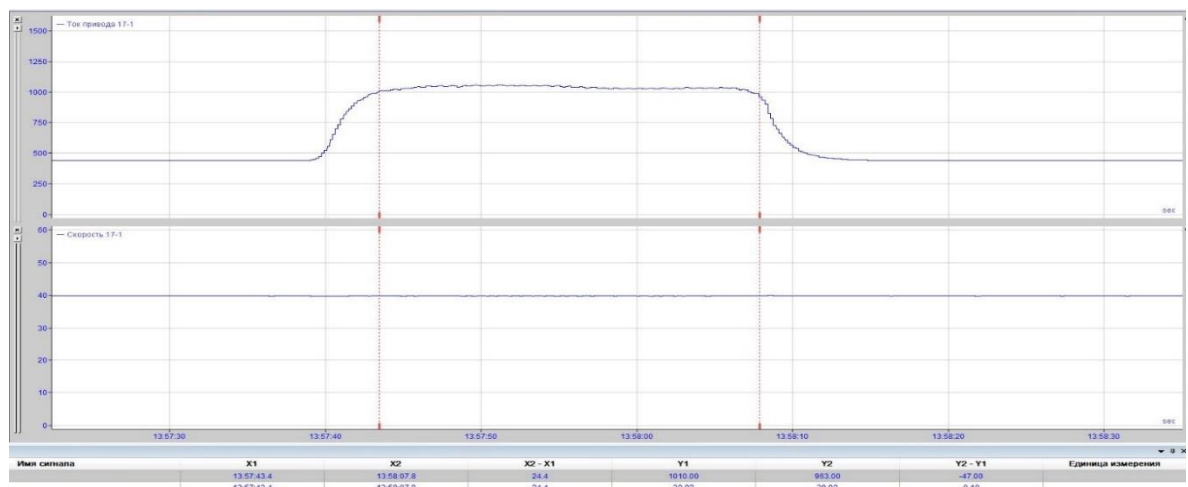


Рисунок 34 – Методика определения продолжительности прокатки за вычетом времени заполнения и освобождения очага деформации по токовым нагрузкам главного привода.

В таблице 14 приведены результаты расчетов условного коэффициента осевой скорости прокатки.

Таблица 14 – Результаты расчетов условного коэффициента осевой скорости.

Частота вращения валков, об/мин	η_o^y , при первой прошивке			η_o^y , при второй прошивке		
	40	50	60	40	50	60
1 группа	0,84	0,83	0,84	0,77	0,73	0,73
2 группа	0,71	0,72	0,73	0,77	0,81	0,78
3 группа	0,87	0,88	0,90	0,91	0,90	0,92
4 группа	0,77	0,73	0,77	0,90	0,86	0,91
5 группа	0,82	0,85	0,82	-		

Полученные данные, свидетельствуют, об отсутствии повышения скольжения металла в осевом направлении при увеличении частоты вращения валков в исследуемом диапазоне как при первой, так и при второй прошивке.

Отклонения условного коэффициента осевой скорости в рамках одной группы обусловлены точностью определения времени заполнения и освобождения очага деформации, а также определения фактической длины гильз.

В исследованиях И.Н. Потапова и П.И. Полухина направленных на интенсификацию процесса прошивки [13, 15], указывается на негативное влияние увеличения окружной скорости валков при прошивке. В работах показано, непропорциональность увеличения скорости прошивки, возрастанию окружной скорости валков, что связано с повышением скольжения металла в очаге деформации. Однако исследования проводились в диапазоне осевых скоростей гораздо больших, применяемых в условиях ТПА 70-270.

Операция второй прошивки в части скоростных условий является неисследованной. Вторая прошивка значительно отличается от первой, обусловлено это отсутствием участка сплошной заготовки в очаге деформации и соответственно меньшим осевым сопротивлением деформации со стороны оправки.

Диапазон изменения частоты вращения валков прошивного стана ТПА 70-270 не позволяет определить критическую окружную скорость валков, при которой будет увеличиваться скольжение металла в очаге деформации. Кроме того, на внутреннюю поверхность гильзы после первой прошивки рекомендуется подавать смазку перед второй операцией, что положительно скажется на интенсификации процесса за счет увеличения коэффициента осевой скорости, качества внутренней поверхности гильзы и стойкости всего технологического инструмента.

Глава 4. Технология производства бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки

4.1. Разработка режимов деформирования и калибровок прокатного инструмента

Действующая технология производства муфтовых заготовок в условиях ТПА 70-270 базируется на применении высококачественной предварительно деформированной заготовки с проработанной структурой, механические свойства которой уже до трубного передела обеспечивают необходимые прочностные свойства, предъявляемые к трубам группы прочности Д.

Анализ деформационных параметров показывает, что при производстве заготовок в условиях АО «ОЭМК», минимальный коэффициент вытяжки при прокатке НЛЗ составляет 3,5. При прокатке круга диаметром 260 мм в стане продольной прокатки в условиях ПАО «НМЗ» коэффициент вытяжки минимального сечения конусного слитка составляет 4,8. Суммарный же коэффициент вытяжки после трубного передела составляет от 7,5 до 21,1, что позволяет полностью проработать литую структуру заготовки и стабильно получать требуемый комплекс механических свойств при производстве всего сортамента труб.

Для использования НЛЗ при прокатке толстостенных муфтовых заготовок в условиях ТПА 70-270, помимо подбора подходящего диаметра исходных заготовок возникает более актуальная задача, а именно обеспечение максимального преобразования литой структуры заготовки, без решения которой невозможно получить необходимый комплекс механических свойств труб.

Полной проработке структуры НЛЗ при минимальных значениях коэффициентов вытяжки будет способствовать технологическая схема ТПА 70-270 с двойной прошивкой. За счет заложенного формоизменения металла: заготовка - гильза после первой прошивки – гильза после второй прошивки, будет достигнута большая накопленная степень деформации.

На основании проведенного анализа научно-технической литературы, поиска

патентных решений, качества непрерывнолитой заготовки и особенностей сортамента ТПА 70-270 разработана технология двойной прошивки в одной клети винтовой прокатки применительно к ТПА 70-270 АО «ВМЗ», принципиальная схема очагов деформации представлена на рисунке 35.

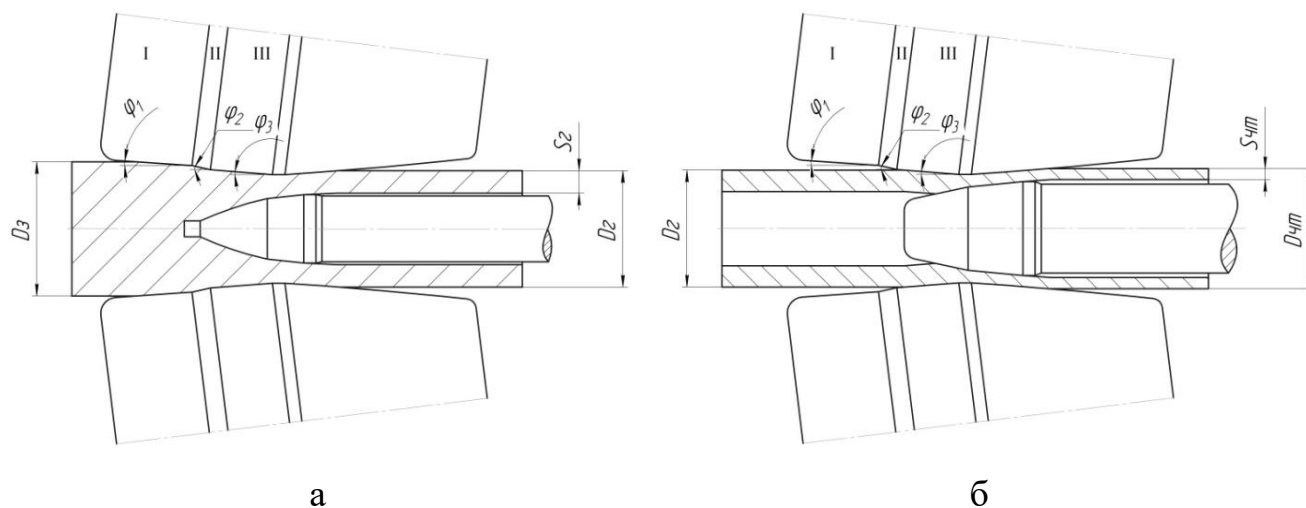


Рисунок 35 – Схема очагов деформации:

а – при первой прошивке;

б – при второй прошивке.

Для реализации нового способа прокатки был спроектирован технологический инструмент: рабочие валки, оправки (приложение А) и разработана таблица прокатки (приложение Б).

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. Вторым участком 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 $U_{\Pi} = 19...20\%$;
- 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 $U_{\Pi} = 7\%$;
- 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.

Основным механизмом износа валков станов винтовой прокатки является фрикционное истирание входного конуса вала в месте захвата заготовки. В момент захвата заготовки обратные силы трения со стороны металла на валок работают на истирание рабочей поверхности инструмента деформации. Износ продольного профиля валков при двухконусной калибровке имеет существенную неравномерность по длине бочки.

Благодаря тому, что захват заготовки при первой прошивке осуществляется на первом участке входного конуса валков, на втором участке интенсивность деформации максимальна и следовательно резко возрастают напряжения нормального давления и пропорционально связанные с ними силы трения,

действующие на истирание валка, а захват гильзы при второй прошивке осуществляется на третьем участке входного конуса, предполагается что износ валков станет более равномерным, что благоприятно скажется на стабильности процесса, увеличении интервала между внесением корректировок в настроечные параметры стана, увеличении длительности работы валков между перевалками и снижении объема металла валков, снимаемого при переточках.

4.2. Промышленное опробование технологии производства труб из непрерывнолитой заготовки в условиях ТПА 70-270

Для проведения опытных прокаток труб из НЛЗ, было запланировано экспериментальное производство труб двух типоразмеров в условиях ТПА 70-270. Для опробования разработанных режимов были проведены подготовительные операции:

- произведена переточка валков прошивного стана на разработанную калибровку;
- изготовлено по одному комплекту оправок для прокатки труб размерами 166,0x16,9 мм и 187,7x17,0 мм;
- от непрерывнолитых заготовок двух типоразмеров, были отобраны пробы для исследования микро- и макроструктуры.

В качестве исходных заготовок использовались НЛЗ двух поставщиков:

- для прокатки труб размерами 166,0x16,9 мм, круг диаметром 196 мм по ТУ-14-1-4992, производства АО «ВТЗ», $\mu_{\Sigma} = 3,73$;
- для производства труб размерами 187,7x17,0 мм, круг диаметром 220 мм по ТУ-14-159-324, поставки ОАО «ПНТЗ», $\mu_{\Sigma} = 4,08$.

При проведении визуального осмотра порезанных заготовок диаметром 220 мм были выявлены дефекты макроструктуры осевой зоны (рисунок 36).



а



б

Рисунок 36 – Дефекты макроструктуры осевой зоны НЛЗ диаметром 220 мм;
а – на отобранной пробе; б – на заготовке при порезке.

Характерные дефекты были обнаружены по всей длине прутка при порезке заготовок.

Дефектов сталеплавильного происхождения заготовок диаметром 196 мм, при визуальном осмотре выявлено не было.

На рисунке 37 и в таблице 15 представлены результаты лабораторных исследований макроструктуры исходных непрерывнолитых заготовок двух поставщиков.



а



б

Рисунок 37 – Фото образцов НЛЗ после глубокого травления:
а – диаметр 196 мм; б – диаметр 220 мм.

Таблица 15 – 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

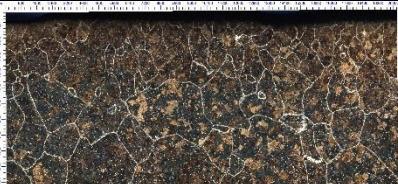
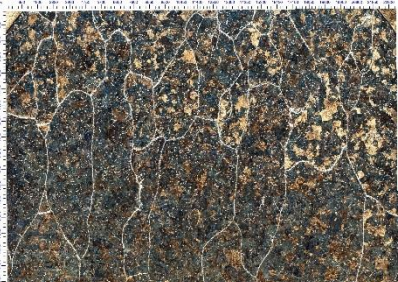
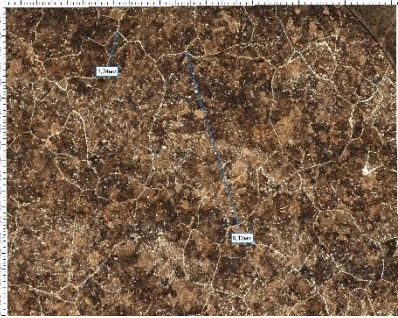
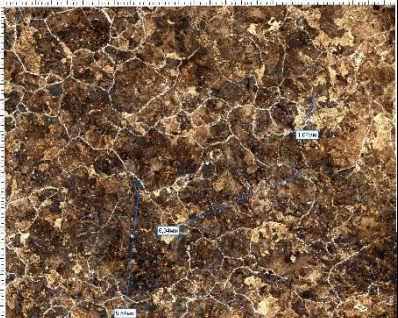
Результаты исследования макроструктуры НЛЗ в лабораторных условиях, свидетельствуют о высоком качестве заготовок, обоих типоразмеров.

Однако так как при визуальном осмотре НЛЗ диаметром 220 мм, без увеличительных приборов наблюдались осевые дефекты макроструктуры, можно утверждать, что этот дефект по длине заготовок располагается неравномерно и не систематически, а результаты лабораторных исследований будут зависеть от места вырезки проб.

В процессе металлографических исследований НЛЗ было выявлено три зоны, характерные для непрерывнолитой заготовки (таблица 16).

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.

Таблица 16 – 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
Нар. поверхность		от 0,41 мм до 3,54 мм		от 0,21 мм до 1,24 мм
Середина радиуса		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
Центр. зона		от 1,24 мм до 9,13 мм		от 1,04 мм до 6,04 мм

Для того чтобы апробировать разработанную технологию и оценить качество получаемых труб, в производство было задано 6 заготовок длиной 1700 мм из прутка диаметром 196 мм.

Нагрев заготовок осуществлялся в печи при стандартном распределении температуры по зонам печи 1150°C, 1180°C и 1200°C. Время нагрева заготовок составляло 176 минут, цикл перемещения шагающего пода составил 378 секунд.

Настройка прошивного стана осуществлялась строго с соблюдением разработанных режимов прокатки и составила:

- расстояние между валками 157мм;
- расстояние между линейками 172 мм;
- диаметр прошивной оправки 90 мм;
- выдвижение прошивной оправки за пережим 145 мм;
- диаметр оправки для второй прошивки 134 мм;

– выдвижение второй оправки за пережим 100 мм.

На рисунке 38 представлено фото очага деформации при первой прошивке.

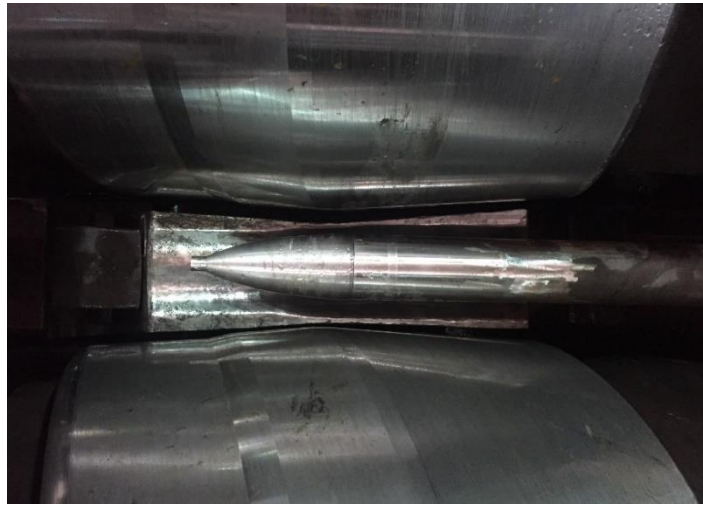


Рисунок 38 – Фото очага деформации, перед прокаткой труб 166,0x16,9 мм.

При заданной настройке оборудования произвели прокатку труб, фото которых представлены на рисунке 39.



а



б

Рисунок 39 – Трубы размером 166,0x16,9 мм, полученные в результате экспериментальной прокатки:

а – состояние наружной поверхности; б – состояние внутренней поверхности.

Процесс протекал стабильно с уверенным первичным и вторичным захватом как при первой, так и при второй прошивке. Толщина стенки, диаметр гильз и труб соответствовали расчетным значениям.

На внутренней и наружной поверхности, при визуальном осмотре дефектов не установлено.

Для опробования разработанных режимов прокатки труб размерами 187,7x17,0 мм, заготовки диаметром 220 мм были заданы в производство.

Время их нагрева составило 198 минут, цикл шагающего пода 425 секунд.

Настройка прошивного стана осуществлялась также согласно разработанных режимов прокатки и составила:

- расстояние между валками 178 мм;
- расстояние между линейками 196 мм;
- диаметр прошивной оправки 112 мм;
- выдвижение прошивной оправки за пережим 155 мм;
- диаметр оправки для второй прошивки 154 мм;
- выдвижение второй оправки за пережим 100 мм.

На рисунке 40 представлено фото очага деформации при первой прошивке.



Рисунок 40 – Фото очага деформации, перед прокаткой труб размером 187,7x17,0 мм.

При заданной настройке оборудования, произвели прокатку заготовок. Процесс также протекал стабильно с уверенным первичным и вторичным захватом как при первой, так и при второй прошивке. Толщина стенки, диаметр гильз и труб соответствовали расчетным значениям. В результате были получены трубы, на внутренней и наружной поверхности которых, при визуальном осмотре дефектов также не наблюдалось, несмотря на выявленные при визуальном контроле дефекты макроструктуры осевой зоны исходных заготовок диаметром 220 мм.

Осмотр состояния валков прошивного стана после прокаток подтвердил соответствие фактических длин очагов деформации, разработанным режимам.

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

Химический состав труб двух типоразмеров был различным. В таблице 17 представлены результаты химического анализа обоих типоразмеров труб и требования к применяемым предварительно деформированным заготовкам стали марки Д.

Таблица 17 – Результаты хим. анализа труб обоих типоразмеров и требования к применяемым предварительно деформированным заготовкам марки стали Д

Сортамент	Массовая доля химических элементов, %						
	C	Mn	Si	V	S	P	Cu
Требования к предварительно деформированным заготовкам стали марки Д	0,41-0,48	0,60-0,90	0,17-0,37	0,03-0,07	Не более 0,030	Не более 0,030	Не более 0,25
187,7x17,0 мм	0.437	0.92	0.24	0.0024	0.0022	0.013	0.200
166,0x16,9 мм	0.366	0.81	0.45	0.0025	0.0038	0.0058	0.189

Анализ таблицы 17 свидетельствует, что химический состав НЛЗ обоих поставщиков схож с требованиями к химическому составу предварительно деформированных заготовок, применяемыми для производства муфтовых труб. Принципиальное отличие заключается в отсутствии микролегирования НЛЗ ванадием. Также трубы размером 166,0x16,9 мм имеют меньшее содержание углерода.

В таблице 18 представлены требования к механическим свойствам труб при испытании на растяжение для групп прочности Д и К55, согласно ТС 05757848-56. В таблице 19 приведены данные фактических механических свойств труб, прокатанных из НЛЗ.

Таблица 18 – Требования к мех. свойствам труб при испытании на растяжение

Группа прочности стали	Временное сопротивление разрыву σ_b , МПа, не менее	Предел текучести σ_t , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %, не менее
Д	655	379 – 552	14,3
К55			19,0

Таблица 19 – Фактические результаты мех. свойств труб из НЛЗ при испытании на растяжение

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

В таблице 20 представлены требования к механическим свойствам труб при испытании на ударный изгиб для групп прочности К55, согласно ТС 05757848-56. В таблице 21 приведены данные фактических механических свойств труб, прокатанных из НЛЗ.

Таблица 20 – Требования к трубам при испытании на ударный изгиб для группы прочности K55

Типоразмер труб, мм	Минимальная поглощенная энергия KV, Дж			Температура испытания, °C	Размер образца, мм	Ориентация образца
	Среднее значение	Каждого образца	Допустимая на одном из трех образцов			
	Не менее					
166,0x16,9	20	20	13	21	10x10	T
187,7x17,0	20	20	13	21	10x10	T

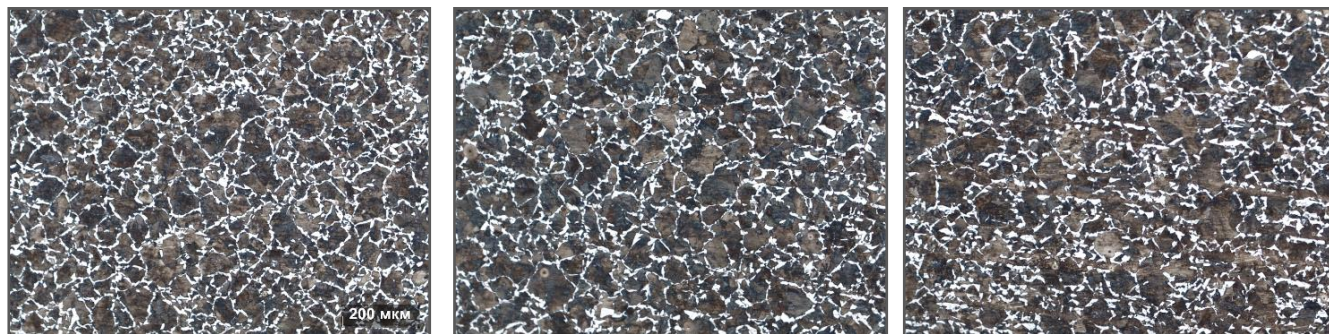
Таблица 21 – Фактические результаты мех. свойств труб из НЛЗ при испытании на ударный изгиб

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

Микроисследование структуры труб проводили на инвертированном микроскопе «Axio Observer D1m» с программным обеспечением «Thixomet Pro» при увеличениях 25-1000 крат до и после травления в 4 %-ом спиртовом растворе азотной кислоты.

Микроструктура на образцах от труб обоих типоразмеров перлито-ферритная. Фото микроструктуры образцов представлены на рисунках 41, 42.

Увеличение x100



а

б

в

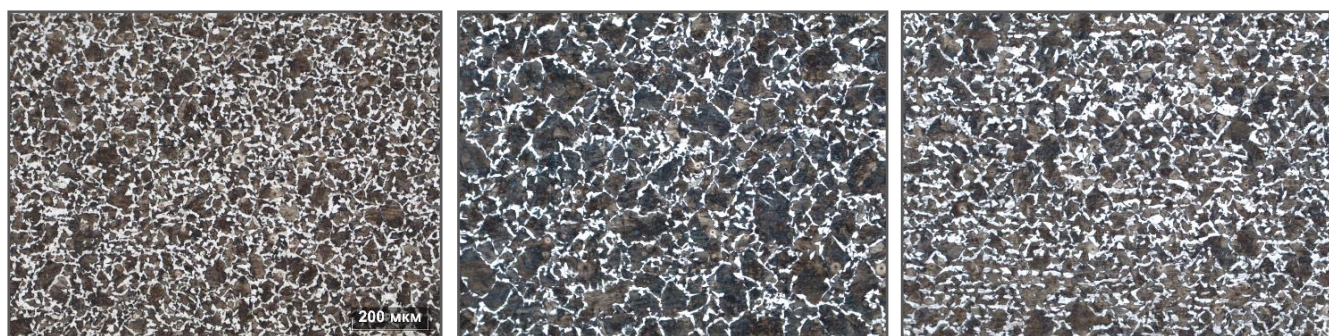
Рисунок 41 – Фото микроструктуры образцов от трубы размером 187,7х17,0 мм:

а – наружная поверхность; б – середина толщины стенки;

в – внутренняя поверхность.

По полученным данным следует отметить, что структура по всей толщине стенки образца от трубы 187,7х17,0 мм распределена равномерно.

Увеличение x100



а

б

в

Рисунок 42 – Фото микроструктуры образцов от трубы размером 166,0х16,9 мм:

а – наружная поверхность; б – середина толщины стенки;

в – внутренняя поверхность.

По величине перлитного зерна на образце от трубы 166,0х16,9 мм у наружной и внутренней поверхности структура более мелкая по сравнению с серединой толщины стенки образца.

Результаты оценки микроструктуры приведены в таблице 22.

Таблица 22 – Результаты оценки микроструктуры

Типоразмер труб, мм	Место оценки	Номер перлитного зерна ГОСТ 5639-82
187,7x17,0	наружная поверхность	5,6
	середина толщины стенки	5,6
	внутренняя поверхность	5,6
166,0x16,9	наружная поверхность	6,7
	середина толщины стенки	5,6
	внутренняя поверхность	6,7

Экспериментальные прокатки подтвердили, что разработанная технология позволяет стабильно вести новый процесс, с получением труб высокой точности.

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

Полученные трубы соответствуют группам прочности K55 и Д согласно ГОСТ 31446-2017 и ТС 05757848-56-2015 без дополнительной термообработки.

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».

Глава 5. Разработка и исследование процесса прошивки с использованием охлаждаемых направляющих линеек

5.1. Разработка новой конструкции направляющих линеек

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 [82, 83]. 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. На рисунке 43 представлен схематичный чертеж и 3D модель линеек новой конструкции.

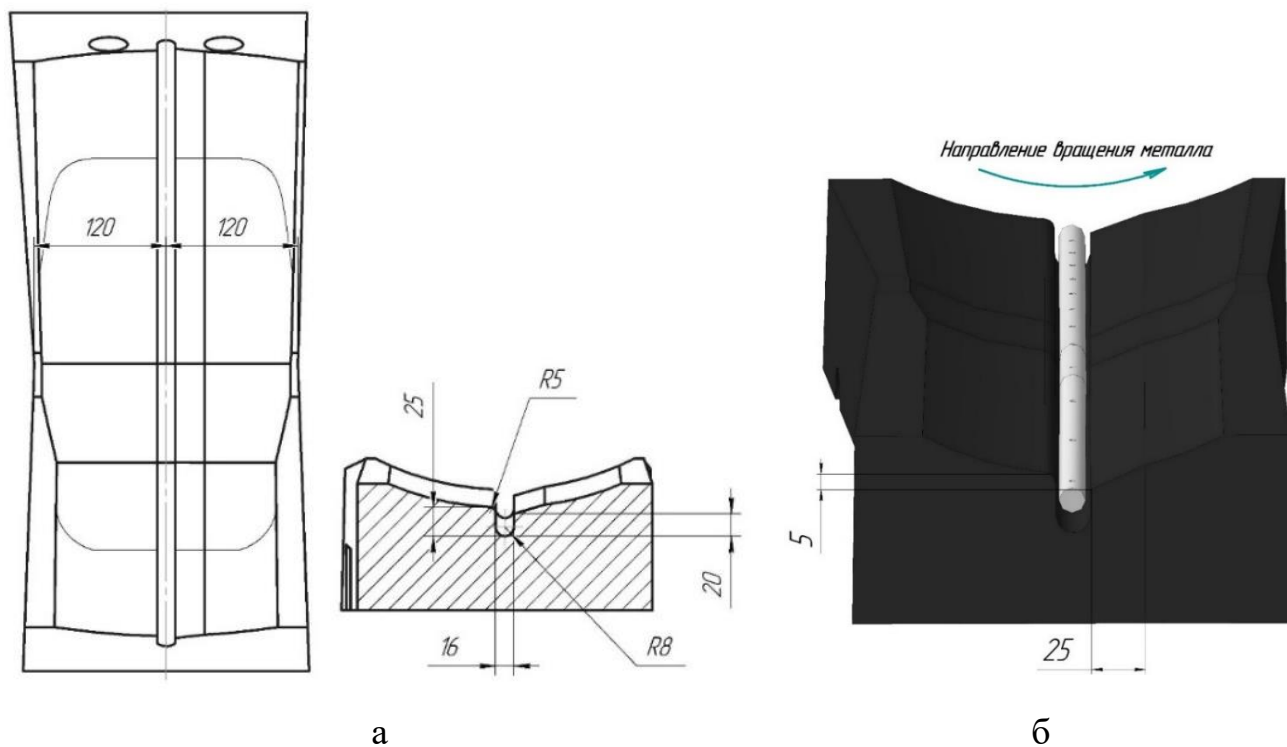


Рисунок 43 – Новая конструкция направляющих линеек с подачей охладителя непосредственно в процессе прокатки:

а – схематичный чертеж; б – 3D сборка.

Ширина паза выбирается из условия уменьшения площади контакта металла с линейкой не более 20% с учетом фасок. Глубина паза лимитирована снижением механической прочности линеек.

Ширина площади контакта металла с линейкой зависит от калибровки линеек и режима прокатки. Для расчета геометрических параметров паза предложены формулы (25,26):

$$b = \frac{(0,05 \dots 0,06) \cdot D_{\text{заг}} \cdot B_{\text{л}}}{R_{\text{л}} \cdot \xi_{\text{л}}}, \quad (25)$$

где b – ширина паза;

$D_{\text{заг}}$ – диаметр заготовки, мм;

$B_{\text{л}}$ – ширина линейки в пережиме, мм;

$R_{\text{л}}$ – радиус линейки в пережиме, мм;

$\xi_{\text{л}}$ – коэффициент овализации очага деформации в пережиме.

$$h = b + \psi \quad (26)$$

где h – глубина паза;

ψ – максимальная глубина износа рабочей поверхности, мм.

В процессе деформации на нижней линейке скапливается отслаивающаяся от заготовки окалина, которая будет препятствовать прохождению охладителя по пазу. Для бесперебойной подачи охладителя по всей длине рабочей поверхности линеек в пазе размещена глухая трубка с выполненными в ней отверстиями. Трубка повторяет профиль паза и не выступает за габариты рабочей поверхности линеек, с учетом входной плоскости.

5.2. Экспериментальное опробование новой конструкции направляющих линеек.

Для проведения эксперимента и опробования разработанной конструкции инструмента был выбран стандартный комплект с обычной калибровкой рабочей поверхности. Паз и наклонная плоскость были выполнены методом фрезерования.

Экспериментальное опробование новой конструкции линеек проводилось

при прокатке труб размером 194,5x15,9 мм.

Настройка очага деформации была следующая:

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

Для подачи охладителя в паз, были изготовлены и смонтированы трубки, подключенные к централизованной системе охлаждения прошивного стана, с давлением 2-3 атм. На рисунке 44 представлена экспериментальная верхняя линейка.



Рисунок 44 – Верхняя линейка до проведения эксперимента

После прошивки заготовок на поверхности гильз дефектов не наблюдалось. Разностенность полученных гильз не отличалась от прошитых на линейках традиционной конструкции.

Остановку производства и осмотр состояния направляющего инструмента

произвели после прокатки пятидесяти труб. Новая конструкция линеек, с подачей охладителя через многочисленные отверстия в трубке расположенной вдоль паза, доказала свою работоспособность. На контактирующих поверхностях, как нижней, так и верхней линейки не наблюдалось налипшего металла. Все отверстия в трубках были открыты, следовательно подаче воды в процессе деформации ничто не препятствовало. Количество отслоившейся окалины в пазе нижней линейки было незначительным. Износ поверхностей был равномерным и не превышал 1 мм, (рисунок 45).



а



б

Рисунок 45 – Экспериментальный направляющий инструмент после прокатки пятидесяти труб:

а – нижняя линейка, б – верхняя линейка

5.3. Моделирование процесса прошивки с использованием линеек новой конструкции

Исследование новой конструкции линеек осуществлялось при помощи верифицированной модели в QFORM 3D в соответствии с реальными параметрами настройки очага деформации и калибровкой рабочего инструмента.

При моделировании проводилась оценка формоизменения металла с применением новой конструкции линеек, а также преследовалась цель провести сравнительный анализ влияния новой конструкции линеек на различные параметры процесса по сравнению с применяемыми линейками.

Деформационное поведение материала при горячей пластической деформации (сопротивление деформации σ_s) задано табличной функцией, аргументами которой являются температура (в диапазоне 800-1200 °С), скорость деформации (0,01-500 с⁻¹) и степень деформации (0,01-1,0).

Основные параметры моделирования представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Исходные параметры для проведения моделирования

Параметр	Значение
Заготовка:	
- диаметр, мм	190
- длина, мм	1000
- температура, °С	1180
- материал	Сталь 45
Инструмент:	
- частота вращения валков, об/мин	60
- диаметр в пережиме, мм	750
- длина бочки, мм	600
- угол подачи, градусы	12
- угол раскатки, градусы	-7
Материал	
- валков	Сталь 40Х
- оправок	Сталь 4Х5МФС
- линеек	Сплав ХН55МБЮ (ЭП 666)
Температура, °С	
- валков	50
- оправки	100
- линеек	100
Фактор трения	
- валки	1,0
- оправка	0,5
- линейки	0,8
Окружающая среда:	
- температура, °С	20

Результаты моделирования указывают на отсутствие затекания металла в пазы линеек, где находятся трубки охлаждения (рисунок 46).

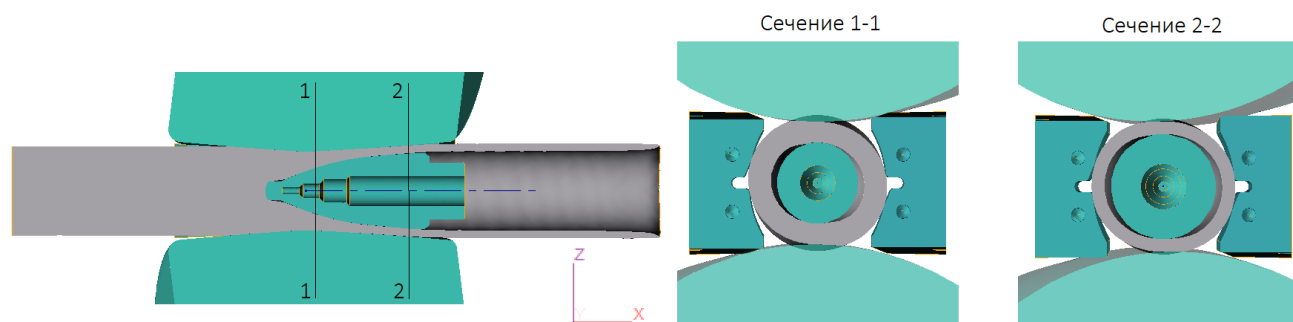


Рисунок 46 – Сечения очага деформации при прошивке с использованием линеек новой конструкции

Как видно из рисунка 46, активного затекания металла в пазы не наблюдается вдоль всей контактирующей поверхности.

Геометрические параметры гильзы при использовании линеек новой конструкции не изменились и составили: наружный диаметр 198...200 мм, толщина стенки 15,9...16,2 мм.

Для оценки кинематики процесса на переднем и заднем торце были созданы трассируемые точки. Для этих точек построены графики изменения осевой скорости заготовки-гильзы в процессе прошивки (рисунок 47). В обоих случаях на графиках можно отметить повышенные колебания осевой скорости, характерные для неустановившегося процесса прошивки. При прошивке с пазами охлаждения, колебания осевой скорости меньше, на 2,5 % выросла осевая скорость прошивки (общее время деформации сократилось с 9,75 до 9,51 с).

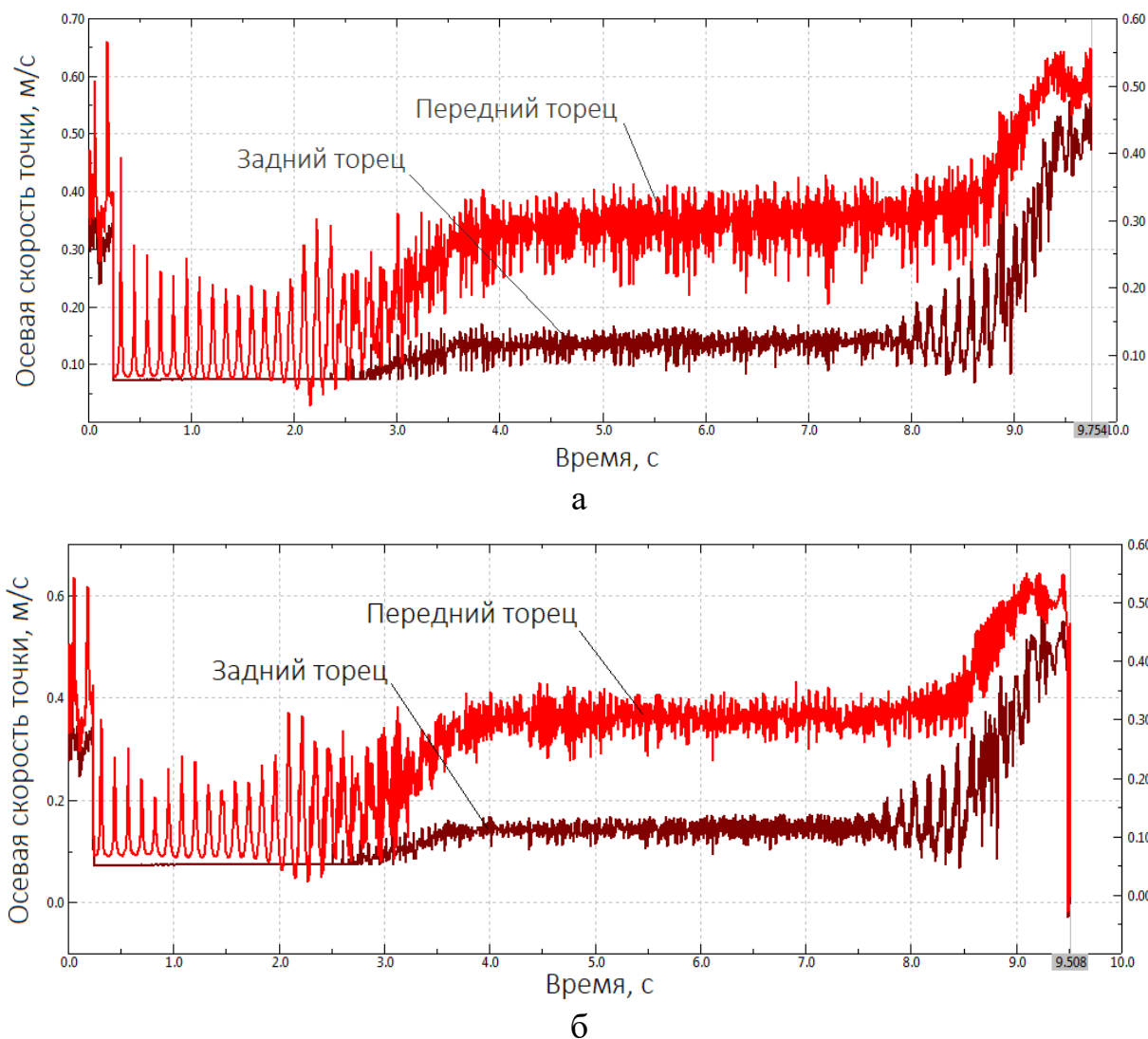


Рисунок 47 – Осевая скорость точки на переднем и заднем торцах заготовки-гильзы при прошивке на линейках:
а – без пазов, б – с пазами для охлаждения

Для линейек с продольным пазом площадь контакта разделена на два участка, больший из которых расположен со стороны начала контакта с заготовкой при ее вращении (рисунок 48). Полученные картины хорошо согласуются с полученными результатами экспериментальных опробований.

Площадь контакта металла с линейками за счет паза уменьшилась приблизительно на 20 %. При этом среднее нормальное усилие металла на линейку без паза составляет 250 кН, а на линейку с пазами 200 кН. Пропорциональное снижение средних усилий и площади контакта, свидетельствует о соизмеримых средних удельных давлений металла на линейки сравниваемых конструкций.

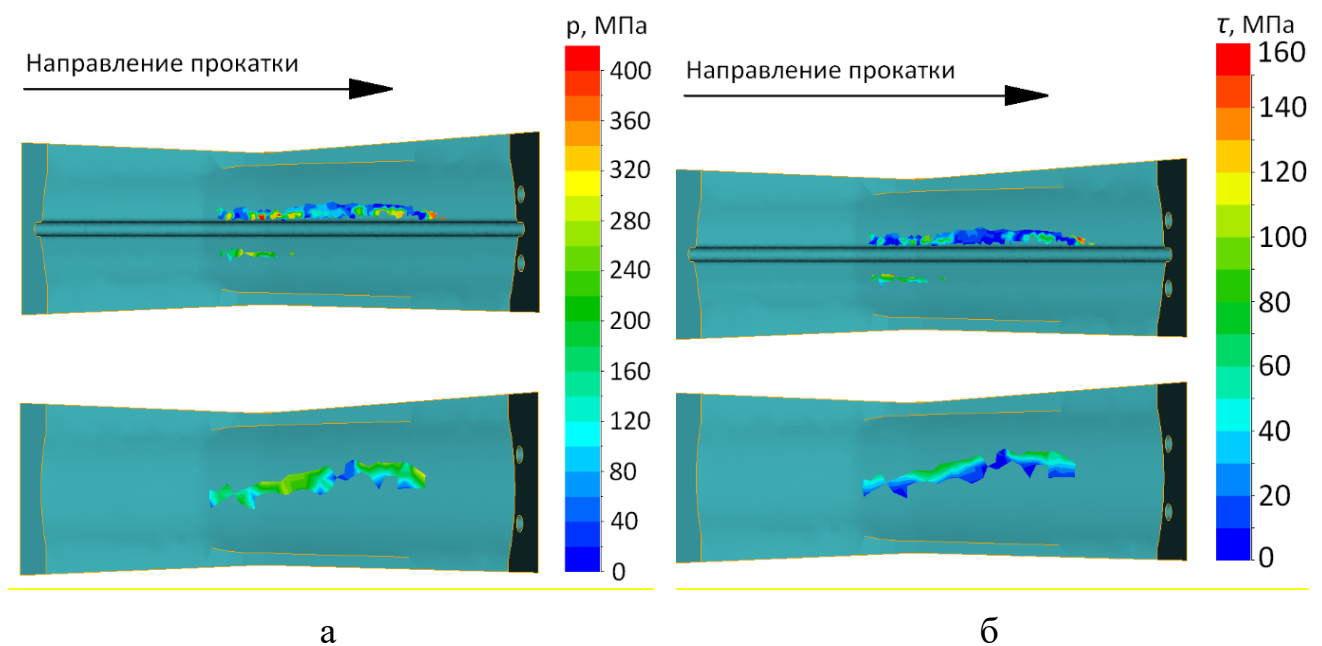


Рисунок 48 – Поля нормального давления на поверхности контакта заготовки с инструментом (а) и касательных напряжений (б) для линеек с пазом и без паза

На линейках без паза значения нормального давления находятся в диапазоне 150-300 МПа. На линейках с продольным пазом основная зона локализована в сечении пережима и на выходном участке вдоль паза со стороны, где отсутствует пологий участок. Средние расчетные значения нормального давления на пятне контакта составляют от 60 до 180 МПа, однако есть две точки пиковых значений до 400 МПа (рисунок 48 а).

Полученные по результатам моделирования значения касательных напряжений (рисунок 48 б) на контакте линеек с заготовкой в данном случае приблизительно одинаковы (20-80 МПа), и не зависят от конструкции линеек. При этом наибольшие значения получены в зоне начала контакта с линейками по ходу вращения заготовки. Представленные данные говорят о том, что более существенное значение на износ линеек оказывает нормальное давление со стороны заготовки.

С помощью стандартной подпрограммы QFORM выполнен расчет износа линеек на основе модели Арчарда по формулам (27, 28):

$$W_p = \int_0^t \frac{K_p \cdot p^a \cdot V_\tau^b}{\bar{\sigma}^a} dt; \quad (27)$$

$$W_\tau = \int_0^t \frac{K_\tau \cdot \tau \cdot V_\tau}{\bar{\sigma}} dt, \quad (28)$$

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

K_p и K_τ – эмпирические коэффициенты;

a и b – эмпирические коэффициенты;

V_τ – касательная скорость контактного узла заготовки относительно инструмента, м/с;

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

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

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

t – время контакта заготовки с инструментом, сек.

Рассчитанные поля в данном случае не дают количественной оценки, но позволяют качественно оценить зоны и интенсивность износа инструмента при различных условиях.

Температура инструмента и заготовки изменяется в соответствии с уравнением нестационарной теплопроводности с учетом теплообмена с окружающей средой по свободной поверхности. Теплообмен между заготовкой и инструментом происходит через слой условной смазки (параметры трения). Тепловой поток зависит от знака разности температур между контактными поверхностями заготовки и инструмента. Величина теплового потока через смазку определяется по выражению:

$$q_n = b\alpha(T_1 - T_2), \quad (29)$$

где q_n – плотность теплового потока через поверхность теплообмена (Вт/м²);

b – коэффициент паузы (0,05), показывающий во сколько раз необходимо уменьшить коэффициент теплопередачи при отсутствии плотного контакта между заготовкой и инструментом (без деформации заготовки).

α – коэффициент теплопередачи ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$), комплексно учитывающий коэффициенты теплоотдачи между заготовкой и смазкой и между смазкой и инструментом;

T_1 и T_2 – температура заготовки и инструмента соответственно, К;

Сравнительная оценка зоны и интенсивности износа линеек также свидетельствует о сопоставимых результатах (рисунок 49). Можно видеть, что основная зона износа формируется от сечения пережима и доходит до сечения выхода из очага деформации. Общая длина пятна контакта составляет 300...305 мм для линеек с пазами и 325 мм для линеек без пазов.

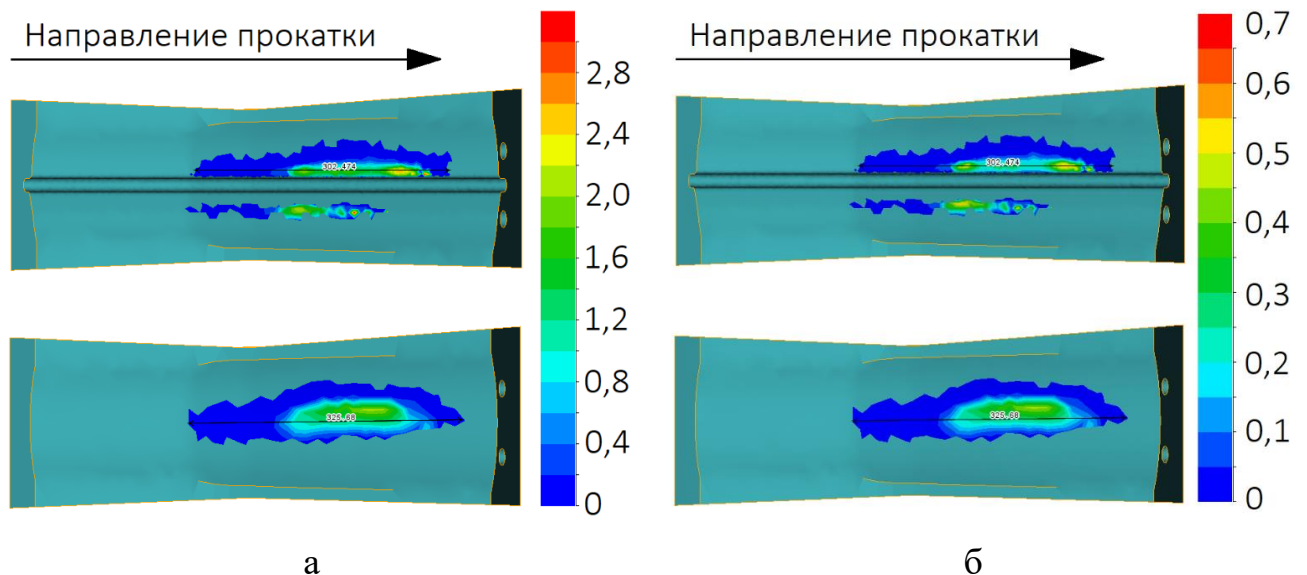


Рисунок 49 – Износ линеек с пазом и без паза:

а – от нормального давления; б – от касательных напряжений.

Максимальные показатели износа линеек от нормальных давлений ($W_p=1,2...2,2$) и касательных напряжений ($W_\tau=0,30...0,55$) в зоне раскатки гильзы за сечением пережима, т.к. в данной зоне происходит интенсивное тангенциальное истечение металла.

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. Ожидается, что в реальном процессе за счет подачи охладителя непосредственно на рабочую поверхность ее

температура снизится, благодаря чему будет достигнута большая износостойкость направляющего инструмента.

Выводы

В результате выполненной диссертационной работы достигнута цель и получены следующие результаты:

1. В результате комплексных исследований процесса двойной прошивки разработаны и внедрены усовершенствованные режимы деформации и технологический инструмент при двойной прошивке на ТПА 70-270, снижающие относительную разностенность труб в среднем на 3%.

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. В ходе экспериментальных исследований установлено, что при прошивке заготовок за одну операцию с коэффициентов вытяжки 2,7 разностенность гильз составила 16,8%, в то время как после двойной прошивки с рациональным распределением коэффициентом вытяжки между проходами разностенность гильз составила 9,8%, таким образом снижение разностенности составило 7,0%.

4. 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.

5. 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%.

6. Разработаны режимы и технологический инструмент для двойной прошивки НЛЗ в одной клети 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 $\sigma_b \approx 750$ МПа, $\sigma_t \approx 450$ 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.

7. 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 литературы

1. Стратегия развития черной металлургии России на 2014 – 2020 годы и на перспективу до 2030 года: Министерство промышленности и торговли Российской Федерации / Утверждена приказом Минпромторга России от 5 мая 2014 г. №839. – 121 с. URL: [http:// minpromtorg.gov.ru](http://minpromtorg.gov.ru)
2. Данченко, В.Н. Технология трубного производства: учебник / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 640 с.
3. Романцев, Б.А. Обработка металлов давлением: учебник / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин – М.: Дом МИСИС, 2008. – 960 с.
4. Столетний, М.Ф. Точность труб / М.Ф. Столетний, Е.Д. Клемперт. – М.: Металлургия, 1975.- 240 с.
5. Михалкин, Д.В. Повышение точности труб путем применения профилированной трубной заготовки / Д.В. Михалкин, А.А. Корсаков, Е.В. Алютина, Е.В. Храмков, А.С. Алещенко, С.П. Галкин и др. // Металлург – 2020г. – №4 – С. 40-45.
6. Перевозчиков, Д.В. Оценка возможности применения подстуживания заготовки для борьбы с неоднородностью деформации по высоте заготовки / Д.В. Перевозчиков, Л.В. Радионова // Вестник Южно-Уральского государственного университета – 2018 г. – №1 – С. 36-45
7. Осадчий, В.Я. Качество труб на трубопрокатных установках с грибовидными и валковыми прошивными станами / В.Я. Осадчий // Металлург – 1968г. – №11 – С. 17-20.
8. Потапов, И.Н. Исследование разностенности передних концов гильз / И.Н. Потапов, В.А. Попов, Б.А. Романцев // Научные труды Московского института стали и сплавов: Теория и технология деформации металлов – 1976 - №96 – с. 65-69
9. Фомичев, И.А. Косая прокатка / И.А. Фомичев – Харьков: Металлургия, 1963. – 262 с.

10. Курятников, А.В. Оценка эффективности зацентровки непрерывнолитой заготовки перед ее винтовой прошивкой в условиях ОАО СТЗ / А.В. Курятников, А.В. Король, В.А. Топоров, А.И. Степанов, О.А. Панасенко // Сталь – 2014г. – №6 – С. 71-73.
11. Король, А.В. Совершенствование двухвалковой винтовой прошивки на основе моделирования и разработки новых технических решений: дис. канд. тех. наук / А.В. Король. – Ч., 2016. – 139 с.
12. Тетерин, П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки: учебник для вузов / П.К. Тетерин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1971. – 368 с.
13. Полухин, П.И. Новая технология винтовой прокатки / П.И. Полухин, И.Н. Потапов. – М.: Металлургия, 1975. – 342 с.
14. Чекмарев, А.П. Прошивка в косовалковых станах / А.П.Чекмарев, Я.Д. Ваткин, М.И. Ханин и др. – М.: Металлургия, 1967. – 240 с.
15. Потапов, И.Н. Технология винтовой прокатки / И.Н. Потапов, П.И. Полухин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
16. Ваткин, Я.Л. Влияние несимметричности нагрева заготовок на разностенность горячекатаных подшипниковых труб / Я.Л. Ваткин, М.К. Клейнер, Г.А. Эммануэль // Сталь – 1972г. – №6 – С. 537-541
17. Осипов, Э.А. Регулирование продольной разнотолщинности бесшовных труб / Э.А. Осипов, Г.А. Осипов, В.И. Пермяков // Механизация и автоматизация производства – 1974г – №1 – С.22-23.
18. Ханин, М.И. Технология прокатки тонкостенных труб повышенной точности на агрегате с автоматическим станом с использованием нестационарных режимов деформации при прошивке / М.И. Ханин // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2002г. – №8 – С. 361-363.
19. Ханин, М.И. Режимы прошивки, обеспечивающие снижение продольной разностенности труб на агрегатах с короткооправочными станами / М.И. Ханин // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2013г. – №2 – С. 48-50.
20. Полухин, П.И. Качество гильз из титановых сплавов при прокатке на

трехвалковом стане / П.И. Полухин, И.Н. Потапов, Б.А. Романцев и др. // Научные труды Московского института стали и сплавов: Теория и технология обработки металлов давлением – 1982 - №142 – с. 93-97

21. Остренко, Я.В. Исследование разностенности гильз при косой прокатке / Я.В. Остренко, Ю.М. Миронов, В.И. Ермолов // Сталь – 1970г. – №8 – С. 728 – 732.

22. Данченко, В.Н. Качество бесшовных горячекатаных труб с учетом влияния колебания стержня оправки / В. Н. Данченко, С.Р. Рахманов // Сталь – 2009г. – №1 – С. 63 – 65.

23. Оклея, Л.П. Качество горячекатаных труб / Л.П. Оклея – М.: Металлургия, 1986г. – 144 с.

24. Струин, Д.О. Совершенствование технологии прокатки труб на непрерывном раскатном стане с удерживаемой оправкой / Д.О. Струин, А.В. Выдрин, В.Г. Шеркунов, Е.А. Шкуратов, И.Н. Черных, О.Е. Сарафанова, С.Н. Мишин // Вестник Южно-Уральского государственного университета – 2018 г. – №2

25. Гамин, Ю.В. Разработка технологии и оборудования для горячей прокатки полых заготовок с дном малого диаметра: дис. канд. тех. наук / Ю.В. Гамин. – М., 2017. – 149 с.

26. Богатов, А.А. Винтовая прокатка непрерывно-литых заготовок из конструкционных марок стали: учеб. пособие / А.А. Богатов, Д.А. Павлов, Д.Ш. Нухов – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 164 с.

27. Друян, В.М. Теория и технология трубного производства: учебник / В.М. Друян, Ю.Г. Гуляев, С.А. Чукмасов – Днепропетровск: Изд-во РИА «Днепр-ВАЛ», 2001. – 544 с.

28. Ханин, М.И. Вторичная прошивка в косовалковом стане с различным направляющим инструментом / М.И. Ханин, В.В. Вольфович, И.Ю. Коробочкин, Н.С. Кирвалидзе, Г.А. Бондарь, П.Д. Мавродин. / «Обработка металлов давлением» сборник научных трудов №59. – М.: Металлургия, 1976. – С. 320-330.

29. Ханин, М.И. Параметры процесса прошивки при производстве труб

наиболее трудоемкого сортамента на ТПА-350 / М.И. Ханин, В.Ю. Солдатов, А.В. Алексеев. / «Сучасні проблеми металургії» сборник научных трудов, 2008, том 11. – С. 12-17.

30. Чикалов, С.Г. Теоретические основы, исследование, разработка и внедрение высокоэффективных технологий производства бесшовных труб с использованием непрерывнолитой заготовки: автореферат дис. докт. техн. наук / С. Г. Чикалов – Москва – 2004 г. – 48 с.

31. Шевакин, Ю.Ф. Производство труб: учебник / Ю.Ф. Шевакин, А.З. Глейберг. – М.: Металлургия, 1968.- 440 с.

32. Марченко, К.Л. Интенсификация процесса винтовой прошивки непрерывнолитых заготовок с целью повышения качества труб: дис. канд. техн. наук / К. Л. Марченко – Москва – 2007 г. – 172 с.

33. Чернышев, Ю.М. Освоение обжата непрерывнолитой заготовки на трехвалковом стане аселя ОАО ПНТЗ / Чернышев Ю.М., Исайкин А.Н., Халдин Д.В., Белокозович Ю.Б., Ошурков А.Л., Чечулин Ю.Б., Песин Ю.В., Кузнецов В.И. // Сталь. – 2016. – №5. – С.35-40.

34. ГОСТ 34636 – 2020 Заготовка трубная. Общие технические условия

35. ГОСТ Р 58228 – 2018 Заготовка стальная непрерывнолитая. Методы контроля и оценки макроструктуры.

36. ГОСТ Р 53932-2010 Заготовка трубная. Общие технические условия.

37. ОСТ 14-1-235-91 Сталь. Метод контроля макроструктуры непрерывнолитой заготовки для производства сортового проката и трубных заготовок.

38. Сафронов, А. А. Качество макроструктуры НЛЗ и его регламентация/ Сафронов А. А., Прилуков С. Б., Гасилов А.Ю. // Сталь. – 2013. – №11. – С.27-31.

39. Барадынцева, Е. П. Трансформация дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовки при производстве бесшовных горячекатаных труб на РУП «БМЗ»/ Барадынцева Е. П., Глазунова Н. А., Рожкова О.В. // Литье и металлургия. – 2008. – №4. – С.38-40.

40. А.Н. Никулин, В.В. Стрелецкий. Деформационное воздействие

винтовой прокатки на непрерывнолитой металл. // *Металлург.* – 2005. – №3. – С.44-46.

41. Парфенов, В.А. Исследование и совершенствование процесса прошивки на двухвалковых винтовых станах моделированием параметров очага деформации для обеспечения качества гильз из непрерывнолитых заготовок: дис. канд. тех. наук / В.А. Парфенов. – М., 2019. – 108 с.

42. Голубчик, Р.М. Составляющие работы деформации при прошивке заготовок / Голубчик Р.М., Клемперт Е.Д., Медведев Е.К., Чепурин М.В., Шелест А.Е. // *Металлургическая и горная промышленность.* – 2011. – №7. – С.197-201.

43. Меркулов, Д.В. Положение оправки в очаге деформации при прошивке заготовок / Меркулов, Д.В., Голубчик Р.М., Топоров В.А., Парфенов В.А., // *Производство проката.* – 2013. – №5. – С.17-24.

44. Голубчик, Р.М. Эффективные режимы прошивки заготовок в станах различной конструкции / Голубчик Р.М., Меркулов, Д.В., Медведев Е.К., Чепурин М.В., Татаркин И.А. // *Сталь.* – 2011. – №3. – С.41-43.

45. Голубчик, Р. М. Оценка размеров прошиваемых заготовок по параметрам циклического формоизменения / Голубчик Р. М., Меркулов Д. В., Топоров В. А., Чепурин М. В., Парфенов В.А. // *Сталь.* – 2012 г., № 12, – С. 37-40.

46. Голубчик, Р.М. Расчет объемной доли деформации при винтовой прокатке / Голубчик Р.М., Меркулов, Д.В., Медведев Е.К., Чепурин М.В., // *Сталь.* – 2013. – №3. – С.41-44.

47. Ханин, М.И. Современное состояние и перспективы развития теории винтовой прокатки / М.И. Ханин // *Труды пятой международной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства», г. Днепропетровск, 2000 г.* – С. 277-278.

48. Галкин, С.П. Показатель поперечной деформации при прошивке заготовок. // *Производство проката.* – 2011. – №9. – С.18-23.

49. Романцев, Б.А. Сравнительный анализ процесса прошивки в станах винтовой прокатки / Романцев Б.А., Гончарук А.В., Галкин С.П. // *Металлургическая и горная промышленность.* – 2011. – №7. – С.153-158.

50. Романцев, Б.А. Трубное производство: Учебник для ВУЗов / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2011, 970 с.
51. Кутепов, В.А. Практика использования оправок прошивного стана с внутренним водяным охлаждением / Кутепов В.А. // Труды международной научно-практической конференции «Трубы-2014». – 2014. – С.197-202.
52. Пат. 2476279 Российская Федерация, МПК В21В 19/00. Направляющий инструмент стана винтовой прокатки / Латкин Д.И., Романцев Б.А., Галкин С.П., Гончарук А.В. и др. – Оpubл. 27.02.2013, Бюл. № 6.
53. Романцев, Б.А. Направляющий инструмент стана винтовой прокатки / Романцев Б.А., Латкин Д.И., Алещенко А.С. // Металлургическая и горная промышленность. – 2011. – №7. – С.194-196.
54. Буркин, С.П. Ресурсо- и энергосбережение в металлургии. Разработка машин и технологий металлургии при инновационном риске: учебник: в 2 кн. Кн.1/С.П. Буркин, Е.А. Коршунов, В.В. Шимов, Н.А. Бабайлов, Е.А. Андрюкова. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 498 с.
55. Хензель А и др. Оптимизация расхода энергии в процессах деформации: Хензель А., Шпиттель Т., Шпиттель М., Гайдук М., Конвичный Й. – М.: Металлургия, 1985. — 184 с.
56. Орлов, Г.А. Основы теории прокатки и волочения труб: учебное пособие / Г.А. Орлов – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 204 с.
57. Тетерин, П.К. Теория поперечно-винтовой прокатки: учебник / П.К. Тетерин – М.: Металлургия, 1971. — 368 с.
58. Aleshchenko A.S., Gamin Y.V., Chan B.K., Tsyutsyura V.Y., Wear features of working tools during piercing of high-temperature alloys, 2018, Chernye Metally, 8, p 63-70
59. Fernandes M., Marouf N, Montmitonnet P., Mocellin K., Impact of the Different Friction Coefficients on the Tools on the Mechanics of the Mannesmann 2-roll Tube Piercing, SIJ International, 2020, Volume 60, Issue 12, Pages 2917-2926, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-290>

60. Romantsev B.A., Aleshchenko A.S., Tsyutsyura V.Y., Tyshchuk I.N., Lube I.I., Features of Piercing Mill TPA 50-200 Working Roll Wear During Rolling Continuously-Cast and Hot-Rolled Billets, 2017, Metallurgist, 60, 9-10, p 1062-1069
61. Romantsev B.A., Matyko O.K., Goncharuk A.V., Aleshchenko A.S., Polivets A.V. Improving the wear resistance of piercing-mill mandrels, 2008, Steel in Translation, 38, 11, p. 897-899
62. Коновалов М.С., Шеногин В.П. Исследование стойкости оправки из сплава на основе Ni3Al при прошивке прутков стали марки 08X18H10T-Ш. Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15. № 2. С. 39-42.
63. Герасимов Ю.Л., Авдеев С.В., Бобарикин Ю.Л. Исследование влияния особенностей оксидированного покрытия прошивных оправок на их эксплуатационную стойкость. Черные металлы. 2017. № 7. С. 46-49.
64. Gevorgyan, G. A., Vorobiev, R. A., Pachurin, G. V., & Kuzmin, A. N. (2020). Steel selection and optimization of plug heat treatment for piercing seamless pipes. ChernyeMetally, 2020(4), 32-37.
65. Romantsev, B., Goncharuk, A., Aleshchenko, A. et al. Development of multipass skew rolling technology for stainless steel and alloy pipes' production. Int J Adv Manuf Technol 97, 3223–3230 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2134-3>
66. Крупин, А.В. Прокатка металлов в вакууме: Учебник для ВУЗов / А.В. Крупин. – М.: Металлургия, 1974. – 248 с.
67. Пат. 2630188 Российская Федерация, МПК В21В 19/04. Линейка прошивного стана / Романцев Б.А., Гончарук А.В., Гамин Ю.В., Алещенко А.С., и др. – Опубл. 05.09.2017, Бюл. № 25.
68. Romantsev B.A., Goncharuk A.V., Zimin V.Y., Pakhomov V.P., Aleshchenko A.S., Matyko O.K. Introducing seamless-pipe production at ОАО vyksunskii metallurgicheskii zavod, 2009, Steel in Translation, 39, 9, p803-805
69. Романцев, Б.А. Трубное производство: Учебник для ВУЗов / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2011, 970 с.

70. Прошивная оправка / Н.М. Вавилкин, В.В. Бухмиров. – М.: МИСиС, 2000. – 128 с.
71. Калибровка инструмента трубных станов / Ю.М. Матвеев, Я.Л. Ваткин. – М.: Металлургия, 1970. – 480 с.
72. Корсаков, А.А. Совершенствование технологии винтовой прокатки непрерывнолитой заготовки с целью уменьшения диаметра черновой трубы: дис. канд. тех. наук / А.А. Корсаков. – М., 2015. – 158 с.
73. Murillo-Marrodán, A.; García, E.; Barco, J.; Cortés, F. Application of an Incremental Constitutive Model for the FE Analysis of Material Dynamic Restoration in the Rotary Tube Piercing Process. *Materials* 2020, 13, 4289. <https://doi.org/10.3390/ma13194289>
74. Galkin, S.P., Stebunov, S.A., Aleschenko, A.S. et al. Simulation and Experimental Evaluation of Circumferential Fracture Conditions in Hot Radial–Shear Rolling. *Metallurgist* 64, 233–241 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00988-9>
75. Goncharuk A.V., Gamin Y.V., Sharafanenko I.K., Aleshchenko A.S. Piercing of a Billet in a Mill with Guide Disks, 2020, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020, 13, p. 1637-1642.
76. Gamin, Y.V., Skripalenko, M.M., Romantsev, B.A. et al. Prediction of Billet Fracture at Two-High Screw Rolling Piercing. *Metallurgist* (2021). <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01093-1>
77. Topa, A., Kim, D. K., & Kim, Y. (2018). 3D numerical simulation of seamless pipe piercing process by fluid-structure interaction method. Paper presented at the MATEC Web of Conferences, , 203 doi:10.1051/matecconf/201820306016
78. Орлов, Д.А. Анализ особенностей процесса прошивки труб на ТПА 70-270 с применением метода конечных элементов / Д.А. Орлов, А.В. Гончарук, О.А. Кобелев, О.Г. Комарницкая, Н.С. Буниц // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. Т. 63. № 10 (2020) с. 848-855.
79. Гончарук, А.В Влияние режимов деформации на точность бесшовных труб / А.В. Гончарук, Б.А. Романцев, Д.А. Орлов, Ю.В. Гамин // Технология металлов № 1. (2020) с. 50-54.

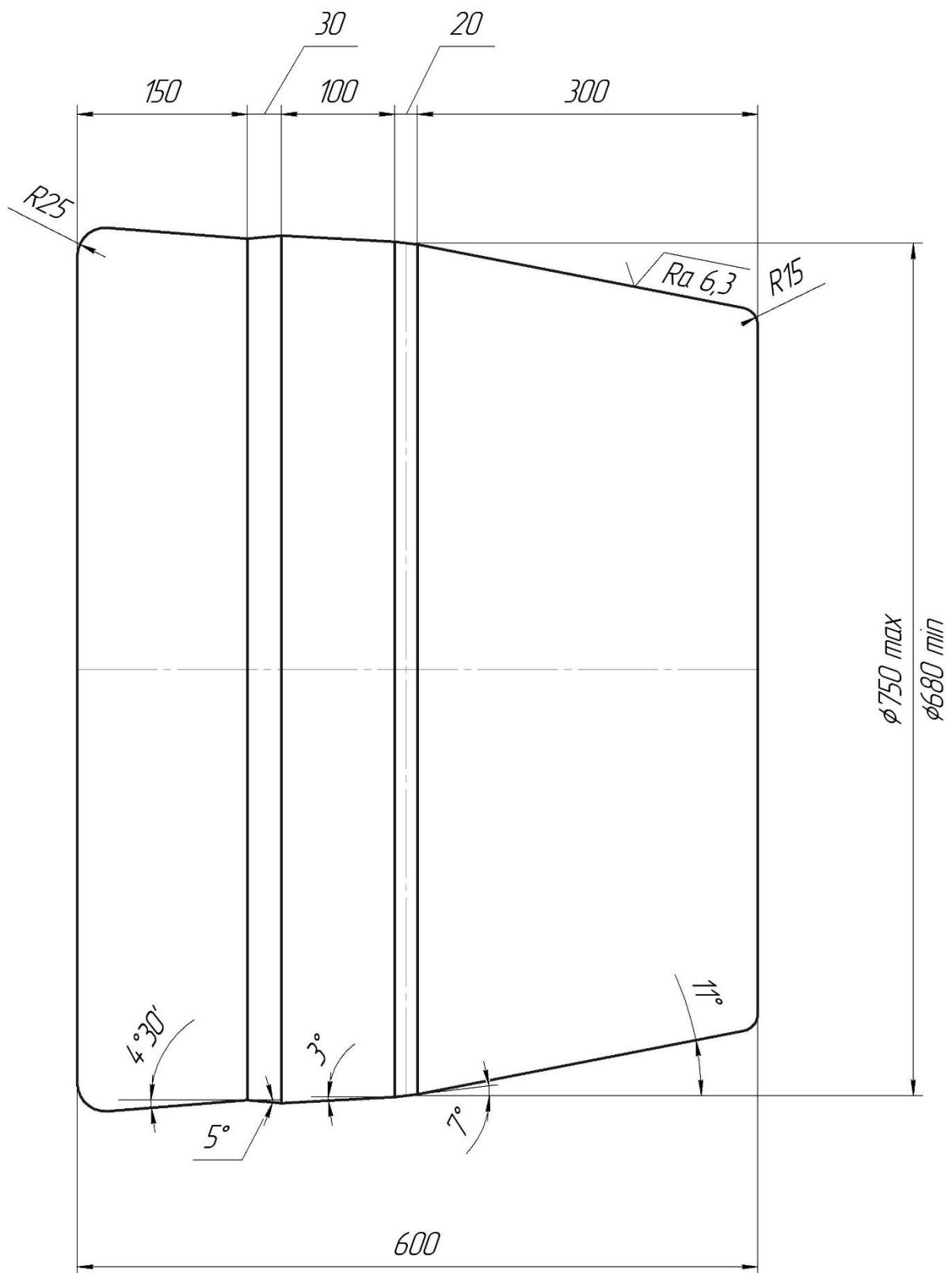
80. Пат. 2741037 Российская федерация, МПК В21В 19/04 В21В 37/56. Способ винтовой прошивки / Орлов Д.А., Гончарук А.В., Романцев Б.А. № 2020119835; заявл. 16.06.20; опубл. 22.01.21, Бюл. № 3. – 5 с.

81. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1975. – 416 с.

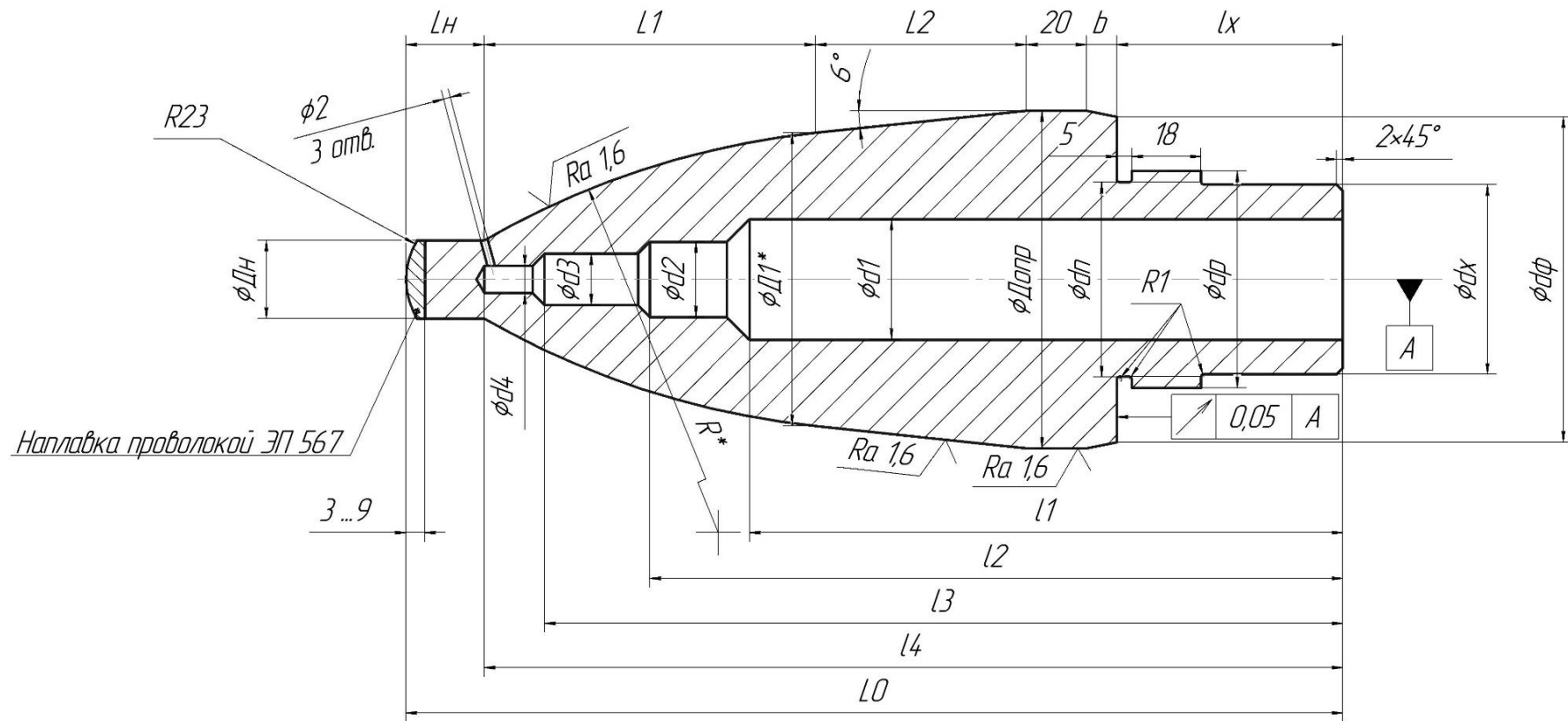
82. Орлов, Д.А. Разработка и исследование процесса прошивки с использованием охлаждаемых направляющих линеек / Д.А. Орлов, Ю.В. Гамин, А.В. Гончарук, Б.А. Романцев // *Металлург* №4 (2021) с. 26-32. D. A. Orlov, Yu. V. Gamin, A. V. Goncharuk, B. A. Romantscev Development and Investigation of Piercing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

83. Пат. 2735436 Российская федерация, МПК В21В 19/04 Способ винтовой прошивки заготовки в гильзу / 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.

Приложение А



3-319790	$\Delta_{\text{онр}}$	Δ_H	L_H	L_1	L_2	R	Δ_1	d_1	l_1	d_2	l_2	d_3	l_3	d_4	l_4	d_n	d_p	l_x	d_x	$d\phi$	L_0	D_{cm}	Масса	b
-1	90	20	20	105	55	328,4	78,44	32	161	23	193	16	225	6	245	54,5	M60x4LH-8g	55	53h9	89	265	89	5,70	10
-2	112	26	26	110	60	269,0	99,39	40	187	25	220	17	255	9	275	66,0	M72x4LH-8g	75	63h9	108	301	108	9,60	10

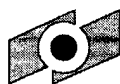


Приложение Б

Таблица прокатки муфтовых труб на ТПА 70-270 из НЛЗ

№	Готовая труба			Заготовка			Гильза после 1-ой прошивки								Труба после 2-ой прошивки								Труба после калибрования					
	Диаметр	Толщина стенки	D/S	Диаметр	Длина	Масса	Диаметр	Толщина стенки	Длина	D/S	Коэф. вытяжки	Вп	Лп	dp	Сп	Диаметр	Толщина стенки	Длина	D/S	Коэф. вытяжки	Вр	Лр	dp	Ср	Диаметр	Толщина стенки	Длина	Коэф. вытяжки
												мм	мм	мм	мм						мм	мм	мм	мм				
1	200,0	18,9	11	220	1800	536,7	192	35	3964	5	2,202	178	196	112	155	209	19,1	6003	11	1,514	178	196	167	60	202,2	19,1	6294,0	1,037
2	194,5	15,9	12	220	1490	444,2	192	35	3281	5	2,202	178	196	112	155	203	16,1	6000	13	1,829	178	196	164	90	196,6	16,1	6279,7	1,035
3	187,7	17,0	11	220	1520	453,2	192	35	3347	5	2,202	178	196	112	155	197	17,2	5951	11	1,778	178	196	154	100	189,8	17,2	6269,0	1,042
4	166,0	16,9	10	196	1670	395,2	168	35	3445	5	2,063	157	172	90	145	175	17,1	5944	10	1,725	157	172	134	100	167,8	17,1	6295,8	1,048
5	153,7	13,6	11	180	1500	299,4	155	29	3325	5	2,217	144	158	90	140	161	13,7	6001	12	1,805	144	158	127	90	155,4	13,7	6307,4	1,040

Приложение В



ОБЪЕДИНЕННАЯ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКАЯ
КОМПАНИЯ

Акционерное общество
«Выксунский
металлургический завод»

Совершенство
продуманных
решений

АКТ

27.05. 20²¹

№ 200748-A-148/21

О внедрении результатов научно-исследовательских работ

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. директора инженерно-технологического центра

А.В. Мунтин

Настоящий акт составлен в том, что работы по теме:
«Совершенствование технологии горячей прокатки бесшовных труб с использованием непрерывнолитой заготовки»

начаты в сентябре 2020 г.

завершены в мае 2021 г.

Участники выполнения работ:

НИТУ «МИСИС» (договор № 52-2020 от 08.09.2020)

Цель работ: Снижение себестоимости производства муфтовых труб за счет использования непрерывнолитой заготовки (НЛЗ).

Результаты работ:

1. Разработана технология прокатки на ТПА 70-270 позволяющая полностью проработать литую структуру НЛЗ при относительно невысоких суммарных коэффициентах вытяжки 3,7, за счет чего достигается требуемый уровень механических свойств.

2. Разработаны режимы прокатки, калибровки технологического инструмента для типоразмеров труб, приведенных в таблице 1.



SSSMM2000KSKLU2K1

Таблица 1 – Типоразмеры муфтовых труб

№	Муфтовая труба			Обсадная труба	Тип резьбового соединения
	Диаметр, мм	Толщина стенки, мм	D/S	Диаметр, мм	
1	200,0	18,9	11	177,8	ВС
2	194,5	15,9	12	177,8	ВС, ОТТМ
3	187,7	17,0	11	168,3	ВС, ОТТМ
4	166,0	16,9	10	146,1	ВС, ОТТМ
5	153,7	13,6	11	139,7	ВС, ОТТМ

3. Предложенная технология прошла промышленное опробование на ТПА 70-270 при опытной прокатке муфтовых труб двух типоразмеров 166,0x16,9 мм и 187,7x17,0 мм. Разработанная технология, позволяет стабильно вести процесс прокатки, с получением труб высокой точности. Результаты металлографических исследований полученных труб свидетельствуют о получении величины перлитного зерна согласно ГОСТ 5639-82 5,6,7 номера. Результаты испытаний механических свойств, полученных труб свидетельствуют о соответствии труб группам прочности Д и К55.

4. Опытная партия труб из НЛЗ имела меньшую себестоимость производства, за счет разницы в стоимости НЛЗ и предварительно деформированной заготовки в отчетный период.

Заключение:

С целью снижения себестоимости производства муфтовых труб, технология и калибровки технологического инструмента предлагаются к внедрению в промышленное производство.

Считать результаты выполненных работ положительными.

Руководитель работы:

Главный специалист по технологии производства
бесшовных труб

Д.А. Орлов

Начальник управления по технологии трубного
производства инженерно-технологического центра

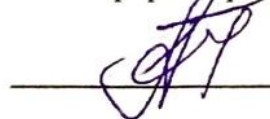
С.А. Гришин

Начальник управления по технологии и качеству
Трубного производства
Дивизиона нефтегазопроводных труб

Д.В. Рощин

Приложение Г**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по образованию

 А.А. Волков

«06» сентября 2021 г.

АКТ**о внедрении результатов диссертационной работы Орлова Д.А.
в учебный процесс на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС»**

Настоящий акт подтверждает использование в учебном процессе результатов диссертационной работы Орлова Д.А. на тему «Совершенствование технологии двойной прошивки заготовок на станах винтовой прокатки», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Изложенные в диссертационной работе исследования геометрических, энергосиловых, температурных и кинематических параметров технологии двойной прошивки в промышленных условиях, методика расчета рационального распределения деформации между операциями двойной прошивки с использованием заданного суммарного коэффициента вытяжки позволяющая снизить разностенность гильз, калибровки технологического инструмента и режимы прокатки труб из непрерывнолитых заготовок, позволяющие проработать литую структуру по толщине стенки труб при относительно невысоких суммарных коэффициентах вытяжки и разработанная конструкция направляющих линеек позволяющая повысить их износостойкость, использованы в учебном процессе на кафедре «Обработки металлов давлением» при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Металлургия» и «Технологические машины и оборудования».

Заведующий кафедрой ОМД



А.С. Алешенко