

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



КРАСИКОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ
ТОВАРНЫХ ТРУБ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ МАРОК СТАЛИ
НА АГРЕГАТАХ С НЕПРЕРЫВНЫМИ СТАНАМИ
С КОНТРОЛИРУЕМО-ПЕРЕМЕЩАЕМОЙ ОПРАВКОЙ**

Специальность 2.6.4 – «Обработка металлов давлением»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант

проф., д.т.н.

А.В. Выдрин

Челябинск – 2023

Содержание

| | Стр. |
|---|------|
| Введение..... | 6 |
| Глава 1. Производство труб на ТПА с современными непрерывными раскатными станами (обзор научно-технической литературы)..... | 14 |
| 1.1 Анализ современных способов производства бесшовных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали..... | 14 |
| 1.1.1 Исходные заготовки для производства бесшовных труб специального назначения..... | 17 |
| 1.1.2 Современные способы прошивки исходных заготовок..... | 25 |
| 1.1.3 Анализ процессов раскатки труб в черновую трубу..... | 38 |
| 1.2 Состояние исследования ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой..... | 45 |
| Глава 2. Прогнозирование пластических и прочностных свойств нержавеющей марки стали при прокатке бесшовных горячедеформированных труб..... | 55 |
| 2.1 Методика прогнозирования пластичности металлов и сплавов при производстве горячедеформированных бесшовных труб | 55 |
| 2.2 Определение пластичности в опытах на растяжение, кручение и осадку с использованием испытательного комплекса Gleeble 3800.... | 59 |
| 2.3 Построение диаграмм пластичности марки стали 08X18H10T ... | 96 |
| 2.4 Методика прогнозирования прочностных свойств металлов и сплавов в процессах непрерывного деформирования..... | 105 |
| 2.5 Определение прочностных свойств марки стали 08X18H10T ... | 108 |
| 2.6 Исследование трансформации свойств нержавеющей марки стали 08X18H10T в линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой | 118 |
| Глава 3. Исследование трибологических свойств дезоксидантов и графитовых смазок, используемых для прокатки нержавеющей марки | 132 |

| | |
|---|-----|
| стали на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой..... | |
| 3.1 Требования к смазочно-дезоксирующему материалу и оборудование для его эффективной подачи в гильзу в линиях ТПА..... | 132 |
| 3.2 Требования к графитовым смазкам и оборудование для их эффективного нанесения на контролируемо-перемещаемую оправку с целью обеспечения ее износостойкости..... | 148 |
| 3.3. Исследование влияния смазочно-дезоксирующих материалов на коэффициент трения..... | 159 |
| Глава 4. Подготовка непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марки стали мартенситного и аустенитного класса к прокатке на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой..... | 186 |
| 4.1 Подготовка к прокатке непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марки стали мартенситного класса..... | 186 |
| 4.2 Подготовка к прокатке непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марки стали аустенитного класса..... | 194 |
| Глава 5. Исследование процесса прошивки заготовок из нержавеющей марки стали в стане винтовой прокатки..... | 196 |
| 5.1 Компьютерное моделирование технологического процесса прошивки при производстве бесшовных труб из нержавеющей марки стали..... | 196 |
| 5.2 Лабораторное моделирование процесса прошивки заготовок из нержавеющей марки стали в стане винтовой прокатки..... | 214 |
| 5.3 Повышение износостойкости оправок прошивного стана при прокатке бесшовных труб из нержавеющей марки стали..... | 235 |

| | |
|---|-----|
| Глава 6. Исследование процесса раскатки гильз из нержавеющей марки стали в непрерывном стане с контролируемо-перемещаемой оправкой..... | 241 |
| 6.1 Компьютерное моделирование технологического процесса раскатки гильз при производстве бесшовных труб из нержавеющей марки стали..... | 241 |
| 6.2 Лабораторное моделирование раскатки гильз из нержавеющей марки стали в непрерывном стане с контролируемо-перемещаемой оправкой..... | 250 |
| 6.3 Математическое моделирование раскатки гильз из нержавеющей марки стали в непрерывных станах с контролируемо-перемещаемой оправкой (геометрические, кинематические и энергосиловые параметры)..... | 277 |
| 6.4 Компьютерное моделирование формоизменения металла при раскатке гильз из нержавеющей марки стали в непрерывном стане.. | 309 |
| Глава 7. Разработка и внедрение сквозной технологии прокатки непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марки стали на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой... | 346 |
| 7.1 Разработка методики прострелки и обеспечение оси непрерывного стана продольной прокатки..... | 346 |
| 7.2 Обеспечение жесткости непрерывного стана продольной прокатки..... | 348 |
| 7.3 Технология прокатки труб из нержавеющей марки стали мартенситного класса на ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой..... | 351 |
| 7.4 Технология прокатки труб из нержавеющей марки стали аустенитного класса на ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой..... | 351 |

| | |
|---|-----|
| 7.5 Технический и экономический эффект от внедрения сквозной технологии прокатки непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марки стали на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой..... | 354 |
| Основные результаты и выводы..... | 356 |
| Список использованной литературы..... | 359 |
| Приложение 1. Программа освоения технологии прокатки труб из нержавеющей марки стали аустенитного класса в условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ»..... | 376 |
| Приложение 2. Акт о внедрении результатов докторской диссертационной работы в промышленное производство бесшовных труб из труднодеформируемых марок стали на ТПА 159-426 с непрерывным станом и контролируемо-перемещаемой оправкой в ТПЦ-3 АО «ВТЗ»..... | 380 |
| Приложение 3. Акт о внедрении результатов исследований в учебный процесс на кафедре «Процессов и машин обработки металлов давлением» НИУ «ЮУрГУ»..... | 382 |
| Приложение 4. Акт о внедрении результатов исследований в учебный процесс на кафедре «Технологии материалов» «ВолГТУ»..... | 383 |

Введение

Актуальность темы заключается в необходимости импортозамещения труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали, которые ранее закупались только за рубежом. При этом, для обеспечения конкурентного преимущества при освоении новых видов труб, необходимо сокращать производственные издержки при одновременном обеспечении высокого качества. Ярким примером такого импортозамещения является освоение технологии прокатки обсадных труб из коррозионно-стойких марок стали группы 13Cr. Данный вид труб активно применяется для освоения месторождений углеводородов, имеющих высокую температуру при добыче и транспортировке, содержащих высокие концентрации коррозионно-активных компонентов, таких как CO_2 , H_2S , ионы хлора. Подобные агрессивные условия эксплуатации трубной продукции вызывают интенсивную коррозию углеродистых марок стали, получивших наибольшее распространение при производстве труб нефтяного сортамента. Именно поэтому производство труб из коррозионно-стойких марок стали, в том числе нержавеющей марки стали мартенситного класса с содержанием хрома около 13 %, является приоритетной, стратегической задачей.

Изначально трубопрокатные агрегаты (ТПА) с непрерывными станами были предназначены для прокатки продукции из углеродистых и легированных марок стали. Однако, растущие эксплуатационные требования на сложных месторождениях нефти и газа, ставят перед отечественными трубопрокатчиками новые задачи по изготовлению высокотехнологичных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали, изготовление которых ранее считалось возможным только прессованием.

В этой связи требуется проведение всестороннего исследования и разработка теоретических основ для создания и освоения сквозной технологии

изготовления новых видов трубной продукции специального назначения из коррозионно-стойких марок стали с применением прокатки.

Целью диссертационной работы является разработка теоретических основ для создания и освоения сквозной технологии изготовления новых видов трубной продукции специального назначения из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса с применением прокатки на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой.

Основные задачи:

1. Изучение особенностей пластических и прочностных свойств коррозионно-стойкой марки стали аустенитного класса, а также исследование их трансформации на различных переделах в линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой.

2. Определение требований к дезоксиданту и графитовой смазке для обеспечения качества труб из коррозионно-стойких марок стали, а также стойкости контролируемо-перемещаемых оправок. Исследование особенностей влияния температуры, дезоксидирующих материалов и смазок на коэффициент контактного трения при деформировании коррозионно-стойких марок стали аустенитного класса.

3. Разработка технологических схем подготовки непрерывно-литых заготовок из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса к прокатке труб в линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой.

4. Исследование с применением компьютерного моделирования закономерностей формоизменения металла при прошивке заготовок и раскатки гильз; оценка влияния технологических факторов прокатки на качество поверхности и точность геометрических параметров труб из коррозионно-стойких марок стали.

5. Моделирование процессов прошивки заготовок и раскатки гильз из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса на лабораторных станах.

6. Определение условий и факторов, обеспечивающих повышение износостойкости оправок при прошивке коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса.

7. Разработка и внедрение сквозной технологии прокатки труб из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой.

Методы исследований: Теоретические исследования, базируются на закономерностях теории пластичности и теории обработки металлов давлением. Лабораторные и промышленные исследования выполнены с использованием современного оборудования и измерительных приборов, прошедших метрологическую поверку. При проведении исследований использованы методы математического моделирования технологических процессов с применением вычислительной техники и современных программных продуктов, результаты экспериментальных исследований обрабатывались с помощью методов математической статистики.

Личный вклад автора состоит в постановке задач как теоретических, так и лабораторных исследований с целью моделирования изучаемых процессов, а также промышленных экспериментов при освоении новой технологии; в создании теоретических и технологических основ для разработки новой технологии прокатки товарных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой; во внедрении новой технологии в условиях действующих ТПА.

Научная новизна диссертации:

- разработана уникальная методика проведения и обработки результатов исследования пластичности и сопротивления металлов и сплавов пластической деформации с использованием современного испытательного оборудования, позволяющая учитывать влияние истории нагружения при изготовлении бесшовных горячедеформированных труб на ТПА с непрерывными станами, с помощью которой получены новые научно-

обоснованные знания о закономерностях изменения сопротивления пластической деформации коррозионно-стойкой стали аустенитного класса в зависимости от степени деформации, скорости деформации, температуры и истории деформирования;

- впервые обнаружены и теоретически обоснованы закономерности формоизменения металла в процессах прошивки сплошных и полых заготовок, а также раскатки гильз из коррозионно-стойких марок стали аустенитного класса в линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой, с использованием компьютерного моделирования в программной среде QForm 3D, учитывающие особенности контактных взаимодействий с технологическим инструментом;

- впервые определены численные значения коэффициента контактного трения в процессе горячей деформации коррозионно-стойкой стали при наличии на контактных поверхностях дезоксидирующих и смазочных материалов;

- впервые определены закономерности трансформации структуры, пластических и прочностных свойств коррозионно-стойких марок стали применительно к многооперационной и многопроходной схеме производства труб в линии ТПА с непрерывным раскатным станом;

- разработана универсальная математическая модель для расчета энергосиловых параметров процесса горячей раскатки гильз в непрерывном стане с различным количеством валков, образующих калибр, а также алгоритм ее численной реализации.

Достоверность основных положений и выводов в диссертации обеспечивается:

- использованием в теоретических исследованиях основополагающих принципов теории обработки металлов давлением;

- использованием для проведения экспериментальных исследований и компьютерного моделирования общепризнанных методов изучения процессов

обработки металлов давлением, поверенных оборудования и приборов, а также стандартного программного обеспечения;

- согласованностью теоретических и экспериментальных результатов исследования, полученных различными методами; отсутствием противоречий результатов работы известным теоретическим и технологическим закономерностям процессов обработки металлов давлением;

- соответствием теоретических результатов работы и высказанных на их основе практических рекомендаций результатам промышленных экспериментов, проведенных при освоении новой технологии прокатки бесшовных горячедеформированных труб на ТПА с непрерывными станами.

Практическая значимость диссертации определяется:

- разработкой и внедрением новых способов подготовки к прокатке непрерывно-литых заготовок из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса, устраняющих осевую рыхлость (центральную пористость и осевые трещины) и, тем самым, предотвращающих образование дефектов на внутренней поверхности труб;

- разработкой и внедрением новых технологий прокатки труб из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса, обеспечивающих высокое качество внутренней и наружной поверхности, точность геометрических размеров, а также требуемые эксплуатационные свойства для нефтяной и атомной промышленности Российской Федерации;

- повышением износостойкости оправок при прошивке заготовок из коррозионно-стойких марок стали с 3 до 60 проходов, что позволило увеличить производительность участка горячего проката труб более, чем в 2 раза в сравнении с ранее достигнутой;

- сформулированными требованиями к дезоксидирующим и смазочным материалам, обеспечивающими высокое качество внутренней поверхности бесшовных труб из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса.

В результате выполнения комплексного исследования в рамках диссертационной работы решена важная народнохозяйственная проблема импортозамещения труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали. На предприятиях ПАО «ТМК» на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой внедрена новая сквозная технология производства высококачественных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса. Разработанные технические решения, обеспечившие реализацию новой технологии, защищены 10 патентами Российской Федерации и 2 свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ.

На защиту выносятся:

- методика проведения и обработки результатов исследования сопротивления металлов и сплавов пластической деформации, позволяющая учитывать влияние истории нагружения в процессе горячей деформации при изготовлении бесшовных труб на ТПА с непрерывными станами;

- результаты исследования трансформации свойств коррозионно-стойкой марки стали аустенитного класса на различных переделах в линии ТПА с непрерывным станом;

- результаты исследования закономерностей изменения сопротивления пластической деформации коррозионно-стойкой стали аустенитного класса в зависимости от степени и скорости деформации, температуры и истории деформирования при изготовлении бесшовных труб из непрерывно-литой заготовки на ТПА с непрерывными станами;

- результаты исследований свойств применяемых смазочных и дезоксидирующих материалов, их влияния на коэффициент контактного трения, а также значения коэффициентов трения на контакте трубы с валками и на контакте трубы с оправкой при горячей деформации;

- усовершенствованная методика и результаты компьютерного моделирования процессов прошивки непрерывно-литой заготовки и раскатки гильз из коррозионно-стойких марок стали в линии ТПА;

- результаты экспериментального исследования процессов прошивки непрерывно-литых заготовок и раскатки гильз из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса на лабораторных станах;

- математическая модель процесса раскатки гильз в непрерывном стане с контролируемо-перемещаемой оправкой;

- новая технология подготовки к прокатке непрерывно-литых заготовок из коррозионно-стойких марок стали, устраняющая осевую рыхлость (центральную пористость и осевые трещины);

- технические предложения по повышению износостойкости оправок при прошивке непрерывно-литых заготовок из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса;

- новая наукоемкая сквозная технологии изготовления новых видов бесшовных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой.

Апробация работы: Основные результаты и положения диссертации доложены и обсуждены на: XI международном конгрессе прокатчиков (Объединение прокатчиков, Магнитогорск, 2017); XXIII международной научно-практической конференции «ТРУБЫ-2018» (АО «РусНИТИ», Челябинск, 2018); XII международном конгрессе прокатчиков (Объединение прокатчиков, Выкса, 2019); XXIV международной научно-практической конференции «ТРУБЫ-2021» (АО «РусНИТИ», Челябинск, 2021); XV международной конференции «MECHANICS, RESOURCE AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS AND STRUCTURES» (ESIS, Екатеринбург, 2021); XIII международном конгрессе прокатчиков (Объединение прокатчиков, Москва, 2022); 15-ой научной конференции аспирантов и докторантов (ЮУрГУ, Челябинск, 2023); XXV международной научно-практической конференции «ТРУБЫ-2023» (АО «РусНИТИ», Челябинск, 2023) и других конференциях.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 45 печатных работ, в том числе 12 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, 8 в изданиях, входящих в наукометрические базы данных «Scopus» и «Web of Science», 1 монография, 10 патентов РФ и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, основных результатов и выводов, изложена на 383 страницах машинописного текста, включающего 194 рисунка, 62 таблицы, библиографический список из 161 наименования.

Глава 1. Производство труб на ТПА с современными непрерывными раскатными станами (обзор научно-технической литературы)

1.1 Анализ современных способов производства бесшовных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали

Обзор научно-технической литературы показывает, что единственным освоенным на сегодняшний день в промышленном масштабе способом производства товарных бесшовных стальных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали и сплавов является прессование.

К достоинствам этого процесса можно отнести следующее [1, 2]:

- благоприятную схему напряженно-деформированного состояния, позволяющую деформировать малопластичные металлы и сплавы;
- технологическую мобильность прессовых установок, благодаря которой облегчается переход на производство труб другого размера;
- возможность получения на прессовых установках не только труб, но также прутков и полых профилей различного сечения, в том числе биметаллических;
- прессованный материал имеет более высокое качество структуры, обладает более однородными свойствами по сечению и длине изделия и выпускается с достаточно жесткими допусками геометрических размеров.

Процесс производства стальных труб способом прессования появился сравнительно недавно. Первый патент на этот способ был получен братьями Маннесман в 1901 году. Первый механический пресс для производства стальных труб был построен в 1928 году в Германии. В 1931 г. Ф. Зингеру в Германии был выдан патент на способ прессования стальных труб на механических прессах. До 1941 г. в Германии было построено семь механических прессов усилием от 6 до 15 МН.

Однако массовое применение процесса прессования для производства стальных бесшовных труб в промышленных масштабах началось только со второй половины XX столетия. Во многом это произошло благодаря разработке и освоению французской фирмой «Comptoir d'Etirage» (директор – Жак Сежурне) производства стеклянных смазок, обеспечивших существенное улучшение условий контактного взаимодействия деформируемого металла и технологического инструмента.

В Российской Федерации процесс производства труб на прессах начал применяться в конце 80-х годов прошлого века на Волжском трубном заводе (АО «ВТЗ»).

Опыт эксплуатации прессовых линий усилием 20 МН и 55 МН в АО «ВТЗ» выявил ряд недостатков процесса, проявляющихся в первую очередь при прессовании бесшовных труб из коррозионно-стойких высоколегированных марок стали и сплавов. К ним относится появление дефектов на наружной и внутренней поверхностях труб.

Методом горячего прессования производят в основном продукцию из высоколегированных марок стали и сплавов, что налагает свой отпечаток на виды наиболее часто встречающихся дефектов нарушения сплошности, связанных с низкой пластичностью металла [2, 3, 4].

Многообразие дефектов горячепрессованных труб отражено в целом ряде научно-исследовательских изданий [5–9], наиболее полным и комплексным из которых является справочное издание [9], подготовленное в соавторстве специалистами ЦНИИчермет им И.П. Бардина и ВНИТИ им Я.Е. Осады на основе систематизации большого объема практической информации, полученной при производстве прессованных изделий в условиях Никопольского южнотрубного завода, Череповецкого сталепрокатного завода, завода «Электросталь».

При прессовании труб металл наружных слоев течет внутрь заготовки, при этом на границе интенсивного скольжения металла может образовываться расслоение стенки. Расслоению стенки, появлению рисок на поверхности

способствуют также попадание окалины, прилипание смазки к поверхности инструмента, твердые включения в смазке и т.п. Поверхностные дефекты в виде борозд, рисков, забоин могут быть вызваны износом или разрушением рабочего инструмента, а рябизна и складки – толстым слоем смазки [8].

За последние 30 лет в мировом трубном производстве произошли серьезные изменения, связанные с увеличением доли непрерывно-литой заготовки, используемой для изготовления горячедеформированных, в том числе и горячепрессованных труб.

При прессовании непрерывно-литых заготовок характерными для коррозионно-стойких высоколегированных марок стали (например, 08X18H10T или 12X18H10T) дефектами являются черновины, риски, впрессованные металлические частицы в виде вырывов и внедрений кусочков металла, а также плены [8].

Первые два вида дефектов не связаны с качеством металла и образуются вследствие разрушения стеклошайбы в первоначальный момент деформации (риски), а также скола металла в «мертвой зоне» очага деформации с последующим втягиванием в матрицу и вдавливанием в поверхность трубы (впрессованные частицы). Глубина указанных дефектов в большинстве случаев не превышает 0,6 мм. Дефекты могут быть удалены, причем толщина стенки трубы в месте удаления не превысит допустимое отклонение.

Основным фактором, определяющим возможное появление дефектов сплошности стенки и поверхности горячепрессованных труб, является физическая природа материала, подвергаемого деформации, а именно его структурные особенности (химический состав, наличие легирующих элементов, пластические свойства, наличие предварительной горячей деформации), которые оказывают определяющее воздействие на параметры процесса прессования. Именно эти свойства диктуют выбор термомеханических параметров деформации, особенности подготовки заготовки и отделки труб.

С каждым годом потребность в трубах из коррозионно-стойких высоколегированных марок стали как мартенситного, так и аустенитного классов, становится все больше. Это связано с освоением нефтегазовых месторождений, осложненных содержанием углекислого газа и сероводорода. Последнее свидетельствует о необходимости проведения научно-исследовательской работы, посвященной изучению теоретических основ и поиску альтернативной (прессованию) технологии изготовления товарных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали высокого качества. Ввиду дороговизны стоимости передела технологии прессования, реальной альтернативой могла бы стать прокатка труб на современных агрегатах с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой.

1.1.1 Исходные заготовки для производства бесшовных труб специального назначения

Условия эксплуатации труб и изделий из них, определяют использование большого количества различных марок стали и сплавов. При этом анализ структуры себестоимости горячекатаных труб показывает, что стоимость исходного металла составляет 75–80 % от себестоимости готовых труб [2, 10, 11]. По данным работы [11] затраты на исходный материал составляют примерно 2/3 общих затрат на обработку в прокатном цехе трубопрокатного завода. Этот факт накладывает определенные требования к исходной заготовке. С одной стороны, металл для труб должен быть по возможности более дешевым, с другой – качество этого металла должно быть высоким, обеспечивающим необходимые технологические свойства и высокий выход годного.

Снижение выхода годного происходит, в частности, из-за появления дефектов на бесшовных трубах. Причины образования дефектов могут быть связаны как со сталеплавильным, так и с прокатным производством.

Существуют противоречивые мнения относительно вклада сталеплавильного и прокатного производства в дефектообразование. Согласно одним источникам считается, что в 40 % случаев причинами возникновения дефектов на трубах является низкое качество заготовки, а в 60 % – нарушение технологии прокатки [12]. С другой стороны, исследования причин образования дефектов на трубах при прокатке на отечественных и зарубежных трубопрокатных агрегатах с непрерывным раскатным станом показывают, что 80% дефектов обусловлены качеством исходной заготовки, и только 20% дефектов возникает при прокатке на ТПА [13, 14, 15].

Тем не менее, несмотря на разные мнения, можно отметить, что одним из ключевых факторов, оказывающим влияние на качество получаемых труб является качество заготовки.

В зависимости от способа производства труб, физико-механических свойств металла и технических требований к готовой продукции в качестве исходной заготовки для производства бесшовных труб применяют:

- трубные слитки круглого и многогранного сечения, получаемые разливкой в изложницы;
- полые заготовки, получаемые центробежным литьём с последующей обдиркой и расточкой;
- трубные заготовки, получаемые прокаткой слитков, разливаемых в изложницы;
- заготовки, получаемые ковкой с последующим сверлением и обдиркой;
- непрерывно-литые заготовки (НЛЗ) круглого и квадратного сечения [2, 10-13, 16-18].

Трубные слитки, отливаемые в изложницы, имеют минимальную стоимость. Это естественно, так как в этом случае используемый металл не проходит разливку на машинах непрерывного литья заготовок, прокатку на блюминге и заготовочном стане. При этом следует отметить, что производство

катаного металла больших сечений также связано со значительными трудностями [2, 10].

Тем не менее, наиболее экономичным для производства бесшовных труб является использование в качестве исходных заготовок, как трубных слитков, так и НЛЗ [19, 20]. При этом непосредственно из слитков трубы изготавливаются только на трубопрокатных агрегатах с пилигримовым станом, так как он обеспечивает наилучшую прорабатываемость литой структуры металла.

В то же время, более дорогие кованные и катаные заготовки не имеют дефектов, присущих слиткам, обладают более точными размерами и чистой поверхностью, что в конечном итоге позволяет изготовить трубы лучшего качества. При этом для получения горячедеформированных труб высокого качества, деформированные круглые заготовки, получаемые прокаткой, прессованием или ковкой, должны отвечать определенным требованиям по состоянию поверхности, колебанию размеров, макро- и микроструктуре [21]. В зависимости от способа производства применяют заготовки разных размеров, удовлетворяющих разным техническим условиям [22].

Центробежная отливка гильз применяется в основном для изготовления труб из высоколегированных марок стали и сплавов, прошивка которых на прошивных станах затруднена. Наружный диаметр гильз достигает 1 м, толщина стенки до 250 мм.

К преимуществам центробежной отливки гильз относятся:

- возможность производства бесшовных труб из коррозионно-стойких марок стали и сплавов (нержавеющих, жаропрочных и т.д.);

- получение металла повышенной чистоты с необходимыми механическими свойствами и заданной структурой, получаемой в результате того, что при центробежной отливке гильз под действием центробежных сил неметаллические включения вытесняются на внутреннюю поверхность гильзы, а металл получает мелкозернистое строение;

– исключается разливка стали в слитки, нагрев слитков перед прокаткой и прокатка в трубную заготовку, а также нагрев перед прошивкой и прошивка в гильзу на прошивном стане.

Основными недостатками центробежной отливке являются:

– разбрызгивание металла в начале вращения изложницы, ведущее к окислению брызг, падающих в жидкий металл и нарушающих кристаллизацию металла;

– образование трещин в гильзе при большой скорости вращения и при увеличении размеров изложницы вследствие расширения от нагрева;

- высокая стоимость центробежной отливки, сопоставимая со стоимостью горячедеформированной трубы.

Полученные центробежной отливкой гильзы подвергаются обдирке внутренней и наружной поверхностей на 10–15 %. Причем, если в определенных случаях наружную поверхность можно не обтачивать, то для внутренней поверхности эта операция является обязательной [13, 16, 22].

Важным направлением улучшения качества трубной заготовки является внедрение непрерывной разливки стали. Появление непрерывно-литой трубной заготовки (НЛЗ) обусловило полную или частичную замену катаной и ковальной заготовок.

Использование непрерывно-литой заготовки для производства бесшовных труб долго сдерживалось наличием характерных дефектов (ликваций и несплошностей в центральной части и на поверхности заготовки, трещин и т.д.), что не обеспечивало получение качественных труб. Однако высокая экономическая эффективность использования непрерывно-литых заготовок стимулировала проведение работ по развитию и совершенствованию технологии их производства, разработку и создание новых процессов, технологий и трубопрокатного оборудования, обеспечивающих получение труб высокого качества.

Впервые в мире применение НЛЗ было реализовано в СССР в 1957 г. При этом партия заготовок диаметром 280 мм, отлитая на экспериментальной

машине полунепрерывного литья в ЦНИИЧермет была прокатана на пилигримовом и автомат-станах Нижнеднепровского трубопрокатного завода. Анализ качества полученных нефтепроводных труб показал перспективность и целесообразность применения непрерывно-литого металла для производства труб [23].

Широкое применение непрерывной разливки стали обусловлено рядом существенных преимуществ перед способом разливки в изложницы: уменьшение капитальных затрат за счет отсутствия обжимных станов и отделения нагревательных колодцев; повышение производительности на 15–25 %; улучшение качества непрерывных слитков и структуры металла; увеличение выхода годного на 10–15%; возможность получения широкого диапазона сечений заготовок; возможность осуществления комплексной механизации и полной автоматизации процесса разливки; снижение себестоимости получаемых заготовок; улучшение условий труда и окружающей среды; сокращение энергетических расходов и др. [11,12, 14, 15, 23-26]. В настоящее время непрерывно-литые заготовки применяются практически на всех типах трубопрокатных агрегатов: с непрерывными, трехвалковыми, автоматическими, речными, пилигримовыми станами, а также для трубопрессовых установок [27].

Размеры непрерывно-литых заготовок, используемых для производства труб, изменяются в широких пределах. Для непрерывно-литых заготовок круглого сечения предельные значения диаметра составляют 156–450 мм, для заготовок квадратного сечения сторона квадрата может изменяться от 180 до 360 мм.

Выбор формы и размеров поперечного сечения заготовки, количества ее типоразмеров влияют на технологические решения как сталеплавильного, так и трубопрокатного цеха. С точки зрения технологии разливки максимальная производительность МНЛЗ, обеспечивающая надлежащее качество заготовки достигается при отливке круга диаметром 220 мм (или квадрата со стороной 220 мм). При этом вследствие разницы в величине поперечного сечения

квадратной и круглой заготовки производительность при выпуске квадратных заготовок будет выше, чем круглых приблизительно на 20 % [27]. Вместе с тем преимущества круглой формы поперечного сечения заготовки заключаются в более равномерном отводе тепла и равномерном затвердевании по периметру заготовок [28]. С другой стороны, НЛЗ круглого сечения сохраняют форму при высоком ферростатическом давлении. При отливке НЛЗ квадратного сечения для получения полой гильзы применяют процесс пресс-валковой прошивки с последующим элонгированием на стане винтовой прокатки [20]. Этот процесс является малопродуктивным, поэтому в настоящее время для получения трубной заготовки используются в основном кристаллизаторы с круглым поперечным сечением. Кроме того, большинство МНЛЗ для производства квадратной непрерывно-литой трубной заготовки реконструированы под производство круглой заготовки.

При выборе количества типоразмеров отливаемых заготовок важное значение имеет сложность перестройки оборудования при переходе с размера на размер. С точки зрения сталеплавильного производства наиболее эффективным является получение одного-двух размеров заготовки для обеспечения всей производственной программы. При этом, даже несмотря на то, что использование одного-двух размеров заготовки не всегда является оптимальным для процесса производства труб, увеличение числа размеров заготовки экономически нецелесообразно.

Наиболее характерными дефектами, связанными с особенностями формирования сплошных непрерывно-литых круглых слитков, являются: овальность профиля поперечного сечения, продольные «горячие» трещины на поверхности слитка, продольные ужимы, внутренние радиальные трещины, а также дефекты затвердевания: пористость и ликвация, осевые паукообразные трещины в сплошном слитке [14, 23, 25, 29].

Одним из вариантов получения надлежащего качества металла исходной НЛЗ является предварительная прокатка непрерывно-литых заготовок. Подобная операция также производится в случае необходимости изменения

формы поперечного сечения прямоугольной или квадратной непрерывно-литой заготовки в круглую, необходимого типоразмера для возможности её прошивки в гильзу на станах винтовой прокатки [14]. Впервые в РФ производство труб из НЛЗ и предварительно обжатой заготовки было освоено на АО «ВТЗ» [30-34].

При производстве труб из непрерывно-литых заготовок для достижения требуемого комплекса свойств необходима достаточная проработка структуры при последующих операциях. Проведенные исследования [35] показывают, что при производстве труб на ТПА 50-200 АО «ВТЗ» полной проработки структуры можно добиться при общей вытяжке более 10. Такие же результаты получены и при изготовлении труб как способами прессования, так и прокатки на ТПА 159-426 с непрерывным станом. Исследования макроструктуры металла труб, изготовленных с коэффициентом вытяжки менее 10, выявили зону с остатками литой структуры в виде измельченных и разориентированных дендритов в средних по толщине труб слоях, причем ближе к внутренней поверхности. Она располагалась локально или по всему периметру труб. Трубы с указанной структурой характеризуются низким уровнем прочностных свойств и повышенной склонностью к механическому старению. Поэтому для получения однородной структуры и соответственно требуемого уровня эксплуатационных свойств такие трубы должны подвергаться нормализации с отдельного нагрева. При этом установлено, что степень развития зоны с остатками литой структуры зависит не только от коэффициента вытяжки, но и от качества макроструктуры исходной непрерывно-литой заготовки – размеров структурных зерен и их дисперсности.

На качество внутренней поверхности гильз и впоследствии труб существенное влияние оказывают дефекты макроструктуры (осевая рыхлость, V-образная ликвация) и их ориентация относительно оси заготовки [23]. В случае расположения рыхлости по оси заготовки металл сохраняет свою сплошность при прошивке перед носком оправки. В этом случае

продеформированный металл имеет однородную плотную структуру и дефекты на внутренней поверхности гильзы отсутствуют. Вместе с тем при деформации заготовок с центральной пористостью и усадочной рыхлостью вскрытие полости наблюдалось, начиная с деформации 2–3 %. Небольшая величина критической деформации свидетельствует о повышенной чувствительности литой структуры металла к знакопеременным нагрузкам в отличие от катаного, вскрытие полости у которого происходит при деформации 8–12 %.

На основании анализа научно-технической литературы, а также опыта производства труб из непрерывно-литых заготовок на различных трубопрокатных станах, можно сделать вывод о том, что величина минимальной общей деформации, гарантирующей полную проработку литой структуры, в значительной степени зависит от качества макроструктуры исходной непрерывно-литой заготовки, схемы построения технологического процесса и режимов его реализации. Для большинства случаев данный показатель можно установить на уровне суммарного коэффициента вытяжки не менее 10.

Исследованиями, проведенными на ТПА 140 с автоматическим станом и ТПА 80 с непрерывным станом в условиях ОАО «Днепропетровский трубный завод» [15, 23], отмечено, что независимо от степени деформации, макро- и микроструктура труб, полученных из непрерывно-литых заготовок, аналогична структуре труб, изготовленных из деформированной заготовки. Механические свойства уже при суммарном коэффициенте вытяжки свыше 1,8 (степень деформации 44,5 %) достигают требований ГОСТ 8731.

Применение качественной и дешевой заготовки в виде слитка непрерывной разливки является важным фактором конкурентоспособности бесшовных труб на мировом рынке. Технология современной выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки позволяет с высоким уровнем выхода годного (96–98 %) разливать широкий сортамент марок стали для производства труб [15, 16, 23].

1.1.2 Современные способы прошивки исходных заготовок

Технологическая операция прошивки является первой и определяющей стадией деформации в процессе превращения исходной заготовки в готовую трубу. Поэтому к получаемой после прошивки гильзе предъявляется ряд требований, касающихся точности размеров и состояния поверхности. Для того, чтобы бесшовная труба могла успешно конкурировать со сварными трубами, современные трубопрокатные агрегаты должны обеспечивать выпуск труб с допусками, близкими к допускам на сварные и холоднодеформированные трубы. При этом многочисленные исследования показывают, что наибольшее влияние на точность размеров готовых труб оказывает точность геометрических размеров гильзы [11, 27]. Практически ни один из раскатных станов, за исключением станов с 3-валковыми калибрами, не может уменьшить относительную разностенность, полученную на прошивном стане. В связи с этим, в технологии производства горячекатаных труб необходимо уделять большое внимание технологии прошивки и станам, обеспечивающим получение полой гильзы из сплошной или полой заготовки.

При освоении применения для производства труб непрерывно-литой заготовки первоначально была освоена разливка заготовки с квадратной формой поперечного сечения. Для прошивки такой заготовки специально были созданы пресс-валковые прошивные станы. Стан пресс-валковой прошивки представляет собой прокатную клеть с двумя валками с нарезанными круглыми калибрами. Непрерывно-литая заготовка подается через зазор между этими валками и одновременно прошивается с помощью иглы, установленной с выходной стороны стана (рисунок 1.1). В результате получается круглая гильза с круглым отверстием и сплошным задним торцом (стакан).

Технология пресс-валковой прошивки была разработана в 70-х годах двадцатого столетия итальянскими фирмами INNSE и «Dalmine» при технических консультациях технологического бюро «Calmes».

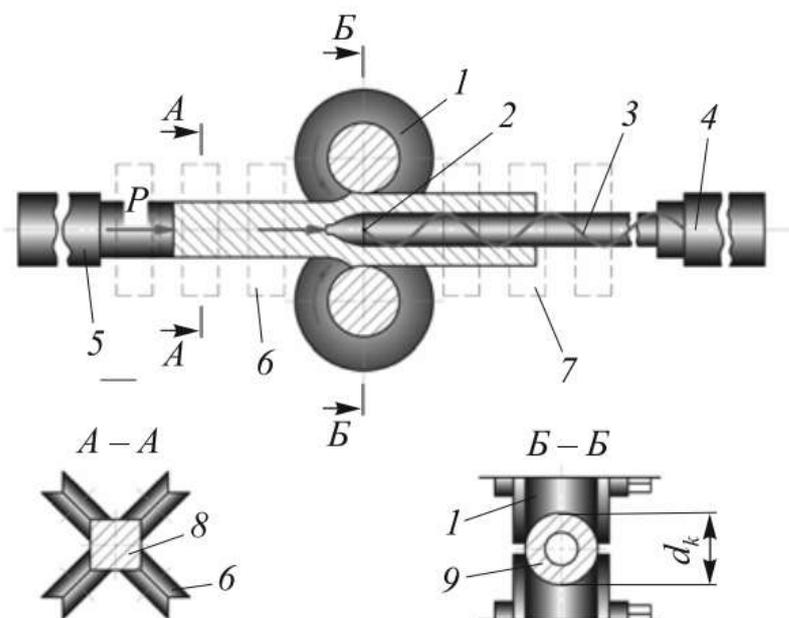


Рисунок 1.1 – Схема пресс-валковой прошивки: 1 – валковая клетка; 2 – оправка; 3 – стержень; 4 – упорно-регулирующий механизм; 5 – вталкиватель заготовки; 6 – роликовые проводки; 7 – центрователь стержня оправки и гильзы; 8 – заготовка; 9 – гильза (труба)

Процесс пресс-валковой прошивки обладает определенными преимуществами, к которым относятся:

- использование при производстве бесшовных труб более дешевой квадратной непрерывно-литой заготовки;
- применение заготовки большой длины и массы;
- наличие заполняющей прошивки, характеризующейся схемой всестороннего сжатия заготовки, что позволяет получить высокое качество внутренней поверхности изделий, а также осуществлять деформацию марок стали с низкими пластическими свойствами;
- возможность получения гильз с хорошим качеством наружной поверхности.

Пресс-валковый стан является, в определенной степени, универсальным агрегатом и может быть установлен перед непрерывным, пилигримовым,

реечным, автоматическим и трехвалковым раскатным станами, а также, в определенных условиях, перед экструзионным прессом [17].

К числу основных недостатков рассматриваемого процесса относятся:

- повышенная поперечная разностенность стаканов (20–30 %). При пресс-валковой прошивке трудно обеспечить минимальную разностенность стакана поэтому необходимым условием применения станов пресс-валковой прошивки является установка за ними одного, а иногда и двух раскатных станов винтовой прокатки (стана-элонгатора), для обеспечения требуемой суммарной вытяжки;

- узкий диапазон изменения регулирующих параметров, обеспечивающих устойчивое течение процесса;

- небольшая степень деформации (коэффициент вытяжки $\mu \leq 1,2$). На станах пресс-валковой прошивки реально получают толстостенные стаканы с отношением D/S равным 4–5 [13, 16, 17, 20, 36].

В результате проведенных за рубежом экспериментальных исследований было установлено, что в процессе пресс-валковой прошивки пластическое течение металла направлено не только вдоль оси заготовки, но и в поперечном сечении.

Поскольку деформация металла при прошивке квадратной заготовки в круглом калибре наиболее интенсивна для внутренних слоев, происходит интенсивная проработка осевой зоны. Это обеспечивает существенное снижение количества дефектов (трещин, плен) на внутренней поверхности [13, 16, 17, 36]. В работе [36] также отмечено, что даже при малых вытяжках ($\mu = 1,1$) уплотнение центральной части заготовки оказывается таким же эффективным, как и при традиционных методах обработки металлов давлением (при прокатке и ковке) с большими степенями вытяжки ($\mu \geq 5,0$), достигаемыми на более мощном оборудовании или требующими большего времени. Наименьшая поперечная разностенность наблюдается при коэффициенте вытяжки μ равном 1,2–1,4. Гильзы, полученные на этом стане, имеют овальность менее 15 %.

Пресс-валковая прошивка была внедрена на трубопрокатных агрегатах в Японии на заводе фирмы "Син ниппон сэйтэцу" в Явате (1977 г.), в Испании на заводе фирмы "Tubos Rennidos" (1976 г.), в Италии на заводе фирмы "Dalmine" в Бергамо (1979 г.), на заводе фирмы "United States Steel" в Ферфилде (США) [16, 36].

В 1990 г. итальянской фирмой "Италимпьянти" на Волжском трубном заводе был введен в эксплуатацию ТПА 159-426 с непрерывным станом для производства труб из непрерывно-литой заготовки квадратного сечения и пресс-валковой прошивкой. Двухвалковый стан пресс-валковой прошивки имел диаметр валков 1430 мм (мощность привода каждого валка 1100 кВт) и был снабжен реечно-зубчатым механизмом, который приводит в движение толкатель заготовок и контролирует ход стержня оправки прошивного стана [10, 13, 16, 20].

В то же время следует отметить, что в силу отмеченных выше недостатков и в связи с освоением непрерывной разливки заготовки с круглой формой поперечного сечения, станы пресс-валковой прошивки по всему миру демонтируются.

В современных условиях наибольшее распространение находит валковая прошивка, которая может осуществляться на станах винтовой прокатки как с двумя, так и с тремя рабочими валками. Сравнительный анализ двух- и трех-валковой схем прошивки в станах винтовой прокатки показывает предпочтительность двухвалковой схемы с точки зрения возможности получения гильз с меньшей разнотолщинностью стенки. В двухвалковых станах схема напряженно-деформированного состояния обеспечивает лучшее центрирование оправки при прошивке. Кроме того, прошивные станы с двумя валками как правило дешевле.

Неоспоримым преимуществом прошивки в двухвалковом стане является высокая точность гильз – разнотолщинность стенки, как правило, меньше в 2–3 раза, чем при прессовании [37]. Разнотолщинность стенки гильз при прошивке в двухвалковых станах винтовой прокатки или сохраняется

практически постоянной по всей длине или даже несколько уменьшается к заднему концу. Характерная для гильз, полученных винтовой прошивкой, волнистость в пределах 0,4–1,0 мм обычно не является препятствием для последующих технологических операций обработки давлением. Однако имеется возможность снижения волнистости до 0,2–0,3 мм и менее за счет совершенствования калибровок инструмента: рабочих валков, оправки и направляющего инструмента.

В станах винтовой прокатки рабочим инструментом являются валки, оправки и направляющий инструмент (линейки, диски, ролики).

Двухвалковые прошивные станы могут различаться в зависимости от формы технологического инструмента. Валки, в частности, могут быть чашевидной, бочковидной и грибовидной формы (рисунок 1.2). В зависимости от формы валков изменяется кинематика течения металла в очаге деформации. В случае применения валков чашевидной формы (рисунок 1.3-в) окружная скорость вращения валка уменьшается по мере передвижения металла в осевом направлении, соответственно уменьшается и продольная составляющая вектора скорости валка. В результате силы трения на контакте с валком направлены противоположно направлению течения металла, создают сопротивление этому течению, а также повышенные сжимающие напряжения в очаге деформации. Наличие сжимающих напряжений создает благоприятные условия для прошивки малопластичных металлов и сплавов, однако повышенное сопротивление течению металла ограничивает степень деформации и приводит к повышенным затратам энергии. Поэтому на современных прошивных станах как правило применяют бочковидные (рисунок 1.3-а) или грибовидные (рисунок 1.3-б) валки.

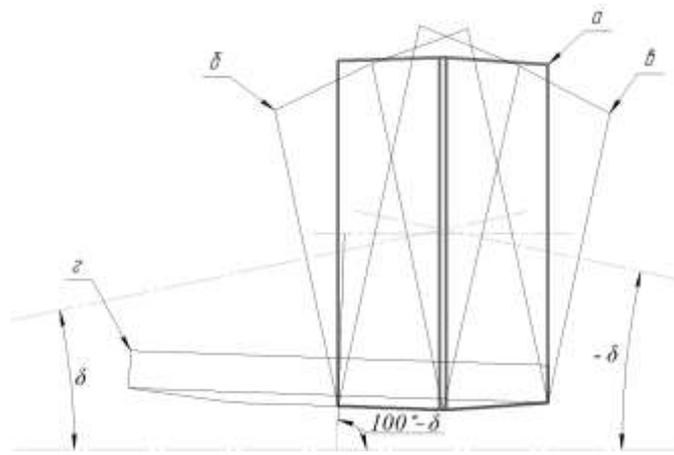
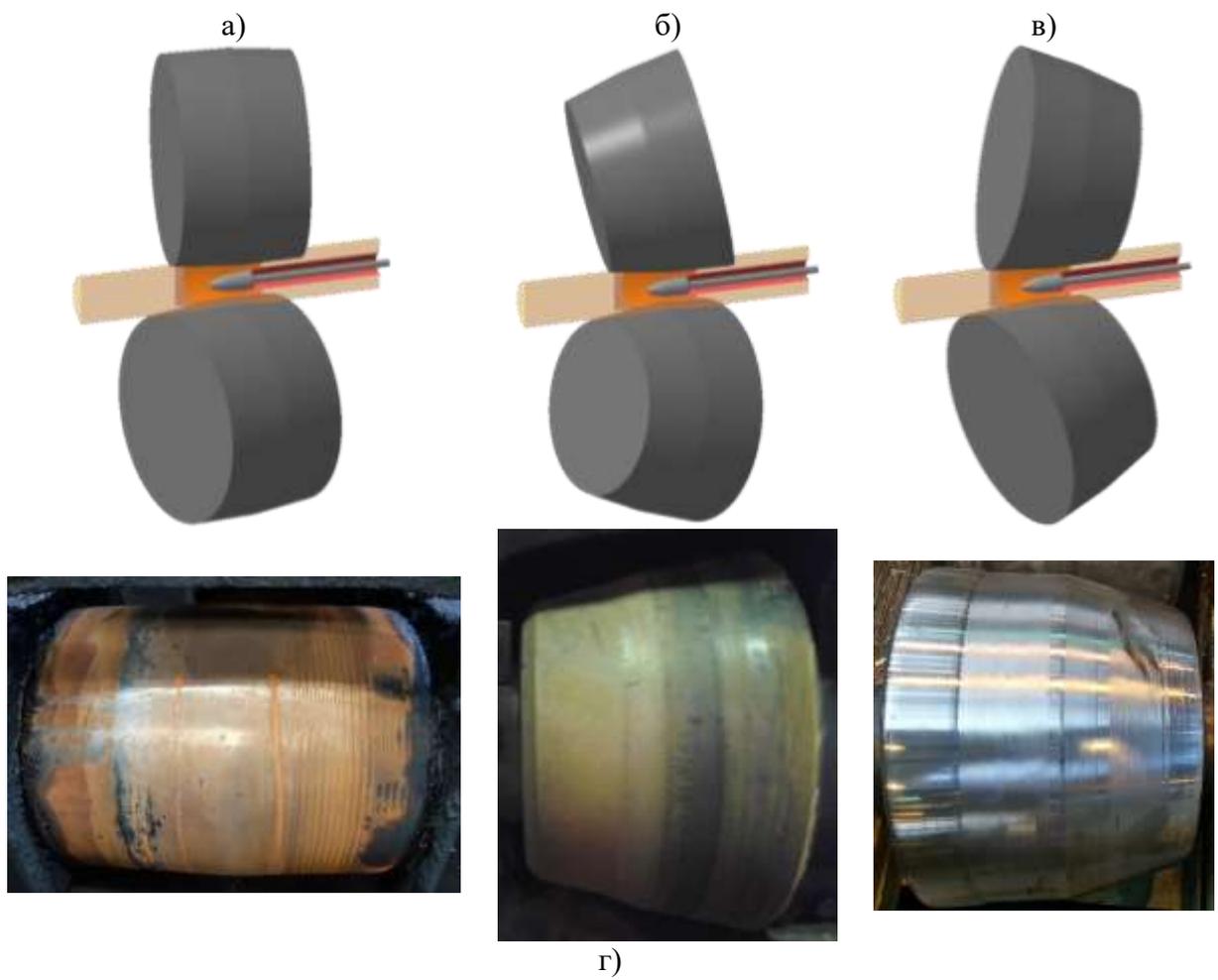


Рисунок 1.2 – Типы валков, применяемые при винтовой прокатке: а – бочковидные, б – грибовидные, в – чашевидные, г – дисковые



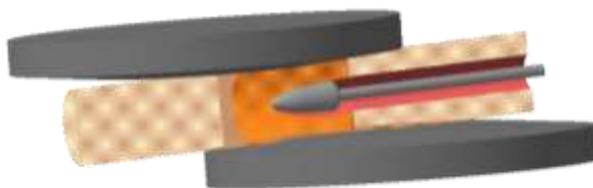


Рисунок 1.3 – Схемы очагов деформации прошивного стана с валками различного типа: а – бочковидными, б – грибовидными, в – чашевидными; г – дисковыми

В работах [38, 39] отмечено, что при бочковидной форме рабочих валков окружные и осевые составляющие скорости деформируемого металла не соответствуют скоростям контактирующих точек поверхности валков. Это наряду с неравномерностью деформации в поперечном сечении заготовки увеличивает склонность к скручиванию, приводит к дополнительному увеличению сдвиговых деформаций и разрушениям на внутренней поверхности гильз.

В работе [40] в ходе исследования влияния конструктивной схемы прошивного стана на получаемые параметры циклического формоизменения авторы приходят к выводу, что для грибовидных станов частное обжатие больше, а ширина контактной поверхности меньше, чем на чашевидных и время деформации, соответственно, меньше. В результате этого интенсивность скоростей деформации сдвига выше на грибовидных станах, и общая накопленная степень деформации сдвига также выше. С увеличением отношения диаметра заготовки к диаметру гильзы и отношения диаметра гильзы к толщине стенки гильзы, возрастает число циклов и накопленная степень деформации сдвига, что может вызвать появление дефектов в наружной поверхности. С точки зрения проработки литой структуры заготовок более предпочтительны станы с грибовидными валками. При этом рекомендуется вести процесс прошивки заготовок в тонкостенные гильзы с «подъемом» по диаметру. Проведенные исследования хорошо согласуются с данными работ [40-47].

Сравнительный анализ процесса прошивки с использованием бочковидных и грибовидных валков представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение грибовидной и бочковидной формы валков

| № | Показатель | Грибовидные валки | Бочковидные валки |
|---|--|---|--|
| 1 | Скручивание заготовки во время прошивки | Скручивание заготовки происходит в одну сторону, что может привести к появлению поверхностных дефектов | Скручивание заготовки происходит до пережима в одну сторону, после пережима в другую сторону, тем самым гильза выходит с незначительным скручиванием |
| 2 | Условие первичного захвата | Небольшой диаметр валка в зоне захвата относительно диаметра валка в пережиме приводит к ухудшению условий захвата заготовки | Разница между диаметром валка в зоне захвата и в зоне пережима незначительна |
| 3 | Унификация подшипниковых узлов | Отсутствует возможность замены подшипников с входной стороны подшипниками выходной стороны валка и наоборот | Подшипники одинаковые на входной и выходной стороне валка |
| 4 | Скоростные условия | Окружная скорость валков заметно повышается в конусе прошивки, что может привести к уменьшению коэффициента трения. В результате первичный захват заготовки становится неустойчивым. Одновременно растет опасность отсутствия вторичного захвата и невозможности осуществления прошивки | Окружная скорость валков незначительно повышается в конусе прошивки, что не приводит к заметному уменьшению коэффициента трения. |
| 5 | Расположение главного привода прошивного стана | Возможно только с выходной стороны стана | Возможно с входной и выходной стороны валков |

Прошивные станы могут также отличаться формой удерживающего инструмента, в качестве которого могут быть линейки, ролики и диски (рисунок 1.4).

Авторы работ [16, 48, 49], определяя влияние на процесс прошивки заготовок направляющего инструмента различных видов, отмечают, что наиболее благоприятные условия наблюдаются в станах с дисками, наихудшие

– в прошивных станах с роликами. Причиной этого, в первую очередь, являются условия трения на контакте металла с направляющим инструментом. Так ролики способствуют поперечной раскатке, диски, напротив, ограничивают истечение металла в тангенциальном направлении, обеспечивая развитие продольной деформации. В результате появляется возможность увеличить длину получаемых гильз до 5 м как из катаной, так и из непрерывнолитой заготовки круглого сечения без предварительного обжатия.

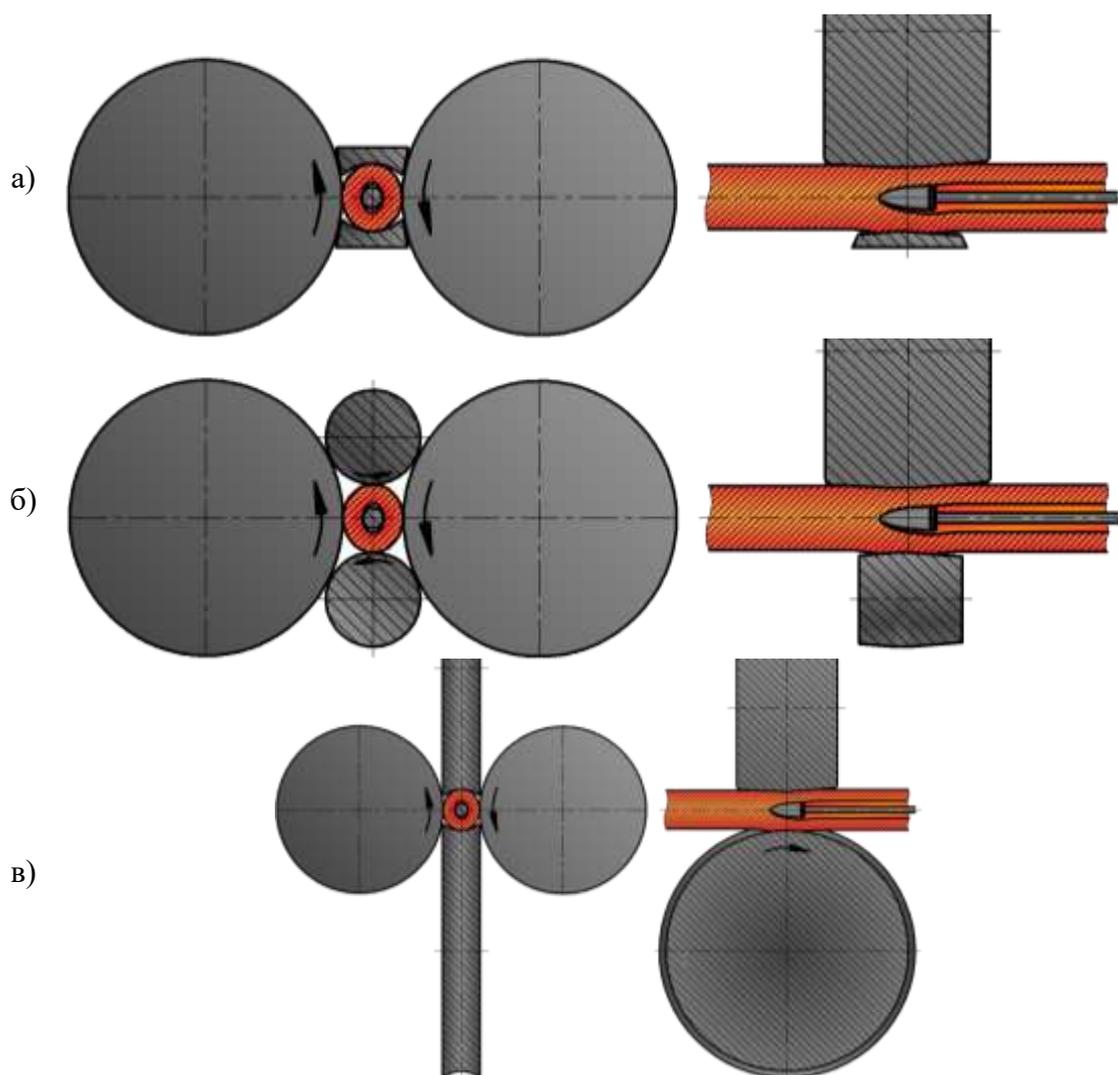


Рисунок 1.4 – Схемы очагов деформации прошивного стана с различными видами направляющего инструмента: а – неподвижные линейки; б – не приводные ролики; в – приводные диски Дишера

а)

б)

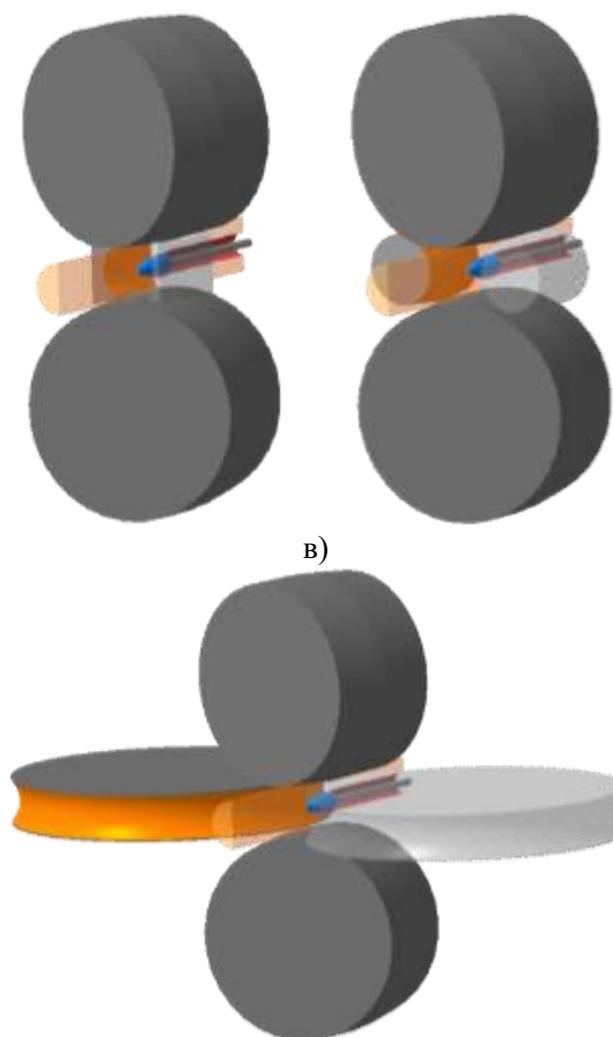


Рисунок 1.5 – Трехмерные модели очагов деформации прошивного стана с различными видами направляющего инструмента: а – линейками; б – роликами; в – дисками

Авторы работы [50] в ходе сравнительных исследований процесса прошивки заготовок с использованием линейек и дисков отмечают, что уровень значения шагов винтовой линии при прокатке с направляющими дисками на 5–10 % больше, чем с линейками, соответственно выше и значения коэффициента осевого скольжения. В работе установлено, что оптимальные значения коэффициента овализации: для дисков близки к 1,0 (1,05–1,07), в результате обеспечивается повышение точности прокатываемых гильз, в десятки раз повышается стойкость направляющего инструмента (на заводе компании «Kawasaki Steel» было отмечено, что стойкость направляющих

дисков в 100 раз больше стойкости линейек [38]), повышается качество наружной поверхности гильз. По сравнению с направляющими линейками диски улучшают процесс прошивки заготовок (по значению критических обжати) примерно на 20 %, что соответствует увеличению угла подачи на 4–5°.

В тоже время прошивные станы с направляющим инструментом в виде дисков Дишера более сложны в изготовлении и требуют значительно большего времени для замены дисков [36]. Сами диски имеют большие размеры (для обеспечения протяженности очага деформации, идентичного очагу деформации с линейками, диаметр диска необходимо выбирать равным 8–12 диаметрам заготовки), в связи с чем затруднены операции ремонта дисков, обработки их поверхности. К тому же диски по сравнению с линейками имеют гораздо большую стоимость.

Сравнительный анализ удерживающего инструмента различной формы представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Сравнение направляющих дисков и линейек

| № | Показатель | Диски | Линейки |
|---|---------------------------------------|---|--|
| 1 | Степень закрытости очага деформации | Степень закрытости очага деформации обусловлена диаметром диска и его толщиной | Существует широкая возможность изменения конфигурации профиля линейки, обеспечивая полное закрытие очага деформации |
| 2 | Стоимость инструмента | Высокая | Относительно стоимости дисков – низкая |
| 3 | Ресурс работы (стойкость) инструмента | Высокий ресурс работы инструмента за счет смены поверхности контакта. Количество переточек достигает 10 раз. Средний ресурс дисков до переточки составляет от 6000 до 9000 т ¹ | Низкий ресурс работы. Ресурс работы обусловлен материалом инструмента. Средний ресурс линейек до замены составляет от 1000 до 3000 т ¹ |
| 4 | Технологичность изготовления | Повторяемость профиля желоба диска высокая за счет применения вальцетокарных станков с ЧПУ | Повторяемость профиля желоба линейек при применении литых линейек низкая. Это приводит к тому, что при идентичных настройках прошивного стана геометрические |

| | | | |
|----|---|--|---|
| | | | параметры гильзы могут существенно отличаться |
| 5 | Восстановление инструмента | При помощи наплавочного оборудования, возможно, полностью восстановить диаметр диска | Отсутствует возможность качественного восстановления линеек |
| 6 | Дополнительное оборудование | Требуется дополнительный привод на вращение дисков | Не требуется дополнительного оборудования |
| 7 | Тип расположения валков | Наиболее целесообразно вертикальное расположение валков | Возможно как горизонтальное, так и вертикальное расположение валков |
| 8 | Особенности процесса | За счет подвода дополнительной мощности прошивки через диски, возможно, вести процесс с повышенными обжатиями, без появления внутренних дефектов | Отсутствует возможность снизить эффект вскрытия внутренней полости заготовки при повышенных обжатиях перед носком оправки. При повышенных обжатиях возможно появление внутренних дефектов на гильзе |
| 9 | Конструкция крепления инструмента | Сложная конструкция крепления дисков (необходимо организовать перемещение дисков с приводом для его вращения) | Простая конструкция крепления линеек (на одну линейку необходимо 1 нажимное устройство и 1 уравнивающее устройство) |
| 10 | Время простоев за счет перевалки инструмента | Замена дисков необходима при использовании разных диаметров заготовок и при наличии на них дефектов (сколов и т.п.). Требуется замена инструмента 1 раз в неделю во время планово-предупредительного ремонта | Замена инструмента при кратковременной перевалке (до 30 минут на одну замену). Требуется замена инструмента через каждые 6-12 часов, а также при наличии на них дефектов (сколов и т.п.). |
| 11 | Оборудование для подготовки направляющего инструмента | Станочное оборудование для переточки дисков. Станочное оборудование для восстановления дисков | Не требуется оборудования для подготовки направляющего инструмента |

В целом анализ показывает, что применение дисков Дишера в качестве удерживающего инструмента оправдано при сравнительно коротком участке очага деформации с выходной стороны стана. В наилучшей степени этому условию отвечают прошивные станы с бочковидными валками и станы с грибовидными валками при условии больших углов подачи. Тем не менее на

станах с грибовидными валками более целесообразно в качестве направляющего инструмента использовать линейки.

Аналогично валкам и направляющему инструменту оправки, применяемые на прошивных станах бывают различных типов. Они могут быть разделены по различным признакам, например, по профилю рабочей поверхности: сферические, дуговые, конические (рисунок 1.6-в). Наиболее распространенными среди них являются оправки со сферическим профилем рабочей поверхности (рисунок 1.6-а) [51].

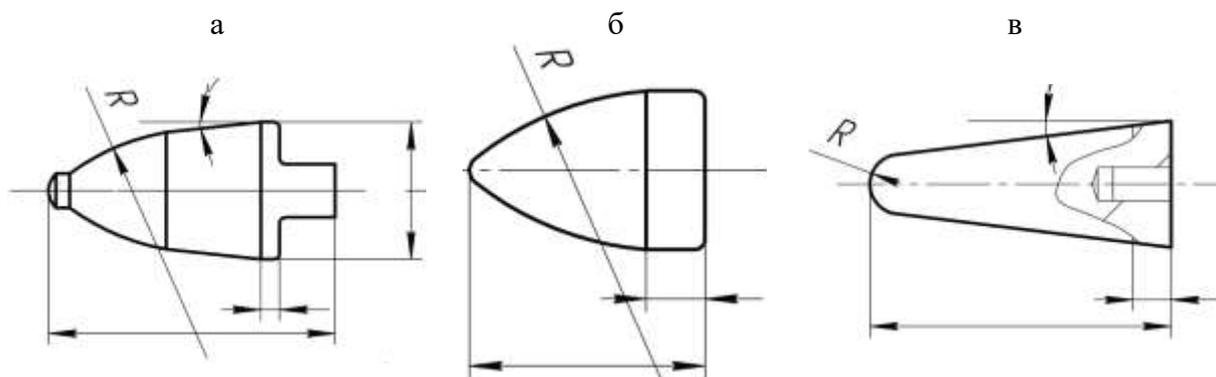


Рисунок 1.6 – Виды оправок прошивного стана с различным профилем:
а – сферическим; б – дуговым; в – коническим

Кроме того, различают водоохлаждаемые оправки и оправки без принудительного охлаждения.

Некоторые характеристики современных прошивных станков приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Сводная таблица параметров процесса прошивки на различных станах

| Завод | Тип валков | Тип удерживающего инструмента | Диаметр заготовки Dз, мм | Диаметр гильзы Dг, мм | Толщина стенки Sг, мм | Коэффициент вытяжки λг | Dг/Sг | Величина подъема*, % |
|-------------|-------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-------|----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| АО «ТАГМЕТ» | Грибовидные | диски Дишера | 210 | 222 | 16 | 3,34 | 13,88 | 5,71 |
| | | | | | 24 | 2,32 | 9,25 | |
| | | | 300 | 303 | 17 | 4,63 | 17,82 | 1 |
| | | | | | 28 | 2,92 | 10,82 | |

| | | | | | | | | |
|---------------------|-------------|--------------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| | | | 300 | 328 | 17 | 4,26 | 19,29 | 9,33 |
| | | | | | 30 | 2,52 | 10,93 | |
| АО «СинТЗ» (Т-2) | Грибовидные | линейки | 120 | 126 | 14 | 2,30 | 9,00 | 5 |
| | | | | | 21 | 1,63 | 6 | |
| | | | 156 | 167 | 10,1 | 3,84 | 16,53 | 11,33 |
| | | | | | 25 | 1,71 | 6,68 | |
| АО «СТЗ» | Грибовидные | линейки | 290 | 328 | 20,55 | 3,33 | 15,96 | 13,1 |
| | | | | | 28,3 | 2,48 | 11,59 | |
| | | | 360 | 433 | 26,9 | 2,97 | 16,10 | 20,28 |
| | | | | | 32,1 | 2,52 | 13,49 | |
| АО «ВТЗ» (ТПЦ-3) | Бочковидные | линейки | 260 | 262 | 25 | 2,85 | 10,48 | 0,77 |
| | | | | | 41 | 1,87 | 6,39 | |
| | | | 340 | 314 | 26 | 3,86 | 12,08 | -7,65 |
| | | | | | 51 | 2,15 | 6,16 | |
| | | | 340 | 323 | 25 | 3,88 | 12,92 | -5 |
| | | | | | 51,5 | 2,07 | 6,27 | |
| | | | 340 | 344 | 28 | 3,27 | 12,29 | 1,18 |
| | | | | | 55 | 1,82 | 6,25 | |
| | | | 410 | 421 | 30,5 | 3,53 | 13,80 | 2,68 |
| | | | | | 56 | 2,06 | 7,52 | |
| | | | 410 | 431 | 32 | 3,29 | 13,47 | 5,12 |
| | | | | | 55 | 2,03 | 7,84 | |
| 410 | 505 | 34 | 2,62 | 14,85 | 23,17 | | | |
| | | 36 | 2,49 | 14,03 | | | | |
| 410 | 500 | 36 | 2,52 | 13,89 | 21,95 | | | |
| | | 51 | 1,84 | 9,80 | | | | |
| ARTROM | Бочковидные | диски Дишера | 177 | 160 | 22 | 2,58 | 7,27 | -5,88 |

1.1.3 Анализ процессов раскатки труб в черновую трубу

Второй основной технологической операцией производства бесшовных труб является получение из полой гильзы черновой трубы. Для осуществления данной операции применяют продольную, периодическую или винтовую прокатку на трубопрокатных раскатных станах различной конструкции, проталкивание стаканов через уменьшающиеся в диаметре калибры с роликовыми обоймами.

Способ раскатки гильзы в трубу характеризует тип трубопрокатного агрегата (ТПА). На практике находят применение трубопрокатные агрегаты с автоматическими (станами тандем), непрерывными, пилигримовыми, раскатными станами винтовой прокатки, реечными и планетарными станами [2, 10, 11, 13, 16-18, 20, 22, 27, 36, 52-58].

Трубопрокатные агрегаты с автоматическим станом получили широкое распространение для производства горячекатаных труб. На таких агрегатах производят свыше 30 % всех горячекатаных труб. На трубопрокатных агрегатах с автоматическими станами для получения из гильзы готовой трубы применяют продольную прокатку в круглом калибре на неподвижной короткой оправке. Деформация металла происходит между стенками калибра и оправкой. Размеры калибра определяют диаметр прокатываемой трубы, а зазор между оправкой и калибром – толщину стенки.

ТПА с автоматическим станом отличаются довольно высокой маневренностью, относительно высокой производительностью при удовлетворительном качестве труб, возможностью изготовления труб широкого сортамента, достаточной простотой прокатного инструмента, гибкостью технологического процесса, возможностью прокатки небольших партий труб. На этих агрегатах прокатывают бесшовные трубы диаметром от 40 до 426 мм с толщиной стенки от 3 до 50 мм.

Недостатками процесса прокатки в круглом калибре на короткой оправке считаются незначительное обжатие по толщине стенки и неудовлетворительное качество внутренней поверхности труб из-за особенностей работы неподвижной оправки (сквозные и поперечные рванины на внутренней поверхности, продольные риски, раковины и отпечатки, «шов» и «бунт», разностенность) [2, 10, 11, 13, 16-18, 36, 58].

На современных ТПА с непрерывным станом производят бесшовные трубы диаметром от 16 до 426 мм с толщиной стенки 2,0–25 мм из углеродистых, низко- и высоколегированных марок стали. На ТПА с непрерывным станом для раскатки гильзы в черновую трубу применяют

продольную непрерывную прокатку в 7–9 клетях с круглыми и овальными калибрами на длинной оправке: плавающей и контролируемо-перемещаемой.

Отличительный признак непрерывной прокатки – одновременная деформация трубы в нескольких последовательно расположенных клетях. Клетки непрерывного стана оказываются взаимосвязанными друг с другом через прокатываемую трубу и оправку. Основное достоинство процесса – возможность прокатки черновых труб значительной длины (до 33 м) с большой скоростью (до 6,5 м/с), что обеспечивает высокую производительность установки. К преимуществам ТПА данного типа следует отнести также благоприятные условия деформации металла в непрерывном стане, минимальные технологические отходы и расположение оборудования, удобное для автоматизации технологических операций.

Недостатками данного процесса производства бесшовных труб являются разностенность, а также различные дефекты на внутренней поверхности труб (внутренние плены, трещины и риски на внутренней поверхности). К тому же оборудование и инструмент для прокатки труб большого диаметра громоздки и дороги [2, 10, 11, 13, 16-18, 20, 27, 52-58].

Для осуществления операции раскатки на трубопрокатных агрегатах с пилигримовым станом применяют периодическую прокатку гильзы на длинной оправке в круглом калибре переменного по длине очага деформации сечения. Прокатка осуществляется поочередными подачами порций металла в валки при помощи подающего аппарата. На этих агрегатах непосредственно из слитка прокатывают трубы диаметром 48–650 мм со стенкой толщиной 2,5–50.

На ТПА с пилигримовым станом достигаются наибольшие значения вытяжки (более 30). Основное преимущество агрегатов такого типа заключается в возможности производить непосредственно из слитков трубы широкого сортамента, в том числе толстостенные (котельные, утяжеленные бурильные), профильные (квадратные штанги), ступенчатые, которые не

производят на других агрегатах. Стоимость труб, полученных на них, наиболее низкая.

Такие станы целесообразно применять для изготовления труб диаметром 194–530 мм ($D/S = 3–47$) при средних объемах производства. При изготовлении толстостенных труб диаметром 324–530 мм пилигримовым установкам альтернативы нет [2, 10, 11, 13, 16-18, 36, 58].

В то же время трубы с пилигримовых станов имеют низкое качество наружной и внутренней поверхности, не удовлетворяют требованиям к точности прокатываемых труб. Пилигримовые станы имеют небольшую производительность.

Для производства толстостенных труб повышенной точности диаметром 38–200 мм со стенкой толщиной 3–50 мм и выше применяют винтовую прокатку гильз на длинной оправке в трехвалковом раскатном стане, обеспечивающем повышенные точности толщины стенки трубы в 2–2,5 раза по сравнению с прокаткой на других станах.

Наличие трех косорасположенных валков раскатного стана, имеющих специальную калибровку, обеспечивает значительные деформации металла. Применение в составе такого агрегата системы прошивного и раскатного косовалковых станов позволяет легко переходить на прокатку труб любого диаметра в пределах сортамента стана без расширения парка валков.

Наиболее эффективно использование этих станов для изготовления труб с отношением диаметра к толщине стенки в пределах 4–12. Несмотря на различные попытки расширения возможностей станов получать тонкостенные трубы ($D/S > 20$) на них не удается, так как при прокатке концов труб, особенно задних, в трехвалковых станах развивается ин-тенсивная поперечная деформация и образуются треугольные концевые раструбы, не позволяющие стабильно осуществлять раскатку. Такие раскатные станы характеризуются малой производительностью. Наиболее часто встречающиеся виды брака: наружные винтовые порезы, внутренние риски, разностенность [2, 10, 11, 13, 16-18, 20, 27, 52-58].

В мировой практике агрегаты с реечным станом получили достаточно широкое распространение для производства труб конструкционных, котельных, трубопроводных в основном малых диаметров от 21 до 133 мм с толщиной стенки 2,5–8,0 мм. Трубы, полученные на агрегатах с реечным станом, используют в качестве заготовок для производства прецизионных и холодноотянутых труб, так как они имеют качественную наружную и внутреннюю поверхности и сравнительно тонкие стенки [2, 10, 11, 13, 16-18, 36].

Реечные станы обеспечивают достаточную точность размеров сечения трубы и по производительности уступают только непрерывным станам. К их достоинствам также относится простота технологии. Нет необходимости в тщательной регулировке скоростей валков, так как деформация происходит в не приводных роликовых обоймах. Реечный стан достаточно металлоемок, однако сортамент таких ТПА значительно уже.

Одним из недостатков реечного стана является высокая стоимость длинных оправок (дорнов).

Планетарно-косовалковые станы отличаются от традиционных станом винтовой прокатки тем, что в них вращается сама рабочая клеть с валками грибовидной формы, обкатывающимися вокруг трубы. Раскатка труб происходит на длинной оправке. На таких агрегатах производят трубы как тонко-, так и толстостенные с отношением D/S равным 3–30 диаметром до 450 мм и разностенностью ± 5 мм. Также возможно получать трубы длиной до 100 м при непрерывном процессе. Агрегаты данного типа экономичны даже при небольших партиях труб, обеспечивает широкий сортамент размеров и материалов [2, 10, 11, 13, 16-18].

Тем не менее агрегаты с планетарными станами не получили распространения из-за сложности конструкции и технологии раскатки, малой износостойкости валков по сравнению с валковыми станами винтовой прокатки.

Для получения труб из коррозионно-стойких марок стали и сплавов, профильных труб со сложной конфигурацией поперечного сечения находит широкое применение метод прессования, имеющий ряд преимуществ перед другими способами производства горячедеформированных труб. Всестороннее неравномерное сжатие даже малопластичных материалов при высоких гидростатических давлениях позволяет осуществлять деформацию за один цикл без разрушения. При прессовании достигаются большие коэффициенты вытяжки (до 60–70), что позволяет получать трубы большой длины из коротких заготовок [2, 10, 11, 13, 16-18, 22, 54].

Практика показала, что рядовые трубы из углеродистых марок стали, целесообразно изготавливать на прессовых установках только при выпуске малотоннажных партий, так как в этом случае стоимость инструмента значительно ниже, чем на трубопрокатных агрегатах.

Однако прессовый инструмент (пуансон, матрица, контейнер) работает в особо тяжелых условиях, поэтому подвергается интенсивному износу, и, естественно, рельеф изношенной поверхности переносится на поверхность гильзы или трубы. В связи с этим при прошивке и прессовании труб, например, из коррозионно-стойких марок стали и сплавов требуется большой объем ремонта поверхности труб или применяется полная обдирка абразивным или механическим инструментом.

Проведенный анализ различных агрегатов для производства бесшовных труб позволяет сделать вывод, что агрегаты с автоматическим (станом тандем) и с пилигримовым станами обладают наибольшей универсальностью. На них возможно производство труб с различным отношением D/S – как тонкостенных, так и толстостенных. Принимая во внимание, что агрегаты с автоматическим станом специализируются на производстве труб широкого сортамента из различных марок стали и сплавов, их применение нашло широкое распространение в мировой практике.

Трубопрокатные агрегаты с пилигримовым станом, работающие с применением слитков, в силу недостаточно высокого качества труб и

повышенного расходного коэффициента металла находят более ограниченное применение.

Наиболее современными в настоящее время считаются ТПА с непрерывным станом, которые производят бесшовные трубы диаметром от 16 до 426 мм с толщиной стенки 2,0–25 мм из нелегированных, низко- и высоколегированных марок стали.

В сравнении с плавающим режимом работы оправок, следующая ступень в совершенствовании технологии непрерывной прокатки, отличалась тем, что перемещение оправки контролировалось (стан типа МРМ – Mandrel Pipe Mill). Впервые эта технология была внедрена и освоена в Италии на заводе «Dalmine» в 1978г. Постоянство скорости перемещения оправок в процессе раскатки, обеспечиваемое механизмом удержания оправки (ретайнер), позволило сократить длину и массу используемых оправок. Кроме того, технология МРМ позволила раскатывать трубы с большим параметром тонкостенности D/S. Последующее десятилетие характеризовалось интенсивным внедрением непрерывных раскатных станом типа МРМ. В то же время технология МРМ, в процессе её освоения, претерпевала некоторые изменения, в частности отмечался тренд по снижению количества клеток стана МРМ. При этом такие ведущие компании по производству металлургического оборудования, как «SMS group» и «Danieli» продолжают предлагать заказчикам оборудования станы с технологией МРМ.

Дальнейшее развитие оборудования непрерывных станом и реализуемой на них технологии связаны с разработками непрерывных станом типа PQF (Premium Quality Finishing) и FQM (Fine Quality Mill). Основное отличие этих станом от станом типа МРМ заключается в использовании рабочих клеток с 3-валковым калибром.

ТПА с непрерывным станом в силу их значительной единичной мощности весьма перспективны для производства труб массового назначения. Применение таких станом в сочетании с непрерывно-литой заготовкой и

технологией прошивки в станах винтовой прокатки расширяет технологические возможности, повышает конкурентоспособность.

То же самое можно отметить в отношении агрегатов с речным станом. Достоинством таких агрегатов является металлосберегающая технология и низкие капитальные вложения в осуществление процесса. Кроме того, речные станы достаточно просты в эксплуатации.

В результате исследований, проведенных ГП «НИТИ им. В.Я. Осады», было определено [59]:

– автоматические станы эффективны для сортамента труб диаметром от 57 до 245 мм при масштабах производства от 50 до 200 тыс. т в год;

– пилигримовые станы эффективны для производства труб диаметром от 194 до 426 мм при объемах производстве 200–250 тыс. т в год;

– непрерывные станы с плавающей оправкой эффективны для получения труб диаметром до 140 мм и с соотношением диаметра и стенки D/S 10–28 при объемах производства до 200 тыс. тонн в год; для труб с соотношением D/S 7–47 целесообразно применять непрерывные станы с контролируемо-перемещаемой оправкой, а объем выпуска в зависимости от диаметра труб (30–426 мм) может находиться в пределах от 200 до 800 тыс. тонн в год.

На основании проведенного обзора научно-технической литературы можно сделать вывод о том, что при организации нового производства и реконструкции действующего приоритетным представляется применение агрегатов с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой в сочетании с непрерывно-литой заготовкой и технологией прошивки в двухвалковых прошивных станах винтовой прокатки.

1.2 Состояние исследования ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой

Выполненный анализ показал, что наиболее прогрессивным в производстве бесшовных труб является процесс раскатки гильзы двумя

валками в непрерывном стане на контролируемо-перемещаемой оправке. При этом значительный прогресс в повышении качества производимой продукции и расширении сортамента бесшовных труб был достигнут с созданием новых непрерывных станов с клетями трехвалковой конструкции [57, 60-62].

Технология производства труб на непрерывных станах с трехвалковыми клетями с контролируемо-перемещаемой оправкой получает широкое распространение за рубежом и постепенно внедряется на отечественных предприятиях. Основными производителями оборудования непрерывных трубопрокатных станов подобной конструкции являются немецкая компания «SMS Meer» (стан PQF – Premium Quality Finishing mill) и итальянская – «Danieli» (стан FQM – Fine Quality Mill) [60, 61-64].

Теоретическим вопросам изучения процесса раскатки труб в непрерывных станах посвящены многочисленные работы А.П. Чекмарева, Я.Л. Ваткина, И.П. Савкина, И.А. Чекмарева, Г.И. Гуляева, В.Н. Данченко и т.д. Было проведено большое количество исследований, освещающих отдельные вопросы теории и практики процесса непрерывной прокатки труб на длинной оправке, а также работ, посвященных разработке и исследованию рациональных технологических режимов и калибровок инструмента непрерывных оправочных станов [65-88]. Однако данные работы проводились и были ориентированы на непрерывные станы с двухвалковыми клетями с плавающей оправкой. Поэтому они не могут быть применены, в полной мере, к непрерывным оправочным станам с клетями трехвалковой конструкции и с контролируемо-перемещаемой оправкой в связи с некоторыми особенностями истечения металла и иным характером напряженно-деформационного состояния трубы.

Анализ научно-технической литературы показал отсутствие достаточной информации по деформационным режимам прокатки труб на непрерывных станах с трехвалковыми клетями, методики расчета калибровки валков и скоростных параметров станов подобной конструкции [53, 89].

Сравнительные технические характеристики ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой, используемыми в настоящее время на отечественных предприятиях, приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Сравнительные характеристики ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой

| 1 | АО «СТЗ» FQM 14 3/8" | | АО «ВТЗ» ТПА 159-426 | | | АО «ТАГМЕТ» PQF 10 3/4" | |
|---|---|---|------------------------------------|-----------|-----------------|--|--|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Диапазон производимых труб: Dт, мм Ст, мм | 168,0-365,1 6,4-40,0 | | 168,0-426,0 7,1-40,5 | | | 73,0-273,0 5,0-25,0 | |
| Кол-во клеток стана | 5 | | 7 | | | 5 | |
| Кол-во валков в клетки непрерывного стана | 3 | | 2 | | | 3 | |
| Режим работы оправки непрерывного стана | контролируемо-перемещаемый | | контролируемо-перемещаемый | | | контролируемо-перемещаемый | |
| Тип заготовки | круглая НЛЗ | | круглая НЛЗ | | | круглая НЛЗ | |
| Диаметр заготовки Dз, мм | 290 | 360 | 260 | 340 | 360/410 | 210 | 250 |
| Наружный диаметр гильзы Dг, мм | 328 | 433 | 257-263 | 281-344 | 416-495 | 224 | 332 |
| Толщина стенки гильзы, Sг, мм | 20,55-46,50 | 26,90-53,95 | 25,5-42,0 | 26,5-58,0 | 30,5-61,5 | 16,1-33,3 | 18,7-38,0 |
| Dг/Sг (max) | 15,96 | 16,10 | 10,3 | 13,0 | 16,6 | 13,9 | 17,8 |
| Максимальный коэффициент вытяжки в прошивном стане | 3,43 | 3,06 | суммарная – 3,49 | | | 3,84 | |
| Диаметр черновой трубы Dч.т, мм | Кал. 291 (287,93 - 299,03) | Кал. 384 (380,19 - 392,26) | 189- 235,2 | 269,6-290 | 357,2- 443,5 | 188-192,5 | 285,4- 291,1 |
| Толщина стенки черновой трубы Sч.т, мм | 6,28- 34,19 | 7,70- 37,31 | 7-35,1 | 7,9-37,8 | 8,6-40 | 4,65-23,55 | 5,30-24,65 |
| Dч.т/Sч.т (max) | 46,54 | 49,89 | 43,3 | | | 54,7 | |
| Максимальный коэффициент вытяжки в непрерывном стане, μ | 3,49 | 3,74 | 4,26 | | | 3,89 | |
| Диаметр бочки валков Dб, мм | 1кл – 659,6- 599,6; 2кл – 664,0- 604,0; 3кл – 668,0- 608,0; 4-5кл – 469,0- 409,0 | 1кл – 712,4- 652,4; 2кл – 715,4- 655,4; 3кл – 718,0- 658,0; 4-5кл – 519,0- 459,0 | 1-3 кл – 930-620; 4-7 кл – 840-520 | | | 1кл – 715,64- 665,64; 2кл – 722,58- 672,58; 3кл – 724,68- 674,68; 4- 5кл – 624,18- 574,18 | 1кл – 698,55- 648,58; 2кл – 707,70- 657,70; 3кл – 709,86- 659,86; 4- 5кл – 563,86- 513,84 |

| | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|
| Ширина бочек валков L_b , мм | 1-3кл – 320; 4-5кл – 300 | 1-3кл – 420; 4-5кл – 380 | 1-3кл - 590; 4-7кл - 540 | | | 1-3кл – 280; 4-5кл – 300 | 1-3кл – 320; 4-5кл – 300 |
| Диаметр оправок $D_{оп}$, мм | 225,0-276,9 | 313,1-365,2 | 165-425 | | | 145,20-179,55 | 239,80-278,35 |
| Общая длина оправок $L_{оп}$, мм | 17 500 | | 24 000 | | | 17 500 | |
| Расстояние между осями клетей, мм | 1475, 1125, 1350, 875 | | 1630, 2040, 1530, 1840, 1840, 1430 | | | 1050, 1580, 1050, 1050 | |
| D_b/D_T | 1-3кл – 2,5-2,7; 4-5кл – 1,9-2,0 | 1-3кл – 1,9-2,0; 4-5кл – 1,4-1,6 | 1-3 кл – 1,4-4,9; 4-7 кл – 1,2-4,4 | | | 1-3кл – 3,5-3,8; 4-5кл – 3,0-3,3 | 1-3кл – 2,2-2,5; 4-5кл – 1,7-1,9 |
| $\Delta V/V_d$ (max), % | 19,8-32,9 | 11,0-17,8 | 27,3-35,8 | 33,6-47,4 | 56,9-89,2 | 9,7-14,8 | 16,2-28,5 |
| ΔS (max), мм | 16,40 | 22,21 | 21,6 | 21,1 | 24,9 | 12,0 | 15,3 |
| ΔS (min), мм | 10,90 | 16,23 | 18,4 | 19,7 | 18,1 | 9,8 | 12,5 |
| Производительность P , тыс.тн/год | 550 | | 700 | | | 600 | |

Анализ таблицы 1.4 показал, что каждый из приведенных ТПА может применяться при производстве труб определенного диаметра: для малого (до 108 мм) - в основном прокатка в 8-9 двухвалковых клетях на плавающей оправке, среднего и большого (от 114 до 426 мм) - в 5-7 двух или трехвалковых клетях на контролируемо-перемещаемой оправке [20, 75]. Раскатка на плавающей оправке в основном применяется для производства труб из нелегированных и экономнолегированных марок стали, в то время как на контролируемо-перемещаемой оправкой обеспечивается пластическая деформация, в том числе и легированных марок стали.

Из таблицы 1.5 следует, что развитие традиционного способа непрерывной прокатки на плавающей оправке сдерживалось рядом технологических ограничений, а именно: максимальная длина оправки (до 20 м) ограничивала размеры черновой трубы; увеличение диаметра трубы приводило к недопустимой массе оправки; уменьшение толщины стенки усложняло извлечение инструмента [1].

Перед подачей оправки в гильзу для дальнейшей раскатки на ее поверхность наносится технологическая смазка. В традиционной непрерывной прокатке на плавающей оправке это, как правило, водный раствор триполифосфата натрия, для контролируемо-перемещаемых чаще

используется графитовая смазка. Смазка снижает коэффициент трения на поверхности контакта металла с оправкой и способствует снижению перегрева [20, 75].

В трехвалковых рабочих клетях в сравнении с традиционными двухвалковыми осуществляются большие разовые обжатия. В этой связи общее количество клетей в непрерывных станах новой конструкции гораздо меньше и составляет 4-6 против 8-9, используемых в традиционной раскатке гильз.

Обжатие гильзы тремя валками в совокупности с контролируемым перемещением оправки обеспечивает более благоприятное напряженно-деформированное состояние металла за счет подпирательной силы трения и снижения неравномерности деформации, что, в свою очередь, положительно сказывается на качестве готовых труб. Тем не менее, в связи с тяжёлыми температурными и силовыми условиями работы оправок возникает необходимость повышения их износостойкости [60, 90].

Негативный фактор повышенного износа инструмента для случая контролируемого перемещения может быть компенсирован возможностью прокатки большего диапазона стенок труб в трехвалковой клетке в сравнении с двухвалковой и, как следствие, необходимостью содержания меньшего парка оправок [90]. Данное обстоятельство приведет к существенному сокращению производственных издержек. Кроме того, трехвалковая схема обеспечивает меньшую разностенность черновых труб. Геометрически это подтверждается эффектом диафрагмы – чем больше лепестков, тем больше форма отверстия похожа на окружность. В то же время, очевидно, что дальнейшее увеличение числа валков в рабочей клетке (до четырех и более) с технологической точки зрения предпочтительно, однако в этом случае усложняется конструкция клетки и снижается ее надежность [60].

Новая технология раскатки гильз внедряется по всему миру – наибольшее распространение агрегаты подобного типа получили в Китае, ТПА со станом FQM введен в ОАЭ, строительство подобных агрегатов ведется

в Индии, Южной и Северной Америке. В России в IV квартале 2008г. в АО «Таганрогский металлургический завод» (АО «ТАГМЕТ») был введен в эксплуатацию агрегат с непрерывным станом PQF 10 3/4", предназначенный для производства бесшовных труб нефтяного сортамента диаметром 73...273 мм с толщиной стенки от 5 до 25 мм. Двумя годами ранее в Белоруссии на РУП «Белорусский металлургический завод» (РУП «БМЗ») введен в эксплуатацию агрегат подобного типа PQF 6 5/8" для производства труб диаметром 21-168 мм с толщиной стенки от 2,3 до 25 мм. В октябре 2014г на АО «Северский трубный завод» (АО «СТЗ») введен в эксплуатацию ТПА с трехвалковым непрерывным станом FQM проектной мощностью 600 тыс. тонн в год для производства труб диаметром 168-339 мм с толщиной стенки от 6,4 до 40 мм. Непрерывные станы PQF и FQM состоят из пяти трехвалковых клеток, калибры которых установлены с поворотом на 60° друг относительно друга. Раскатка гильзы происходит на контролируемо-перемещаемой оправке, скорость перемещения которой несколько ниже или равна скорости выхода трубы из первой клетки стана (скорость перемещения оправки ниже скорости выхода из первой клетки на станах FQM; на станах PQF скорость оправки равна скорости выхода из первой клетки). В мировой промышленности кроме пятиклетевых эксплуатируются так же шестиклетевые трехвалковые непрерывные станы.

С 2000 года компания «SMS group» установила 21 стан PQF и 4 стана MPM (последний заказ в 2003г).

В настоящее время компания «SMS group» разработала три схемы станов [64]:

1) PQF АСО (туннельная конструкция), позволяющая осуществлять перевалку клеток в направлении оси прокатки (рисунок 1.7 а). Однако использование данной конструкции имеет свои ограничения в виду того, что перевалка осуществляется одновременно для всего комплекта клеток, собранных в одну кассету. Для извлечения валков из клетки, в данной конструкции, предусмотрена система рычагов, позволяющая осуществлять

С 2004 г. компанией «Danieli» установлены один стан типа MPM и 12 станков типа FQM.

Конструкция стана FQM концептуально повторяет стан PQF. Отличительная особенность заключается в доработке клетей, регулировка валков в которых осуществляется строго в радиальном направлении, в отличие от клетей PQF, имеющих рычажную систему. Разработанные схемы станков «Danieli»: FQM ACO (с 2005г), FQM LCO (с 2008г), FQM LCO ESR (с 2013г), аналогичны схемам PQF.

Для повышения качества раскатываемых труб, стабильности протекания процесса раскатки, а также повышения выхода годного стан FQM имеет различные системы автоматического управления, в частности:

- а) систему автоматической настройки частоты вращения валков раскатного стана – ALS;
- б) систему компенсации динамической нагрузки при захвате раската – ISC;
- в) систему адаптивной балансировки валков – AFB;
- г) систему адаптивной компенсации упругой деформации рабочего инструмента – АММС;
- д) систему «гидроутонения» концов труб – FTT;
- е) систему автоматической настройки частоты вращения валков стана-извлекателя – EDC и другие.

Следует отметить, что последний стан FQM, для производства труб размером 26,7 – 139,7 мм, был запущен в 2015 г., на заводе «Benteler» (США).

Таким образом, самый современный уровень развития технологии и оборудования для раскатки гильз на непрерывных станах, как в России, так и за рубежом базируется на применении непрерывных раскатных станков с трехвалковыми клетями и удерживаемой оправкой типа MPM PQF и FQM. Для извлечения раската с оправки используется трехвалковый стан-извлекатель, имеющий общую ось прокатки с непрерывным раскатным станом.

Кроме общепризнанных лидеров в разработке и изготовлении непрерывных станов с трехвалковыми клетями, также известна китайская фирма «ТҮНІ». По утверждению фирмы, она контролирует до 70 % крупнейшего в мире рынка трубопрокатного оборудования КНР. Произведена экспортная поставка восьми станов в Индию, Индонезию и Южную Корею.

Следует отметить, что оборудование данной фирмы не превосходит по своим характеристикам оборудования европейских изготовителей, но можно ожидать, что стоимость оборудования будет ниже.

В то же время можно отметить ряд недостатков непрерывных раскатных станов. А именно, трубопрокатные непрерывные станы являются чрезвычайно сложными установками, требующими крупных инвестиций, которые могут достаточно быстро окупиться, только в случае загрузки на 100 % мощности. В настоящее время загрузка трубопрокатных мощностей в мире составляет около 50 %.

Выводы и постановка задач исследования. Сравнительный анализ различных способов получения исходных заготовок для производства бесшовных труб, проведенный в разделе 1.1.1, показал эффективность и экономичность применения непрерывно-литой заготовки. Учитывая выводы по разделам 1.1.2 и 1.1.3 можно сделать заключение о том, что с точки зрения технико-экономических показателей наиболее эффективным и перспективным представляется применение агрегатов с непрерывным станом и контролируемо-перемещаемой оправкой как с двух, так и с трех валковой конструкцией.

Учитывая идентичную схему напряженного состояния деформируемого металла, а именно схему всестороннего сжатия, применение такого ТПА теоретически может являться полноценной альтернативой прессованию для изготовления товарных труб специального назначения из коррозионно-стойких марок стали из непрерывно-литой заготовки. В этой связи разработка теоретических основ новой технологии прокатки товарных труб из нержавеющей марки стали на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой является актуальной научно-технической задачей, решению которой посвящена данная работа.

Глава 2. Прогнозирование пластических и прочностных свойств нержавеющей марки стали при прокатке бесшовных горячедеформированных труб

2.1 Методика прогнозирования пластичности металлов и сплавов при производстве горячедеформированных бесшовных труб

В настоящее время расширяется область применения трубной продукции из специальных марок стали, связанная с освоением добычи нефти и газа на новых месторождениях, осложненных наличием диоксида углерода и сероводорода. Кроме того, трубы из коррозионно-стойких и нержавеющей марок стали находят широкое применение в атомной промышленности, авиастроении, на заводах по производству сжиженного природного газа и ряде других наукоемких видах производства.

Для придания стали высоких прочностных и антикоррозионных свойств в нее добавляют достаточно большой процент легирующих элементов таких, как хром, никель, молибден и др. Однако эти элементы как правило снижают пластические свойства стали при производстве труб способами обработки давлением. В результате на горячедеформированных трубах могут появляться дефекты в виде трещин и разрывов. Поэтому, при проектировании технологических процессов производства труб необходима достоверная информация о пластичности марок стали, из которых они изготавливаются.

Известно [91], что пластичность металлов и сплавов представляет собой функцию, зависящую, кроме химического состава и структуры, от схемы напряженного состояния и температуры. Такие функции получили название диаграмм пластичности [92]. Методика построения диаграмм пластичности металлов и сплавов при их холодном деформировании достаточно хорошо проработана в трудах отечественных и зарубежных ученых [93, 94]. В этом случае пластичность зависит только от схемы напряженного состояния, характеризуемой отношением среднего нормального напряжения σ к

интенсивности касательных напряжений T . Менять схему напряженного состояния можно за счет осуществления опытов на растяжение и кручение с наложением внешнего гидростатического давления жидкости [95]. Многочисленные исследования, проведенные по этой методике, показали, что зависимость пластичности от схемы напряженного состояния хорошо описывается экспоненциальной зависимостью.

Однако применение этой методики для построения диаграммы пластичности металлов при горячей деформации сопряжено со значительными трудностями. Это связано прежде всего с тем, что производство горячедетформированных труб происходит при температурах $950...1250^{\circ}\text{C}$ и осуществлять опыты с наложением гидростатического давления жидкости до 10000 атмосфер приходится с применением специальных одноразовых приспособлений и жидкостей для нагрева [96-99].

Следует отметить, что работы по изучению пластичности металлов и сплавов в горячем состоянии проводятся, в том числе и в последнее время, например, [100]. Однако, с другой стороны, проведенные исследования пока не носят системный характер и общепризнанные подходы, такие как для случая холодной деформации отсутствуют. С другой стороны, научно-техническое развитие в области создания испытательных установок привели к созданию и достаточно широкому распространению в мире универсальных испытательных комплексов Gleeble [101]. Наличие таких установок открывает новые возможности по исследованию пластичности металлов и сплавов.

С учетом открывшихся возможностей предлагается для определения пластичности использовать опыты на растяжение, кручение и осадку с использованием испытательного комплекса Gleeble 3800. При этом в качестве рабочей гипотезы принять, что влияние схемы напряженного состояния на пластичность описывается экспоненциальной зависимостью при любых температурах проведения испытаний.

Поскольку такая зависимость предполагает определение двух эмпирических коэффициентов, для ее построения достаточно экспериментов

с двумя видами деформирования. Например, это могут быть опыты на растяжение и осадку. Тем не менее, осуществляя при этом дополнительный вид испытаний на кручение можно оценить применимость рабочей гипотезы о независимости характера влияния схемы напряженного состояния на пластичность от температуры испытания.

При выборе вида зависимости, описывающей диаграмму пластичности металлов и сплавов при горячем деформировании, была учтена возможность ее линеаризации для применения метода наименьших квадратов при обработке результатов эксперимента. В итоге предлагается следующая формула [102]:

$$\Lambda_p = a_0 \left(\frac{\theta}{1000} \right)^{a_1 + a_{12} \frac{\sigma}{T}} \exp \left(a_2 \frac{\sigma}{T} \right), \quad (2.1)$$

где a_0 , a_1 , a_2 , a_{12} – эмпирические коэффициенты, определяемые при испытаниях; θ – температура нагрева образца; σ – среднее нормальное напряжение; T – интенсивность касательных напряжений; Λ_p – пластичность металла (степень деформации, накопленная металлом к моменту разрушения).

Для определения значений эмпирических коэффициентов проведены эксперименты с использованием комплекса Gleeble 3800. При этом с целью варьирования напряженного состояния образцы подвергались одноосному растяжению и сжатию в диапазоне температур от 1000 °С до 1200 °С. При этом были реализованы значения $\frac{\sigma}{T} +0,58$ и $-0,58$ соответственно. Однако в опытах на сжатие образцы не удалось продеформировать до разрушения из-за ограниченной мощности испытательной машины. Поэтому была проведена вторая серия экспериментов, включающая опыты на кручение в том же диапазоне изменения температур. При этом реализована схема напряженного состояния с $\frac{\sigma}{T} = 0$. На основании этого были скорректированы выражения, описывающие диаграммы пластичности, полученные при выполнении работы [102].

Величина осевой деформации ε_{zz} рассчитывалась исходя из относительного сужения образца по формуле с учетом радиальной деформации ε_{yy} :

$$\varepsilon_{zz} = 2\varepsilon_{yy}, \quad (2.2)$$

Используем полученную степень относительной деформации сжатия для подсчета значения пластичности в момент разрушения образца в соответствие с:

$$\Lambda_p = \sqrt{3}\varepsilon_{zz}. \quad (2.3)$$

Эквивалентная деформация ε при кручении цилиндрического образца определяется по выражению:

$$\varepsilon = \frac{d}{2L}\theta \quad (2.4)$$

где $d = 10$ мм – диаметр рабочей зоны образца; $L = 20$ мм – длина рабочей зоны, $\theta = 2\pi N$ – угол поворота, N – число оборотов.

Исходя из размеров образца:

$$\varepsilon = 0,144 \times \theta \quad (2.5)$$

Для определения коэффициентов, входящих в формулу аппроксимирующую диаграмму пластичности, выполним линеаризацию выражения (2.1):

$$\begin{aligned} \ln \Lambda_p &= \ln \left(a_0 \Theta_{от}^{a_1 + a_{12} \frac{\sigma}{T}} \exp \left(a_2 \frac{\sigma}{T} \right) \right) = \ln a_0 + \ln \Theta_{от}^{a_1 + a_{12} \frac{\sigma}{T}} + \ln \exp \left(a_2 \frac{\sigma}{T} \right) = \\ &= \ln a_0 + \left(a_1 + a_{12} \frac{\sigma}{T} \right) \ln \Theta_{от} + \ln \left(\exp \left(a_2 \frac{\sigma}{T} \right) \right) \\ &= \ln a_0 + a_1 \ln \Theta_{от} + a_{12} \frac{\sigma}{T} \ln \Theta_{от} + a_2 \frac{\sigma}{T} \end{aligned}$$

Обозначим:

$$\ln \Lambda_p = Y;$$

$$\ln a_0 = A_0;$$

$$a_1 = A_1;$$

$$a_{12} = A_{12};$$

$$a_2 = A_2;$$

$$\ln \Theta_{от} = X_1;$$

$$\frac{\sigma}{T} = X_2.$$

С учетом этого уравнение (2.1) примет вид:

$$Y = A_0 + A_1 X_1 + A_{12} X_1 X_2 + A_2 X_2 \quad (2.6)$$

В программном комплексе Excel проводим регрессионный анализ и получаем коэффициенты линейного уравнения (2.6) для марки стали 08X18H10T на основе метода наименьших квадратов.

В результате получаем значения эмпирических коэффициентов диаграммы пластичности марки стали 08X18H10T.

2.2 Определение пластичности в опытах на растяжение, кручение и осадку с использованием испытательного комплекса Gleeble 3800

Для проведения полного комплекса запланированных в рамках данной работы исследований марки стали 08X18H10T были подготовлены различные виды образцов, отобранных от заготовки, гильзы, горячекатаной трубы и трубы после термической обработки (рисунок 2.1), из которых изготовлены образцы для проведения всех запланированных видов испытаний: металлографических (рисунок 2.2) и пластометрических (рисунок 2.3).

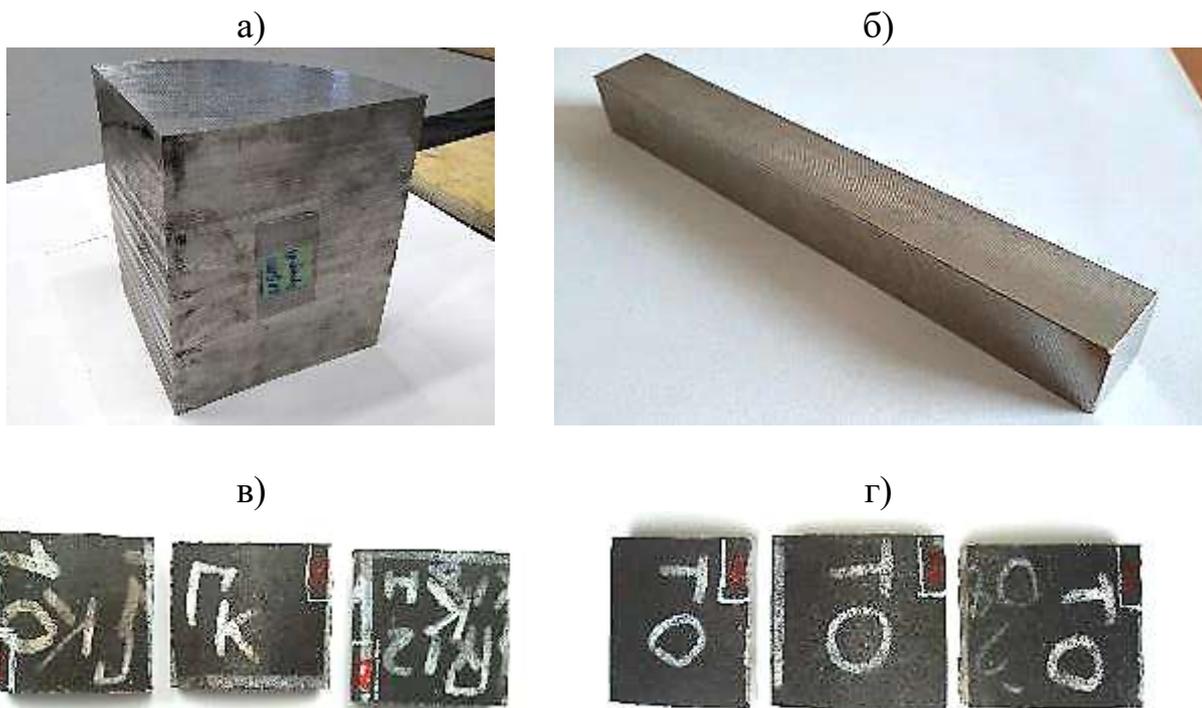


Рисунок 2.1 – Образцы из стали марки 08X18N10T: а) от непрерывнолитой заготовки; б) от гильзы; в) от горячекатаной трубы; г) от трубы после термической обработки

Совершенствование технологии производства труб из нержавеющей марок стали на основе исследования пластичности позволит скорректировать режимы деформации, в первую очередь температурные. Для этого необходимо проведение исследований металла, подвергаемого обработке давлением в горячем состоянии, на основных переделах ТПА: прошивке и раскатке, а также определение изменения свойств по мере деформации от заготовки до готового изделия.

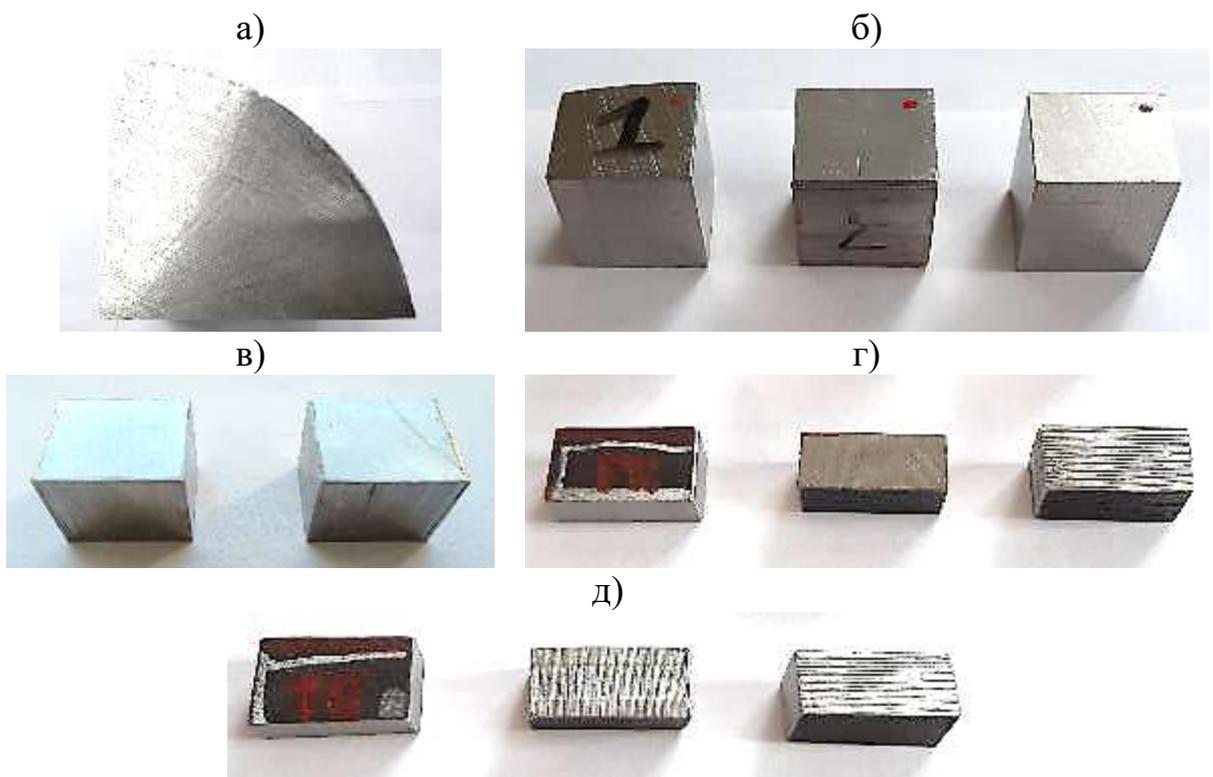


Рисунок 2.2 – Готовые образцы для металлографических исследований:
 а) от заготовки для исследования макроструктуры; б) от заготовки для исследования микроструктуры; в) от гильзы для исследования микроструктуры; г) от горячекатаной трубы для исследования микроструктуры; д) от трубы после термической обработки для исследования микроструктуры

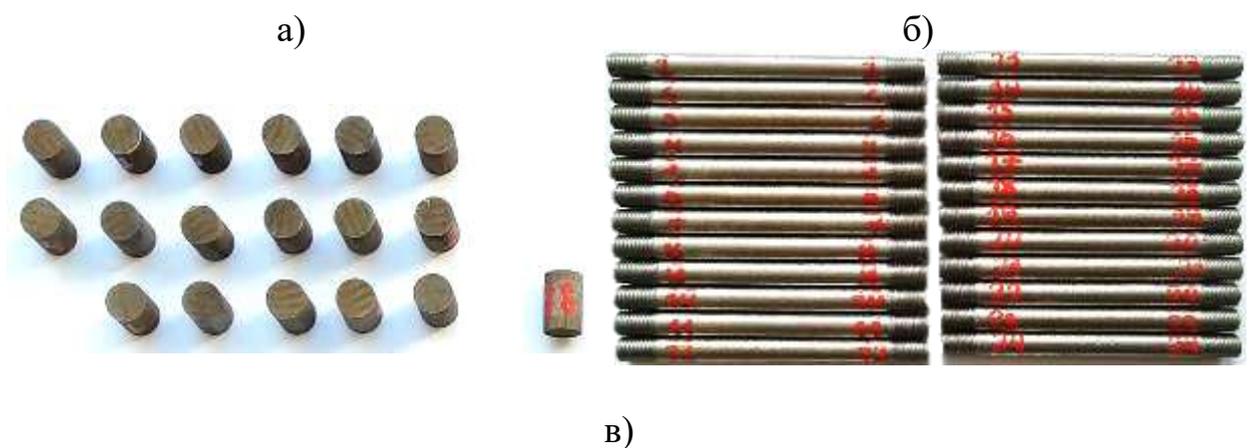




Рисунок 2.3 – Готовые образцы для пластометрических испытаний из НЛЗ из стали марки 08X18N10T: а) на сжатие; б) на растяжение; в) на кручение

В рамках выполнения настоящей работы было запланировано:

- проведение оценки макроструктуры заготовки;
- исследование изменений микроструктуры от заготовки до термообработанной трубы;
- проведение экспериментальных исследований образцов из стали марки 08X18N10T на сжатие, растяжение и кручение;
- исследование зависимости разрушения образцов от температуры испытания;
- получение численных значений критической степени деформации ($\Delta\epsilon_p$) в зависимости от температуры испытания (t , °C) и вида испытания (σ/T);
- получение диаграммы растяжения, сжатия и кручения образцов в зависимости от температуры испытания.

Для проведения металлографических исследований было применено следующее оборудование: ферритометр ФХ-ЗИФМ и оптический микроскоп Axiovert 40MAT.

Для проведения пластометрических исследований стали марки 08X18N10T в горячем состоянии выбран комплекс с цифровой замкнутой системой термомеханического моделирования «Gleeble 3800»^{*} – один из

^{*} Комплекс выполнен в модульном принципе: к основному силовому блоку подключаются сменные модули, осуществляющие тот или иной вид механического воздействия. Он состоит из следующих компонентов:

самых современных и технически оснащенных комплексов, позволяющий моделировать поведение металла и изменение его механических свойств в процессе прокатки,ковки,экструзии,литья,сварки и др.

В настоящей работе испытания проводились в вакуумной среде (низкий вакуум) с использованием следующих модулей: HydraWedge (сжатие), PocketJaw (растяжение) и Torsion (кручение). Контроль температуры при нагреве, а также измерение деформационного разогрева обеспечивалось посредством приварки к образцам хромель-алюмелевых термопар. На рисунке **Ошибка! Источник ссылки не найден.** представлена применяемая при выполнении данной работы установка «Gleeble 3800» с подключаемыми модулями, расположенная в Южно-Уральском Государственном университете (ЮУрГУ), г. Челябинск.

Температурные режимы и режимы деформации, при которых проводились испытания, выбраны в соответствии с режимами характерными для ТПА 159-426 АО «ВТЗ» значениями.

Для проведения исследований были изготовлены стандартные для выбранной испытательной установки образцы, вырезанные из НЛЗ из стали марки 08X18H10T. Отбор образцов от НЛЗ производился в продольном направлении.

- силовой блок, обеспечивающий приложение заданного усилия к образцу и нагрев образца прямым пропусканием электрического тока (что обеспечивает скорости нагрева до 10 000 °C/c);

- модуль PocketJaw, позволяющий производить испытания на растяжение-сжатие, ползучесть, малоцикловую усталость, осуществлять дилатометрические исследования и нагревать металл вплоть до температуры плавления (включительно). Максимальные развиваемые нагрузки: ± 10 тонн;

- модуль HydraWedge, предназначенный для изучения поведения исследуемых материалов в условиях одноосной осадки и плоской деформации сжатием. Отличный от PocketJaw способ приложения нагрузки путем разгона гидравлического поршня с последующим ударом по траверсе обеспечивает максимальную скорость движения рабочего инструмента – не менее 2 м/с и усилие на сжатие до 20 тонн;

- модуль Torsion, реализующий деформацию исследуемых образцов кручением;

- модуль MaxStrain, позволяющий чередовать ударную деформацию в двух взаимно перпендикулярных направлениях и имитировать процессы ротационнойковки.

Фотографии образцов из НЛЗ для испытаний на установке «Gleeble 3800» представлены на рисунке 2.3.



Рисунок 2.4 – Комплекс с цифровой замкнутой системой термомеханического моделирования «Gleeble 3800» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»: а) общий вид комплекса; б) подключаемые модули

Способность сталей и сплавов подвергаться обработке давлением на трубопрокатных агрегатах определяется двумя основными показателями – пластичностью и сопротивлением деформации, которые в совокупности обеспечивают технологическую пластичность металлов.

Оба этих показателя взаимосвязаны и зависят от природы металла, его структурного состояния, температурно-скоростных условий деформации, состояния поверхности заготовки, окружающей среды и других факторов.

Для проведения пластометрических исследований металла в горячем состоянии необходимо проведение по крайней мере трех видов испытаний, поэтому были выбраны испытания на сжатие, растяжение и кручение.

Как было отмечено выше испытания одноосным сжатием (осадкой) осуществлялись с использованием модуля HydraWedge рабочая камера которого представлена на рисунке 2.5.

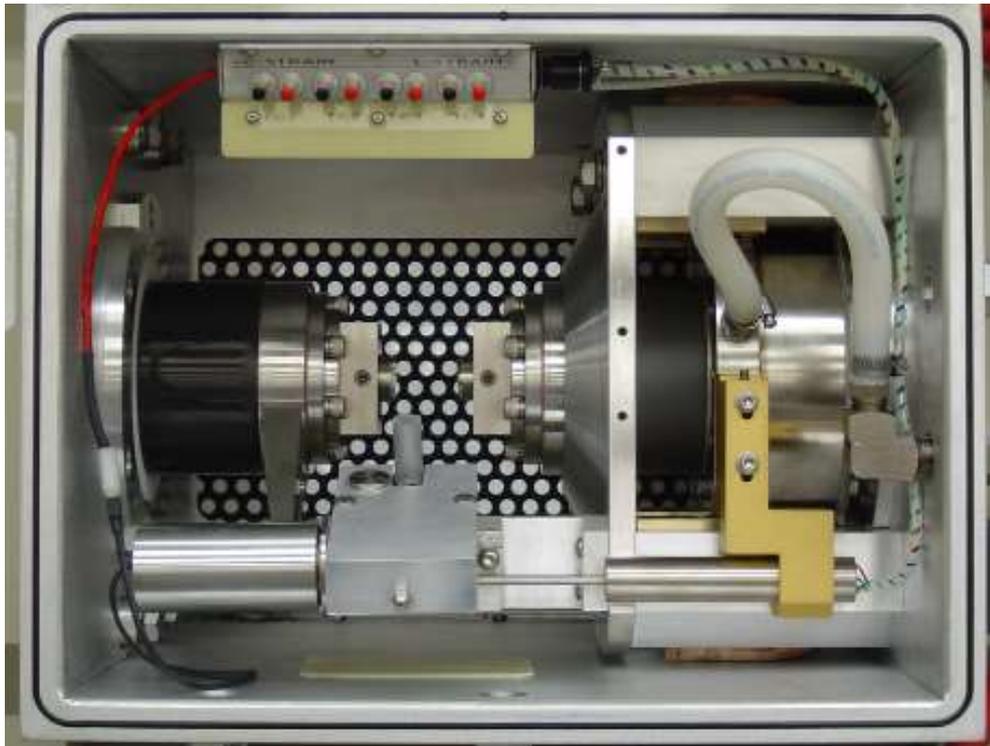


Рисунок 2.5 – Рабочая камера модуля HydraWedge

На рисунке 2.6 представлен внешний вид исходного образца.



Рисунок 2.6 – Внешний вид исходного образца

Испытания проводились на цилиндрических образцах диаметром 10 мм и высотой 15 мм. Для уменьшения контактного трения между образцом и рабочим инструментом (твердосплавные бойки из карбида вольфрама типа ВК8) помещалась молибденовая фольга толщиной 0,08 мм. Нагрев образца, помещенного в рабочую камеру с низким вакуумом, осуществлялся прямым пропусканием через него электрического тока. Температура контролировалась хромель-алюмелевой термопарой, приваренной к центральной части образца.

Образцы подвергались нагреву до температуры испытания со скоростью 5 °С/с. После достижения заданной температуры следовала изотермическая

выдержка в течение полутора минут для выравнивания температуры по объему образца.

Деформация производилась при температурах: 1250, 1200, 1100, 1000 и 900 °С со скоростью деформации 15 с⁻¹, согласно программе исследования (по 3 повтора).

В процессе эксперимента фиксировались: температура образца T , усилие деформации F и текущее изменение высоты образца $\Delta h = h - h_0$. Автоматически с помощью встроенной программы рассчитывались: истинная (логарифмическая) деформация ε и истинные напряжения σ в предположении о неизменности объема образца и сохранения им цилиндрической формы в процессе испытания:

$$\varepsilon = \ln \frac{h}{h_0}; \quad (2.7)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi d^2/4} = \frac{F}{\left(\frac{\pi h_0}{4 h} d_0^2\right)}, \quad (2.8)$$

где h_0 и h – начальная и текущая высота образца;

S – текущая площадь сечения образца;

d_0 и d – начальный и текущий диаметр образца.

При испытаниях на сжатие для минимальной температуры 900 °С устанавливается максимальная степень деформации, исходя из возможностей применяемого оборудования, затем, при наличии разрушения (появлении трещины), температура постепенно увеличивается на 50 °С до прекращения образования разрушения.

Поскольку в явном виде при предельных условиях испытаний разрушения (трещины) получено не было деформация сжатием для всех

образцов при всех температурах осуществлялась до максимальной величины $\varepsilon = 1,3-1,4$.

Испытания на растяжение проводились с использованием модуля RocketJaw, рабочая камера которого представлена на рисунке 2.7.

Испытания проводились на цилиндрических образцах диаметром 10 мм и длиной 121,5 мм. Нагрев образцов до температуры испытания осуществлялся пропусканием тока (по той же схеме, что и в испытаниях на сжатие). Температура измерялась хромель-алюмелевой термопарой, приваренной к центральному сечению образца. Для измерения деформации использовался высокотемпературный датчик поперечной деформации (далее – дилатометр, рисунок 2.9).

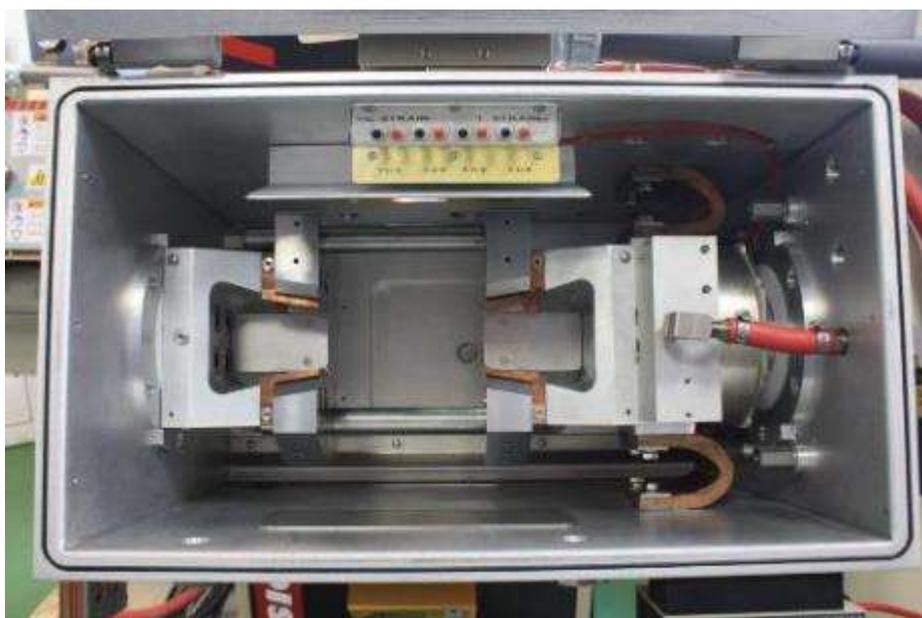


Рисунок 2.7 – Рабочая камера модуля RocketJaw

На рисунке 2.8 представлен внешний вид исходного образца.



Рисунок 2.8 – Внешний вид исходного образца на растяжение



Рисунок 2.9 – Высокотемпературный датчик поперечной деформации (дилатометр)

В испытаниях растяжением задавалась постоянная скорость перемещения траверсы, отвечающая заданному номинальному значению скорости деформации (15 с^{-1}), которая подбиралась индивидуально для каждой из температур, отвечающих Программе исследования: 1250, 1200, 1100, 1000 и 900 °С (по 5, 5, 3, 3 и 5 повторов соответственно). Оставшиеся два запасных образца по инициативе исполнителей испытаны при температуре 1150 °С.

Значения истинных напряжений и логарифмических деформаций в процессе эксперимента рассчитывались программным обеспечением комплекса по формулам:

$$\varepsilon = 2 \ln \frac{d_0}{d_0 + \Delta d} \quad (2.9)$$

$$\sigma = \frac{4F}{\pi(d_0 + \Delta d)^2}, \quad (2.10)$$

где $d_0 = 10 \text{ мм}$ – исходный диаметр образца;

Δd – изменение диаметра образца (показание дилатометра).

Начиная с определенного момента после локализации деформации в шейке, предшествующей разрушению, положение датчика деформации перестает отвечать наименьшему поперечному сечению и измеряемые значения Δd перестают изменяться (датчик застревает на одной из половин образца). В этом случае формулы (2.9 и 2.10) утрачивают смысл: для анализа необходимо комбинирование зависимости усилия от перемещения с результатами конечно-элементного расчета.

Испытания на кручение представляет наибольший интерес при исследовании процесса винтовой прошивки, поскольку схема напряженного состояния при косовалковой прошивке резко отличается от схемы напряженного состояния при любом применяемом способе испытания металлов. Поэтому экспериментальные данные о механических свойствах сталей в горячем состоянии (сопротивление растяжению, сжатию, динамическая проба на удар и др.) не показательны в этом случае и практически не могут быть использованы. Значительно более надежные результаты дает способ испытания на горячее кручение [103].

Сущность данного метода заключается в определении угла закручивания образца до его разрушения (характеристики пластических свойств стали) и максимального скручивающего усилия или момента кручения (характеристика сопротивления деформации).

В рамках выполнения текущего этапа работы, проводились испытания на горячее кручение металла, отобранного от непрерывнолитой заготовки, позволяющие определить рациональный режим его нагрева перед прошивкой, и провести сравнительный анализ по оценке изменения пластических свойств металла до и после деформационного передела.

Испытания на кручение проводились с использованием модуля Torsion, рабочая камера которого представлена на рисунке 2.10.

Испытания проводились на цилиндрических образцах диаметром 14 мм и общей длиной 165 мм. Диаметр рабочей зоны 10 мм, длина рабочей зоны 20 мм.

При испытаниях на кручение один конец образца был неподвижно зафиксирован в захватах, ко второму (подвижному) концу прикладывался скручивающий момент. Способ нагрева – такой же, как и в предыдущих видах испытаний. Образцы испытывались при температурах 1250, 1200, 1150, 1100, 1050, 1000 и 900 °С (по 5, 5, 5, 4, 3, 3 и 3 повторов соответственно).

На рисунке 2.11 представлен внешний вид исходного образца.

В нескольких испытаниях к неподвижному концу образца на расстоянии 1 мм от базы приваривалась термопара, фиксирующая величину деформационного разогрева. Поскольку край базы не успевает нагреваться в процессе испытания, от этой методики решено было отказаться в пользу измерения температуры центральной части образца цветковым пирометром.



Рисунок 2.10 – Рабочая камера модуля Torsion



Рисунок 2.11 – Внешний вид исходного образца на кручение

В процессе эксперимента фиксировались: угол скручивания φ и крутящий (скручивающий) момент M . Интенсивности деформаций ε и напряжений σ рассчитаны по выражениям [104]:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R}{L} \varphi; \quad (2.11)$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{3}M}{2\pi R^3} (3 + n + m), \quad (2.12)$$

где m – показатель деформационного упрочнения;

n – показатель скоростной чувствительности напряжений.

Принято стандартное для горячей деформации допущение $3 + n + m = 3,3$.

Скорость деформации определялась согласно результатам расчетов по разработанной ранее методике [105, 106]. В условиях работы прошивного стана ТПА 159-426 АО «ВТЗ» по очагу деформации она изменяется в пределах от 10 до 20 с⁻¹.

Перевод скорости деформации в скорость вращения зажима испытательной установки для испытаний на горячее кручение осуществлялся по зависимости [106, 107]:

$$\varepsilon = \frac{d \cdot \theta}{2 \cdot L \cdot \sqrt{3}}, \quad (2.13)$$

где ε – степень деформации;

d – диаметр рабочей зоны образца ($d = 10$ мм);

L – длина рабочей зоны образца ($L = 20$ мм);

θ – угол скручивания ($\theta = 2 \pi N$, рад);

N – количество оборотов (кручений).

Таким образом $\varepsilon = 0,144 \theta$.

Если принять, что τ – это время поворота на угол θ , а f – это частота вращения зажима испытательной установки, то для скорости деформации будет справедливо:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d}{2 \cdot L \cdot \sqrt{3}} \cdot \frac{\theta}{\tau} = \frac{d \cdot \pi}{L \cdot \sqrt{3}} \cdot f = 0,906 \cdot f . \quad (2.14)$$

Как было отмечено выше, среднее значение скорости деформации при винтовой прошивке составляет 15 с^{-1} , этому значению соответствует частота вращения зажима установки $f \approx 16,5 \text{ об/с}$.

Количество полных оборотов образца задавалось заведомо большим, чем образец способен выдержать не разрушаясь. Предварительные значения о количестве оборотов до разрушения были получены на настроечных образцах.

В процессе испытаний на горячее кручение в непрерывном режиме регистрировались: угол поворота, крутящий момент, температура в рабочей зоне образца посредством цветового пирометра. По полученным данным были построены графики зависимостей крутящего момента от угла поворота и определены угол поворота и количество оборотов до разрушения образца.

Деформация при всех видах испытаний производилась в одном и том же диапазоне температур: $900\text{-}1250 \text{ }^\circ\text{C}$ с одинаковой скоростью 15 с^{-1} по 3-5 повторов.

На рисунке 2.12 представлены результаты испытаний на сжатие – кривые деформации сжатием при температурах $1250, 1200, 1100, 1000$ и $900 \text{ }^\circ\text{C}$ (скорость деформации 15 с^{-1}). Фото деформированных образцов представлены на рисунке 2.13.

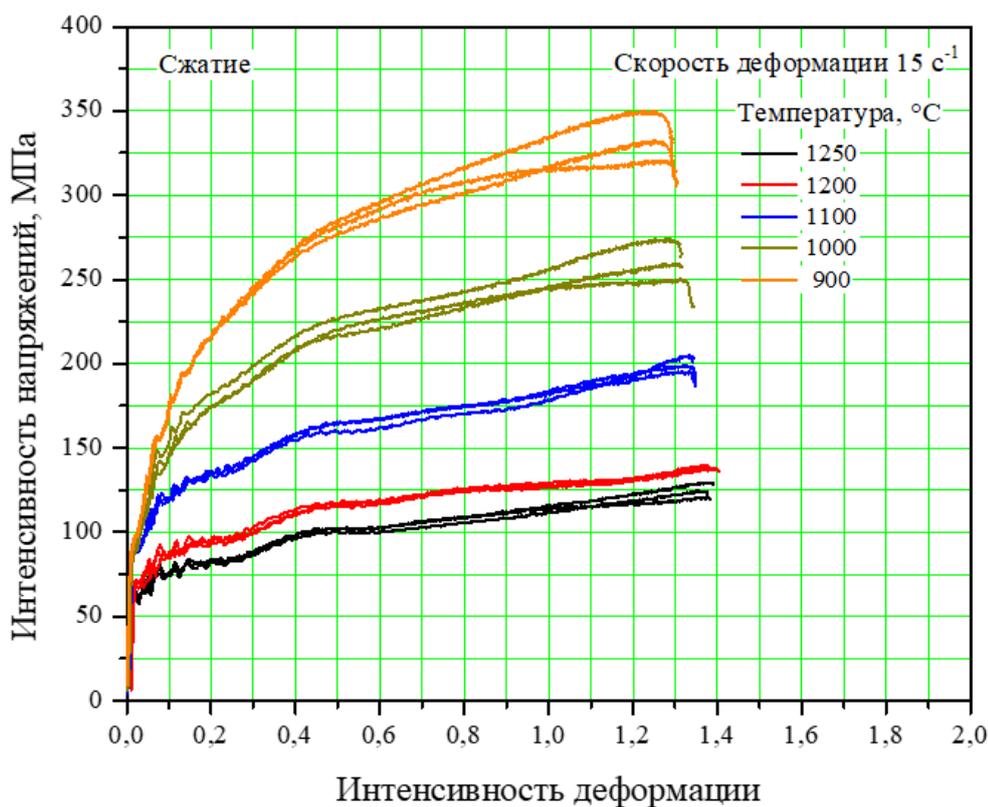


Рисунок 2.12 – Кривые деформации сжатием



Рисунок 2.13 – Деформированные образцы после испытаний на сжатие

Наблюдается хорошая воспроизводимость результатов испытаний для всех исследованных температур. Напряжения деформирования увеличиваются с понижением температуры испытаний.

Форма кривых деформирования сжатием имеет типичный для сталей при высоких температурах и скоростях деформации вид. Кривые деформирования представлены участком упругопластического перехода с последующим интенсивным упрочнением до 0,1 единиц деформации, после чего наблюдается более слабое упрочнение без достижения плато. Отметим,

что наклон кривых деформирования на участке интенсивного упрочнения слабо зависит от температуры испытания и в диапазоне температур 900-1100 °С практически не изменяется.

Испытанные образцы имеют цилиндрическую форму и их поверхность для большинства образцов не содержит трещин. Мелкие дефекты наподобие пор обнаружены на образцах с номерами 2, 13, испытанных при температурах 1250 и 900 °С.

На рисунке 2.14 представлены результаты испытаний на растяжение – кривые растяжения цилиндрических образцов (ниспадающие части кривых деформирования, отвечающие локализации деформации в шейке, отрезаны) при температурах 1250, 1200, 1100, 1150, 1000 и 900 °С (скорость деформации 15 с^{-1}). Фото деформированных образцов представлены на рисунке 2.15.

Для всех образцов, испытанных на растяжение, наблюдается значительный разброс данных по кривым деформирования, что, вероятно, обусловлено неоднородностью распределения микропор по объему НЛЗ. Отметим существенную макроскопическую неоднородность деформаций рабочей базы и наличие на ее поверхности раскрывшихся пор (наблюдаемых для отдельных образцов). Наблюдается аналогичная результатам при сжатии закономерность роста напряжений деформирования с понижением температуры испытания.

При сопоставимых значениях напряжений на кривых сжатия и растяжения, для последних наблюдаются более низкие величины пределов текучести и монотонное деформационное упрочнение, что указывает на анизотропию непрерывнолитой заготовки. Последнее подтверждается эллиптической формой образцов на сжатие и шейки образцов на растяжение.

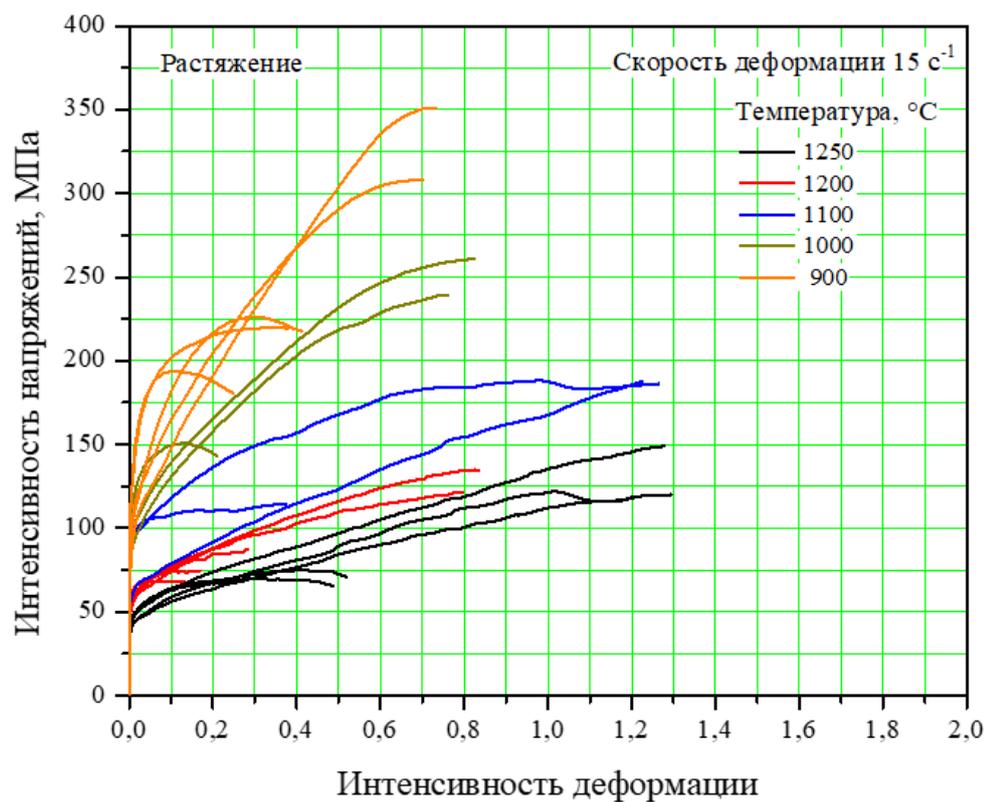


Рисунок 2.14 – Кривые деформации растяжением

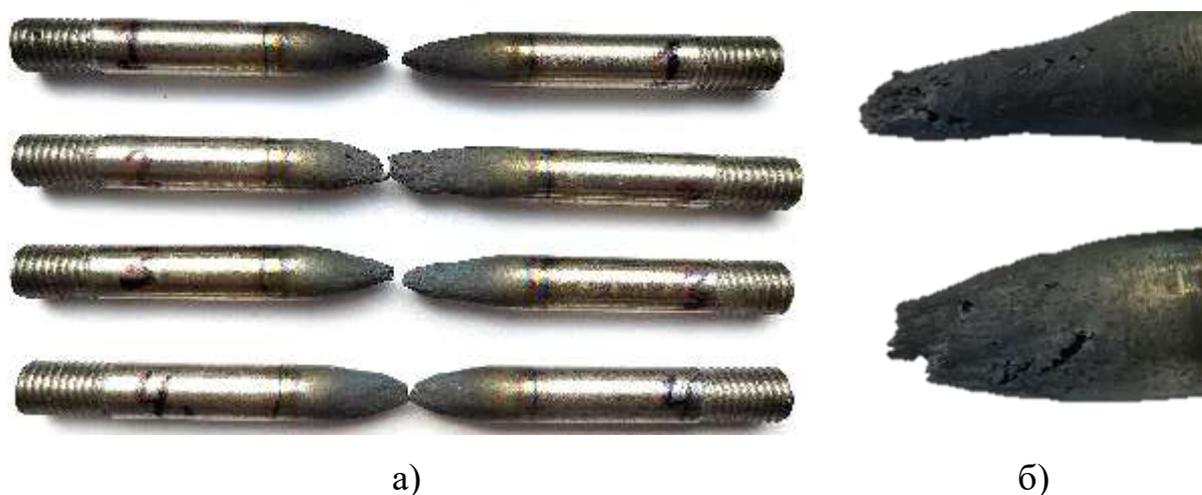


Рисунок 2.15 – Образцы после испытаний на растяжение: а) Испытанные на растяжение образцы из НЛЗ; б) Увеличенные фрагменты рабочей базы образцов № 2 и 9.

Пластичность образцов при растяжении оценивалась по величине относительного поперечного сужения при разрыве ψ . Пересчет сужения в предельную деформацию осуществлен по стандартной формуле:

$$\varepsilon = \ln \frac{1}{1 - \psi}. \quad (2.15)$$

Полученная зависимость предельных пластических деформаций от температуры испытания приведена на рисунке 2.16. Тренд, верхняя и нижняя границы экспериментальных данных описаны путем расчета среднего, максимального и минимального значений пластичности при соответствующей температуре с последующей аппроксимацией расчетных точек квадратичным сплайном. Отмечается наличие пика пластичности при температуре 1200 °С.

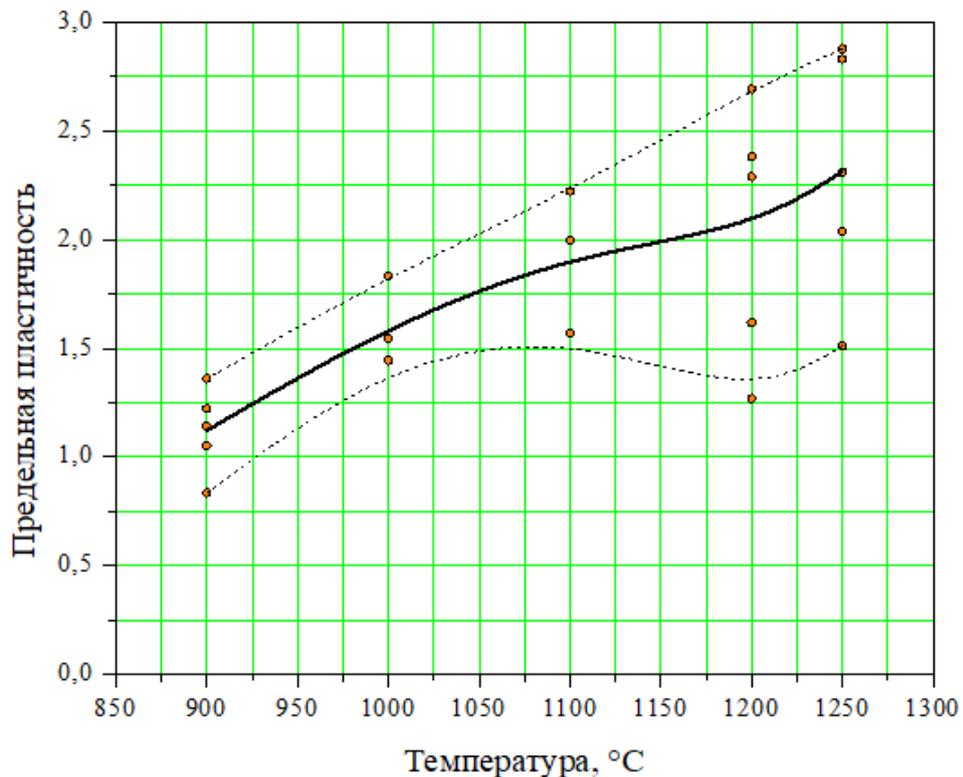


Рисунок 2.16 – Зависимость предельной деформации при растяжении от температуры испытания

Образцы на кручение испытаны при температурах 1250, 1200, 1150, 1100, 1050, 1000 и 900 °С (по 5, 5, 4, 4, 3, 3 и 3 повторов соответственно) со скоростью деформации 15 с^{-1} .

Как было отмечено выше в процессе эксперимента фиксировались: угол скручивания (угол поворота) и крутящий (скручивающий) момент (рисунок 2.17).

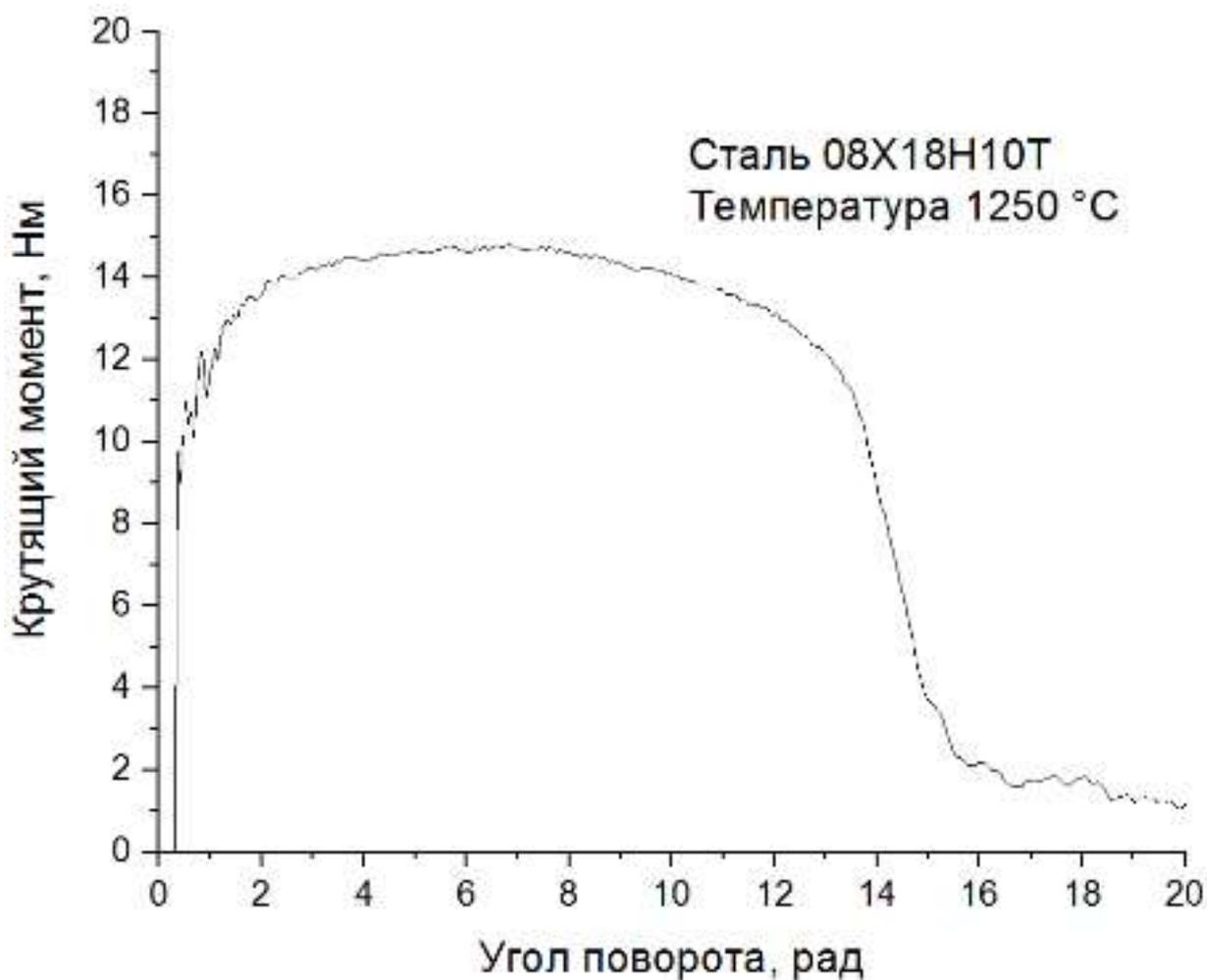


Рисунок 2.17 – Экспериментальная кривая кручения образцов из стали марки 08Х18Н10Т при температуре испытаний 1250 °С

С ростом угла поворота крутящий момент, требуемый для деформирования, сначала возрастает и достигает максимального (пикового) значения. При последующем росте угла поворота наблюдается падение крутящего момента, вероятно связанное с деформационным разогревом. Согласно показаниям пирометра, разогрев в очаге деформации составляет 75-250 °С в зависимости от температуры испытания (рисунок 2.18).

Величины деформационного разогрева при кручении представлены на рисунке 2.18. Величина разогрева увеличивается с понижением температуры испытания. Отметим, что разогрев образцов из НЛЗ существенно ниже, чем у образцов из гильзы в связи с более низкой пластичностью (а, следовательно, и продолжительностью кривой деформирования) у НЛЗ. В испытаниях растяжением и сжатием не наблюдается значительного деформационного разогрева. Следовательно, разогрев при сжатии и растяжении практически не сказывается на виде кривых деформирования.

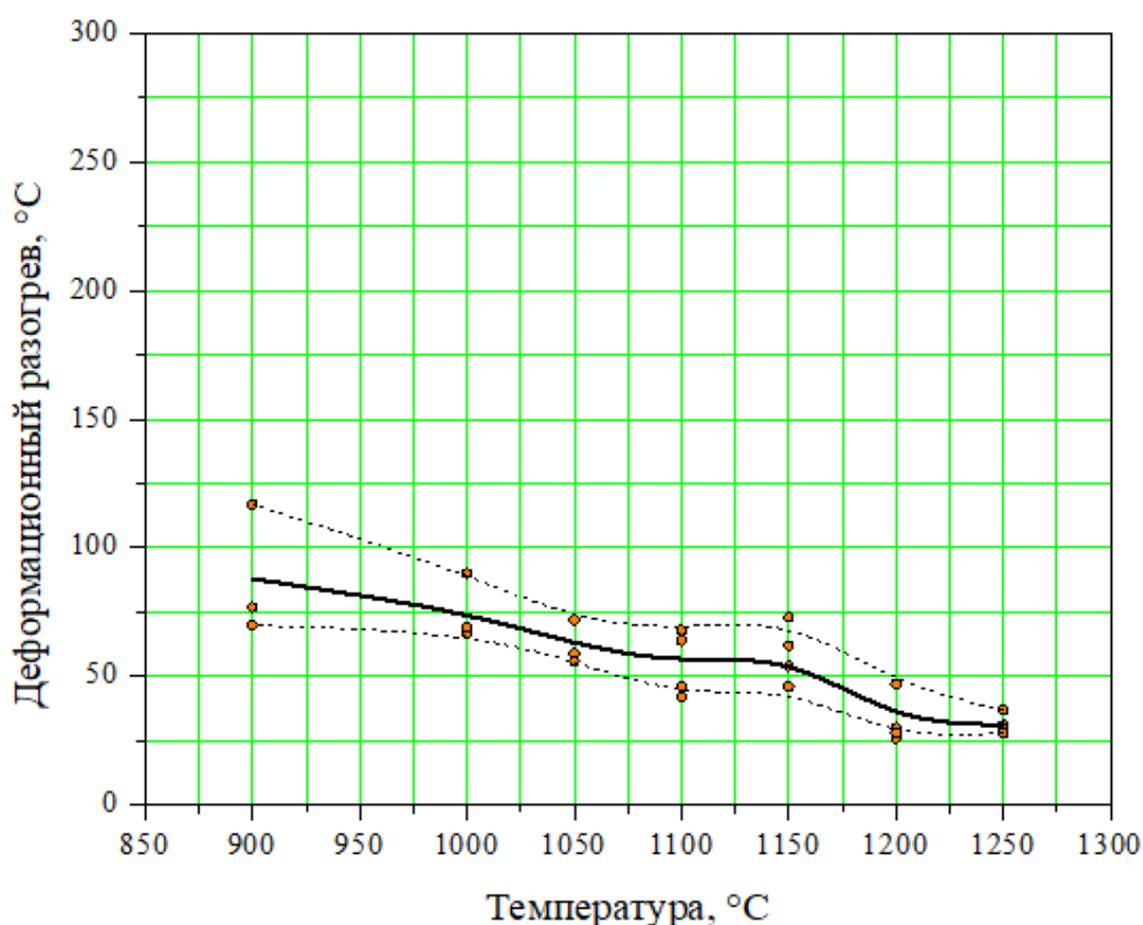


Рисунок 2.18 – Величина деформационного разогрева образцов из НЛЗ при кручении, в зависимости от температуры испытания

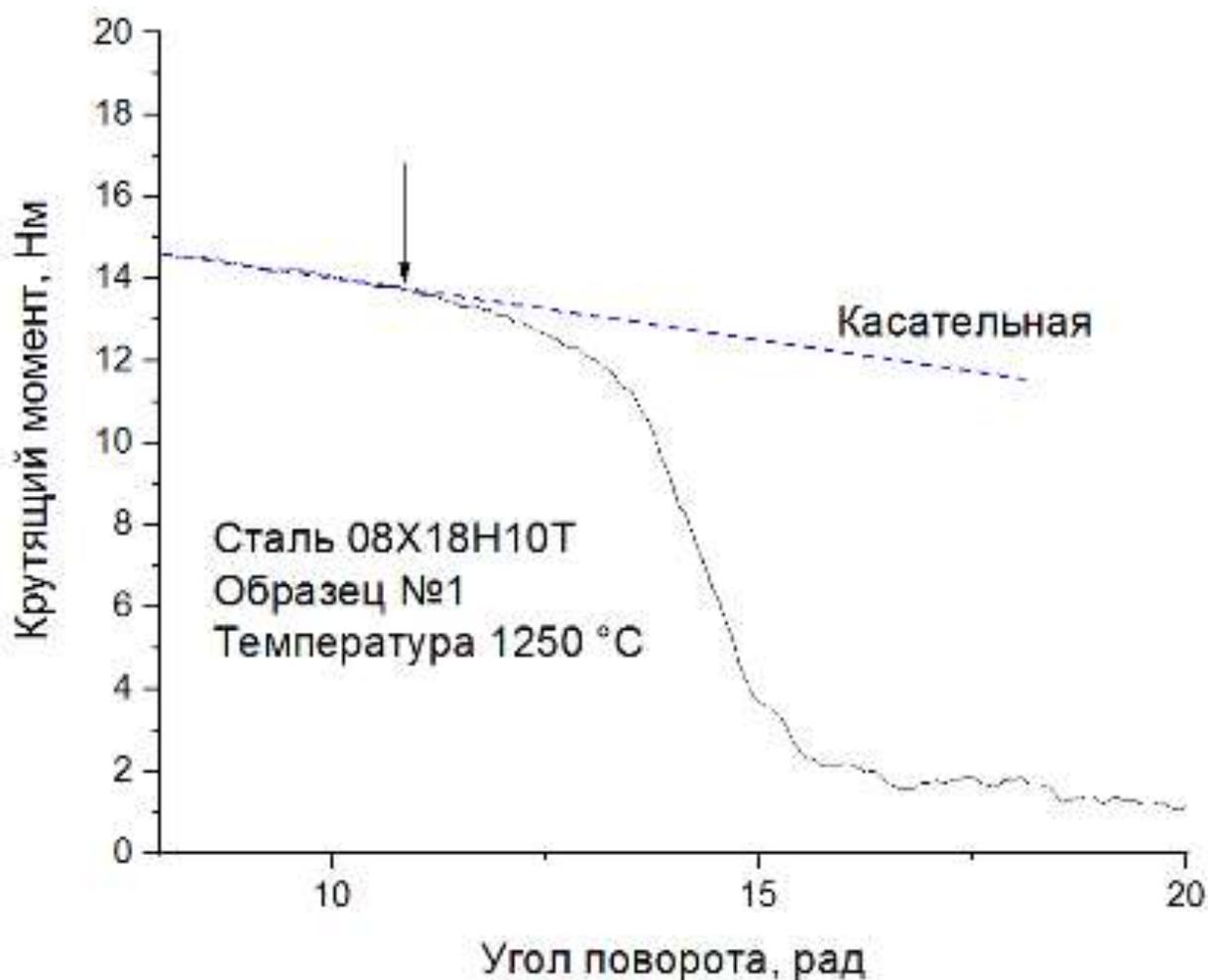


Рисунок 2.19 – Определение момента начала разрушения

За момент начала разрушения образца принят момент отрыва кривой деформации от касательной, проведенной к ниспадающему участку, связанному с деформационным разупрочнением (рисунок 2.19).

На рисунке 2.20 представлены результаты испытаний на кручение – экспериментальные кривые кручения в координатах интенсивность деформации-интенсивность напряжений. Фото деформированных образцов представлены на рисунке 2.21.

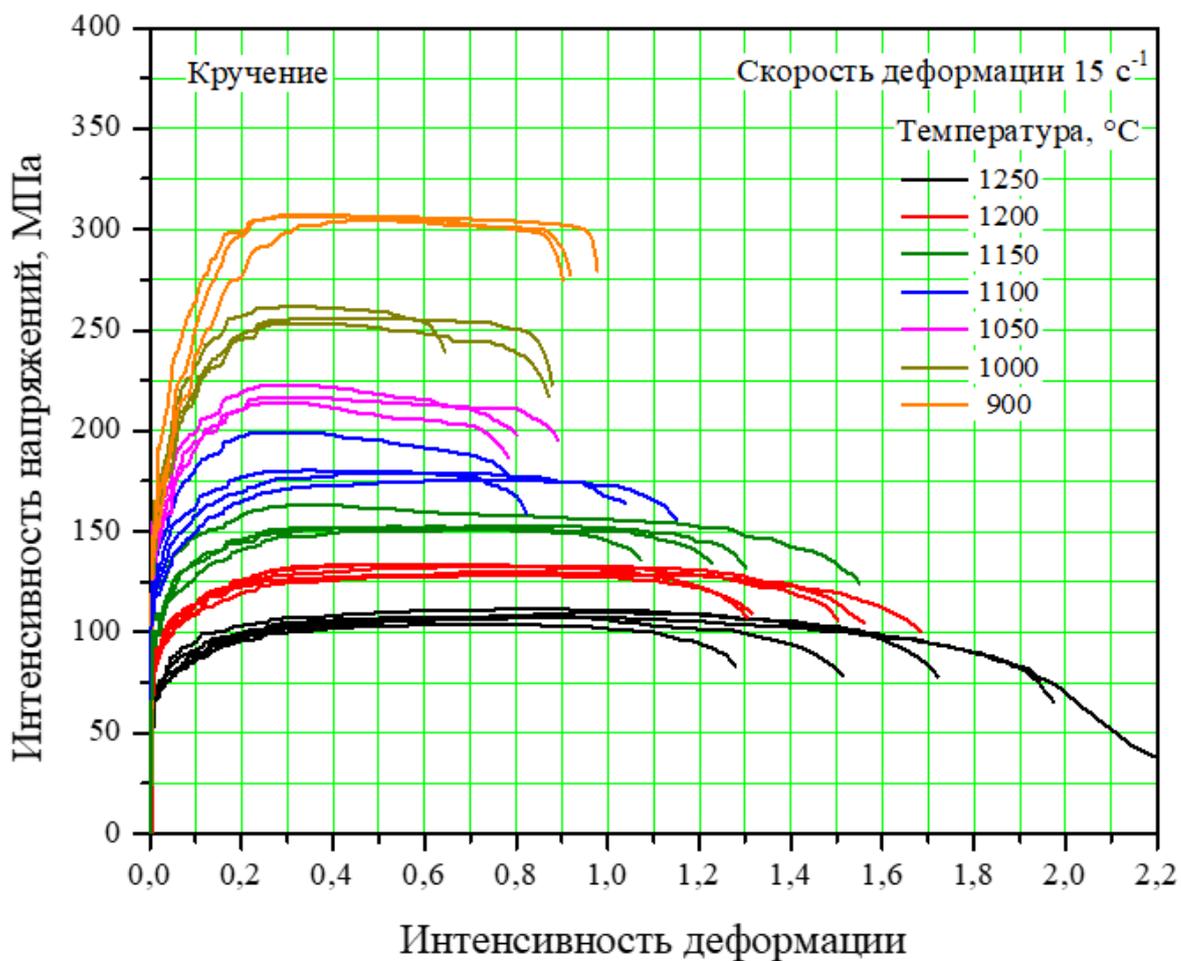


Рисунок 2.20 – Кривые деформации кручением



Рисунок 2.21 – Образцы после испытаний на кручение

Отмечается более высокая, по сравнению с растяжением, воспроизводимость кривых деформирования и величин предельной пластичности. Наибольший разброс величин пластичности наблюдается при высоких температурах.

Кривые деформирования представлены преимущественно стадией установившихся напряжений (небольшое разупрочнение обусловлено деформационным разогревом), предваряемой деформационным упрочнением и завершающейся интенсивным разупрочнением, обусловленным макроскопическим разрушением. Момент перехода к последней стадии принят за предельную величину пластической деформации при кручении.

Зависимость предельной пластичности от температуры испытания приведена на рисунке 2.22. Линии на графике построены по методике, приведенной для растяжения. Минимум пластичности наблюдается при температуре 1000-1150 °С.

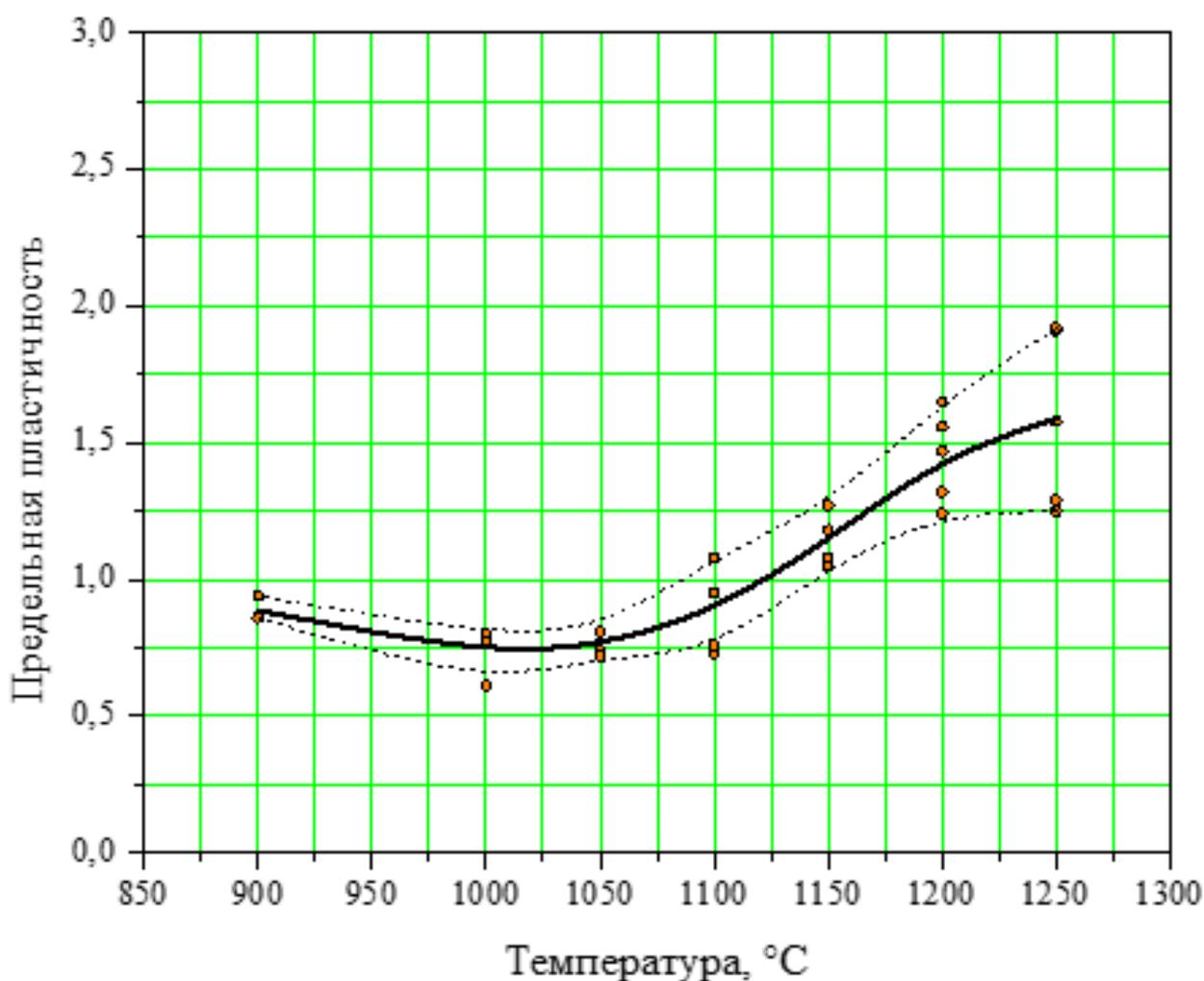


Рисунок 2.22 – Зависимость предельной деформации при кручении от температуры испытания

Согласно рисунку 2.22 произведен пересчет интенсивности деформаций при разрушении в предельные обороты по формуле:

$$n = 1,1\varepsilon; \quad (2.16)$$

где n – количество кручений;

ε – интенсивность деформации, вычисленная по формуле (2.11).

Полученные таким образом данные представлены в таблице 2.1 и на рисунке 2.23.

Таблица 2.1 – Величины предельных оборотов* в испытаниях кручением

| Температура испытания, °С | Предельные обороты, об. | | | |
|---------------------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|------------------|
| | Отдельные испытания | Минимальное значение | Максимальное значение | Среднее значение |
| 1250 | 2,1 | 1,4 | 2,1 | 1,7 |
| | 1,7 | | | |
| | 1,4 | | | |
| | 1,4 | | | |
| | 2,1 | | | |
| 1200 | 1,6 | 1,4 | 1,8 | 1,6 |
| | 1,8 | | | |
| | 1,4 | | | |
| | 1,7 | | | |
| | 1,5 | | | |
| 1150 | 1,2 | 1,2 | 1,4 | 1,3 |
| | 1,4 | | | |
| | 1,3 | | | |
| | 1,2 | | | |
| 1100 | 0,8 | 0,8 | 1,2 | 1 |
| | 1,2 | | | |
| | 0,8 | | | |
| | 1,0 | | | |
| 1050 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,8 |
| | 0,8 | | | |
| | 0,9 | | | |
| 1000 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0,8 |
| | 0,8 | | | |

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0,7 | | | |
| 900 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,0 |
| | 0,9 | | | |
| | 1,0 | | | |

*до начала процесса макроскопического разрушения образцов.

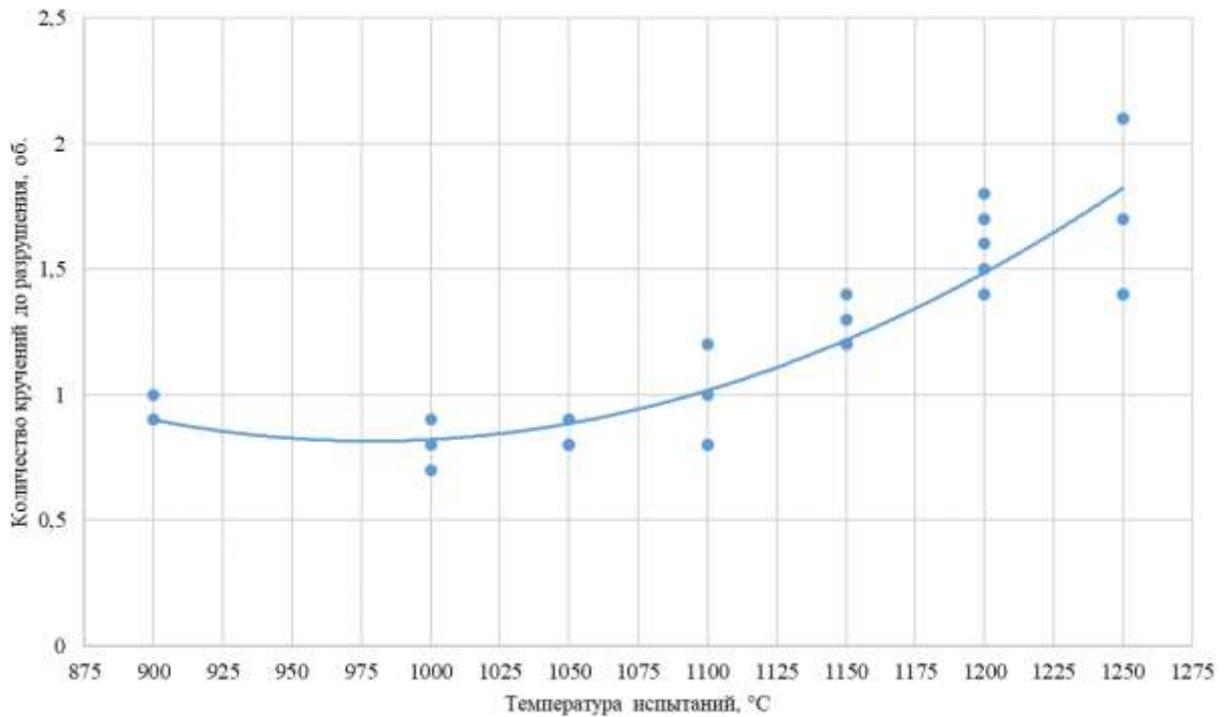


Рисунок 2.23 – Пластичность стали 08X18H10T при различной температуре

Усредненные значения количества оборотов до разрушения в зависимости от температуры испытания образцов, вырезанных из НЛЗ из стали марки 08X18H10T, приведены на рисунке 2.24.

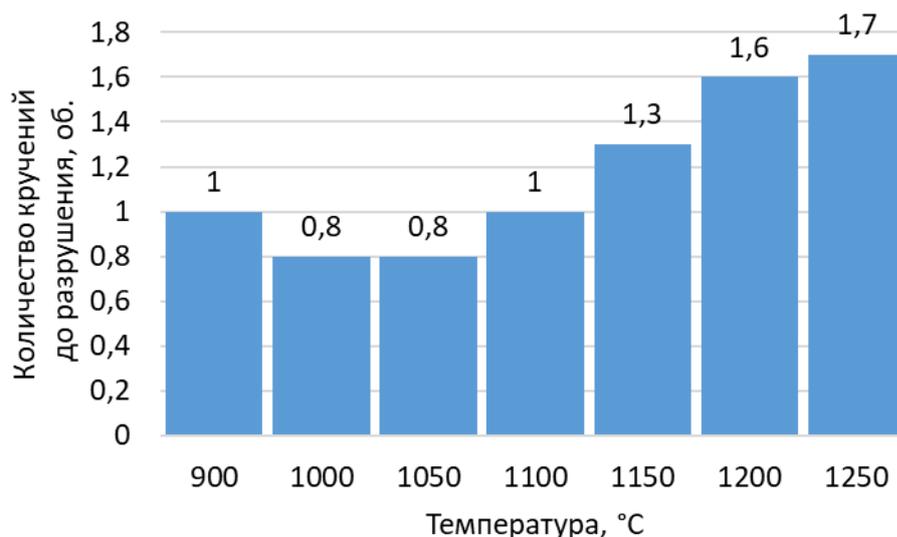


Рисунок 2.24 – Зависимость усредненного количества кручений до разрушения от температуры испытания образцов из стали марки 08X18H10T

Для более наглядного анализа изменения пластичности при горячем кручении построена гистограмма отклонений показателей пластичности относительно оптимального значения в исследуемом интервале температур (рисунок 2.25).

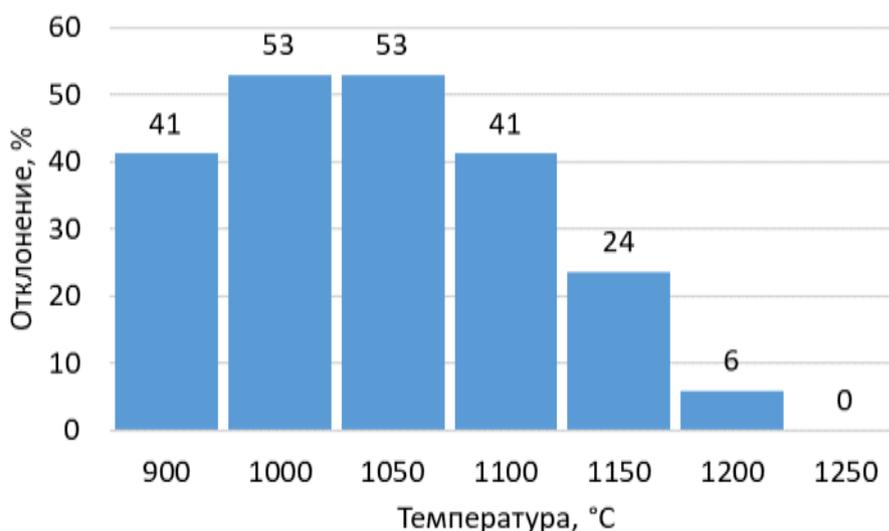


Рисунок 2.25 – Зависимость относительного отклонения показателей пластичности относительно оптимального значения от температуры испытания образцов из стали марки 08X18H10T

Из анализа гистограммы следует, что если считать допустимым отклонение $\pm 10\%$ от оптимального значения, то температурный диапазон максимальной технологической пластичности для стали марки 08X18H10T перед прошивкой начинается от 1200 °С и заканчивается при 1250 °С (при среднем количестве кручений до разрушения 1,7 оборотов).

Сопоставление данных о реологии стали марки 08X18H10T (образцы от НЛЗ и гильзы) в зависимости от вида напряженного состояния осуществлено путем сравнения истинных кривых деформирования при сжатии, растяжении и кручении. Кривые деформирования при фиксированных температурах усреднены и приведены на рисунке 2.26.

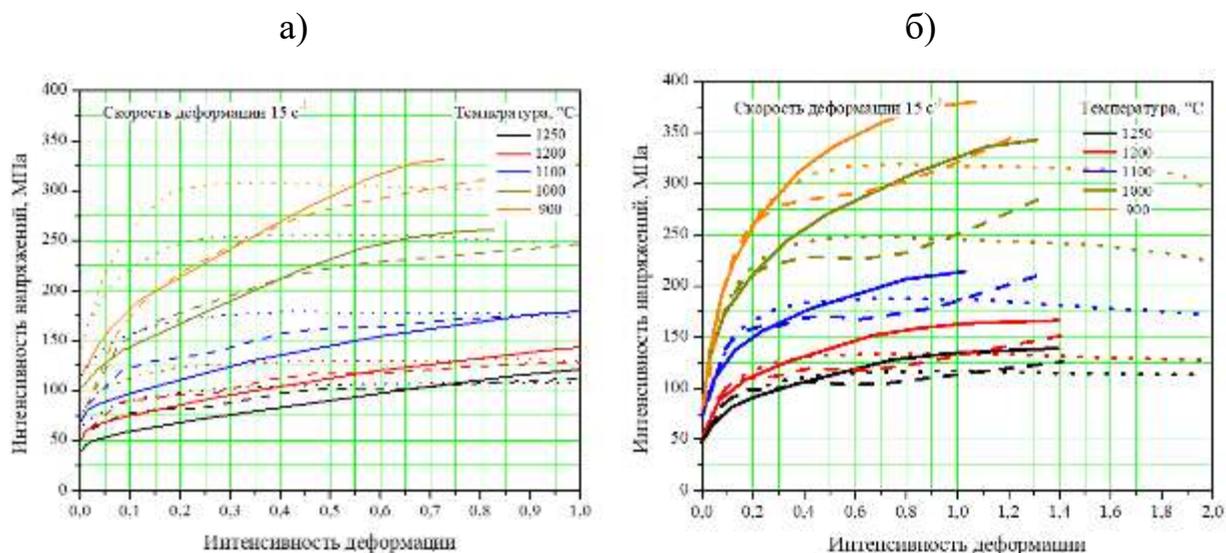


Рисунок 2.26 – Сопоставление истинных кривых деформирования при сжатии (-----), растяжении (————) и кручении (.....): а) НЛЗ, б) гильза

Из рисунка 2.26 видно, что у НЛЗ наибольший уровень напряжений деформирования наблюдается в испытаниях кручением, в то время как в испытаниях сжатием и растяжением уровень напряжений сопоставим, и преимущественно ниже, чем при кручении. Наиболее интенсивное деформационное разупрочнение наблюдается при растяжении; при сжатии оно ниже, в то время как при кручении преобладают установившиеся напряжения (нет упрочнения). Наблюдаемые эффекты, вероятно, обусловлены

совокупным влиянием неоднородности и деформационной анизотропии непрерывнолитой заготовки.

В отличие от НЛЗ у гильзы начальные участки кривых деформирования (до 0,2 единиц деформации) практически совпадают (не зависят от вида нагружения). Возможными причинами дальнейшего расхождения кривых деформирования могут быть:

- искажение вида кривой деформирования при сжатии, обусловленного влиянием сил трения (в частности повышение напряжений при деформациях свыше 0,8);

- неоднородность нагрева и деформации образцов на растяжение;

- локализация пластической деформации в шейке образца на растяжение, приводящая к повышению скорости деформации и изменению вида напряженного состояния к более трехосному;

- возможные неточности выбора коэффициентов при пересчете кривых деформирования кручением.

В качестве нижней оценки величин пластичности при сжатии использованы расчетные значения интенсивности деформации для образцов с дефектами типа пор на поверхности. Поскольку в условиях одноосного сжатия не были получены значительного размера макротрещины, невозможно однозначно утверждать, что наблюдаемые поры соответствуют моменту начала разрушения. Их происхождение может быть обусловлено исходными дефектами заготовки. Сопоставление данных о предельной пластичности материала при всех трех видах напряженного состояния приведено на рисунке 2.27.

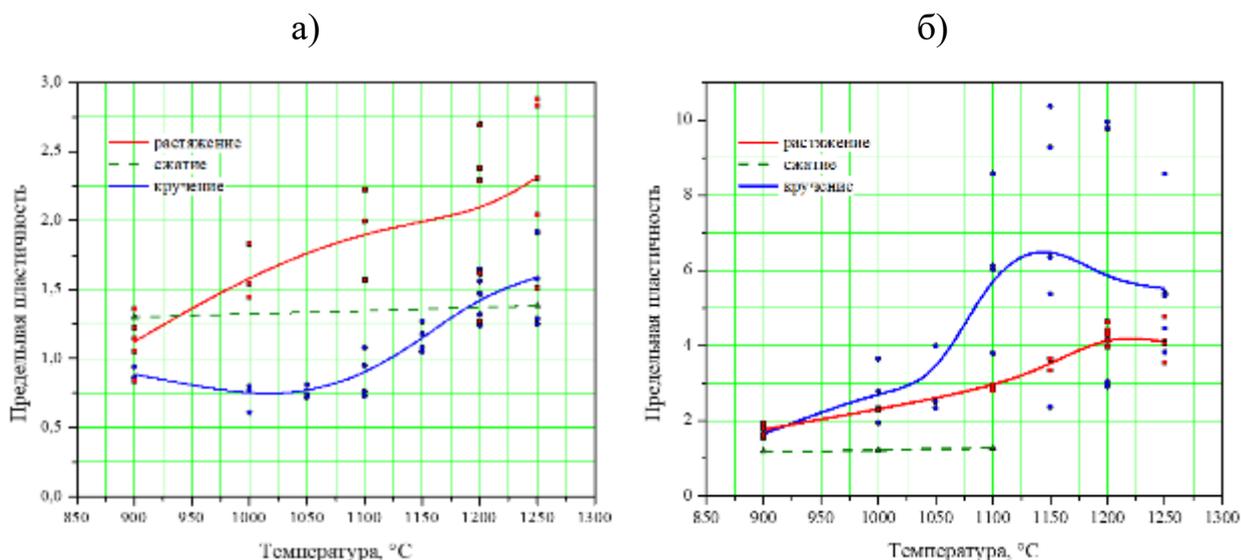


Рисунок 2.27 – Сопоставление предельных деформаций при сжатии, растяжении и кручении: а) НЛЗ; б) гильза

Отметим следующие закономерности полученных результатов:

Непрерывно-литая заготовка:

- максимальная предельная пластичность при кручении и растяжении достигается при различных температурах (1200 и 1250 °C соответственно);
- пластичность при растяжении выше, чем при кручении;
- пластичность при кручении минимальна в диапазоне температур 1000-1050 °C;
- оптимальным для реализации деформации является диапазон температур 1200-1250 °C.

Гильза:

- максимальная предельная пластичность при кручении и растяжении достигается при различных температурах (1150 и 1200 °C соответственно);
- пластичность при растяжении и кручении в диапазоне температур 900-1050 °C практически совпадает;
- пластичность при температуре 1250 °C ниже, чем при температуре 1200 °C для растяжения и кручения;

– если предполагать, что наблюдаемые при сжатии поры соответствуют моменту начала разрушения, то пластичность при температуре 900 °С практически не зависит от вида напряженного состояния для всех исследованных видов нагружения. Наблюдаемая аномально низкая пластичность при одноосном сжатии по сравнению с растяжением и кручением не может быть объяснена без дополнительных исследований, например, при плоской деформации сжатием, при которой достижима более высокая степень деформации;

– оптимальным для реализации деформации является диапазон температур 1150-1200 °С.

На рисунках 2.28-2.30 приведено сравнение кривых деформирования, полученных для образцов из материалов НЛЗ и гильзы при сжатии, растяжении и кручении.

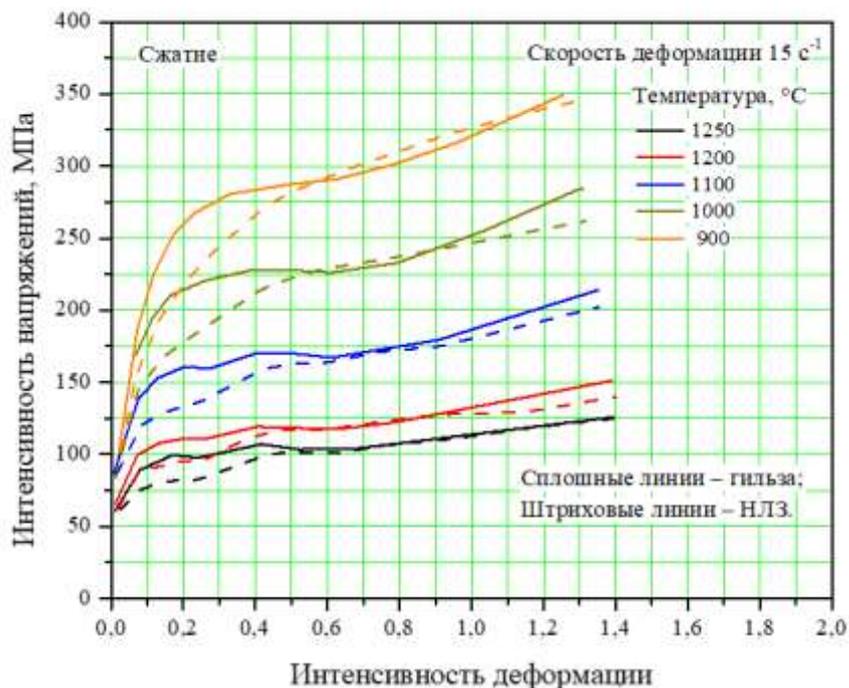


Рисунок 2.28 – Сравнение кривых деформирования сжатием образцов из НЛЗ и гильзы

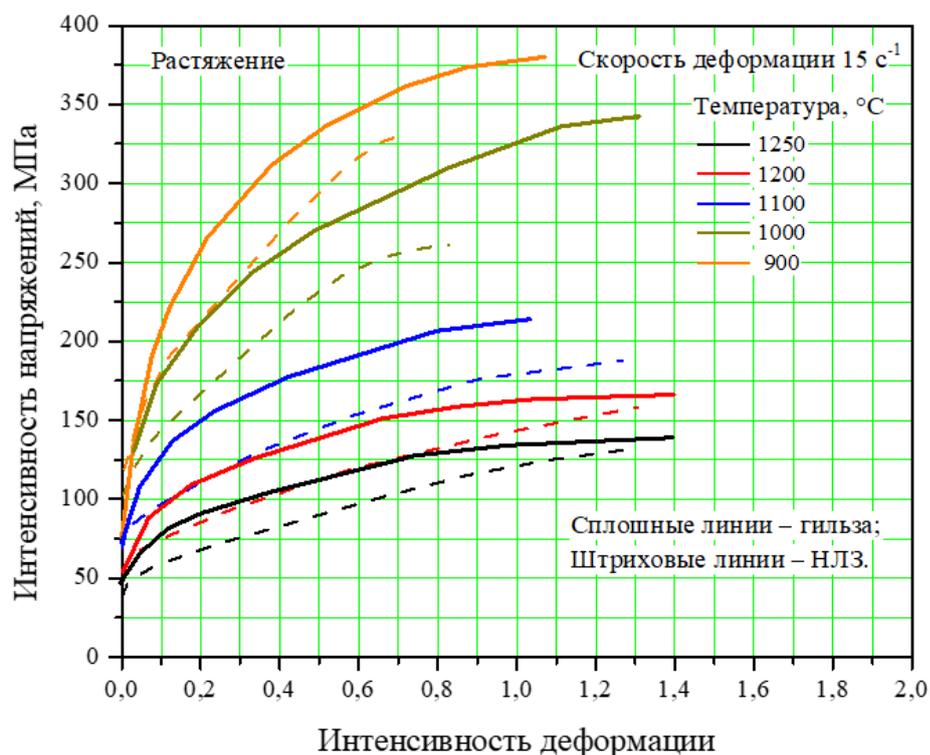


Рисунок 2.29 – Сравнение кривых деформирования растяжением образцов из НЛЗ и гильзы

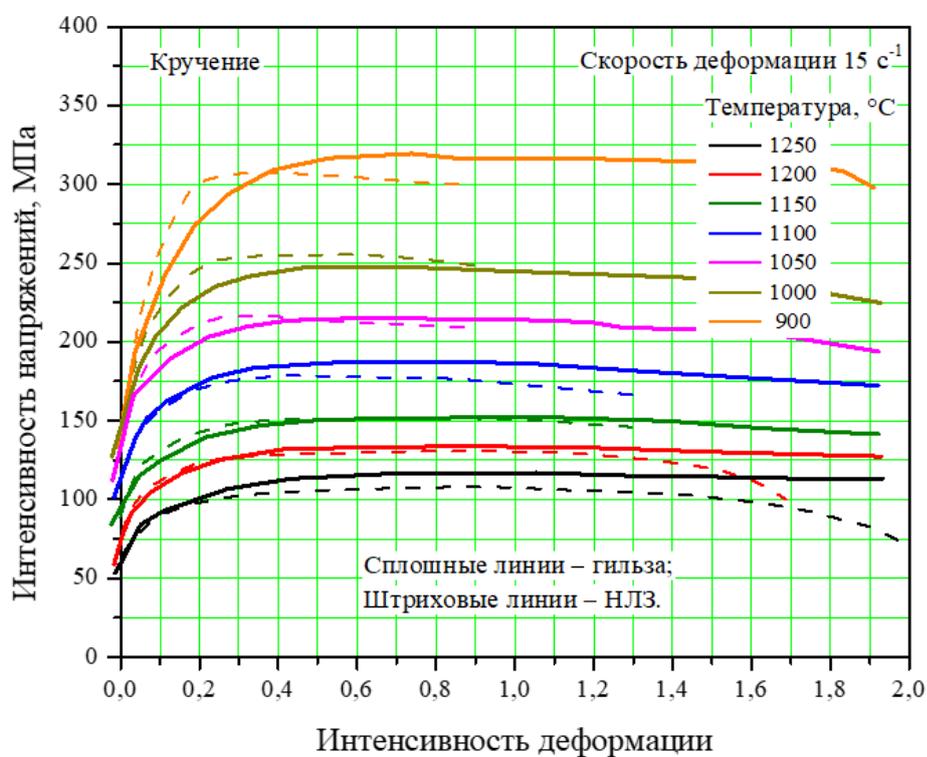


Рисунок 2.30 – Сравнение кривых деформирования кручением образцов из НЛЗ и гильзы

При сжатии предел текучести выше у материала гильзы, а у НЛЗ наблюдается менее выраженная стадийность (большая монотонность) кривых деформирования; уровень напряжений для двух материалов сопоставим.

При растяжении наблюдаем закономерно более низкий уровень напряжений у НЛЗ по сравнению с материалом гильзы.

При кручении предел текучести оказывается более высоким у НЛЗ, по сравнению с материалом гильзы. Кривые деформирования для образцов из НЛЗ достигают установившихся значений напряжений и исчерпания пластичности (разрушения) при более низких степенях деформации.

Сопоставление данных по предельной пластичности при растяжении и кручении приведено на рисунках 2.31-2.32.

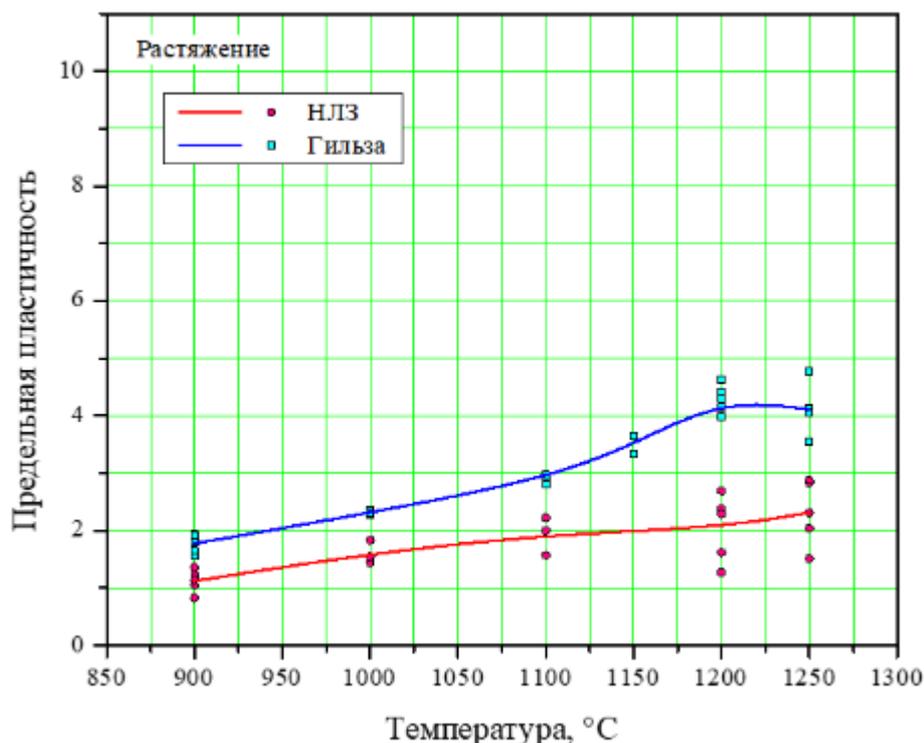


Рисунок 2.31 – Сравнение предельной пластичности при растяжении образцов из НЛЗ и гильзы

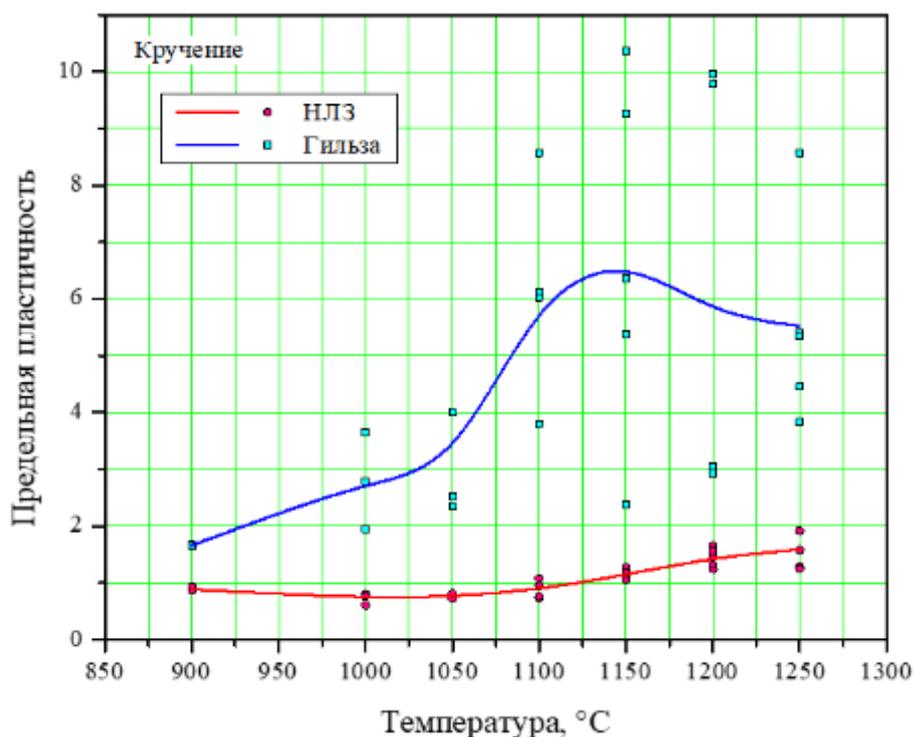


Рисунок 2.32 – Сравнение предельной пластичности при кручении образцов из НЛЗ и гильзы

Отметим значительно более высокую пластичность у материала гильзы по сравнению с НЛЗ, как при растяжении, так и при кручении.

При растяжении данные о пластичности материалов НЛЗ и гильзы имеют одинаковый тренд: рост пластичности с повышением температуры испытания. Наибольшая пластичность при растяжении достигается при температурах 1200-1250 °C.

При кручении наблюдается высокий разброс данных о пластичности материала гильзы. В области оптимальных, с точки зрения тренда температур, наблюдается самый высокий разброс величин пластичности, что усложняет сравнительную интерпретацию результатов. Для НЛЗ аналогичного разброса не наблюдается, и оптимальным с точки зрения пластичности является диапазон температур 1200-1250 °C.

На рисунке 2.33 представлена пластичность непрерывно-литой заготовки и гильзы, а на рисунке 2.34 – зависимость относительного отклонения показателей пластичности.

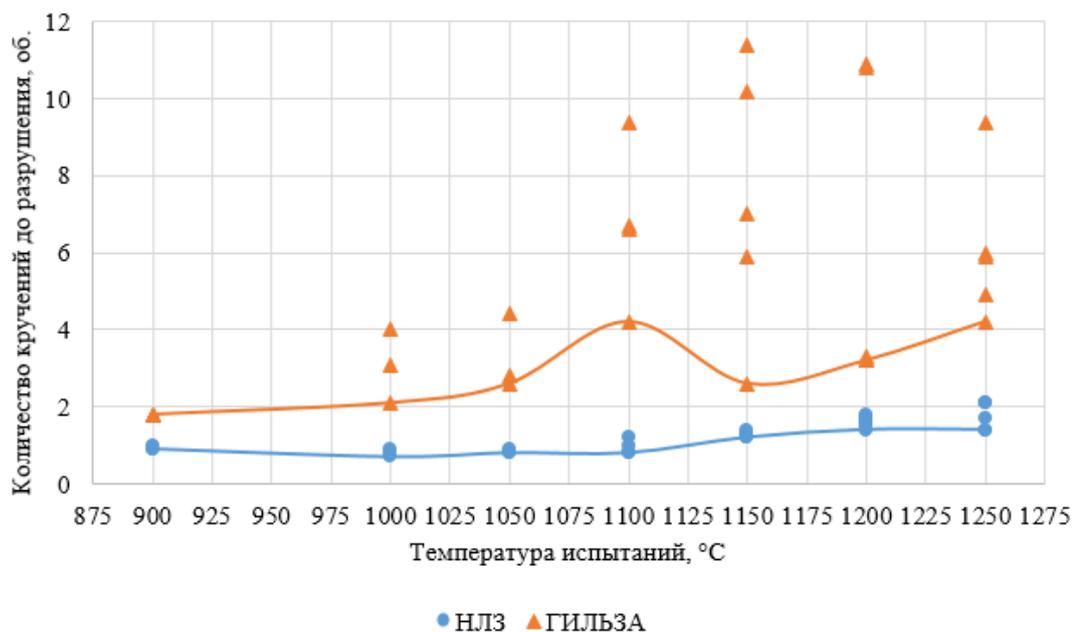


Рисунок 2.33 – Пластичность НЛЗ и гильзы из стали 08X18H10T при различной температуре

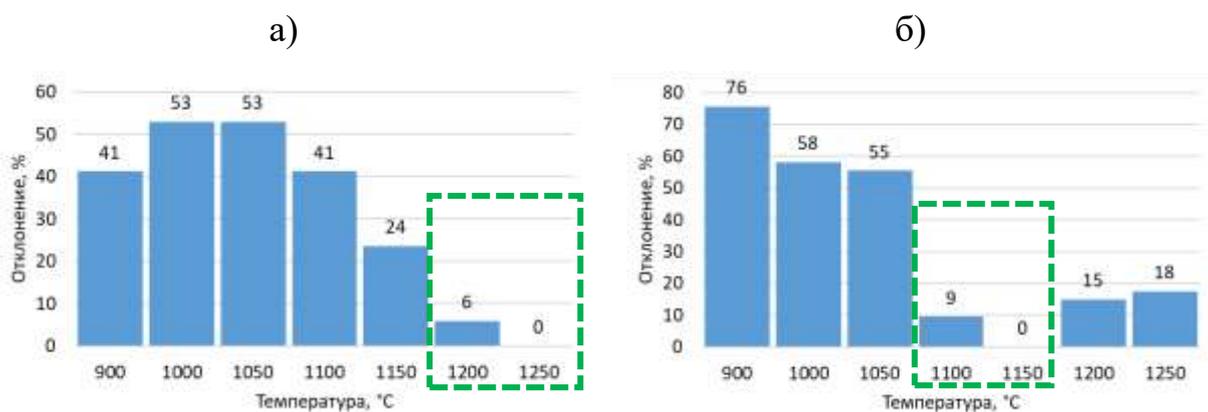


Рисунок 2.34 – Зависимость относительного отклонения показателей пластичности относительно оптимального значения от температуры испытания образцов (НЛЗ, гильза) из стали марки 08X18H10T: а) НЛЗ; б) гильза

Из рисунка 2.34 видно, что температурный диапазон максимальной технологической пластичности для стали марки 08X18H10T: перед прошивкой начинается от 1200 °C и заканчивается при 1250 °C, перед раскаткой начинается от 1100 °C и заканчивается при 1150 °C.

На рисунке 2.35 представлена пластичность различных марок стали: рассматриваемая в данном параграфе сталь марки 08X18H10T (НЛЗ, гильза); и рассматриваемые ранее стали марок 15X13H2 (НЛЗ, ковкая заготовка), 20 и 10ГФБЮ (НЛЗ) [102].

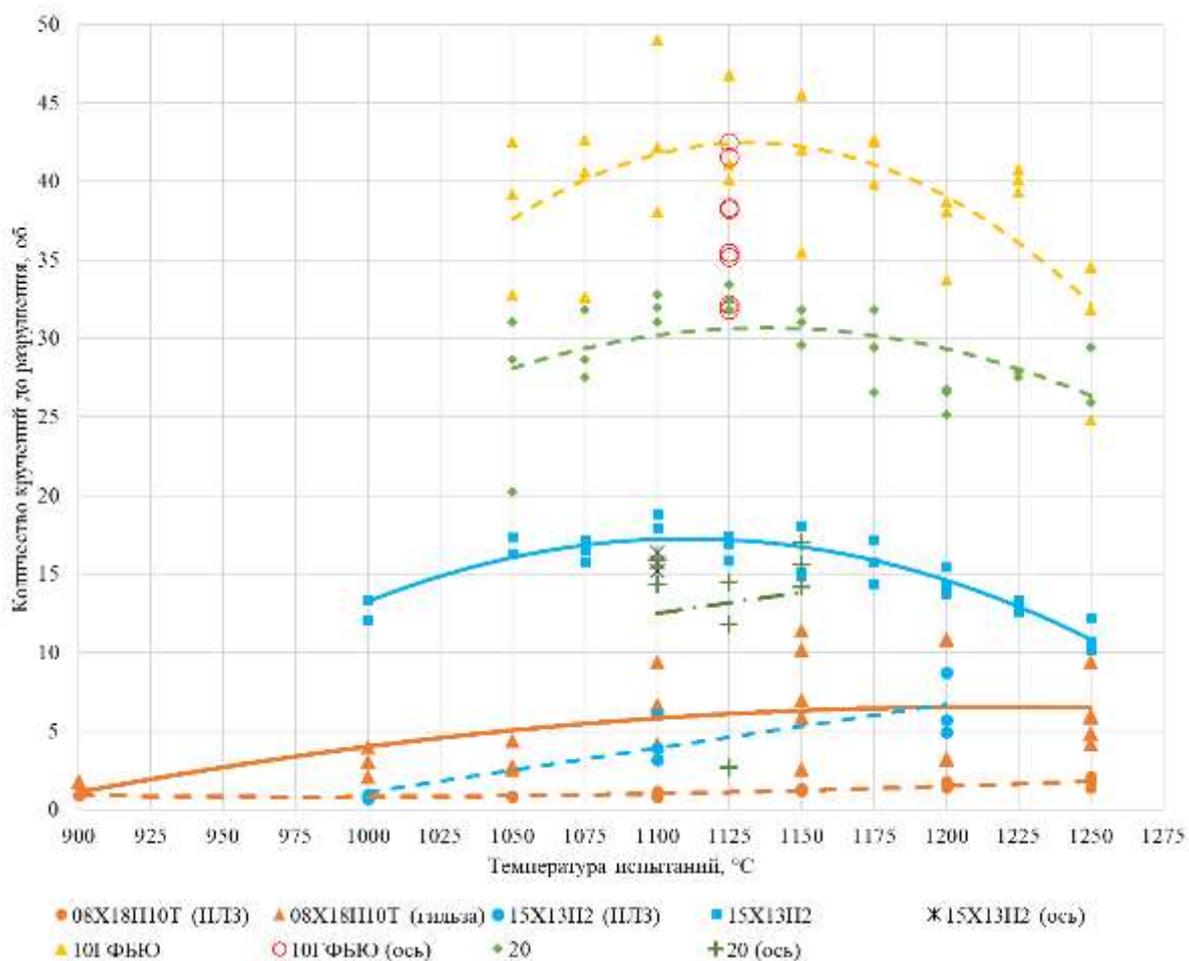


Рисунок 2.35 – Пластичность различных марок и типов стали при различной температуре: НЛЗ (-----), предварительно деформированные образцы (————)

Из рисунка 2.35 видно, что пластичность стали марок 08X18H10T и 15X13H2 возрастает после деформационного упрочнения.

Для НЛЗ из стали марок 20 и 10ГФБЮ проводились сравнительные испытания пластичности отдельно для осевой и периферийной областей. Результаты испытаний показали, что НЛЗ из данных марок стали имеют

существенную неоднородность свойств по поперечному сечению (пластичность значительно ухудшается от периферийных областей к осевой зоне). Сталь марки 15X13H2 в ковном состоянии лишена данного недостатка. Благодаря тому, что заготовка прошла предварительную деформационную обработку – достигнута однородность свойств по поперечному сечению заготовки и ее пластичность возросла более чем в 3 раза. Аналогичная картина характерна и для стали марки 08X18H10T.

Из графика видно, что сталь марки 08X18H10T, имеет наименьшую пластичность из всех испытанных марок стали, а, следовательно, наибольшую склонность к разрушению, поэтому прошивку непрерывно-литых заготовок из данной марки стали рекомендуется осуществлять при минимальных значениях обжатий перед носком оправки (не более 4-6 %).

В рамках исследования проведена оценка макроструктуры заготовки и изменения микроструктуры от заготовки до термообработанной трубы из стали марки 08X18H10T, согласно которым в структуре НЛЗ обнаружены дефекты: центральная пористость и подкорковые пузыри, а в центральной части заготовки присутствуют скопления неметаллических включений, которые трансформируются в горячекатаной трубе в грубые строчки нитридов, и отсутствующие в термообработанной трубе.

Исследована реология и пластичность образцов из стали марки 08X18H10T, изготовленных из НЛЗ. Установлена аналогичная материалу гильзы монотонная зависимость реологических свойств материала от температуры (прочность материала повышается при понижении температуры). Стадийность кривых деформирования у НЛЗ менее выражена, чем у гильзы. У материала НЛЗ наблюдаются более высокие значения пределов текучести при кручении по сравнению с другими видами воздействия (сжатие и растяжение, для которых напряжения сопоставимы), и в сравнении со свойствами материала гильзы. Интенсивность упрочнения у НЛЗ убывает в зависимости от типа испытания в порядке: растяжение, сжатие,

кручение (для последнего наблюдается преобладание стадии деформирования с установившимися напряжениями). Для материала гильзы различие между кривыми деформирования при растяжении, сжатии и кручении минимально и обусловлено преимущественно особенностями методики проведения испытаний.

Напряжения деформирования в испытаниях сжатием и кручением для материалов НЛЗ и гильзы сопоставимы, а различия в пределе текучести не столь значительны. В то же время, в испытаниях на растяжение наблюдается существенно более низкий уровень напряжений и их высокий разброс для материала НЛЗ по сравнению с материалом гильзы. Пластичность НЛЗ также существенно ниже по сравнению с пластичностью гильзы. Наблюдаемые эффекты в реологии и пластичности, в совокупности с формой деформированных образцов (наличие эллиптичности при растяжении и сжатии, поры на поверхности образцов после растяжения), указывают на наличие анизотропии и неоднородного распределения пор в объеме НЛЗ.

Пластичность НЛЗ ниже, чем у гильзы, как при растяжении, так и при кручении. При растяжении данные для материалов НЛЗ и гильзы имеют одинаковый тренд: рост пластичности с повышением температуры испытания и достижением максимума при 1200-1250 °С. При кручении образцов из НЛЗ, наблюдается незначительный разброс данных о пластичности, пик пластичности приходится на диапазон температур 1200-1250 °С, минимум на 1000-1050 °С. Для гильзы наблюдается высокий разброс данных о пластичности, достигающий максимума на пике пластичности по тренду (1150 °С).

Таким образом, по итогам выполнения работы по исследованию пластичности образцов из стали марки 08X18H10T с использованием установки «GLEEBLE 3800» сформулированы следующие рекомендации:

1. Температура максимальной технологической пластичности НЛЗ, перед прошивкой на ТПА 159-426, находится в диапазоне 1200-1250 °С;

2. Температура максимальной технологической пластичности гильзы, перед раскаткой на непрерывном стане МРМ, находится в диапазоне 1100-1150 °С;

3. Использование для винтовой прошивки предварительно деформированных заготовок предпочтительнее использования НЛЗ;

4. Прошивку НЛЗ необходимо осуществлять при минимально возможных значениях обжатия перед носком оправки, которые для ТПА 159-426 составляют 4-6 %;

2.3 Построение диаграмм пластичности марки стали 08X18H10T

Эмпирические коэффициенты, входящие в формулу (2.6), определяются экспериментально с использованием плана полного факторного эксперимента ПФЭ 2^2 [108]. В качестве основных факторов при этом учитываются температура металла или сплава θ и показатель напряженного состояния $\frac{\sigma}{T}$. Соответственно, линеаризованными значениями факторов будут $X_1 = \ln \frac{\theta}{1000}$ и $X_2 = \frac{\sigma}{T}$. При планировании эксперимента и обработке полученных результатов удобно пользоваться не физическими, а кодированными значениями факторов. Переход от физических факторов к кодированным осуществляется по формуле

$$x_i = \frac{X_i - X_i^0}{|X_i^{max} - X_i^{min}|} \quad (2.17)$$

где x_i – кодированное значение i -го фактора;

X_i – физическое значение i -го фактора;

X_i^0 – физическое значение i -го фактора на основном уровне (в середине исследуемого диапазона);

X_i^{max} – физическое значение i -го фактора, соответствующее верхней границе исследуемого диапазона;

X_i^{min} – физическое значение i -го фактора, соответствующее нижней границе исследуемого диапазона.

Интервалы варьирования и кодированные значения факторов в проводимом эксперименте представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Значение уровней факторов в физических и кодированных величинах

| Показатели | X_1 | x_1 | X_2 | x_2 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| | физич. | кодир. | физич. | кодир. |
| Верхний уровень | 0,22 | +1 | 0,58 | +1 |
| Нижний уровень | -0,11 | -1 | 0 | -1 |

Требуемые уровни температуры образцов обеспечиваются их регулируемым нагревом в процессе деформации. Нижний уровень диапазона варьирования показателя напряженного состояния соответствует опытам на кручение образцов. Верхний уровень диапазона варьирования показателя напряженного состояния соответствует опытам на растяжение образцов.

Матрица полного факторного эксперимента для рассматриваемого случая приведена в виде таблицы 2.3. Каждый опыт повторялся минимум три раза.

Таблица 2.3 – Матрица полного факторного эксперимента ПФЭ 2^2

| Номер опыта | x_0 | x_1 | x_2 | x_1x_2 |
|-------------|-------|-------|-------|----------|
| 1 | + | - | - | + |
| 2 | + | + | - | - |
| 3 | + | - | + | - |
| 4 | + | + | + | + |

Для определения значений эмпирических коэффициентов проведены эксперименты с использованием комплекса Gleeble 3800. При этом с целью варьирования напряженного состояния образцы подвергались одноосному растяжению ($\frac{\sigma}{T} = \sqrt{3}$), кручению ($\frac{\sigma}{T} = 0$) и сжатию ($\frac{\sigma}{T} = -\sqrt{3}$) в диапазоне температур от 900 °С до 1250 °С.

Для построения диаграмм пластичности по полученным данным необходимо определить накопленную степень деформации сдвига до разрушения в проведенных экспериментах. Рассмотрим методику ее определения применительно к опытам на осадку цилиндрических образцов.

В ходе эксперимента замеряется высота образца до деформации (h_0) и после деформации (h_1). Если направление деформации совместить с осью z , то степень относительной деформации сжатия можно вычислить по формуле:

$$\varepsilon_{zz} = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \quad (2.18)$$

Если учесть условие несжимаемости и то, что при осадке цилиндрических образцов $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$, получим $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = -\frac{\varepsilon_{zz}}{2}$.

Используем полученную степень относительной деформации сжатия для подсчета значения пластичности в момент разрушения образца в соответствие с:

$$\Lambda_p = \sqrt{3}\varepsilon_{zz} \quad (2.19)$$

Эквивалентная деформация ε при кручении цилиндрического образца определяется по выражению [104]:

$$\varepsilon = \frac{d}{2L}\theta \quad (2.20)$$

где $d = 10$ мм – диаметр рабочей зоны образца; $L = 20$ мм – длина рабочей зоны,
 $\theta = 2\pi N$ – угол поворота, N – число оборотов.

Исходя из размеров образца:

$$\varepsilon = 0,144 \cdot \theta \quad (2.21)$$

Пластичность образцов при растяжении оценивалась по величине относительного поперечного сужения при разрыве ψ . Пересчет сужения в предельную деформацию осуществлен по стандартной формуле:

$$\varepsilon = \ln \frac{1}{1 - \psi}. \quad (2.22)$$

Величина осевой деформации ε_{zz} рассчитывается, исходя из относительного сужения образца по формуле с учетом радиальной деформации ε_{yy} :

$$\varepsilon_{zz} = 2\varepsilon_{yy} \quad (2.23)$$

Полученные результаты представлены в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4 – Результаты испытаний образцов на растяжение

| Вид заготовки | № п/п | Температура испытания, °С | Ресурс пластичности Λ_p |
|---------------|-------|---------------------------|---------------------------------|
| НЛЗ | 1 | 900 | 0,7 |
| | 2 | 1000 | 0,83 |
| | 3 | 1100 | 1,27 |
| | 4 | 1200 | 1,31 |
| | 5 | 1250 | 1,27 |
| Гильза | 1 | 900 | 1,08 |

| | | | |
|--|---|------|------|
| | 2 | 1000 | 1,3 |
| | 3 | 1100 | 1,05 |
| | 4 | 1200 | 1,4 |
| | 5 | 1250 | 1,4 |

Таблица 2.5 – Результаты испытаний образцов на кручение

| Вид заготовки | № п/п | Температура испытания, °С | Ресурс пластичности Λ_p |
|---------------|-------|------------------------------|------------------------------------|
| НЛЗ | 1 | 900 | 0,85 |
| | 2 | 1000 | 0,9 |
| | 3 | 1100 | 1,3 |
| | 4 | 1200 | 1,7 |
| | 5 | 1250 | 1,95 |
| Гильза | 1 | 900 | 1,9 |
| | 2 | 1000 | 1,92 |
| | 3 | 1100 | 1,92 |
| | 4 | 1200 | 1,93 |
| | 5 | 1250 | 1,93 |

Испытания образцов из НЛЗ и гильзы на сжатие производились при температурах: 900, 1000, 1100, 1200 и 1250 °С. В явном виде при предельных условиях испытаний разрушения (трещины) получено не было деформация сжатием для всех образцов при всех температурах осуществлялась до максимальной величины $\varepsilon = 1,3-1,4$.

Поскольку значения степени деформации при сжатии не соответствуют моменту разрушения образцов, то проведение регрессионного анализа проводилось по результатам испытаний на растяжение и кручение.

Полученные результаты эксперимента занесены в таблицу 2.6.

Таблица 2.6 – Таблица кодированных значений факторов и средних значений отклика

| Вид заготовки | Номер опыта | x_0 | x_1 | x_2 | x_1x_2 | \bar{Y} |
|---------------|-------------|-------|-------|-------|----------|-----------|
| НЛЗ | 1 | + | - | - | + | -0,17 |
| | 2 | + | + | - | - | 0,67 |
| | 3 | + | - | + | - | -0,36 |
| | 4 | + | + | + | + | 0,24 |
| Гильза | 1 | + | - | - | + | 0,64 |
| | 2 | + | + | - | - | 0,66 |
| | 3 | + | - | + | - | 0,08 |
| | 4 | + | + | + | + | 0,34 |

где \bar{Y} – среднее значение отклика, полученное из испытаний на растяжение и кручение.

Далее необходимо определить коэффициенты уравнения (2.6). Эти коэффициенты определяются с помощью метода наименьших квадратов [92]. Этот метод предполагает дифференцирование полученных уравнений по искомым коэффициентам и приравнивание результатов к нулю. В результате получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} nA_0 + A_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + A_2 \sum_{i=1}^n x_{2i} + A_{12} \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i} = \sum_{i=1}^n y_i \\ A_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} + A_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + A_2 \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i} + A_{12} \sum_{i=1}^n x_{1i}^2x_{2i} = \sum_{i=1}^n x_{1i}y_i \\ A_0 \sum_{i=1}^n x_{2i} + A_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i} + A_2 \sum_{i=1}^n x_{2i}^2 + A_{12} \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i}^2 = \sum_{i=1}^n x_{2i}y_i \\ A_0 \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i} + A_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2x_{2i} + A_2 \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i}^2 + A_{12} \sum_{i=1}^n x_{1i}^2x_{2i}^2 = \sum_{i=1}^n x_{1i}x_{2i}y_i \end{cases} \quad (2.24)$$

где n – число опытов.

Для НЛЗ получается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} 4 \cdot A_0 + 0,236 \cdot A_1 + 1,154 \cdot A_2 + 0,068 \cdot A_{12} = 0,667 \\ 0,236 \cdot A_0 + 0,122 \cdot A_1 + 0,068 \cdot A_2 + 0,035 \cdot A_{12} = 0,323 \\ 1,154 \cdot A_0 + 0,068 \cdot A_1 + 0,666 \cdot A_2 + 0,039 \cdot A_{12} = 0,100 \\ 0,068 \cdot A_0 + 0,035 \cdot A_1 + 0,039 \cdot A_2 + 0,020 \cdot A_{12} = 0,090 \end{cases} \quad (2.25)$$

Из этой системы можно вычислить значения коэффициентов:

$$\begin{cases} A_0 = 0,1 \\ A_1 = 2,56 \\ A_2 = -0,45 \\ A_{12} = -1,3 \end{cases} \quad (2.26)$$

В результате уравнение (2.6) примет вид:

$$Y = 0,1 + 2,56 \cdot X_1 - 0,45 \cdot X_2 - 1,3 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (2.27)$$

После обратной замены получаем выражение пластичности для НЛЗ из стали марки 08X18H10T:

$$\Lambda_p = 1,1 \cdot \left(\frac{\theta}{1000}\right)^{2,56-1,3} \frac{\sigma}{T} \exp\left(-0,45 \frac{\sigma}{T}\right) \quad (2.28)$$

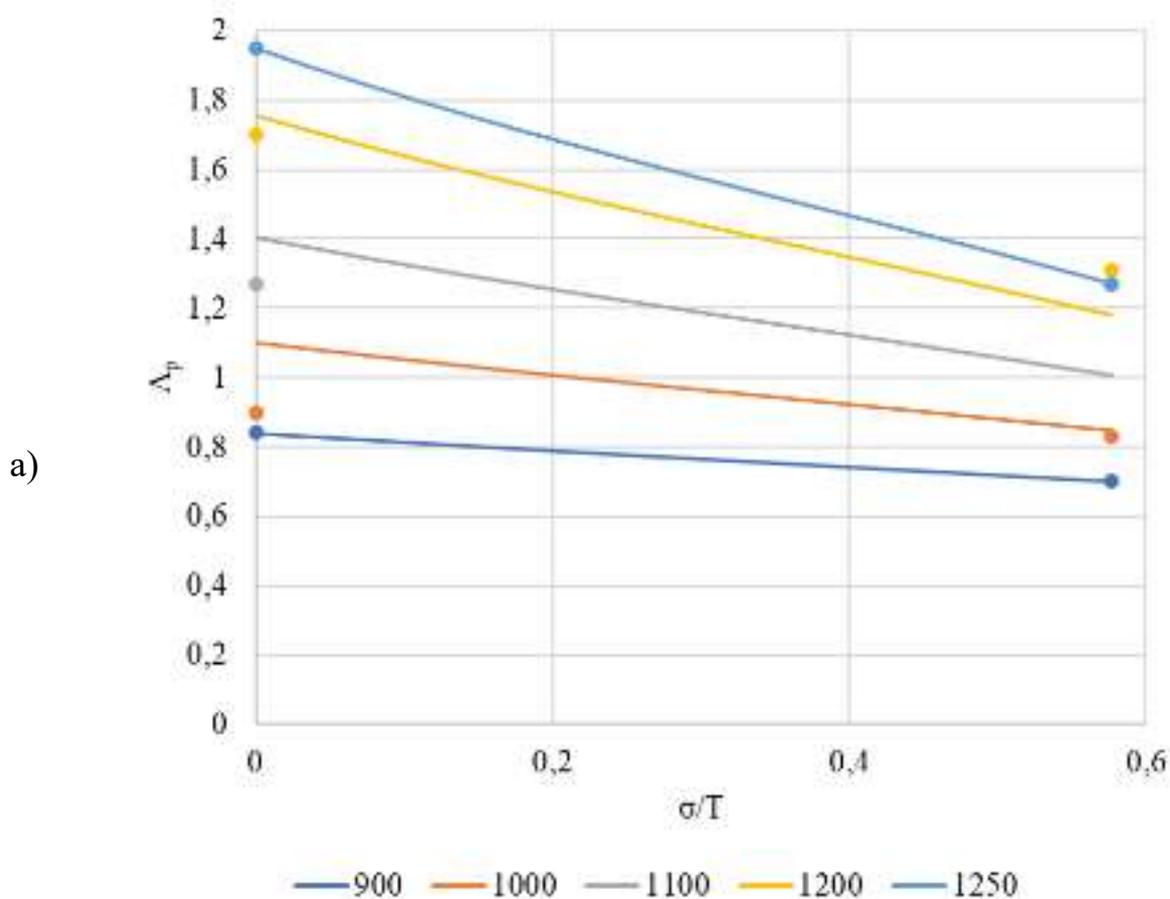
Система уравнений для гильзы будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} 4 \cdot A_0 + 0,236 \cdot A_1 + 1,154 \cdot A_2 + 0,068 \cdot A_{12} = 1,713 \\ 0,236 \cdot A_0 + 0,122 \cdot A_1 + 0,068 \cdot A_2 + 0,035 \cdot A_{12} = 0,146 \\ 1,154 \cdot A_0 + 0,068 \cdot A_1 + 0,666 \cdot A_2 + 0,039 \cdot A_{12} = 0,239 \\ 0,068 \cdot A_0 + 0,035 \cdot A_1 + 0,039 \cdot A_2 + 0,020 \cdot A_{12} = 0,039 \end{cases} \quad (2.29)$$

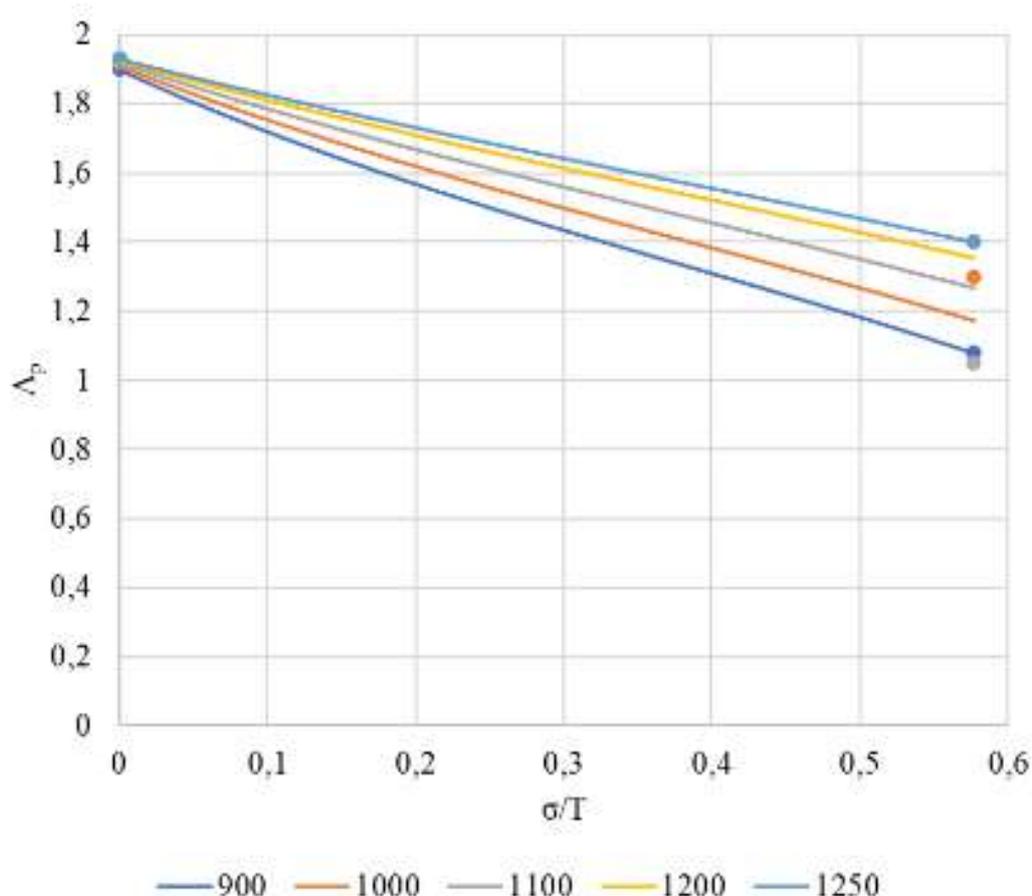
Проведя аналогичные математические преобразования, получаем выражение пластичности для гильзы из стали марки 08Х18Н10Т:

$$\Lambda_p = 1,91 \cdot \left(\frac{\theta}{1000}\right)^{0,05+1,29\frac{\sigma}{T}} \exp\left(-0,84\frac{\sigma}{T}\right) \quad (2.30)$$

По полученным выражениям построены графики изменения пластичности в зависимости от напряженного состояния металла НЛЗ и гильзы (рисунок 2.36). Также на графики нанесены полученные экспериментальные точки, в том числе и полученные в результате испытаний на сжатие.



б)



а) НЛЗ; б) гильза

Рисунок 2.36 – Диаграмма пластичности стали марки 08X18H10T

Аппроксимирующие кривые пластичности для НЛЗ и гильзы из стали марки 08X18H10T обеспечивают высокую сходимость с экспериментальными данными. С использованием результатов испытаний на горячее растяжение и кручение, методом полного факторного эксперимента получены диаграммы пластичности для НЛЗ и гильзы из стали марки 08X18H10T, учитывающие влияние на ее не только показателя напряженного состояния σ/T , но и температуры деформации θ , а также взаимное влияние температуры и показателя напряженного состояния. Полученные диаграммы пластичности позволят оценить также вероятность появления разрушения металла при прессовании. При этом они имеют «пессимистический» характер, так как пластичность стали будет не ниже значений, полученных при испытаниях на

кручение. Также отмечается повышение пластичности стали при повышении температуры испытания.

2.4 Методика прогнозирования прочностных свойств металлов и сплавов в процессах непрерывного деформирования

Теоретической основой для определения функциональных свойств сопротивления металла пластической деформации служит подход, приведенный в работе [109]. Согласно этому подходу для математического описания закономерностей изменения сопротивления металла пластической деформации с учетом процессов упрочнения и разупрочнения необходимо экспериментально определить значения коэффициентов σ_{s0}^0 , a и n , характеризующих упрочнение металла при деформации в холодном состоянии; коэффициентов A и N , характеризующих влияние начальной температуры нагрева на сопротивление металла пластической деформации заготовки; коэффициентов c_i , характеризующих влияние температуры на интенсивность разупрочнения металла во время паузы между деформациями. При этом для определения указанных коэффициентов целесообразно проводить опыты на растяжение цилиндрических образцов с использованием многофункционального испытательного комплекса Gleeble 3800. Выбор оборудования обусловлен возможностью поддержания постоянства температуры деформируемого металла в процессе испытания и возможностью реализации различных схем деформирования.

В настоящее время имеется опыт определения функциональных свойств сопротивления металлов и сплавов пластической деформации применительно к сталям феррито-перлитного класса 32ХГА, 09Г2С, 32Г2У [110]. Аналогичная методика реализуется и для определения функциональных свойств стали марок 08-12Х18Н10Т.

Первые пять образцов растягиваются при комнатной температуре до разрыва. Полученная в результате информация используется для определения коэффициентов σ_{s0}^0 , a и n , входящих в формулу, описывающую кривую упрочнения стали в холодном состоянии

$$\sigma_{s0} = \sigma_{s0}^0 + a\varepsilon^n, \quad (2.31)$$

где ε – степень деформации при растяжении.

Методика определения значений коэффициентов σ_{s0}^0 , a и n достаточно хорошо разработана и описана в научно-технической литературе, например, в работе [94]

Остальные образцы испытываются в диапазоне температур от 900⁰С до 1200⁰С. При этом для каждой температуры испытания по одному образцу растягивается до разрыва, что позволяет определить возможный диапазон изменения степеней деформации. Далее производится растяжение образцов до разрушения за три этапа с паузой между этапами. Первый этап деформирования осуществляется со степенью, равной примерно 30% от максимальной, которая определена при растяжении первого образца. Второй этап деформирования осуществляется со степенью, обеспечивающей суммарную деформацию примерно равную 60% от максимальной. На третьем этапе деформирования образец растягивается до разрыва.

Для определения значений коэффициентов A и N , входящих в формулу, описывающую зависимость исходного значения сопротивления стали пластической деформации от температуры

$$\sigma_{s0}(\theta_0) = \sigma_{s0}^0 \exp \left[-A \left(\frac{\theta_0 - \theta_0^0}{\theta_{пл} - \theta_0} \right)^N \right], \quad (2.32)$$

где θ_0^0 – температура, при которой определено σ_{s0}^0 ; $\theta_{пл}$ – температура плавления стали,

для каждой температуры определяются значения предела текучести путем фиксации точки на кривой деформация-напряжение, в которой наблюдается отклонение от линейной зависимости. Массив полученных

данных по θ_0 и σ_{s0} обрабатывается с помощью метода наименьших квадратов [108] с целью получения значений коэффициентов A и N .

Для определения влияния температуры на интенсивность разупрочнения металла во время паузы между этапами деформирования в общей формуле для определения зависимости коэффициента разупрочнения k от температуры θ_i , приведенной в работе [109], в отличие от работы [110] учитываются два первых слагаемых. То есть формула имеет вид

$$k(\theta_i) = c_0 + c_1 \frac{\theta_{пл} - \theta_i}{\theta_i - \theta_0^0}. \quad (2.33)$$

Для определения значений коэффициентов c_0 и c_1 в процессе эксперимента фиксируется температура испытания θ_i , сопротивление металла пластической деформации $\sigma_{s0}(\theta_i)$, сопротивление металла пластической деформации в конце рассматриваемого этапа растяжения $\sigma_s(t^*)$, сопротивление металла в конце промежутка между этапами растяжения $\sigma_s(t)$ и продолжительность этого промежутка $t - t^*$.

С использованием этих данных сначала вычисляются следующие значения:

$$\Delta\sigma_s(t) = \sigma_s(t) - \sigma_{s0}; \quad (2.34)$$

$$\Delta\sigma_s(t^*) = \sigma_s(t^*) - \sigma_{s0}. \quad (2.35)$$

Затем определяется значение коэффициента k при заданной температуре испытания θ_i по формуле

$$k = - \frac{t}{\ln \frac{\Delta\sigma_s(t)}{\Delta\sigma_s(t^*)}}. \quad (2.36)$$

Полученный массив значений $k - \theta_i$ также обрабатывается с помощью метода наименьших квадратов для получения значений коэффициентов c_0 и c_1 .

В процессе всех опытов на растяжение производится запись значений растягивающего напряжения, степени деформации и температуры, фиксируется время паузы между этапами деформации.

2.5 Определение прочностных свойств марки стали 08X18H10T

Исследование проведено с использованием цилиндрических образцов из стали марки 12X18H10T. Общее количество образцов 35 штук. Все опыты проведены с использованием термомеханического симулятора *Gleeble 3800*.

В настоящей работе эксперименты проводились в вакуумной среде (низкий вакуум) на модуле *PocketJaw* с приваркой к образцам хромель-алюмелевых термопар (для контроля температуры при нагреве, а также измерения деформационного разогрева). Нагрев образцов со скоростью $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до температуры испытания с последующей 5-минутной выдержкой осуществлялся пропусканием тока. Для измерения деформации использованы высокотемпературные датчики продольной и поперечной деформации. Экспериментальное исследование выполнено в соответствии с разработанной и согласованной программой.

С целью определения закономерностей упрочнения стали марки 12X18H10T проведены опыты на монотонное растяжение при различных температурах (рисунок 2.37).

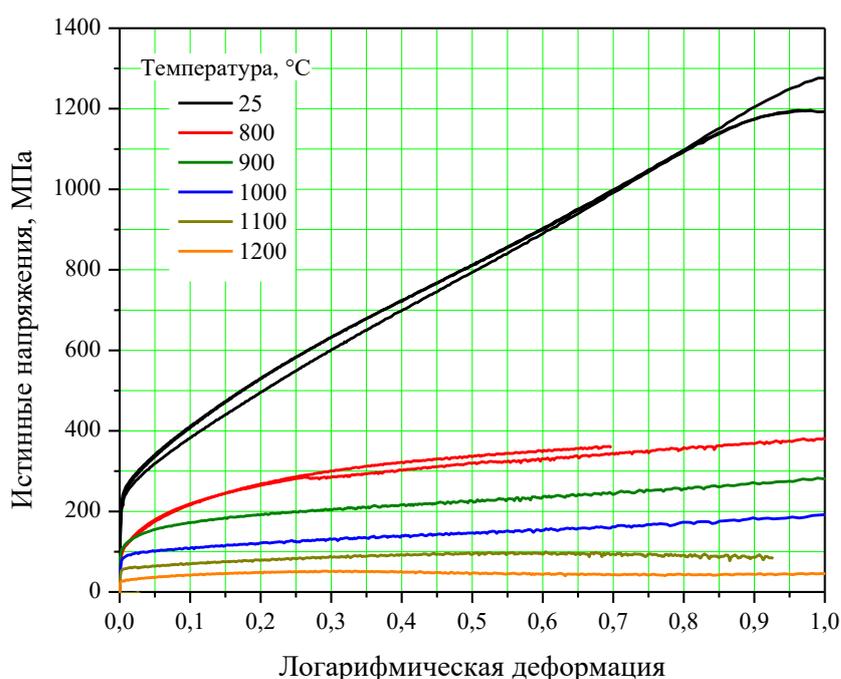


Рисунок 2.37 – Зависимости деформация-напряжение для монотонного растяжения

Для аппроксимации кривой деформационного упрочнения при отсутствии разупрочняющих эффектов использованы результаты разрыва двух образцов при температуре 25⁰С (таблица 2.7).

Таблица 2.7 – Сопротивление пластической деформации стали марки 12Х18Н10Т при температуре 25⁰С

| | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| № точки | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Степень деформации | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |
| Напр., МПа | 380 | 530 | 600 | 720 | 790 | 900 | 980 | 1100 | 1170 | 1270 |

Аппроксимация полученных данных с помощью метода наименьших квадратов позволила получить выражение

$$\sigma_{s0} = 200 + 1064\varepsilon^{0,78} \quad (2.37)$$

Определение зависимости начального сопротивления пластической деформации от температуры планировалось в соответствии с методикой, изложенной в работе [109]. Однако в процессе обработки полученной информации выяснилось, что для исследованного температурного диапазона она не всегда работоспособна. Поэтому на основе теоретического анализа для аппроксимации зависимости начального сопротивления пластической деформации σ_{s0} от температуры нагрева θ_0 предложена новая, более простая и более адекватная зависимость вида

$$\sigma_{s0}(\theta_0) = \sigma_{s0}^0 \left(\frac{\theta_{пл} - \theta_0}{\theta_{пл} - \theta_0^0} \right)^N, \quad (2.38)$$

где σ_{s0}^0 – сопротивление металла пластической деформации при комнатной температуре;

$\theta_{пл}$ – температура плавления металла;

θ_0^0 – температура, при которой определено σ_{s0}^0 ;

N – эмпирический коэффициент.

Эмпирический коэффициент N определен с помощью метода наименьших квадратов на основе кривых упрочнения для температур 800⁰С, 900⁰С, 1000⁰С, 1100⁰С и 1200⁰С (рисунок 2.36). Исходная информация для этого приведена в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Начальное значение сопротивления стали марки 12Х18Н10Т пластической деформации при различных температурах

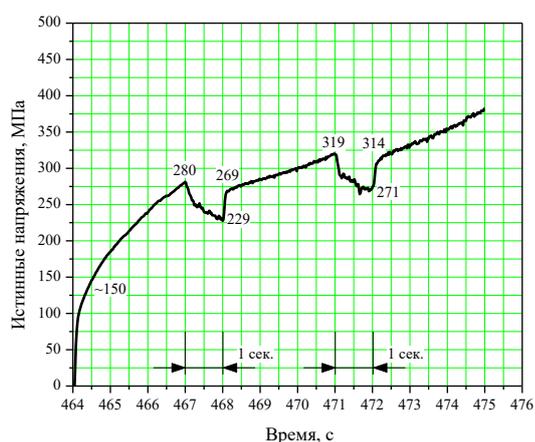
| № точки | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Температура, °С | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 |
| Напряжение, МПа | 100 | 100 | 60 | 40 | 30 |
| Расчет, МПа | 93,07 | 78,16 | 62,81 | 46,87 | 30,05 |
| Погрешность, % | 6,9 | 21,8 | 4,7 | 17,2 | 0,2 |

При обработке данных таблицы 2.8 принято, что температура плавления стали равно 1350⁰С, а комнатная температура равно 25⁰С. В результате для стали марки 12Х18Н10Т получено выражение

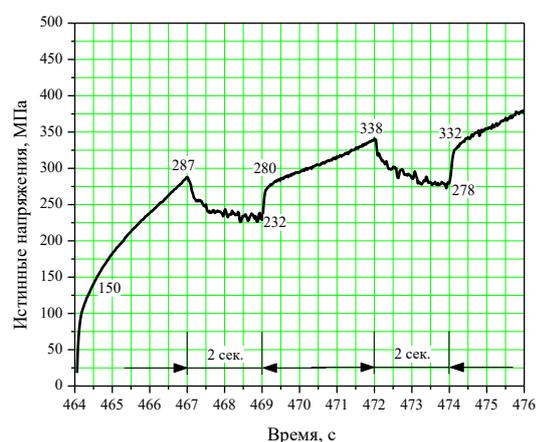
$$\sigma_{s0} = 200 \left(\frac{1350 - \theta_0}{1325} \right)^{0,87} \quad (2.39)$$

Результаты расчета по этой формуле в сравнении с эмпирическими данными приведены в двух нижних строках таблицы 2.3.

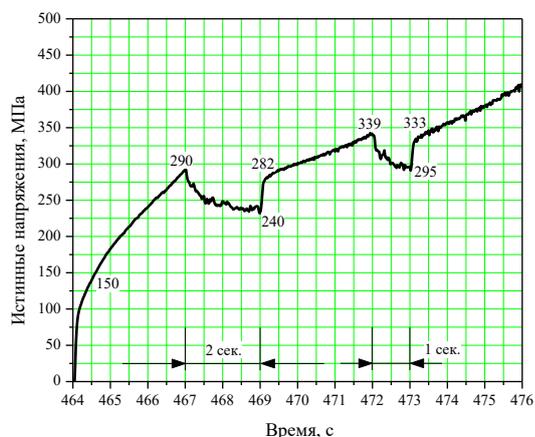
Для определения влияния температуры на скорость разупрочнения стали 12X18Н10Т использованы результаты опытов на растяжение цилиндрических образцов за три этапа с паузами между этапами в соответствии с методикой. Графики, характеризующие изменение напряжения при многоступенчатой деформации приведены на рисунках 2.38-2.42. Экспериментально полученные данные, принятые во внимание при аппроксимации зависимости коэффициента разупрочнения k от температуры, приведены в таблице 2.9.



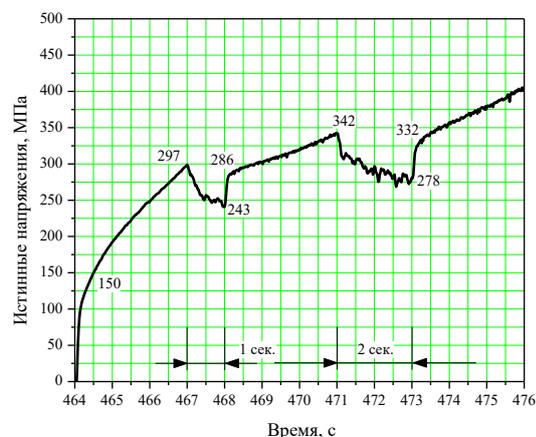
Образец № 5



Образец № 6

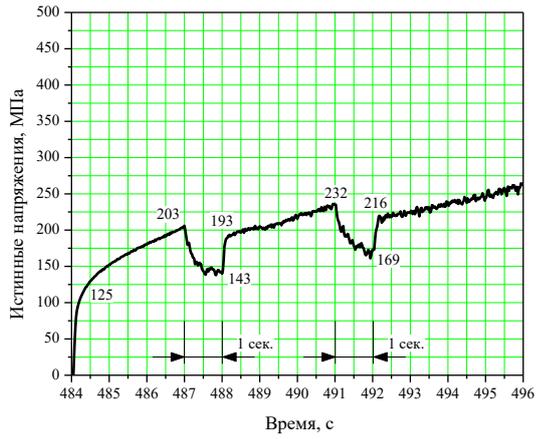


Образец № 17

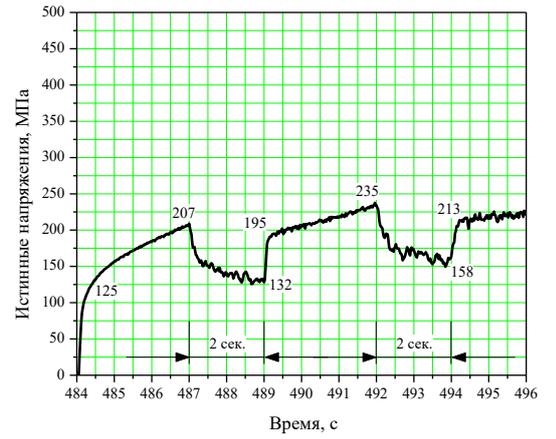


Образец № 22

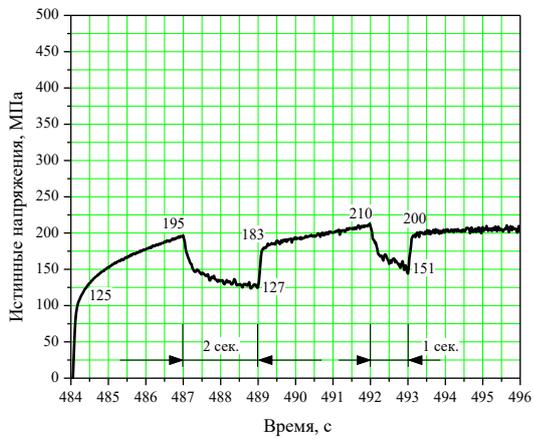
Рисунок 2.38 — Кривые релаксации при 800 °С



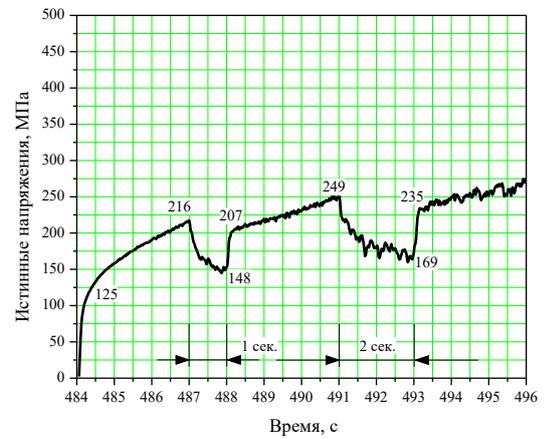
Образец № 8



Образец № 9

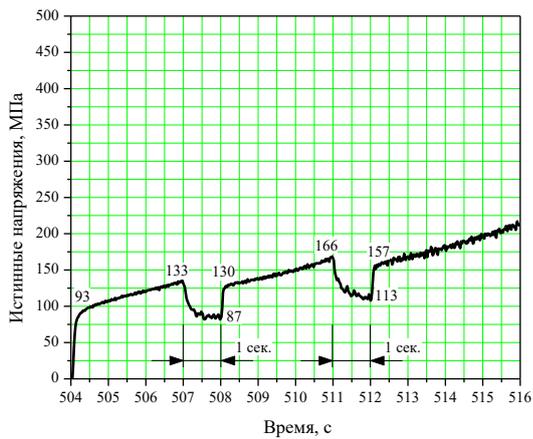


Образец № 18

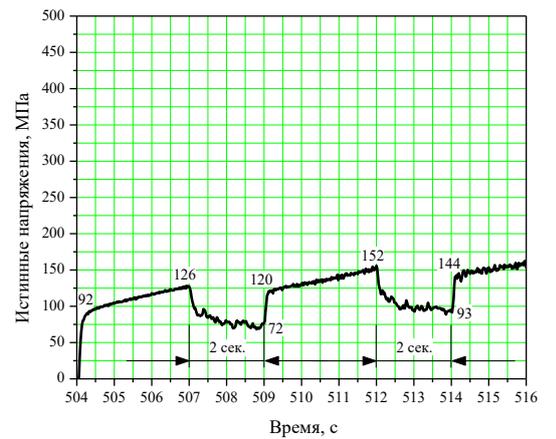


Образец № 23

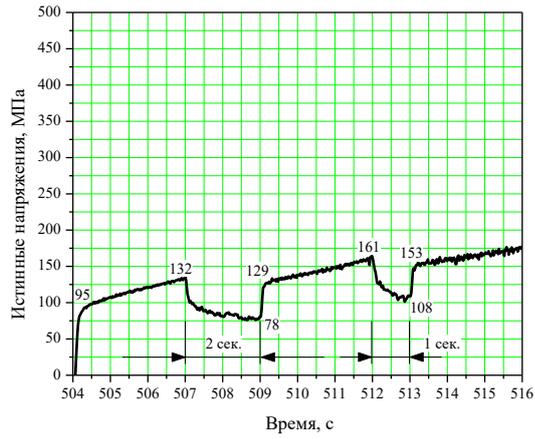
Рисунок 2.39 — Кривые релаксации при 900 °С



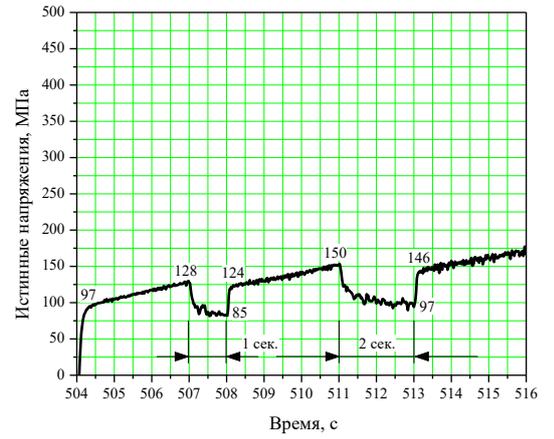
Образец № 12



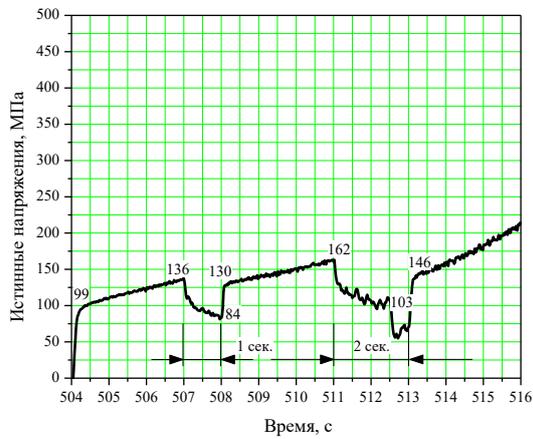
Образец № 13



Образец № 19

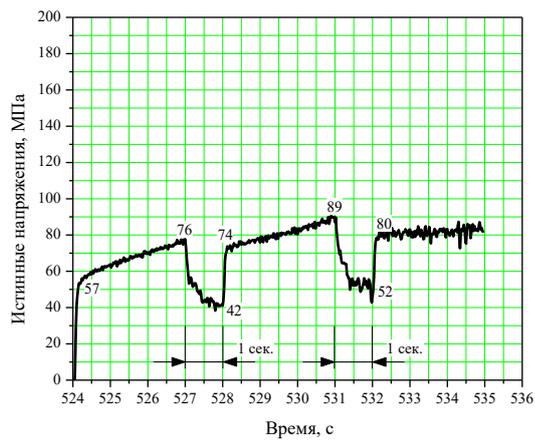


Образец № 24

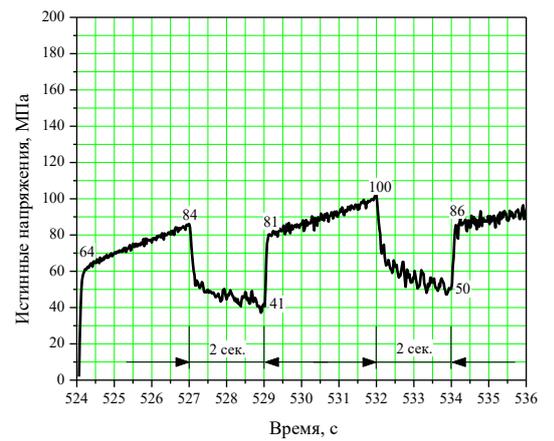


Образец № 30

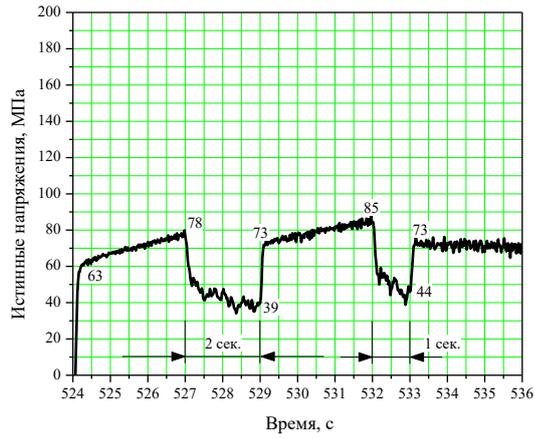
Рисунок 2.40 — Кривые релаксации при 1000 °С



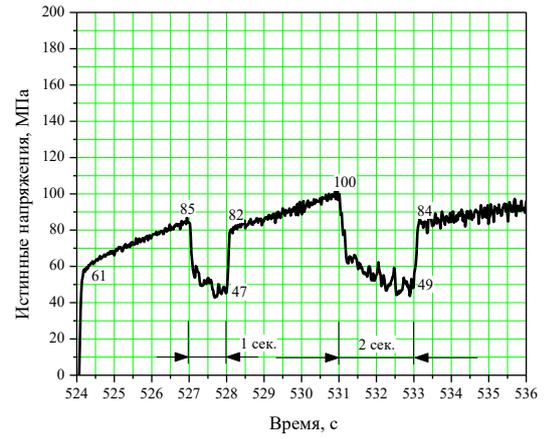
Образец № 15



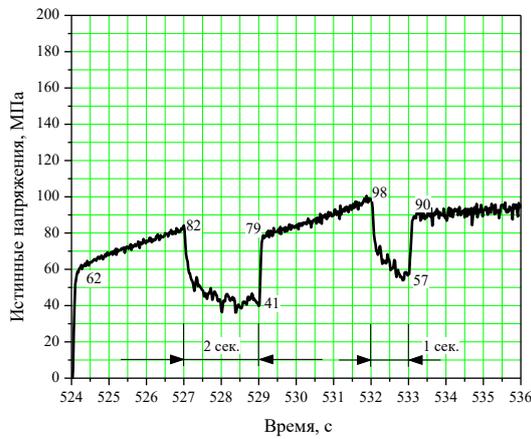
Образец № 16



Образец № 20

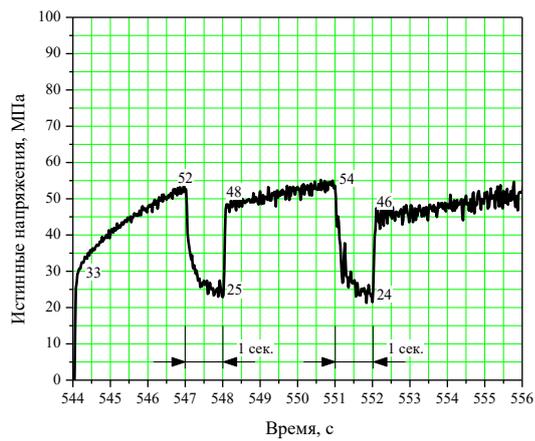


Образец № 25

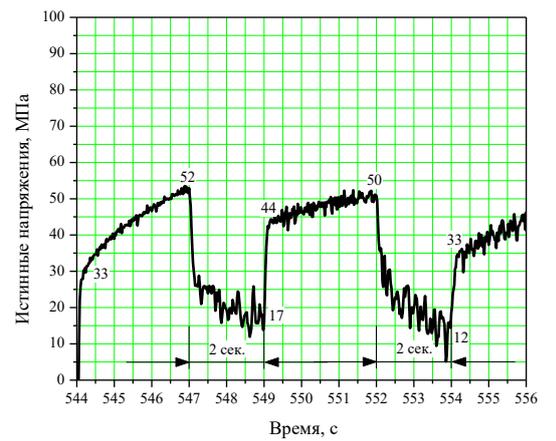


Образец № 29

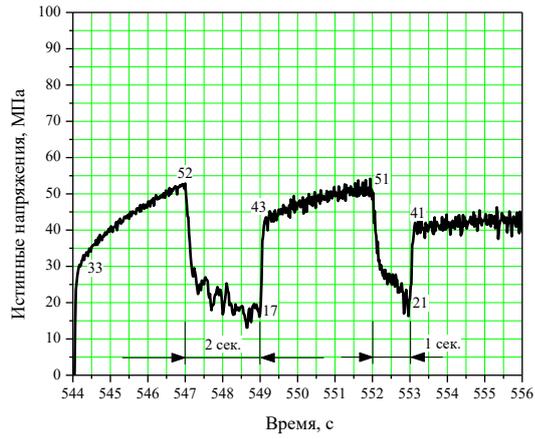
Рисунок 2.41 — Кривые релаксации при 1100 °С



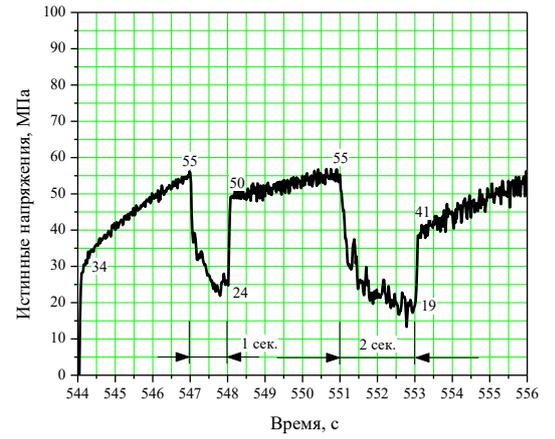
Образец № 28



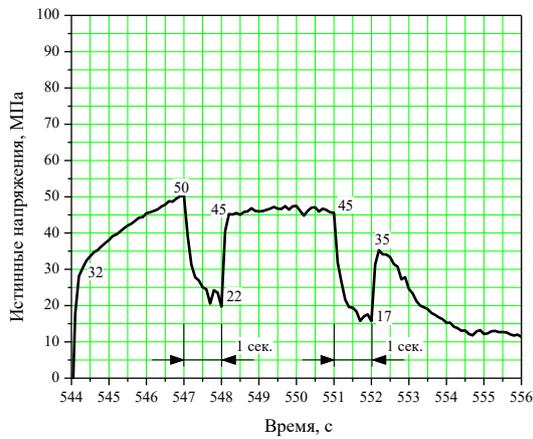
Образец № 10



Образец № 21



Образец № 26



Образец № 2

Рисунок 2.42 — Кривые релаксации при 1200 °С

Таблица 2.9 – Результаты эксперимента на многоступенчатое растяжение

| № п.п. | Температура, °С | $\Delta\sigma_s(t^*)$, МПа | t , с | k , с |
|--------|-----------------|-----------------------------|---------|---------|
| 1 | 800°С | 130 | 1 | 2,01 |
| 2 | 800°С | 137 | 2 | 3,9 |
| 3 | 800°С | 140 | 2 | 4,53 |
| 4 | 800°С | 147 | 1 | 2,29 |
| 5 | 900°С | 78 | 1 | 0,68 |
| 6 | 900°С | 82 | 2 | 0,81 |

| | | | | |
|----|---------------------|----|---|------|
| 7 | 900 ⁰ C | 70 | 2 | 0,56 |
| 8 | 900 ⁰ C | 91 | 1 | 0,73 |
| 9 | 1000 ⁰ C | 40 | 1 | 0,27 |
| 10 | 1000 ⁰ C | 34 | 1 | 0,47 |
| 11 | 1000 ⁰ C | 37 | 1 | 0,13 |
| 12 | 1000 ⁰ C | 31 | 1 | 0,53 |
| 13 | 1000 ⁰ C | 37 | 1 | 0,33 |
| 14 | 1100 ⁰ C | 19 | 1 | 0,13 |
| 15 | 1100 ⁰ C | 20 | 1 | 0,26 |
| 16 | 1100 ⁰ C | 15 | 1 | 0,08 |
| 17 | 1100 ⁰ C | 24 | 1 | 0,13 |
| 18 | 1100 ⁰ C | 20 | 1 | 0,27 |
| 19 | 1200 ⁰ C | 19 | 1 | 0,17 |
| 20 | 1200 ⁰ C | 19 | 1 | 0,15 |
| 21 | 1200 ⁰ C | 19 | 1 | 0,17 |
| 22 | 1200 ⁰ C | 21 | 1 | 0,2 |
| 23 | 1200 ⁰ C | 18 | 1 | 0,15 |

Обработка представленных экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов позволило получить следующую зависимость

$$k = 4,75 \frac{1350-\theta}{\theta-25} - 0,93 \quad (2.40)$$

Исследование сопротивления пластической деформации стали марки 12X18H10T подтвердило имеющуюся в настоящее время информацию об интенсивном упрочнении этой марки стали при холодной деформации. При этом характер упрочнения достаточно точно описывается степенной зависимостью, предложенной в работе [111].

Предложенный новый вид зависимости исходного уровня сопротивления пластической деформации стали марки 12X18H10T от

температуры нагрева качественно правильно и количественно удовлетворительно описывает эту зависимость. Достаточно большая погрешность имеет место при температуре порядка 900⁰С. Однако, с другой стороны, процесс раскатки гильзы происходит при более высоких температурах, при которых полученная зависимость имеет достаточно хорошую сходимость с фактическими данными. Тем не менее вопрос поиска более подходящей формы уравнения регрессии остается.

Зависимость коэффициента разупрочнения стали марки 12Х18Н10Т от температуры получена впервые. При этом ранее не было прецедентов использования в этой зависимости свободного члена. Анализ предложенной новой зависимости показал, что в результате расчета по ней при больших температурах коэффициент разупрочнения может принимать отрицательные значения. Это лишено физического смысла, т.к. коэффициент разупрочнения представляет собой промежуток времени, за который металл полностью разупрочнится. Поэтому, чтобы это в формуле гарантировано учитывалось, свободный член следует принять как минимум равным нулю. Однако, как показали расчеты, при этом ухудшается качество аппроксимации при более низких температурах. В соответствии с этим, предлагается оставить вид формулы неизменным, но в случае получения отрицательных значений коэффициента разупрочнения, принимать его равным нулю. Альтернативный вариант связан с поиском нового, более подходящего вида уравнения регрессии.

Исследование характера разупрочнения стали марки 12Х18Н10Т при высоких температурах позволило выявить еще одну ее особенность, а именно более интенсивный характер ее разупрочнения в промежутках между обжатиями по сравнению, например, со сталями феррито-перлитного класса [112].

Ранее [109] было показано, что для определения актуальной величины сопротивления металла пластической деформации с учетом ее развития во времени, весь временной отрезок процесса деформирования, включая паузы

между обжатиями, разбивается на временные промежутки и для каждого i -го временного промежутка сопротивление пластической деформации вычисляется по рекуррентной формуле.

Результаты исследования сопротивления пластической деформации стали марки 12X18H10T позволяют предложить для его определения в диапазоне температур $900^{\circ}\text{C} - 1200^{\circ}\text{C}$ следующее уравнение:

$$\sigma_{si} = 200 \left(\frac{1350 - \theta_0}{1325} \right)^{0,87} + \sum_{i=1}^m \left\{ 1064 (\varepsilon_i^{0,78} - \varepsilon_{i-1}^{0,78}) + (\sigma_{s(i-1)} - \sigma_{s0}) \left[\exp \left(- \frac{\Delta\tau_i}{4,75 \frac{1350 - \theta}{\theta - 25} - 0,93} \right) - 1 \right] \right\} \quad (2.41)$$

где i – номер временного интервала на которые разбивается промежуток времени деформирования;

m – число временных интервалов, на которые разбивается промежуток времени деформирования;

$\Delta\tau_i$ – продолжительность временного интервала.

Таким образом, изучено сопротивление пластической деформации стали марки 12X18H10T в горячем состоянии. При этом наряду с определением конкретных значений эмпирических коэффициентов обнаружена еще одна особенность деформирования нержавеющей марок стали – гораздо более высокие скорости разупрочнения, чем у сталей феррито-перлитного класса.

2.6 Исследование трансформации свойств нержавеющей марки стали 08X18H10T в линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой

В рамках исследовательской работы была проведена оценка макроструктуры заготовки и изменения микроструктуры от заготовки до термомообработанного состояния труб из марки стали 08X18H10T.

Объектом исследования являлся темплет, отобранный от непрерывно-литой заготовки Ø360 мм, образец, отобранный от гильзы Ø 431×29 мм, а также образцы, отобранные от горячекатаной и термообработанной трубы Ø325×12 мм. Оценка макроструктуры осуществлялась по ГОСТ 10243-75, микроструктуры по ГОСТ 5639.

Для проведения работы использовалось следующее оборудование: термометр ртутный лабораторный ТЛ-2, плита нагревательная LOIP LH-302 (ЛАБ-ПН-02), ферритометр ФХ-ЗИФМ со стандартными образцами СОП СФФ, оптический микроскоп Axiovert 40MAT.

Контроль макроструктуры осуществлялся на образце, отобранном от темплета непрерывно-литой заготовки Ø360 мм, после травления в 50 %-ном водном растворе соляной кислоты при температуре 60 °С в течении 30 минут. Результаты оценки макроструктуры по ГОСТ 10243-75 приведены в таблице 2.10 и на рисунке 2.43. Травление ¼ темплета, вырезанного поперек непрерывнолитой заготовки, показывает наличие трех зон макроструктуры. Вблизи поверхности заготовки образуется зона мелких равноосных кристаллов шириной менее 1 мм (удалось идентифицировать при исследовании микроструктуры). За ней расположена зона столбчатых кристаллов, длинные кристаллы простираются от поверхности НЛЗ практически до сердцевины, радиус зоны достигает 165 мм. Столбчатые γ-кристаллы растут под прямым углом к поверхности НЛЗ и встречаются друг с другом в центральной части. В центральной части заготовки наблюдается зона крупных равноосных кристаллов диаметр зоны – 10 мм.

Таблица 2.10 - Результаты контроля качества макроструктуры по ГОСТ 10243-75

| Дефекты макроструктуры, балл | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|
| ЦП | ТН | ОПЛ | КПЛ | ЛК | ПУ | ПП | МТ | ПК | СП |
| 1,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 4,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| ЦП - центральная пористость; ТН - точечная неоднородность; ОПЛ - общая пятнистая ликвация; КПЛ - краевая пятнистая ликвация; | | | | | | ПУ - подусадочная ликвация; ПП - подкорковые пузыри; МТ - межкристаллитная трещина; ПК - послойная кристаллизация; | | | |

ЛК- ликвационный квадрат;

СП - светлая полоска.

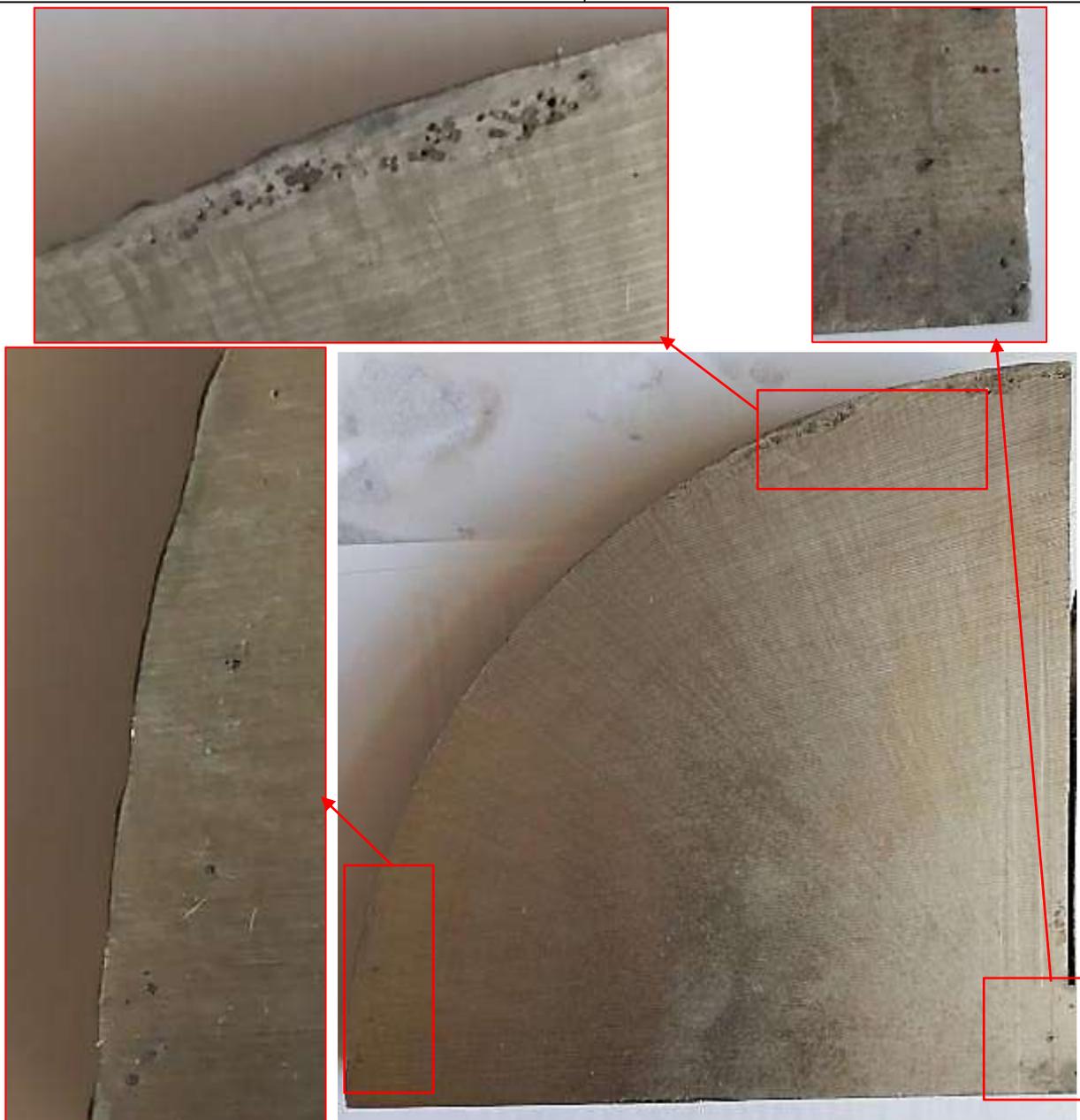


Рисунок 2.43 – Макроструктура НЛЗ Ø 360 мм из стали 08X18H10T

Исследование микроструктуры проводили после электролитического травления металлографических шлифов в 10%-ном водном растворе щавелевой кислоты.

Заготовка Ø 360 мм

Вблизи наружной поверхности НЛЗ наблюдается зона мелких равноосных зерен аустенита средним размером до 50 мкм и δ -феррит располагающийся в междендритных пространствах. Глубина данной зоны

составляет 190 мкм. Располагающаяся за ней зона столбчатых кристаллов представляет собой длинные вытянутые зерна аустенита средним размером до 2 мм и δ -феррит располагающийся в междендритных пространствах. Внутри зерен наблюдаются линии скольжения, имеющие определенную ориентацию и приблизительно параллельны в пределах каждого зерна (рисунок 2.43). В центральной части заготовки наблюдаются крупные зерна аустенита средним размером до 1 мм и δ -феррит располагающийся в междендритных пространствах (рисунок 2.45). В центральной части НЛЗ содержание δ -феррита самое высокое и составляет 3%, на $\frac{1}{2}$ радиуса его содержание снижается до 1,2% и вблизи поверхности НЛЗ достигает 0,4 %. Также в этой области присутствуют скопления неметаллических включений (нитридов), которые на периферии НЛЗ распределялись равномерно по сечению.

Гильза $\varnothing 431 \times 29$ мм

Микроструктура гильзы представляет собой равноосные зерна аустенита, внутри которых располагаются полосы скольжения и небольшое количество двойников, образовавшихся в результате деформации (рисунок 2.46). На внутренней поверхности наблюдается текстура деформации и δ -феррит по границам зерен (0,3%), повторяющий текстуру деформации. По мере приближения к наружной поверхности количество δ -феррита уменьшается и практически отсутствует на наружной поверхности. Размер зерен аустенита увеличивается от наружной к внутренней поверхности. На наружной поверхности средний размер зерна достигает 80 мкм, что соответствует 4 номеру по ГОСТ 5639-82, в центре гильзы средний размер зерна равен 125 мкм – 3 номер и на внутренней поверхности средний размер зерна составляет 170 мкм, что соответствует 2 номеру.

Горячекатаная труба $\varnothing 325 \times 12$ мм

Исследование микроструктуры труб производилось в трех направлениях под углом 120° . Микроструктура горячекатаной трубы представляет собой зерна аустенита по границам зерен наблюдается выделение δ -феррита, по мере

удаления от внутренней поверхности (0,3%) его количество уменьшается. Размер зерна аустенита составляет 10 мкм, что соответствует 10 номеру по ГОСТ 5639-82. Внутри зерен располагаются двойники деформации. На наружной и внутренней поверхности наблюдаются крупные вытянутые в направлении деформации зерна аустенита длиной до 800 мкм, также на внутренней поверхности наблюдается текстура деформации (рисунок 2.47). Скопления неметаллических включений, выявленные в центральной части НЛЗ, трансформировались в горячекатаной трубе в грубые строчки нитридов 2 – 3 балла по ГОСТ 1778-70 (рисунок 2.48).

Термообработанная труба Ø 325×12 мм

По сравнению с горячекатаной трубой микроструктура термообработанной трубы имеет более крупное зерно 7 – 8 номера по ГОСТ 5639-82. Внутри зерен располагаются двойники деформации, на границах зерен наблюдается δ-феррит. Также наблюдается значительное уменьшение количества крупных вытянутых в направлении деформации зерен аустенита, которые на наружной поверхности практически отсутствуют. Вблизи внутренней поверхности наблюдается текстура деформации (рисунок 2.49).

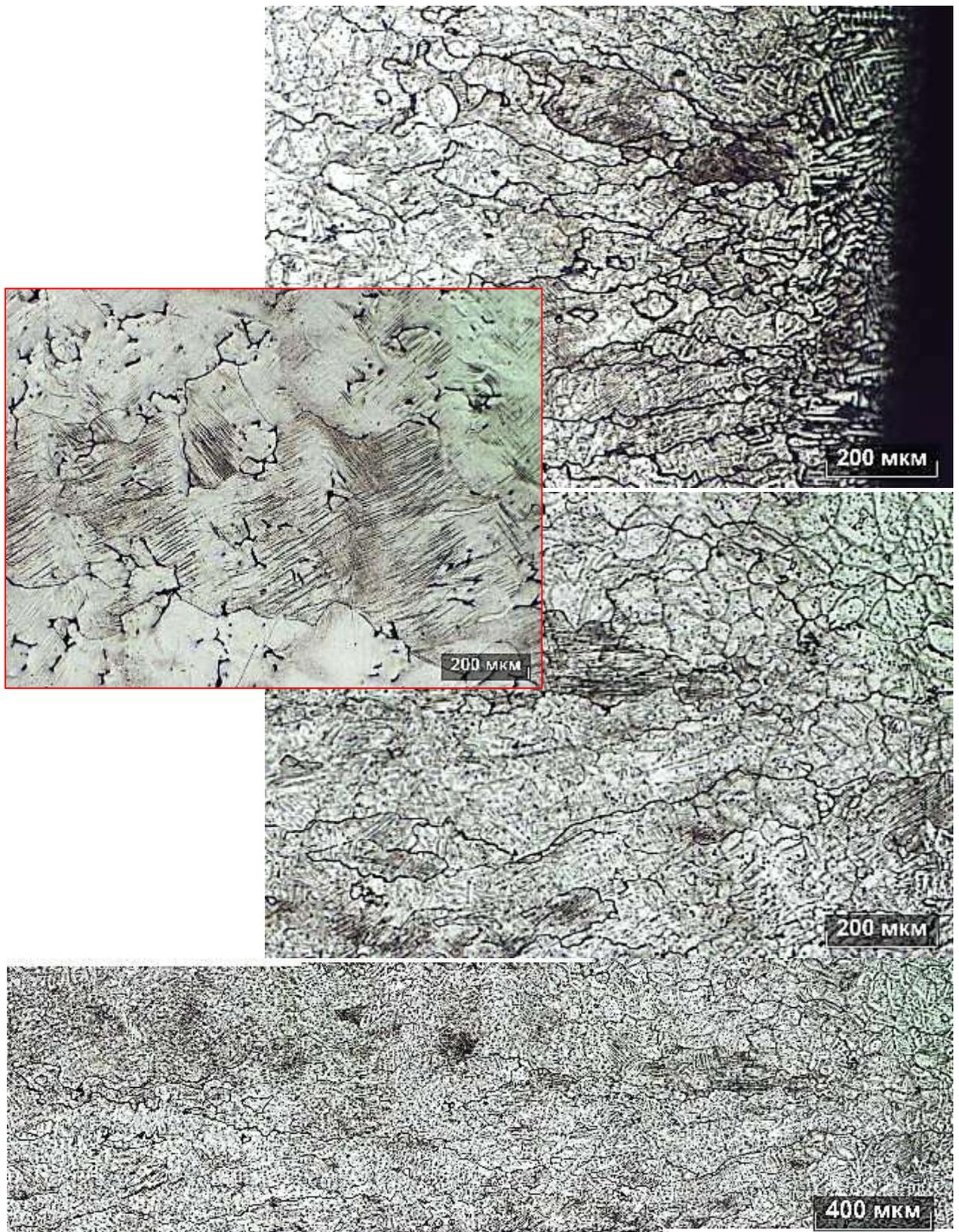


Рисунок 2.44 – Микроструктура зоны мелких и вытянутых кристаллов
НЛЗ

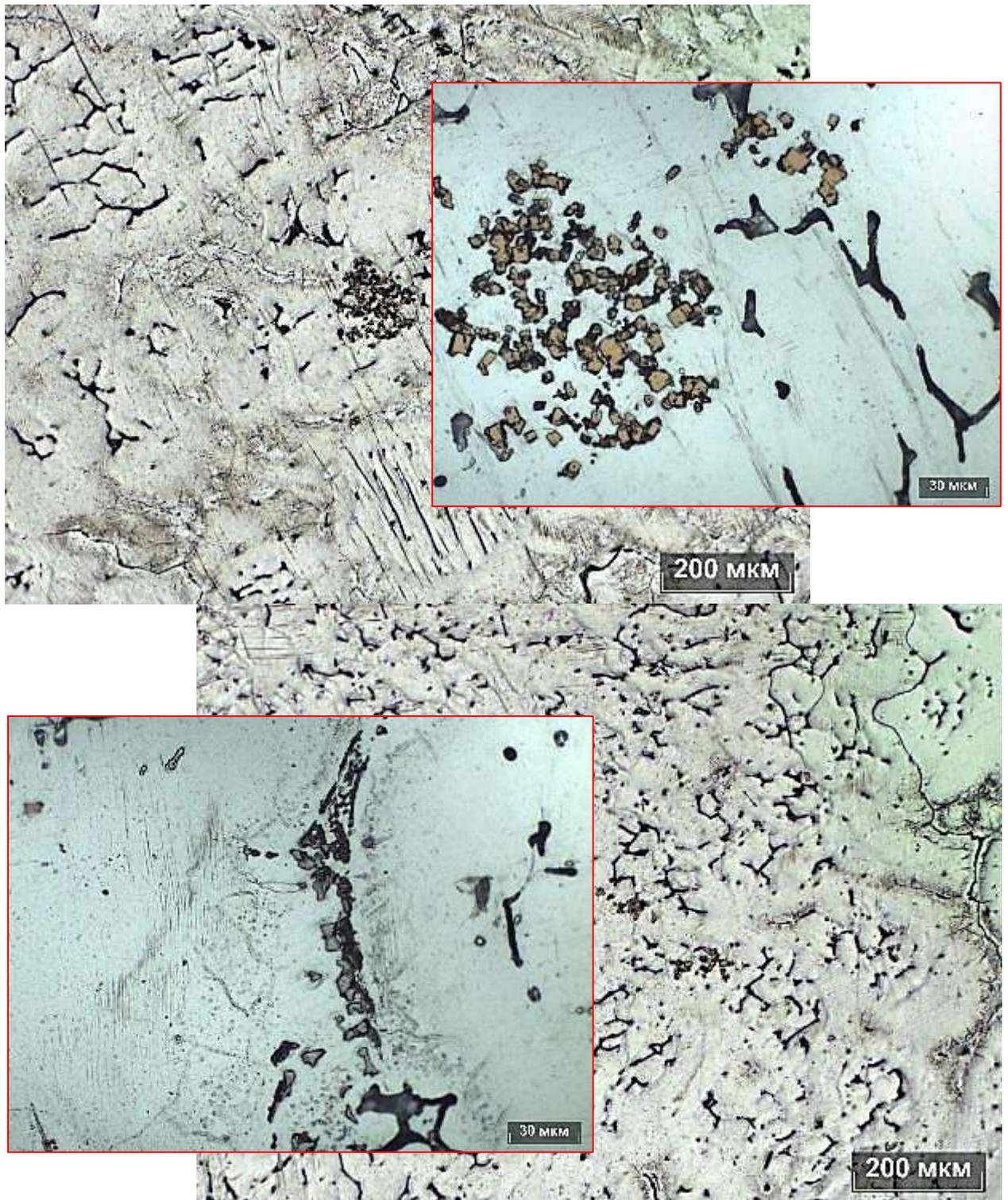


Рисунок 2.45 – Микроструктура центральной части НЛЗ



Рисунок 2.46 – Микроструктура гильзы

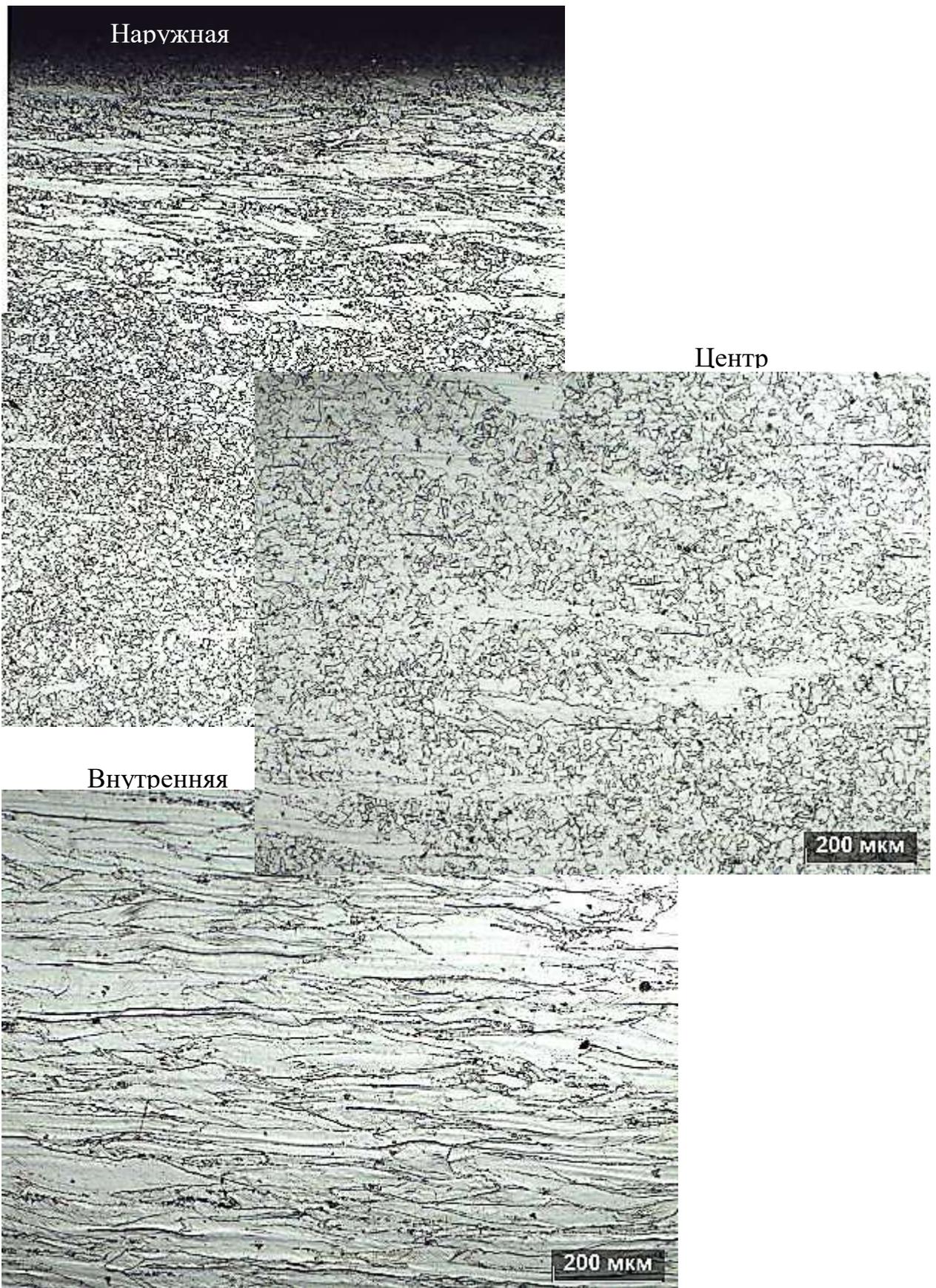


Рисунок 2.47 – Микроструктура горячекатаной трубы

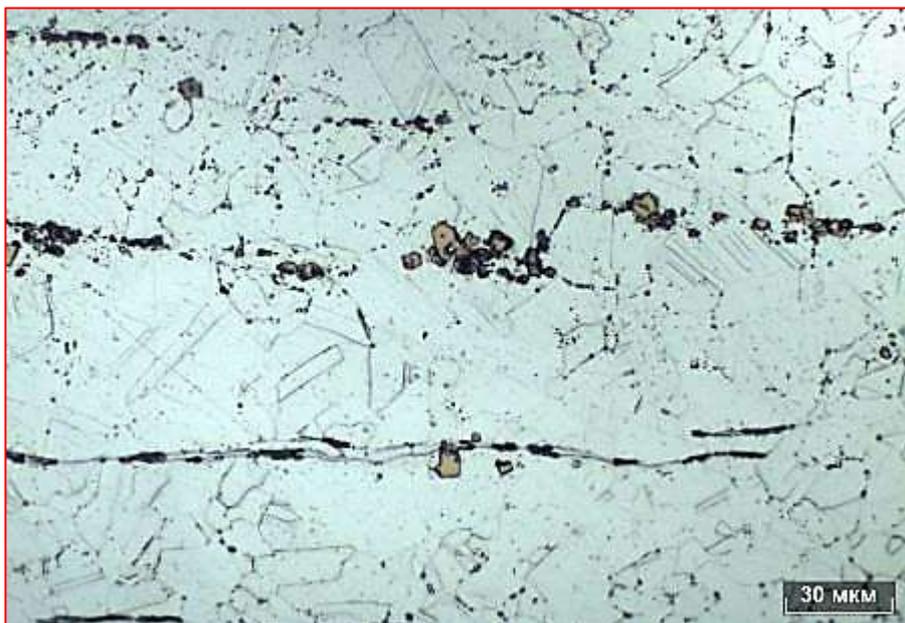
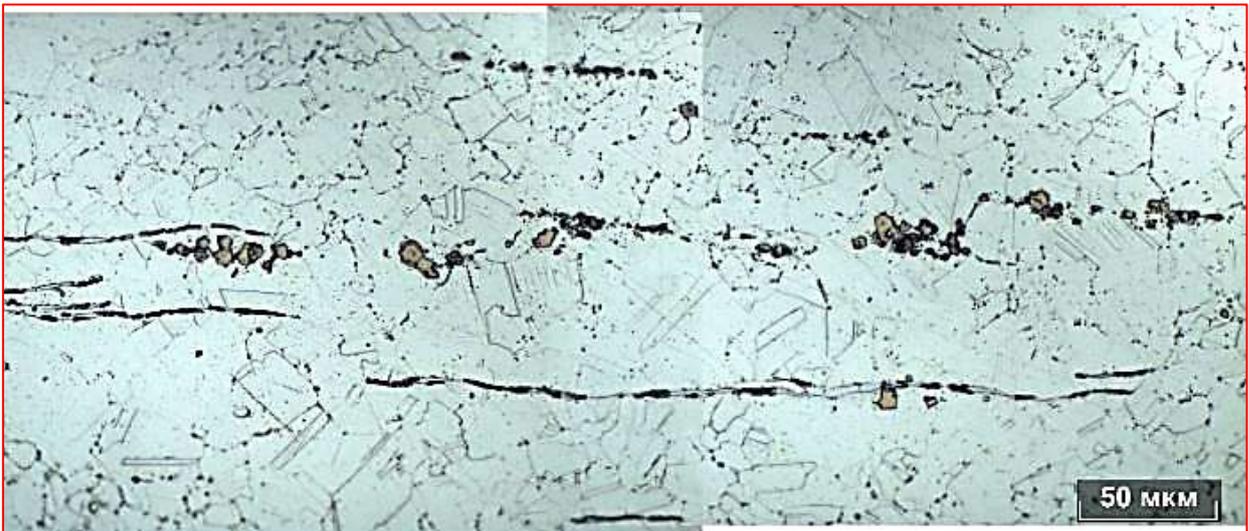
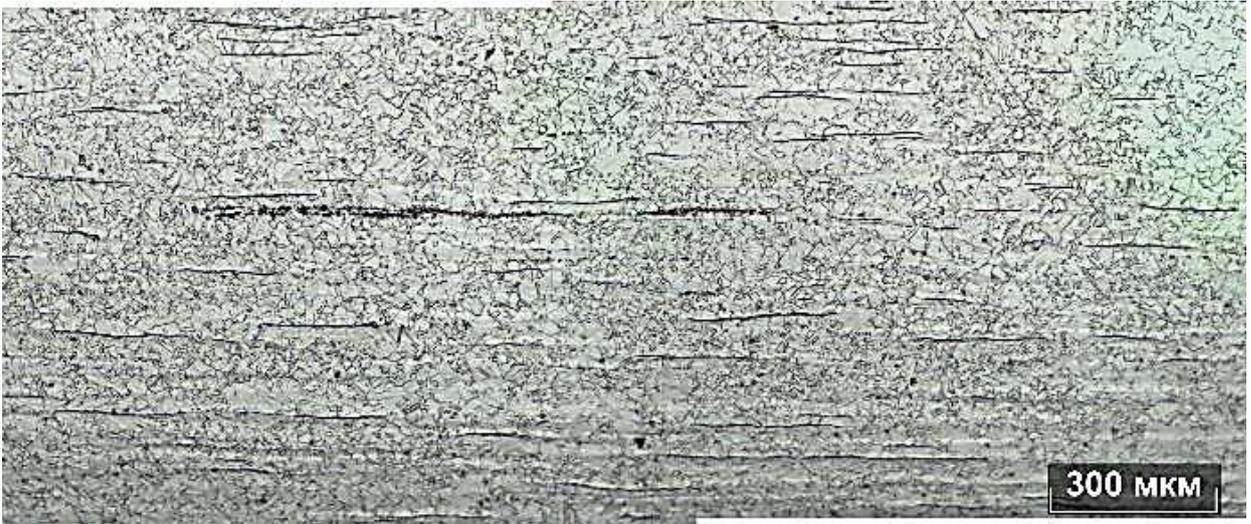


Рисунок 2.48 – Нитриды строчечные в металле горячекатаной трубы

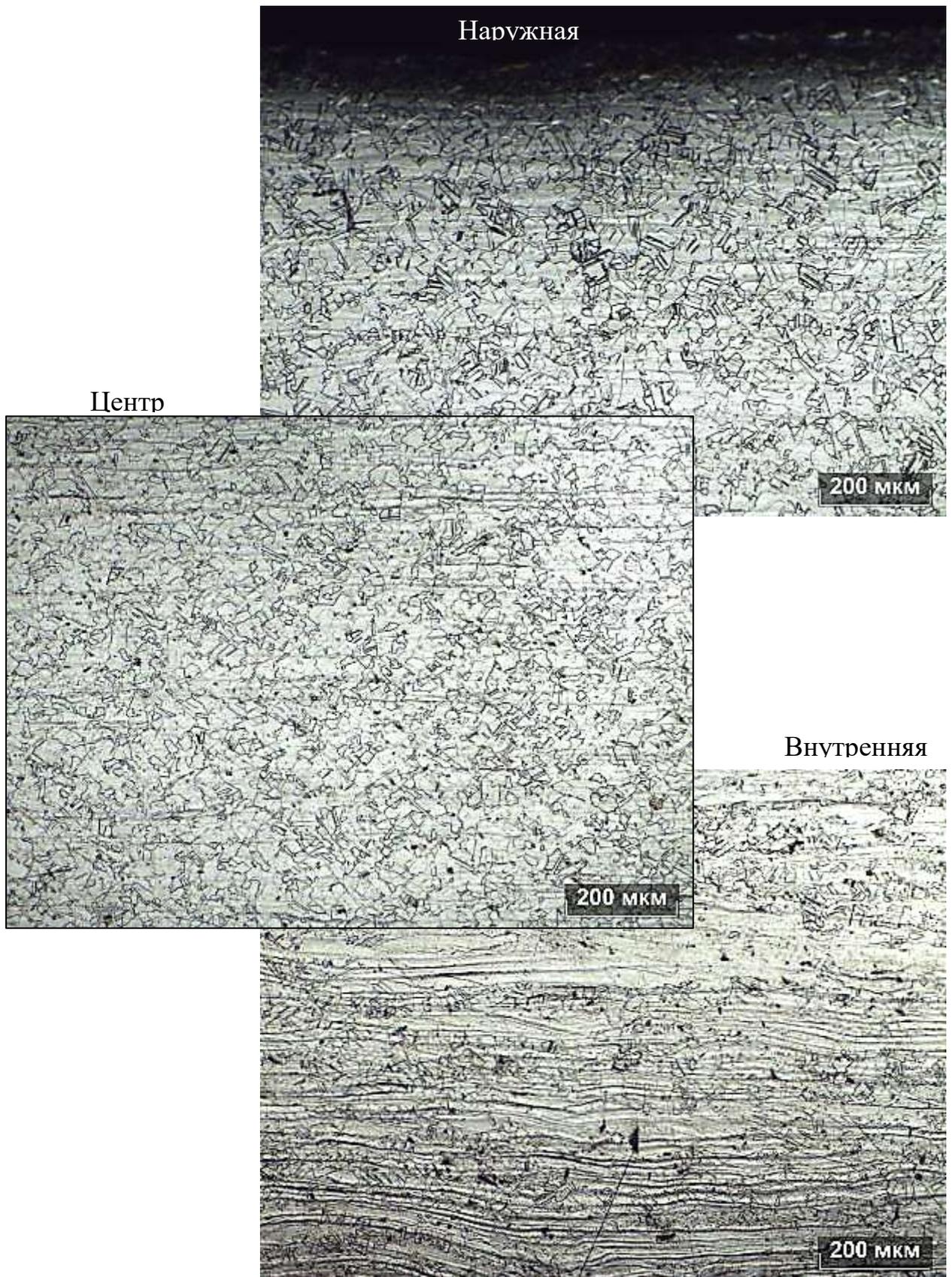


Рисунок 2.49 – Микроструктура термообработанной трубы

В макроструктуре НЛЗ Ø360 мм из стали марки 08X18H10T наблюдается три зоны. Вблизи поверхности заготовки зона мелких равноосных кристаллов ширина зоны составляет менее 1 мм. В микроструктуре данная зона представлена мелкими равноосными зернами аустенита средним размером до 50 мкм и δ-феррит располагающийся в междендритных пространствах. За ней расположена зона столбчатых кристаллов, длинные кристаллы простираются от поверхности НЛЗ практически до сердцевины, длина зоны достигает 165 мм. Столбчатые γ-кристаллы растут под прямым углом к поверхности НЛЗ и встречаются друг с другом в центральной части. В микроструктуре данная зона представляет собой длинные вытянутые зерна аустенита средним размером до 2 мм и δ-феррит располагающийся в междендритных пространствах. Внутри зерен наблюдаются линии скольжения, имеющие определенную ориентацию и приблизительно параллельны в пределах каждого зерна. В центральной части заготовки наблюдается зона крупных равноосных кристаллов диаметр зоны 10 мм. В микроструктуре зона представлена крупными зернами аустенита средним размером до 1 мм и δ-ферритом. В центральной части НЛЗ содержание δ-феррита самое высокое и составляет 3%, на ½ радиуса его содержание снижается до 1,2% и вблизи поверхности НЛЗ достигает 0,4 %. Также в этой области присутствуют скопления неметаллических включений (нитридов), которые на периферии НЛЗ распределялись равномерно по сечению.

Микроструктура гильзы, горячекатаной и термообработанной труб представляет собой равноосные зерна аустенита, внутри зерен располагаются линии скольжения, и двойники деформации по границам зерен присутствует δ-феррит. Количество δ-феррита на внутренней поверхности гильзы и труб составляет 0,3 %, при удалении от внутренней поверхности его количество уменьшается и практически отсутствует на наружной поверхности, что коррелирует с содержанием δ-феррита в участках НЛЗ. На внутренней

поверхности наблюдается текстура деформации. На рисунке 2.50 показано изменение размера зерен аустенита, согласно ГОСТ 5639-82.

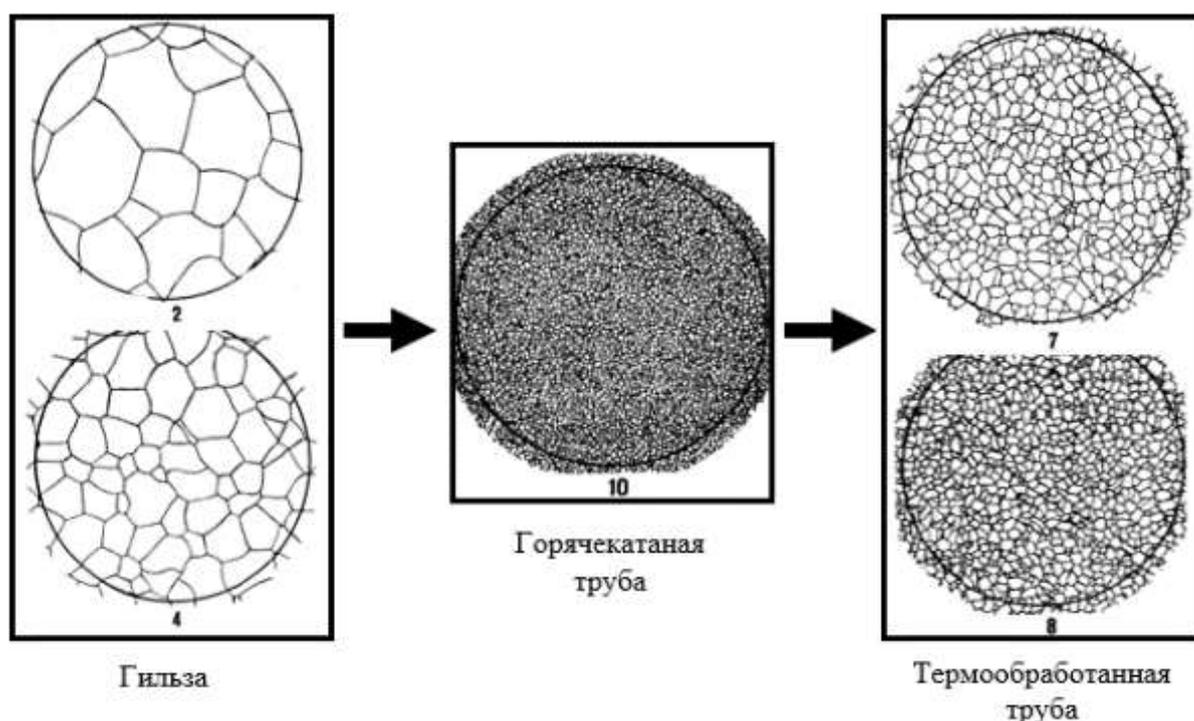


Рисунок 2.50 – Размер зерен аустенита от гильзы до термообработанной трубы

Размер зерен аустенита в гильзе самый крупный – 2-4 номер, в горячекатаном состоянии зерно измельчается до 10 номера и при дальнейшей термообработке трубы немного увеличивается до 7-8 номера. Также после проведения термической обработки трубы уменьшается количество крупных вытянутых зерен в основном присутствующих на наружной и внутренней поверхностях трубы. Скопления неметаллических включений, выявленные в центральной части НЛЗ, трансформируются в горячекатаной трубе в грубые строчки нитридов 2 – 3 балла.

Проведенное исследование трансформации свойств нержавеющей марки стали 08X18H10T в линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой позволяет сделать вывод о применимости предложенных в параграфах 2.1 и 2.4 методик прогнозирования

пластических и прочностных свойств как для технологической операции прошивки, так и раскатки.

Глава 3. Исследование трибологических свойств дезоксидантов и графитовых смазок, используемых для прокатки нержавеющей марки стали на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой

3.1 Требования к смазочно-дезоксирующему материалу и оборудованию для его эффективной подачи в гильзу в линиях ТПА

Технология производства бесшовных горячекатаных труб на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой, для изготовления труб в том числе из нержавеющей марки стали, для борьбы с окалиной предусматривает после прошивки заготовки производить обработку внутренней поверхности нагретой гильзы порошкообразным смазочно-дезоксирующим материалом. При этом порошковый продукт вводится в полость гильзы с торцевой стороны переднего конца прошитой заготовки.

Многочисленные исследования [113-117] эффективности применения смазочных материалов при горячей прокатке показали, что они обеспечивают существенное снижение величины износа технологического инструмента, повышение качества наружной и, особенно, внутренней поверхности, геометрической точности прокатываемых труб, а также снижение энергетических параметров процесса.

Анализ патентной документации и технической литературы показывает, что для повышения качества внутренней поверхности горячекатаных бесшовных труб, в том числе из нержавеющей марки стали, в линии непрерывного стана с контролируемо-перемещаемой оправкой обработку внутренней поверхности гильз необходимо производить с использованием комбинированного состава, состоящего из неорганических плавких солевых смесей на основе щелочных фосфатов с боратными добавками, не содержащего графит [118-119]. Смазочно-дезоксирующий материал, предназначенный для обработки внутренней поверхности нагретой гильзы,

представляет собой высокотемпературное смазывающее средство, которое состоит из смеси фосфатных и боратных соединений [120].

Кроме того, исследования в обычных испытательных машинах показали, что графит обеспечивает стабильное смазывающее действие только до температур порядка 500°C. При температурах свыше 500°C, слой графита разрушается частично или полностью, вследствие чего коэффициент трения может подняться до 0,3 [121], что в значительной степени снижает стойкость оправок непрерывного стана и качество внутренней поверхности готовых труб. Кроме того, это способствует росту энергосиловых параметров и в целом энергоёмкости процесса. Использование графита нежелательно и с точки зрения гигиены труда, поскольку графитовый порошок легко распыляется в окружающей атмосфере и представляет серьёзную опасность для здоровья работающих поблизости людей при его вдыхании.

К качеству внутренней поверхности бесшовных труб, включая трубы из нержавеющей марки стали, потребителями предъявляются повышенные требования – полное отсутствие трещин и плён, вкатанной окалины, раковин, расслоений, наличия продольных и поперечных рисок глубиной более 5,0 % от номинальной толщины стенки, и других несовершенств поверхности.

Во многом наличие перечисленных выше дефектов зависит от наличия окалины на внутренней поверхности гильзы. Для борьбы с окалиной, а также сдерживания дальнейшего роста её количества производится обработка внутренней поверхности гильзы смазочно-дезоксирующим материалом, что позволяет за счёт химического взаимодействия преобразовывать возникшую окалину с растворением в расплаве, обладающем смазочными свойствами. При этом также происходит улучшение условий работы оправок непрерывного стана. Заданный объём смазочно-дезоксирующего материала определённого состава подаётся на внутреннюю поверхность гильзы методом вдувания. При этом равномерность нанесения материала, а значит и качество внутренней поверхности готовых труб во многом зависит от способа подачи смазочно-дезоксирующего материала и режимов его подачи.

В результате проведённых исследований были установлены следующие ключевые факторы и причины возникновения окалины на внутренней поверхности горячекатаных бесшовных труб в процессе их производства.

1. Наличие в марки стали определенных легирующих элементов, способствующих образованию прочных продуктов взаимодействия металла, окалины и дезоксидирующего материала.

2. Наличие воды в гильзе после прошивки, способствующей процессу интенсивного окисления внутренней поверхности.

3. Наличие в гильзе, отделившихся от свободных поверхностей макрочастиц окалины, которые в процессе раскатки гильз в непрерывном стане вдавливаются в стенку трубы.

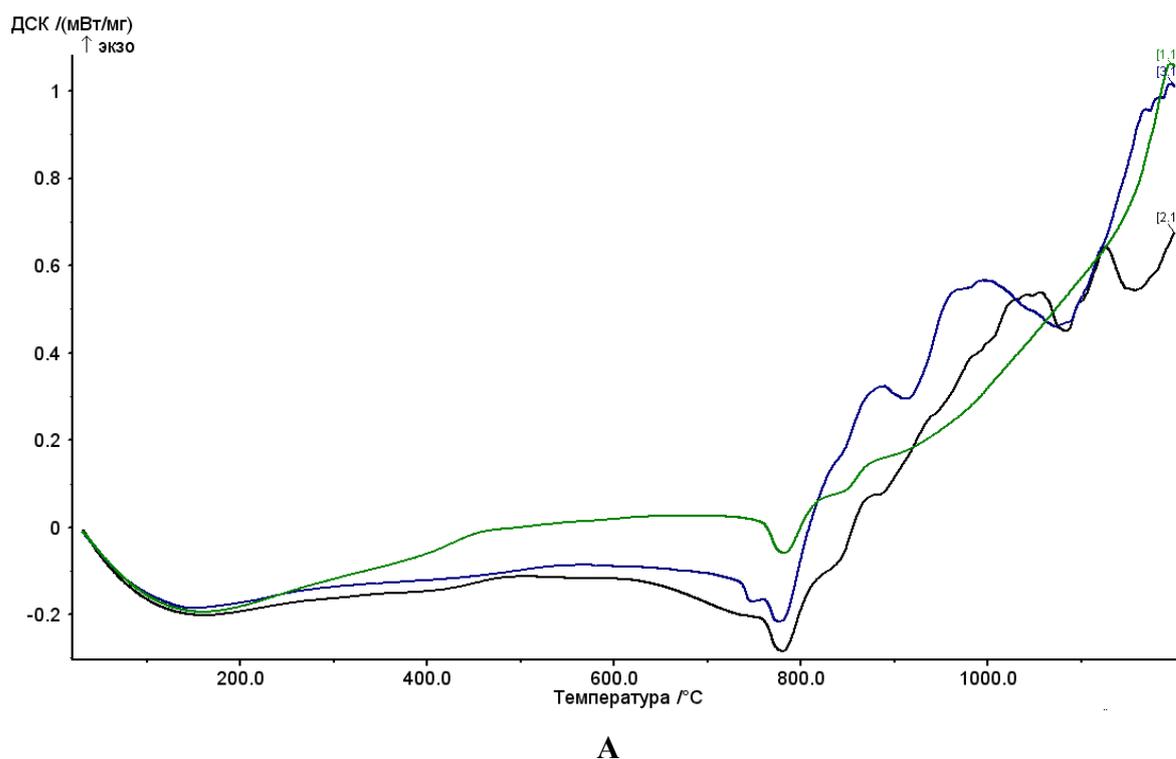
4. Шероховатость на внутренней поверхности гильз и труб, формированию которой способствуют:

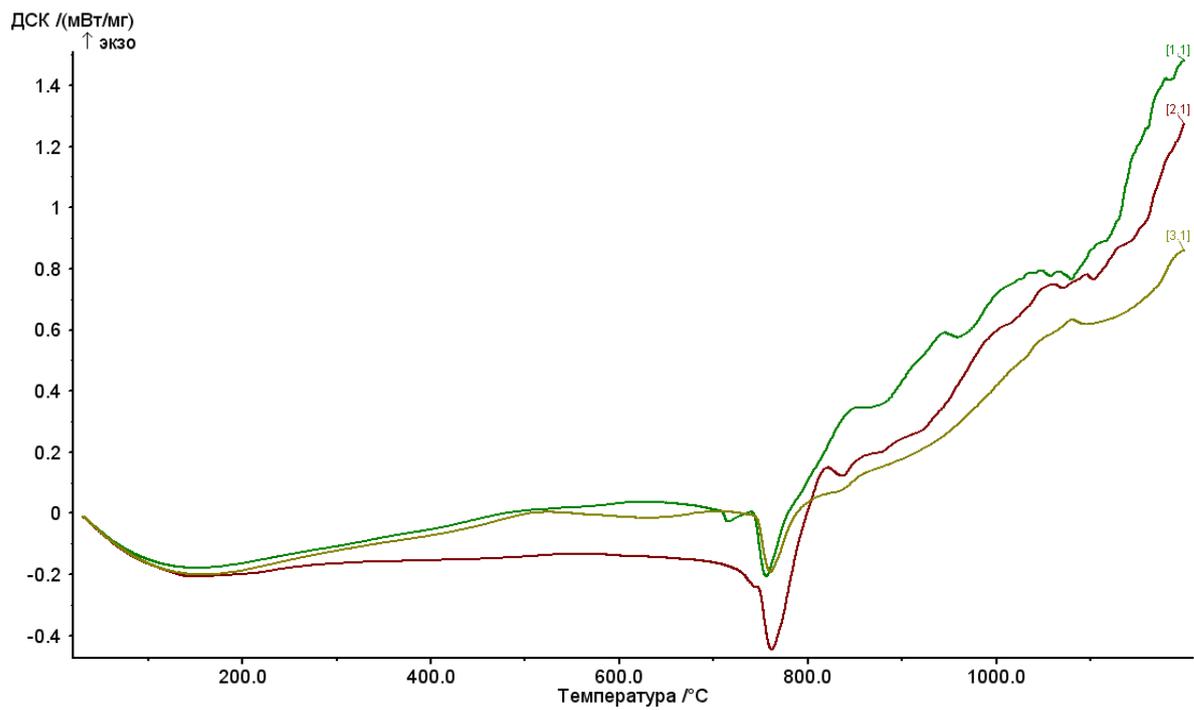
- износ оправок прошивного и непрерывного станов;
- налипание прокатываемого металла на рабочую поверхность оправок прошивного и непрерывного стана;
- большое количество неравномерно распределённого по длине гильзы вязкого расплава продуктов химического взаимодействия смазочно-дезоксирующего материала с окалиной;
- относительная неравномерность нанесения графитовой смазочной суспензии на рабочую поверхность оправок непрерывного стана.

Изучению процесса окалинообразования и разработке путей его минимизации посвящены многочисленные исследования различных авторов, некоторые из которых представлены в работах [122-128]. Исследования, проведённые на предприятиях Группы ТМК и в АО «РусНИТИ» с использованием методов термогравиметрии, дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгеноспектрального анализа позволили определить особенности химического взаимодействия, вдуваемого смазочно-дезоксирующего материала и окислов на внутренней поверхности гильз [129].

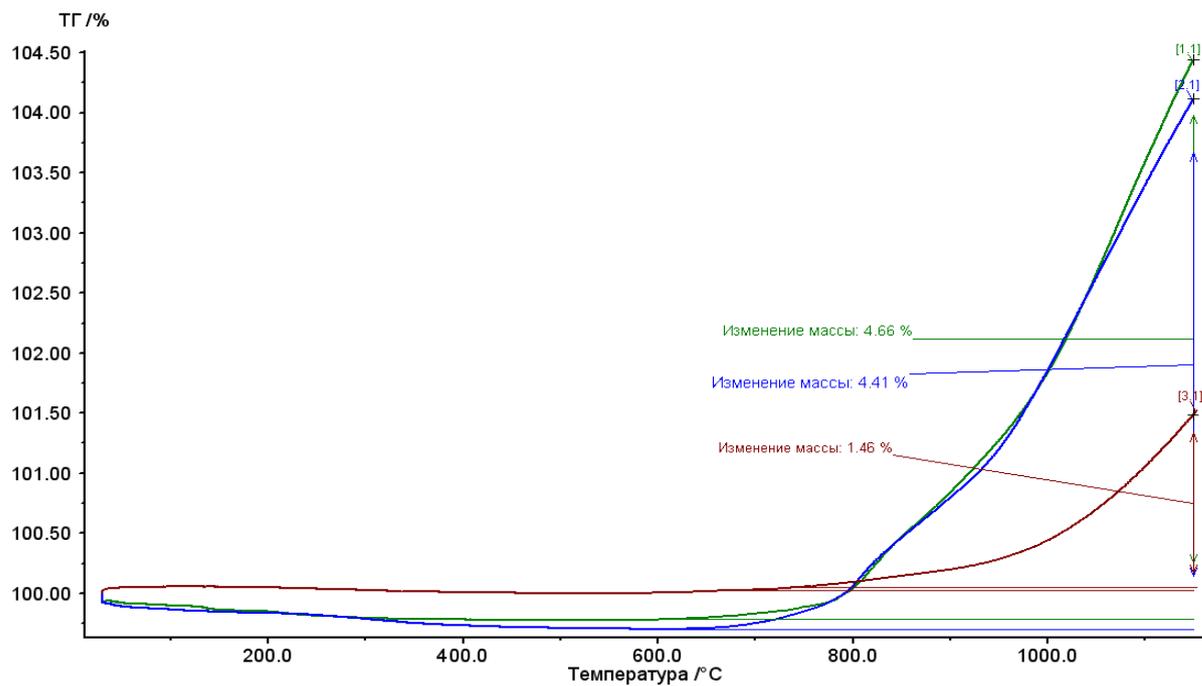
В качестве смазочно-дезоксирующих материалов, предназначенных для сдерживания интенсивного роста слоя окалины на внутренней поверхности гильз, не зависимо от деформируемого материала наиболее часто применяют бораты и фосфаты щелочных металлов, которые представляют собой конденсированные системы.

В ходе исследований, проведённых в АО «РусНИТИ», были изготовлены образцы из стали марок 13ХФА и 20 с нанесенным слоем дезоксирующих материалов различного состава на окисленную поверхность. После нагрева в камерной печи до температур, приближенным к температурам горячей деформации и промежуточного нагрева труб в линиях ТПА, а также температурам нагрева в закалочной печи на участках термической обработки, образцы подвергали исследованию методами термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии (рисунок 3.1).

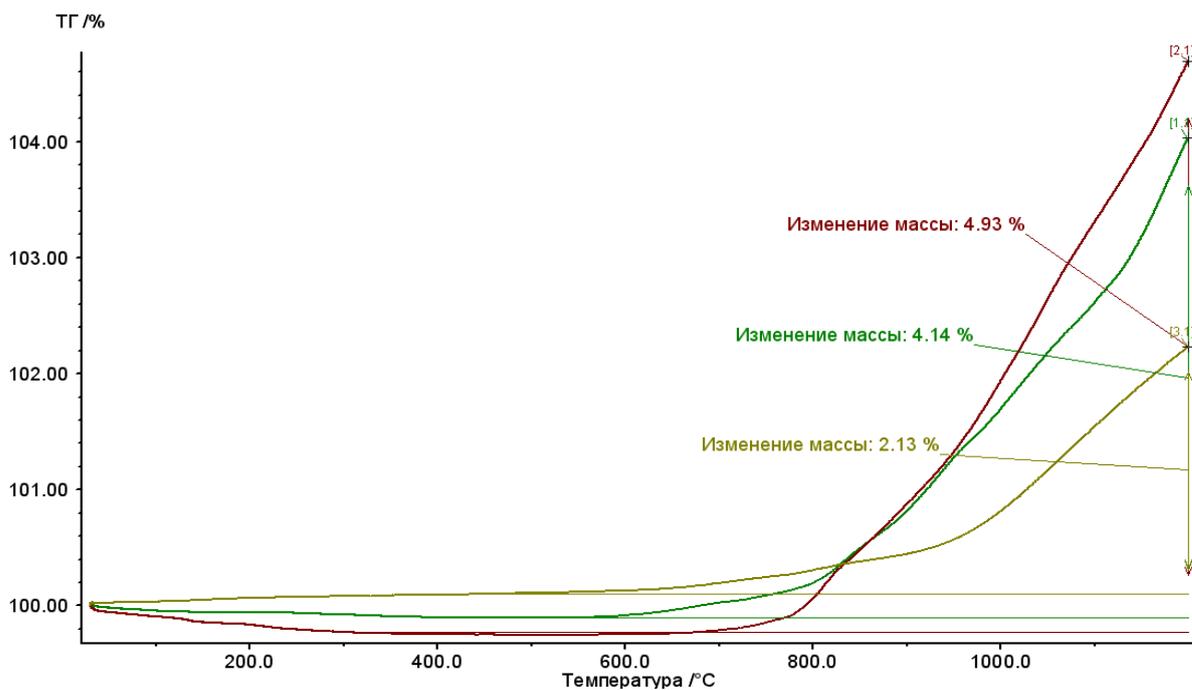




Б



В



Г

Рисунок 3.1 - Результаты дифференциально-сканирующей калориметрии (а, б) и термогравиметрии (в, г) при нагреве образцов из стали марок 13ХФА и 20: а – сталь 13ХФА: зеленая кривая – образец, очищенный от окалины; черная, синяя кривые – образцы с нанесенным слоем дезоксиданта; б - сталь 20: желтая кривая – образец, очищенный от окалины; зеленая, красная кривые – образцы с нанесенным слоем дезоксиданта; в – сталь 13ХФА: красная кривая – образец, очищенный от окалины; синяя, зеленая кривые – образцы с нанесенным слоем дезоксиданта; г – стали 20: желтая кривая – образец, очищенный от окалины; зеленая, красная кривые – образцы с нанесенным слоем дезоксиданта

Полученные результаты (рисунок 3.1) свидетельствует о том, что:

- нанесение слоя дезоксиданта на поверхность образца приводит к большему приросту массы по сравнению с образцом с чистой поверхностью, что связано с образованием расплавленного слоя, за время которого происходит выпаривание влаги, содержащейся в дезоксиданте, с образованием пара приводящего к интенсивному окислению железа;

- при температурах 600-700 °С начинается интенсивный прирост массы образцов с нанесенным слоем смазочно-дезоксирующего материала, при температурах 1200 °С прирост массы достигает около 5,0 %, что говорит о незначительном продолжении окисления металла. При этом можно считать, что проникновение кислорода не приводит к формированию твердых оксидов, которые растворяются в расплаве. На ДСК-кривых зафиксирована череда эндотермических пиков, свидетельствующих о продолжающемся в процессе нагрева взаимодействии окислов с продуктами дезоксирующего материала.

После проведения нагрева образцов из стали марки 13ХФА до температур 900, 1100 и 1250°С производился микрорентгеноспектральный анализ образованной окалины (рисунок 3.2).

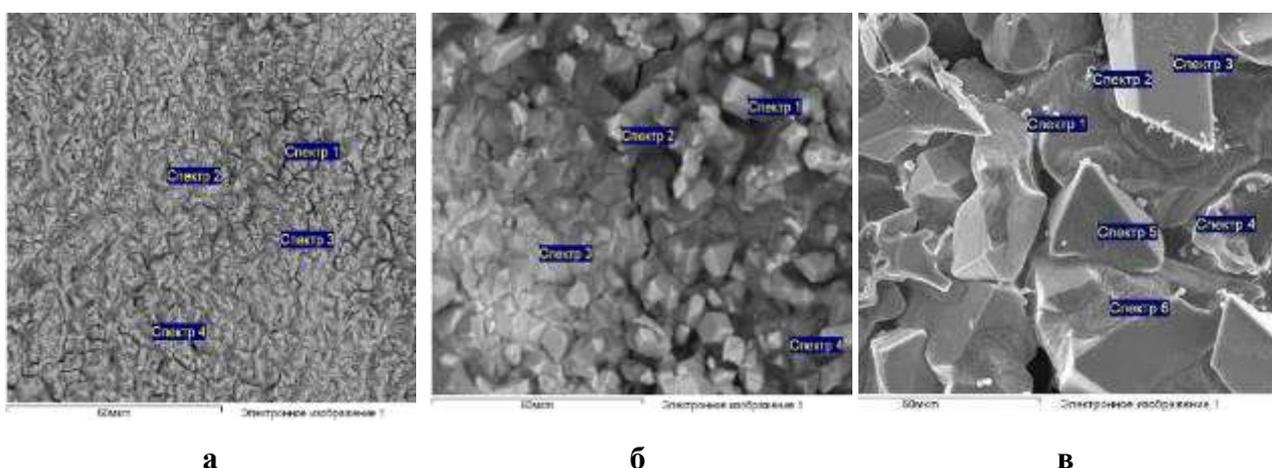


Рисунок 3.2 - Микрорентгеноспектральный анализ окалины, образованной на поверхности образцов из стали марки 13ХФА при их нагреве до различных температур: **а** – 900 °С; **б** – 1 100 °С; **в** – 1 250 °С

Таблица 3.1 – Результаты микрорентгеноспектрального анализа окалины, образованной на поверхности образцов из стали марки 13ХФА, нагретых до различных температур

| Температура нагрева образца, °С | Спектр | Массовая доля элементов, % | | | | |
|---------------------------------|--------|----------------------------|-------|----|----|----|
| | | O | Fe | Cr | Ni | Cu |
| 900 | 1 | 57,49 | 42,51 | - | - | - |
| | 2 | 51,70 | 48,30 | - | - | - |

| | | | | | | |
|-------|---|-------|-------|------|------|-------|
| | 3 | 64,12 | 35,88 | - | - | - |
| | 4 | 69,12 | 30,88 | - | - | - |
| 1 100 | 1 | 29,90 | 69,13 | 0,97 | - | - |
| | 2 | 15,01 | 84,99 | - | - | - |
| | 3 | 58,74 | 40,27 | 0,99 | - | - |
| | 4 | 42,50 | 56,93 | 0,57 | - | - |
| 1 250 | 1 | 23,23 | 46,52 | 0,60 | 2,69 | 26,96 |
| | 2 | 20,84 | 39,26 | 0,78 | 1,70 | 37,42 |
| | 3 | 31,28 | 67,10 | 1,62 | - | - |
| | 4 | 23,44 | 73,51 | 3,05 | - | - |
| | 5 | 28,03 | 69,16 | 2,81 | - | - |
| | 6 | 31,93 | 66,11 | 1,96 | - | - |

По результатам анализа (таблица 3.1) выявлен рост содержания легирующих элементов на границе сталь-окалина при увеличении температуры нагрева образцов вследствие диффузии данных компонентов к поверхности. Выделение тонких частиц окислов в металлической фазе упрочняет поверхностный слой, улучшает сцепление окалины со сплавом [129].

В результате проведённой работы по дробеструйной обработке внутренней поверхности нефтегазопроводных труб, было выделено 5 типов трудноудаляемых образований, вскрытых первичной дробеструйной обработкой, позволяющих определить их влияние на качество труб и стойкость оправок:

1. Окалина, закатанная в стенку трубы.
2. Продукты химического взаимодействия расплава дезоксиданта с окалиной, закатанные в стенку трубы.
3. Прикатанная окалина.
4. Продукты химического взаимодействия расплава дезоксиданта с окалиной, расположенные в углублениях шероховатостей и впадинах рисок.

5. Толстый слой продуктов химического взаимодействия расплава дезоксиданта с окалиной.

Для повышения качества внутренней поверхности готовых труб и стойкости оправок непрерывного стана с контролируемо-перемещаемой оправкой необходимо следующее.

1. Прокатку труб независимо от марки стали производить на новых оправках или оправках, бывших в употреблении ориентировочно с количеством проходов не более 400. При этом на их рабочей поверхности не допускается:

- наличие участков с износом по наружному диаметру в виде огранки;
- наличие скопления вырывов металла глубиной 0,5 мм и более на отдельных участках оправки;
- наличие многочисленных мелких вырывов металла по всей длине оправки;
- наличие механических продиров и трещин в различных направлениях на поверхности оправок.

2. Перед прокаткой труб необходимо проводить дополнительную проверку оборудования по внесению смазочно-дезоксирующего материала в гильзу и нанесения графитовой смазки на оправку непрерывного стана.

3. Производить периодический контроль за настройкой распылительных сопел, предназначенных для подачи смазочной суспензии на рабочую поверхность оправки, по установочным параметрам.

4. Производить периодический контроль температуры рабочей поверхности оправок. До нанесения смазки необходимо охлаждать оправку до температуры 110°C, но не ниже 95°C.

5. Систематически контролировать состояние рабочей поверхности оправок. Периодически очищать оправки от кусочков налипшего металла и окалины.

Основными факторами, влияющими на качество внутренней поверхности готовых труб и стойкость оправок, относящимися к смазочно-дезоксирующему материалу, можно отнести следующие:

- химический состав;
- реологические свойства в рабочем интервале температур;
- способ подачи;
- режимы нанесения;
- гранулометрия.

Химический состав

При недостаточном содержании в смазочно-дезоксирующем материале компонентов, отвечающих за дезоксидацию, окалина преобразуется не полностью. Это приводит к её вдавливанию в поверхность гильзы с образованием мелких раковин на внутренней поверхности готовых труб, что в конечном итоге приводит к снижению качества внутренней поверхности труб и стойкости оправок.

Реологические свойства продукта в рабочем интервале температур

Высокая вязкость расплава смазки ухудшает качество внутренней поверхности за счет низкой растекаемости и её вдавливания в стенку трубы. Расплав с низкой вязкостью, вследствие её стекания со стенок гильзы приводит к образованию утолщений в виде наплывов. При этом ухудшается товарный вид, увеличивается вероятность снижения выхода годного за счет утолщения стенки и выходом, таким образом, номинала за пределы поля допуска. Слишком низкая вязкость приводит к выдавливанию смазки из очага деформации, что снижает качество внутренней поверхности и стойкость оправок.

Способ подачи

Забрасывание (совком или ложкой) не обеспечивает равномерного распределения смазочно-дезоксирующего материала по внутренней поверхности гильзы. В этом случае она концентрируется в месте вброса и расходуется не полностью. При этом снижается стойкость оправок и качество

внутренней поверхности готовых труб. Вдувание смазки с помощью специального оборудования обеспечивает более равномерное распределение по внутренней поверхности гильзы и таким образом улучшает качество поверхности по всей длине трубы и стойкость оправок.

Режимы нанесения (расход, давление, время вдувания)

В условиях, не обеспечивающих равномерное распределение смазочно-дезоксирующего материала, возникают локальные утолщения, что в свою очередь снижает стойкость оправок и качество внутренней поверхности трубы. Избыточный расход смазочно-дезоксирующего материала приводит к образованию толстого слоя по всей внутренней поверхности гильзы, что снижает качество внутренней поверхности, а также производительность дробеструйной обработки труб, идущих под покрытие. Малый расход смазочно-дезоксирующего материала приводит к тому, что окалина преобразуется не полностью. Это ведёт к снижению стойкости оправок и качества внутренней поверхности готовых труб.

Гранулометрия

Крупные частицы смазочно-дезоксирующего материала, имеющие размеры свыше 500÷1000 мкм, не успевают полностью расплавиться и прореагировать. Поэтому реакция взаимодействия смазочно-дезоксирующего продукта с окалиной продолжается и после деформации металла. В результате этого образуется рыхлость на внутренней поверхности трубы в виде оспин и «рябизны».

Для обеспечения высокого качества обработки внутренней поверхности стальных гильз в том числе из нержавеющей марки стали, а также высокой стойкости оправок, смазочно-дезоксирующий материал должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- иметь плавкий комбинированный состав, состоящий из неорганических плавких солевых смесей на основе щелочных фосфатов с боратными добавками, не содержащий графит;

- равномерно распределён по внутренней поверхности гильзы, например, распылением;

- быть плавким в интервале рабочих температур прокатки труб;

- иметь размеры гранул не более 1000 мкм

- иметь вязкость в пределах $0,5 \div 1,5$ Па·с.

Поскольку во время прошивки процесс образования вторичной окалины на внутренней поверхности гильзы зависит от длительности пребывания на воздухе, то на переднем конце гильзы образуется наибольшее количество окалины с постепенным уменьшением к заднему концу. Это требует дифференцированной подачи смазочно-дезоксирующего материала по внутренней поверхности гильзы в продольном направлении. Поэтому оборудование для подачи смазочно-дезоксирующего материала должно обеспечивать дифференцированную подачу смазочно-дезоксирующего материала вдоль внутренней поверхности гильзы, учитывая, таким образом, неравномерное образование окалины по её длине.

На рисунке 3.3 представлены примеры оборудования для нанесения смазочно-дезоксирующего материала на внутреннюю поверхность гильзы, используемого в линиях непрерывных станов с контролируемо-перемещаемой оправкой.



Рисунок 3.3 – Примеры оборудования для нанесения смазочно-дезоксирующего материала на внутреннюю поверхность нагретой гильзы

На рисунке 3.4 представлен типичный внешний вид двух половин гильзы, обработанной с помощью представленного оборудования.



Рисунок 3.4 - Внешний вид двух половин гильзы

В результате визуальной оценки состояния внутренней поверхности гильзы было установлено следующее.

Неравномерное распределение смазочно-дезоксирующим материала по длине и периметру гильзы; при этом, на первых 4-х метрах максимальная толщина покрытия колеблется от 50 до 500 мкм, винтовой след от прокатного инструмента на этой части гильзы отсутствует. Начиная с 5-го метра и до конца гильзы, на внутренней поверхности наблюдается явно выраженная винтовая линия, толщина покрытия в этой части уменьшается и колеблется от 0 до 100 мкм, цвет гильзы в основном металлический. Некоторые участки (7, 8, 9 м) гильзы остались практически не обработанными смазочно-дезоксирующим материалом, зафиксирована часть переднего конца гильзы не обработанного смазочно-дезоксирующим материалом.

Общим недостатком представленных конструкций является то, что они не позволяют производить полную и равномерную обработку внутренней

поверхности гильзы, что в конечном итоге ведёт к снижению качества внутренней поверхности готовых труб, стойкости оправок, повышенному расходу смазочно-дезоксирующего материала. Кроме того, данное оборудование не позволяет производить дифференцированную подачу смазочно-дезоксирующего материала по длине внутренней поверхности гильзы, что также снижает качество готовых труб и стойкость оправок.

На рисунке 3.5 представлено оборудование, позволяющее устранить вышеуказанные недостатки [130].

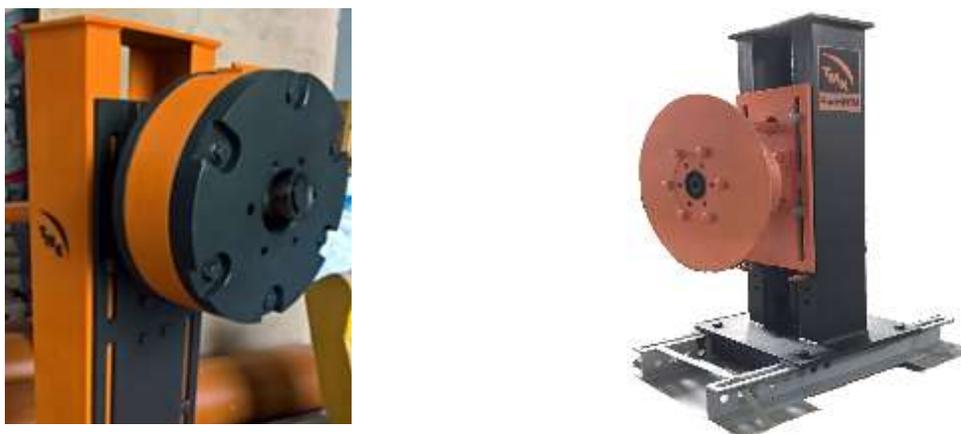


Рисунок 3.5 – Оборудование для нанесения смазочно-дезоксирующего материала на внутреннюю поверхность гильзы

Использование данного оборудования позволяет повысить качество внутренней поверхности готовых труб, стойкость оправок непрерывного стана и снизить расход смазочно-дезоксирующего материала.

Обработка внутренней поверхности вращающейся гильзы производится путём вдувания порошкового смазочно-дезоксирующего материала потоком азота и подачей вихревого потока азота в направлении противоположном направлению вращения гильзы. Перед вдуванием в гильзу смазочно-дезоксирующий материал разделяют на два потока, которые подают одновременно, при этом один поток смазочно-дезоксирующего материала направляют вдоль продольной оси гильзы в виде пучка частиц, а другой поток распыляют по внутренней поверхности гильзы, и вместе со

смазочно-дезоксилирующим материалом подают в гильзу вихревые потоки газа для равномерного распределения смазочного материала по внутренней поверхности гильзы.

Поток смазочно-дезоксилирующего материала, направленный вдоль продольной оси гильзы в виде пучка частиц, обеспечивает обработку заднего конца гильзы. Поток смазочного материала, распылённый перед передним концом, в совокупности с вращением гильзы и вихревыми потоками газа обеспечивает обработку переднего конца гильзы. В целом при такой обработке на внутренней поверхности по всей длине гильзы не остаётся участков, необработанных смазочно-дезоксилирующим материалом. Распределение частиц смазочно-дезоксилирующего материала происходит дифференцировано. Передний конец обрабатывается больше. Далее идёт постепенное снижение интенсивности обработки внутренней поверхности гильзы смазочно-дезоксилирующим материалом, что позволяет компенсировать неравномерное образование окалина по длине гильзы. Такое распределение смазочно-дезоксилирующего материала позволяет повысить качество внутренней поверхности готовых труб и стойкость оправок непрерывного стана.

Кроме того, разделение смазочного материала на два потока, направленных в разных направлениях, снижает интенсивность выдувания смазочного порошка с заднего конца гильзы. При этом происходит значительное снижение расхода смазочно-дезоксилирующего материала.

Применение такого метода позволяет сбалансировать процесс нанесения смазочно-дезоксилирующего материала по всей внутренней поверхности гильзы, и таким образом, уменьшить количество локальных утолщений смазочно-дезоксилирующего материала, уменьшить коэффициент трения на контакте «оправка-деформируемый металл», снизить вероятность возникновения дефектов в виде рисок и вдавов, повысить стойкость оправок непрерывного стана, снизить расход смазочно-дезоксилирующего материала.

На рисунке 3.6 приведена фотография процесса вдувания смазочно-дезоксирующего материала на внутреннюю поверхность гильзы с помощью данного оборудования.



Рисунок 3.6 – Вдувание смазочно-дезоксирующего материала на внутреннюю поверхность гильзы

На рисунке 3.7 показана внутренняя поверхность остывшей гильзы. Из рисунка 3.7 видно, что смазочно-дезоксирующий материал по периметру поперечного сечения переднего и заднего концов гильзы распределен равномерно. При этом на переднем конце гильзы количество продуктов химического взаимодействия смазочно-дезоксирующего материала с окалиной больше, чем на заднем конце, что подтверждает дифференцированный характер обработки гильзы.



Передний конец

Задний конец

Рисунок 3.7 – Внутренняя поверхность гильзы после остывания

На рисунке 3.8 показана внутренняя поверхность готовой трубы, обработанная смазочно-дезоксирующим материалом с применением этого способа [131].



Рисунок 3.8 – Внутренняя поверхность готовой трубы

Выполненный комплекс исследований подтвердил, что для обеспечения высокого качества обработки внутренней поверхности стальных гильз, в том числе из нержавеющей марки стали, а также высокой стойкости оправок раскатного стана, смазочно-дезоксирующим материалом должен удовлетворять сформулированным в данном разделе основным требованиям.

3.2 Требования к графитовым смазкам и оборудование для их эффективного нанесения на контролируемо-перемещаемую оправку с целью обеспечения ее износостойкости

Для прокатки труб на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой при выборе смазки, учитывая высокие прочностные свойства стали марок типа 08-12X18H10T при температурах деформации, на первое место выходит обеспечение высокой несущей способности и прочности разделительного смазочного слоя. Незаменимым компонентом для

прокатки стали такого типа в составе смазки на сегодня является графит, природа происхождения которого в большей степени определяет основные её свойства [132-135].

По этой причине в настоящее время при производстве бесшовных горячекатаных труб, в линии непрерывного стана с контролируемо-перемещаемой оправкой используются графитсодержащие смазки. Все известные составы таких смазок представляют собой смеси графита с различными добавками, обеспечивающими при разведении с водой образование суспензий с необходимыми технологическими свойствами, а также нанесение сплошного смазывающего разделительного слоя на рабочую поверхность оправок для снижения отрицательного влияния сил трения при контактном взаимодействии оправки с деформируемым металлом. Это обеспечивает стабильную работу прокатного оборудования, стойкость оправок, качество выпускаемых труб за счет снижения трения между контактирующими поверхностями при заполнении непрерывного стана в процессе прокатки и стягивания трубной заготовки с оправки.

Наиболее важным свойством графита является его смазывающая способность, которую он имеет благодаря слоистой структуре кристаллической решетки. Графит закрепляется на контактных поверхностях, в результате чего внешнее трение между поверхностями заменяется внутренним трением между слоями графита.

Однако не все графиты обладают одинаковыми смазывающими свойствами, и разница в этих свойствах может быть связана со способом его получения.

Одним из распространенных способов получения графита является его добыча на природных месторождениях. Добытый таким образом графит имеет кристаллическое строение.

Другим способом получения графита является его синтез из углеродсодержащих соединений. Полученный таким образом графит является искусственным, и его свойства будут зависеть от времени, температуры и

метода получения, а также от исходных материалов, так как не все углеродсодержащие материалы способны к графитизации. Графитизацией называют высокотемпературный процесс совершенствования структуры углеродного материала для получения в нём структуры графита.

Одним из качественных показателей, полученных таким способом графитов, является степень их графитизации, то есть доля атомов углерода, которая ориентирована в требуемом порядке и образует слоистую структуру. В природных кристаллических графитах, как правило, степень графитизации составляет 98 – 100%, в искусственных графитах этот показатель, как говорилось выше, зависит от времени, температуры, метода получения и исходных материалов [132]. Менее графитизированный углерод обладает высокой твердостью и плохими смазывающими свойствами.

Кроме того, искусственный графит, при достижении температуры 400 °С легко окисляется. При этом он разрыхляется и теряет прочность [133]. Искусственный графит отличается низкой кристалличностью и высокой чистотой. Способ производства искусственного графита предполагает образование в нём карбидообразующих элементов с высокой температурой плавления. По перечисленным выше причинам, использование искусственного графита при прокатке труб из нержавеющей марки стали нежелательно, так как может привести к значительному снижению качества готовой продукции и повышению расхода дорогостоящих оправок.

Хорошие смазывающие свойства графита обусловлены образованием на скользящих поверхностях защитного слоя из гексагональных сеток атомов углерода (в особенности на металлических поверхностях).

Согласно литературным данным [132] наилучшими смазывающими свойствами обладают графиты с идеальной кристаллической решеткой, представляющей собой плоские пластинки, расположенные параллельно друг другу и связанные между собой слабыми связями. Однако не все графиты имеют идеальное строение из-за наличия дефектов, как в самих слоях, так и в пространстве между ними.

В работе [132] внешний вид графита связывают со степенью совершенства его кристаллической решетки. Чем меньше дефектов присутствует в слоях графита, тем большей отражательной способностью эти слои обладают.

Естественный кристаллический графит блестит почти так же, как металлы, в то время как плотно связанный поликристаллический графит имеет черный цвет. В этом состоянии поверхность твердого тела не обладает способностью отражать падающий на нее свет.

В АО «РусНИТИ» были проведены исследования смазывающих свойств различных видов графитов на трибологической установке (рисунок 3.9).

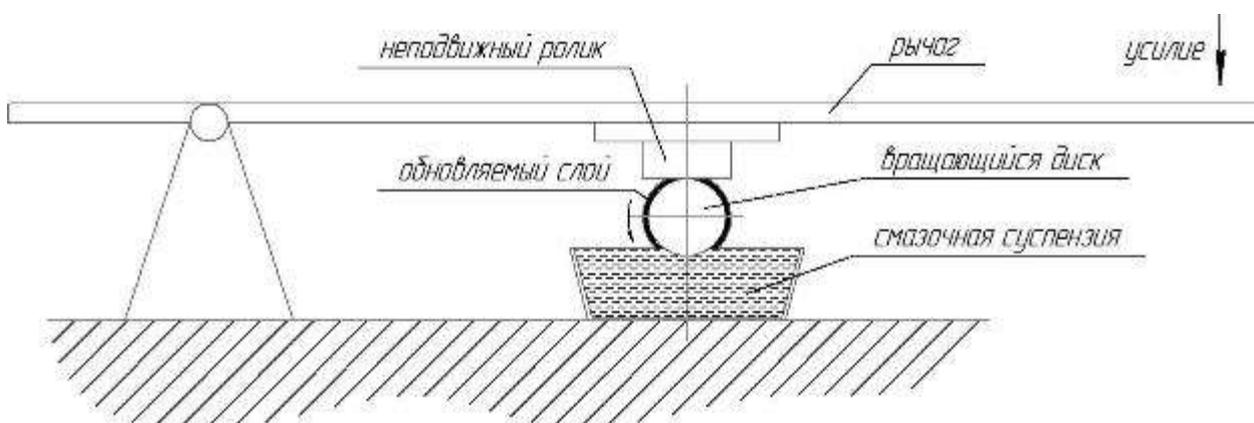


Рисунок 3.9 – Принципиальная схема трибологической установки

Графиты использовали для приготовления суспензий с одинаковой концентрацией. Смазочные свойства графитов оценивали по нагрузке, при которой достигались критические условия на поверхности трения (заклинивание приводного ролика). Исследования показали, что смазывающая способность натурального кристаллического графита на 23% выше, чем искусственного.

Согласно литературным данным, термоокислительная стабильность также связана со структурой графита. Основные кристаллографические плоскости кристаллов графита сравнительно инертны к окислению, которое происходит на крайних атомах, имеющих свободные валентности. В графитах с крупными частицами площадь основных плоскостей значительно больше

площади всех других плоскостей. Также по кривым видно, что искусственный графит имеет более низкую температуру начала окисления, по сравнению с натуральным графитом. Природный графит более устойчив к воздействию высоких температур.

Еще одним показателем качества графита является его зольность, а также содержание тугоплавких оксидов. Для искусственного графита зольность, как правило, менее 1%. Для природного графита значение данного показателя варьируется и может достигать до 10%.

Значения насыпной плотности также принимают [133] за некоторую характеристику совершенства кристаллической структуры графита. Невысокие значения плотности, по-видимому, связаны с наличием областей с сильным нарушением упаковки слоев.

Таким образом, наиболее подходящий графит в составе графитовой смазки для нанесения на контролируемо-перемещаемую оправку, при прокатке на ТПА с непрерывными станами должен обладать:

- лучшими смазывающими свойствами (как правило это блестящие серые графиты с идеальной кристаллической решеткой, представляющей собой плоские пластинки, расположенные параллельно друг другу и связанные слабыми связями;
- высокой термоокислительной устойчивостью, то есть более длительной сохранностью устойчивого разделительного слоя при повышении температуры;
- минимальным количеством примесей.

Удовлетворяющий этим требованиям графит может служить основой для графитовой смазки, которую используют для приготовления смазочной суспензии.

Получаемая графитовая суспензия должна соответствовать определенным требованиям, чтобы в результате нанесения на оправку было получено качественное графитовое покрытие.

Распределение графитовой смазки в воде и образование однородной

графитовой суспензии является одним из важных технологических показателей смазки. Готовая к применению графитовая суспензия должна быть однородной, без комочков, пены и неприятного запаха, а также должна образовываться за время, указанное в рекомендациях для ее приготовления.

Основным показателем технологичности суспензии графитовой смазки является вязкость, величина которой сказывается на толщине получаемого покрытия, а также на стабильности работы оборудования, предназначенного для нанесения суспензии на оправку. При этом распределение графита на единицу площади рабочей поверхности оправки должно находиться в пределах 80-120 г/м². Вязкость суспензии не должна сильно зависеть от температуры окружающей среды.

Графитовая суспензия не должна быть коррозионно-активной по отношению к металлическим поверхностям. Наличие в суспензии избытка свободных ионов водорода или гидроксид-ионов может быть причиной появления коррозионных очагов на металлической поверхности. Благоприятным значением по данному показателю является интервал значений 7÷10 (нейтральная – слабощелочная среда). Кислая среда графитовой суспензии (рН<7) является источником свободных ионов водорода, являющихся сильным окислителем.

Графитовая смазочная пленка на поверхности оправки (температура 90 – 120°С), должна быть сплошной, равномерной, сухой по всей длине, допускаются незначительные потеки. Не допускается наличие пузырей и отслоений в пленке, так как это может привести к нарушению сплошности смазочной пленки и, как следствие, быть причиной возникновения контакта трущихся поверхностей, приводящей к ухудшению качества внутренней поверхности трубы из-за появления дефектов. Графитовая суспензия должна высыхать на оправке за время, не превышающее 30 секунд.

Водостойкость является одним из показателей адгезии получаемой графитовой пленки к металлической поверхности. Не допускается отслоения смазочного покрытия при перемещении оправки по транспортному рольгангу.

В условиях горячей прокатки труб оправка подвергается существенному нагреву, что отрицательно сказывается на ее стойкости и качестве покрытия. Поэтому получаемое покрытие должно обладать теплозащитными свойствами для снижения температурного воздействия на оправку.

Для оценки теплозащитных свойств графитовых смазок в АО «РусНИТИ» изготовлена специальная лабораторная установка (рисунок 3.10).

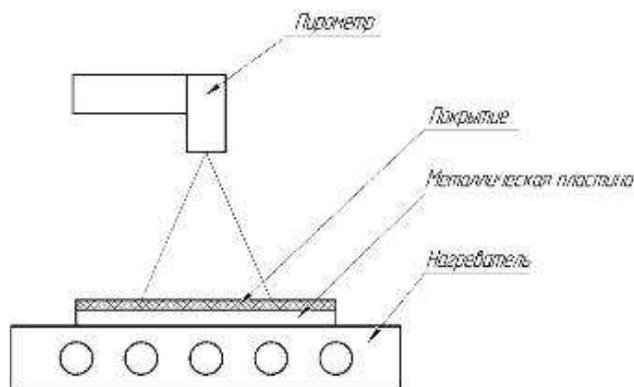


Рисунок 3.10 – Схема установки для оценки теплозащитных свойств графитовой смазки

С помощью нагревательного элемента, имеющего температуру 500°C , создается тепловое воздействие на поверхность металлической пластины. Металлическую пластину без покрытия помещали на нагревательный элемент и измеряли температуру на поверхности образца с помощью контактного пирометра через определенные временные промежутки. Затем на этот образец, нагретый до $90 - 120^{\circ}\text{C}$ наносили графитовую смазку для получения покрытия. С помощью контактного пирометра фиксировали температуры нагрева поверхности металлической пластины без графитовой смазки и после нанесения покрытия. По полученным данным строили график зависимости разности температур ΔT от времени воздействия тепла нагревательного элемента ($\Delta T = T_{\text{без графита}} - T_c$) (рисунок 3.11).

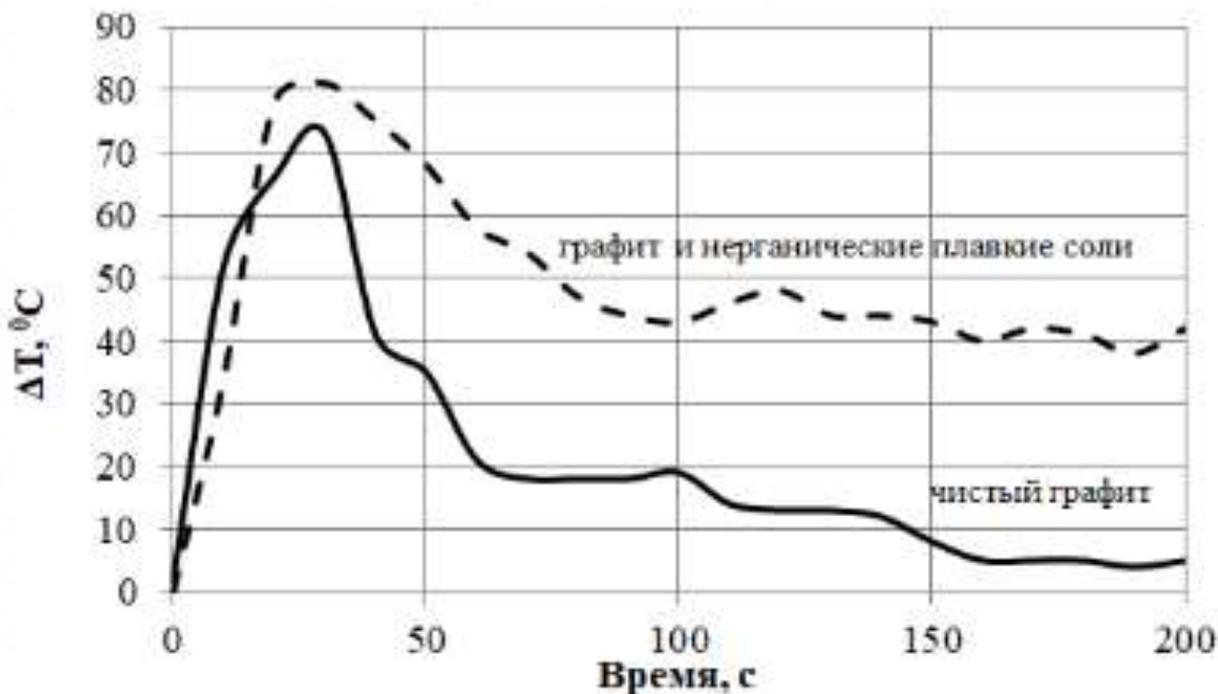


Рисунок 3.11 – График зависимости изменения температуры образца со смазкой от времени нагрева

Из графика видно, что смазка, содержащая чистый графит, обладает меньшими теплозащитными свойствами по сравнению со смазкой, содержащей неорганическую плавкую составляющую.

Для нанесения смазочной суспензии в линии непрерывного стана при производстве бесшовных горячекатаных труб, включая трубы из нержавеющей марки стали, используется оборудование, реализующее безвоздушный способ нанесения или способ нанесения сжатым воздухом. Оба способа позволяют получить гомогенную смазочную плёнку на рабочей поверхности оправки; сбалансировать расход смазки; повысить качество внутренней поверхности труб и стойкость оправок, получить наилучшие результаты по экономичности, улучшить экологическую безопасность.

Состав основного оборудования для приготовления и нанесения водной смазочной суспензии безвоздушным способом в линии непрерывного стана с контролируемо-перемещаемой оправкой включает:

1. Бак для приготовления смазочной суспензии объёмом 1500-2000 л. с механизированной подачей порошка, оснащенный дозатором воды,

диспергатором для приготовления смазки, подающим насосом, интегрированной системой подачи порошка.

2. Ёмкость для готовой смазки объёмом 2000-2500 л. Ёмкость оборудована электрической мешалкой, двумя нагнетающими насосами, двумя циркулирующими системами с системой контроля. В оборудование входят все необходимые клапаны и трубопроводы.

3. Перфорированный диск с фильтром.

4. Распыляющий барабан (камера) длиной 900-1500 мм с двумя кольцами. Каждое кольцо имеет по 4 безвоздушных клапана с выпускными соплами. Регулирование распыляющего барабана возможно исполнительным быстродействующим устройством.

5. Система возврата использованной (стекшей) смазки, которая включает ёмкость на 1000 л. с мешалкой, фильтр, диафрагмовый насос для подачи смазки обратно в рабочую ёмкость для смазки или перемешивающую дозирующую ёмкость.

6. Установочное оборудование, включая трубы для всех подающих смазку систем из нержавеющей марки стали, и трубы для подачи сжатого воздуха и воды из гальванизированной стали.

Примеры оборудования, реализующего безвоздушный способ распыления водной графитовой смазочной суспензии на оправку в линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой, приведены на рисунках 3.12 (оборудование в линии ТПА 159-429, АО «ВТЗ», изготовитель фирма «INSSE») и 3.13 (оборудование в линии ТПА 10 ¾", ПАО «ТАГМЕТ», изготовитель фирма «BEMERS»). На рисунке 3.14 (оборудование в линии ТПА 168-365, ПАО «СТЗ», изготовитель фирма «СМТ») представлен пример воздушного способа распыления смазочной суспензии.



Рисунок 3.12 – Пример распылительного оборудования с клапанами и выпускными соплами для безвоздушного нанесения смазочной суспензии



Рисунок 3.13 – Пример распылительного оборудования для нанесения смазочной суспензии



Рисунок 3.14 – Пример распылительного оборудования для нанесения смазочной суспензии АО «СТЗ»

Регулирование толщины слоя графитовой смазки при безвоздушном напылении осуществляется следующими параметрами:

- давлением при нанесении смазки;
- скоростью движения оправки;
- количеством колец с распылительными форсунками

При напылении сжатым воздухом:

- давлением воздуха при распылении смазки;
- потоком смазочного материала (обеспечивается насосами);
- углом раскрытия (распыления);
- скоростью движения оправки.

Отличием безвоздушного способа нанесения графитовых смазок является возможность применения более вязких суспензий (с условной вязкостью до 100 сек.).

Выполненный комплекс исследований показал, что для нанесения смазочного материала на рабочую поверхность оправки с целью обеспечения гарантированного разделения контактных поверхностей и высоких антифрикционных свойств необходимо использование комбинированного состава, представляющего собой сочетание графита и неорганических плавких солей, с набором функциональных ингредиентов, отвечающих за адгезию, плёнообразование смазочного слоя, седиментацию, вязкость. Для обеспечения высокого качества обработки рабочей поверхности оправок при прокатке труб из нержавеющей марки стали, а также высокой стойкости оправок и качества готовых труб смазочный материал должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- содержать природный графит с высокой термоокислительной устойчивостью и зольностью менее 1%;
- графитовая смазочная суспензия должна быть однородной, без комочков, пены и неприятного запаха, а также образовываться за время, указанное в рекомендациях для ее приготовления (ориентировочно за 30-60 минут);
- иметь благоприятное значение показателя рН 7-10 (нейтральная – слабощелочная среда);
- обеспечивать высокие теплозащитные свойства.

Для нанесения графитовой смазочной суспензии на поверхность оправки необходимо использовать способы воздушного или безвоздушного распыления для получения сплошного равномерного смазочного слоя без пузырей и отслоений.

3.3. Исследование влияния смазочно-дезоксирующих материалов на коэффициент трения

Под величиной коэффициента трения в данном исследовании будем понимать отношение усредненного по контактной поверхности напряжения

трения к средней величине контактного давления. Имеющаяся в научно-технической литературе информация свидетельствует о том, что расчет среднего напряжения трения допустим для всех процессов ОМД, так как обеспечивает достаточную точность расчета энергосиловых параметров. В настоящее время известен ряд относительно простых методик определения коэффициента трения. К ним относятся метод конических бойков, метод осадки клиновидного образца, метод осадки кольца, метод бочкообразования, метод давления, метод осадки со сдвигом, метод вытяжки с утонением. Анализ этих методов показал, что все они имеют свои достоинства и недостатки. При этом большинство из этих методов применимо только для оценки величины коэффициента трения при холодной деформации. В случае горячей деформации наиболее подходящим будет метод подобный методу бочкообразования, предложенного С.И. Губкиным и Н.М. Орловым в 1934 году. Согласно этому методу, сплошные цилиндрические образцы осаживают между параллельными плитами. При этом образцы принимают бочкообразную форму, которую предложено характеризовать показателем бочкообразности, представляющим, по существу, относительную разницу максимального и минимального диаметров. Далее делается вполне логичный вывод о том, что чем больше коэффициент трения, тем больше показатель бочкообразности. и предлагается формула для расчета коэффициента трения по результатам вычисления показателя бочкообразности. В то же время, во-первых, непонятен физический смысл формулы и, во-вторых, получается, что величина коэффициента трения зависит от степени деформации при осадке и от начальных размеров образца, что также лишено физического смысла. Однако следует отметить, что дается рекомендация при какой степени деформации и при каких начальных размерах рассчитывать коэффициент трения.

Для того, чтобы в максимальной степени устранить отмеченные выше недостатки, предлагается модернизировать метод Губкина-Орлова.

Известные в настоящее время результаты исследований контактного трения при пластической деформации металла [94, 108] свидетельствуют о том, что для процессов горячей пластической деформации, особенно высоколегированных марок стали для определения напряжений трения более подходит закон, предложенный Э. Зибелем, т.е. $\tau = f\tau_s$, где τ – напряжение трения; f – коэффициент трения; τ_s – сопротивление металла пластической деформации сдвига. Соответственно предлагаемая методика ориентирована на определение коэффициента трения для закона трения Э. Зибеля. В этом случае также производится осадка цилиндрических образцов между параллельными плитами (рисунок 3.15).

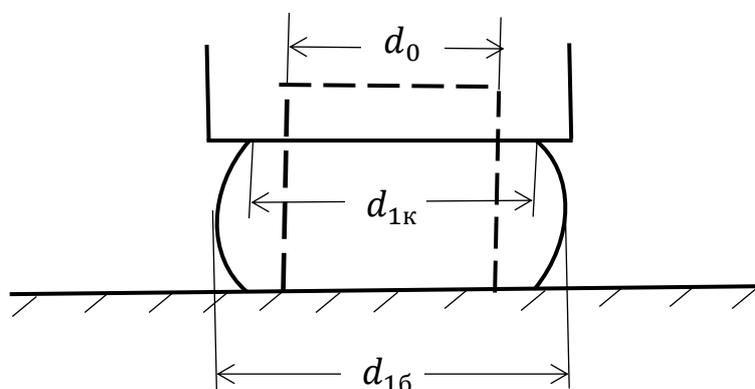


Рисунок 3.15 – Схема процесса осадки

Образцы из исследуемого материала представляют собой цилиндры диаметром 10 мм и высотой 15 мм.

В процессе эксперимента замеряются исходный диаметр цилиндрического образца d_0 , диаметр контактной поверхности после осадки $d_{1к}$ и максимальный диаметр образца после осадки $d_{1б}$. Замеры выполняются с помощью стереомикроскопа. При этом встает вопрос с какой степенью деформации осаживать образец. Очевидно, что при существенной степени деформации условия трения могут меняться во времени, что не позволит определить истинное значение коэффициента трения. С другой стороны, при малой степени деформации изменения его геометрических размеров будет

несущественным, что может привести к существенной погрешности измерений. Отмеченные обстоятельства, в частности, подтверждают результаты, полученные в работе [136]. Поэтому экспериментальное исследование необходимо осуществлять в две стадии. На первой стадии образцы следует осаживать с разными степенями деформации и оценивать влияние степени деформации на получаемую величину коэффициента трения. Диапазон степеней деформации, при котором значения коэффициента трения наиболее стабильны, выбирается в качестве рабочего. На второй стадии осуществляется исследование зависимости коэффициента трения от технологических параметров процесса деформации в определенном на предыдущей стадии, диапазоне степеней деформации.

В связи с тем, что в процессе эксперимента предполагается изучить влияние на коэффициент трения температуры деформируемого металла, образец помещается в специальный толстостенный контейнер (рисунок 3.16), нагревается вместе с ним до требуемой температуры и затем осаживается без извлечения из контейнера.

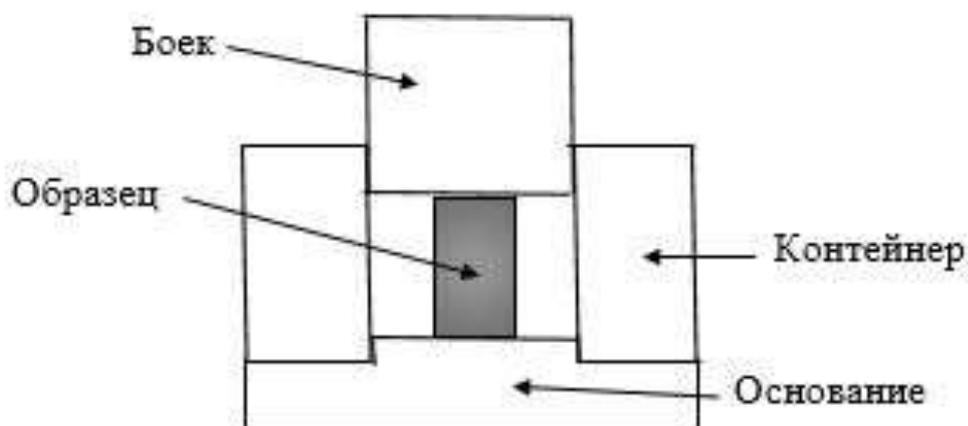


Рисунок 3.16 – Схема установки бойка в контейнере

В процессе эксперимента исследуется влияние на коэффициент трения смазочных и дезоксидирующих материалов. С этой целью осуществляются следующие варианты осадки образцов:

1. На контактных поверхностях образца, бойка и основания отсутствуют смазочные и дезоксидирующие составы.
2. На верхнюю контактную поверхность образца и на контактную поверхность основания насыпается порошок дезоксидирующего материала.
3. На контактную поверхность бойка и на контактную поверхность основания наносится слой графитовой смазки.
4. На контактную поверхность бойка и на контактную поверхность основания наносится слой графитовой смазки, сверху на контактную поверхность основания насыпается порошок дезоксидирующего материала, на верхнюю контактную поверхность образца насыпается порошок дезоксидирующего материала.

С целью определения значений коэффициента трения с использованием результатов замера геометрических размеров образца принимаются во внимание следующие закономерности:

- ✓ если $\tau = \tau_s$, т. е. $f=1$ на всей контактной поверхности будет прилипание и, соответственно, $d_{1к} = d_0$;
- ✓ если $\tau = 0$, т.е. $f = 0$ будет отсутствовать неравномерность деформации, искажение формы боковой поверхности образца не будет и, соответственно, $d_{1к} = d_{1б}$.

В реальных условиях коэффициент трения принимает, как правило, некоторое промежуточное значение, т.е. $0 \leq f \leq 1,0$ и, соответственно $d_0 \leq d_{1к} \leq d_{1б}$.

Если принять гипотезу о том, что в диапазоне изменения диаметра контактной поверхности образца зависимость между ним и коэффициентом трения линейная (рисунок 3.17), появляется возможность оценить величины коэффициента трения по результатам замеров исходного диаметра образца, а также его диаметра на контактной поверхности и в месте максимального бочкообразования.

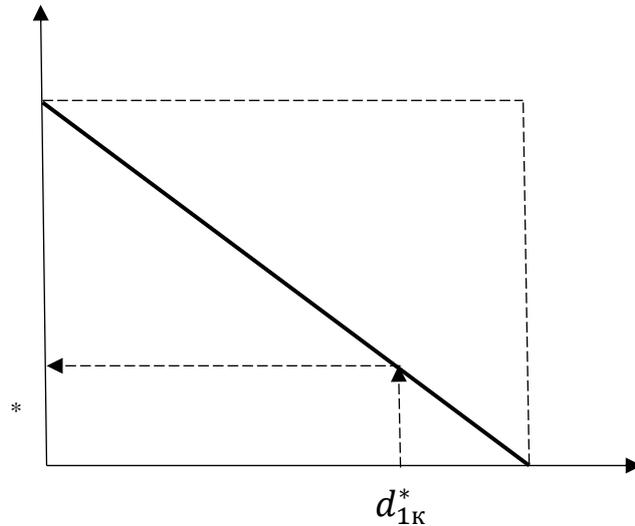


Рисунок 3.17 – Зависимость коэффициента трения от скольжения на контактной поверхности

С использованием результатов этих замеров, прежде всего, масштабируется ось $d_{1к}$. Затем зная величину $d_{1к}^*$ по графику на рисунке 3.17 легко определить значение коэффициента трения f^* . Также это можно сделать по формуле

$$f^* = \frac{d_{1к}^* - d_{16}}{d_0 - d_{16}}. \quad (3.1)$$

Точность определения коэффициента трения по представленной методике во многом зависит от точности измерения геометрических размеров образца. Поэтому измерения необходимо делать с использованием стереомикроскопа Stemi 2000C. Микроскоп служит для визуального стереоскопического наблюдения с тринокулярным тубусом с возможностью микрофотографирования и видеодокументирования изображений. Таким образом фотография образца может быть экспортирована на персональный компьютер и обработана на нем, например, с помощью средств графического редактора «КОМПАС».

В качестве образцов для исследования применялись цилиндрические образцы из стали марки 12Х18Н10Т высотой 15 мм с диаметром 10 мм.

В качестве дезоксидирующего материала применялся дезоксидант «Sideox» производства компании «Sichim Alfa».

В качестве смазочного материала использовалась графитовая смазка «Polypire 18» производства ООО «Политег-Мет».

Экспериментальные исследования проводились на автоматизированном цифровом пластометре конструкции ЮУрГУ «Многоулачковый пластометр ЧПИ-2» (рисунок 3.18).



Рисунок 3.18 – Автоматизированный цифровой пластометр

Средняя шероховатость поверхности деформирующего инструмента, замеренная с помощью профилометра SurfTest Sj-201, составила Ra 8,98 (Rz 53,67).

Нагрев образцов осуществлялся в камерной лабораторной электропечи ПКЛ-1,2-12 (рисунок 3.19)



Рисунок 3.19 – Нагревательная печь ПКЛ-1,2-12

Краткая техническая характеристика нагревательной печи:

- диапазон рабочих температур 200 – 1200⁰С;
- аварийная температура 1220⁰С;
- размер рабочего пространства 220x180x300 мм;
- атмосфера в рабочем пространстве воздух;
- габаритные размеры 710x615x620 мм;
- масса 90 кг.

Замер размеров образцов осуществлялся с помощью инструментального микроскопа (рисунок 3.20)



Рисунок 3.20 – Инструментальный микроскоп

Экспериментальное исследование проведено в соответствии с утвержденной программой.

Статистическая обработка данных, полученных на предварительной стадии эксперимента.

Целью предварительной стадии является определение степени деформации образцов, обеспечивающей получение достоверной информации по значениям коэффициента трения.

В процессе эксперимента проводилась осадка образцов с замерами размеров образца до и после осадки и вычисления степени относительного обжатия ε . При этом в числе прочих замерялись диаметр контактной поверхности образца и максимальный по высоте образца диаметр. Поскольку в процессе деформации возможна овализация образца, диаметр замерялся в четырех сечениях на контактной поверхности ($d_{1к}$) и в четырех сечениях с максимальным диаметром (d_{16}). После этого, для расчета коэффициента трения f значения диаметров усреднялись ($d_{1к}^*$ и d_{16}^*) Результаты измерения

геометрических размеров образцов после осадки и расчета значения коэффициента трения представлены в таблице 3.2. С использованием замеренных диаметров вычислялся коэффициент трения в соответствии с разработанной методикой проведения эксперимента.

Таблица 3.2 – Обработка результатов эксперимента по осадке образцов с различными степенями обжата

| Номер образца | ε | $d_{1к}$, мм | $d_{1к}^*$, мм | d_{16} , мм | d_{16}^* , мм | f |
|---------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|------|
| 1 | 0,1 | 10,37 | 10,41 | 10,67 | 10,73 | 0,44 |
| | | 10,39 | | 10,82 | | |
| | | 10,46 | | 10,75 | | |
| | | 10,41 | | 10,68 | | |
| 2 | 0,2 | 10,0 | 9,9 | 10,04 | 10,08 | 2,25 |
| | | 9,96 | | 10,09 | | |
| | | 9,86 | | 10,05 | | |
| | | 9,79 | | 10,15 | | |
| 3 | 0,3 | 10,12 | 10,16 | 10,26 | 10,26 | 0,39 |
| | | 10,15 | | 10,3 | | |
| | | 10,19 | | 10,23 | | |
| | | 10,17 | | 10,25 | | |
| 4 | 0,4 | 10,22 | 10,16 | 10,21 | 10,19 | 0,16 |
| | | 10,1 | | 10,16 | | |
| | | 10,27 | | 10,19 | | |
| | | 10,06 | | 10,21 | | |
| 5 | 0,5 | 11,2 | 11,31 | 11,8 | 11,99 | 0,34 |
| | | 10,84 | | 12,1 | | |
| | | 11,59 | | 11,89 | | |
| | | 11,59 | | 12,07 | | |

| | | | | | | |
|---|-----|-------|-------|-------|-------|------|
| 6 | 0,6 | 11,82 | 12,03 | 12,36 | 12,52 | 0,19 |
| | | 12,05 | | 12,62 | | |
| | | 12,26 | | 12,74 | | |
| | | 11,98 | | 12,34 | | |

Полученные в результате величины позволяют сделать вывод о том, что при относительном обжати образцов меньше 0,3 изменения геометрических размеров достаточно малы и, соответственно, ошибка в их измерении может привести к получению недостоверных результатов. Кроме этого, в соответствии с результатами, приведенными в работе [137], принято, что осаживать образцы со степенью деформации больше 0,6 нецелесообразно, так как при этом в процессе осадки происходит значительное изменение условий деформирования, что также может повлиять на достоверность результатов. Поэтому в основной серии экспериментов принят рабочий диапазон обжатий 0,3 – 0,6.

Статистическая обработка данных, полученных на основной стадии эксперимента

Численные значения замеренных и рассчитанных величин приведены в таблицах 3.3, 3.4, 3.5 и 3.6. В таблицах желтым цветом залиты строки, несоответствующие выбранному диапазону обжатий.

Таблица 3.3. Экспериментальные данные, полученные при температуре 900°C

| Номер образца | h | ε | $d_{1к}$, мм | $d_{1к}^*$, мм | d_{16} , мм | d_{16}^* , мм | f |
|---------------|-----|---------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-------|
| 1 | 8,9 | 0,41 | 11,33 | 10,781 | 11,84 | 13,189 | 0,755 |
| | | | 10,37 | | 13,26 | | |
| | | | 11,2 | | 13,84 | | |
| | | | 10,225 | | 13,815 | | |

| | | | | | | | |
|----|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 2 | 10,245 | 0,317 | 11,04 | 10,972 | 10,9 | 11,714 | 0,433 |
| | | | 10,38 | | 10,65 | | |
| | | | 10,545 | | 12,315 | | |
| | | | 11,921 | | 12,99 | | |
| 3 | 7,65 | 0,49 | 11,45 | 11,64 | 13,02 | 12,736 | 0,401 |
| | | | 11,635 | | 11,915 | | |
| | | | 11,84 | | 12,95 | | |
| | | | 11,635 | | 13,06 | | |
| 4 | 10,18 | 0,321 | 10,595 | 10,83 | 13,267 | 12,89 | 0,713 |
| | | | 10,725 | | 12,282 | | |
| | | | 11,16 | | 12,95 | | |
| | | | 10,84 | | 12,84 | | |
| 5 | 9,37 | 0,375 | 11,625 | 11,386 | 12,79 | 11,945 | 0,287 |
| | | | 11,57 | | 11,72 | | |
| | | | 11,72 | | 11,59 | | |
| | | | 10,63 | | 11,68 | | |
| 11 | 9,22 | 0,385 | 10,995 | 10,99 | 11,74 | 11,741 | 0,431 |
| | | | 10,85 | | 11,825 | | |
| | | | 10,85 | | 11,72 | | |
| | | | 11,265 | | 11,68 | | |
| 12 | 7,04 | 0,531 | 10,56 | 10,731 | 11,25 | 11,641 | 0,555 |
| | | | 10,54 | | 10,93 | | |
| | | | 12,615 | | 13,025 | | |
| | | | 9,21 | | 11,36 | | |
| 13 | 10,55 | 0,297 | 10,9 | 10,911 | 11,45 | 11,668 | 0,454 |
| | | | 10,495 | | 11,76 | | |
| | | | 11,1 | | 11,76 | | |
| | | | 11,15 | | 11,7 | | |
| 14 | 8,27 | 0,449 | 11,84 | 11,411 | 13,05 | 12,728 | 0,483 |

| | | | | | | | |
|----|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | | 11,63 | | 12,57 | | |
| | | | 11,615 | | 12,48 | | |
| | | | 10,56 | | 12,81 | | |
| 15 | 12,886 | 0,141 | 10,3 | 10,495 | 10,625 | 10,646 | 0,234 |
| | | | 10,455 | | 10,875 | | |
| | | | 10,45 | | 10,58 | | |
| | | | 10,775 | | 10,505 | | |
| 21 | 4,13 | 0,725 | 11,545 | 11,666 | 12,995 | 12,995 | 0,444 |
| | | | 10,63 | | 13,14 | | |
| | | | 11,575 | | 13,065 | | |
| | | | 12,915 | | 12,78 | | |
| 22 | 9,416 | 0,372 | 10,47 | 10,443 | 11,645 | 11,686 | 0,737 |
| | | | 10,395 | | 11,25 | | |
| | | | 10,77 | | 11,733 | | |
| | | | 10,135 | | 12,115 | | |
| 23 | 11,56 | 0,229 | 10,01 | 10,218 | 11,225 | 11,058 | 0,794 |
| | | | 10,395 | | 10,225 | | |
| | | | 10,475 | | 11,51 | | |
| | | | 9,99 | | 11,27 | | |
| 24 | 8,63 | 0,425 | 11,36 | 11,32 | 11,57 | 12,468 | 0,465 |
| | | | 11,39 | | 12,82 | | |
| | | | 11,32 | | 13,055 | | |
| | | | 11,21 | | 12,425 | | |
| 25 | 9,83 | 0,345 | 10,42 | 11,313 | 12,25 | 13,148 | 0,583 |
| | | | 11,41 | | 13,42 | | |
| | | | 11,8 | | 13,8 | | |
| | | | 11,62 | | 13,12 | | |
| 31 | 9,91 | 0,339 | 10,47 | 11,236 | 13,21 | 13,05 | 0,595 |
| | | | 11,18 | | 12,71 | | |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | | 11,5 | | 12,545 | | |
| | | | 11,795 | | 13,735 | | |
| 33 | 4,425 | 0,705 | 11,7 | 11,819 | 11,875 | 12,654 | 0,315 |
| | | | 11,9 | | 12,7 | | |
| | | | 11,795 | | 12,87 | | |
| | | | 11,88 | | 13,17 | | |
| 34 | 10,4 | 0,307 | 11,08 | 11,413 | 11,56 | 12,416 | 0,415 |
| | | | 12,55 | | 13,79 | | |
| | | | 11,04 | | 12,46 | | |
| | | | 10,98 | | 11,855 | | |

В результате статистической обработки данных, приведенных в таблице 3.3 получено:

- среднее значение коэффициента трения в отсутствии третьих веществ 0,481 со среднеквадратичным отклонением 0,044;

- среднее значение коэффициента трения при наличии дезоксидирующего продукта 0,431 со среднеквадратичным отклонением 0,047;

- среднее значение коэффициента трения при наличии графитовой смазки 0,595 со среднеквадратичным отклонением 0,096;

- среднее значение коэффициента трения при наличии графитовой смазки и дезоксидирующего материала 0,505 со среднеквадратичным отклонением 0,127.

Таблица 3.4 – Экспериментальные данные, полученные при температуре 1000 °С

| Номер образца | h | ε | $d_{1к}$, мм | $d_{1к}^*$, мм | d_{16} , мм | d_{16}^* , мм | f |
|---------------|------|---------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|------|
| 1 | 10,0 | 0,333 | 11,52 | 11,341 | 13,14 | 13,046 | 0,56 |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | | 11,44 | | 12,975 | | |
| | | | 11,14 | | 13,005 | | |
| | | | 11,265 | | 13,065 | | |
| 2 | 9,44 | 0,371 | 11,14 | 11,43 | 13,11 | 13,148 | 0,546 |
| | | | 11,62 | | 13,11 | | |
| | | | 11,48 | | 13,12 | | |
| | | | 11,48 | | 13,25 | | |
| 3 | 9,69 | 0,354 | 11,24 | 11,08 | 12,725 | 12,983 | 0,638 |
| | | | 11,08 | | 12,735 | | |
| | | | 10,855 | | 13,53 | | |
| | | | 11,145 | | 12,94 | | |
| 4 | 8,965 | 0,402 | 12,135 | 11,815 | 14,465 | 14,681 | 0,612 |
| | | | 11,8 | | 14,71 | | |
| | | | 11,725 | | 14,91 | | |
| | | | 11,6 | | 14,64 | | |
| 5 | 8,65 | 0,423 | 11,97 | 12,025 | 13,36 | 13,781 | 0,464 |
| | | | 12,485 | | 14,09 | | |
| | | | 12,33 | | 14,68 | | |
| | | | 11,315 | | 12,995 | | |
| 11 | 8,5 | 0,433 | 13,0 | 12,735 | 14,33 | 14,118 | 0,336 |
| | | | 13,12 | | 14,13 | | |
| | | | 12,52 | | 13,83 | | |
| | | | 12,3 | | 14,18 | | |
| 12 | 13,21 | 0,119 | 10,16 | 10,365 | 10,75 | 10,858 | 0,574 |
| | | | 10,13 | | 10,6 | | |
| | | | 10,51 | | 11,08 | | |
| | | | 10,06 | | 11,0 | | |
| 13 | 7,77 | 0,482 | 12,52 | 12,41 | 14,57 | 14,608 | 0,477 |
| | | | 12,65 | | 14,64 | | |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | | 12,15 | | 14,63 | | |
| | | | 12,32 | | 14,59 | | |
| 14 | 7,735 | 0,484 | 12,835 | 12,83 | 13,995 | 14,153 | 0,319 |
| | | | 13,06 | | 14,23 | | |
| | | | 12,885 | | 14,49 | | |
| | | | 12,54 | | 13,895 | | |
| 15 | 8,92 | 0,405 | 12,95 | 12,888 | 13,85 | 13,84 | 0,248 |
| | | | 12,91 | | 14,03 | | |
| | | | 12,82 | | 13,75 | | |
| | | | 12,87 | | 13,73 | | |
| 21 | 8,77 | 0,415 | 11,93 | 12,38 | 13,25 | 13,778 | 0,37 |
| | | | 12,87 | | 13,79 | | |
| | | | 12,57 | | 14,07 | | |
| | | | 12,15 | | 14,0 | | |
| 22 | 9,3 | 0,38 | 10,74 | 11,435 | 13,79 | 13,485 | 0,588 |
| | | | 11,8 | | 12,91 | | |
| | | | 12,44 | | 13,38 | | |
| | | | 10,76 | | 13,86 | | |
| 23 | 7,75 | 0,483 | 12,44 | 12,164 | 13,36 | 13,779 | 0,427 |
| | | | 12,02 | | 13,81 | | |
| | | | 11,915 | | 14,28 | | |
| | | | 12,28 | | 13,665 | | |
| 24 | 8,98 | 0,401 | 12,82 | 13,113 | 13,83 | 13,845 | 0,19 |
| | | | 12,81 | | 13,8 | | |
| | | | 13,27 | | 13,75 | | |
| | | | 13,55 | | 14,0 | | |
| 25 | 10,01 | 0,333 | 11,14 | 11,108 | 12,35 | 12,503 | 0,557 |
| | | | 11,13 | | 12,51 | | |
| | | | 11,12 | | 12,75 | | |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | | 11,04 | | 12,4 | | |
| 31 | 8,05 | 0,463 | 12,87 | 12,713 | 14,09 | 14,163 | 0,348 |
| | | | 13,0 | | 14,54 | | |
| | | | 12,48 | | 14,15 | | |
| | | | 12,5 | | 13,87 | | |
| 32 | 11,15 | 0,257 | 10,31 | 10,996 | 12,505 | 12,516 | 0,604 |
| | | | 11,66 | | 12,56 | | |
| | | | 10,82 | | 12,49 | | |
| | | | 11,195 | | 12,51 | | |
| 33 | 2,96 | 0,803 | 11,92 | 12,436 | 14,3 | 14,359 | 0,441 |
| | | | 12,455 | | 14,45 | | |
| | | | 12,835 | | 14,375 | | |
| | | | 12,535 | | 14,31 | | |
| 34 | 9,61 | 0,359 | 11,395 | 11,31 | 12,63 | 12,761 | 0,526 |
| | | | 11,525 | | 13,09 | | |
| | | | 10,765 | | 12,67 | | |
| | | | 11,555 | | 12,655 | | |
| 35 | 9,64 | 0,357 | 10,225 | 11,009 | 12,63 | 12,538 | 0,602 |
| | | | 10,77 | | 12,625 | | |
| | | | 11,29 | | 12,315 | | |
| | | | 11,75 | | 12,58 | | |

В результате статистической обработки данных, приведенных в таблице 3.4 получено:

- среднее значение коэффициента трения в отсутствии третьих веществ 0,564 со среднеквадратичным отклонением 0,067;

- среднее значение коэффициента трения при наличии дезоксидирующего продукта 0,345 со среднеквадратичным отклонением 0,096;

- среднее значение коэффициента трения при наличии графитовой смазки 0,315 со среднеквадратичным отклонением 0,203;

- среднее значение коэффициента трения при наличии графитовой смазки и дезоксидирующего материала 0,492 со среднеквадратичным отклонением 0,144.

Таблица 3.5 – Экспериментальные данные, полученные при температуре 1100⁰С

| Номер образца | h | ε | $d_{1к}$, мм | $d_{1к}^*$, мм | d_{16} , мм | d_{16}^* , мм | f |
|---------------|-------|---------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-------|
| 1 | 9,26 | 0,383 | 11,46 | 11,665 | 13,18 | 13,47 | 0,52 |
| | | | 11,40 | | 13,37 | | |
| | | | 11,84 | | 13,77 | | |
| | | | 11,96 | | 13,56 | | |
| 2 | 9,07 | 0,395 | 11,87 | 12,08 | 13,58 | 13,605 | 0,423 |
| | | | 12,25 | | 13,68 | | |
| | | | 12,28 | | 13,62 | | |
| | | | 11,92 | | 13,54 | | |
| 3 | 10,16 | 0,323 | 11,4 | 11,56 | 12,78 | 12,783 | 0,439 |
| | | | 11,55 | | 12,54 | | |
| | | | 11,65 | | 12,77 | | |
| | | | 11,64 | | 13,04 | | |
| 4 | 8,9 | 0,407 | 12,11 | 12,095 | 13,91 | 14,053 | 0,483 |
| | | | 12,17 | | 14,16 | | |
| | | | 12,22 | | 14,23 | | |
| | | | 11,88 | | 13,91 | | |
| 5 | 10,97 | 0,269 | 10,46 | 10,445 | 12,22 | 12,2 | 0,8 |
| | | | 10,54 | | 12,37 | | |
| | | | 10,46 | | 12,16 | | |
| | | | 10,32 | | 12,04 | | |

| | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 11 | 9,7 | 0,353 | 11,53 | 11,5 | 12,87 | 12,965 | 0,494 |
| | | | 11,4 | | 12,84 | | |
| | | | 11,46 | | 13,07 | | |
| | | | 11,61 | | 13,08 | | |
| 12 | 10,24 | 0,317 | 11,66 | 11,58 | 12,43 | 12,458 | 0,357 |
| | | | 11,55 | | 12,53 | | |
| | | | 11,39 | | 12,46 | | |
| | | | 11,72 | | 12,41 | | |
| 13 | 9,32 | 0,379 | 11,0 | 11,405 | 13,15 | 13,3 | 0,573 |
| | | | 11,45 | | 13,41 | | |
| | | | 11,88 | | 13,35 | | |
| | | | 11,29 | | 13,27 | | |
| 14 | 10,02 | 0,332 | 10,92 | 11,135 | 12,65 | 12,81 | 0,596 |
| | | | 11,14 | | 12,63 | | |
| | | | 10,86 | | 12,98 | | |
| | | | 11,62 | | 12,98 | | |
| 15 | 10,02 | 0,332 | 11,95 | 11,8 | 13,06 | 12,985 | 0,397 |
| | | | 11,81 | | 12,87 | | |
| | | | 11,65 | | 12,87 | | |
| | | | 11,79 | | 13,14 | | |
| 21 | 8,58 | 0,428 | 12,28 | 12,648 | 13,47 | 13,715 | 0,287 |
| | | | 12,45 | | 13,87 | | |
| | | | 12,79 | | 14,01 | | |
| | | | 13,07 | | 13,51 | | |
| 22 | 8,76 | 0,416 | 11,65 | 11,753 | 13,62 | 13,62 | 0,516 |
| | | | 11,81 | | 13,72 | | |
| | | | 11,71 | | 13,64 | | |
| | | | 11,84 | | 13,5 | | |
| 23 | 8,25 | 0,45 | 13,04 | 13,055 | 14,17 | 14,458 | 0,315 |

| | | | | | | | |
|----|------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | | 12,7 | | 14,0 | | |
| | | | 13,41 | | 14,36 | | |
| | | | 13,07 | | 14,6 | | |
| 24 | 9,47 | 0,369 | 11,35 | 11,608 | 13,24 | 13,495 | 0,54 |
| | | | 11,39 | | 13,7 | | |
| | | | 12,03 | | 13,78 | | |
| | | | 11,66 | | 13,26 | | |
| 25 | 8,56 | 0,429 | 12,48 | 13,013 | 13,03 | 14,213 | 0,285 |
| | | | 13,0 | | 13,87 | | |
| | | | 13,4 | | 15,13 | | |
| | | | 13,17 | | 14,82 | | |
| 31 | 9,39 | 0,374 | 12,35 | 12,728 | 13,27 | 13,338 | 0,183 |
| | | | 12,5 | | 13,27 | | |
| | | | 12,84 | | 13,47 | | |
| | | | 13,22 | | 13,34 | | |
| 32 | 8,67 | 0,422 | 11,87 | 11,38 | 14,27 | 13,915 | 0,648 |
| | | | 10,97 | | 14,07 | | |
| | | | 10,95 | | 13,49 | | |
| | | | 11,73 | | 13,83 | | |
| 33 | 8,97 | 0,402 | 11,83 | 11,85 | 13,36 | 13,548 | 0,479 |
| | | | 11,81 | | 13,47 | | |
| | | | 12,25 | | 13,73 | | |
| | | | 11,51 | | 13,63 | | |
| 34 | 8,42 | 0,439 | 13,14 | 12,923 | 14,12 | 14,14 | 0,294 |
| | | | 13,32 | | 14,41 | | |
| | | | 12,68 | | 14,17 | | |
| | | | 12,55 | | 13,86 | | |
| 35 | 9,47 | 0,369 | 12,07 | 12,363 | 13,23 | 13,275 | 0,278 |
| | | | 12,46 | | 13,07 | | |

| | | | | | | | |
|--|--|--|-------|--|-------|--|--|
| | | | 12,55 | | 13,35 | | |
| | | | 12,37 | | 13,45 | | |

В результате статистической обработки данных, приведенных в таблице 3.5 получено:

- среднее значение коэффициента трения в отсутствии третьих веществ 0,466 со среднеквадратичным отклонением 0,025;

- среднее значение коэффициента трения при наличии дезоксидирующего продукта 0,483 со среднеквадратичным отклонением 0,053;

- среднее значение коэффициента трения при наличии графитовой смазки 0,389 со среднеквадратичным отклонением 0,172;

- среднее значение коэффициента трения при наличии графитовой смазки и дезоксидирующего материала 0,376 со среднеквадратичным отклонением 0,093.

Таблица 3.6 – Экспериментальные данные, полученные при температуре 1200⁰С

| Номер образца | h | ε | $d_{1к}$, мм | $d_{1к}^*$, мм | d_{16} , мм | d_{16}^* , мм | f |
|---------------|------|---------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|-------|
| 1 | 8,23 | 0,451 | 12,25 | 12,143 | 15,22 | 14,593 | 0,533 |
| | | | 11,69 | | 14,52 | | |
| | | | 12,47 | | 14,36 | | |
| | | | 12,16 | | 14,27 | | |
| 2 | 8,34 | 0,444 | 13,17 | 13,138 | 14,63 | 14,468 | 0,298 |
| | | | 13,19 | | 14,74 | | |
| | | | 12,82 | | 14,14 | | |
| | | | 13,37 | | 14,36 | | |
| 3 | 8,97 | 0,402 | 11,75 | 11,448 | 13,93 | 13,898 | 0,628 |
| | | | 11,25 | | 13,75 | | |
| | | | 11,95 | | 13,94 | | |

| | | | | | | | |
|----|------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | | 10,84 | | 13,97 | | |
| 4 | 8,45 | 0,437 | 12,57 | 12,663 | 13,87 | 14,105 | 0,351 |
| | | | 12,51 | | 14,18 | | |
| | | | 12,75 | | 14,37 | | |
| | | | 12,82 | | 14,0 | | |
| 5 | 9,84 | 0,344 | 11,42 | 11,375 | 13,0 | 13,053 | 0,549 |
| | | | 11,27 | | 13,15 | | |
| | | | 11,44 | | 13,06 | | |
| | | | 11,37 | | 13,0 | | |
| 11 | 9,82 | 0,345 | 11,53 | 11,48 | 13,0 | 13,003 | 0,507 |
| | | | 11,58 | | 13,0 | | |
| | | | 11,48 | | 13,11 | | |
| | | | 11,33 | | 12,9 | | |
| 12 | 8,95 | 0,403 | 12,55 | 11,543 | 14,0 | 13,61 | 0,573 |
| | | | 11,0 | | 13,8 | | |
| | | | 10,72 | | 12,87 | | |
| | | | 11,9 | | 13,77 | | |
| 13 | 8,77 | 0,415 | 13,0 | 12,58 | 14,62 | 14,075 | 0,367 |
| | | | 12,48 | | 14,15 | | |
| | | | 12,26 | | 13,73 | | |
| | | | 12,58 | | 13,8 | | |
| 14 | 7,49 | 0,501 | 13,84 | 13,488 | 15,43 | 14,965 | 0,297 |
| | | | 13,54 | | 14,84 | | |
| | | | 13,26 | | 14,59 | | |
| | | | 13,31 | | 15,0 | | |
| 15 | 9,06 | 0,396 | 10,36 | 12,465 | 13,48 | 13,485 | 0,293 |
| | | | 10,47 | | 13,46 | | |
| | | | 10,29 | | 13,35 | | |
| | | | 10,3 | | 13,65 | | |

| | | | | | | | |
|----|------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|
| 22 | 9,22 | 0,385 | 12,52 | 12,163 | 13,86 | 13,425 | 0,368 |
| | | | 12,19 | | 13,8 | | |
| | | | 11,63 | | 12,92 | | |
| | | | 12,31 | | 13,12 | | |
| 23 | 6,87 | 0,542 | 13,43 | 13,8 | 15,45 | 15,593 | 0,32 |
| | | | 13,61 | | 15,64 | | |
| | | | 14,2 | | 15,6 | | |
| | | | 13,94 | | 15,68 | | |
| 24 | 8,32 | 0,445 | 12,02 | 11,745 | 14,25 | 14,18 | 0,583 |
| | | | 11,65 | | 14,21 | | |
| | | | 11,53 | | 14,12 | | |
| | | | 11,78 | | 14,14 | | |
| 25 | 9,08 | 0,395 | 10,27 | 10,535 | 13,48 | 13,57 | 0,85 |
| | | | 10,55 | | 13,25 | | |
| | | | 10,81 | | 13,74 | | |
| | | | 10,51 | | 13,81 | | |
| 31 | 8,49 | 0,434 | 12,48 | 12,46 | 13,71 | 14,125 | 0,404 |
| | | | 12,33 | | 13,79 | | |
| | | | 12,83 | | 14,57 | | |
| | | | 12,2 | | 14,43 | | |
| 32 | 9,22 | 0,385 | 12,0 | 12,193 | 13,46 | 13,508 | 0,375 |
| | | | 12,14 | | 13,37 | | |
| | | | 12,28 | | 13,72 | | |
| | | | 12,35 | | 13,48 | | |
| 33 | 9,02 | 0,399 | 11,78 | 11,805 | 13,26 | 13,355 | 0,462 |
| | | | 11,69 | | 13,58 | | |
| | | | 11,82 | | 13,4 | | |
| | | | 11,93 | | 13,18 | | |
| 34 | 8,25 | 0,45 | 10,27 | 10,343 | 14,0 | 13,975 | 0,914 |

| | | | | | | | |
|----|------|------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | | 10,38 | | 14,1 | | |
| | | | 10,35 | | 13,92 | | |
| | | | 10,37 | | 13,88 | | |
| 35 | 7,65 | 0,49 | 10,76 | 12,525 | 13,25 | 13,983 | 0,366 |
| | | | 12,42 | | 14,26 | | |
| | | | 13,81 | | 14,42 | | |
| | | | 13,11 | | 14,0 | | |

В результате статистической обработки данных, приведенных в таблице 3.6 получено:

- среднее значение коэффициента трения в отсутствии третьих веществ 0,472 со среднеквадратичным отклонением 0,07;

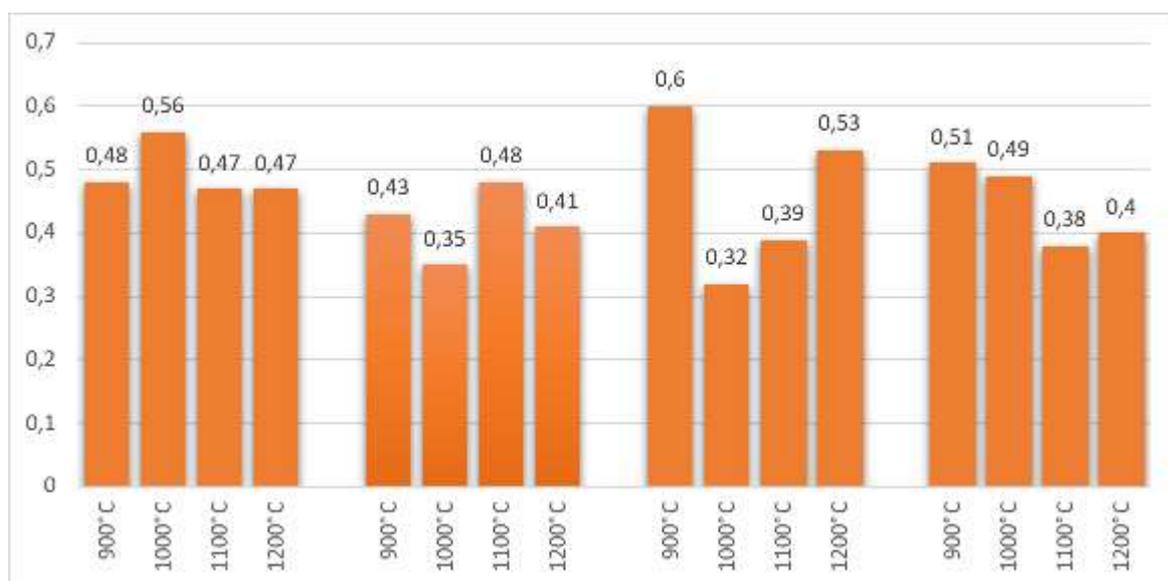
- среднее значение коэффициента трения при наличии дезоксидирующего продукта 0,407 со среднеквадратичным отклонением 0,082;

- среднее значение коэффициента трения при наличии графитовой смазки 0,53 со среднеквадратичным отклонением 0,137;

- среднее значение коэффициента трения при наличии графитовой смазки и дезоксидирующего материала 0,402 со среднеквадратичным отклонением 0,129.

Полученные в результате экспериментального исследования данные позволяют определить зависимость коэффициента трения при деформации труб из нержавеющей марки стали 12X18H10T от химико-технологических и температурных условий на контактной поверхности с инструментом.

На рисунке 3.21 показаны средние значения коэффициента трения, полученные при различных условиях контактного взаимодействия.



а

б

в

г

Рисунок 3.21 – Средние значения коэффициента трения при отсутствии третьих веществ (а), с напылением дезоксидирующего порошка (б), при нанесении графитовой смазки (в), с дезоксидирующим порошком и графитовой смазкой (г)

Согласно данным, приведенным на рисунке 3.23, характер изменения коэффициента трения в зависимости от температуры при отсутствии смазочных и дезоксидирующих материалов качественно совпадает с существующими представлениями [137]. А именно, в области относительно низких температур повышение температуры способствует увеличению толщины слоя окалины, которая при этом остается достаточно жесткой и способствует увеличению коэффициента трения. Однако при достижении температуры 800⁰С-900⁰С (для углеродистых марок стали) начинается размягчение окалины и соответствующее снижение коэффициента трения. Судя по результатам проведенного исследования, при деформации нержавеющей марки стали размягчение окалины начинается после температуры 1000⁰С.

По аналогии с известными формулами зависимость коэффициента трения f от температуры θ в диапазоне от 1000°C и выше можно представить в следующем виде:

$$f = 1,602 - 0,001\theta \quad (3.2)$$

Недостаток приведенной формулы в том, что в левой ее части стоит безразмерная величина, а в правой величина, имеющая размерность температуры. Это приводит к тому, что коэффициент при θ должен быть размерным, что противоречит физическому смыслу. Поэтому в качестве аргумента целесообразно выбрать безразмерную величину, в качестве которой может быть отношение актуальной температуры к температуре плавления материала. Если в качестве температуры плавления принять 1350°C , формула примет вид:

$$f = 1,36 - 1,08\tilde{\theta} \quad (3.3)$$

Наличие дезоксидирующих материалов на контактной поверхности в целом способствует снижению коэффициента трения, при чем его минимальное значение наблюдается при температуре 1000°C . Одним из возможных объяснений этому является то, что при температуре ниже 1000°C дезоксидант еще имеет большую вязкость, а при температуре выше 1100°C расплав дезоксиданта имеет низкую вязкость и начинает выдавливаться с контактной поверхности.

Влияние графитовой смазки достаточно неоднозначно. Она обеспечивает минимальные значения коэффициента трения при температурах 1000°C и 1100°C . При температуре 900°C коэффициент трения высокий, что вероятно связано с выгоранием примесей и полимерных компонентов смазки, с образованием твердых частиц. При повышении температуры происходит полное выгорание горючих веществ и примесей, что приводит к образованию гомогенной структуры графитового разделительного слоя не оказывающего

негативного влияния на коэффициент трения. При температуре 1200⁰С происходит выгорание остатков графита разделительного слоя и, соответственно, повышение коэффициента трения.

Данные по влиянию температуры на коэффициент трения при наличии как дезоксидирующих, так и смазочных материалов получились достаточно логичными в части уменьшения коэффициента трения с повышением температуры. Некоторое увеличение коэффициента трения наблюдается при температуре 1200⁰С, что может быть объяснено отсутствием влияния графитовой смазки и выдавливанием расплава дезоксиданта из-за его низкой вязкости.

В целом, на основании проведенного эксперимента можно сделать вывод о том, что на контактной поверхности трубы и вала коэффициент трения имеет порядок 0,47, а на контактной поверхности трубы и оправки 0,38. Оба этих значения выше, чем при прокатке труб из углеродистых марок стали.

Таким образом, определен коэффициент трения для условий непрерывного раскатного стана с контролируемо-перемещаемой оправкой. С этой целью была разработана оригинальная методика определения коэффициента трения при горячей деформации. Использование этой методики впервые позволило получить информацию по влиянию на коэффициент трения смазочно-дезоксирующих материалов, что особенно важно при проектировании технологии раскатки гильзы на контролируемо-перемещаемой оправке.

Глава 4. Подготовка непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марки стали мартенситного и аустенитного класса к прокатке на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой

4.1 Подготовка к прокатке непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марки стали мартенситного класса

За последние 30 лет в мировом трубном производстве произошли серьезные изменения, связанные с увеличением доли непрерывно-литой заготовки (НЛЗ), используемой для изготовления горячедеформированных, в том числе и горячепрессованных труб. Ввиду высокой стоимости передела реальной альтернативой технологии прессования, могла бы стать прокатка труб на современных агрегатах с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой [138].

Использование НЛЗ для производства бесшовных труб долго сдерживалось наличием характерных дефектов (ликваций и несплошностей в центральной части и на поверхности заготовки, трещин и т.д.), что не обеспечивало получение качественных труб. Однако высокая экономическая эффективность использования НЛЗ стимулировала проведение работ по развитию и совершенствованию технологии их производства, разработку и создание новых процессов, технологий и трубопрокатного оборудования, обеспечивающих получение труб высокого качества [23].

Широкое применение непрерывной разливки стали обусловлено рядом существенных преимуществ перед способом разливки в изложницы: уменьшение капитальных затрат за счет отсутствия обжимных станов и отделения нагревательных колодцев; повышение производительности на 15–25 %; улучшение качества непрерывных слитков и структуры металла; увеличение выхода годного на 10–15%; возможность получения широкого диапазона сечений заготовок; возможность осуществления комплексной механизации и полной автоматизации процесса разливки; снижение

себестоимости получаемых заготовок; улучшение условий труда и окружающей среды; сокращение энергетических расходов и др. В настоящее время непрерывно-литые заготовки применяются практически на всех типах трубопрокатных агрегатов: с непрерывными, трехвалковыми, автоматическими, речными, пилигримовыми станами, а также для трубопрессовых установок [27].

В электросталеплавильном цехе АО «ВТЗ» в период с 2011 по 2021 годы успешно освоено производство непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марки стали типа 13Cr, а также стали 08X18H10T. Основная сложность заключалась в производстве заготовки из титансодержащей стали методом непрерывной разливки. Титан взаимодействует с кислородом и азотом на всех этапах технологического процесса, что приводит к образованию пленок, которые в процессе разливки откладываются на стенках разливочного канала и быстро, разрастаются, перекрывая его сечение. Данная проблема была решена за счет безусловного соблюдения технологии разливки стали в узких температурно-скоростных интервалах. Однако литая структура имеет свои недостатки, в связи с чем, потребовалась разработка технологии ее подготовки к прокатке.

С использованием программного комплекса QForm 3D проведено компьютерное моделирование процесса прошивки как полой непрерывно-литой, так и сплошной ковальной заготовки из нержавеющей марки стали. По результатам моделирования процесса прошивки для последующей раскатки установлено следующее [138]:

- геометрические показатели гильз, полученных как из сплошной, так и полой заготовок, соответствуют требованиям, предъявляемым к заготовкам, прокатываемым в непрерывном стане;

- при прошивке сплошной заготовки величина износа оправки выше, чем для случая полой в 1,5 раза;

- для сплошной заготовки наблюдаются области с критическим значением показателя напряженного состояния, что может привести к разрыву металла на внутренней поверхности гильзы;

- ресурс пластичности для сплошной заготовки незначительно выше, чем для полой заготовки (средние значения). Однако на переднем торце сплошной заготовки в осевой зоне показатель истощения ресурса пластичности больше в 2,7 раза, чем для переднего торца полой заготовки. На рисунках 4.1 и 4.2 представлено распределение максимального значения степени истощения ресурса пластичности по длине сплошной и полой заготовки.

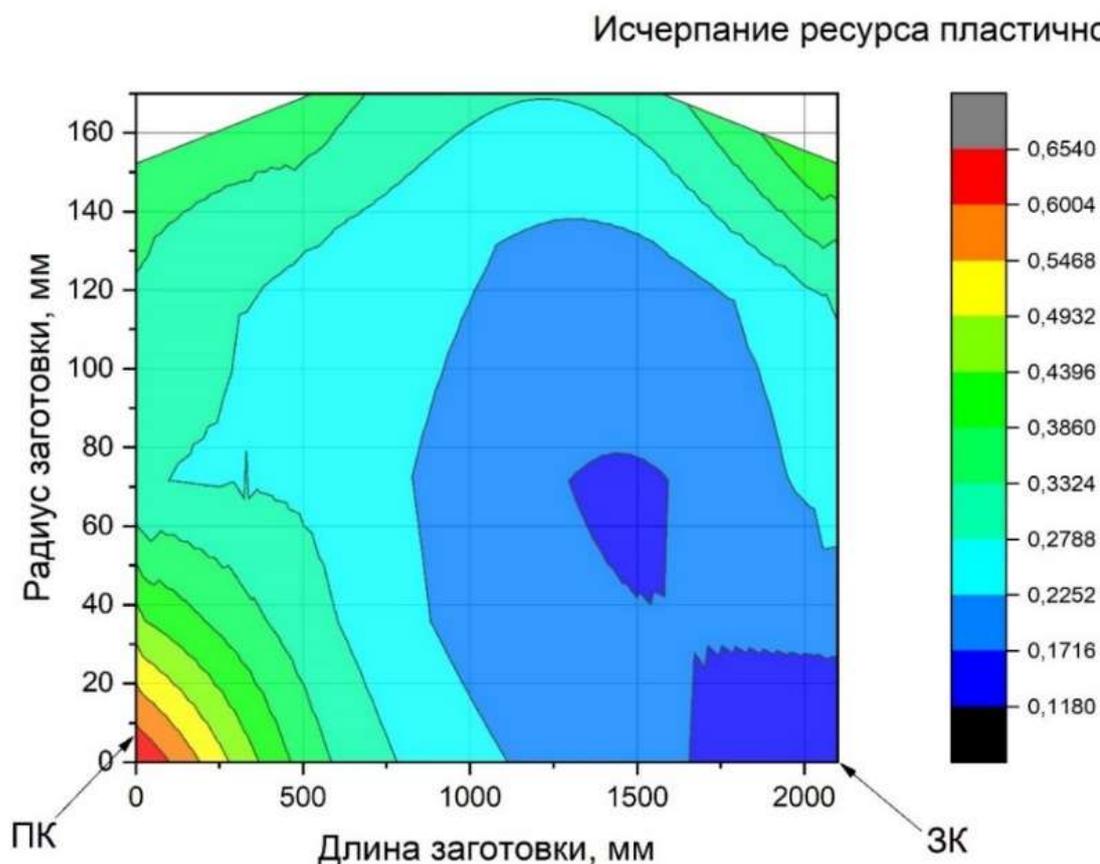


Рисунок 4.1 – Изменение истощения ресурса пластичности для сплошной заготовки по ее длине

Как видно из рисунка 4.1 максимальное значение истощения ресурса пластичности наблюдается в осевой зоне заготовки на переднем торце. Следовательно, в этом месте и практически по всей длине наибольшая вероятность образования сначала трещины, а потом дефекта типа плена. На заднем торце сплошной заготовки наблюдается наиболее пластичная область.

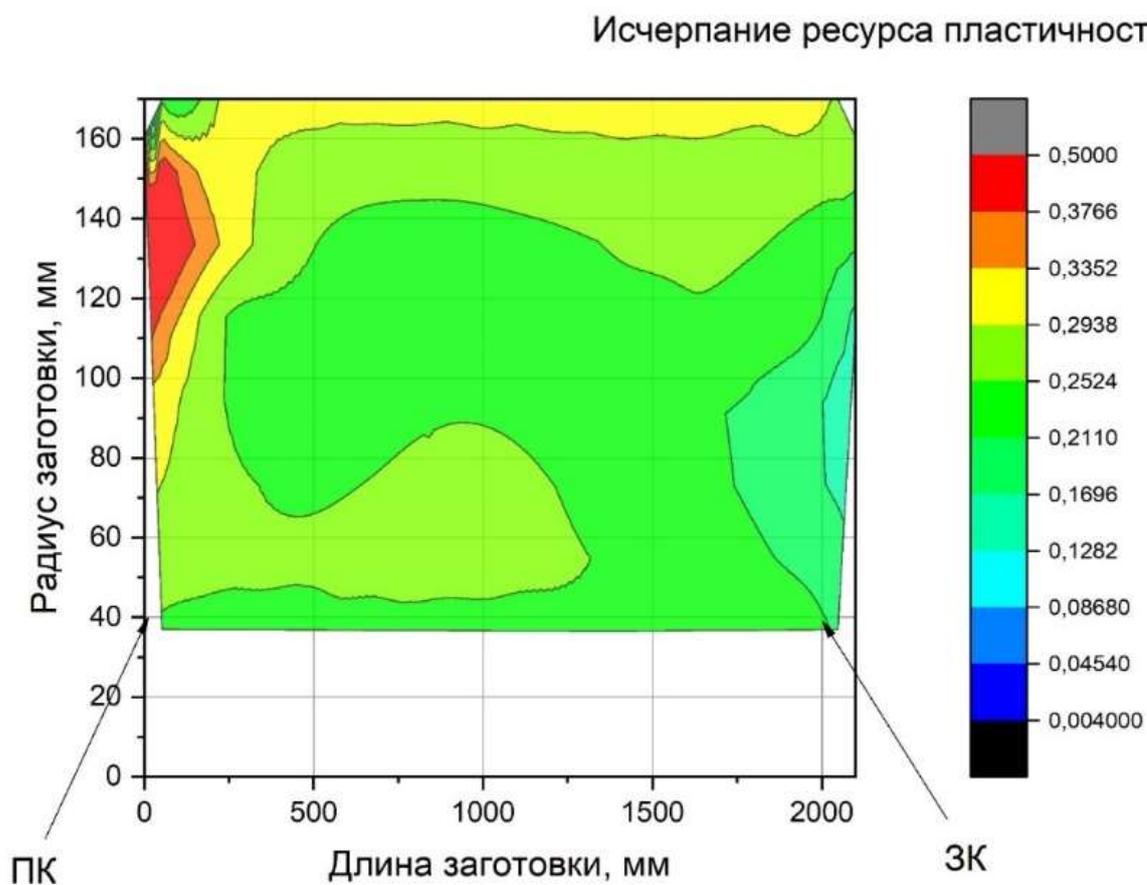


Рисунок 4.2 – Изменение истощения ресурса пластичности для полой заготовки по ее длине

Для полой заготовки (рисунок 4.2) показатель истощения ресурса пластичности по всему объему распределен более равномерно. Стоит отметить, что максимальное значение истощения ресурса пластичности для полой заготовки наблюдается в приповерхностных слоях на переднем торце.

При этом величина показателя не превышает 0,5, что существенно снижает вероятность рисков получения дефектов в виде расслоений при использовании стандартных настроек прошивного стана.

Таким образом, можно сделать вывод, что для прокатки труб из нержавеющей марки стали целесообразно использовать полую непрерывно-литую заготовку.

Проведенный анализ свойств заготовок из марок стали группы 13Cr позволяет определить технологическую схему их производства и подготовки к прокатке, этапы которой представлены на рисунке 4.3.

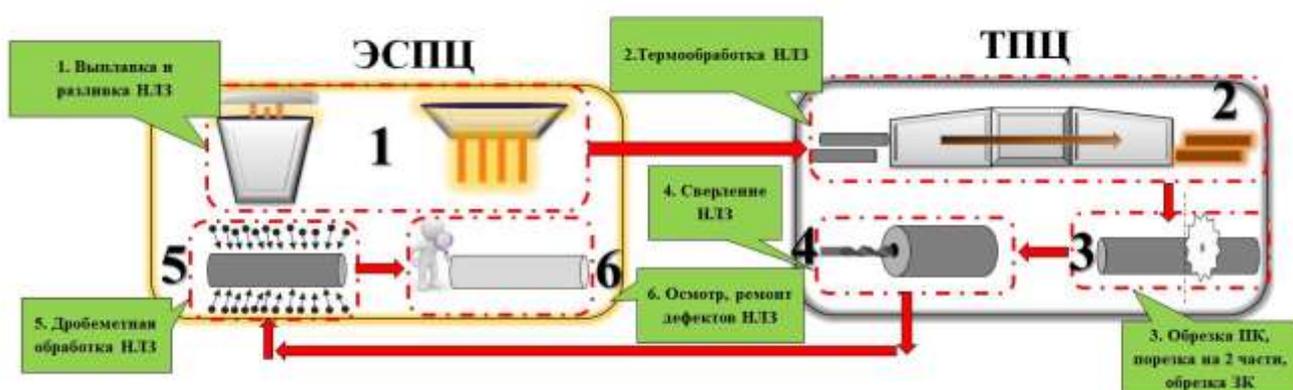


Рисунок 4.3 – технологическая схема подготовки к прокатке заготовок из марок стали группы 13Cr

Предложенная схема включает в себя следующие основные операции:

- 1) выплавка и разливка НЛЗ;
- 2) термообработка НЛЗ;
- 3) обрезка переднего конца, порезка на две части, обрезка заднего конца;
- 4) сверление НЛЗ;
- 5) дробеметная обработка НЛЗ;
- 6) осмотр НЛЗ, ремонт дефектов при необходимости.

Термическая обработка заготовки по режиму смягчающего отжига снижает твердость материала и является обязательной операцией, учитывая необходимость ее дальнейшей механической обработки на станках глубокого

сверления. Операции порезки позволяют получить гладкие торцы заготовки требуемой формы, а также нужный по заказу раскрой металла. Операция сверления убирает осевую рыхлость металла, тем самым обеспечивая качество внутренней поверхности труб. Дробеметная обработка наружной поверхности заготовок позволяет убрать окалину с поверхности и является финишной операцией подготовки металла к прокатке. За ней следует осмотр и ремонт поверхности по необходимости.



Рисунок 4.4 – темплет заготовки из стали марки 15X13H2 диаметром 340мм

На рисунке 4.4 представлено изображение темплета заготовки из стали марки 15X13H2 диаметром 340мм. Замеры показали, что диаметр осевой

несплошности составляет примерно 40мм со смещением ~ около 10мм от геометрического центра. Данное обстоятельство необходимо учитывать при выборе диаметра сверла, чтобы обеспечить полное удаление осевой рыхлости (центральная пористость и осевые трещины) литого металла без смещения внутреннего отверстия относительно геометрического центра заготовки. Проведенные исследования [139] показывают, что точное положение центровочного отверстия и, соответственно, внутреннего отверстия заготовки, непосредственно влияет на точность размеров получаемых гильз.

Для вычисления необходимого диаметра сверла предложена формула 4.1.

$$D_{cv} = (0,15 \div 0,3) d_{zag} K_{он} \quad (4.1)$$

где D_{cv} – диаметр осевого отверстия, мм;

d_{zag} – диаметр заготовки, мм;

$K_{он}$ – коэффициент осевой неоднородности, равный 1,07-1,09 для заготовок всех диаметров.

На практике парк сверл ограничен, в связи с чем выбирать нужно ближайшее по размеру сверло с диаметром, превышающим значение, вычисленное по формуле (4.1). В противном случае остатки осевых несовершенств металла литой структуры приведут к внутренним дефектам на готовых трубах.

Схема и вид полностью подготовленной к прокатке НЛЗ из стали марки 15Х13Н2 диаметром 340мм представлены на рисунках 4.5 и 4.6. Для исключения нанесения дефектов от острой кромки на прошивную оправку по переднему концу заготовки между ее торцом и внутренним отверстием делается скругление.

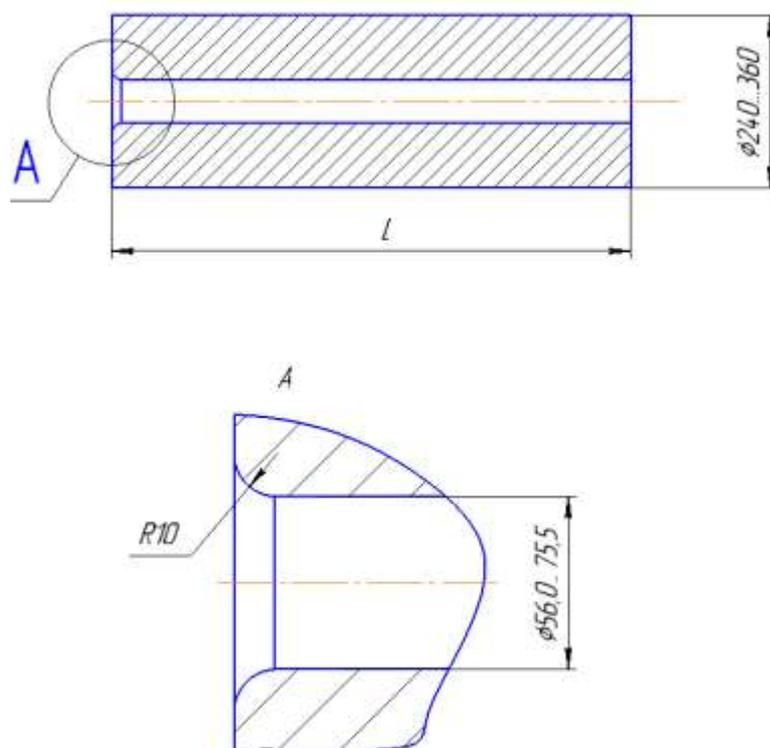


Рисунок 4.5 – схема подготовленной заготовки



Рисунок 4.6 – вид полностью подготовленной к прокатке НЛЗ из стали марки 15X13H2 диаметром 340мм

Предложенная технология подготовки НЛЗ марок стали группы 13Cr полностью устраняет все недостатки литой структуры металла, и обеспечивает высокое качество прокатанных бесшовных труб.

4.2 Подготовка к прокатке непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марки стали аустенитного класса

Проведенный анализ свойств заготовок из марок стали 08-12X18H10T позволяет определить технологическую схему их производства и подготовки к прокатке, этапы которой представлены на рисунке 4.7.

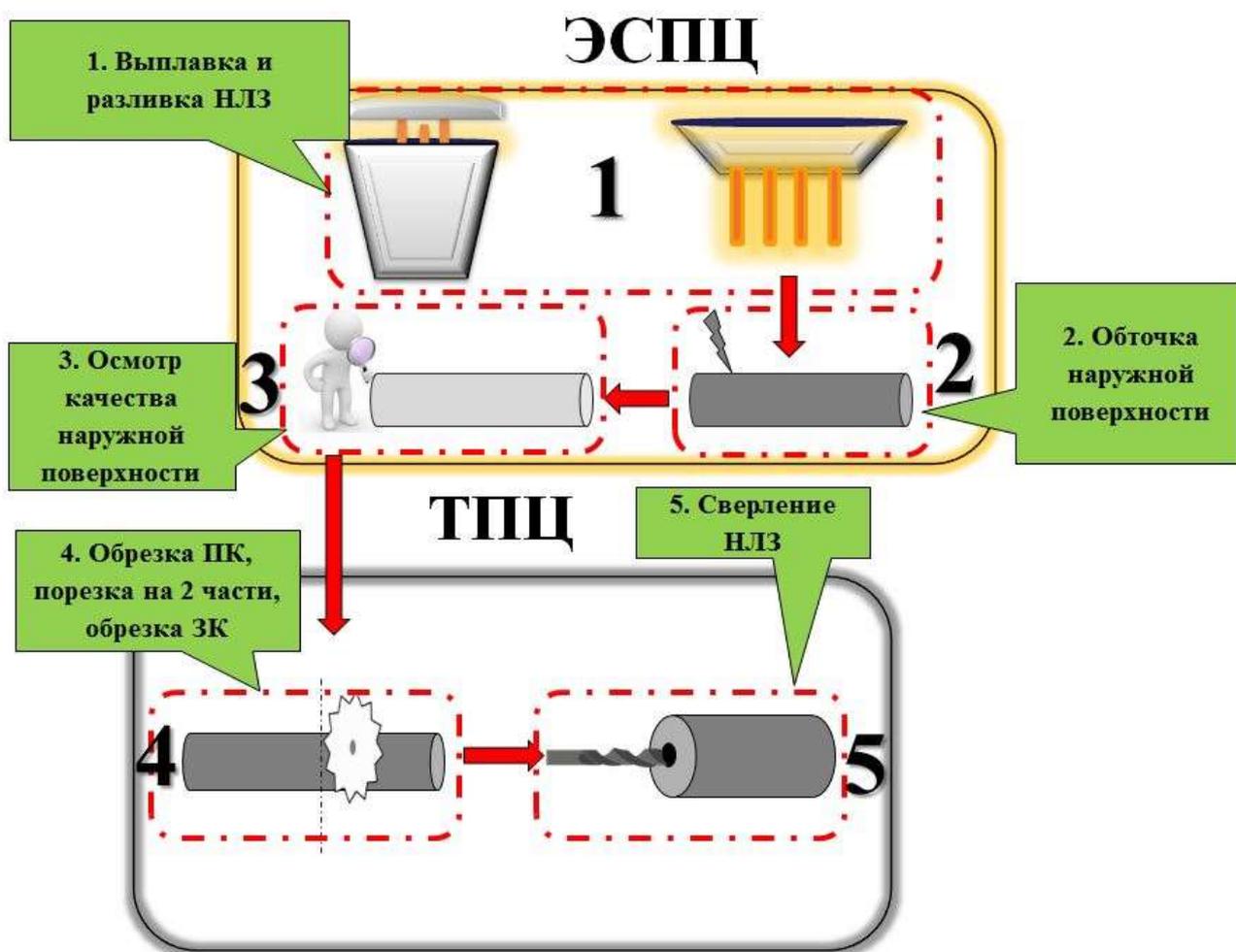


Рисунок 4.7 – технологическая схема подготовки к прокатке заготовок из марок стали 08-12X18H10T

Предложенная схема включает в себя следующие основные операции:

- 1) выплавка и разливка НЛЗ;
- 2) обточка наружной поверхности НЛЗ;
- 3) осмотр качества наружной поверхности;
- 4) обрезка переднего конца, порезка на две части, обрезка заднего конца;
- 5) сверление НЛЗ.

Обточка наружной поверхности непрерывно-литой заготовки из марок стали 08-12Х18Н10Т призвана убрать несовершенства сталеплавильного происхождения. Для этого применяются специальные станки, позволяющие осуществлять съем металла по 5мм на сторону (максимальная глубина залегания дефектов сталеплавильного происхождения). В случае наличия дефектов после обточки, как исключение, назначается дополнительный съем металла для их полного устранения. Операция порезки позволяет получить гладкие торцы заготовки требуемой формы, а также нужный по заказу раскрой металла. Операция сверления убирает осевую рыхлость металла, тем самым обеспечивая качество внутренней поверхности труб без дефектов.

Расчет диаметра нужного сверла, схема и вид полностью подготовленной к прокатке НЛЗ из стали марки 08-12Х18Н10Т полностью аналогичны группе марок стали 13Cr.

Предложенная технология подготовки НЛЗ марок стали 08-12Х18Н10Т, так же, как и для 13Cr, полностью устраняет все недостатки литой структуры металла, и обеспечивает высокое качество прокатанных бесшовных труб.

Глава 5. Исследование процесса прошивки заготовок из нержавеющей марки стали в стане винтовой прокатки

5.1 Компьютерное моделирование технологического процесса прошивки при производстве бесшовных труб из нержавеющей марки стали

С целью оценки возможности производства труб размером 273×20 мм на ТПА 159-426 с непрерывным станом МРМ проведено моделирование процесса прошивки и последующий процесс раскатки. Для уменьшения затрат на подготовку заготовок (сверление сквозного отверстия) предложено смоделировать процесс прошивки как полой, так и сплошной заготовки.

В связи с этим разработана схема моделирования, представленная в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные данные при моделировании

| Модель | 1 | 2 |
|-------------------------------------|---|---------------------------------------|
| Прошивной стан | | |
| Размеры заготовки | Длина – 2100 мм; Диаметр – 340 мм; Внутренний диаметр – 75,5 мм | Длина – 2100 мм; Диаметр – 340 мм; |
| Размеры оправки | Диаметр – 253 мм, Длина – 520 мм | |
| Расстояние между валками, мм | 302 | |
| Расстояние между линейками, мм | 332 | |
| Выдвижение оправки за пережим, мм | 200 | |
| Частота вращения валков | Захват – 40 об/мин; Раскатка – 60 об/мин. | |
| Угол подачи, град | 10 | |
| Раскатной стан МРМ | | |
| Межвалковый зазор в 1-ой клетки, мм | 43,2 | |
| Межвалковый зазор в 2-ой клетки, мм | 33,6 | |

| | |
|--|-----|
| Частота вращения валков в 1-ой клетки, об/мин | 48 |
| Частота вращения валков в 2-ой клетки, об/мин | 65 |
| Скорость перемещения оправки, мм/с | 880 |

На первом этапе были созданы твердотельные модели очага деформации, представленные на рисунке 5.1.

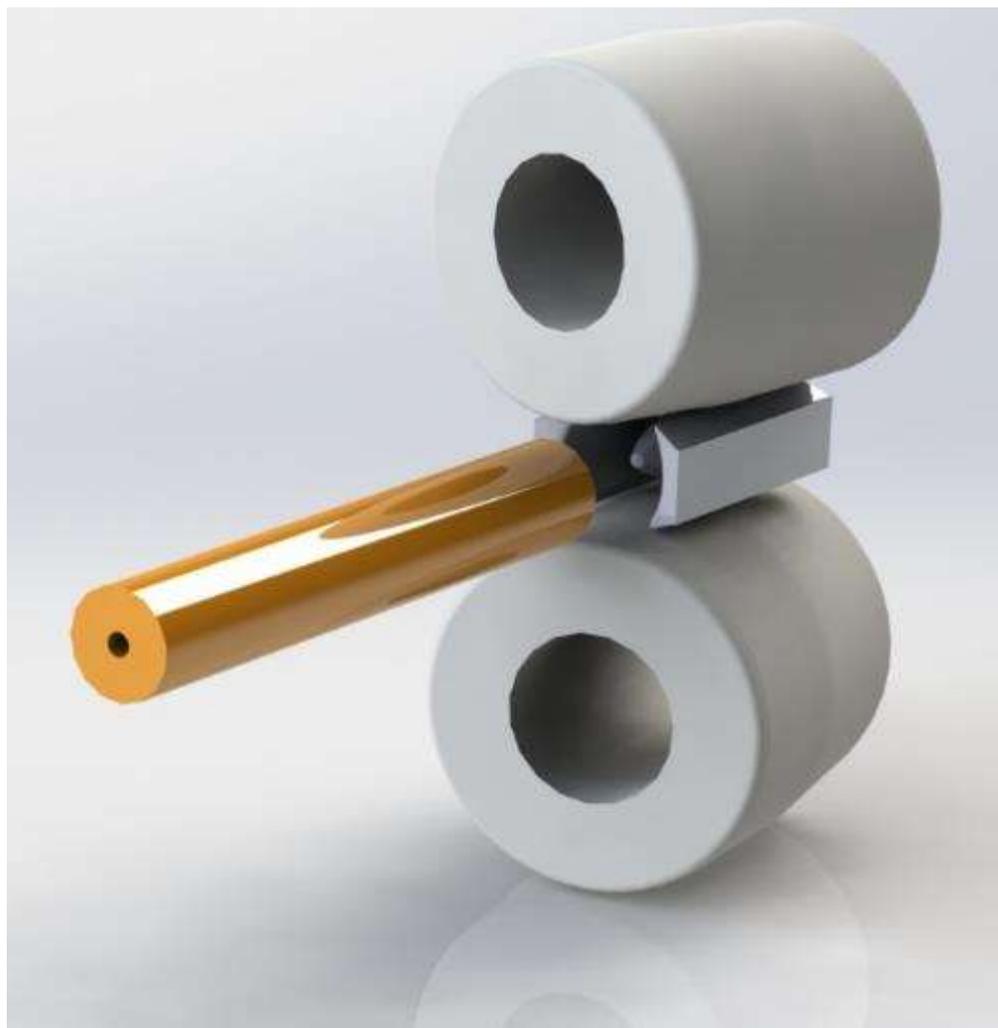


Рисунок 5.1 – Общий вид 3D модели прошивного стана

По результатам моделирования определялись геометрические параметры гильзы, скорость в очаге деформации, показатель напряженно-деформированного состояния, изменение температуры гильзы.

На рисунке 5.2 представлен общий вид продольных и поперечных сечений, полученных в ходе моделирования.

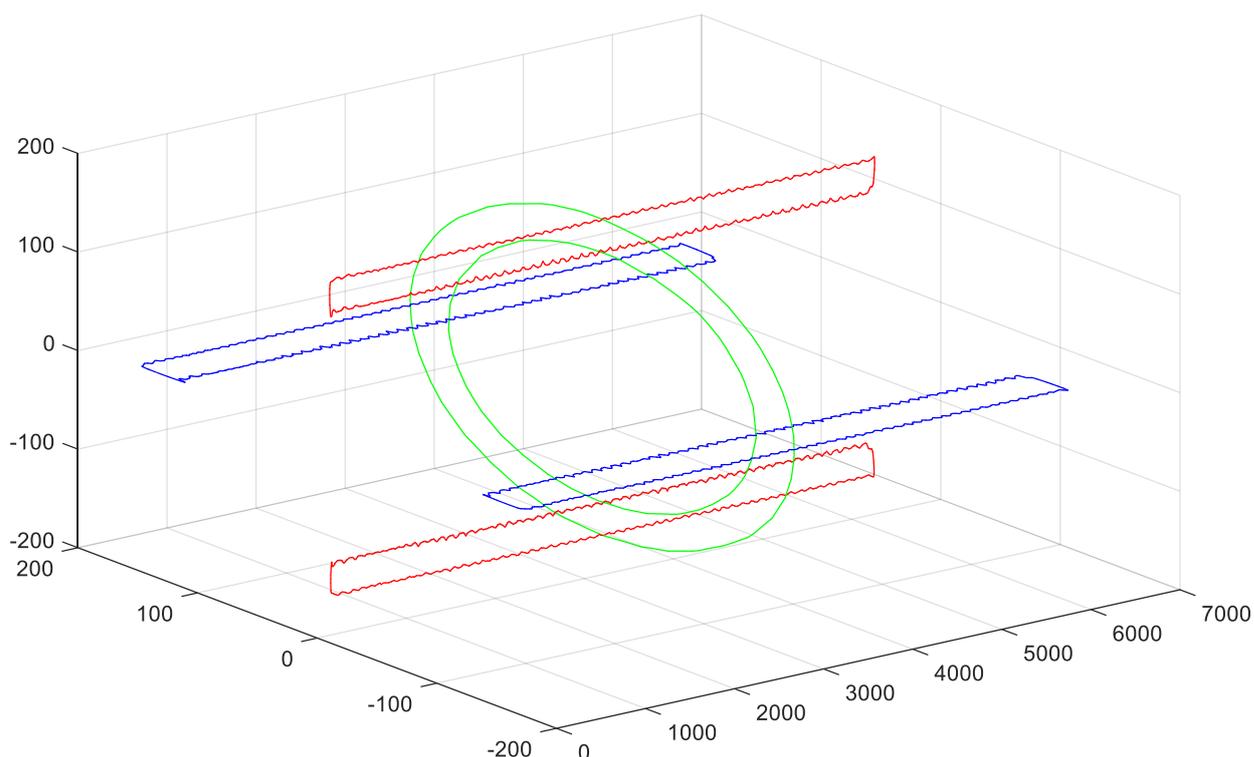


Рисунок 5.2 – Общий вид полученной гильзы

Для каждой гильзы были определены толщины стенок, а также наружные диаметры через 20 мм. Расчет геометрических параметров полученных гильз производился с использованием программного продукта «Программа для расчета геометрических параметров труб при моделировании в среде QForm».

На рисунке 5.3 представлена гистограмма распределения толщины стенки по всей длине гильзы. На рисунке 5.4 представлено распределение диаметра по длине гильзы.

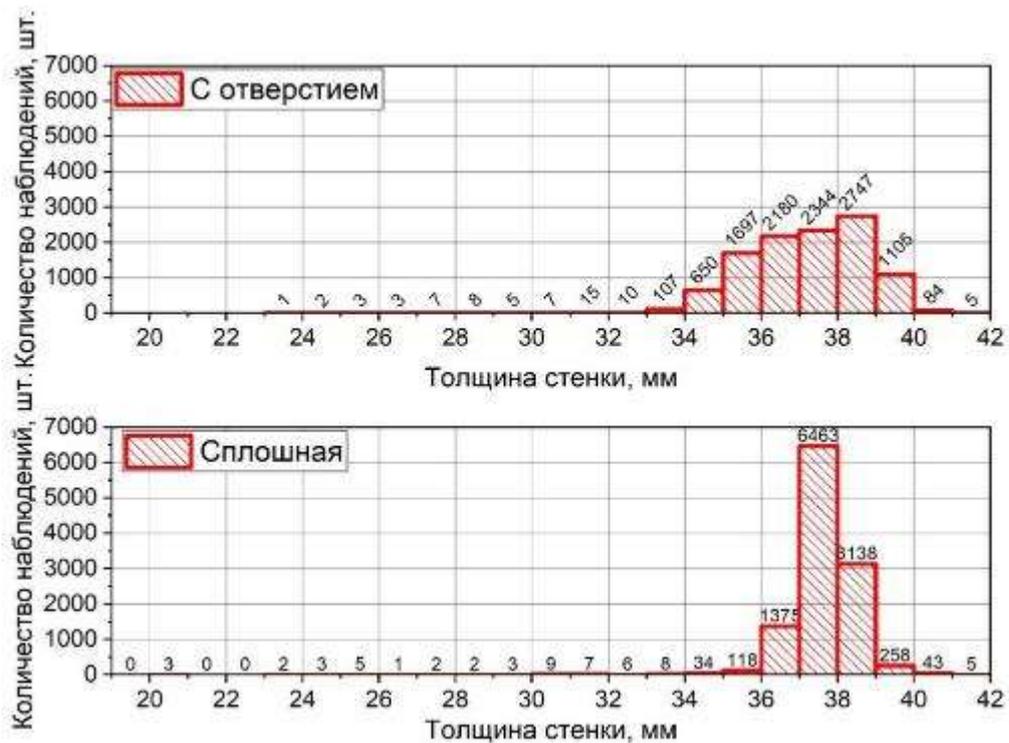


Рисунок 5.3 – Распределение толщины стенки гильзы

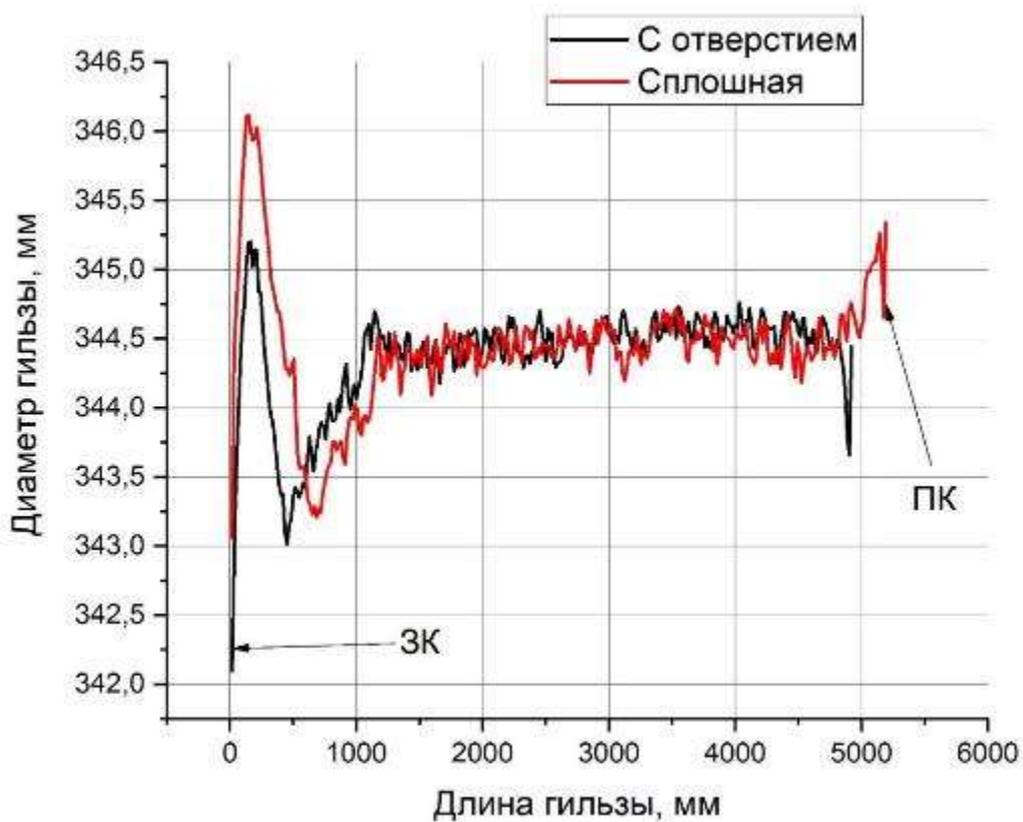


Рисунок 5.4 – Распределение диаметра гильзы по ее длине

В таблице 5.2 представлены сводные данные по размерам гильз.

Таблица 5.2 – Параметры гильзы

| Модель | 1 | 2 |
|---|----------------------|----------|
| Тип заготовки | Полая (с отверстием) | Сплошная |
| Средняя толщина стенки гильзы, мм | 37,2 | 37,65 |
| Максимальная толщина стенки гильзы, мм | 41,28 | 41,62 |
| Минимальная толщина стенки гильзы, мм | 23,65 | 20,09 |
| Средний диаметр гильзы, мм | 344,4 | 344,6 |
| Максимальный диаметр гильзы, мм | 345,2 | 346,11 |
| Минимальный диаметр гильзы, мм | 342,1 | 343,1 |
| Минимальный внутренний диаметр гильзы, мм | 265,2 | 268,9 |
| Длина гильзы, мм | 4921 | 5226 |

На рисунке 5.5 представлено распределение величины износа на оправке при прошивке сплошной и полый заготовок.

Как видно из рисунка величина износа на оправке при прошивке сплошной заготовки в $\sim 1,5$ раза выше. Следовательно, при прошивке сплошной заготовке существует вероятность низкой стойкости оправки и соответственно ее заката на стане.

Так как по результатам расчета геометрические параметры гильзы получились практически идентичными для двух расчетов, то для детальной оценки необходимо проанализировать изменение степени использования пластичности.

Анализ литературных данных показал, что в настоящее время имеется большое количество информации по пластичности металлов и сплавов в холодном состоянии, однако системные исследования пластичности в горячем состоянии отсутствуют. Это связано с техническими сложностями осуществления горячей деформации в контейнере, заполненном рабочей жидкостью, создающей высокое гидростатическое давление. Среди немногих

работ в направлении исследования пластичности металлов в горячем состоянии можно отметить работу, в которой проведено комплексное исследование зависимости пластичности металлов от температуры, показателя напряженного состояния и параметра Лоде. Однако, в этой работе отсутствуют уравнения, аппроксимирующие полученные экспериментальные данные.

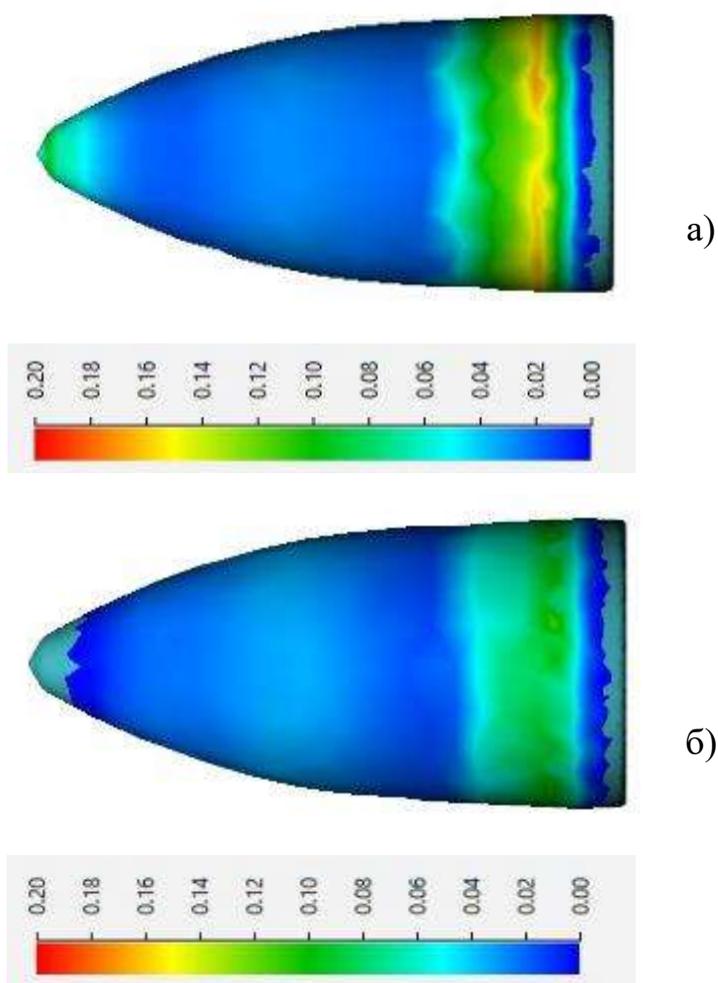


Рисунок 5.5 – Распределение износа на оправке при прошивке заготовок
а) износ оправки при прошивке сплошной заготовки;
б) износ оправки при прошивке полый заготовки

Поскольку для расчета степени использования ресурса пластичности металлов и сплавов необходимо иметь выражение, описывающее диаграмму

пластичности, содержащее эмпирические коэффициенты, которые методически легко определить, была предложена зависимость вида:

$$\Lambda_p = a_0 \Theta^{a_1 + a_{12} \frac{\sigma}{T}} \exp\left(a_2 \frac{\sigma}{T}\right), \quad (5.1)$$

где Λ_p – степень деформации сдвига, накопленная металлом к моменту разрушения;

a_0, a_1, a_{12}, a_2 – эмпирические коэффициенты;

Θ – температура металла;

$\frac{\sigma}{T}$ – показатель напряженного состояния металла.

Так для стали 08X18H10T (непрерывно-литая заготовка) ранее было получено уравнение степени использования пластичности:

$$\Lambda_p = 2,55 \Theta^{5,73 - 2,02 \frac{\sigma}{T}} \exp\left(0,04 \frac{\sigma}{T}\right), \quad (5.2)$$

Для оценки степени исчерпания ресурса пластичности используют уравнение вида:

$$\psi = \int_0^z \frac{H}{\Lambda_p} dz \leq 1, \quad (5.3)$$

где H – скорость деформации;

z – относительная длина очага деформации.

В то же время следует отметить, что процесс прошивки сопровождается знакопеременной деформацией. При знакопеременной деформации наблюдается меньшая, чем при монотонной деформации, интенсивность накопления поврежденности металла.

На рисунке 5.6 представлена схема очага деформации с относительной длиной очага деформации.

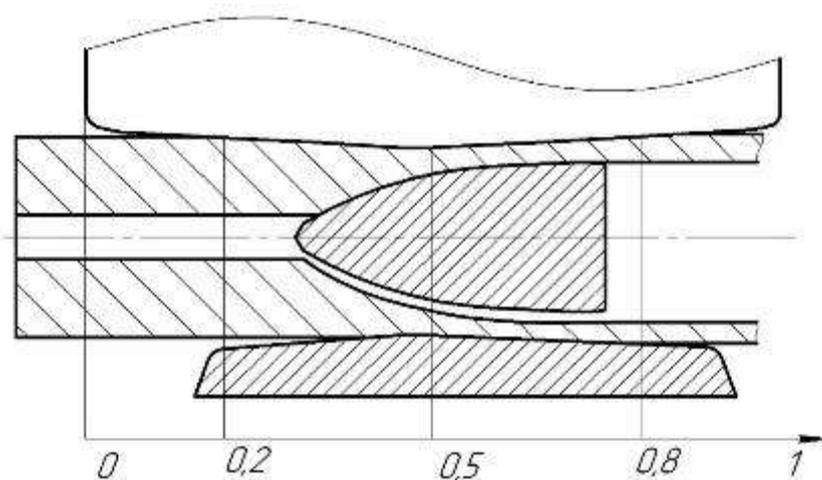


Рисунок 5.6 – Схема очага деформации с относительной длиной очага деформации

В ходе моделирования на заготовку наносились точки относительно которых фиксировались значения показателя напряженного состояния, интенсивности скорости деформации и температуры, а также положение в каждый момент времени процесса прошивки. Точки наносились на наружную поверхность, внутреннюю (для полой заготовки), относительно оси заготовки (для сплошной заготовки), а также на некотором расстоянии от оси заготовки (для сплошной заготовки).

На рисунке 5.7 представлено распределение показателя напряженного состояния, скорости деформирования, температуры для внутренней поверхности полой заготовки, а на рисунке 5.8 представлены аналогичные графики для осевой зоны сплошной заготовки.

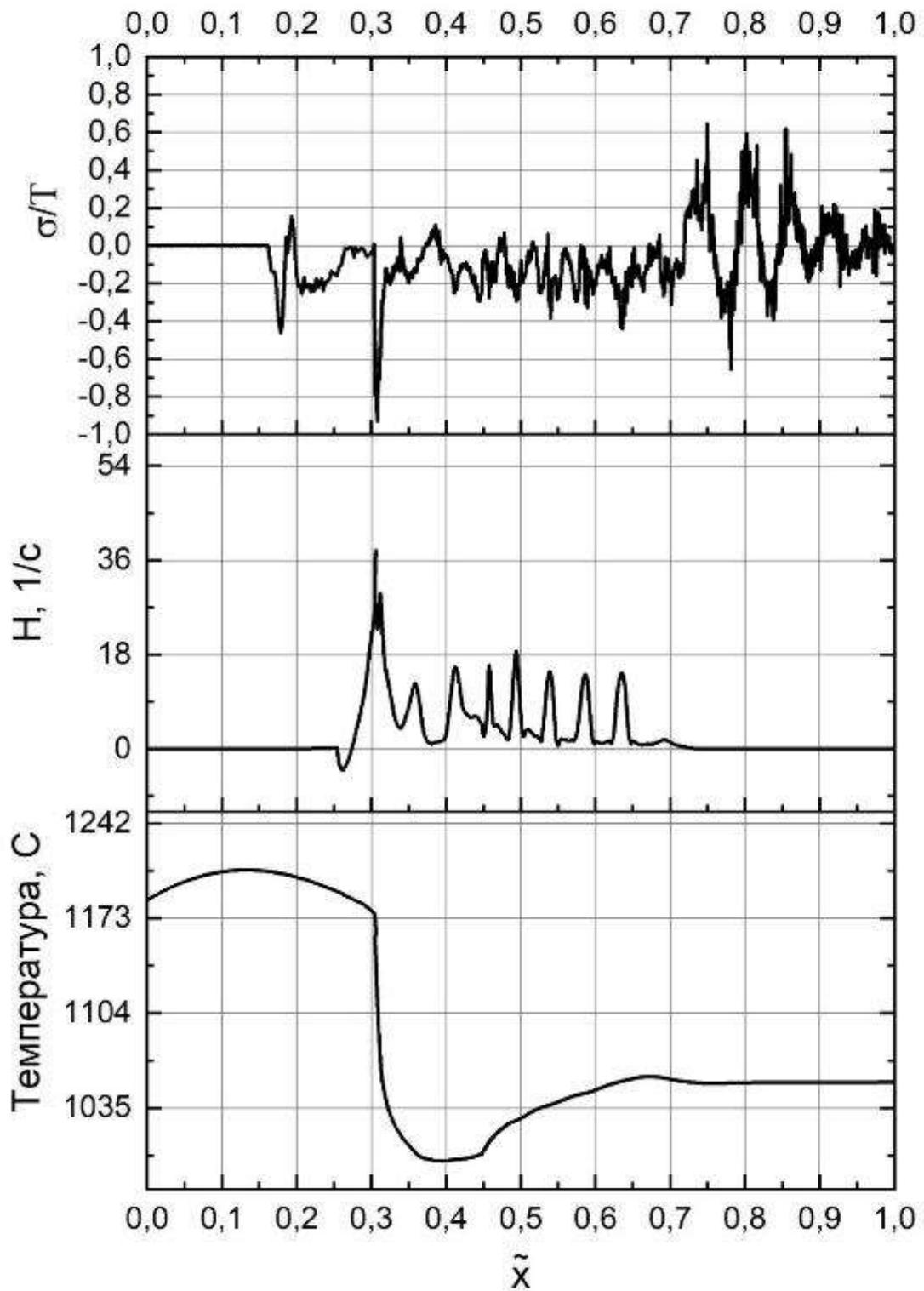


Рисунок 5.7 – Распределение показателя напряженного состояния, скорости деформирования и температуры металла для центральной части сплошной заготовки

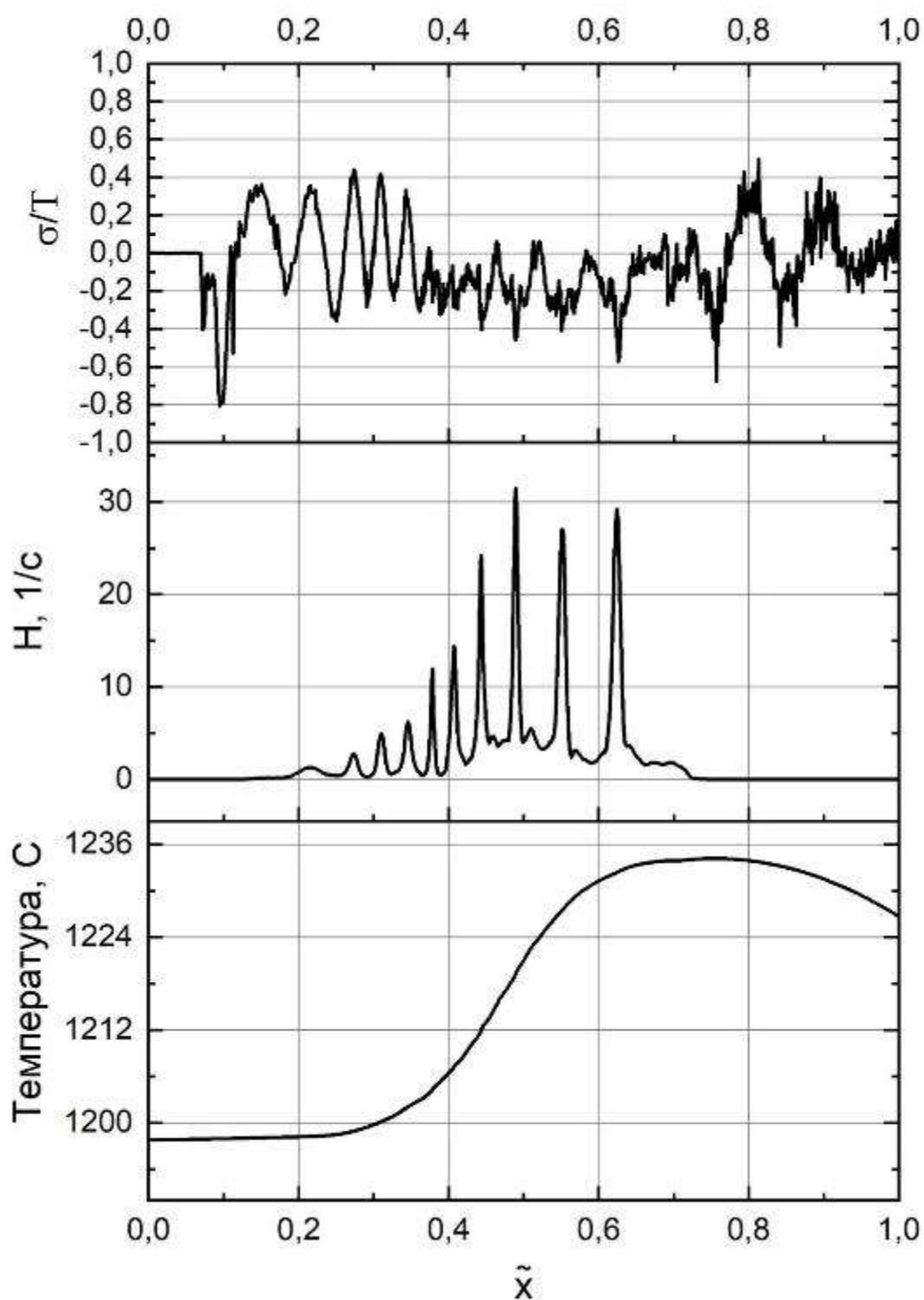


Рисунок 5.8 – Распределение показателя напряженного состояния, скорости деформирования и температуры металла для внутренней поверхности заготовки

Первичный захват заготовки происходит на расстоянии 0,16 относительной длины очага деформации. При сравнении показателей напряженного состояния можно сделать вывод о том, что в конце очага деформации на расстоянии 0,7-0,85 длины очага деформации показатель напряженного состояния превышает значения 0,58 (для сплошной заготовки). Это соответствует тому, что на данном промежутке прошивки может возникнуть разрушение поверхностных слоев из-за высоких растягивающих напряжений.

Для того чтобы точно рассчитать показатель истощения ресурса пластичности необходимо численно описать показатель напряженного состояния, интенсивности скоростей и температуры.

Для описания показателя напряженного состояния практически невозможно подобрать уравнение регрессии. Наиболее подходящим может быть уравнение Гауссовского вида, представленное на рисунке 5.9. Однако в этом случае коэффициент достоверности составляет 0,56, что является низким значением.

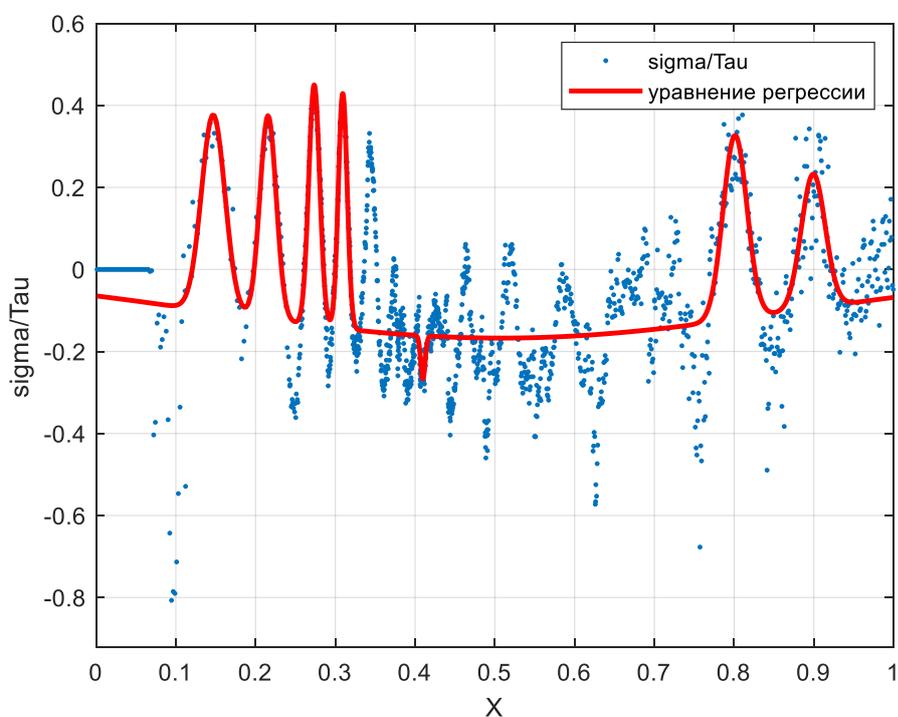


Рисунок 5.9 – Сопоставление регрессионного уравнения с данными

Также стоит отметить, что данный вид изменения показателя напряженного состояния не является идентичным для всех точек как по радиусу заготовки, так и по длине заготовки.

Для описания подобного уравнения был использован программный комплекс MATLAB позволяющий определить тип уравнения, а также использовать полученное уравнение в последующих расчетах.

На рисунке 5.10 представлен общий вид диалогового окна для предварительных настроек вычисления регрессионного уравнения. Данный модуль позволяет рассчитать уравнение с использованием проверочных данных, причем с использованием 5 различных выборок (перекрёстная проверка). При таком подходе оценка эффективности выбранной модели получается с наиболее равномерным использованием имеющихся данных.

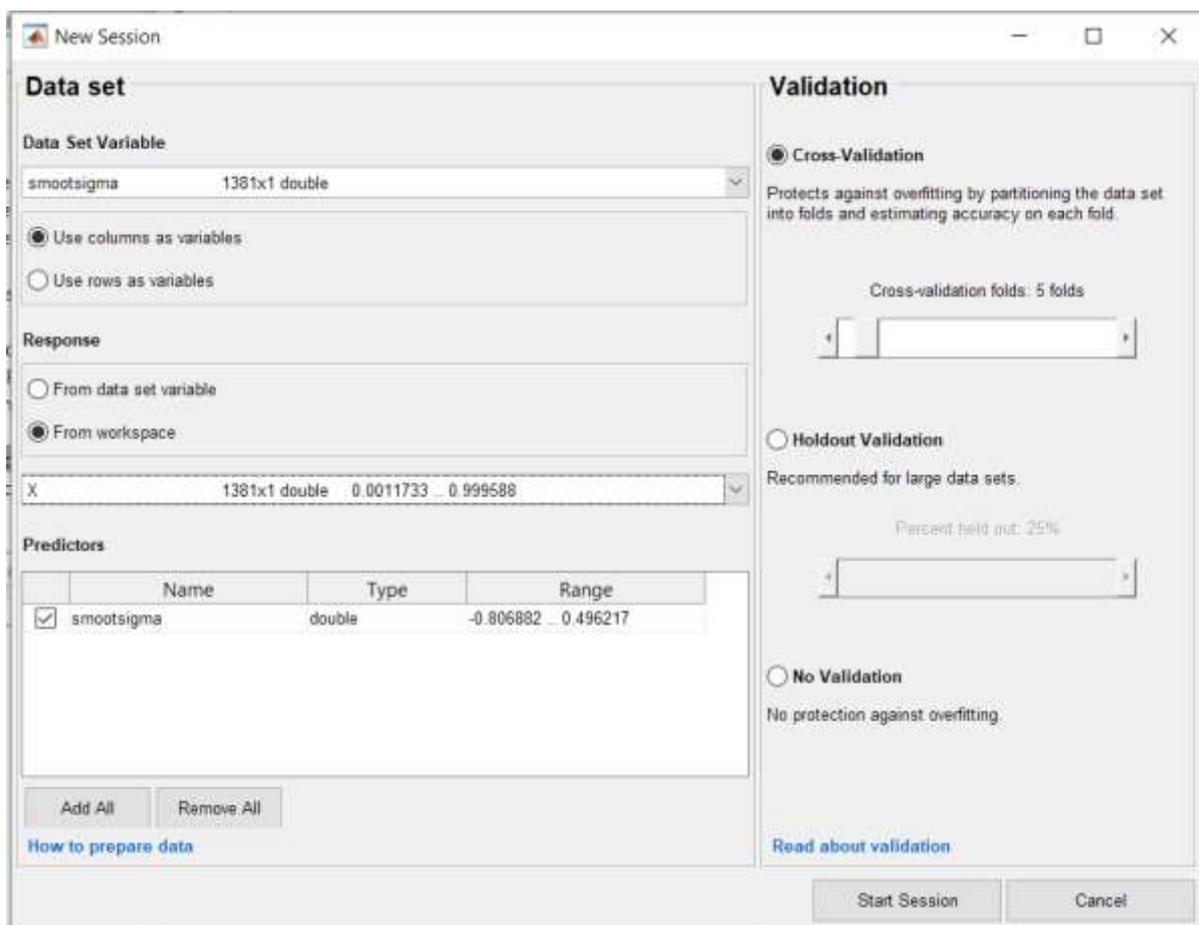


Рисунок 5.10 – Диалоговое окно модуля определения вида регрессии уравнений

В ходе обучения были выбраны различные модели. Наиболее подходящей моделью уравнения – Gaussian Process Regression (Exponential GPR) с величиной ошибки определения – 0,05477 (рисунок 5.11).

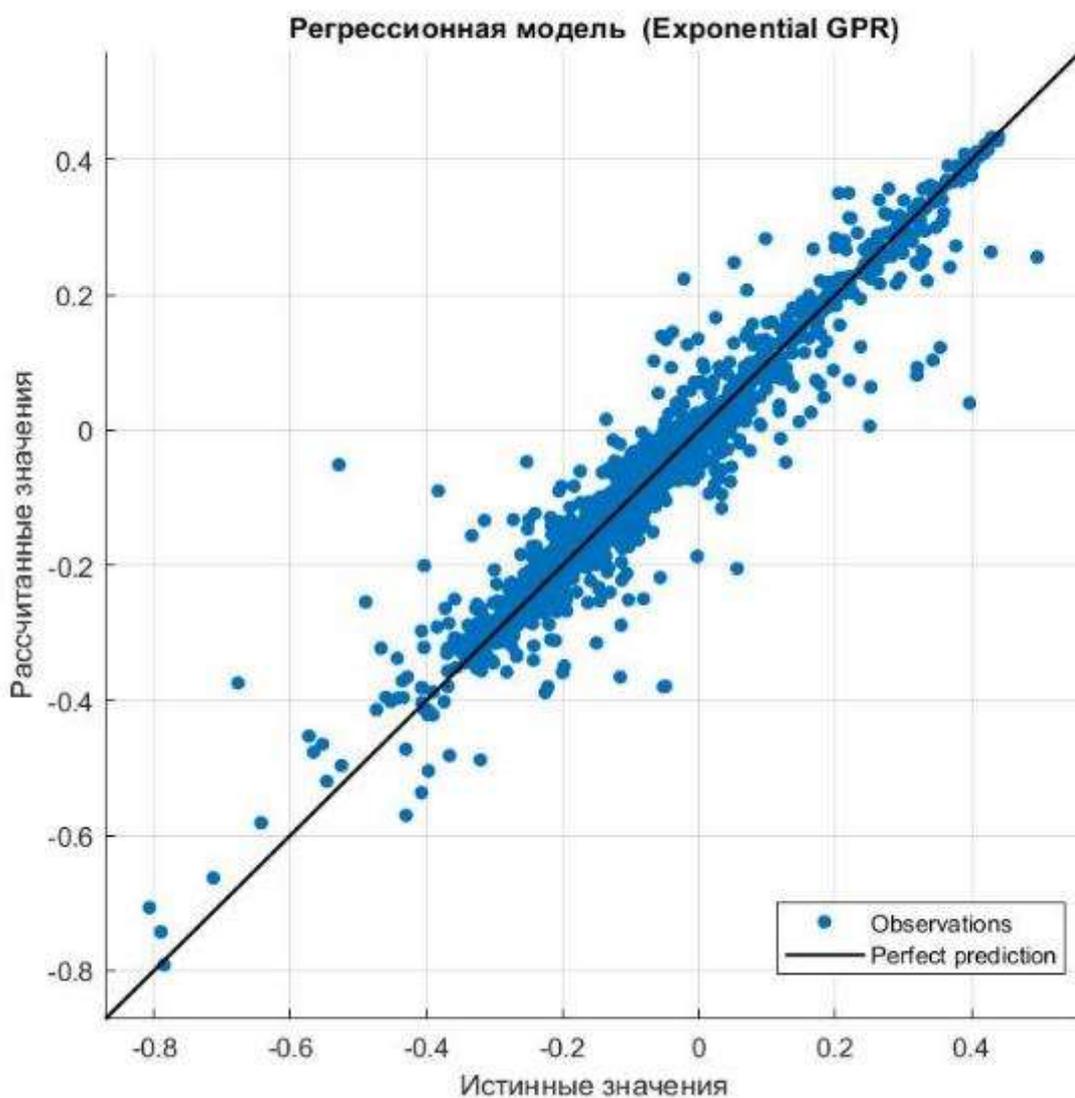


Рисунок 5.11 – Распределение истинных и рассчитанных значений для выбранной модели регрессии

На рисунке 5.12 представлено распределение ресурса пластичности для центра сплошной заготовки и внутренней поверхности полый заготовки.

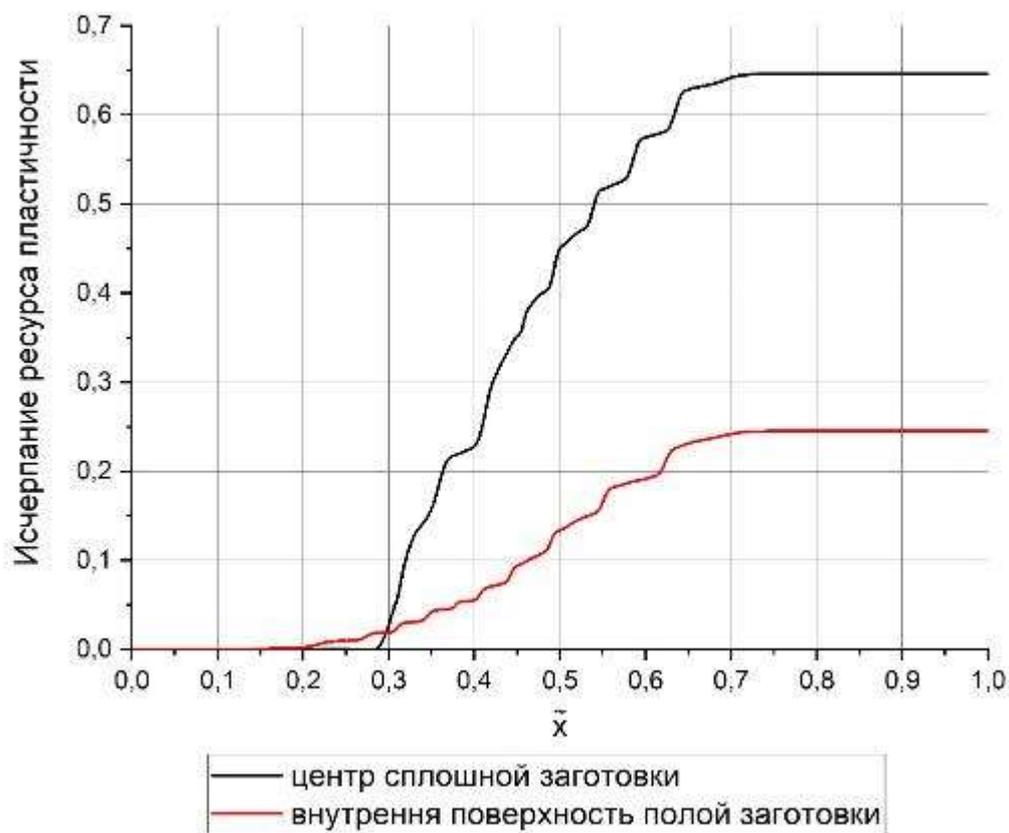


Рисунок 5.12 – Распределение истощения ресурса пластичности по длине очага деформации

Как видно из рисунка 5.12 степень истощения ресурса пластичности возрастает ступенчато, что характерно процессу прошивки, так как в этом процессе сжимающие напряжения (со стороны валков) сменяются растягивающими напряжениями (со стороны линейек).

Что характерно для сплошной заготовки степень истощения ресурса пластичности в 2,7 раза превышает степень истощения ресурса пластичности для полой заготовки. Следовательно сплошная заготовка более склонна к появлению внутренних дефектов в виде плен.

На рисунке 5.13 и 5.14 представлено распределение максимального значения истощения ресурса пластичности по длине заготовки.

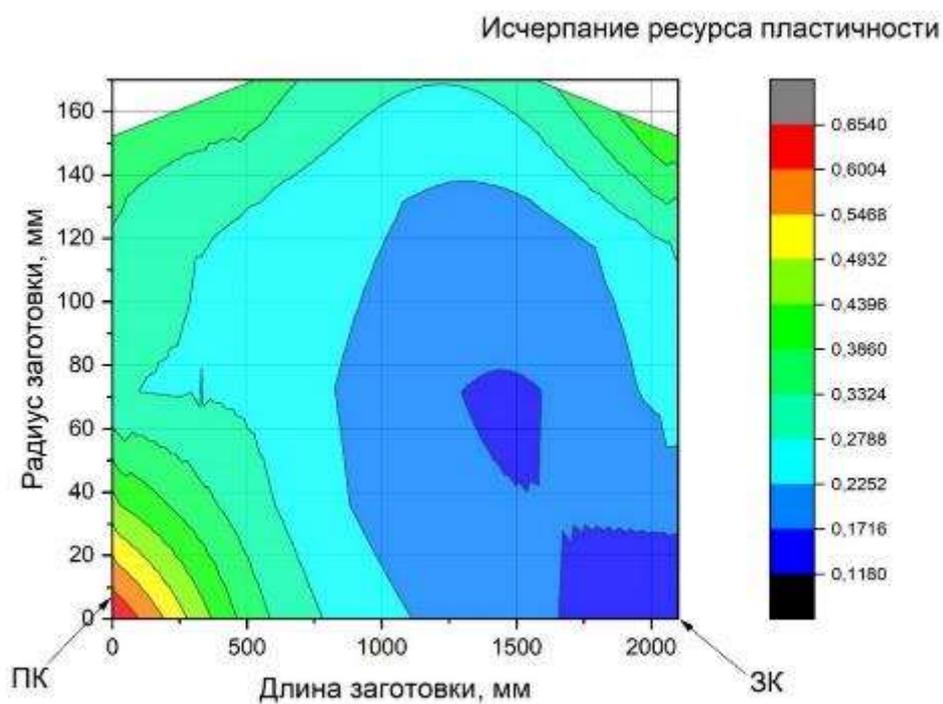


Рисунок 5.13 – Изменение исчерпания ресурса пластичности для сплошной заготовки относительно ее длины

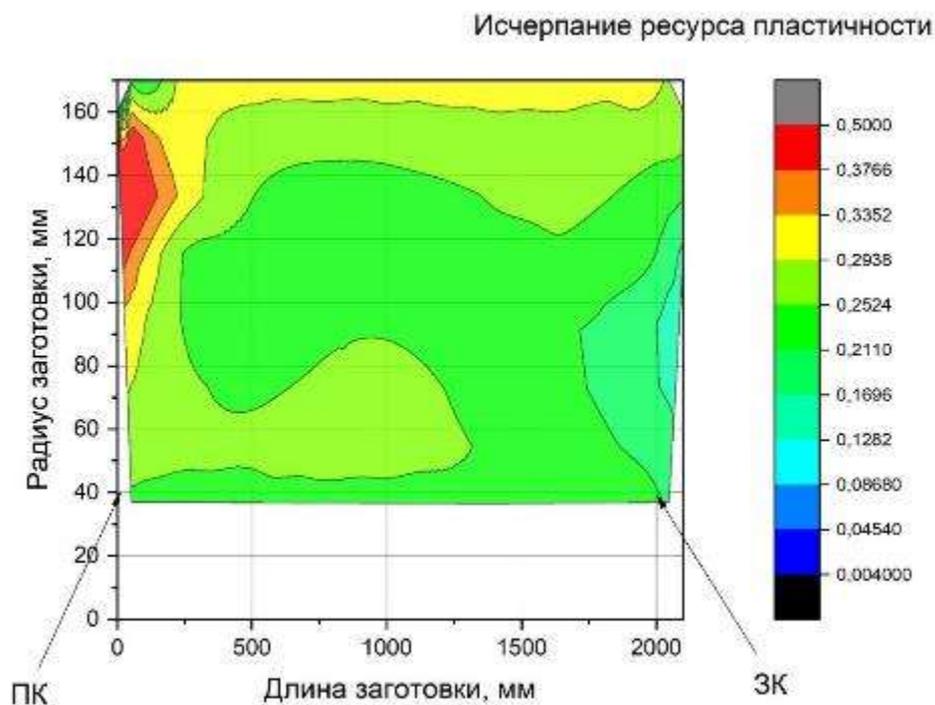


Рисунок 5.14 – Изменение исчерпания ресурса пластичности для полой заготовки относительно ее длины

Как видно из рисунка 5.13 максимальное значение истощения ресурса пластичности наблюдается в центре заготовки на переднем торце. Следовательно, при превышении степени истощения ресурса пластичности более 1 в этом месте и практически по всей длине будет образовываться сначала трещины, а потом дефекты типа плена. На заднем торце сплошной заготовки наблюдается наиболее пластичная область, что также подтверждается практикой, так как на заднем торце может образовываться кольцевое отслоение.

Для полой заготовки показатель истощения ресурса пластичности по всему объему заготовки практически одинаков.

Для сравнения на рисунке 5.15 и 5.16 представлено распределение изменения истощения ресурса пластичности для полой и сплошной заготовки, предназначенной для раскатки в калибре 372 мм (под трубу 325x12 мм).

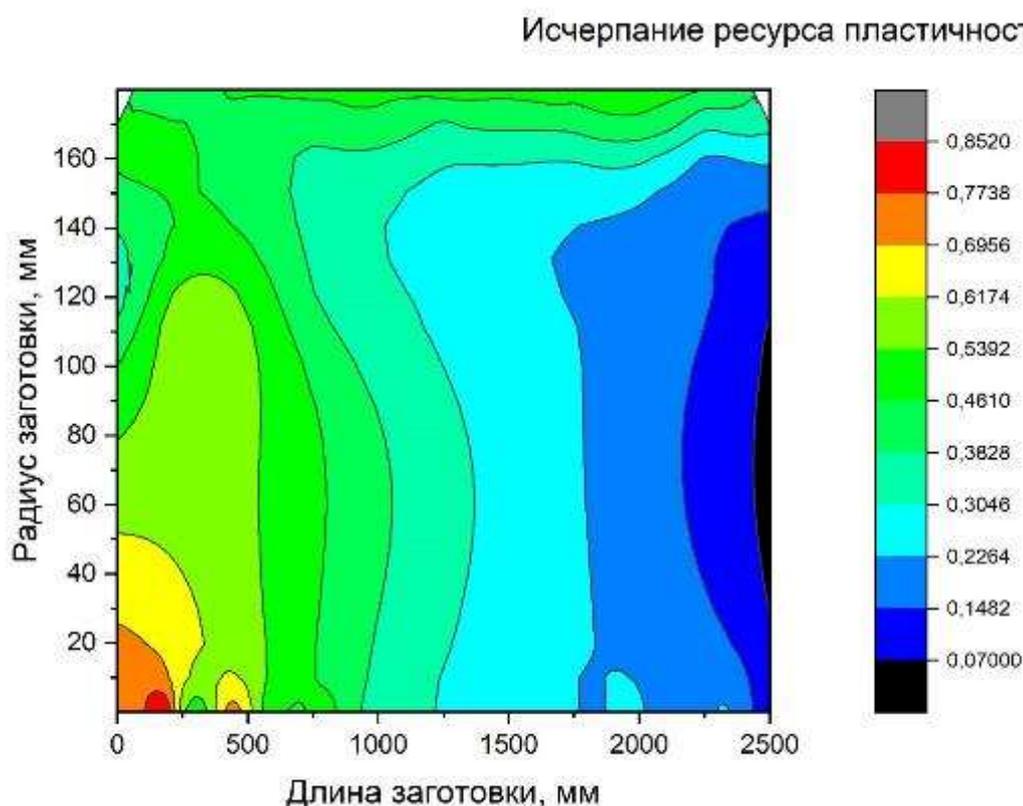


Рисунок 5.15 – Изменение истощения ресурса пластичности для сплошной заготовки относительно ее длины

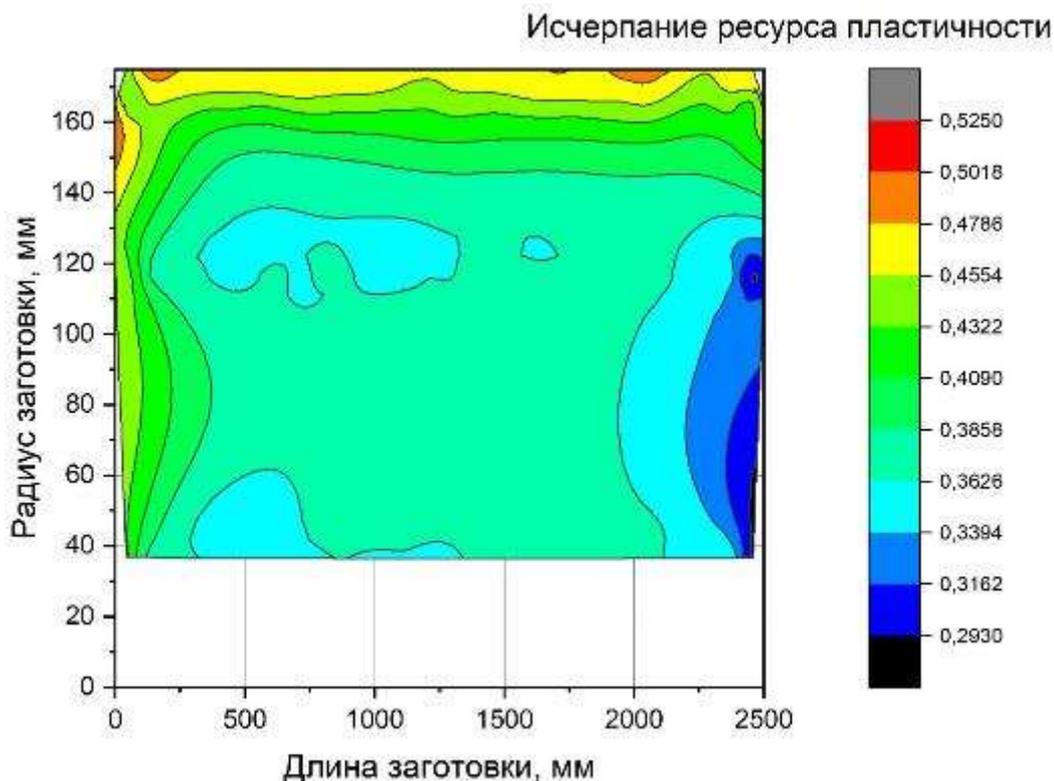


Рисунок 5.16 – Изменение исчерпания ресурса пластичности для поллой заготовки относительно ее длины

При сравнении рисунков 5.12-5.15 можно сделать вывод о том, что для сплошной заготовки характерно пониженное значение пластичности на переднем торце заготовки и повышенное значение пластичности к концу прошивки. Для поллой заготовки значение пластичности на передних и задних торцах приблизительно равны.

Таким образом сделан вывод, что для прокатки труб из марки стали 08X18H10T необходимо использовать полую заготовку.

По результатам моделирования процесса прошивки для последующей раскатки в калибре 288 установлено следующее:

- 1) геометрические показатели гильз соответствуют требованиям, предъявляемым к заготовкам, прокатываемым на стане МРМ;
- 2) при прошивке сплошной заготовки величина износа оправки выше, чем при прошивке поллой заготовки в 1,5 раза;

3) для сплошной заготовки наблюдаются области с критическим значением напряженного состояния (0,58), что может привести к разрыву металла на внутренней поверхности гильзы;

4) показатель показателя ресурса пластичности для сплошной заготовки незначительно выше, чем для полой заготовки (средние значения). Однако на переднем торце заготовки в осевой зоне показатель истощения ресурса пластичности больше в 2,7 раза чем для переднего торца полой заготовки. Таким образом можно сделать вывод о том, что сплошная заготовка менее пластична. Аналогичное изменение истощения ресурса пластичности наблюдается при прошивке заготовок под последующую раскатку в калибре 372 мм.

5) При раскатке гильз в калибре 288 наблюдается превышение нагрузки удержания оправки (более 2000 кН). Также наблюдается больший охват оправки металлом по сравнению с прокаткой в калибре 372 мм.

Основываясь на результатах опытной прокатки, а также на результатах моделирования процесса, можно заключить следующее, для обеспечения процесса прокатки труб 273x20 необходимо:

1) Увеличить овальность калибра не менее 5% от действующей калибровки, ширина калибра 1- клетки составит 366 мм;

2) В случае увеличения овальности калибра на 5% максимально возможный диаметр гильзы составит 360 мм для прокатки в 1-клетки без переполнения калибра;

3) С целью обеспечения суммарного обжатия по толщине стенки в стане МРМ на уровне прокатки в 360 калибре толщина стенки гильзы для прокатки трубы 273x20 мм должна составить 34-35 мм;

4) Уменьшение суммарного обжатия по толщине стенки может повлечь за собой дополнительное остывание раската в стане с увеличением угла охвата оправки и повышении токовых нагрузок на стане.

5.2 Лабораторное моделирование процесса прошивки заготовок из нержавеющей марки стали в стане винтовой прокатки

Для лабораторного моделирования были изготовлены оправки из различных марок стали (таблица 5.3) с классической калибровкой № 1-4 и оправка № 5 со специальной калибровкой рабочей поверхности с нанесением на нее продольных выточек. При этом марка стали у оправки № 5 совпадает с маркой стали у оправки № 3. Эскизы оправок представлены на рисунке 5.17.

Испытание оправок при прошивке нержавеющей марки стали проводилось на опытно-промышленном стане МИСиС-130Д, технические характеристики которого представлены в таблице 5.4.

Для прошивки было подготовлено:

– 35 заготовок из стали марки 20Х13 диаметром 60 мм длиной 200 мм (на передние торцы всех заготовок были нанесены центровочные отверстия диаметром 18 мм и глубиной ~20 мм);

– 5 оправок прошивного стана из различных марок стали, с различными калибровками рабочей поверхности;

– комплект валков. Калибровка представлена на рисунке 5.18б;

– комплект линейек. Калибровка представлена на рисунке 5.18а.

Таблица 5.3 – Материалы экспериментальных оправок

| № оправки | Марка стали | $C_{ЭКВ}$ |
|-----------|-------------------------------|-----------|
| 1 | 4Х5МФС | 2,05 |
| 2 | 5Х3В3МФС | 1,69 |
| 3 | 20Х2Н4А | 0,76 |
| 4 | 3Х3М3Ф | 1,94 |
| 5 | 20Х2Н4А (конструкция РусНИТИ) | 0,76 |

Таблица 5.4 – Техническая характеристика прошивного стана МИСиС-130Д

| Наименование параметра | Значение |
|------------------------|----------|
| Рабочие валки: | |
| Диаметр в пережиме, мм | 430 |
| Длина бочки, мм | 320 |

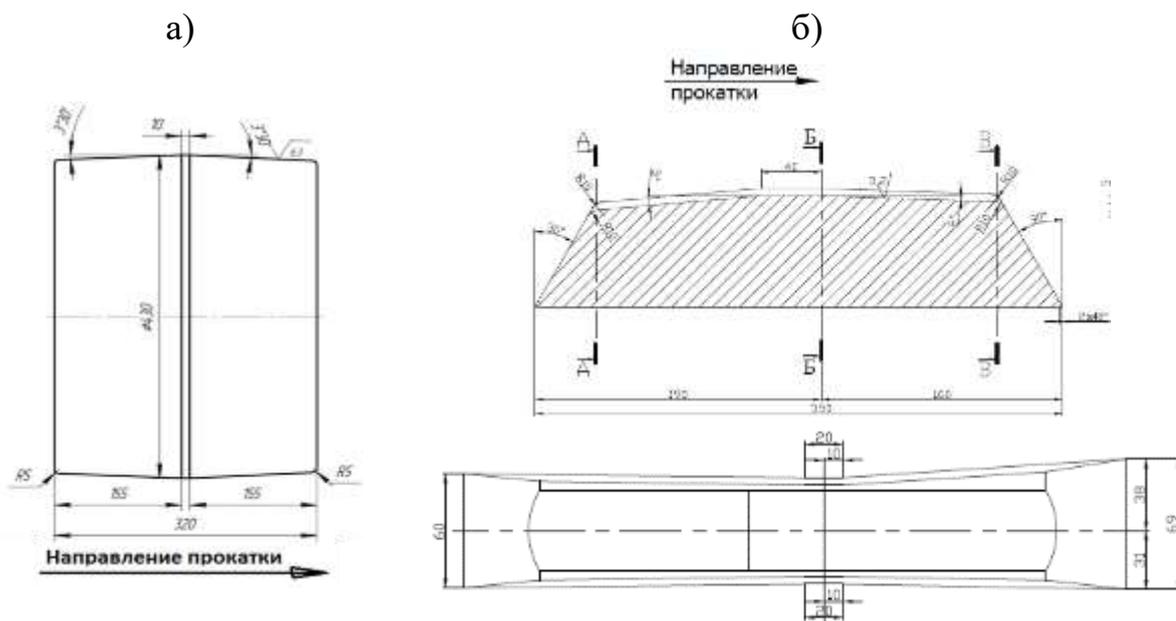


Рисунок 5.18 – Калибровка направляющего инструмента: а – калибровка валка; б – калибровка линеек

Перед испытаниями все оправки подвергались отжигу при температуре 930 °С в течении 60 минут с последующим медленным остыванием в печи до температуры 600 °С.

Величина показателя углеродного эквивалента, представленная в таблице 1, определяемая химическим составом, стали, рассчитывалась по формуле 1:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}, \quad (5.4)$$

Очаг деформации с оправкой диаметром 43,5 мм представлен на рисунке 5.19.

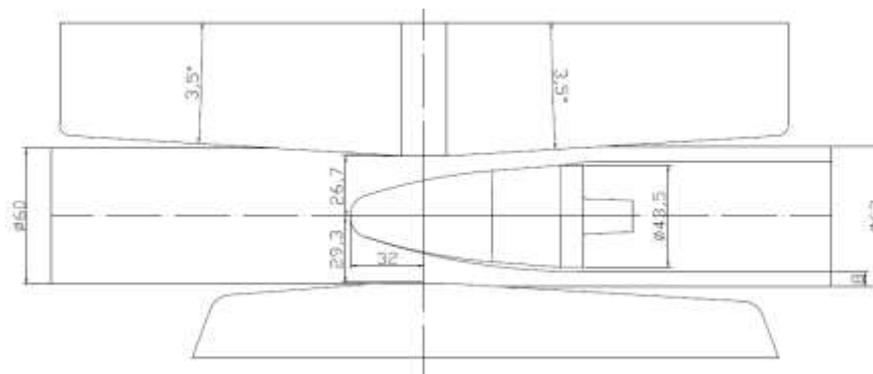


Рисунок 5.19 – Очаг деформации с оправкой диаметром 43,5 мм

Настроечные параметры прошивного стана представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Параметры настройки очага деформации стана МИСиС-130Д

| D_3 , мм | D_r , мм | S_r , мм | μ | ε_n , % | ε_n , % | a, мм | b, мм | c, мм | β , град | $d_{опр}$, мм |
|------------|------------|------------|-------|---------------------|---------------------|-------|-------|-------|----------------|----------------|
| 60,0 | 62,0 | 9,0 | 1,8 | 6,0 | 11,0 | 53,4 | 58,6 | 32,0 | 10,0 | 43,5 |

где D_3 – диаметр заготовки;

D_r – диаметр гильзы;

S_r – толщина стенки гильзы;

μ - коэффициент вытяжки;

ε_n – обжатие перед носком оправки;

ε_n – обжатие в пережиме валков;

a – расстояние между валками в пережиме;

b – расстояние между линейками;

c – выдвигание оправки за пережим валков;

β – угол подачи;

$d_{опр}$ – диаметр оправки.

Дополнительные параметры настройки очага деформации:

– частота вращения валков – 28 об/мин;

– коэффициент овализации – 1,10.

Нагрев заготовок перед прошивкой осуществляли в камерной электрической печи до температуры 1180 °С в течение 80-90 мин.

Прошивка заготовок протекала стабильно с естественным первичным и вторичным захватом и свободным выходом заднего конца гильзы из очага деформации.

Средняя токовая нагрузка на главный привод стана составляла 150–170 А. С увеличением количества проходов было отмечено незначительное увеличение нагрузки, что объясняется изменением формы оправок и изменением условий трения на поверхности заготовки с оправкой. Среднее время прошивки заготовок составляло 10 с.

Внешний вид оправок после различного количества проходов представлен в таблицах 5.6-5.13.

Таблица 5.6 – Ход проведения опытной прокатки (0 проходов)

| № оправки | Фото | Вес оправки, г | Марка стали |
|-----------|--|----------------|----------------------|
| 1 |  | 0,858 | 4X5MФC |
| 2 |  | 0,878 | 5X3B3MФC |
| 3 |  | 0,872 | 20X2H4A |
| 4 |  | 0,874 | 3X3M3T |
| 5 |  | 0,864 | 20X2H4A (РусНИТИ) |

Таблица 5.7 – Ход проведения опытной прокатки (1 проход)

| № оправки | Фото | Вес оправки, г | Марка стали |
|-----------|--|----------------|----------------------|
| 1 |  | 0,858 | 4Х5МФС |
| 2 |  | 0,878 | 5Х3В3МФС |
| 3 |  | 0,874 | 20Х2Н4А |
| 4 |  | 0,872 | 3Х3М3Т |
| 5 |  | 0,862 | 20Х2Н4А (РусНИТИ) |

Таблица 5.8 – Ход проведения опытной прокатки (2 прохода)

| № оправки | Фото | Вес оправки, г | Марка стали |
|-----------|--|----------------|----------------------|
| 1 |  | 0,858 | 4Х5МФС |
| 2 |  | 0,878 | 5Х3В3МФС |
| 3 |  | 0,872 | 20Х2Н4А |
| 4 |  | 0,870 | 3Х3М3Т |
| 5 |  | 0,862 | 20Х2Н4А (РусНИТИ) |

Таблица 5.9 – Ход проведения опытной прокатки (3 прохода)

| № оправки | Фото | Вес оправки, г | Марка стали |
|-----------|--|----------------|----------------------|
| 1 |  | 0,856 | 4Х5МФС |
| 2 |  | 0,874 | 5Х3В3МФС |
| 3 |  | 0,872 | 20Х2Н4А |
| 4 |  | 0,870 | 3Х3М3Т |
| 5 |  | 0,860 | 20Х2Н4А (РусНИТИ) |

Таблица 5.10 – Ход проведения опытной прокатки (4 прохода)

| № оправки | Фото | Вес оправки, г | Марка стали |
|-----------|--|----------------|----------------------|
| 1 |  | 0,852 | 4X5МФС |
| 2 |  | 0,872 | 5X3В3МФС |
| 3 |  | 0,870 | 20X2Н4А |
| 4 |  | 0,870 | 3X3М3Т |
| 5 |  | 0,860 | 20X2Н4А (РусНИТИ) |

Таблица 5.11 – Ход проведения опытной прокатки (5 проходов)

| № оправки | Фото | Вес оправки, г | Марка стали |
|-----------|--|----------------|----------------------|
| 1 |  | 0,852 | 4Х5МФС |
| 2 |  | 0,870 | 5Х3В3МФС |
| 3 |  | 0,870 | 20Х2Н4А |
| 4 |  | 0,868 | 3Х3М3Т |
| 5 |  | 0,860 | 20Х2Н4А (РусНИТИ) |

Таблица 5.12 – Ход проведения опытной прокатки (6 проходов)

| № оправки | Фото | Вес оправки, г | Марка стали |
|-----------|--|----------------|----------------------|
| 1 |  | 0,850 | 4Х5МФС |
| 2 |  | 0,866 | 5Х3В3МФС |
| 3 |  | 0,870 | 20Х2Н4А |
| 4 |  | 0,866 | 3Х3М3Т |
| 5 |  | 0,858 | 20Х2Н4А (РусНИТИ) |

Таблица 5.13 – Ход проведения опытной прокатки (7 проходов)

| № оправки | Фото | Вес оправки, г | Марка стали |
|-----------|--|----------------|----------------------|
| 1 |  | 0,846 | 4X5MΦC |
| 2 |  | 0,866 | 5X3B3MΦC |
| 3 |  | 0,870 | 20X2H4A |
| 4 |  | 0,866 | 3X3M3T |
| 5 |  | 0,858 | 20X2H4A (РусНИТИ) |

Внешний вид полученных гильз представлен на рисунке 5.20. При визуальном осмотре внутренней поверхности гильз дефектов не обнаружено.



Рисунок 5.20 – Внешний вид прошитых гильз

Испытания позволили определить наиболее износостойкие материалы прошивных оправок из представленных материалов, учитывая их меньшую массу и размеры в сравнении с промышленными условиями.

Поскольку время прошивки заготовок составило около 10 с, значительный износ был замечен только после четвертой прошивки.

Первые следы износа были зафиксированы на оправках из стали 4Х5МФС и 5Х3В3МФС уже после второй прошивки. После четвертой прошивки дефекты поверхности были обнаружены на носке оправки из стали 20Х2Н4А. После прошивки 7 заготовок дальнейшую работу прекратили и произвели сравнительный визуальный осмотр поверхности оправок, а также определили зависимости потери массы от количества проходов (рисунок 5.21). По результатам визуального осмотра можно отметить, что за исключением оправок из стали 20Х2Н4А и 3Х3М3Ф, остальные оправки существенно потеряли начальную конфигурацию носка.

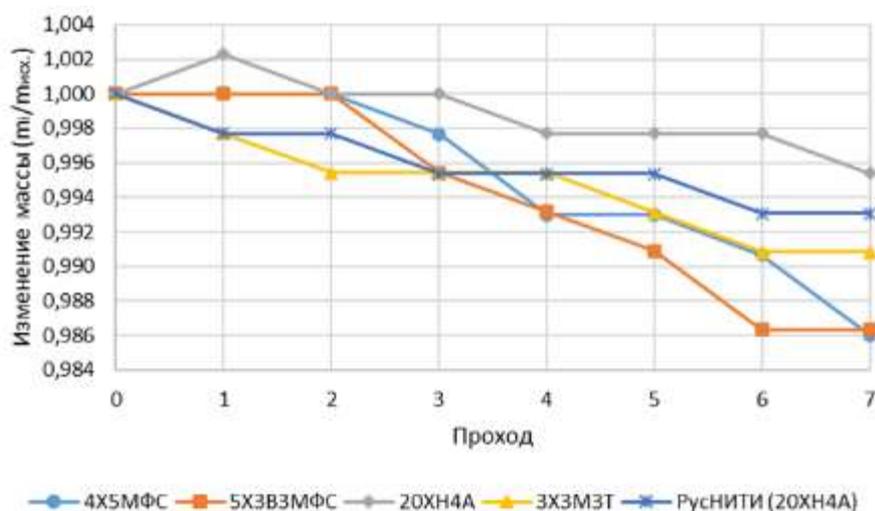


Рисунок 5.21 – Изменение массы оправки после i -го прохода по отношению к исходной массе

Возникшие на рабочей поверхности оправок из сталей 4X5MФC и 5X3B3MФC дефекты не получили заметного развития. Наименьшая потеря массы была зафиксирована у оправок из сталей 20X2H4A, 20X2H4A (РусНИТИ). Она составила не более 6 граммов, в то время как у оправок из сталей 4X5MФC и 5X3B3MФC потеря массы составила до 12 граммов. Таким образом, основным критерием для выбора материала оправки следует считать значение потери массы, которое коррелируется с величиной углеродного эквивалента и данными по материалостойкости.

На основе данных об изменении массы оправок рассчитан коэффициент расхода оправок для разных марок стали по формуле 5.5:

$$q_{\text{опр}} = \frac{\Delta M}{G} [\text{г/кг}], \quad (5.5)$$

где ΔM – изменение массы оправки;

G – масса заготовки (масса одной исходной заготовки из стали 20X13 составляет 4,3 кг).

Результаты расчетов представлены на графиках изменения коэффициента расхода оправок в зависимости от количества проходов (рисунок 5.22).

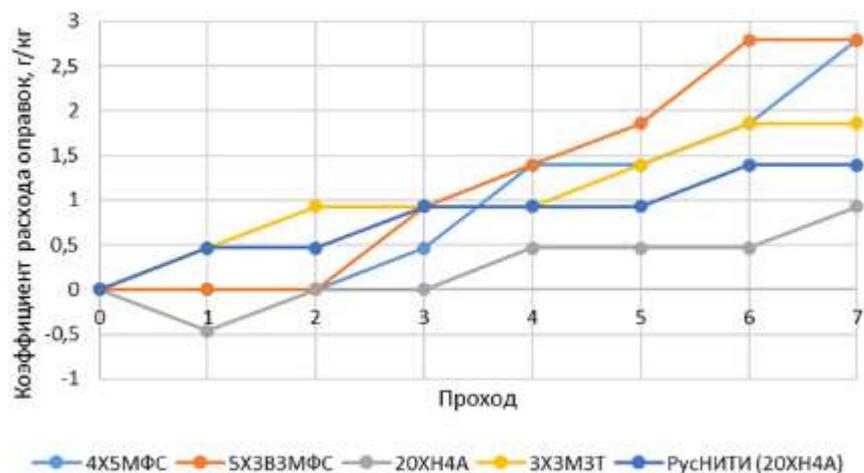


Рисунок 5.22 – Изменение коэффициента расхода оправок после i -го прохода

На основе полученных результатов можно считать, что с точки зрения состояния наружной поверхности наиболее приемлемым материалом из исследованных в ходе эксперимента является сталь марки 20X2H4A. С точки зрения критерия расхода оправок наилучшие результаты в условиях эксперимента на прошивном стане МИСиС-130Д показали оправки из стали марки 20X2H4A.

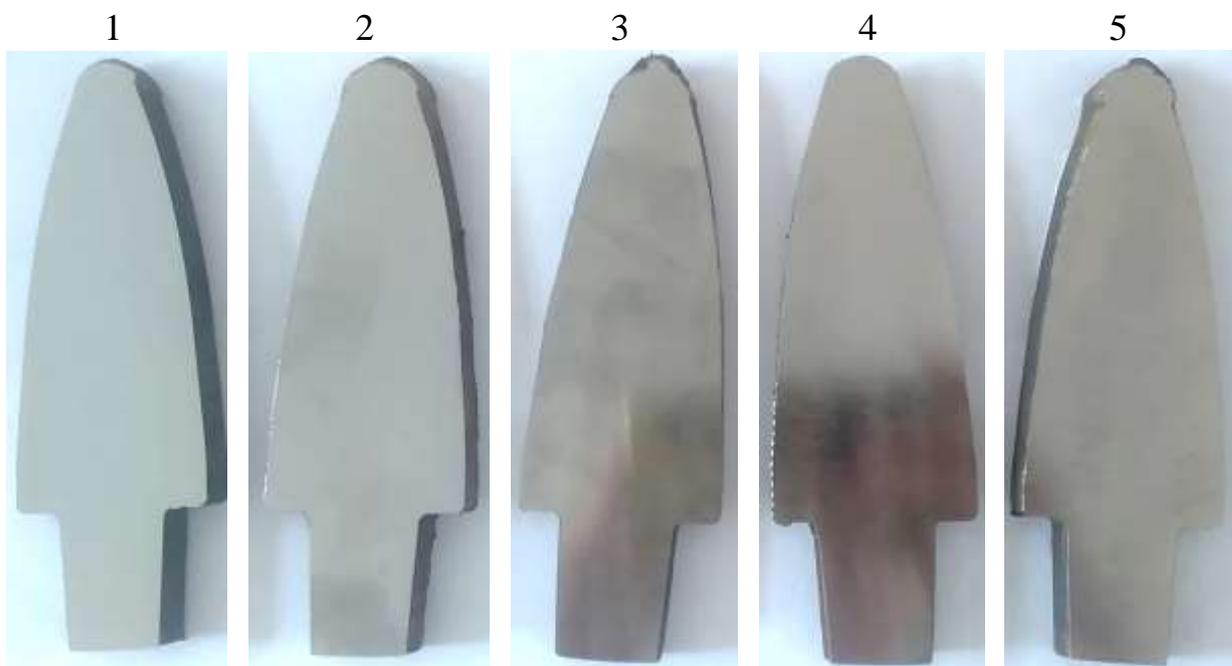
Для дюраметрического исследования, а также для проведения химического анализа оправки в количестве 5 штук были подвергнуты механической обработке. Оправки в продольном направлении распилили на темплеты. На рисунке 5.23 представлен вид полученных темплетов.

Определение химического состава металла оправок прошивного стана проводилось по ГОСТ Р 54153-2010 методом атомно-эмиссионного спектрального анализа на образцах № 1-5. Определение твердости проводилось по ГОСТ 9013-59.

Для исследования использовали оборудование:

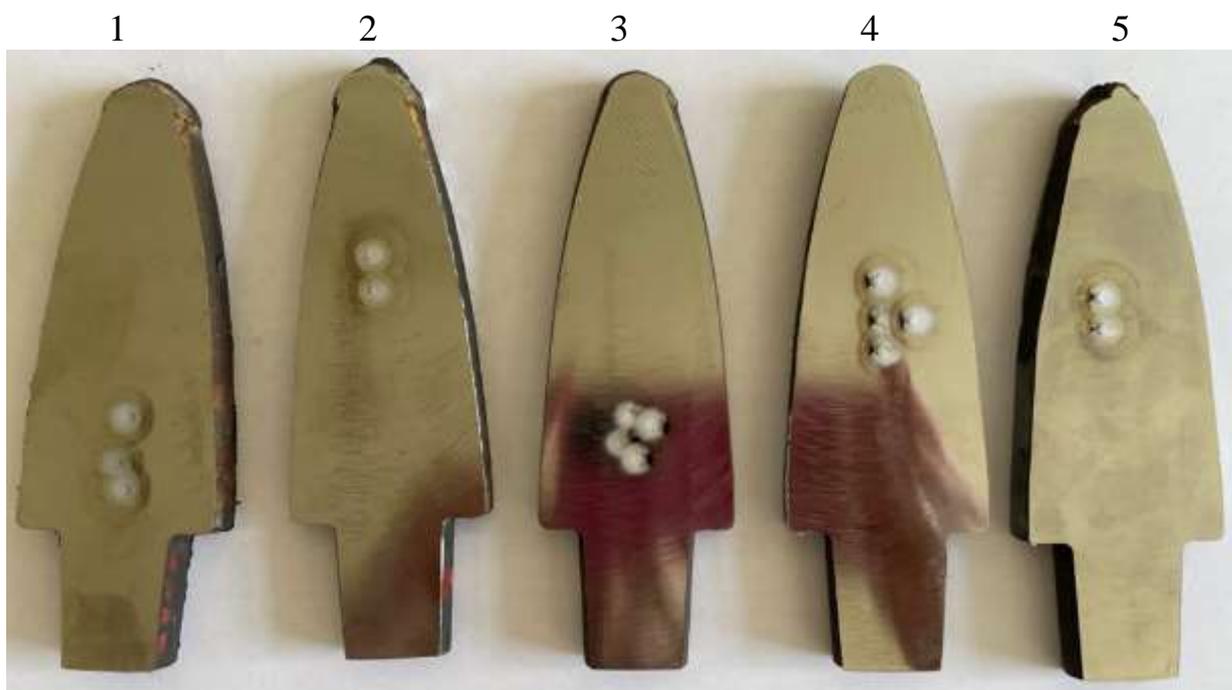
- твердомер Роквелла DuraJet;
- спектрометр оптико-эмиссионный OBLF MVS1000.

На рисунке 5.24 приведены темплеты оправок после химического анализа. Результаты анализа химического состава металла оправок приведены в таблице 5.14.



1 – 4Х5МФС; 2 – 5Х3В3МФС; 3 – 20Х2Н4А; 4 – 3Х3М3Ф; 5 – 20Х2Н4А
(РусНИТИ)

Рисунок 5.23 – Темплеты оправок после механической обработки



1 – 4Х5МФС; 2 – 5Х3В3МФС; 3 – 20Х2Н4А; 4 – 3Х3М3Ф; 5 – 20Х2Н4А
(РусНИТИ)

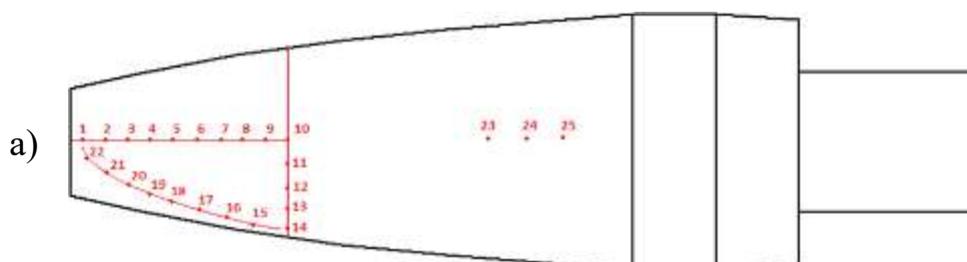
Рисунок 5.24 – Темплеты оправок после химического анализа

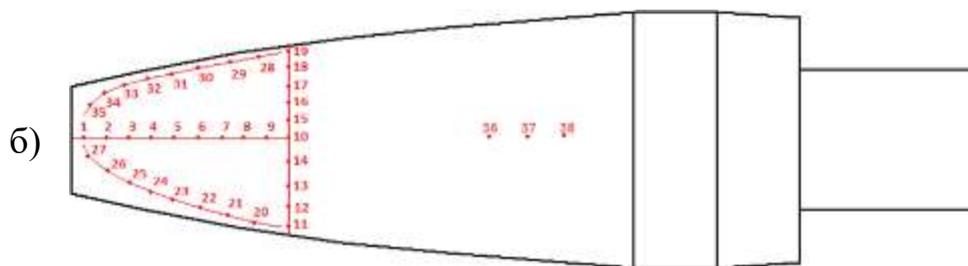
По итогам проведенного анализа химического состава было определено, что у темплета № 1 из стали 4Х5МФС содержание углерода ниже требуемого. У темплета № 2 из стали марки 5Х3В3МФС содержание вольфрама немного превышает требуемые значения. В темплете № 3 и 5 из стали 20Х2Н4А химический состав удовлетворяет требованиям. У темплета № 4 стали 3Х3М3Ф химический состав удовлетворяет требованиям.

Таблица 5.14 – Результаты анализа химического состава металла оправок прошивного стана

| № | Массовая доля элементов, % | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Al | Cu | V | W | Co | Ti | Nb |
| 1 | 0,2 | 1,1 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 4,5 | 0,1 | 1,1 | 0,0 | 0,1 | 0,3 | 0,02 | 0,0 | 0,0 | 0,00 |
| | 648 | 51 | 74 | 010 | 067 | 06 | 95 | 53 | 296 | 264 | 139 | 38 | 161 | 047 | 41 |
| 2 | 0,4 | 0,6 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 2,7 | 0,3 | 0,9 | 0,0 | 0,1 | 1,5 | 3,83 | 0,0 | 0,0 | 0,09 |
| | 092 | 38 | 56 | 197 | 095 | 10 | 28 | 02 | 190 | 132 | 182 | 97 | 257 | 033 | 93 |
| 3 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 1,3 | 3,3 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | <0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 |
| | 583 | 19 | 65 | 015 | 032 | 22 | 45 | 20 | 176 | 096 | 032 | 050 | 105 | 008 | 28 |
| 4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 2,8 | 0,2 | 2,1 | 0,0 | 0,1 | 0,4 | 0,01 | 0,0 | 0,0 | <0,0 |
| | 551 | 81 | 60 | 086 | 089 | 34 | 53 | 96 | 313 | 669 | 213 | 36 | 180 | 033 | 010 |
| 5 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 1,3 | 3,3 | 0,0 | 0,0 | 0,2 | 0,0 | <0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 |
| | 708 | 23 | 67 | 026 | 042 | 25 | 85 | 21 | 179 | 114 | 036 | 050 | 107 | 010 | 26 |

Измерение твердости металла проводили по методу Роквелла по ГОСТ 9013-59 на твердомере DuraJet на образцах № 1-4 в точках № 1-25, на образце № 5 в точках № 1-38 указанных на рисунке 5.25. Результаты испытания представлены в таблице 5.15.





а) – образцы № 1-4; б) – образец № 5

Рисунок 5.25 – Схема расположения точек определения твердости

Значения твердости ближе к центру оправки № 2 оказались ниже 20 HRC поэтому было выполнено измерение по шкале «В», полученные данные также указаны в таблице 5.15.

На рисунке 5.26 представлена гистограмма средних значений твердости на разных участках оправок. Наибольшая твердость зафиксирована у оправки № 4, которая практически одинакова на всех участках оправки; наименьшая – у оправки № 2, где также на всех участках она практически одинакова. У оправок № 3 и № 5, изготовленных из стали марки 20X2H4A, значения твердости на одних и тех же участках практически одинаковы. У оправки № 1 несмотря на наивысшее значение твердости на носке оправки и в основном металле оправки, твердость на рабочей поверхности существенно снижается.

Таблица 5.15 – Результаты измерения твердости оправок прошивного стана

| № образца | Расположение | От носка вглубь оправки | | | | | От центра к поверхности | | Поверхность | | | | Осн. Ме |
|-----------|-------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|-----------|-------------|-------|-------|-----------|-------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 11 | 12 | 15 | 16 | 17 | 18 | |
| 1 | Позиция № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 11 | 12 | 15 | 16 | 17 | 18 | 23 |
| | Твердость HRC | 56,85 | 50,21 | 22,41 | 25,40 | 26,35 | 34,44 | 33,82 | 26,61 | 26,57 | 26,64 | 25,08 | 48,44 |
| | Позиция № | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 13 | 14 | 19 | 20 | 21 | 22 | 24/25 |
| | Твердость HRC | 28,01 | 29,70 | 30,62 | 31,96 | 33,54 | 31,91 | 27,68 | 25,38 | 25,88 | 52,24 | 56,15 | 48,80/49,98 |
| 2 | Позиция № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 11 | 12 | 15 | 16 | 17 | 18 | 23 |
| | Твердость HRC/HRB | 46,43 | 31,46 | 23,26 | <20/92,41 | <20/94,19 | <20/98,01 | <20/97,87 | 25,62 | 27,14 | 22,45 | <20/93,19 | 20,32 |
| | Позиция № | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 13 | 14 | 19 | 20 | 21 | 22 | 24/25 |
| | Твердость HRC/HRB | <20/94,44 | <20/95,75 | <20/96,52 | <20/96,62 | <20/96,70 | 20,57 | 25,46 | <20/93,41 | 21,94 | 32,89 | 40,77 | 20,54/21,95 |
| 3 | Позиция № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 11 | 12 | 15 | 16 | 17 | 18 | 23 |
| | Твердость HRC | 46,60 | 48,35 | 46,92 | 34,71 | 20,62 | 25,52 | 25,95 | 24,50 | 25,51 | 25,18 | 26,74 | 33,20 |
| | Позиция № | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 13 | 14 | 19 | 20 | 21 | 22 | 24/25 |
| | Твердость HRC | 21,61 | 22,84 | 23,94 | 24,88 | 25,94 | 25,89 | 25,26 | 30,21 | 46,20 | 47,56 | 47,00 | 35,06/36,04 |
| 4 | Позиция № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 11 | 12 | 15 | 16 | 17 | 18 | 23 |
| | Твердость HRC | 49,15 | 42,06 | 32,79 | 38,23 | 41,86 | 46,67 | 46,66 | 46,67 | 45,85 | 45,24 | 43,46 | 41,84 |
| | Позиция № | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 13 | 14 | 19 | 20 | 21 | 22 | 24/25 |
| | Твердость HRC | 43,82 | 45,31 | 46,62 | 46,46 | 46,63 | 48,20 | 44,63 | 39,28 | 33,93 | 41,68 | 42,15 | 42,24/42,24 |
| | Позиция № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 14 | 13 | 35 | 34 | 33 | 32 | 36 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|
| 5 | Твердость HRC | 44,65 | 44,17 | 46,77 | 45,88 | 32,37 | 27,88 | 27,48 | 46,32 | 46,7 9 | 47,3 7 | 47,41 | 32,67 |
| | Позиция № | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 11 | 31 | 30 | 29 | 28 | 37 |
| | Твердость HRC | 21,37 | 22,20 | 23,53 | 24,73 | 25,59 | 26,83 | 25,20 | 40,99 | 31,4 8 | 29,8 1 | 28,40 | 35,24 |
| | Позиция № | - | - | - | - | - | 15 | 16 | Поверхность по дну выточки | | | | 38 |
| | | | | | | | | | 20 | 21 | 22 | 23 | |
| | Твердость HRC | - | - | - | - | - | 27,30 | 27,68 | 22,88 | 23,1 0 | 26,4 7 | 40,45 | 35,61 |
| | Позиция № | - | - | - | - | - | 17 | 18/19 | 24 | 25 | 26 | 27 | - |
| Твердость HRC | - | - | - | - | - | 28,02 | 28,17/23, 66 | 46,02 | 47,9 0 | 46,8 8 | 46,50 | - | |

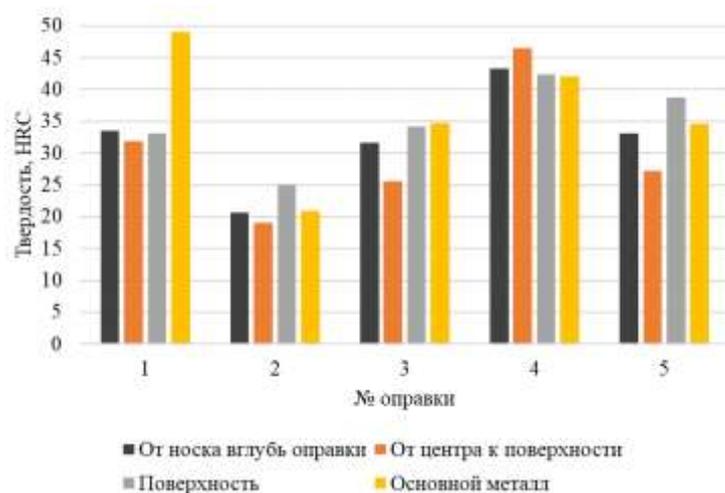


Рисунок 5.26 – Гистограмма средних значений твердости на разных участках оправок

Корреляции стойкости оправки от значений твердости на различных участках оправки не наблюдается, поскольку лучшие показатели стойкости у оправок № 3 и № 5 со средними показателями по всем участкам.

По результатам лабораторного моделирования сделаны следующие выводы:

1. Наличие продольных выточек на рабочей поверхности оправки не оказывает влияние на качество гильз, поскольку при визуальном осмотре их внутренней поверхности дефектов не обнаружено.

2. Износ оправок преимущественно носит адгезионный характер. На оправках присутствуют следы налипаний и вырывов металла оправок.

3. Из исследованных марок сталей наивысшую износостойкость и меньшую склонность к налипанию фрагментов стали марки 20X13 показали оправки из стали марки 20X2H4A.

4. На основе полученных результатов износа опытных оправок рекомендуется провести дополнительное промышленное опробование производства труб из стали марки 20X13 на прошивном стане ТПА 50-200 АО «ВТЗ» с использованием оправок диаметром более 72 мм из стали марки 20X2H4A с продольными выточками на рабочей поверхности.

5. По результатам анализа химического состава металла оправок прошивного стана можно сделать вывод, что оправки соответствуют заявленным маркам стали.

6. По результатам измерения твердости оправок прошивного стана можно сделать вывод, что корреляция между стойкостью оправки и твердостью на различных ее участках отсутствует.

7. Наилучшие показатели стойкости наблюдаются у оправок из стали марки 20Х2Н4А (действующая марка стали) как с действующей калибровкой, так и с экспериментальной калибровкой (продольные выточки на рабочей поверхности).

5.3 Повышение износостойкости оправок прошивного стана при прокатке бесшовных труб из нержавеющей марки стали

По сравнению с углеродистыми марками стали, нержавеющей стали мартенситного и аустенитного класса обладают достаточно низким ресурсом пластичности и узким температурным диапазоном деформации. Это, наряду с высоким химическим сродством данных материалов со сталями, из которых изготавливается прокатный инструмент, делает производство труб из нержавеющей марки стали достаточно сложной технологической задачей в связи с интенсивным износом инструмента и, в первую очередь, оправок прошивного стана. Еще одной причиной интенсивного износа прошивных оправок является повышенное сопротивление пластической деформации нержавеющей марки стали по сравнению с углеродистыми марками стали, а, следовательно, более высокие нагрузки на прокатный инструмент.

Важнейшими факторами, влияющими на стойкость прошивных оправок, являются: сортамент прошиваемых заготовок и получаемых гильз; калибровка инструмента и химический состав материала, из которого изготовлены оправки; параметры настройки очага деформации прошивного стана; режимы деформации и т.д. Использование ковальной заготовки для

изготовления прошивных оправок взамен литой не дает существенного эффекта в повышении стойкости инструмента при производстве труб, а лишь увеличивает их стоимость. Нарботанный опыт показал, что содержание хрома в оправке практически не влияет на повышение ее стойкости. Образуемые тонкие защитные окислы с высокой температурой плавления быстро разрушаются во время работы и практически не восстанавливаются в процессе прошивки. Никель придает слою окислов на поверхности оправки некоторую пластичность и повышает прочность сцепления с окисляемым металлом, а молибден и ванадий обеспечивают прочность и вязкость материала инструмента при высокой температуре.

Поэтому в рамках решения задачи повышения стойкости прошивных оправок, при прокатке труб из нержавеющей марки стали, в первую очередь, была проведена работа по подбору материала для его изготовления. В таблице 5.16 представлены базовый материал, применяемый традиционно для изготовления прошивных оправок, и новая марка стали, предложенная для повышения их стойкости. Так же представлен фактический показатель стойкости оправок для каждого материала при прошивке заготовок из стали марок типа 13Cr, определяемый как количество заготовок, прошитых в гильзы до появления на оправке недопустимых признаков износа и налипания на ее рабочей поверхности.

Таблица 5.16 – Химический состав испытанных прошивных оправок и их стойкость при прошивке заготовок из стали марок типа 13Cr

| Марка стали | Массовая доля элементов (средние значения), % | | | | | | | | | | Кол-во заготовок, прошитых на одной оправке, шт |
|-------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| | C | Cr | Ni | Mo | V | W | Co | Mn | Si | Nb | |
| 20X2H4MФА | 0,15 | 1,58 | 3,40 | 0,38 | 0,42 | 0,06 | 0,03 | 0,48 | 0,38 | - | 3 |
| 20XH2MB3KB | 0,23 | 0,49 | 1,47 | 1,20 | 0,04 | 2,80 | 0,96 | 0,51 | 0,50 | 0,19 | 6 |

Микроструктура оправки в исходном состоянии характеризуется наличием крупного аустенитного зерна 1-2 номера в соответствии с ГОСТ

5639, внутри которого располагаются грубые пакеты бейнита (рисунок 5.27а). В оправке из новой марки стали наблюдается микроструктура сорбита отпуска, сформированная при термической обработке, представляющая собой полигонизированную матрицу феррита, в которой равномерно распределены дисперсные карбидные частицы (рисунок 5.27б).

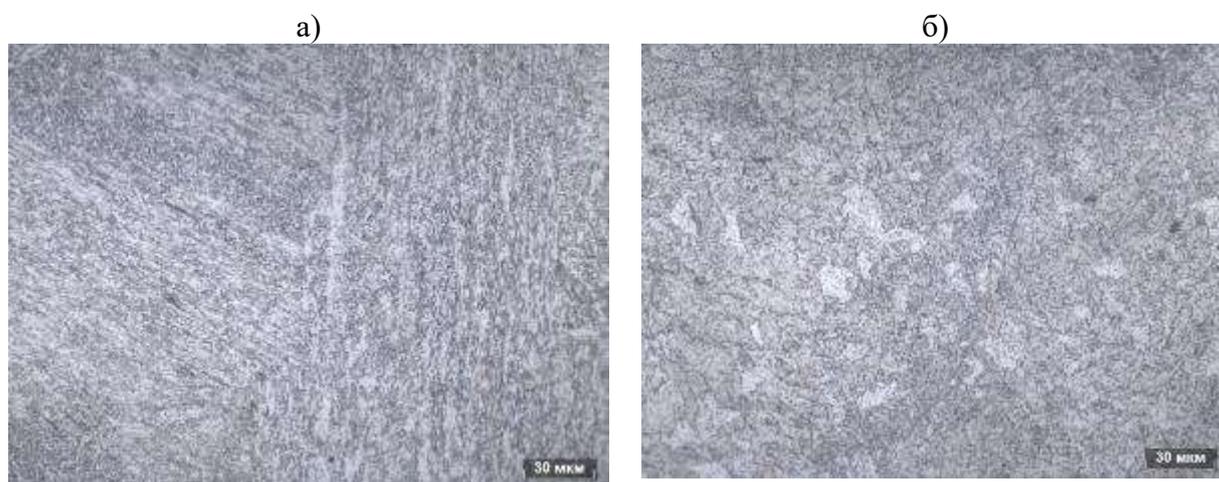


Рисунок 5.27 – Микроструктура оправки из стали марки: а)20Х2Н4МФА; б)20ХН2МВЗКБ

При проведении опытных прокаток использовали оправки прошивного стана диаметрами 247, 253 и 263 мм. Результаты работ подтвердили, что высокое содержание хрома и никеля в оправках из базовой марки стали не оказало положительного влияния на стойкость оправок при прошивке заготовок из стали марок типа 13Cr. Недопустимый износ на рабочей поверхности прошивных оправок наблюдался уже после трех проходов (рисунок 5.28а).

Увеличение содержания молибдена, который повышает характеристики прочности и вязкости стали при высоких температурах и способствует измельчению зерна, вольфрама, который образует в стали карбиды, резко увеличивающие ее твердость и красностойкость, а также препятствует росту зерен при нагреве, и кобальта, который повышает жаропрочность и увеличивает стойкость к ударным нагрузкам, позволило повысить стойкость оправок в 2 раза (рисунок 5.28б), при увеличении их стоимости не более, чем в 1,6 раза.



Рисунок 5.28 – Внешний вид прошивной оправки после трех проходов при прошивке заготовок из стали типа 13Cr: а) 20X2H4MФА; б) 20XH2MB3КБ

Кроме того, помимо изменения химического состава материала для изготовления оправок, было предложено испытать оправки с особой обработкой поверхности рабочего конуса – создание рифления (рисунок 4.29а). Подобный характер обработки поверхности обеспечивает интенсификацию образования и лучшее удержание возобновляемого защитного слоя окалины на рабочей поверхности прошивной оправки, который препятствует износу основного материала технологического инструмента.



Рисунок 5.29 – Внешний вид рабочей поверхности новой оправки: а) с рифлением на рабочей поверхности; б) без рифления

Наличие рифления на поверхности рабочего конуса оправки позволило так же, достичь существенный прирост стойкости (до 60 проходов) без существенного изменения стоимости инструмента (рисунок 5.30).



Рисунок 5.30 – Внешний вид прошивной оправки с рифлением при прошивке заготовок из стали типа 13Cr: а) после 3 проходов; б) после 60 проходов

Третьим решением, позволившим добиться повышения стойкости прошивных оправок при прошивке заготовок из стали типа 13Cr, стало применение бойка зацентровщика специальной конструкции, который обеспечил формирование скругленной кромки на передних торцах заготовок. Реализация данного мероприятия позволила исключить подрез наружной поверхности оправок в процессе вторичного захвата заготовок, таким образом, продлевая жизненный цикл оправок прошивного стана.

Полученные в ходе реализации вышеуказанных мероприятий результаты существенно превышают показатели стойкости, достигнутые при эксплуатации штатных оправок. Повышение износостойкости оправок обеспечено за счет совокупности свойств материала, из которого они изготовлены, их формы и технологии изготовления.

Применение опытных оправок с высокой износостойкостью в совокупности с другими техническими решениями при прокатке заготовок из стали марок типа 13Cr позволило увеличить часовую производительность участка горячего проката ТПА 159-426 АО «ВТЗ» более, чем в 2 раза в сравнении с ранее достигнутой.

Таким образом, реализуемые мероприятия, направленные на повышение стойкости технологического инструмента, позволяют повысить эффективность производственного процесса и, в целом, обеспечивают рост

возможных объемов производства высокотехнологичной продукции специального назначения из нержавеющей марки стали [140, 141].

Глава 6. Исследование процесса раскатки гильз из нержавеющей марки стали в непрерывном стане с контролируемо-перемещаемой оправкой

6.1 Компьютерное моделирование технологического процесса раскатки гильз при производстве бесшовных труб из нержавеющей марки стали

Оценка влияния различных технологических схем получения труб размером 325x12 мм из стали 08X18H10T проводилась с использованием компьютерного моделирования процесса раскатки гильз в программной среде QForm 3D.

Производство труб в ТПЦ-3 АО «ВТЗ» реализуется с использованием раскатного семи клетьевого стана продольной прокатки. При прокатке труб различного сортамента в стане энергосиловые параметры процесса изменяются. При первой опытной прокатке труб размером 325x16 мм из стали 08X18H10T в линии ТПА 159-426 произошло аварийное отключение стана МРМ, что привело к закату оправки. Анализ результатов условий производства опытной прокатки показал, что аварийный останов стана связан с превышением нагрузки на двигатель ретайнера вследствие повышенного охвата оправки металлом раската во 2 клетки стана.

Для последующей в будущем успешной прокатки труб из стали 08X18H10T была разработана компьютерная программа, в которой моделировалась работа первых двух клеток с различными условиями.

На первом этапе были созданы твердотельные модели очага деформации, представленные на рисунке 6.1.



Рисунок 6.1 – Общий вид 3D модели клеток стана МРМ (первая и вторая клеть)

В таблице 6.1 представлены исходные данные для моделирования процесса.

Таблица 6.1 – Параметры процесса раскатки гильз на стане МРМ

| Модель | Размеры гильзы, мм | Частота вращения валков, об/мин | | Температура заготовки, °С | Коэффициент трения заготовка/оправка | Осевая скорость оправки, мм/с |
|----------------------|--------------------|---------------------------------|---------|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| | | 1 клеть | 2 клеть | | | |
| 1 (сталь 20) | 424x36,71 | 395 | 440 | 1150 | 0,1 | 720 |
| 2 (сталь 08X18H10T) | | | | 1150 | | |
| 3 (сталь 08X18H10T) | | | | 1180 | | |
| 4 (сталь 08X18H10T) | | | | 1200 | | |
| 5 (сталь 08X18H10T) | | 375,25 | | 1150 | | |
| 6 (сталь 08X18H10T) | | 355,5 | | | | |
| 7 (сталь 08X18H10T) | | 395 | | | 0,01 | |
| 8 (сталь 08X18H10T) | | | | | 0,08 | |
| 9 (сталь 08X18H10T) | | | | 0,15 | | |
| 10 (сталь 08X18H10T) | | | | 0,22 | | |
| 11 (сталь 08X18H10T) | | 395 | | 0,29 | | |
| 12 (сталь 08X18H10T) | | | | 0,36 | | |

| | | | | | | |
|----------------------|--------|--|--|--|------|--|
| 13 (сталь 08X18H10T) | | | | | 0,43 | |
| 14 (сталь 08X18H10T) | | | | | 0,5 | |
| 15 (сталь 08X18H10T) | 421x32 | | | | 0,1 | |

По результатам моделирования определялись крутящие моменты на валки, усилия на оправку, величина окова оправки.

В результате моделирования на рисунке 6.2 представлено изменение усилия на валки и оправку раскатного стана при прокатке гильз из стали 08X18H10T (модель №2 таблицы 6.1). Для сравнения приведены данные для случая прокатки гильз из стали 20 (модель №1).

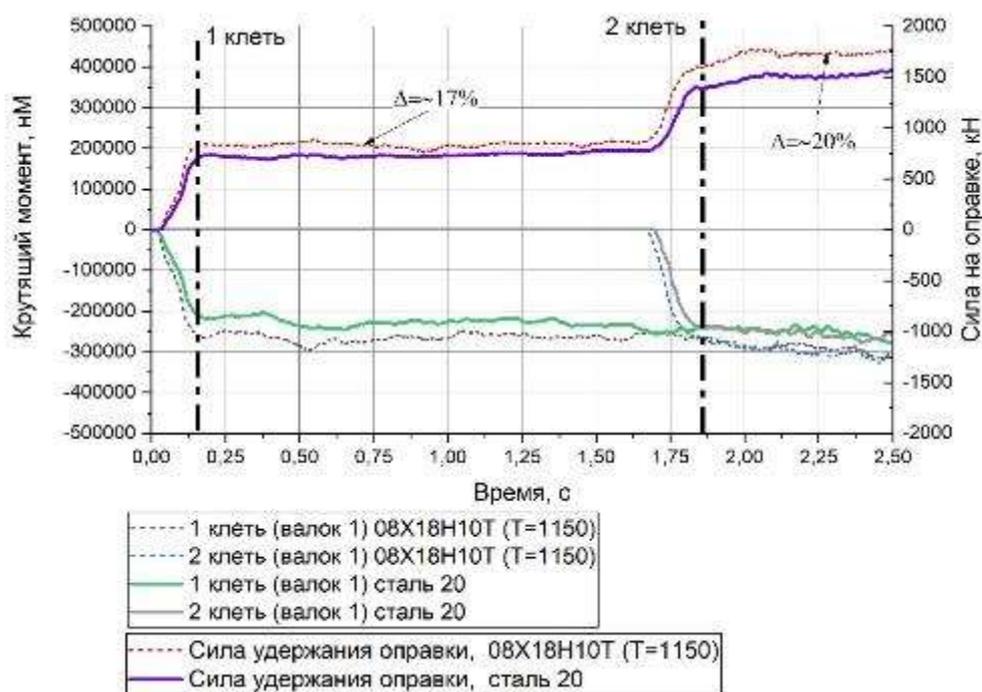


Рисунок 6.2 – Распределение крутящего момента на валках и усилия на оправке при прокатке стали 08X18H10T и стали 20

Из рисунка 6.2 видно, что усилие на оправке больше при прокатке стали марки 08X18H10T. При этом крутящий момент на валках 1 и 2-ой клетки практически не изменился.

На рисунке 6.3 представлено распределение усилия на оправке в зависимости от начальной температуры гильзы из стали 08X18H10T (модели №2-4, таблицы 6.1).

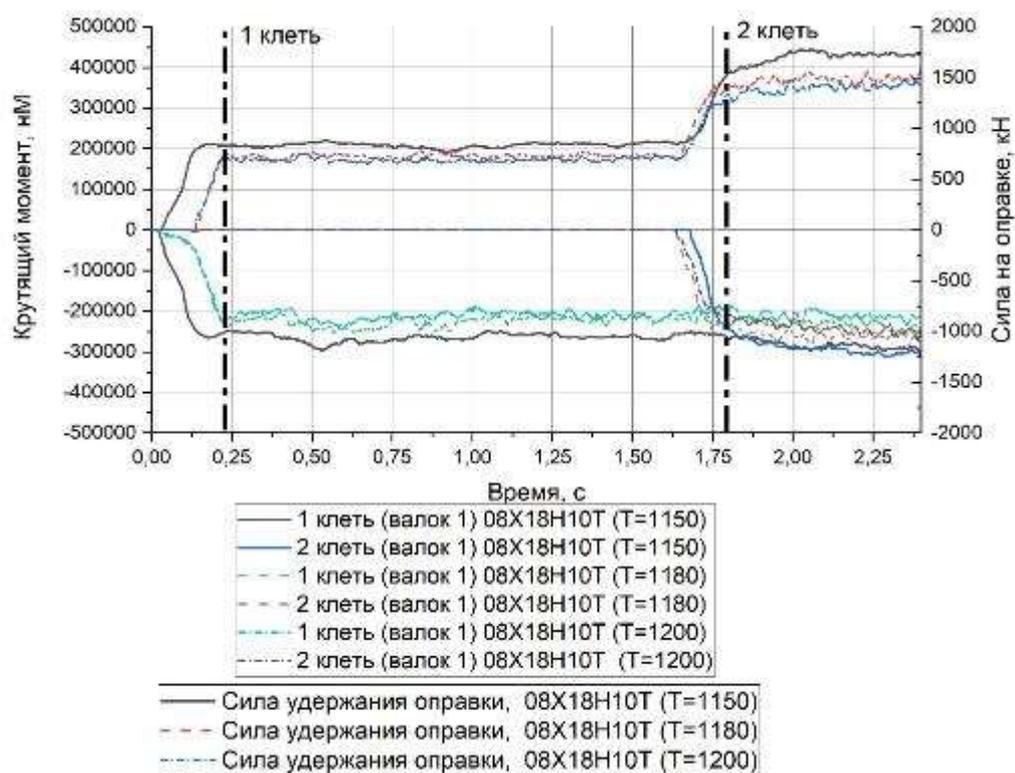


Рисунок 6.3 – Распределение крутящего момента на валках и усилия на оправке при прокатке стали 08X18H10T при различных температурах

Сравнительные результаты представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Обобщенные данные по моделированию раскатки гильз при различной температуре

| Температура гильзы, °C | Среднее усилие на оправке (между 1 и 2 клетью), кН | Среднее усилие на оправке (за 2 клетью), тонн-сила | Крутящий момент в клетях №1 (между 1 и 2 клетью), Н·м | Крутящий момент в клетях №1 (за 2 клетью), Н·м | Крутящий момент в клетях №2 (за 2 клетью), Н·м |
|------------------------|--|--|---|--|--|
| 1150 | 834,8 | 1716,3 | 265431 | 282871 | 290604 |
| 1180 | 728,5 | 1481,2 | 225210 | 229852 | 258487 |
| 1200 | 690,5 | 1402 | 211096 | 211695 | 238810 |

Исходя из представленных результатов (таблица 6.2), с увеличением температуры гильзы крутящий момент на валках и усилие удержания оправки снижается на 17-18%.

На рисунке 6.4 представлено распределение усилия на оправку и крутящего момента валков в зависимости от изменения частоты вращения валков в 1-ой клетке (модели №2, 5, 6 таблицы 6.1).

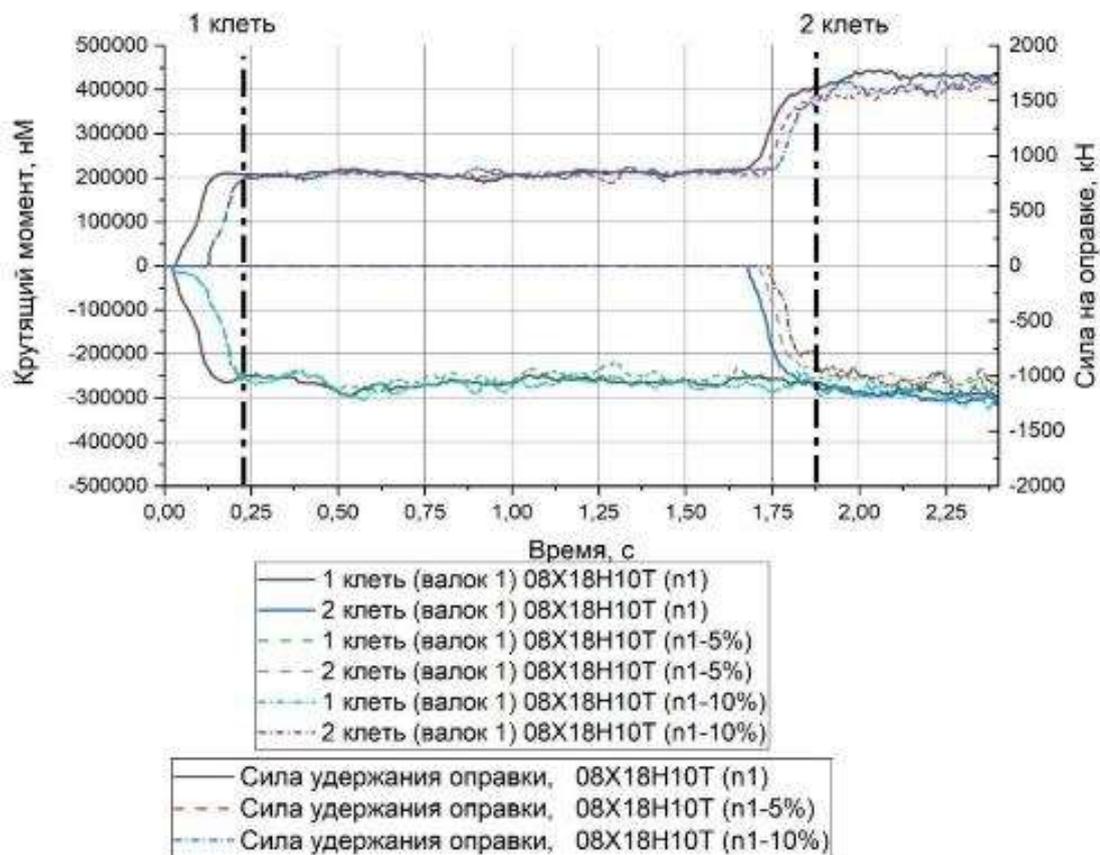


Рисунок 6.4 – Распределение крутящего момента на валках и усилия на оправке при прокатке стали 08X18H10T при различных частотах вращения валков 1-ой клетки

Сравнительные результаты представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Обобщенные данные по моделированию раскатки гильз при различной частоте вращения валков 1-ой клетки

| Частота вращения валков, об/мин | Среднее усилие на оправке (между 1 и 2 клетью), кН | Среднее усилие на оправке (за 2 клетью), кН | Крутящий момент в клетях №1 (за 2 клетью), Н·м | Крутящий момент в клетях №1 (за 2 клетью), Н·м | Крутящий момент в клетях №2 (за 2 клетью), Н·м |
|---------------------------------|--|---|--|--|--|
| 395 (n1) | 834,8 | 1716,3 | 265431 | 282871 | 290604 |
| 375,25 (n1-5%) | 825,6 | 1571,2 | 253549 | 261984 | 251427 |

| | | | | | |
|-------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 355,5 (n1-10%) | 837,3 | 1611,6 | 268925 | 287080 | 257999 |
|-------------------|-------|--------|--------|--------|--------|

Анализируя полученные результаты, представленные на рисунке 6.4 и в таблице 6.3 можно сделать вывод о том, что уменьшение частоты вращения валков практически не влияет на изменение как усилия на оправку, так и крутящего момента на валки.

На рисунке 6.5 представлено распределение крутящего момента на валки и усилие на оправку в зависимости от изменения коэффициента трения.

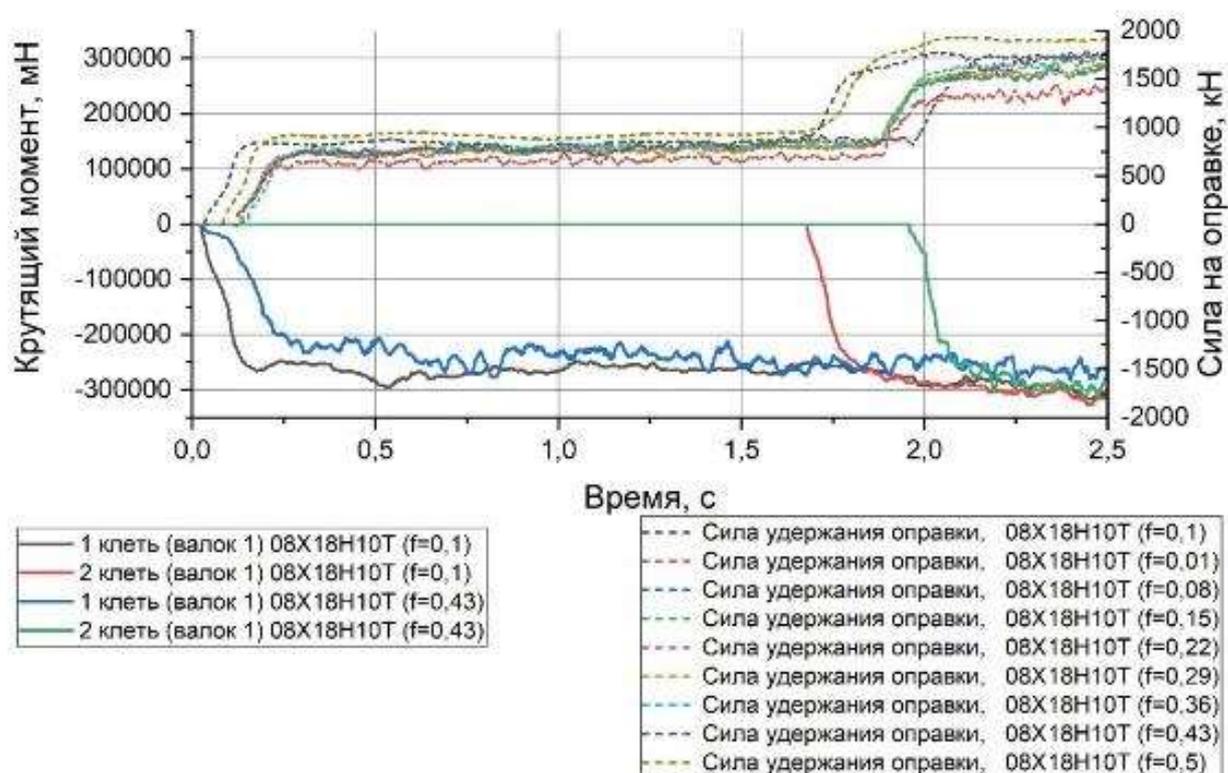


Рисунок 6.5 – Распределение крутящего момента на валках и усилия на оправке при прокатке стали 08X18H10T при различных коэффициентах трения

Установлено, что изменение коэффициента трения в диапазоне от 0,01 до 0,5 практически не оказывает влияние на изменение энергосиловых параметров процесса. В связи с этим на рисунке 6.5 показаны только 2-модели.

Сравнительные результаты представлены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Обобщенные данные по моделированию раскатки гильз при различном коэффициенте трения

| Коэффициент трения на контакте оправка/заготовка | Среднее усилие на оправке (между 1 и 2 клетью), кН | Среднее усилие на оправке (за 2 клетью), кН | Крутящий момент в клетки №1 (между 1 и 2 клетью), Н·м | Крутящий момент в клетки №1 (за 2 клетью), Н·м | Крутящий момент в клетки №2 (за 2 клетью), Н·м |
|--|--|---|---|--|--|
| 0,1 | 834,8 | 1716,3 | 265431 | 282871 | 290604 |
| 0,01 | 656,7 | 1335,7 | 246385 | 262573 | 269751 |
| 0,08 | 758 | 1546,5 | 252442 | 269029 | 276384 |
| 0,15 | 750,3 | 1530,7 | 249999 | 266425 | 273708 |
| 0,22 | 773,3 | 1576,5 | 257082 | 273973 | 281463 |
| 0,29 | 757,6 | 1652,5 | 268836 | 286499 | 294332 |
| 0,36 | 793,9 | 1685,1 | 273877 | 291872 | 299851 |
| 0,43 | 779,3 | 1676,6 | 237628 | 262378 | 289047 |
| 0,5 | 919,4 | 1904,1 | 307743 | 327963 | 336929 |

Из представленных зависимостей, следует, что коэффициент трения в диапазоне от 0,08 до 0,5 практически не оказывает влияния на изменения в энергосиловых параметрах. Реализация значений коэффициента трения в диапазоне от 0,01 до 0,08 затруднительна, так как необходимо учитывать взаимное взаимодействие расплава окислы с дезоксидирующим материалом, водно-графитной смазки и горячим материалом. Также необходимо учитывать, что от поставщика дезоксидирующего материала и графитной смазки меняется и коэффициент трения.

На рисунке 6.6 представлено распределение крутящего момента на валки и усилия, действующего на оправку при прокатке по действующей технологии и с измененной геометрией гильз.

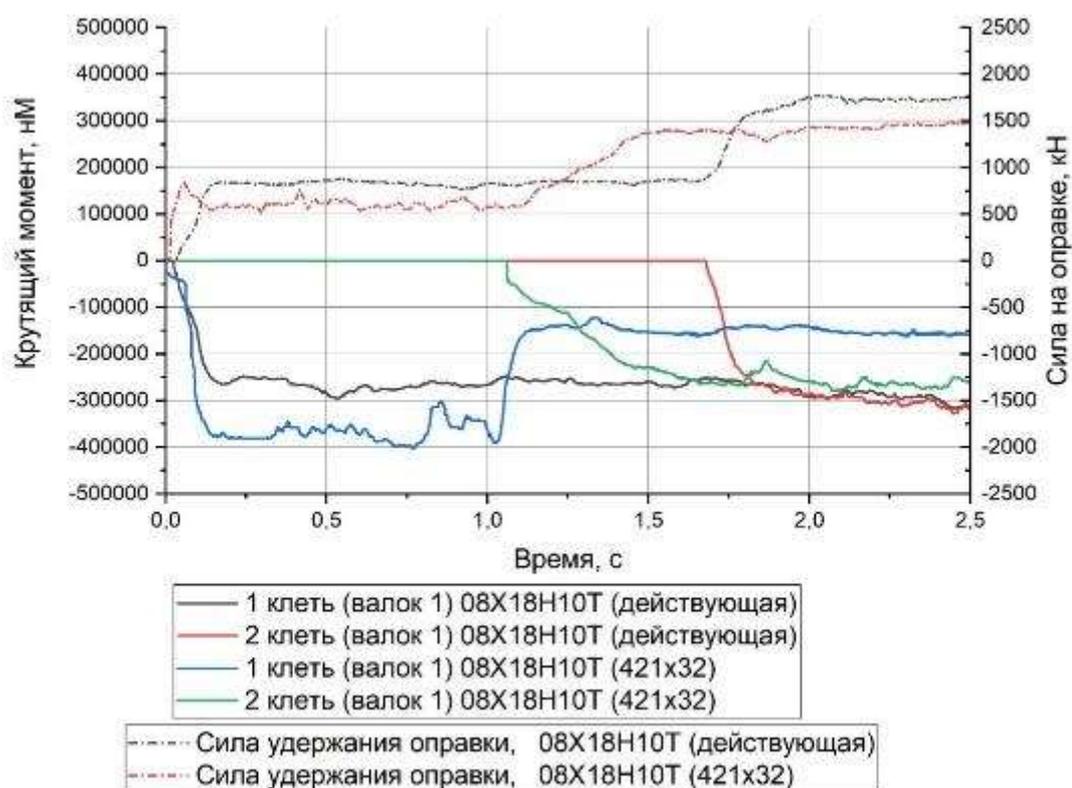


Рисунок 6.6 – Распределение крутящего момента на валках и усилия на оправке при прокатке стали 08X18H10T при различных размерах заготовки

Сравнительные результаты представлены в таблице 6.5.

Таблица 6.5 – Обобщенные данные по моделированию раскатки гильз при различной геометрии гильз

| Технология | Среднее усилие на оправке (между 1 и 2 клетью), кН | Среднее усилие на оправке (за 2 клетью), кН | Крутящий момент в клетке №1 (между 1 и 2 клетью), Н·м | Крутящий момент в клетке №1 (за 2 клетью), Н·м | Крутящий момент в клетке №2 (за 2 клетью), Н·м |
|-------------|--|---|---|--|--|
| действующая | 834,8 | 1716,3 | 265431 | 282871 | 290604 |
| 421x32 | 600,9 | 1442,4 | 366540 | 152747 | 264777 |

Исходя из представленных данных, можно сделать вывод о том, что с изменением размеров гильзы усилие прокатки снижается на 16%, при этом крутящий момент снижается на 46% (при нахождении раската одновременно в 1 и 2-ой клетях).

Также для моделей был вычислен полный угол охвата, представленный на рисунке 6.7. При этом стоит отметить, что здесь показаны лишь те результаты, для которых было установлено снижение нагрузки на оправку стана МРМ.

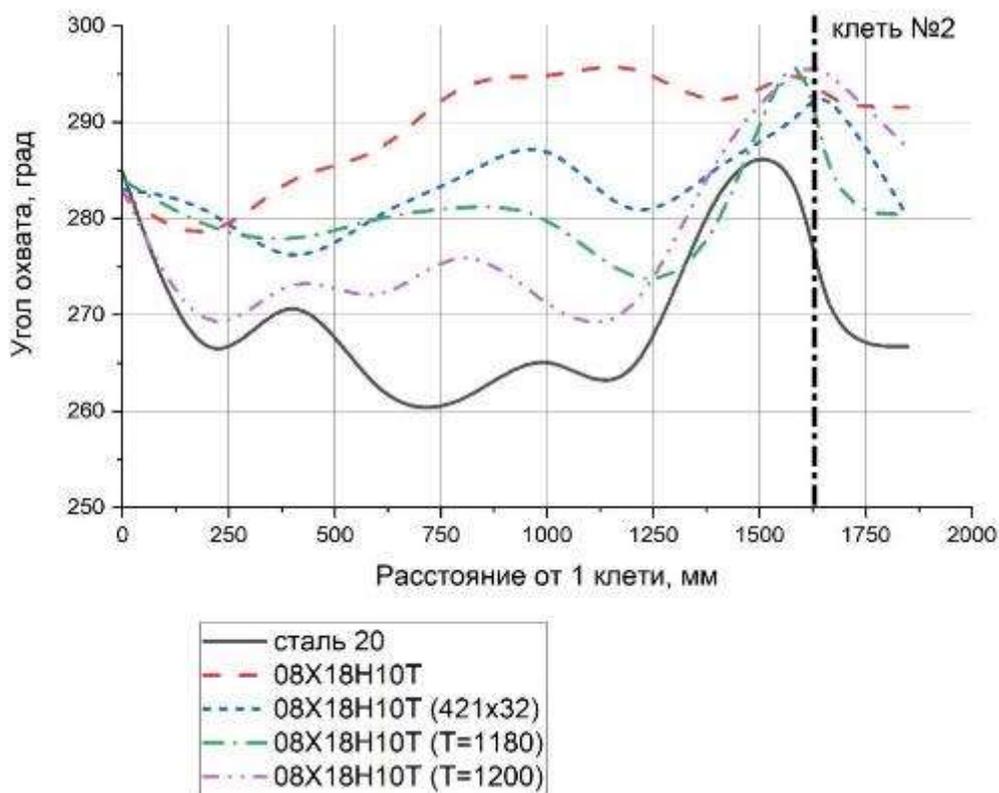


Рисунок 6.7 – Распределение величины охвата трубой оправки

Из представленного рисунка следует, что при прокатке заготовки из стали 08X18H10T наблюдается повышенный охват оправки металлом раската. При увеличении температуры раската величина охвата снижается. Также величина охвата снижается при уменьшении размера гильз.

По результатам моделирования процесса раскатки в 2-х клетях стана МРМ установлено следующее:

- 1) усилие на оправку при прокатке стали 08X18H10T больше на 20% по сравнению с усилием при прокатке стали 20;
- 2) при увеличении начальной температуры гильзы с 1150 до 1200°C наблюдается снижение нагрузки на оправку на 17-18%;

3) при изменении частоты вращения валков 1-ой клетки нагрузка на оправку практически не изменяется;

4) при изменении коэффициента трения существенного изменения в энергосиловых параметрах не было выявлено;

5) уменьшение размера гильз (до 421x32 мм) позволяет снизить усилие на оправку до 16%, а крутящий момент первой клетки на 46%;

6) наименьший суммарный угол охвата оправки наблюдается у стали марки 20. Наибольший угол охвата наблюдается при прокатке стали марки 08X18H10T (действующая технология). При увеличении температуры подката наблюдается зависимость снижения угла охвата. При уменьшении размера гильзы (до 421x32 мм), также наблюдается снижение величины суммарного охвата оправки;

7) при одинаковом диаметре оправки стана МРМ и при использовании штатной калибровки валков МРМ в клетях 1 и 2 охват оправки металлом раската изменяется в межклетевых промежутках;

8) уменьшению угла охвата оправки непосредственно в очаге деформации может способствовать изменение диаметра оправки стана МРМ и уменьшение угла обжимной зоны калибров в клетях стана МРМ.

Исходя из проведенного моделирования следует вывод, что для обеспечения стабильной прокатки труб из стали 08X18H10T диаметром 325x12 мм на стане МРМ необходимо использовать гильзу с уменьшенной толщиной стенки (например, размер гильзы 421x32мм).

6.2 Лабораторное моделирование раскатки гильз из нержавеющей стали в непрерывном стане с контролируемо-перемещаемой оправкой

Лабораторное моделирование процесса продольной прокатки производилось с использованием лабораторного прокатного стана АО

«РосНИТИ» в два этапа - на плавающей, а затем на контролируемо-перемещаемой оправке.

Экспериментальное исследование процесса раскатки патрубков из нержавеющей марки стали аустенитного класса осуществлено в лаборатории продольной прокатки труб с использованием лабораторного прокатного стана и нагревательной печи. Лабораторный прокатный стан имеет в своем составе две клетки, каждая из которых оснащена своим приводом. Общий вид стана представлен на рисунке 6.8.



Рисунок 6.8 – общий вид лабораторного прокатного стана АО «РусНИТИ»

Для моделирования процесса раскатки гильзы в непрерывном раскатном стане ТПА 159-426 использован вариант сборки клетки с двухвалковым калибром.

Главная линия стана с двухвалковой клетью показана на рисунке 6.9. Привод валков осуществляется от электродвигателя 1 через ременную передачу 2 к раздаточной (шестеренной) клетке 3. Затем вращательное движение через шпиндели 4 передается к рабочей клетке 5. Для регулировки вертикального положения валков, 2-валковая клетка имеет нажимное устройство с ручным приводом.



Рисунок 6.9 – Главная линия клетки с 2-валковым калибром

Техническая характеристика лабораторного стана представлена в таблице 6.6.

Таблица 6.6 - Техническая характеристика лабораторного прокатного стана с двухвалковым вариантом сборки

| № п.п. | Элементы и параметры установки | Единица измерения | Величина, обозначение |
|--------|---|-------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Двигатель | | |
| | тип | | 4A160 M4Y3/M100 |
| | мощность | кВт | 18,5 |
| | частота вращения вала | об/мин | 1500 |
| | напряжение питания | В | 380 |
| 2 | Редуктор | | |
| | первый блок | – | 1Ц2У-200 – 40 – 11У1 |
| 3 | Передаточное отношение клиноременной передачи | – | 1,5 |
| 4 | Максимальный наружный диаметр заготовки | мм | 40 |
| 5 | Минимальный наружный диаметр трубы | мм | 10 |
| 6 | Условный диаметр | | |
| | горизонтальных валков | мм | 245÷260 |
| 7 | Длина бочки | | |
| | горизонтальных валков | мм | 60÷420 |
| 8 | Величина радиальной регулировки | | |
| | горизонтальных валков | мм | 45 |
| 9 | Величина осевой регулировки нижнего горизонтального валка | мм | ±0,5 |
| 10 | Величина перемещения валка за один оборот штурвала нажимного устройства | мм | ±2,5 |
| 11 | Максимальный крутящий момент на валке | кНм | ±2,5 |
| 12 | Максимальное усилие | | |

| | | | |
|----|-----------------------|-----|----------------|
| | горизонтальных валков | кН | 300 |
| 13 | Скорость прокатки | м/с | 0÷0,34 |
| 14 | Габариты блока | мм | 2342×1111×1705 |
| 15 | Масса клетки | кг | 1127 |
| 16 | Масса блока | кг | 2210 |

Для определения геометрических параметров поперечного сечения образцов делались специальные шлифы, которые сканировались, импортировались в программу «Компас» и замерялись с помощью средств этой программы.

Усилие прокатки замерялось с помощью месдоз, установленных между подушкой верхнего валка и нажимным винтом (рисунок 6.10).



Рисунок 6.10 - Месдоза SM-T010

Раскатка на плавающей оправке.

Для обеспечения процесса были взяты материалы: оправки $\varnothing 28,7$ мм, $\varnothing 30,1$ мм и $\varnothing 31,5$ мм, патрубки $\varnothing 37 \times 2,5$ мм из марки стали 08X18H10T в количестве 20 штук, смазка оправок и дезоксидант. Материал оправок, состав смазки и дезоксиданта применяется при производстве труб на АО «ВТЗ».

Оправки подогревались в специальной печи до температуры 150°C , патрубки нагревались до температуры прокатки 1150°C , 1200°C и 1250°C .

После подогрева оправки извлекались из печи, производилась их смазка. Одновременно с этим, извлекались нагретые патрубки, производилось нанесение порошка дезоксиданта на внутреннюю поверхность патрубка при

помощи медицинской спринцовки. После чего осуществлялся процесс прокатки в 1 и 2 прохода. Перед вторым проходом осуществлялась кантовка образца на 90°, задавалось реверсивное вращение валков, и осуществлялся процесс прокатки.

Перед вторым проходом оправки и патрубки повторно не подогревались, предварительно установленный межвалковый зазор не изменялся, прокатка осуществлялась непосредственно после кантовки образца с целью обеспечения минимального уровня падения температуры. Процесс горячей оправочной прокатки труб в условиях лабораторного стана АО «РосНИТИ» был осуществлен впервые.

Поперечные сечения патрубков представлены на рисунке 6.11.

Режимы деформации, геометрические характеристики патрубков, зафиксированные в результате прокатки, приведены в таблице 6.7.

Степень тонкостенности патрубка перед прокаткой составляла 14,8, выбранная овальность калибра 1,065-1,09 (таблица 6.7) соответствовала овальности калибров (1,03-1,11) в клетях СК 360 мм стана МРМ при прокатке труб $\varnothing 323,9 \times 12,7$ мм из марки стали 08Х18Н10Т. Выбранный температурный диапазон 1150-1250°C соответствует температуре раскатки гильз в непрерывном стане.

Таблица 6.7 – Исходные данные и результаты проведения эксперимента

| Диаметр оправки, мм | | 28,7 | | 31,5 | | 30,1 | | | | | |
|-----------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Овальность калибра | | 1,09 | | 1,024 | | 1,065 | | | | | |
| Температура испытания, °С | | 1200 | | | | | | 1250 | | 1150 | |
| Проход | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Толщина стенки, мм | в вершине | 2,04 | 2,15 | 2,3 | 2,34 | 2,1 | 2,18 | 2,11 | 2,18 | 1,78 | 2,29 |
| | в обжимной зоне | 2,22 | 2,23 | 2,05 | 1,94 | 2,01 | 1,96 | 1,97 | 2,13 | 1,63 | 1,99 |
| | в выпуске | 3,67 | 2,53 | 2,6 | 2,33 | 2,8 | 2,35 | 2,69 | 2,3 | 2,48 | 2,26 |
| Разнотолщинность стенки | мм | 1,63 | 0,38 | 0,55 | 0,4 | 0,79 | 0,39 | 0,72 | 0,17 | 0,85 | 0,3 |
| | % | 79,9 | 17,7 | 27,1 | 20,6 | 40,7 | 19,89 | 36,7 | 8,2 | 51,61 | 15,4 |
| Изменение толщины стенки, % | в вершине | 18,0 | 41,6 | 8,0 | 10,0 | 15,2 | 24,5 | 16,8 | 20,6 | 29,2 | 8,0 |
| | в выпуске | 46,8 | 23,2 | 4,0 | 1,1 | 15,2 | 10,9 | 9,6 | 10,6 | -0,4 | 29,1 |
| Диаметр образца, мм | в вершине | 32,8 | 33,0 | 36,1 | 36,2 | 34,3 | 34,5 | 34,3 | 34,5 | 33,7 | 34,7 |
| | в выпуске | 43,6 | 39,5 | 41,1 | 37,8 | 42,0 | 38,8 | 42,1 | 38,6 | 42,0 | 38,5 |
| Уширение диаметра в выпуске | мм | 6,6 | 6,76 | 4,11 | 1,7 | 4,99 | 4,45 | 5,1 | 4,26 | 5,03 | 4,84 |
| | % | 17,8 | 20,6 | 11,1 | 4,7 | 13,5 | 13,0 | 13,8 | 12,4 | 13,6 | 14,4 |
| Овальность | — | 1,33 | 1,20 | 1,14 | 1,04 | 1,22 | 1,12 | 1,23 | 1,12 | 1,25 | 1,11 |
| Угол охвата оправки | град | 283,6 | 267,5 | 288,9 | 293,4 | 291,6 | 273,5 | 293,9 | 270,9 | 304,4 | 279,7 |

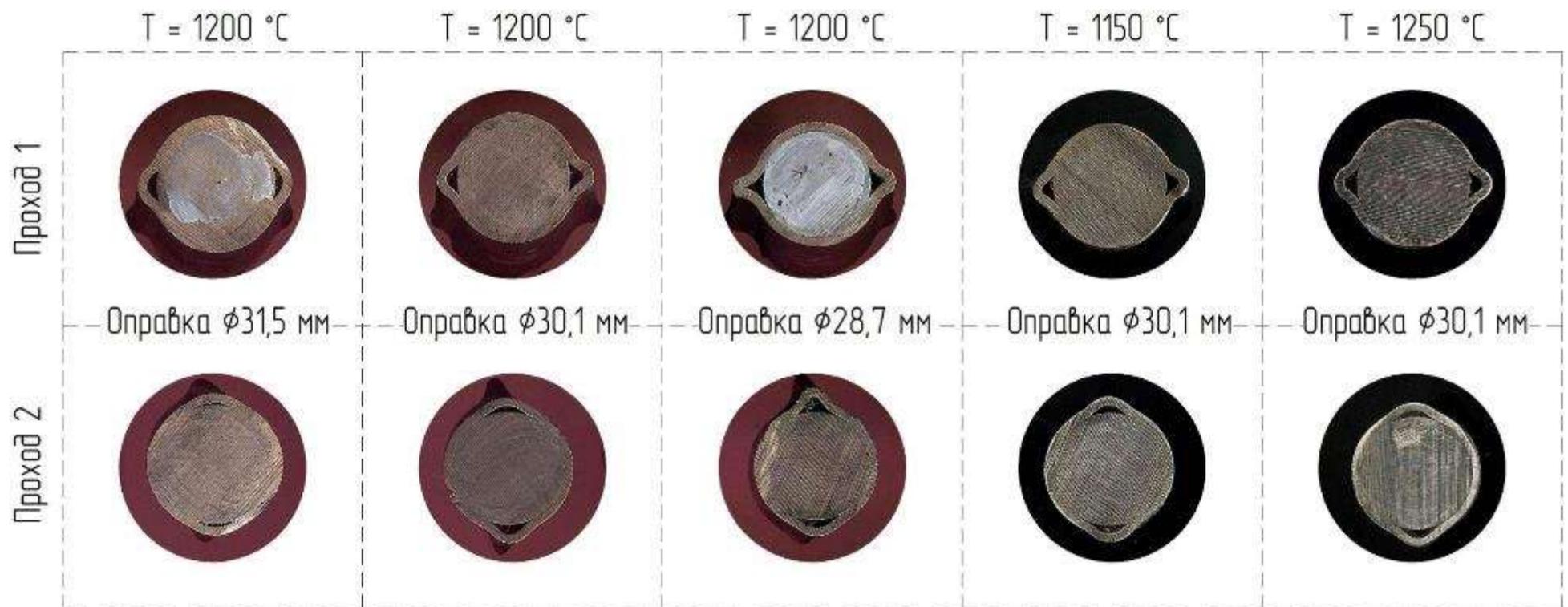


Рисунок 6.11 – Внешний вид поперечных сечений патрубков

Из таблицы 6.7 и рисунка 6.11 отметим:

1. Наибольшая поперечная разнотолщинность стенки 79,9% зафиксирована при прокатке с использованием минимального диаметра оправки $\varnothing 28,7$ мм в 1 проходе.

2. Процесс прокатки 08X18H10T характеризовался утолщением стенки в выпусках калибра в диапазоне от -0,4% до 46,8%. Наибольшее утолщение и максимальный уровень разнотолщинности зафиксирован в 1 проходе на оправке $\varnothing 28,7$ мм.

3. Наименьший уровень разнотолщинности стенки 8,2% зафиксирован при использовании оправки среднего диаметра $\varnothing 30,1$ мм при номинальном положении валков.

Минимальная толщина стенки 1,94 мм (таблица 6.7) в поперечном сечении раската при разведении валков (при использовании оправки максимального диаметра $\varnothing 31,5$ мм) соответствовала концу обжимной зоны калибра. Максимальное обжатие толщины стенки в данных местах калибра приводило к возникновению дефектов в виде рисок на внутренней поверхности раската (рисунок 6.12а).



а - риска



б - закат

Рисунок 6.12 – Дефекты на поверхности патрубков после 2 прохода

При прокатке с использованием оправки $\varnothing 28,7$ мм в 1 проходе зафиксированы наибольшее утолщение стенки в выпуске 46,8%, а также наибольшее уширение 17,8% наружного диаметра. Такой характер формирования металла в выпуске калибра в 1 проходе (рисунок 1) привел к

возникновению дефекта вида закат при дальнейшей прокатке в вершине калибра при 2 проходе (рисунок 6.12б).

Таким образом, уменьшение диаметра оправки может приводить к увеличению разнотолщинности стенки раската из-за сведения валков и появлению дефектов вида закат из-за особенностей формирования толщины стенки и наружного диаметра при прокатке 08X18H10T. При увеличении диаметра оправки и разведении валков минимальная толщина стенки формируется в конце обжимной зоны калибров, что может приводить к возникновению дефектов в виде рисок на внутренней поверхности раската.

По данным АО «ВТЗ» при прокатке труб $\varnothing 323,9 \times 12,7$ мм из стали марки 08X18H10T относительная разнотолщинность стенки за 7 клетью стана МРМ составила 4,1%. Следовательно, применяемая оправка $\varnothing 337,5$ мм способствует получению черновых труб (до ИКС) с высокой точностью по толщине стенки. Дефектов вида закат и риск на внутренней поверхности раската не было зафиксировано. Применяемый диаметр оправки $\varnothing 337,5$ мм является рациональным с точки зрения получения качественных геометрических характеристик труб.

Влияние температуры прокатки на угол охвата оправки металлом 1 и 2 проходе (по данным таблицы 6.7) показано на рисунке 6.13 для патрубков, прокатанных на оправке одного диаметра $\varnothing 30,1$ мм.

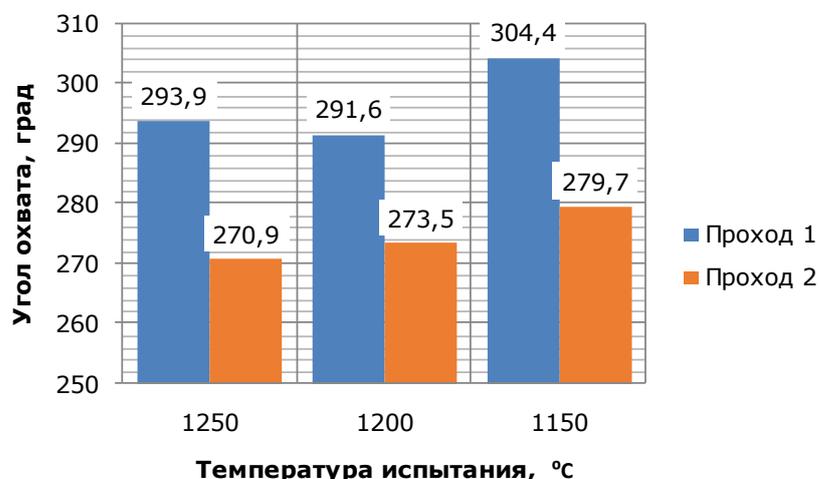


Рисунок 6.13 – Влияние температуры прокатки на угол охвата (диаметр оправки $\varnothing 30,1$ мм)

Из рисунка 6.13 видно:

1. Наибольший угол охвата зафиксирован при температуре испытаний 1150°C.
2. При температурах 1200 °С и 1250 °С угол охвата практически не изменяется.
3. Уменьшению угла охвата способствует прокатка в температурном диапазоне от 1200°C и выше.

Наличие специальных месдоз, установленных под нажимные винты клетки лабораторного стана, позволило зафиксировать усилие на клеть, возникающее при прокатке (рисунок 6.14).



Рисунок 6.14 – Влияние температуры прокатки на величину усилия на клеть (диаметр оправки $\varnothing 30,1$ мм)

Из рисунка 6.14 следует:

1. Наименьшее усилие на клеть при прокатке в 1 и 2 проходе соответствует температуре испытаний 1200°C.
2. Повышение или понижение температуры на 50 °C приводит к росту усилия на ~7,4-8,8 %.

Таким образом, по результатам исследований (рисунок 6.13 и 6.14), с точки зрения снижения угла охвата оправки металлом и энергосиловых

параметров процесса, рациональная температура прокатки марки стали 08X18H10T соответствует значению 1200 °С.

Влияние овальности калибра на угол охвата оправки металлом 1 и 2 проходе (по данным таблицы 6.7) показано на рисунке 6.15 для патрубков, прокатанных при температуре 1200 °С.

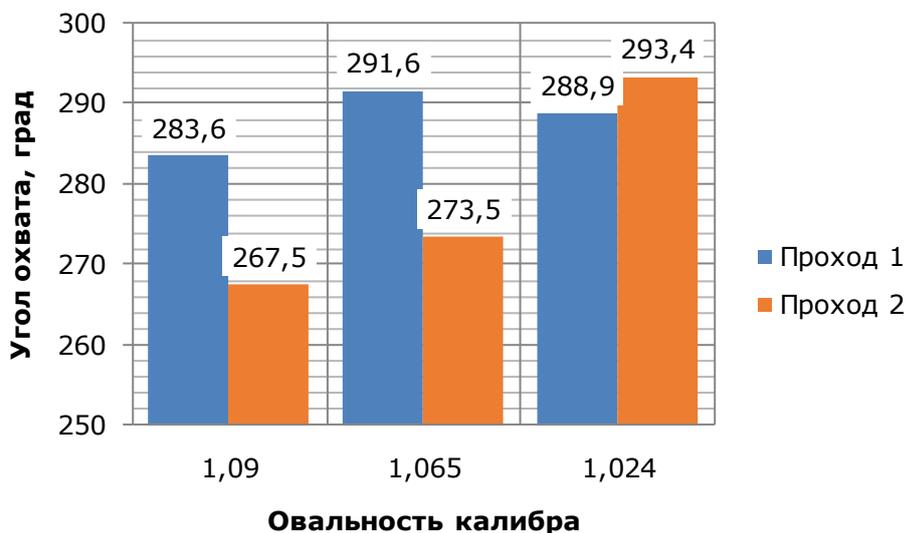


Рисунок 6.15 – Влияние овальности калибра на угол охват (температура испытания 1200°С)

Для рациональной температуры прокатки 1200 °С из рисунка 6.15 отметим:

1. Наименьший угол охвата в 1 и 2 проходе соответствует режиму прокатки с применением калибровки с наибольшей 1,09 овальностью.
2. При уменьшении овальности калибра угол охвата увеличивается на $\sim 8^\circ$ в первом проходе и на $\sim 25,9^\circ$ во втором.
3. Наибольшее влияние на изменение угла охвата оправки металлом овальность калибра оказывает во 2 проходе.

Влияние овальности калибра на усилие в клети показано на рисунке 6.16:

1. Наибольшее влияние на изменение усилия овальность калибра оказывает во 2 проходе.

2. При увеличении овальности во 2 проходе величина усилия на клеть уменьшается на ~23,7%.

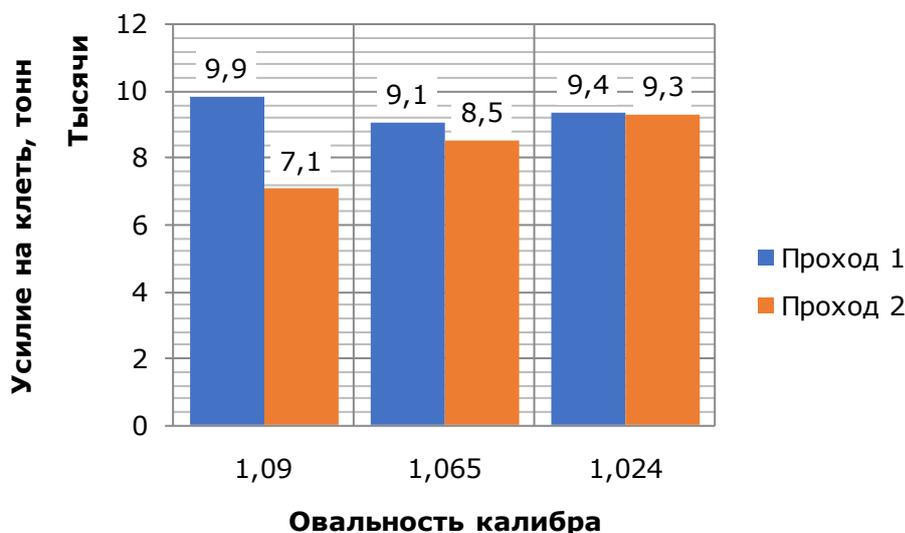


Рисунок 6.16 – Влияние овальности на величину усилия на клеть (температура испытания 1200°C)

Ранее было отмечено, что оправка стана МРМ $\varnothing 337,5$ мм является рациональной с точки зрения получения качественных геометрических характеристик труб. При этом изменение диаметра оправки, сведение или разведение валков может приводить к увеличению разнотолщинности стенки и появлению дефектов на поверхности труб.

Кроме того, при прокатке труб $\varnothing 323,9 \times 12,7$ мм из стали марки 08X18H10T повышенный охват был зафиксирован во 2 клетки стана МРМ.

Следовательно, снизить вероятность появления охвата оправки можно увеличив овальность калибра в наиболее нагруженных черновых клетях (2 и 3 клетки) стана МРМ за счет увеличения ширины калибра. В экспериментальных условиях показано, что наибольшее влияние на изменение угла охвата и усилия на клеть овальность калибра оказывает во 2 проходе. При этом в последующих клетях стана МРМ должно быть реализовано постепенное уменьшение овальности.

Необходимо отметить, с другой стороны, для калибровки валков в СК 360 мм стана МРМ характерно увеличенное значение угла обжимной зоны 55°

(для $\frac{1}{4}$ части очага деформации) калибра, что позволяет формировать толщину стенки на большем угле. Однако формирование точности толщины стенки происходит в чистовых клетях стана МРМ. Для формирования толщины стенки достаточно угла обжимной зоны в диапазоне значений 45-48° в зависимости от клетки стана МРМ. По данным [142] уменьшение угла охвата оправки возможно при уменьшении угла обжимной зоны калибра.

Там же [142] показано, что уменьшение угла охвата оправки возможно за счет уменьшения степени деформации, что может быть достигнуто за счёт уменьшения толщины стенки и наружного диаметра гильзы. Исследования [142] проведены для технологии прокатки труб в стане МРМ.

Кроме того, в ходе опытно-промышленной прокатки труб с использованием системы калибров стана МРМ 368мм, был реализован процесс прокатки труб $\varnothing 325 \times 8$ мм в стане МРМ. В клетях с 2 по 7 стана угол обжимной зоны калибров был уменьшен до величин 44,23-47,59°. При этом в клетях с 3 по 7 был реализовано плавное снижение величины овальности калибров (таблица 6.8).

Таблица 6.8 – Параметры калибровки валков при опытно-промышленной прокатке труб в системе калибров 368 мм

| Клеть | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Угол обжимной зоны, град | Штатная калибровка СК 372 мм | 44,23 | 44,16 | 44,45 | 44,26 | 47,27 | 47,59 |
| Овальность | | 1,09 | 1,08 | 1,07 | 1,045 | 1,044 | 1,04 |

По результатам опытно-промышленной прокатки в СК 368 мм стана МРМ было зафиксировано снижение токовых нагрузок на двигатели клетей 3-7 стана на 8,21-36,01%. Величина усилия удержания оправки была уменьшена в сравнении со штатной технологией на 12,14%.

Таким образом, перспективным направлением для обеспечения прокатки труб из стали 08X18H10T, являются работы по уменьшению угла

обжимной зоны калибров, увеличению овальности калибров в черновой группе клетей, реализация плавного снижения овальностей по клетям стана МРМ.

По результатам лабораторного моделирования раскатки на плавающей оправке сделаны следующие выводы:

1. Проведено лабораторное моделирование процесса раскатки патрубков $\varnothing 37 \times 2,5$ мм из марки стали 08X18H10T с использованием лабораторного стана АО «РосНИТИ». Режимы прокатки соответствовали технологии раскатки гильз в стане МРМ.

2. Прокатка патрубков из стали 08X18H10T сопровождалась интенсивным утолщением стенки в зоне выпуска калибров в пределах от -0,4% до 46,8 %.

3. Определена рациональная температура прокатки труб из стали 08X18H10T - 1200°C. При соблюдении данной температуры обеспечивается минимальный уровень нагрузок на прокатную клеть и снижение угла охвата оправки металлом.

4. Оправка стана МРМ $\varnothing 337,5$ мм является рациональной с точки зрения получения качественных геометрических характеристик труб $\varnothing 323,9 \times 12,7$ мм из стали марки 08X18H10T.

5. С уменьшением и увеличением диаметра оправки (сведением/разведением валков относительно оправки) увеличивается поперечная разнотолщинность стенки (таблица 1), и появляется риск возникновения дефектов поверхности (рисунок 2).

6. С учетом пунктов 4 и 5 уменьшение угла охвата оправки металлом раската возможно за счет увеличения овальности калибров за счёт увеличения их ширины. При уменьшении овальности калибра угол охвата увеличивается на $\sim 8^\circ$ в первом проходе и на $\sim 25,9^\circ$ во втором. Наименьшие показатели усилия на клеть и угла охвата оправки во 2 проходе зафиксированы при максимальной овальности калибра 1,09.

7. С учетом полученных экспериментальных данных и сведений [142] перспективными для обеспечения прокатки труб из марки стали 08X18H10T в линии ТПА 159-426 со станом МРМ являются следующие мероприятия:

- уменьшение наружного диаметра и толщины стенки гильзы с целью снижения уровня частных деформаций по клетям МРМ;
- соблюдение рациональной температуры прокатки $T \geq 1200^{\circ}\text{C}$;
- уменьшение угла обжимной зоны калибров 45-48° в зависимости от клетки стана МРМ;
- работы в направлении увеличения овальности клетей черновой группы (2 и 3 клетки) стана МРМ и реализации плавного снижения овальности по клетям МРМ.

Раскатка на контролируемо-перемещаемой оправке.

Основным методом исследования является лабораторное моделирование процесса продольной прокатки труб на контролируемо-перемещаемой оправке. В процессе лабораторного моделирования производятся прямые измерения следующих величин: общей длины образцов после прокатки, длины прокатанной части образцов (в случае получения недокатов), усилия прокатки.

С целью измерения толщины стенки образцов и их наружного диаметра из центральной части прокатанного на оправке образца вырезается фрагмент в поперечном направлении, представляющий собой патрубок на оправке. Торец вырезанного фрагмента сканируется и импортируется в графический редактор. После этого с помощью методов компьютерной графики определяются наружный диаметр, толщина стенки образца и угол охвата оправки внутренней поверхностью образца.

График изменения усилия прокатки выводится на экран компьютера, которым оснащен лабораторный прокатный стан. При этом подводя маркер к

различным точкам графика изменения усилия прокатки, можно высветить на дисплее численное значение соответствующего ему усилия прокатки.

Для оценки особенностей продольной прокатки полых образцов из нержавеющей марки стали аустенитного класса при тех же самых условиях осуществлялась прокатка образцов из углеродистой стали марки 20.

Процесс прокатки на лабораторном прокатном стане представляет собой процесс деформации металла между двумя вращающимися валками, осуществляемый за счет сил трения, возникающих на контакте между валками и образцом. Валки с нарезанными на их бочке ручьями обжимают образец по диаметру. Для уменьшения толщины стенки образца в его внутреннюю полость вводится оправка. При этом оправка имеет два возможных режима движения – свободное перемещение под действием сил трения, возникающих на поверхности ее контакта с внутренней поверхностью образца и отсутствие перемещения оправки. С целью удержания оправки от перемещения для лабораторного прокатного стана изготовлена специальная оснастка, представляющая собой плиту, устанавливаемую с входной стороны и имеющую отверстие диаметром, позволяющим пропускать через него оправку (рисунок 6.17). При этом сами оправки, предназначенные для опытов с отсутствием перемещения, имеют задний утолщенный конец, который не проходит в отверстие на плите и таким образом тормозит оправку.



Рисунок 6.17 – Оснастка для удержания оправки

Условия и ход экспериментальных исследований соответствовали разработанной и утвержденной программе.

Проведение экспериментального исследования начиналось с прокатки образцов без оправки с целью установления возможности прокатки для условий, оговоренных программой эксперимента. В результате было обнаружено, что захват образцов из нержавеющей марки стали диаметром 38 мм не происходит во всех испытанных калибрах с овальностью от 1,18 до 1,3. При этом существовала возможность обеспечения захвата за счет разведения валков, однако при этом нарушалась сопоставимость полученных результатов. Захват таких же образцов из стали 20 при указанных условиях оказался достаточно стабильным. Очевидно, это связано с пониженным значением коэффициента трения из-за свойств окалины, образовавшейся на поверхности образца при нагреве. В связи с этим дальнейшие исследования с использованием образцов из стали марки 08X18H10T диаметром 38 мм не проводились и исследования выполнялись с использованием образцов из

стали 08X18H10T диаметром 34 мм, для которых условия захвата обеспечивались.

Фактические условия проведения эксперимента и их особенности представлены в таблице 6.9. В таблице 2 применены следующие обозначения: D_{on} – диаметр оправки; D_0 – исходный наружный диаметр образца; L_l – длина прокатанного образца. Длина образца замерялась только при получении недокатов, полученных в результате прекращения процесса прокатки из-за плотного охвата оправки внутренней поверхности образца в процессе его прокатки. Для этих случаев замерялась как полная длина образца, так и длина прокатанной части. Полученные предварительные результаты представлены в таблице 6.10.

Таблица 6.9 – Порядок и условия прокатки образцов

| № п.п. | Марка стали | Наличие смазки и дезоксиданта | D_{on} , мм | D_0 , мм | L_l , мм | Длина деформ. части, мм | Условия перемещения оправки | Комментарий |
|--------|-------------|-------------------------------|---------------|------------|------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------|
| 1 | 08X18H10T | нет | 21 | 34 | | | | Нет захвата |
| 2 | 08X18H10T | нет | 21 | 34 | 285,5 | 225 | неподвижная | |
| 3 | 08X18H10T | нет | 21 | 34 | 280 | 156 | неподвижная | |
| 4 | 12X18H10T | нет | 21 | 34 | 285 | 207 | неподвижная | |
| 5 | 12X18H10T | нет | 21 | 34 | | | | Свернуло шпиндель |
| 6 | 12X18H10T | нет | 21 | 34 | | - | плавающая | |
| 7 | 12X18H10T | нет | 21 | 34 | | - | плавающая | |
| 8 | 12X18H10T | нет | 21 | 34 | | - | плавающая | |
| 9 | 12X18H10T | нет | 21 | 34 | | - | плавающая | |
| 10 | 20 | нет | 21 | 34 | | - | плавающая | |
| 11 | 20 | нет | 21 | 38 | | - | плавающая | |

| | | | | | | | | |
|----|---------------|------|----|----|-----|-----|-------------|--|
| 12 | 12X18H1 0T | нет | 21 | 34 | | - | плавающая | |
| 13 | 20 | нет | 21 | 34 | 280 | 210 | неподвижная | |
| 14 | 12X18H1 0T | есть | 21 | 34 | | - | плавающая | |
| 15 | 12X18H1 0T | есть | 21 | 34 | | - | плавающая | |
| 16 | 12X18H1 0T | есть | 21 | 34 | | - | плавающая | |
| 17 | 12X18H1 0T | есть | 21 | 34 | | - | плавающая | |
| 18 | 12X18H1 0T | есть | 21 | 34 | | - | плавающая | |
| 19 | 20 | есть | 21 | 34 | | - | плавающая | |
| 20 | 12X18H1 0T | есть | 21 | 34 | | - | неподвижная | |
| 21 | 12X18H1 0T | есть | 21 | 34 | | - | неподвижная | |
| 22 | 12X18H1 0T | есть | 21 | 34 | | - | неподвижная | |
| 23 | 20 | есть | 21 | 34 | | - | неподвижная | |
| 24 | 12X18H1 0T | есть | 21 | 34 | | - | неподвижная | |
| 25 | 12X18H1 0T | есть | 21 | 34 | | - | неподвижная | |

Таблица 6.10 – Фотографии прокатанных образцов

| Условия проведения эксперимента | Вид прокатанного образца |
|--|--|
| Сталь 08X18H10T, обжатие по толщине стенки 0,11, неподвижная оправка, смазочно-дезоксирующие материалы отсутствуют, недокат, отношение длины продеформированной части образца к общей длине 0,56 |  |
| Сталь 08X18H10T, обжатие по толщине стенки 0,1, плавающая оправка, смазочно-дезоксирующие материалы отсутствуют |  |
| Сталь 20, обжатие по толщине стенки 0,1, плавающая оправка, смазочно-дезоксирующие материалы отсутствуют |  |
| Сталь 20, обжатие по толщине стенки 0,1, неподвижная оправка, смазочно-дезоксирующие материалы отсутствуют, недокат, отношение длины продеформированной части образца к общей длине 0,75 |  |
| Сталь 08X18H10T, обжатие по толщине стенки 0,1, плавающая оправка, с подачей дезоксиданта и нанесением графитовой смазки |  |

После прокатки все образцы плотно охватывали оправку, поэтому ее извлечение без искажения размеров образцов после прокатки является достаточно трудоемким. В соответствии с этим для осуществления необходимых замеров от образцов, посаженных на оправку, отрезались темплеты, которые позволяли сделать все необходимые замеры, характеризующие форму поперечного сечения образцов и позволяющие определить угол охвата оправки.

Результаты непосредственных замеров, выполненных с помощью цифрового штангенциркуля представлены в таблице 6.11. Нумерация образцов соответствует нумерации в таблице 6.9.

Таблица 6.11 – Параметры формоизменения металла (h_l – размер образца по вершине калибра; b_l – размер образца по разьему калибра; λ – коэффициент вытяжки; β – коэффициент уширения; φ_{ox} – одна четверть суммарного угла охвата оправки)

| Номер образца | Условия проведения эксперимента | h_l , мм | λ | b_l , мм | β | φ_{ox} , ° |
|---------------|---|------------|-----------|----------------|----------------|--------------------|
| 2 | Сталь 08X18H10T, неподвижная оправка, смазочно-дезоксирующие материалы отсутствуют | 30,0 | 1,11 | 35,7 | 1,05 | 36 |
| 9 | Сталь 08X18H10T, плавающая оправка, смазочно-дезоксирующие материалы отсутствуют | 29,91 | 1,14 | 35,22 | 1,04 | 37 |
| 11 | Сталь 20, плавающая оправка, смазочно-дезоксирующие материалы отсутствуют | 30,6 | 1,19 | 43,3 (36,0) | 1,27 (1,06) | 18 |
| 13 | Сталь 20, неподвижная оправка, смазочно-дезоксирующие материалы отсутствуют | 29,46 | 1,21 | 35,03 | 1,03 | 31 |
| 15 | Сталь 08X18H10T, плавающая оправка, с подачей дезоксиданта и нанесением графитовой смазки | 29,91 | 1,12 | 35,97 | 1,06 | 41 |
| 19 | Сталь 20, плавающая оправка, с подачей дезоксиданта и нанесением графитовой смазки | 29,66 | 1,18 | 35,7 | 1,05 | 39 |
| 20 | Сталь 08X18H10T, неподвижная оправка, с подачей дезоксиданта и нанесением графитовой смазки | 29,91 | 1,12 | 35,71 | 1,05 | 37 |

| | | | | | | |
|----|---|-------|------|-------|------|----|
| 23 | Сталь 20, неподвижная оправка с подачей дезоксиданта и нанесением графитовой смазки | 29,54 | 1,16 | 35,51 | 1,04 | 37 |
|----|---|-------|------|-------|------|----|

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. При отсутствии смазочных и дезоксидирующих материалов (при повышенном трении на контакте с оправкой) уширение при прокатке нержавеющей марки стали несколько выше.

2. При прокатке нержавеющей марки стали на плавающей оправке применение смазочно-дезоксирующих материалов (уменьшение сил трения на контакте с оправкой) способствует увеличению уширения.

3. При прокатке нержавеющей марки стали на неподвижной оправке наличие или отсутствие смазочно-дезоксирующих материалов практически не оказывает влияние на величину уширения.

4. При прокатке нержавеющей марки стали угол охвата трубой оправки несколько больше, чем при прокатке углеродистой марки стали, особенно при отсутствии смазочно-дезоксирующих материалов.

5. При прокатке нержавеющей марки стали угол охвата трубой оправки больше при использовании плавающей оправки, и он увеличивается при уменьшении сил трения на поверхности контакта трубы с оправкой.

Полученные результаты несколько противоречат данным, полученным при прокатке круглых сортовых профилей. Это связано с тем, что при прокатке полых изделий (труб) у металла появляется дополнительная степень свободы, а именно возможность свободного течения на внутренней поверхности в зоне редуцирования. Поэтому при формировании формы поперечного сечения трубы действуют следующие факторы:

1. Сопротивление продольному течению металла в результате действия подпирющих сил трения на контактной поверхности с валками в зоне опережения. Это сопротивление тем выше, чем больше длина очага деформации его ширины. Наличие сопротивления продольному течению

способствует поперечному течению металла в сторону разъема калибров и оправки.

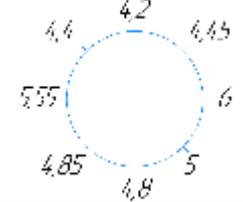
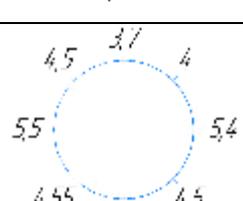
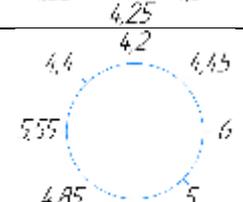
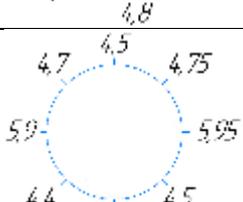
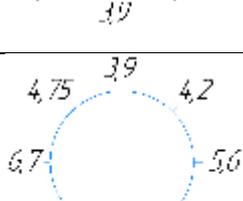
2. Сопротивление продольному течению металла со стороны оправки, которое приводит к такому же эффекту, как и по пункту 1. При этом сопротивление течению больше при использовании контролируемо-перемещаемой оправки, что будет способствовать развитию уширения и охвату оправки. Влияние сопротивления продольному течению со стороны оправки, а значит и уширение, снижается при применении смазочно-дезоксирующих материалов.

3. Течению металла в направлении внутренней поверхности, а значит и увеличению угла охвата, способствуют силы трения, действующие на контактной поверхности с валками в тангенциальном направлении. Поскольку коэффициент контактного трения при прокатке нержавеющей марок стали выше, вероятность переполнения калибра становится меньше, но, при прочих равных условиях угол охвата оправки будет больше.

4. Наличие смазочно-дезоксирующих материалов на контактной поверхности трубы и оправки облегчает течение металла на этой поверхности и способствует увеличению угла охвата оправки.

Для оценки влияния условий прокатки на формирование толщины стенки образца, вырезанные темплеты были отсканированы и импортированы в программу «Компас». Замеры, выполненные с помощью этого графического редактора представлены в таблице 6.12.

Таблица 6.12 – Результаты замеров толщины стенки образцов

| Номер образца | Результаты замеров толщины стенки, мм | Среднее значение толщины стенки, мм | Среднеквадратичное отклонение, мм | Допустимый интервал, мм |
|---------------|---|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2 |  | 5,02 | 0,75 | ±1,73 (±34%) |
| 9 |  | 4,91 | 0,55 | ±1,27 (±26%) |
| 11 |  | 5,11 | 1,93 | ±4,44 (±87%) |
| 13 |  | 4,55 | 0,63 | ±1,45 (±32%) |
| 15 |  | 4,94 | 0,98 | ±2,25 (±46%) |
| 19 |  | 4,83 | 0,73 | ±1,68 (±35%) |
| 20 |  | 4,98 | 0,86 | ±1,98 (±40%) |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|---|------|------|-----------------|
| 23 | | 4,78 | 0,66 | ±1,52 (±32%) |

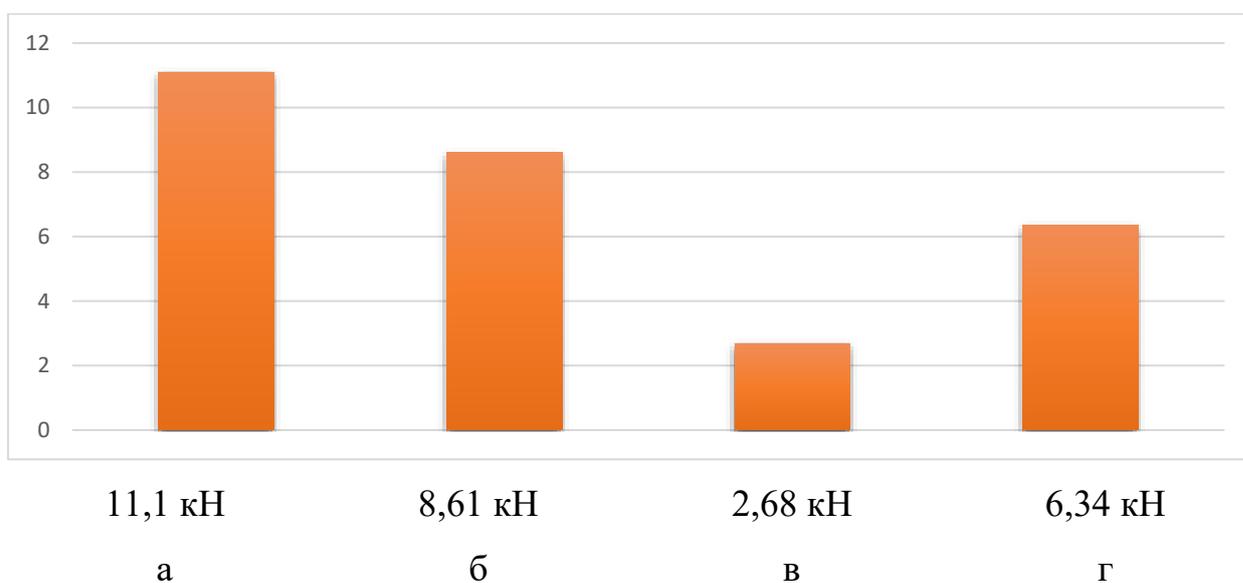
Анализ данных таблицы 6.12 показывает, что в среднем точность по толщине стенки образцов из стали марки 08X18H10T выше, чем у образцов из стали марки 20 (36,5% против 46,5%). Разнотолщинность образцов, прокатанных без применения смазочных и дезоксидирующих материалов выше, чем при прокатке образцов с дезоксидантом на внутренней поверхности и на оправке, покрытой графитовой смазкой. Это можно объяснить большей неравномерностью контактных условий при использовании смазочно-дезоксирующих материалов. При использовании смазочно-дезоксирующих материалов большая точность по толщине стенки наблюдается при прокатке на неподвижной оправке. Это очевидно связано с большей стабильностью кинематики процесса.

Как было отмечено выше, усилие прокатки измерялось с помощью месдоз, установленных между подушками валков и нажимными винтами. Формируемый при этом сигнал передавался в компьютер и визуализировался на экране монитора. Выводимая цифровая информация позволяла определять усилия, действующие на каждый нажимной винт по отдельности и полное усилие, действующее на валки. При этом на записываемой диаграмме четко выделялось три ступени. Первая ступень соответствовала захвату образца и заполнению очага деформации, вторая ступень соответствовала раскатке образца на оправке, третья ступень соответствовала освобождению очага деформации.

При анализе влияния условий прокатки образцов на энергосиловые параметры прежде всего была сделана оценка точности получаемых результатов. Поскольку в большинстве случаев каждый опыт повторялся 5 раз, имеется возможность выполнить статистическую обработку результатов. В

итоге было получено, что погрешность в вычислении среднего значения усилия прокатки на первой ступени составляет 23%, на второй ступени – 16% и на третьей ступени – 9%. Таким образом можно отметить, что точность определения усилия прокатки на второй и третьей ступенях удовлетворительная.

Сравнение полученных средних значений усилия прокатки представлено на рисунке 6.18.



а – плавающая оправка, отсутствие смазочно-дезоксирующих продуктов, б - плавающая оправка, наличие смазочно-дезоксирующих продуктов, в - неподвижная оправка, отсутствие смазочно-дезоксирующих продуктов, г - неподвижная оправка, наличие смазочно-дезоксирующих продуктов

Рисунок 6.18 – Влияние кинематики оправки и условий контактного трения на средние значения усилия прокатки

Как видно из рисунка 6.18, максимальное усилие прокатки наблюдается при раскатке образца на плавающей оправке без нанесенной на нее смазки и без предварительного распыления на внутреннюю поверхность образца дезоксирующего порошка (рисунок 6.18а). Вполне закономерным и соответствующим известным зависимостям [75] является факт снижения усилия прокатки при нанесении смазочных материалов на поверхность

оправки и вдувании на внутреннюю поверхность образца дезоксидирующего порошка (рисунок 6.18б). Интересным является факт резкого снижения усилия прокатки при торможении оправки (рисунок 6.18в). Это может быть объяснено эффектом «прокатки-волочения» [143], который был обнаружен при листовой прокатке. Суть эффекта заключается в том, что при создании в очаге деформации схемы напряженного состояния с противонаправленным действием сил трения на противоположных контактных поверхностях, во-первых, устраняется эффект подпирающих сил трения и, во-вторых, сдвигающие напряжения во всем очаге деформации создают благоприятные условия для скольжения дислокаций. Нанесение графитовой смазки на оправку и вдувание дезоксидирующего порошка на внутреннюю поверхность образца способствуют снижению сил трения и тем самым уменьшают сдвиговые напряжения в очаге деформации. Соответственно, эффект снижения усилия прокатки становится меньше (рисунок 6.18г). Полученные результаты позволяют рекомендовать для снижения усилия прокатки в клетях непрерывного раскатного стана уменьшать скорость перемещения оправки. Однако следует отметить, что при этом возрастут крутящие моменты на валках.

Сравнение значений усилия прокатки при раскатке образцов из стали марок 20 и 12Х18Н10Т показало, что при прокатке нержавеющей марки стали усилие прокатки выше. Например, при раскатке образцов на неподвижной оправке усилие прокатки в случае стали марки 20 составило 6,5 кН, а в случае стали марки 08Х18Н10Т – 9,2 кН. Этим подтверждается более интенсивный характер упрочнения при деформировании нержавеющей марки стали.

На основе выполненных исследований можно сделать предложение, что при раскатке гильз из нержавеющей марки стали контролируемо-перемещаемую оправку следует перемещать с меньшей скоростью.

Проведенное экспериментальное исследование подтвердило возможность продольной раскатки гильз из нержавеющей стали аустенитного класса. При этом было выявлено следующее:

1. Двойственность действия сил трения, проявляющаяся в том, что коэффициент трения окалины на нержавеющей марке стали ниже, чем на углеродистых, что затрудняет условия захвата. Однако в процессе деформации слой окалины разрушается, что приводит к увеличению коэффициента трения на контакте с валками и оправкой.

2. Закономерности контактного трения способствуют тому, что при прочих равных условиях вероятность переполнения калибра при прокатке нержавеющей марки стали ниже, чем при прокатке углеродистых марок стали. Однако угол охвата оправки при этом в случае прокатки нержавеющей марки стали выше. Поэтому важность применения качественных дезоксидирующих и смазочных материалов, а также других способов снижения коэффициента трения (например, хромирования оправок) при прокатке нержавеющей марки стали повышается.

3. Уменьшение скорости перемещения оправки способствует снижению усилия, действующего на валки.

6.3 Математическое моделирование раскатки гильз из нержавеющей марки стали в непрерывных станах с контролируемо-перемещаемой оправкой (геометрические, кинематические и энергосиловые параметры)

Важнейшим технологическим параметром процесса непрерывной прокатки является скоростной режим прокатного стана. В первую очередь это связано с тем, что от него зависит уровень продольных усилий, возникающих в раскатываемой гильзе в промежутке между клетями стана. В случае превышения растягивающими продольными усилиями допустимой величины на теле трубы появляются сквозные разрывы (рисунок 6.19а) и труба естественно бракуется. Если продольные сжимающие усилия превышают допустимые значения, раскатываемая гильза теряет устойчивость (рисунок 6.19б), что может привести к созданию аварийной ситуации.



а



б

Рисунок 6.19 – Виды дефектов, вызванных превышением продольных усилий допустимых значений

С другой стороны, в настоящее время отсутствует физическая возможность непосредственного замера продольных усилий, возникающих в деформированном металле между клетями при непрерывной раскатке гильзы. Об их величине можно судить только косвенно по диаграммам записи усилия прокатки. Такой способ замера позволяет определить только растягивающие или сжимающие усилия возникают между клетями, но не позволяет оценить их величину.

Поэтому для корректной настройки скоростного режима непрерывного раскатного стана необходимо иметь аналитические зависимости, связывающие скорости вращения валков с энергосиловыми параметрами процесса прокатки. Использовать для этих целей компьютерное моделирование, основанное на методе конечных элементов не всегда возможно в первую очередь из-за больших временных затрат необходимых для одновременного расчета всех клетей стана во взаимосвязи друг с другом.

В настоящее время известен ряд подходов для расчета усилий между клетями. Часть из них основана на вычислении так называемого коэффициента кинематического натяжения [1, 10, 144]. Следует отметить, что эта методика противоречит сама себе. Так, в начале декларируется (вполне справедливо) условие постоянства секундных объемов, т.е. объем металла, проходящего через поперечное сечение любого очага деформации в единицу времени величина постоянная. А затем предлагается вычислять коэффициент

кинематического натяжения как отношение секундных объемов в соседних клетях стана. Но из первого условия следует, что это отношение всегда должно быть равно единице. И действительно, согласно данным работы [10] значения коэффициента кинематического натяжения, определенные опытным путем, имеют порядок 1,0 – 1,04. Выполненный анализ скоростного режима непрерывного раскатного стана МРМ ТПА 159-426 показал, что отклонение отношения секундных объемов от единицы связан только с ошибками округления.

В работе [75] представлена более корректная с физической точки зрения методика определения продольных усилий, действующих в плоскостях входа и выхода из очага деформации. Методика основана на энергетических принципах. Уравнения баланса мощности записываются для каждой клетки отдельно, причем продольные усилия на границах очага деформации задаются относительно произвольно. Затем истинные значения продольных усилий ищутся итерационными методами. Недостаток этой методики связан прежде всего с большими временными затратами, которые необходимы для выполнения итерационной процедуры. Кроме того, в этом случае путем последовательного перебора делается попытка нахождения связи большого числа параметров, имеющих сложный характер взаимодействия друг с другом. В результате, поскольку процесс перебора параметров имеет формальный характер, даже при больших временных затратах решение задачи не гарантировано.

Более корректный подход предложен в работе [145]. Он основан на гипотезе о том, что ввиду незначительной деформации в последней клетке непрерывного раскатного стана, которая является по существу проглаживающей, скорость выхода металла из этой клетки равна средней по контуру калибра окружной скорости валков. Эта гипотеза позволяет определить величину секундного объема, который является константой непрерывной прокатки и имеет одну и ту же величину для любой клетки стана. Далее, зная величину секундного объема и заднее продольное усилие для

первой клетки (оно равно нулю) на основе уравнения баланса мощности определяется переднее продольное усилие, которое является задним для второй клетки. Далее расчет производится последовательно для остальных клеток непрерывного стана вплоть до последней. Достоверность выдвинутой гипотезы была проверена путем сравнения результатов расчета с фактическими значениями усилия прокатки по клетям стана FQM Северского трубного завода [146]. Сравнение показало достаточно хорошую сходимость расчетных и фактических значений усилия прокатки, особенно в последних клетях стана, что позволяет сделать вывод о допустимости предложенной гипотезы. В то же время, несмотря на достаточно хорошую сходимость разработанной математической модели, расчетные значения усилия прокатки всегда были ниже фактических.

На основе изложенного можно определить следующие задачи для дальнейших исследований:

1. Определить причину получения заниженных результатов расчета энергосиловых параметров с использованием разработанной математической модели.
2. Уточнить математическую модель процесса непрерывной раскатки гильз, сделав ее более универсальной, т.е. применимой для расчета как 2-, так и для 3-валковых калибров.

Описание геометрических параметров очага деформации

Корректное математическое описание закономерностей, определяющих границы очага деформации, имеет первостепенную роль при построении математических моделей процессов обработки металлов давлением. С одной стороны, геометрические граничные условия определяют схему течения металла при пластической деформации. С другой стороны, они определяют форму и размеры контактных поверхностей деформируемого металла и инструмента и, тем самым, позволяют рассчитать контактные взаимодействия.

В настоящее время достаточно хорошо проработаны вопросы описания геометрических характеристик очага деформации при прокатке труб в 2-валковых калибрах [77]. Вопросы, связанные с определением геометрических параметров очага деформации при прокатке сплошных профилей в многовалковых калибрах рассмотрены в работе [147]. При этом получены зависимости для описания геометрических параметров при прокатке в калибрах различной формы. Часть из них может быть использована для описания процесса продольной прокатки труб в 3-валковых калибрах (рисунок 6.20). Это, в частности, уравнения линий, ограничивающих задаваемое в калибр поперечное сечение профиля, уравнение линии, ограничивающей поперечное сечение калибра в плоскости выхода металла из валков. Однако для определения площадей поперечных сечений полого профиля они не подходят.

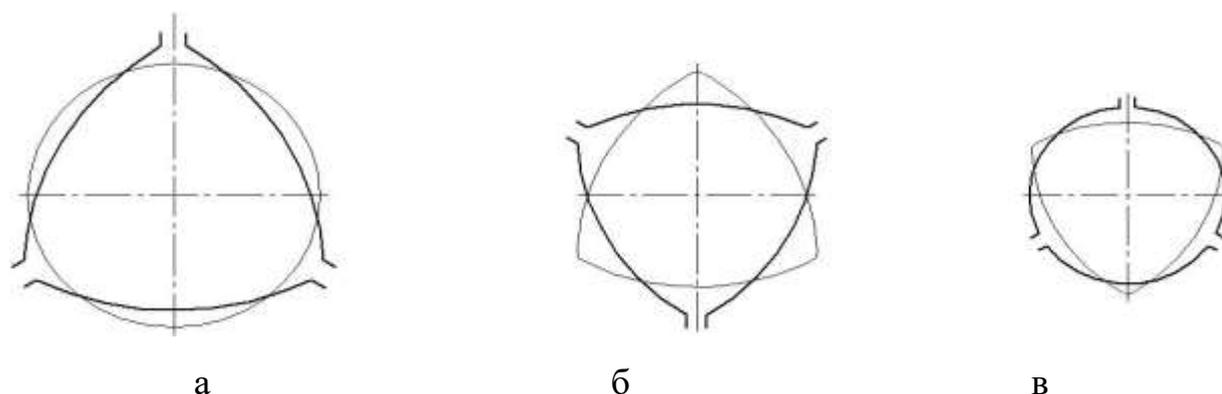


Рисунок 6.20 – Схемы обжатий в 3-валковых калибрах, применяемые при продольной прокатке

В работе [77] сделана попытка описания геометрической формы очага деформации при прокатке труб в 3-валковом калибре. Однако она сводится в основном к определению параметров фрезы для нарезки калибра и не имеет законченного характера. В работах [77, 148] рассмотрены вопросы редуцирования труб в клетях с 3-валковыми калибрами. Однако при описании геометрических параметров внимание обращено только на описание размеров и формы калибров.

Современные процессы непрерывной прокатки труб осуществляются преимущественно в клетях с 2- и 3-валковыми калибрами, поэтому необходимо иметь комплексное описание соответствующих геометрических соотношений очага деформации. Особое значение при этом имеет определение площади поверхностей, описывающих границы очага деформации.

Для определения площади поверхности очага деформации прежде всего необходимо описать форму заготовки.

1. Описание формы заготовки

Наружный контур заготовки перед первой клетью раскатного стана с достаточной для практических расчетов точностью может быть описан уравнением окружности, а схема деформации в первом проходе будет соответствовать рисунку 6.20а. То есть уравнение наружного контура заготовки (гильзы) может быть записано в виде $\tilde{y}^2 + \tilde{z}^2 = R_r^2$, где R_r – радиус гильзы.

Для определения наружного контура поперечного сечения заготовки для последующих проходов общий вид наружного контура поперечного сечения деформируемого профиля на входе в очаг деформации представлен на рисунке 6.21. При этом можно заметить, что схема применительно к системе 2-валковых калибров (рисунок 6.21а) отличается от схемы для системы 3-валковых калибров (рисунок 6.21б) тем, что в первом случае угол выпуска $\varphi_{\text{вып}}$ откладывается от горизонтальной оси симметрии, а во втором случае он откладывается от оси разъема калибров, наклоненной к горизонтальной оси симметрии под углом $\pi/6$. Поэтому предлагается для унификации геометрического описания очага деформации ввести угол φ_0 , характеризующий положение угла выпуска относительно горизонтальной оси симметрии. В этом случае для 2-валкового калибра $\varphi_0 = 0$, для 3-валкового калибра $\varphi_0 = \pi/6$. Такой подход в принципе позволяет исследовать и другие возможные, но в настоящее время не применяемые схемы калибровок, отличающиеся углом φ_0 .

Описание наружного контура заготовки выполним в системе координат $\tilde{z}O\tilde{y}$, связанной с осями симметрии поперечного сечения заготовки.

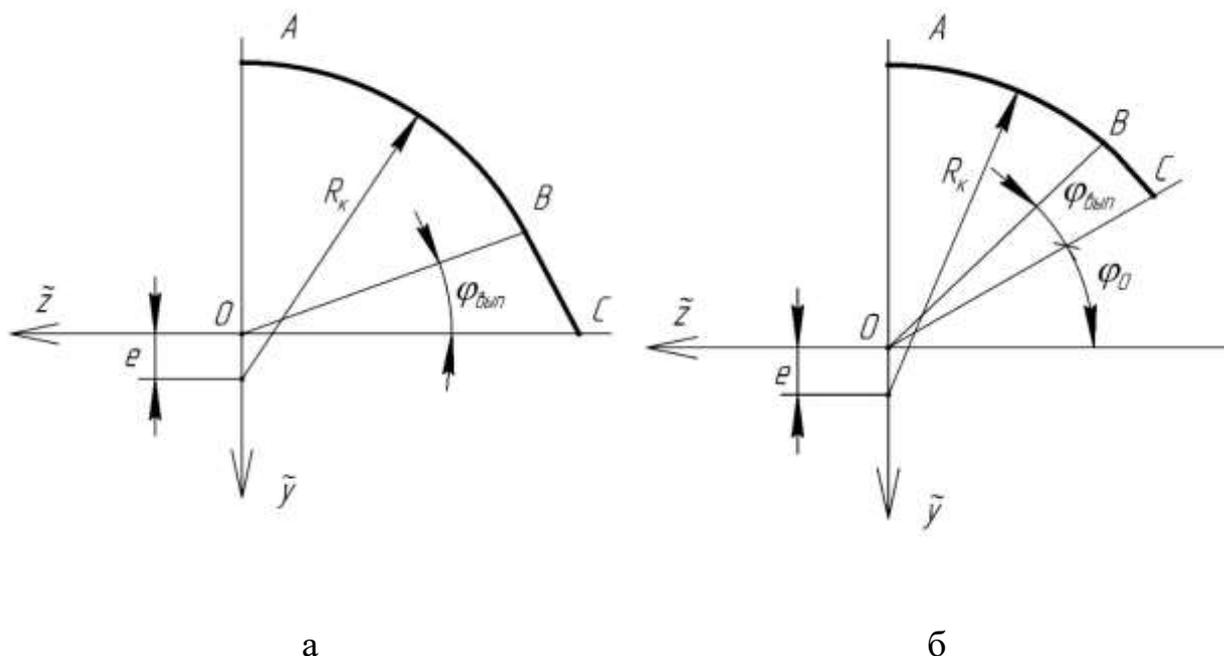


Рисунок 6.21 – Наружный контур заготовки

Как видно из рисунка 6.21, контур приведенной части поперечного сечения описывается кусочно-гладкой кривой, состоящей из двух однотипных участков. В свою очередь однотипный участок представляет собой сочетание дуги окружности АВ и прямолинейного отрезка ВС. Уравнение дуги окружности с учетом возможного эксцентриситета описывается известной формулой:

$$\tilde{z}^2 + (\tilde{y} + e)^2 = R_k^2 \quad (6.1)$$

где e – эксцентриситет; R_k – радиус калибра.

Для определения границы контура, описываемого дугой окружности, а также вида линейной функции, описывающей отрезок ВС, определим координату точки В, как точки пересечения луча ОВ и дуги окружности АВ. При этом будем иметь в виду, что уравнение отрезка ОВ имеет вид

$$\tilde{y} = \tilde{z} \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0). \quad (6.2)$$

Приравнявая уравнения (6.1) и (6.2), получим

$$\tilde{z}_B = \frac{-e \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0) + \sqrt{R_k^2 [1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0)] - e^2}}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0)}. \quad (6.3)$$

соответственно

$$\tilde{y}_B = \tilde{z}_B \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0). \quad (6.4)$$

Если учесть, что обычно R_k существенно больше e , то приближенно можно записать:

$$\tilde{z}_B \approx R_k \cos(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0) \quad (6.5)$$

$$\tilde{y}_B \approx R_k \sin(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0) \quad (6.6)$$

Функцию, описывающую отрезок ВС, можно определить как линейную функцию, проходящую через точки В и С:

$$\tilde{y} = -\tilde{z} + \tilde{z}_B [1 + \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0)]. \quad (6.7)$$

Или, с использованием упрощенных уравнений:

$$\tilde{y} = -\tilde{z} + R_k \cos(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0) [1 + \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0)]. \quad (6.8)$$

Таким образом, контур заготовки описывается следующим образом:

$$\text{при } 0 \leq \tilde{z} < \tilde{z}_B \quad \tilde{y} = \sqrt{R_k^2 - \tilde{z}^2} - e; \quad (6.9)$$

$$\text{при } \tilde{z}_B \leq \tilde{z} \leq \tilde{z}_B [1 + \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0)] \quad \tilde{y} = -\tilde{z} + \tilde{z}_B [1 + \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0)] \quad (6.10)$$

При определении геометрических параметров в много-клетевом стане, уравнение контура поперечного сечения заготовки для i -ой клетки примет вид:

$$\text{при } 0 \leq \tilde{z} < \tilde{z}_{B(i-1)} \quad \tilde{y} = \sqrt{R_{k(i-1)}^2 - \tilde{z}^2} - e_{(i-1)}; \quad (6.11)$$

$$\text{при } \tilde{z}_{B(i-1)} \leq \tilde{z} \leq \tilde{z}_{B(i-1)} [1 + \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}(i-1)} + \varphi_{0(i-1)})] \quad \tilde{y} = -\tilde{z} + \tilde{z}_{B(i-1)} [1 + \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}(i-1)} + \varphi_{0(i-1)})] \quad (6.12)$$

В частности, для гильзы после прошивного стана при $i = 1$ (заготовка для первой клетки) $e_0 = 0$; $R_{k0} = R_\Gamma$; $\tilde{z}_{B0} = R_\Gamma \cos(\varphi_0)$. В результате система (6.7) принимает вид $\tilde{z}^2 + \tilde{y}^2 = r_0^2$ – уравнение окружности радиусом r_0 , где r_0 – радиус гильзы после прошивного стана.

2. Описание формы ручья калибра

Схемы для описания геометрической формы поперечного сечения ручья калибра представлены на рисунке 6.22.

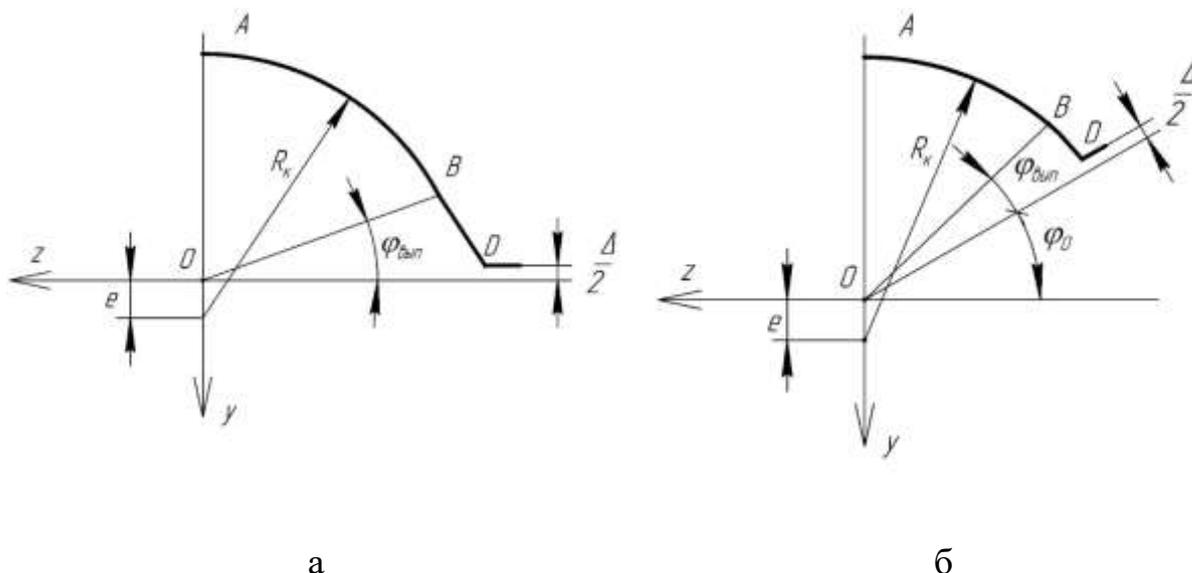


Рисунок 6.22 – Контур поперечного сечения ручья калибра, образованного двумя (а) и тремя (б) валками

Описание контура поперечного сечения ручья калибра выполним в системе координат zOy , связанной с осями симметрии калибра.

Как видно из рисунков 6.21 и 6.22, форма контура поперечного сечения ручья калибра отличается от формы наружного контура заготовки тем, что прямолинейный участок ручья калибра, соответствующий его выпуску, заканчивается в точке D . В свою очередь положение точки D определяется зазором между валками Δ . Следовательно, можно воспользоваться для описания дуги AB формулой, полученной ранее для наружного контура поперечного сечения заготовки. Отрезок BD представляет собой отрезок прямой, уравнение которого в общем случае имеет вид:

$$y = az + b \quad (6.13)$$

Для определения коэффициентов a и b воспользуемся следующими условиями:

- отрезку BD принадлежит точка B , координаты которой определены ранее;
- переход от дуги AB к отрезку BD плавный и, следовательно, производная от обеих линий в точке перехода одинаковая.

Исходя из этого можно записать:

$$\text{для дуги АВ: } \frac{dy}{dz} = \frac{d}{dz} \left(\sqrt{R_K^2 - z^2} \right) = - \frac{z}{\sqrt{R_K^2 - z^2}} \quad (6.14)$$

$$\text{для отрезка ВD: } \frac{dy}{dz} = \frac{d}{dz} (az + b) = a \quad (6.15)$$

Отсюда следует

$$a = - \frac{z_B}{\sqrt{R_K^2 - z_B^2}} \quad (6.16)$$

Исходя из того, что отрезок ВD проходит через точку В, получим

$$y_B = - \frac{z_B^2}{\sqrt{R_K^2 - z_B^2}} + b, \text{ или } b = y_B + \frac{z_B^2}{\sqrt{R_K^2 - z_B^2}} \quad (6.17)$$

С учетом этого уравнение отрезка ВD будет иметь вид

$$y = \frac{z_B}{\sqrt{R_K^2 - z_B^2}} (z_B - z) + y_B. \quad (6.18)$$

или

$$y = \frac{z_B}{\sqrt{R_K^2 - z_B^2}} (z_B - z) + z_B \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0). \quad (6.19)$$

Для определения границ участков с однотипным описанием наружного контура ручья калибра необходимо знать координаты z точек А, В, D. В соответствии с выполненными построениями имеем:

для точки А - $z_A = 0$;

$$\text{для точки В - } z_B = \frac{-e \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0) + \sqrt{R_K^2 [1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0)] - e^2}}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0)};$$

$$\text{для точки D - } z_D = z_B - \left[\frac{\Delta}{2z_B} \cos \varphi_0 - \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0) \right] \sqrt{R_K^2 - z_B^2}.$$

Тогда уравнение 1/6 части контура поперечного сечения ручья калибра будет иметь вид:

$$y = \sqrt{R_K^2 - z^2} - e; \quad \text{при } 0 \leq z \leq z_B, \quad (6.20)$$

$$y = \frac{z_B}{\sqrt{R_K^2 - z_B^2}} (z_B - z) + y_B, \quad \text{при } z_B < z \leq z_D.$$

При определении геометрических параметров в много-клетевом стане, уравнение контура ручья калибра для i -ой клетки примет вид:

$$y = \sqrt{R_{ki}^2 - z^2} - e_i, \quad \text{при } 0 \leq z \leq z_{Bi} \quad (6.21)$$

$$y = \frac{z_{Bi}}{\sqrt{R_{ki}^2 - z_{Bi}^2}} (z_{Bi} - z) + y_{Bi} \quad \text{при } z_{Bi} < z \leq z_{Di}$$

При раскатке гильзы в непрерывном стане рабочие клетки развернуты друг относительно друга на угол ψ , который для прокатного стана с 2-валковыми калибрами равен 90° , а для стана с 3-валковыми калибрами 60° .

Для того, чтобы можно было пользоваться выведенными выше формулами для описания геометрических характеристик очага деформации при переходе от клетки к клетке, можно воспользоваться формулами преобразования системы координат при ее повороте [149]. В частности, уравнения контура заготовки были записаны в системе координат $\tilde{z}0\tilde{y}$, а уравнения контура поперечного сечения ручья калибра записаны в системе координат $z0y$, повернутой относительно системы координат $\tilde{z}0\tilde{y}$ на угол ψ . В рассматриваемом случае поворот системы координат происходит вокруг оси $0x$, следовательно координата x при этом не меняется, а координаты \tilde{z} и \tilde{y} преобразуются по следующему правилу

$$\tilde{z} = z \cos \psi + y \sin \psi; \quad (6.22)$$

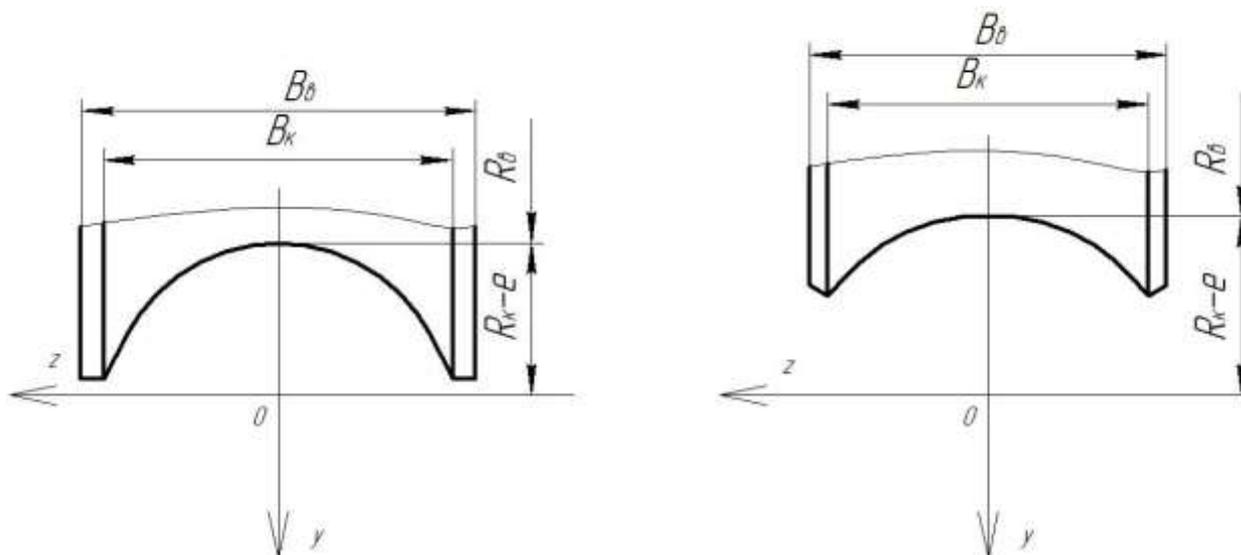
$$\tilde{y} = -z \sin \psi + y \cos \psi. \quad (6.23)$$

При прокатке в 2-валковом калибре $\psi=90$ градусов, при прокатке в 3-валковом калибре $\psi=60$ градусов.

3. Уравнение поверхности вала

Уравнение поверхности рабочего вала определяется на основе математических зависимостей, полученных для описания контура поперечного сечения ручья калибра.

Рабочий валок представляет собой цилиндрическое тело с переменным радиусом наружной поверхности (рисунок 6.23), который определяет форму очага деформации (рисунок 6.24).



2-валковый калибр

3-валковый калибр

Рисунок 6.23 – Форма рабочего валка

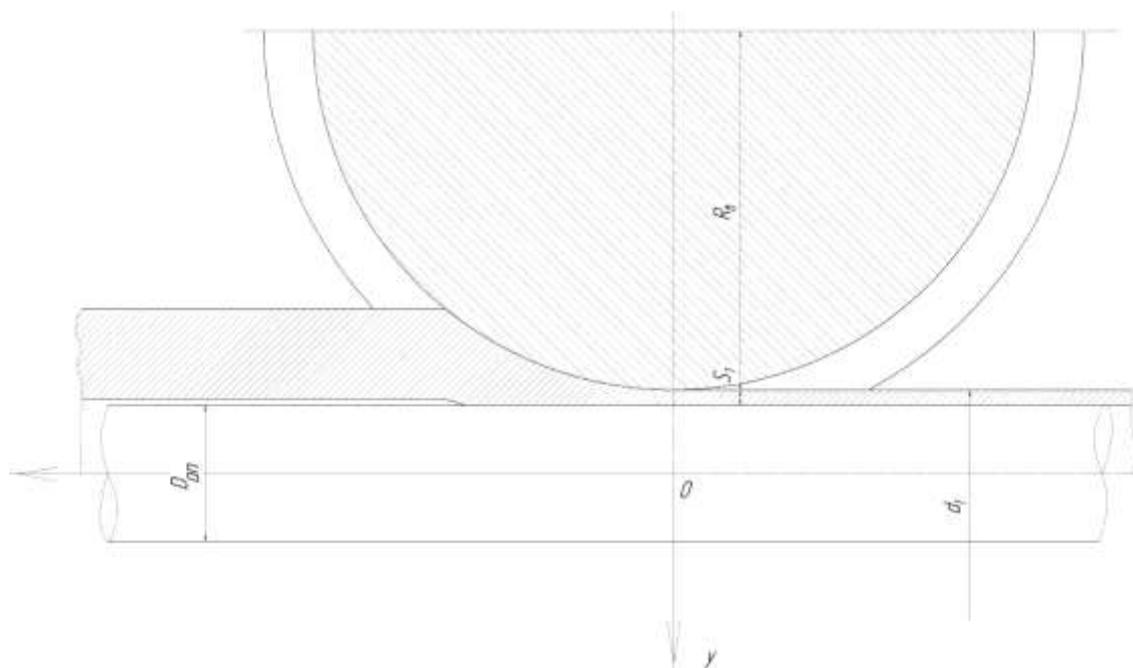


Рисунок 6.24 – Продольное сечение очага деформации

Согласно рисунку 6.24, изменение зазора между валками можно записать в виде:

$$y = \frac{D_{on}}{2} + s_1 + \frac{x^2}{R(z)}, \quad (6.24)$$

где $D_{оп}$ - диаметр оправки;

s_1 - толщина стенки трубы на выходе из очага деформации.

Переменный радиус валка $R(z)$ можно представить в виде

$$R(z) = R_в + R_к - e - y_к(z), \quad (6.25)$$

где $R_в$ - радиус валка по вершине калибра;

$y_к(z)$ - уравнение наружного контура поперечного сечения ручья калибра.

Уравнение профиля ручья калибра описывается формулами (6.20), (6.21).

4. Уравнение границы контактной поверхности очага деформации

Уравнение границы контактной поверхности очага деформации определяется как геометрическое место точек пересечения линии, описывающей наружный контур заготовки, и линии, описывающей поверхность калибра. При этом вдоль оси Oz плоскости выхода из очага деформации можно выделить три характерных участка (рисунок 6.25).

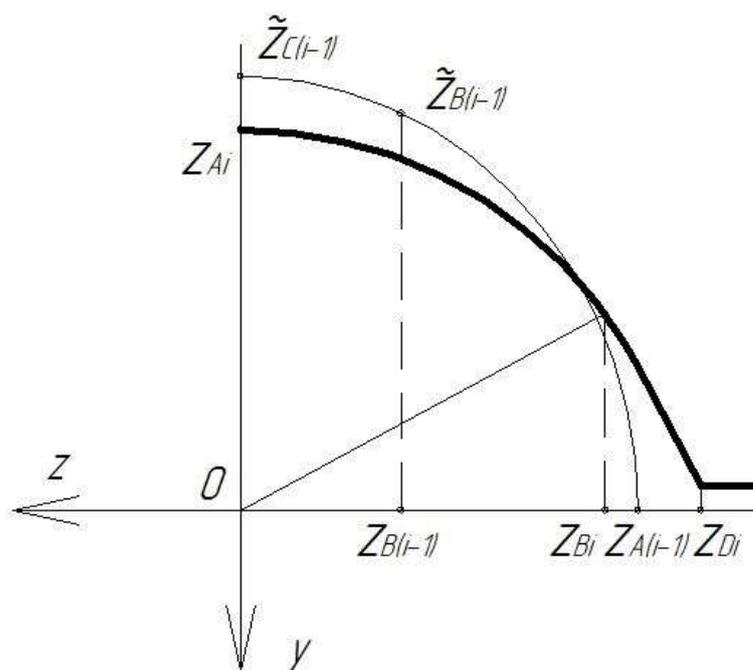


Рисунок 6.25 – Схема поперечного сечения заготовки и ручья калибра в плоскости выхода из очага деформации

Первый участок, для которого $0 \leq z < z_{B(i-1)}$ предполагает пересечение участка контура заготовки, сформированного в зоне выпуска ручья калибра предыдущей клетки, и радиусной зоны ручья калибра рассматриваемой клетки.

Второй участок, для которого $z_{B(i-1)} \leq z < z_{Bi}$, предполагает пересечение радиусных участков заготовки и ручья калибра.

Третий участок, для которого $z_{Bi} \leq z \leq z_{Di}$, предполагает пересечение радиусного участка заготовки с зоной выпуска калибра рассматриваемой клетки.

Рассмотрим методику построения уравнения границы очага деформации на примере процесса раскатки гильз в 2-валковом калибре. В этом случае $\varphi_0 = 0$, а угол $\psi = \frac{\pi}{2}$. Следовательно, при повороте системы координат получим $\tilde{z} = y$; $\tilde{y} = -z$.

Рассмотрим участок $0 \leq z < z_{B(i-1)}$. Уравнение контура заготовки на этом участке в соответствии с правилом поворота осей координат будет иметь вид:

$$y_{\text{заг}} = \frac{\tilde{z}_{B(i-1)} - \tilde{z}_{C(i-1)}}{\tilde{y}_{B(i-1)}} z + \tilde{z}_{C(i-1)} \quad (6.26)$$

Уравнение поверхности калибра описывается первой формулой системы (6.21) и формулами (6.24), (6.25). Приравняв эти выражения получаем формулу для определения границы очага деформации на рассматриваемом участке:

$$x = \sqrt{\left[\frac{\tilde{z}_{B(i-1)} - \tilde{z}_{C(i-1)}}{\tilde{y}_{B(i-1)}} z + \tilde{z}_{C(i-1)} + \frac{D_{\text{оп}}}{2} - s_{1i} \right] \left(R_{Bi} - R_{ki} + \sqrt{R_{ki}^2 - z^2} \right)} \quad (6.27)$$

Рассмотрим участок $z_{B(i-1)} \leq z < z_{Bi}$. Уравнение контура заготовки на этом участке в соответствии с правилом поворота осей координат будет иметь вид:

$$y_{\text{заг}} = \sqrt{R_{k(i-1)}^2 - (e_{(i-1)} + z)^2} \quad (6.28)$$

Уравнение поверхности калибра описывается первой формулой системы (6.21) и формулами (6.24), (6.25). Приравняв эти выражения получаем формулу для определения границы очага деформации на рассматриваемом участке:

$$x = \sqrt{\left[\sqrt{R_{K(i-1)}^2 - (z + e_{(i-1)})^2} - \frac{D_{оп}}{2} - s_{1i} \right] \left(R_{Bi} - R_{Ki} + \sqrt{R_{Ki}^2 - z^2} \right)} \quad (6.29)$$

Рассмотрим участок $z_{Bi} \leq z \leq z_{Di}$. Уравнение контура заготовки на этом участке описывается выражением (6.28). Уравнение контура калибра имеет вид:

$$y_{кал} = \frac{D_{оп}}{2} + s_{1i} + \frac{x^2}{R_{Bi} + R_{Ki} - e_i - y_{Ki}(z)} \quad (6.30)$$

$$\text{где } y_{Ki} = \frac{z_{Bi}}{\sqrt{R_{Ki}^2 - z_{Bi}^2}} (z_{Bi} - z) + y_{Bi}$$

С учетом этих выражений получаем формулу для определения границы очага деформации на рассматриваемом участке:

$$x = \sqrt{\left[\sqrt{R_{Ki}^2 - (z + e_{(i-1)})^2} - \frac{D_{оп}}{2} - s_{1i} \right] \left[R_{Bi} + R_{Ki} - e_i - \frac{z_{Bi}(z_{Bi} - z)}{\sqrt{R_{Ki}^2 - z_{Bi}^2}} - y_{Bi} \right]} \quad (6.31)$$

При расчете процессов производства труб следует иметь в виду наличие еще одной границы очага деформации, а именно поверхность контакта с оправкой. На формирование границы этой контактной поверхности оказывают влияние не только геометрические размеры прокатываемого профиля и инструмента, но и физические процессы, связанные в первую очередь с трением. Закономерности формирования площади контакта деформируемого металла с правкой рассмотрены в рамках исследования. Однако их использование для расчета энергосиловых параметров процесса приведет к неоправданному усложнению модели. Поэтому предлагается формула, основанная на экспериментальной информации. В частности, в работе [146]

получена эмпирическая зависимость, связывающая величину угла охвата оправки металлом α_1 на выходе из очага деформации с коэффициентом вытяжки μ . Однако при этом не учитывается изменение угла охвата оправки по длине очага деформации l . Проведенный анализ показал, что граница плоскости контакта деформируемого металла и оправки достаточно хорошо описывается зависимостью типа $y = \sqrt{x}$. С учетом этого предлагается следующая общая формула (как для 2-, так и для 3-валкового калибра) для определения текущего значения угла охвата:

$$\alpha = (\pi - 2\varphi_0)(\mu - 1)^{0,33} \sqrt{1 - \frac{x}{l}}. \quad (6.32)$$

С учетом этого площадь контакта деформируемого металла с оправкой может быть определена следующим образом:

$$F_{\text{оп}} = \frac{2}{3} r_{\text{оп}} l (\pi - 2\varphi_0) (\mu - 1)^{0,33}$$

Кинематическая модель очага деформации

Поле скоростей для процесса раскатки гильз было представлено в работах [150, 151]. Основываясь на их результатах выполнен альтернативный вариант построения кинематически возможного поля скоростей в цилиндрической системе координат применительно к случаю прокатки в 2-валковом калибре. При этом приняты следующие гипотезы:

1. В виду того, что контур поперечного сечения валка описывается уравнением окружности, примем по аналогии с работами [150, 151] квадратичную зависимость изменения компоненты вектора скорости v_x по длине очага деформации.

2. Поскольку при прокатке трубы на длинной оправке изгиб трубы невозможен, считаем, что компонента вектора скорости v_x изменяется только по длине очага деформации.

3. Ввиду малой величины толщины стенки трубы (справедливо при производстве труб нефтяного сортамента) будем считать, что радиальная

компонента вектора скорости v_ρ изменяется по толщине стенки трубы по закону, близкому к линейному.

4. Поскольку схема раскатки в 2-валковом калибре близка к осесимметричной, пренебрежем тангенциальной составляющей вектора скорости.

Поле скоростей построено применительно к схеме очага деформации, представленной на рисунке 6.26.

В соответствии с принятыми гипотезами продольная составляющая вектора скорости описывается следующим выражением [150, 151]

$$v_x = v_1 \left(1 - \frac{x}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(2 - \frac{x}{l} \right) \right), \quad (6.33)$$

где v_1 – продольная скорость выхода металла из очага деформации; l – длина очага деформации; μ – коэффициент вытяжки.

Длина очага деформации может быть определена по известной зависимости [152]:

$$l = \sqrt{(d_0 - d_1)R_B}, \quad (6.34)$$

где R_B – радиус валка по вершине калибра; d_0 – наружный средний диаметр трубы на входе в очаг деформации; d_1 – наружный средний диаметр трубы на выходе из очага деформации.

Радиальная компонента вектора скорости должна удовлетворять условию несжимаемости, которое для осесимметричной задачи имеет вид [153]

$$\frac{\partial v_\rho}{\partial \rho} + \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{v_\rho}{\rho} = 0. \quad (6.35)$$

Уравнение (6.35) представляет собой неоднородное дифференциальное уравнение, решение которого сводится к решению интегрального уравнения и аналитически выполнено быть не может. Поэтому, согласно приведенным выше гипотезам, считаем, что кривизна линии, описывающей изменение компоненты v_ρ вектора скорости, незначительна и в первом приближении искомая зависимость может быть принята линейной.

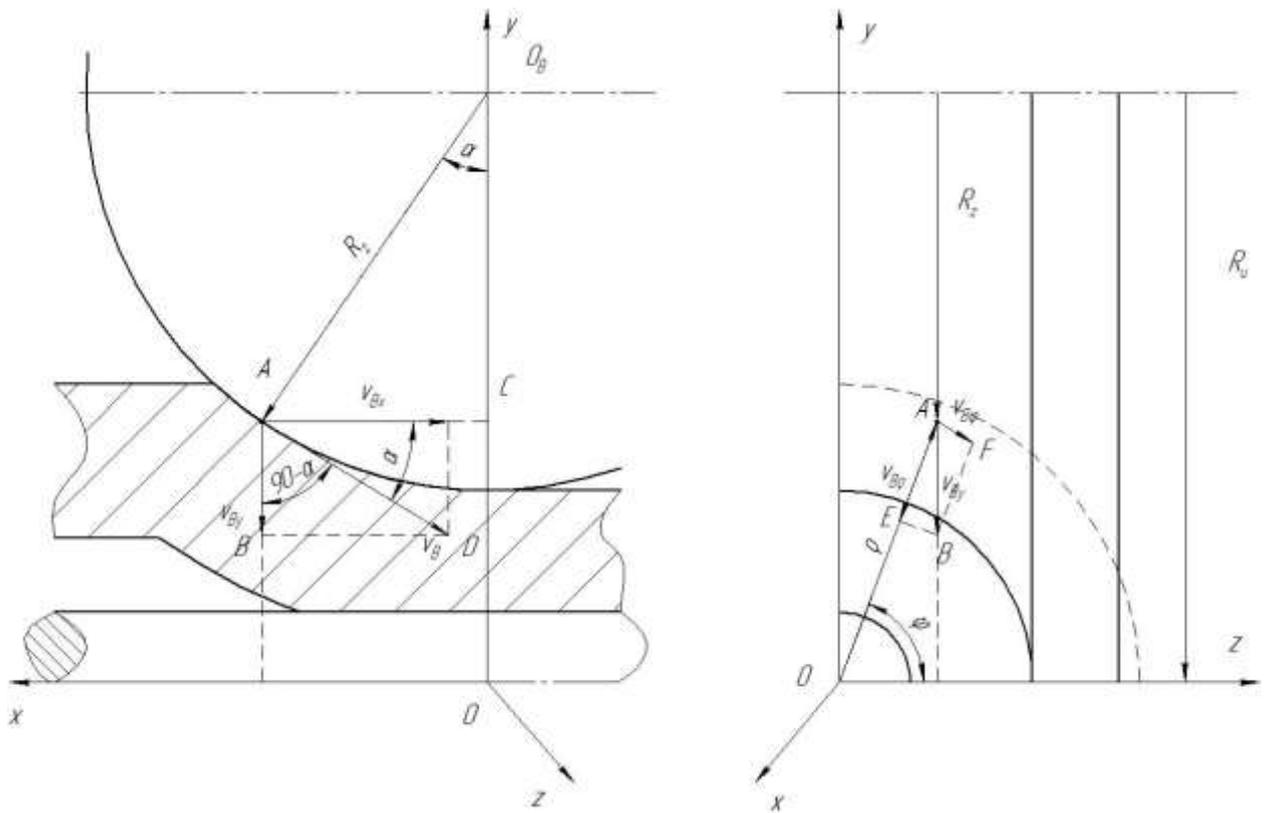


Рисунок 6.26 - Расчётная схема для определения кинематически возможного поля скоростей

С учетом граничного условия v_ρ при $\rho = r_{\text{оп}}$ ($r_{\text{оп}}$ – радиус оправки) равно 0, запишем

$$v_\rho = b_0(r_{\text{оп}} - \rho) \quad (6.36)$$

Коэффициент b_0 определим из условия несжимаемости

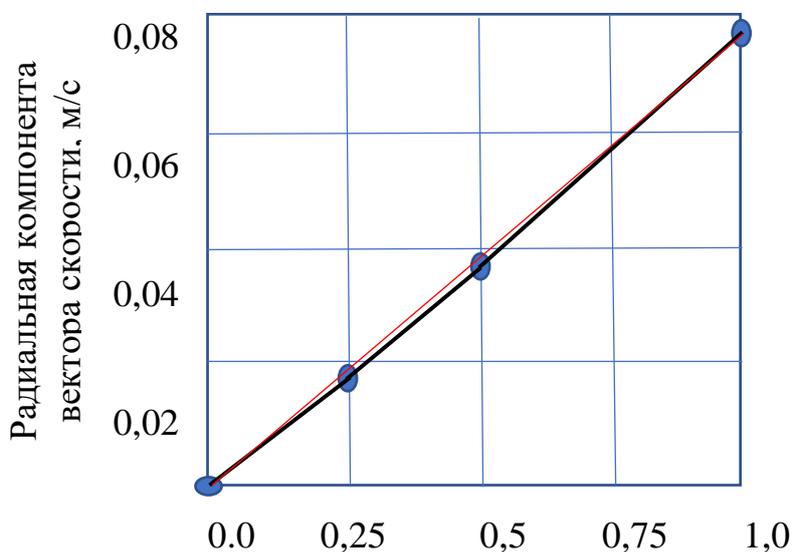
$$b_0 = \frac{\rho}{r_{\text{оп}}} \frac{2v_1}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(2 - \frac{x}{l} \right) \quad (6.37)$$

С учетом этого

$$v_\rho = \frac{2\rho v_1}{lr_{\text{оп}}} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(2 - \frac{x}{l} \right) (r_{\text{оп}} - \rho). \quad (6.38)$$

С одной стороны, получили определенное противоречие, т.к. исходная гипотеза предполагала линейную зависимость изменения радиальной компоненты вектора скорости по толщине стенки трубы, а получилась квадратичная. Однако в виду малой толщины стенки трубы отклонение этой зависимости от линейной будет незначительным и в дальнейшем для описания характера изменения радиальной компоненты вектора скорости применяется

формула (6.38). В качестве примера на рисунке 6.27 показан характер зависимости, описываемой формулой (6.38), для тонкостенной трубы с $d/s = 30$ (красная линия – линейная зависимость)



Относительная радиальная координата по толщине стенки трубы

Рисунок 6.27 – Характер изменения радиальной компоненты вектора скорости в пределах толщины стенки трубы в соответствии с зависимостью (6.36)

Аналитическое описание компонент вектора скорости необходимо для определения интенсивности скоростей деформаций сдвига H , которая, в свою очередь, понадобится при вычислении мощности формоизменения.

С этой целью определим компоненты тензора скоростей деформаций.

$$\xi_{xx} = \frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{2v_1}{l} \left(\frac{1-\mu}{\mu} \right) \left(1 - \frac{x}{l} \right); \quad (6.39)$$

$$\xi_{\rho\rho} = \frac{\partial v_\rho}{\partial \rho} = \frac{2v_1}{r_{\text{оп}} l} \left(\frac{\mu-1}{\mu} \right) \left(1 - \frac{x}{l} \right) (r_{\text{оп}} - 2\rho) \quad (6.40)$$

$$\xi_{x\rho} = \frac{\partial v_\rho}{\partial x} = \frac{2v_1 \rho}{r_{\text{оп}} l^2} \left(\frac{1-\mu}{\mu} \right) (r_{\text{оп}} - \rho) \quad (6.41)$$

С учетом выведенных зависимостей, в соответствии с кинематическими соотношениями Коши, записанными в цилиндрической системе координат [154], в итоге получим:

$$H = \frac{2v_1}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \sqrt{\frac{4}{3} \left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 \left(3 \frac{\rho^2}{r_{оп}^2} - 6 \frac{\rho}{r_{оп}} + 4 \right) + \frac{\rho^2}{l^2} \left(1 - \frac{\rho}{r_{оп}} \right)^2}. \quad (6.42)$$

Одной из важнейших характеристик кинематики процесса прокатки является положение нейтрального сечения x_γ (координата точки на контактной поверхности с равенством скоростей деформируемого металла и валка) [152]. Учитывая, что углы захвата при продольной раскатке гильз на превышают 30° [148], для определения положения нейтрального сечения x_γ приравняем величину компоненты вектора скорости v_x окружной скорости валка, выраженной через частоту вращения. В итоге с учетом формулы (6.33) получим

$$v_1 \left[1 - \frac{x_\gamma}{l} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(2 - \frac{x_\gamma}{l} \right) \right] = 2\pi n_B R_B, \quad (6.43)$$

где n_B – частота вращения валков.

В результате решения уравнения (6.43) получим для i -ой клетки

$$x_{\gamma i} = l_i \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\mu_i}{\mu_i - 1} \left(1 - \frac{2\pi n_{Bi} R_{Bi}}{v_{1i}} \right)} \right]. \quad (6.44)$$

Уравнение (6.44) содержит одну неизвестную величину - v_{1i} . Для ее определения используем гипотезу, успешно использованную в работе [145].

Согласно этой гипотезе принимается, что при раскатке гильз на непрерывных станах коэффициент вытяжки в последней клетки, как правило, имеет значение близкое к 1, т.е. изменение скорости металла в этой клетки незначительно. Поэтому, без внесения существенной погрешности можно считать, что скорость выхода металла из последней n -ой клетки стана равна средней окружной скорости валка n -ой клетки. Это условие запишется следующим образом:

$$v_{1n} = \pi n_{\text{вн}} \left(R_{\text{кн}} - e_n - \frac{\Delta}{2} \right). \quad (6.45)$$

Далее, зная режим обжатий по клетям непрерывного стана и скоростной режим можно последовательно определить скорости перемещения металла в промежутках между клетями в соответствии с зависимостью $v_{1(i-1)} = \frac{v_{1i}}{\mu_i}$. После этого с использованием формулы (6.44) определяются координаты нейтрального сечения для всех клеток непрерывного стана.

Модель энерго-силовых параметров

В основу построения модели положены результаты, полученные в работе [145]. Предложенная в этой работе математическая модель для расчета усилия прокатки показала хорошую сходимость с замеренными результатами, однако результаты расчета всегда получались ниже, чем реальные значения. С другой стороны, анализ работ [136, 155] показал, что применение при непрерывной горячей прокатке модели сопротивления металла пластической разовой деформации, предложенной в работе [156], приводит к получению заниженных значений этой величины, так как не учитывает закономерности изменения сопротивления металла пластической деформации в промежутке между клетями. Поскольку усилие прокатки напрямую зависит от величины сопротивления металла пластической деформации, ее заниженное значение приводит к занижению расчетного значения усилия прокатки.

Для корректного учета влияния сопротивления металла пластической деформации может быть использована методика построения функционала сопротивления металла пластической деформации, приведенная в работе [109]. Однако это не очень удобно при создании инженерных моделей, работающих в режиме реального времени. Поскольку при горячей обработке давлением сопротивление металла пластической деформации в пределах очага деформирования изменяется не очень существенно, в соответствующих зависимостях (как это делается в большинстве случаев) для расчета энергосиловых параметров целесообразно применять среднюю величину

сопротивления металла пластической деформации. Но эта величина должна быть определена с учетом реального характера упрочнения металла в очаге деформации и с учетом неполного разупрочнения в промежутке между клетями.

С этой целью временной промежуток процесса деформации в непрерывном прокатном стане разбиваем не на малые временные промежутки, а на этапы деформирования, к которым относятся формоизменение в очаге деформации и прохождение промежутка между клетями. Полученные результаты на каждом этапе усредняются.

Рассмотрим с этой точки зрения процесс деформации в отдельной i -ой клетки стана (рисунок 6.28). В процессе прокатки в общем случае протекают процессы деформационного упрочнения и динамической рекристаллизации. Их наложение дает конечное значение сопротивления металла пластической деформации. В соответствии с этим результирующее значение сопротивления металла пластической деформации на выходе из i -ой клетки стана будет равно (рисунок 6.29)

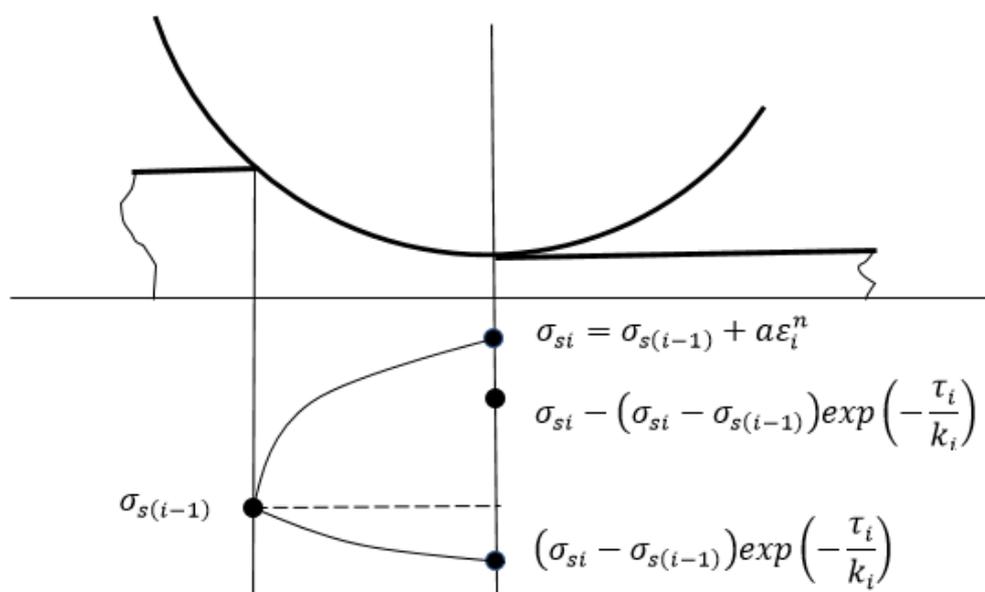


Рисунок 6.28 – Характер изменения сопротивления металла пластической деформации в i -ой клетки прокатного стана

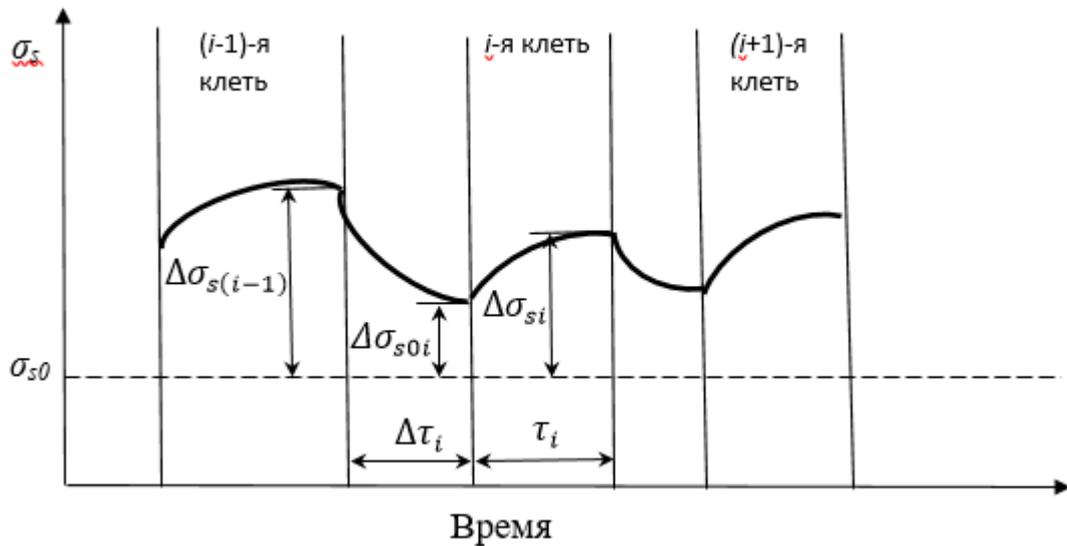


Рисунок 6.29 – Динамика изменения сопротивления металла пластической деформации при непрерывной прокатке

$$\sigma_{si} = \sigma_{s0i} + a\varepsilon_i^n - (\sigma_{si} - \sigma_{s0}) \exp\left(-\frac{\tau_i}{k_i}\right) \quad (6.46)$$

или

$$\sigma_{si} + \sigma_{si} \exp\left(-\frac{\tau_i}{k_i}\right) = \sigma_{s0i} + a\varepsilon_i^n + \sigma_{s0} \exp\left(-\frac{\tau_i}{k_i}\right).$$

В итоге получим

$$\sigma_{si} = \frac{\sigma_{s0i} + a\varepsilon_i^n + \sigma_{s0} \exp\left(-\frac{\tau_i}{k_i}\right)}{1 + \exp\left(-\frac{\tau_i}{k_i}\right)} \quad (6.47)$$

где ε_i – степень деформации в i -ой клетки прокатного стана; τ_i – время прохождения металла через очаг деформации в i -ой клетки; k_i – коэффициент разупрочнения металла, определяемый температурой в i -ой клетки; σ_{s0i} – сопротивление металла пластической деформации на входе в очаг деформации i -ой клетки.

Величина σ_{s0i} , согласно рисунку 6.29, будет равна:

$$\sigma_{s0i} = \sigma_{s0} + (\sigma_{s(i-1)} - \sigma_{s0}) \exp\left(-\frac{\Delta\tau_i}{k_i}\right), \quad (6.48)$$

где $\Delta\tau_i$ – время нахождения металла между $(i-1)$ -й и i -й клетями.

Время нахождения металла в i -й клетки прокатного стана можно определить, разделив длину очага деформации на среднюю скорость металла

в продольном направлении. В соответствии с полученными ранее зависимости средне-интегральное значение продольной составляющей вектора скорости будет равно:

$$v_{xci} = v_{1i} \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{\mu_i - 1}{\mu_i} \right) \right]. \quad (6.49)$$

Следовательно,

$$\tau_i = \frac{l}{v_{1i} \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{\mu_i - 1}{\mu_i} \right) \right]} \quad (6.50)$$

Время нахождения металла между $(i-1)$ -й и i -й клетями определяется следующим образом:

$$\Delta\tau_i = \frac{L_i}{v_{1(i-1)}} \quad (6.51)$$

где L_i – расстояние между $(i-1)$ -й и i -й клетями.

При вычислении энергосиловых параметров в соответствующие формулы предлагается подставлять среднее по очагу сопротивление металла пластической деформации, то есть:

$$\sigma_{sic} = \frac{\sigma_{s(i-1)} + \sigma_{si}}{2} \quad (6.52)$$

Также следует иметь в виду, что при $i = 1$: $\sigma_{s0i} = \sigma_{s0}$; $\Delta\tau_i = 0$; $L_i = 0$.

В остальном для расчета энергосиловых параметров используются формулы, приведенные в работе [17], но записанные для случая прокатки в 2-валковом калибре с учетом геометрических и кинематических особенностей, приведенных выше. При этом в соответствии с рекомендациями работы [136] принимаем для определения сил контактного трения закон Зибеля $f_\tau = f\sigma_{scp}$.

В соответствии с этим усилие, действующее на валки раскатного стана, определяется по формуле

$$p_{cp} = \frac{\pi}{2F_K \sin \frac{\alpha_0}{2}} [S_1\sigma_1(d_1 - s_1) - S_0\sigma_0(d_0 - s_0)] - f\sigma_{scp} \frac{F_{K1} - F_{K0}}{F_K} ctg \frac{\alpha_0}{2}, \quad (6.53)$$

где F_K – площадь контактной поверхности с рабочим валком;

α_0 – угол захвата;

S_1 - площадь поперечного сечения раската на выходе из очага деформации;

S_0 – площадь поперечного сечения раскатка на входе в очаг деформации;

σ_1 – продольное напряжение на выходе из очага деформации;

σ_0 – продольное напряжение на входе в очаг деформации;

d_1 – диаметр раската на выходе из очага деформации;

d_0 – диаметр раската на входе в очаг деформации;

s_1 – толщина стенки раската на выходе из очага деформации;

s_0 – толщина стенки трубы на входе в очаг деформации;

f – коэффициент трения на контакте с рабочими валками;

F_{K1} – площадь контактной поверхности в зоне опережения;

F_{K0} – площадь контактной поверхности в зоне отставания.

При определении площади контактной поверхности в виду сложности зависимости, описывающей ее контур, в работе [17] предложено заменять реальную форму контактной поверхности прямоугольником. Такой же подход был использован в работе [145]. Практика расчетов показала, что подобные допущения не оказывают существенного влияния на конечный результат при определении энергосиловых параметров. Однако, выполненное в данной работе описание геометрических характеристик очага деформации позволяет повысить точность расчетов.

Теоретически полученные зависимости, описывающие контур поверхности контакта с валками, позволяют рассчитать контур контактной поверхности с высокой степенью точности аналитическим путем. Но это приведет к существенному усложнению задачи. С другой стороны, как было отмечено выше, даже замена площади контактной поверхности прямоугольником позволяет получить результаты близкие к действительным. Поэтому любая более точная аппроксимация позволит повысить точность и достоверность решения.

В связи с этим предлагается разбить реальную форму контактной поверхности на простые фигуры и общую площадь контактной поверхности определять в виде суммы площадей этих простых фигур (рисунок 6.30).

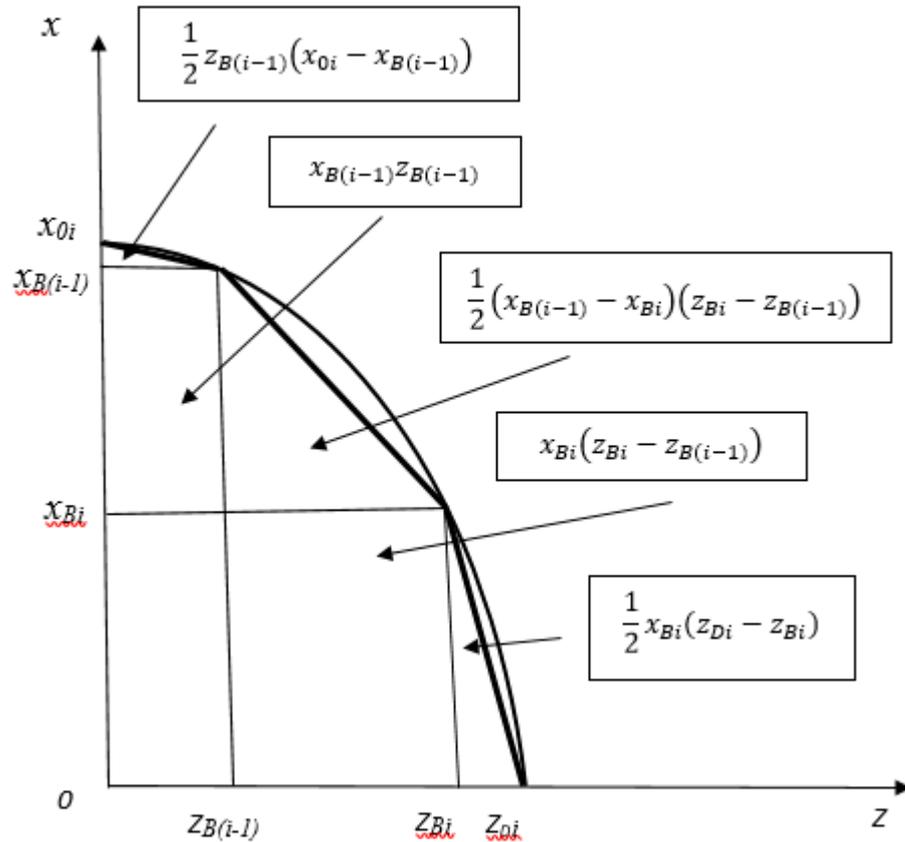


Рисунок 6.30 – Схема контактной поверхности с валком

С учетом этого, для i -ой клетки стана можно записать:

$$F_{ki} = 2 \left\{ \frac{1}{2} \left[z_{B(i-1)} (x_{0i} - x_{B(i-1)}) + (x_{B(i-1)} - x_{Bi}) (z_{Bi} - z_{B(i-1)}) + x_{Bi} (z_{Di} - z_{Bi}) \right] + x_{B(i-1)} z_{B(i-1)} + x_{Bi} (z_{Di} - z_{Bi}) \right\}. \quad (6.54)$$

Величина x_{0i} , входящая в формулу (6.54), в соответствии с зависимостью (6.27) может быть определена следующим образом:

$$x_{0i} = \sqrt{(z_{D(i-1)} - D_{оп} - 2s_{1i})R_{Bi}}. \quad (6.55)$$

При этом следует иметь в виду, что при рассмотрении 1-ой клетки стана необходимо принять:

$$x_{01} = \sqrt{(2R_{\Gamma} - D_{оп} - 2s_{11})R_{B1}}. \quad (56)$$

Величина $z_{B(i-1)}$ в соответствии с формулой (6.3) определяется по формуле:

$$z_{B(i-1)} = \frac{-e_{(i-1)} \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}(i-1)} + \varphi_0) + \sqrt{R_{K(i-1)}^2 [1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_{\text{вып}(i-1)} + \varphi_0)] - e_{(i-1)}^2}}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_{\text{вып}(i-1)} + \varphi_0)} \quad (6.57)$$

Для первой клетки $z_{B(i-1)} = R_r$.

В соответствии с формулой (6.22) получаем:

$$z_{Bi} = z_{B(i-1)} \cos \psi + y_{B(i-1)} \sin \psi, \quad (6.58)$$

а в соответствии с формулой (6.9) имеем

$$y_{B(i-1)} = \sqrt{R_{K(i-1)}^2 - z_{B(i-1)}^2} - e_{(i-1)}. \quad (6.59)$$

Для первой клетки, при $i=1$, $y_{B(i-1)} = 0$.

Для определения $x_{B(i-1)}$ воспользуемся формулой (6.27)

$$x_{B(i-1)} = \sqrt{\left[\frac{z_{B(i-1)} - z_{D(i-1)}}{y_{B(i-1)}} z_{B(i-1)} + z_{D(i-1)} + \frac{D_{\text{оп}}}{2} - s_{1i} \right] \left(R_{Bi} - R_{Ki} + \sqrt{R_{Ki}^2 - z_{B(i-1)}^2} \right)} \quad (6.60)$$

Для первой клетки можно принять $x_{B(i-1)} = 0$.

Величина x_{Bi} с учетом формулы (6.29) будет равна:

$$x_{Bi} = \sqrt{\left[\sqrt{R_{K(i-1)}^2 - (z_{Bi} + e_{(i-1)})^2} - \frac{D_{\text{оп}}}{2} - s_{1i} \right] \left(R_{Bi} - R_{Ki} + \sqrt{R_{Ki}^2 - z_{Bi}^2} \right)} \quad (6.61)$$

Для первой клетки принимаем $R_{K(i-1)} = R_r$, $e_{(i-1)} = 0$.

При этом для вычисления величины $z_{D(i-1)}$ можно воспользоваться формулой:

$$z_{D(i-1)} = z_{B(i-1)} - \left[\frac{\Delta}{2z_{B(i-1)}} \cos \varphi_0 - \operatorname{tg}(\varphi_{\text{вып}} + \varphi_0) \right] \sqrt{R_{K(i-1)}^2 - z_{B(i-1)}^2} \quad (6.62)$$

Для определения площадей контактной поверхности, относящихся к зоне отставания F_{K0} и опережения F_{K1} необходимо определить границу между этими зонами, которая характеризуется величиной координаты $x_{\gamma i}$, представляющей собой координату нейтрального сечения по вершине калибра.

Поскольку зона опережения всегда меньше зоны отставания, погрешность в определении ее площади в меньшей степени повлияет на результат вычисления. Поэтому предлагается рассматривать поверхность, соответствующую зоне опережения в виде прямоугольника и, соответственно ее площадь будет равна:

$$F_{k1i} = x_{\gamma i} z_{Di}. \quad (6.63)$$

Площадь зоны отставания после этого может быть определена как разность между всей площадью контактной поверхности, рассчитываемой по формуле (54), и площадью зоны опережения, то есть:

$$F_{k0i} = F_{ki} - F_{k1i} \quad (6.64)$$

Теперь формула (6.53) содержит две неизвестные величины σ_0 и σ_1 . С другой стороны, известно, что прокатка в первой клетки стана идет без заднего натяжения. Поэтому для первой клетки характерно $\sigma_{01} = 0$. Таким образом формула (6.53) для первой клетки непрерывного раскатного стана содержит одну неизвестную величину σ_{11} . Для ее определения воспользуемся уравнением баланса мощностей, записанным для одной отдельно взятой клетки [8].

$$N_B \pm N_1 \pm N_0 - N_\phi - N_{TB} - N_{T0} = 0, \quad (6.65)$$

где N_{TB} – мощность трения скольжения на контакте с валками;

N_{T0} – мощность сил трения скольжения на контакте с оправкой;

N_B – мощность, подводимая в очаг деформации валками;

N_1 – мощность, создаваемая продольным усилием, приложенным в плоскости выхода из очага деформации;

N_0 – мощность, создаваемая продольным усилием, приложенным в плоскости входа в очаг деформации;

N_ϕ – мощность формоизменения.

Следует отметить, что согласно работе [17]

$$N_B - N_{TB} = N_\tau, \quad (6.66)$$

где N_τ – полезная мощность сил трения, определяемая по формуле:

$$\begin{aligned}
 N_\tau &= \int_{F_{ki}} f \sigma_{scp} \frac{2v_x}{\cos \alpha_0} dF \\
 &\quad - 2 \int_{F_{k1i}} f \sigma_{scp} \frac{2v_x}{\cos \alpha_0} dF \\
 &= v_1 \frac{f \sigma_{scp}}{\cos \alpha_0} \left(\frac{\mu - 1}{\mu} \right) \left(\frac{5 F_k}{3 x_0} l - \frac{10}{3} z_D x_\gamma \right)
 \end{aligned} \tag{6.67}$$

Мощность трения скольжения на контакте с оправкой представляет собой мощность, создаваемую силой трения на разности между продольной составляющей скорости перемещения раската и скоростью перемещения оправки, то есть:

$$\begin{aligned}
 N_{\tau 0} &= \int_{F_{оп}} f_{оп} \sigma_{sc} (v_x - v_{оп}) dF = f_{оп} \sigma_{sc} \int_0^l \int_0^{\alpha_{cp}} r_{оп} (v_x - v_{оп}) d\alpha dx = \\
 f_{оп} \sigma_{sc} r_{оп} &= \frac{2}{3} f_{оп} \sigma_{sc} r_{оп} l (\pi - 2\varphi_0) (\mu - 1)^{0,33} \left[v_1 \left(1 - \frac{2}{3} \frac{\mu - 1}{\mu} \right) - v_{оп} \right],
 \end{aligned} \tag{6.68}$$

где $F_{оп}$ – площадь контакта деформируемого металла с оправкой, определяемая с учетом формулы (6.32).

Мощность, создаваемая продольным усилием, приложенным в плоскости выхода из очага деформации, равна:

$$N_1 = \sigma_1 S_1 v_1 = \pi \sigma_1 v_1 s_1 (2r_{оп} + s_1). \tag{6.69}$$

Мощность, создаваемая продольным усилием, приложенным в плоскости входа в очаг деформации, равна:

$$N_0 = \sigma_0 S_0 \frac{v_1}{\mu} = \pi \sigma_0 s_0 \frac{v_1}{\mu} (d_0 - s_0). \tag{6.70}$$

Мощность формоизменения можно определить следующим образом:

$$N_\phi = \int_V \tau_{sc} H dV, \tag{6.71}$$

где V – объем очага деформации.

Интенсивность скоростей деформаций сдвига H определяется по формуле (6.42). В этом случае можно записать:

$$N_{\phi} = \frac{2\tau_{sc}v_1}{l} \left(\frac{\mu-1}{\mu} \right) \int_V \sqrt{\frac{4}{3} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \left(3 \frac{\rho^2}{r_{оп}^2} - 6 \frac{\rho}{r_{оп}} + 4\right) + \frac{\rho^2}{l^2} \left(1 - \frac{\rho}{r_{оп}}\right)^2} dV. \quad (6.72)$$

В результате получилось выражение для мощности формоизменения, содержащее интеграл, первообразная для которого неизвестна. В первую очередь это касается интегрирования по переменной ρ . С другой стороны, расчеты показали, что даже при раскатке относительно толстостенной трубы с отношением $\frac{D}{s} = 25$ значение $\frac{\rho}{r_{оп}}$ изменяется в объеме очага деформации в пределах 1,0...1,05. Поэтому предлагается принять $\rho = \rho_c = r_{оп} + \frac{s_0+s_1}{2} = const$. Тогда в выражении (6.72) получается табличный интеграл и мощность формоизменения может быть определена аналитическим путем.

В связи с тем, что получаемые при этом выражения получаются достаточно громоздкими, обозначим:

$$a = \frac{4}{3l^2} \left(3 \frac{\rho_c^2}{r_{оп}^2} - 6 \frac{\rho_c}{r_{оп}} + 4\right); \quad (6.73)$$

$$b = -\frac{8}{3l} \left(3 \frac{\rho_c^2}{r_{оп}^2} - 6 \frac{\rho_c}{r_{оп}} + 4\right); \quad (6.74)$$

$$c = \frac{4}{3} \left(3 \frac{\rho_c^2}{r_{оп}^2} - 6 \frac{\rho_c}{r_{оп}} + 4\right) + \frac{\rho_c^2}{l^2} \left(1 - \frac{\rho_c}{r_{оп}}\right)^2. \quad (6.75)$$

С учетом этого, получим:

$$N_{\phi} = 4\pi\rho_c \frac{\tau_{sc}v_1}{l} \left(\frac{\mu-1}{\mu} \right) \left(\frac{2al+b}{4a} \sqrt{al^2+bl+c} - \frac{4ac-b^2}{8a\sqrt{a}} \arcsin \frac{2al+b}{\sqrt{b^2-4ac}} - \frac{b}{4a} \sqrt{c} + \frac{4ac-b^2}{8a\sqrt{a}} \arcsin \frac{b}{\sqrt{b^2-4ac}} \right). \quad (6.76)$$

После подстановки в формулу (6.65) выражений (6.67), (6.68), (6.69), (6.70), (6.72), записанных для i -ой клетки прокатного стана, получаем формулу для расчета нормального напряжения, действующего в поперечном сечении раскатываемой гильзы после его выхода из очага деформации:

$$\begin{aligned}
\sigma_{1i} = 2,32 \frac{\rho_{ci} \sigma_{sci}}{l_i s_{1i} (2r_{оп} s_{1i})} \left(\frac{\mu_i - 1}{\mu_i} \right) & \left[\frac{2a_i l_i + b_i}{4a_i} \sqrt{a_i l_i^2 + b_i l_i + c_i} \right. \\
& - \frac{4a_i c_i - b_i^2}{8a_i \sqrt{a_i}} \left(\arcsin \frac{2a_i l_i + b_i}{\sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i}} - \arcsin \frac{b_i}{\sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i}} \right) - \frac{b_i}{4a_i} \sqrt{c_i} \left. \right] \\
& - \frac{5f_i \sigma_{sci}}{3\pi s_1 (2r_{оп} + s_{1i}) \cos \alpha_0} \left(\frac{\mu_i - 1}{\mu_i} \right) (F_{ki} - 2z_{Di} x_{\gamma i}) \\
& + \frac{2f_{опi} \sigma_{sci} r_{оп} l_i (\pi - 2\varphi_0) (\mu_i - 1)^{0,33}}{3 \pi s_{1i} (2r_{оп} + s_{1i})} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{\mu_i - 1}{\mu_i} - \frac{v_{оп}}{v_{1i}} \right) \\
& + \frac{\sigma_{0i} s_{0i} (d_{0i} - s_{0i})}{\mu_i s_{1i} (2r_{оп} + s_{1i})}
\end{aligned} \quad (6.77)$$

Предложенная математическая модель описания геометрических, кинематических и энергосиловых параметров очага деформации, позволяет с высокой точностью осуществлять расчет процесса раскатки гильз в непрерывном стане на контролируемо-перемещаемой оправке.

Для оценки достоверности полученной математической модели использованы данные об усилии прокатки, полученные в лабораторных условиях при выполнении работ по моделированию. При этом, поскольку прокатка образцов на лабораторном стане осуществлялась без приложения продольных усилий на входе и выходе из очага деформации, т.е. $\sigma_0 = \sigma_1 = 0$, уравнение (6.77) было разрешено относительно v_1 . Для получения аналитической зависимости сделано допущение о том, что $\frac{\rho_c}{r_{оп}} \approx 1$.

Выполненные оценочные расчеты показали, что вносимая при этом погрешность не превышает 2%. В результате получено следующее выражение

$$v_1 = \frac{4}{3} \frac{\left(A \frac{\mu + 2}{\mu - 1} v_B + f_{оп} B v_{оп} \right)}{4,2 \frac{\rho_c^2}{l} \frac{\mu - 1}{\mu} + \frac{2}{9} A \frac{\mu + 2}{\mu} + \frac{4}{9} f_{оп} B \frac{\mu + 2}{\mu}}, \quad (6.78)$$

в формуле обозначено:

$$A = \frac{\pi}{3} f (r_{оп} + s_1);$$

$$B = r_{оп} (\pi - 2\varphi_0) (\mu - 1)^{0,33}.$$

С использованием вычисленного значения v_1 по формуле (6.44) определялось значение координаты нейтрального сечения x_γ , после чего по формуле (6.53) определялось среднее контактное давление, а затем по формуле

$$P = p_{cp} F_k \quad (6.79)$$

вычислялось усилие P , действующее на валки прокатного стана.

С использованием приведенной методики вычислено усилие прокатки для условий, представленных в таблице 6.13.

Таблица 6.13 – Исходные данные для расчета усилия прокатки

| <i>Параметр</i> | <i>Единица измерения</i> | <i>Значение</i> |
|---|--------------------------|--------------------------------|
| Диаметр заготовки | мм | 34,0 |
| Толщина стенки заготовки | мм | 5,0 |
| Диаметр прокатанной заготовки | мм | 33,0 |
| Толщина стенки прокатанной заготовки | мм | 4,0 |
| Радиус оправки | мм | 10,05 |
| Радиус валков | мм | 125,0 |
| Частота вращения валков | Об/мин | 5,0 |
| Калибр (φ_0) | - | 2-валковый ($\varphi_0 = 0$) |
| Скорость перемещения оправки | м/с | 0,0 |
| Коэффициент трения на контакте с валком | - | 0,28 |
| Коэффициент трения на контакте с оправкой | - | 0,245 |
| Среднее сопротивление металла пластической деформации | МПа | 80,0 |

В результате выполненных расчетов получено значение усилия прокатки, равное 6,5 кН. Среднее значение усилия прокатки, определенное при проведении эксперимента в лабораторных условиях составило 6,34 кН. Поскольку расчетное усилие отличается от замеренного экспериментально на 2,5%, можно сделать вывод о достаточной достоверности полученной математической модели.

6.4 Компьютерное моделирование формоизменения металла при раскатке гильз из нержавеющей марок стали в непрерывном стане

Моделирование осуществляется в два этапа. На этапе I исследуется влияние коэффициентов трения на контакте поверхности трубы с валками и оправкой, величины обжатия в вершине калибра и параметров, характеризующих форму ручья калибра, на формоизменение металла в отдельно взятой клетки. На этапе II исследуется влияние скоростного режима и калибровки валков всего непрерывного стана на формоизменение металла.

Фиксированные значения нерегулируемых определяющих параметров для этапа I представлены в таблице 6.14.

Таблица 6.14 – Значения нерегулируемых определяющих параметров для I этапа моделирования

| № п.п. | Параметр | Единица измерения | Значение |
|--------|---|-------------------|-----------|
| 1 | Марка стали | - | 12X18H10T |
| 2 | Температура заготовки | °С | 1100 |
| 3 | Наружный диаметр заготовки | мм | 421 |
| 4 | Толщина стенки заготовки | мм | 38 |
| 5 | Длина заготовки | мм | 1000 |
| 6 | Частота вращения валков | об/мин | 45,7 |
| 7 | Диаметр валков по буртам | мм | 800 |
| 8 | Радиус ручья калибра по вершине | мм | 180 |
| 9 | Эксцентриситет радиуса ручья калибра по вершине | мм | 0 |
| 10 | Угол промежуточной зоны | рад | 0 |

Диапазоны значений регулируемых определяющих параметров для I этапа моделирования представлены в таблице 6.15.

Таблица 6.15 – Диапазоны изменения регулируемых определяющих параметров для I этапа моделирования

| № п.п. | Параметр | Обозначение | Единица измерения | Минимальное значение | Максимальное значение |
|--------|---|-------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | Коэффициент трения на контакте с валком | X_1 | - | 0,2 | 0,4 |

| | | | | | |
|---|---|----------------|-------|-----|-----|
| 2 | Коэффициент трения на контакте с оправкой | X ₂ | - | 0,2 | 0,6 |
| 3 | Диаметр оправки | X ₃ | мм | 324 | 346 |
| 4 | Скорость перемещения оправки | X ₄ | мм/с | 600 | 700 |
| 5 | Угол выпуска калибра | X ₅ | град. | 34 | 44 |

Расчеты в процессе I этапа моделирования выполняются в соответствии с планом дробного факторного эксперимента ДФЭ2⁵⁻² (таблица 6.16).

Таблица 6.16 – План вычислительного эксперимента I этапа моделирования

| Номер опыта | X ₀ | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₂ X ₃ | X ₃ X ₁ | X ₅ |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
| 1 | + | - | - | - | + | + | + | - |
| 2 | + | + | - | - | - | + | - | + |
| 3 | + | - | + | - | - | - | + | + |
| 4 | + | + | + | - | + | - | - | - |
| 5 | + | - | - | + | + | - | - | + |
| 6 | + | + | - | + | - | - | + | - |
| 7 | + | - | + | + | - | + | - | - |
| 8 | + | + | + | + | + ² | + | + | + |

Основным результатом моделирования в рамках I этапа является выявление зависимостей толщины стенки трубы, ее диаметра и угла охвата оправки от величин коэффициентов трения на контакте поверхностей трубы с валками и оправкой, величины обжатия по стенке трубы, скорости перемещения оправки и величины угла выпуска калибра.

Фиксированные значения нерегулируемых определяющих параметров для этапа II представлены в таблице 6.17.

Таблица 6.17 – Значения нерегулируемых определяющих параметров для II этапа моделирования

| № п.п. | Параметр | Номер клетки | | | | | | |
|--------|---|--------------|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | Марка стали | 12X18H10T | | | | | | |
| 2 | Температура заготовки (гильзы), °С | 1100 | | | | | | |
| 3 | Наружный диаметр заготовки (гильзы), мм | 421 | | | | | | |
| 4 | Толщина стенки заготовки (гильзы), мм | 38 | | | | | | |

² «+» означает максимальное значение фактора, «-» означает минимальное значение фактора

| | | | | | | | | |
|----|---|--------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 5 | Длина заготовки (гильзы), мм | 2000 | | | | | | |
| 6 | Частота вращения валков, об/мин | 19,5 | - | 52,4 | 76,33 | 80,85 | 95,6 | 126,6 |
| 7 | Диаметр валков по буртам, мм | 925 | 930 | 925 | 828 | 808 | 729 | 689 |
| 8 | Радиус ручья калибра по вершине, мм | 196,55 | - | 182,6 | 181,0 | 180,3 | 180,0 | 180,0 |
| 9 | Эксцентриситет радиуса ручья калибра по вершине, мм | -4,95 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | Угол выпуска калибра, град. | 43 | | | 44 | | 45 | |
| 11 | Угол промежуточной зоны, град. | 0 | - | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | Коэффициент трения на контакте с валком | 0,3 | | | | | | |
| 13 | Коэффициент трения на контакте с оправкой | 0,3 | | | | | | |
| 14 | Диаметр оправки, мм | 336 | | | | | | |

Диапазоны значений регулируемых определяющих параметров для II этапа моделирования представлены в таблице 6.18.

Таблица 6.18 – Диапазоны изменения регулируемых определяющих параметров для II этапа моделирования

| № п.п. | Параметр | Обозначение | Единица измерения | Минимальное значение | Максимальное значение |
|--------|--|-------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | Скорость перемещения оправки | X_1 | мм/с | 600 | 900 |
| 2 | Радиус по вершине калибра 2-й клетки, мм | X_2 | мм | 185 | 190 |
| 3 | Эксцентриситет радиуса по вершине калибра 2-й клетки, мм | X_3 | мм | 93 | 100 |
| 4 | Угол | X_4 | градус | 34 | 44 |
| 5 | Частота вращения валков 2-й клетки | X_5 | об/мин | 45 | 60 |

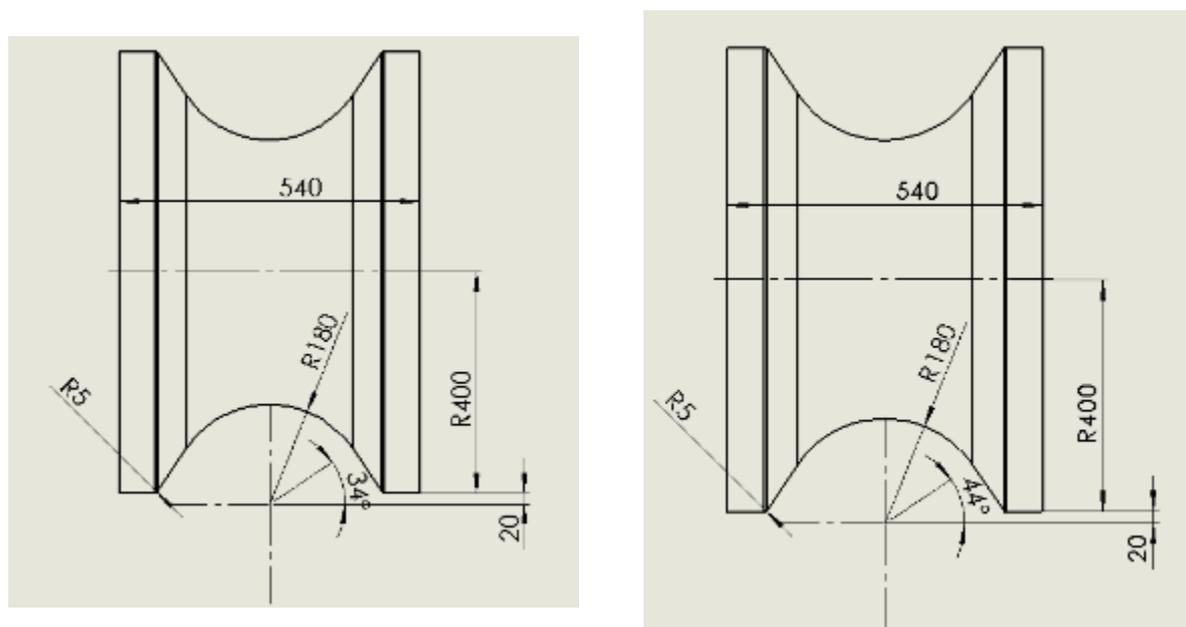
Расчеты в процессе II этапа моделирования также выполняются в соответствии с планом дробного факторного эксперимента ДФЭ⁵⁻² (таблица 6.16).

В главах 2 и 3 получен комплекс экспериментальной информации, который может быть использован при определении формоизменения и

энергосиловых параметров процесса непрерывной раскатки гильз из нержавеющей марки стали аустенитного класса на непрерывных раскатных станах с контролируемо-перемещаемой оправкой.

Поэтому с целью проверки данных фактов, а также для более глубокого изучения необходимо провести компьютерное моделирование.

Для моделирования созданы 3d модели исследуемых калибровок валков (рисунок 6.31).



а)

б)

а) Угол выпуска – 34° б) Угол выпуска – 44°

Рисунок 6.31 – Исследуемые варианты калибровки валков

По результатам моделирования определялись геометрические параметры гильзы (толщина стенки трубы по периметру при выходе из очага деформации, ширина трубы в разьеме калибра).

На рисунке 6.32 представлен общий вид продольных и поперечных сечений, полученных в ходе моделирования. Для оценки толщины стенки трубы на выходе из очага деформации исключали 50% от общей длины (исследовалась только средняя часть трубы).

Измерения проводились с помощью «Программы для расчета геометрических параметров труб при моделировании в среде QForm» [157]. Для оценки был выбран диапазон и рассчитано 100 сечений. В каждом сечении определяли ширину заготовки в выпуске калибра. Значение средней толщины стенки выдается автоматически.

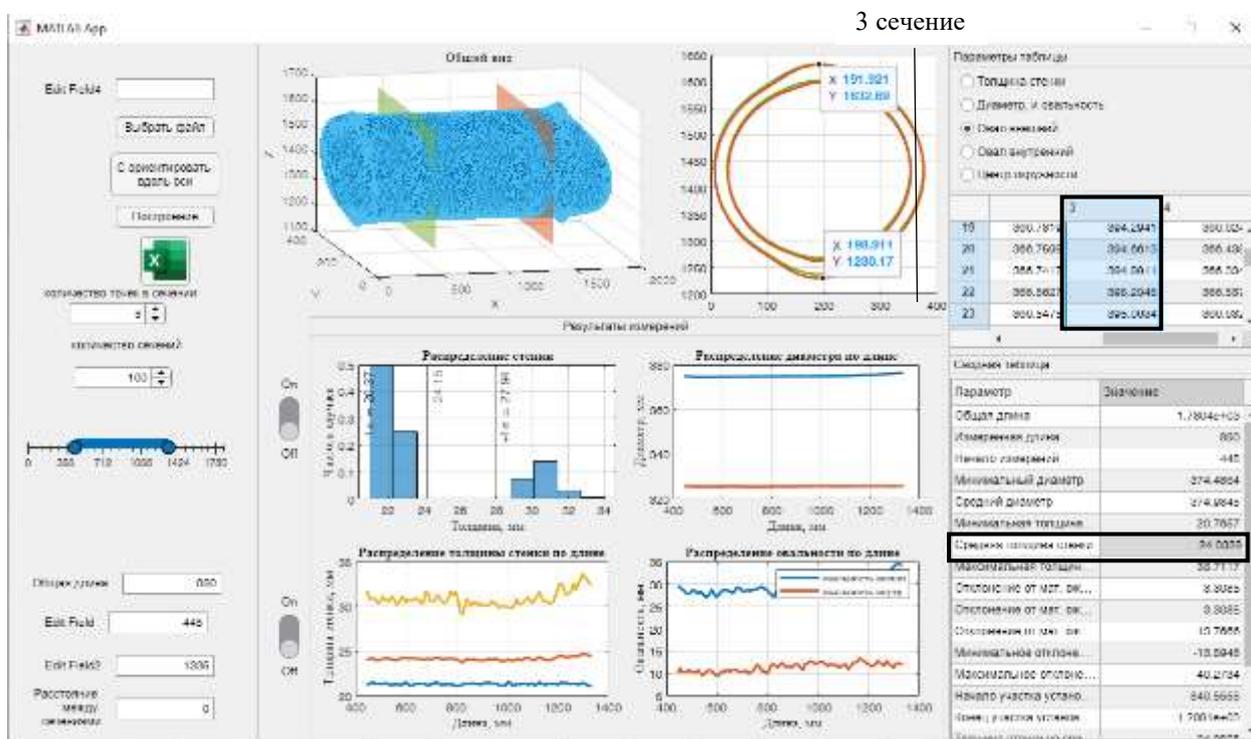


Рисунок 6.32 – Общий вид полученной гильзы

Результаты измерений и параметры для регрессионного анализа представлены в таблице 6.19.

Таблица 6.19 – Результаты моделирования

| Номер опыта | Y ₁ | Y ₂ | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ |
|-------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------------------------|-----------------------|
| | Средняя толщина стенки трубы, мм | Ширина трубы на выходе из ОД, мм | Коэффициент трения на валках | Коэффициент трения на оправке | Диаметр оправки, мм | Скорость удержания оправки, мм/с | Угол выпуска, градусы |
| 1 | 24,0879 | 394,99 | 0,2 | 0,2 | 324 | 700 | 34 |
| 2 | 24,7526 | 421,16 | 0,6 | 0,2 | 324 | 600 | 44 |
| 3 | 24,7526 | 407,03 | 0,2 | 0,4 | 324 | 600 | 44 |
| 4 | 24,8254 | 406 | 0,6 | 0,4 | 324 | 707 | 34 |
| 5 | 13,5129 | 381,3 | 0,2 | 0,2 | 346 | 700 | 44 |
| 6 | 12,96 | 411,56 | 0,6 | 0,2 | 346 | 600 | 34 |
| 7 | 14,0716 | 398,59 | 0,2 | 0,4 | 346 | 600 | 34 |
| 8 | 16,4969 | 462,14 | 0,6 | 0,4 | 346 | 700 | 44 |

По полученным данным произвели статистический анализ результатов вычислительного эксперимента данных по изменению толщины стенки и ширины трубы на выходе из очага деформации. С помощью программы MATLAB³ была построена регрессионная зависимость, а также выбраны наиболее значимые факторы.

В таблице 6.20 представлены полученные коэффициенты.

Таблица 6.20 – Коэффициенты к уравнению регрессии

| Параметр | Коэффициент | |
|----------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | (средняя толщина стенки трубы) | (ширина трубы на выходе из ОД) |
| Свободный член | 4,68 | -0,14 |
| X ₁ | 0,04 | 0,32 |
| X ₂ | 0,15 | 0,34 |
| X ₃ | -5,2 | 0,52 |
| X ₄ | 0,062 | 0,02 |
| X ₅ | -0,23 | 1,63 |

Стоит отметить, что перекрестное взаимодействие параметров понижает адекватность полученных регрессионных зависимостей. Поэтому было выбрано уравнение, где используются только основные параметры.

³ Высокоуровневый интерпретируемый язык программирования вместе с пакетом прикладных программ и интегрированной средой для разработки, выполнения инженерных и математических расчетов, работы с матричными базами данных, визуализации.

Таким образом, принято следующее уравнение регрессии для толщины стенки трубы с коэффициентом достоверности $R^2 = 0.983$:

$$y = 4,68 + 0,04X_1 + 0,15X_2 - 5,2X_3 + 0,062X_4 - 0,23X_5 \quad (6.80)$$

где X_1 – коэффициент трения на валках; X_2 – коэффициент трения на оправке; X_3 – диаметр оправки; X_4 – скорость удержания оправки; X_5 – угол выпуска калибра.

Анализируя уравнение по значениям коэффициента (6.80) видно, что на изменения толщины стенки трубы наиболее значимое влияние оказывают коэффициент трения на валках и угол выпуска калибра.

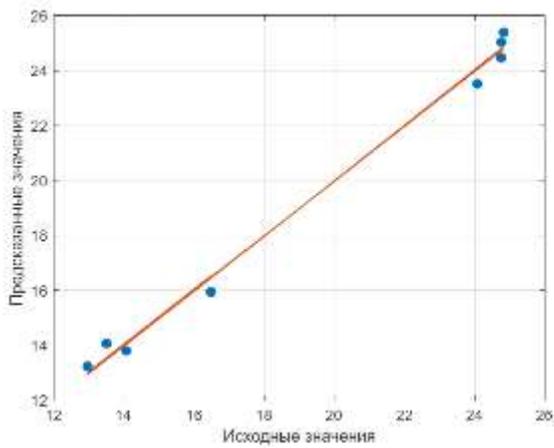
Для ширины трубы на выходе из ОД получено следующее уравнение с коэффициентом достоверности $R^2 = 0.821$:

$$y = -0,14 + 0,328X_1 + 0,34X_2 - 0,52X_3 + 0,02X_4 - 1,6326X_5 \quad (6.81)$$

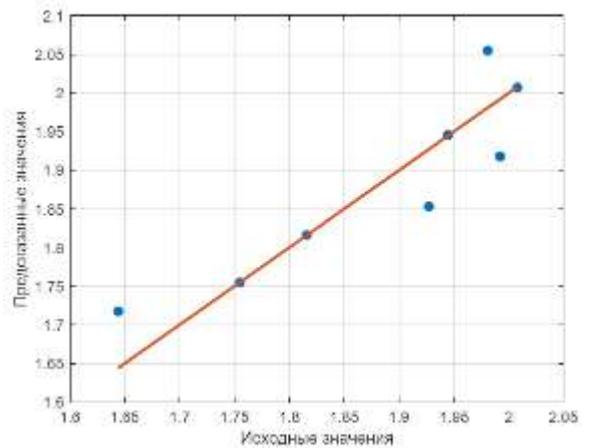
где X_1 – коэффициент трения на валках; X_2 – коэффициент трения на оправке; X_3 – диаметр оправки; X_4 – скорость удержания оправки; X_5 – угол выпуска калибра.

Анализируя уравнение по значениям коэффициента (6.81) видно, что на ширину трубы на выходе из ОД с наибольшей степенью влияют коэффициент трения на валках, диаметр оправки, угол выпуска калибра.

Для проверки линейности зависимостей и достоверности полученных результатов построим графики соответствия предсказанных значений и исходных (рисунок 6.33).



а)



б)

а) для средней толщины стенки б) для ширины трубы на выходе из ОД

Рисунок 6.33 – Распределение отклонений предсказанных значений толщины стенки от фактических значений

Так как важным параметром, характеризующим формоизменения, является ширина трубы на выходе из ОД, произведем анализ уравнения (2) с определенными параметрами (рисунок 6.35). Так как параметры из таблицы 6 для регрессионного анализа были переведены в относительные величины стоит принять, что «у» это отношение ширины трубы на выходе из ОД к ширине калибра (рисунок 6.34).

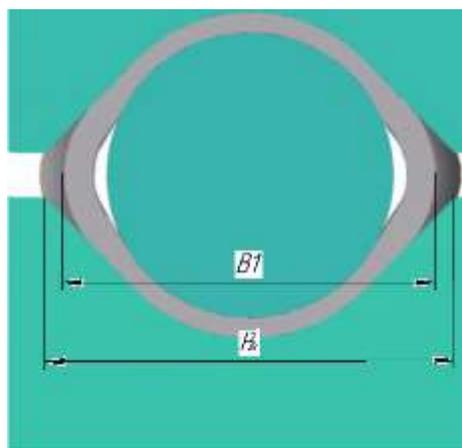


Рисунок 6.34 – Ширина трубы на выходе из ОД

Параметр χ_5 – отношение радиуса калибра к ширине калибра, который варьируется углом выпуска калибра.

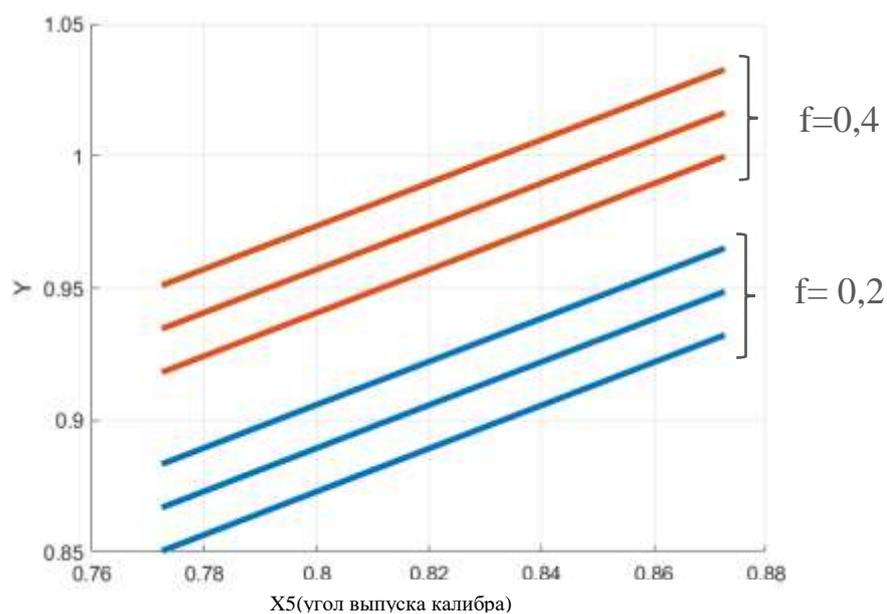


Рисунок 6.35 – Зависимость изменения ширины трубы на выходе из ОД при фиксированных параметрах коэффициента трения на валках (0,5) и на оправке (0,2; 0,4)

Анализируя рисунок 6.35 видно, что при уменьшении угла выпуска калибра происходит увеличение ширины трубы на выходе из ОД, так как происходит переполнение калибра. Поэтому более оптимальным в данном случае является использование угла 44 градуса. Также следует отметить, что при увеличении коэффициента трения на оправке также происходит увлечение ширины трубы на выходе из ОД. Однако при комбинации параметров максимального трения на валках и максимального обжатия металл течет не только в зоны выпуска калибра, но и в продольном направлении (рисунок 6.36). Такой же результат получился в ходе физического эксперимента.

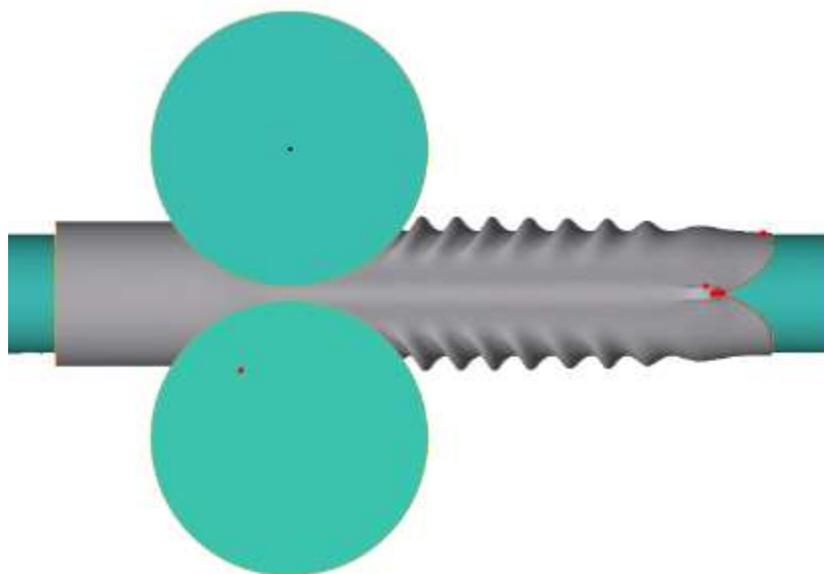


Рисунок 6.36 – Скриншот модели

Во втором этапе моделирования провели исследования процесса непрерывной раскатки гильз во всех клетях стана МРМ. Варьирование параметров выполнялись в соответствии с планом дробного факторного эксперимента ДФЭ⁵⁻² (таблица 6.21).

Таблица 6.21 – План вычислительного эксперимента 2 этапа моделирования

| Номер опыта | X ₀ | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₂ X ₃ | X ₃ X ₁ | X ₅ |
|-------------|----------------|----------------------------|--|---------------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| | | Скорость удержания оправки | Радиус по вершине калибра 2-й клетки, мм | Эксцентриситет калибра 2-й клетки, мм | Угол выпуска | | | Частота вращения валков 2-й клетки |
| 1 | + | 600 | 185 | 5 | 44 | + | + | 45 |
| 2 | + | 900 | 185 | 5 | 34 | + | - | 60 |
| 3 | + | 600 | 190 | 5 | 34 | - | + | 60 |
| 4 | + | 900 | 190 | 5 | 44 | - | - | 45 |
| 5 | + | 600 | 185 | 0 | 44 | - | - | 60 |
| 6 | + | 900 | 185 | 0 | 34 | - | + | 45 |
| 7 | + | 600 | 190 | 0 | 34 | + | - | 45 |
| 8 | + | 900 | 190 | 0 | 44 | + | + | 60 |

Параметрами отклика II этапа моделирования являются:

1. Наружный диаметр трубы на выходе из каждой клетки непрерывного стана, замеренный в 16 точках по периметру поперечного сечения, две из которых соответствуют вершине калибра.

2. Угол охвата трубой оправки на выходе из каждой клетки непрерывного стана.

3. Толщина стенки трубы на выходе из каждой клетки непрерывного стана, замеренная в 16 точках по периметру поперечного сечения, две из которых соответствуют вершине калибра.

В модели были приняты следующие допущения:

– коэффициент трения между валками и заготовкой: 0,4 по закону Зибеля;

– коэффициент трения между оправкой и заготовкой: графит + вода;

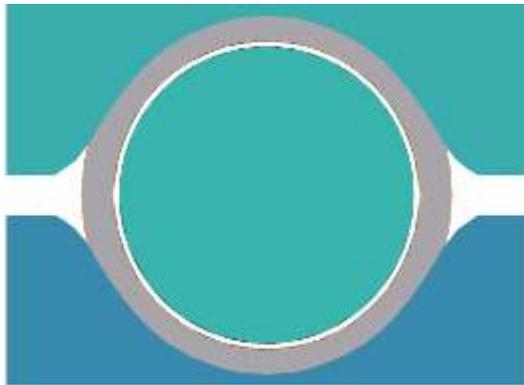
– материал и температура инструмента: 40Х, абсолютно жесткий; 200°С;

– начальная температура заготовки: 1100°С;

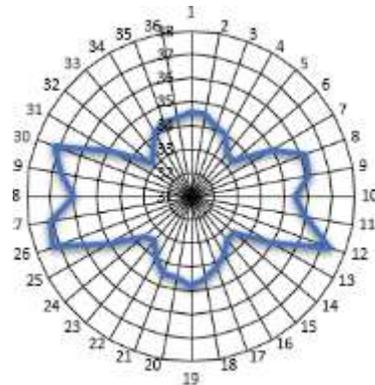
– начальная скорость заготовки сообщается до момента захвата ее валками первой клетки;

– материал заготовки: 08-12Х18Н10Т.

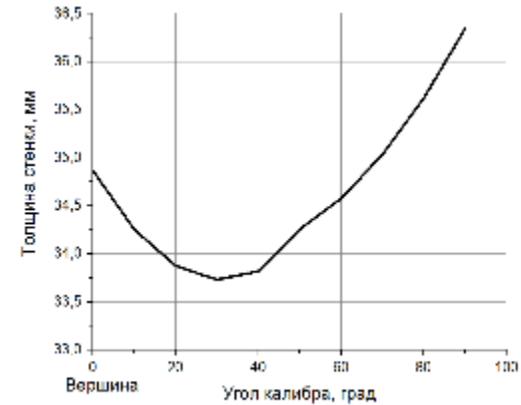
Анализ геометрических характеристик раската по клетям производился для случая установившегося процесса, то есть в момент времени, когда заготовка находилась во всех клетях одновременно. Для этого полученная конечно-элементная модель QForm раската обрабатывалась с помощью «Программы для расчета геометрических параметров труб при моделировании в среде Qform» [157]. По результатам обработки строились лепестковые диаграммы изменения средней толщины стенки по периметру калибров, графики формирования толщины стенки. Результаты, проведенного анализа, представлены на рисунках 6.37-6.68. Так как изменения параметров происходит только во второй клетки, с целью экономии машинного времени, обработка параметров осуществлялась в первых 4 клетях стана МРМ.



(a)



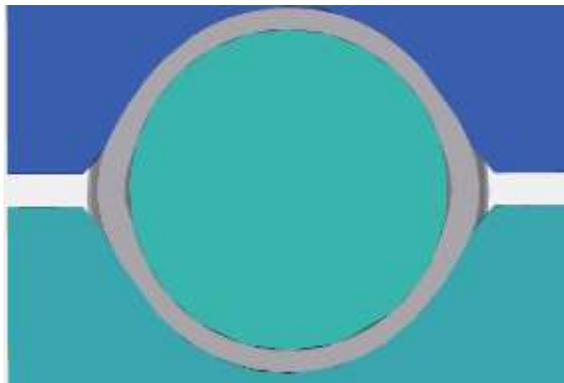
(б)



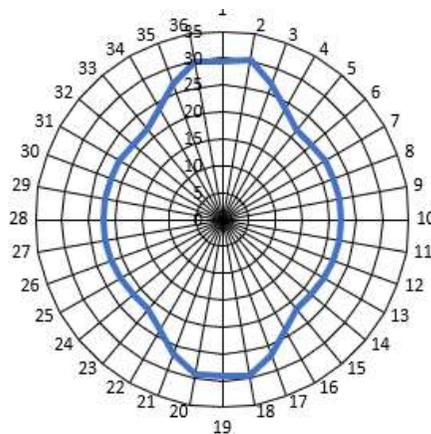
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

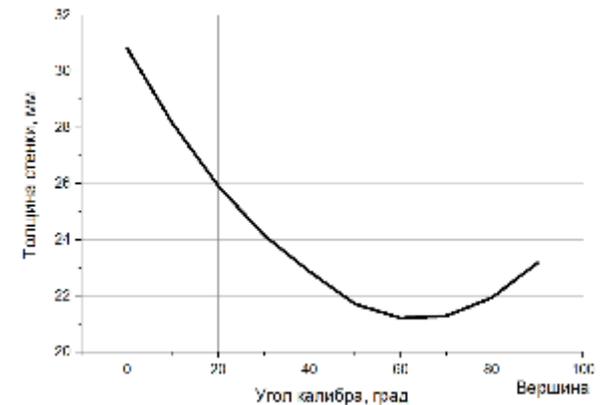
Рисунок 6.37 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в первой клетке стана для 1 модели по данным QForm



(a)



(б)



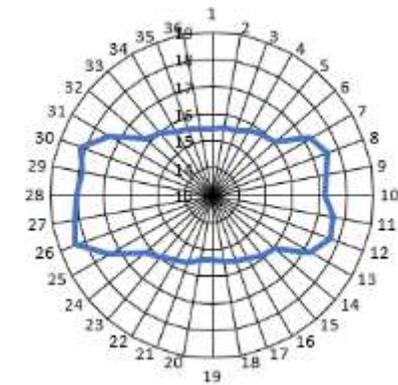
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

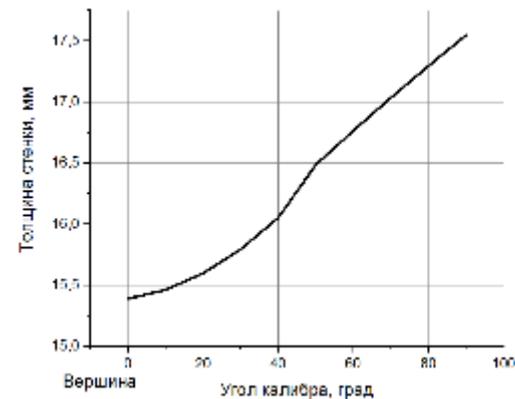
Рисунок 6.38 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб во второй клетке стана для 1 модели по данным QForm



(a)



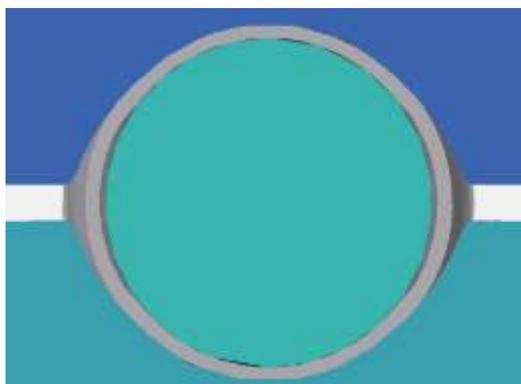
(б)



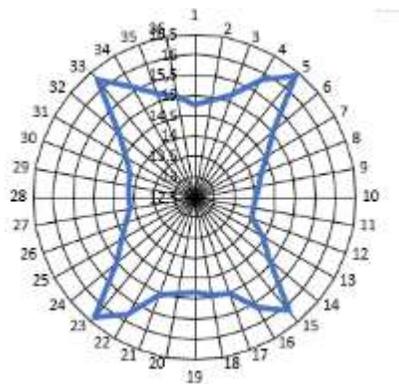
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

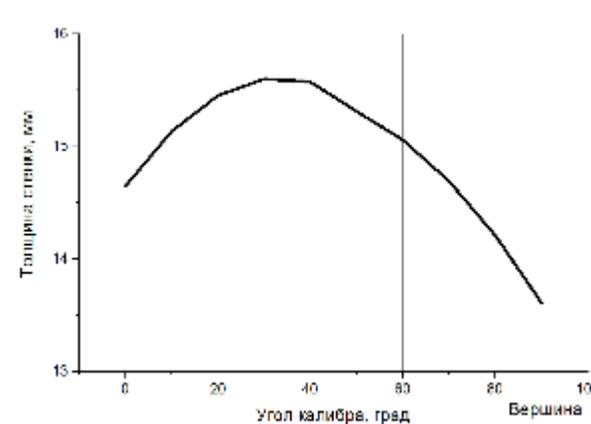
Рисунок 6.39– Геометрические характеристики процесса раскатки труб в третьей клетке стана для 1 модели по данным QForm



(a)



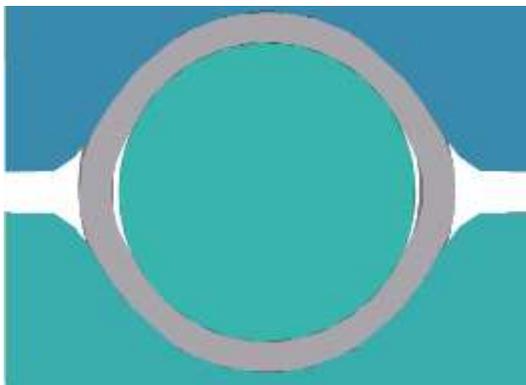
(б)



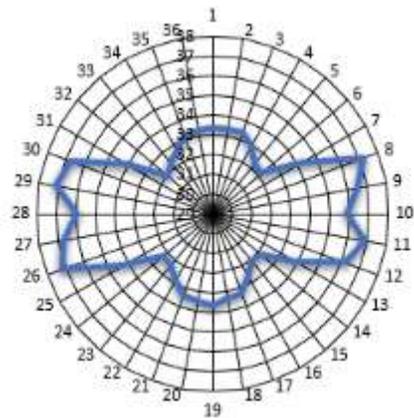
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

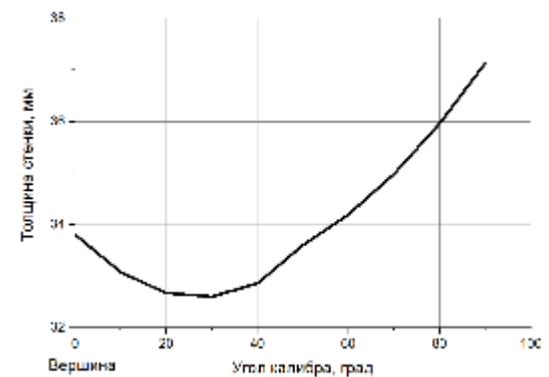
Рисунок 6.40 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в четвертой клетке стана для 1 модели по данным QForm



(a)



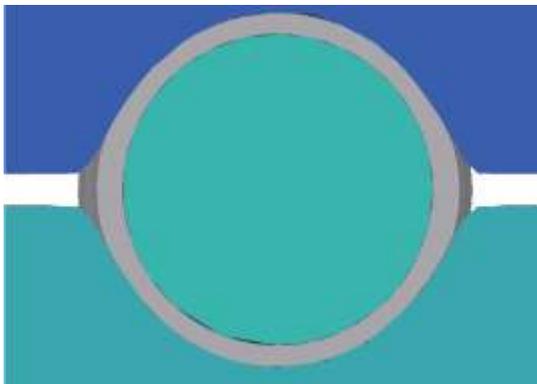
(б)



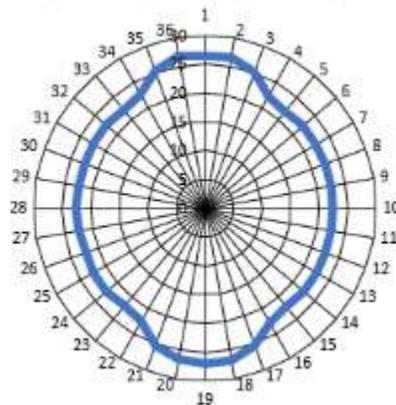
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

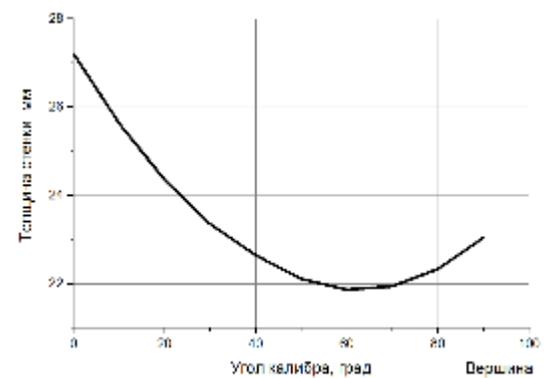
Рисунок 6.41 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в первой клетке стана для 2 модели по данным QForm



(a)



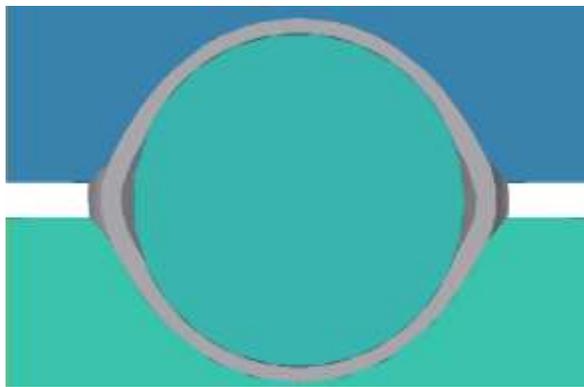
(б)



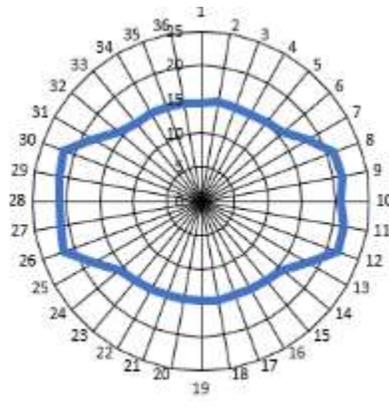
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

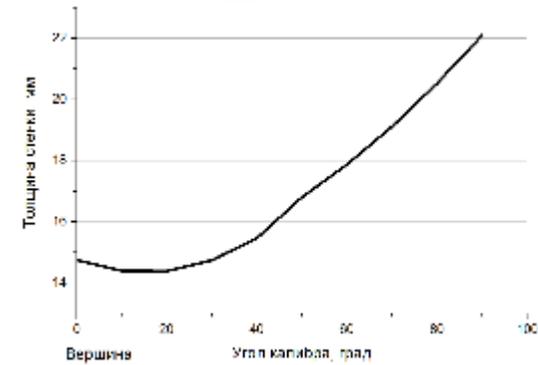
Рисунок 6.42 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб во второй клетке стана для 2 модели по данным QForm



(a)



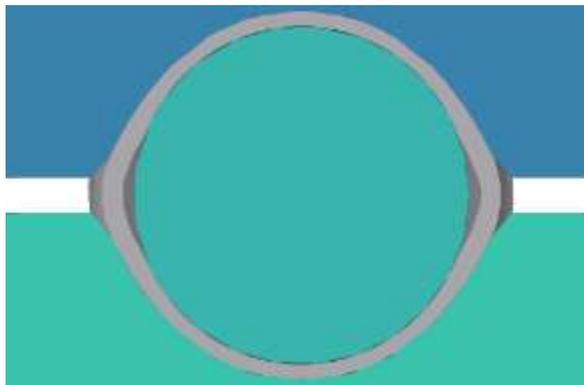
(б)



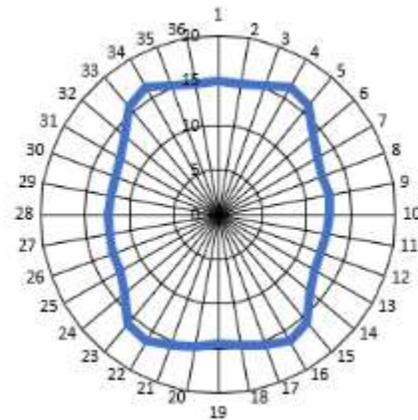
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

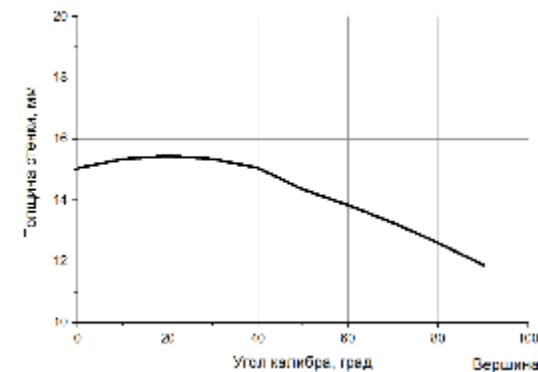
Рисунок 6.43 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в третьей клетке стана для 2 модели по данным QForm



(a)



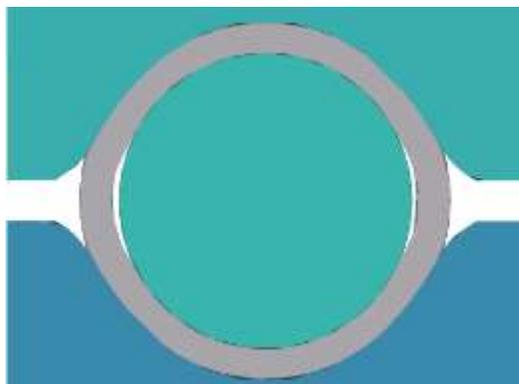
(б)



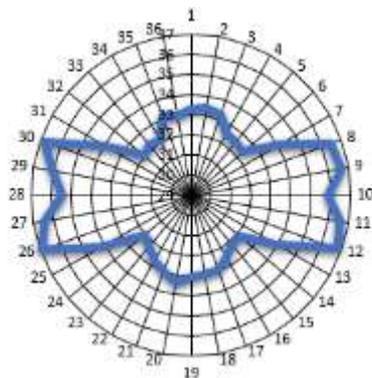
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

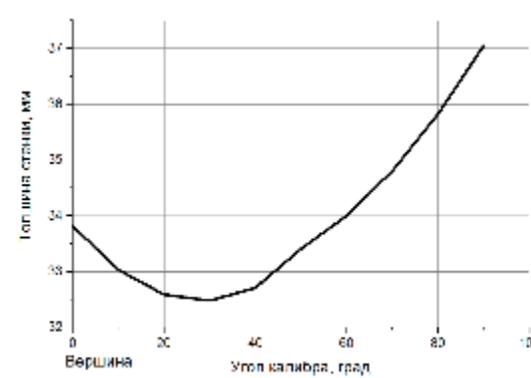
Рисунок 6.44 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в четвертой клетке стана для 2 модели по данным QForm



(a)



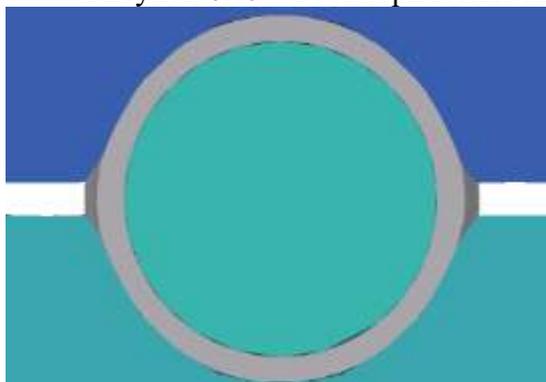
(б)



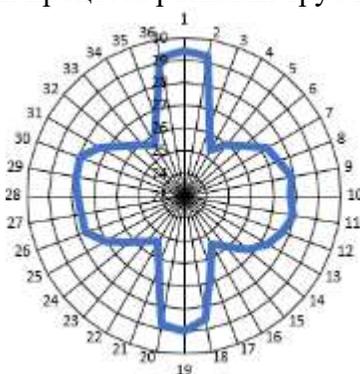
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

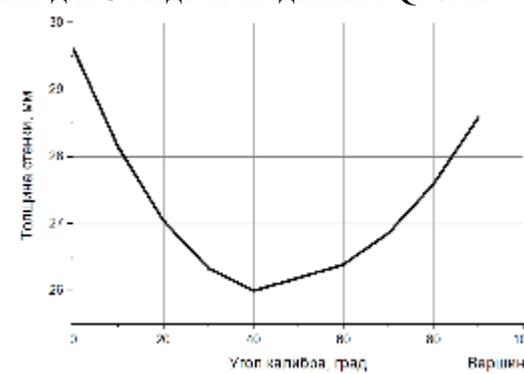
Рисунок 6.45 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в первой клетке стана для 3 модели по данным QForm



(a)



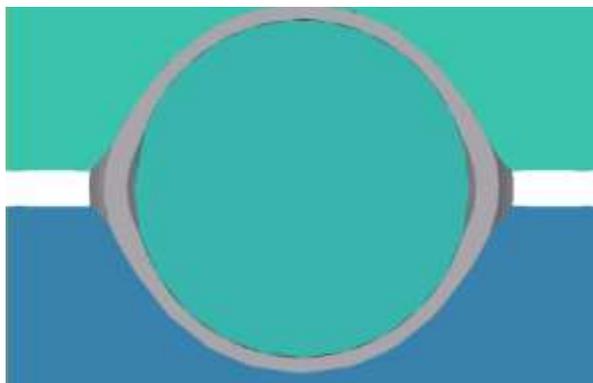
(б)



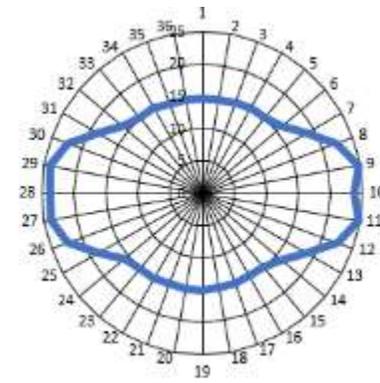
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

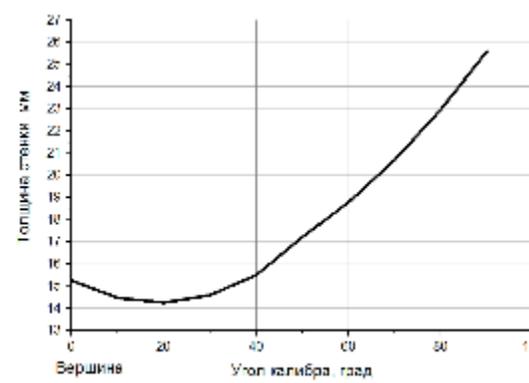
Рисунок 6.46 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб во второй клетке стана для 3 модели по данным QForm



(a)



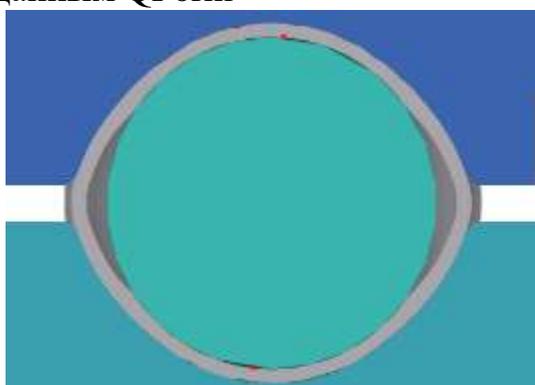
(б)



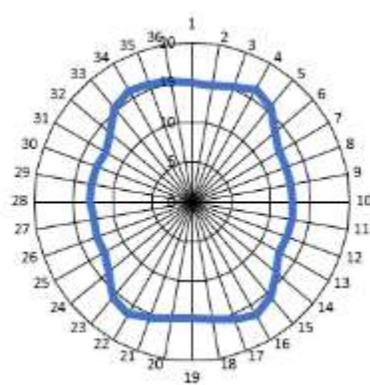
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

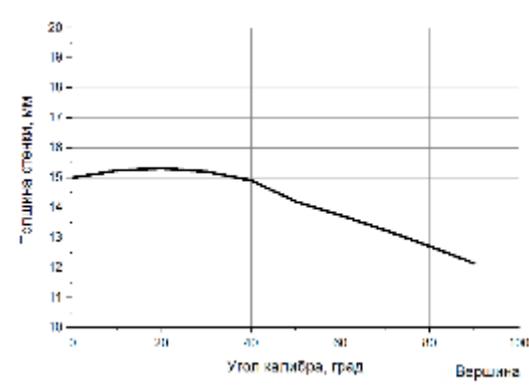
Рисунок 6.47 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в третьей клетке стана для 3 модели по данным QForm



(a)



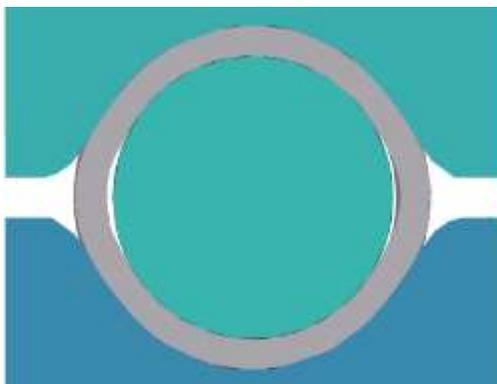
(б)



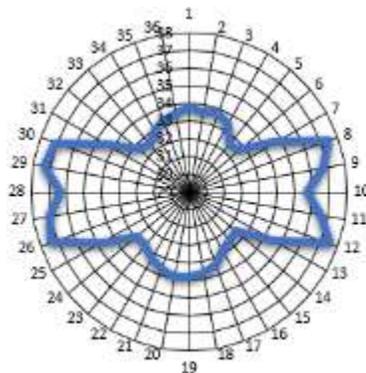
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

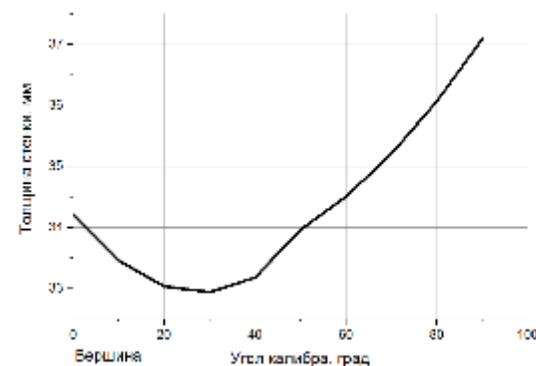
Рисунок 6.48 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в четвертой клетке стана для 3 модели по данным QForm



(a)



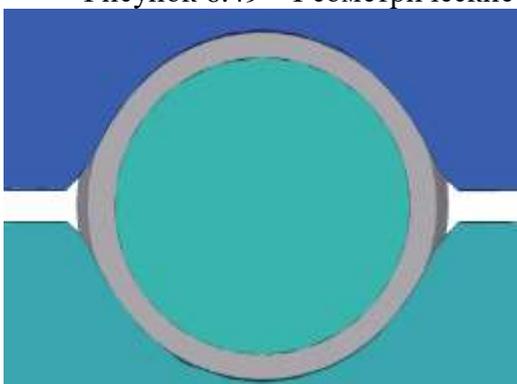
(б)



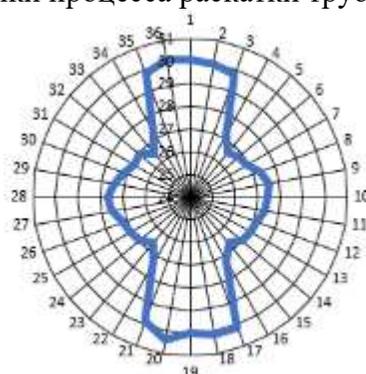
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

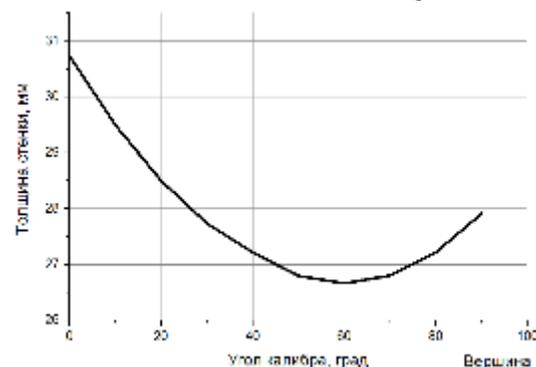
Рисунок 6.49 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в первой клетке стана для 4 модели по данным QForm



(a)



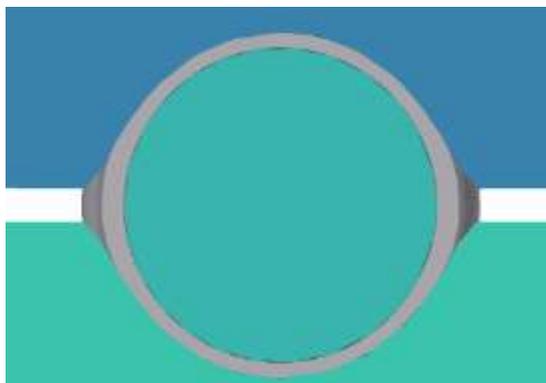
(б)



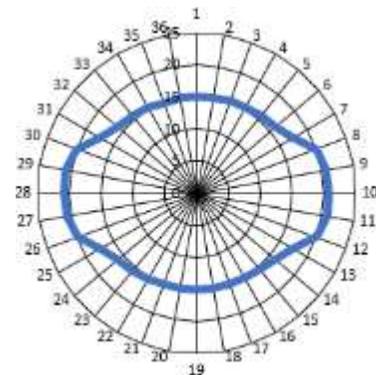
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

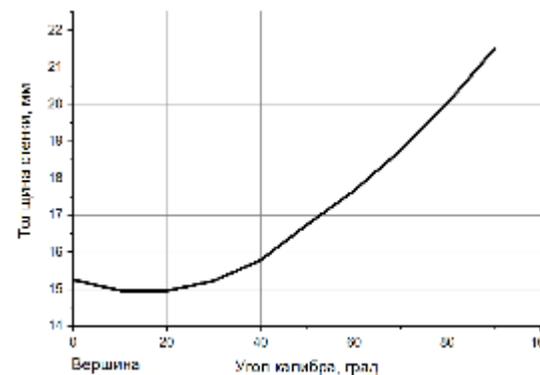
Рисунок 6.50 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб во второй клетке стана для 4 модели по данным QForm



(a)



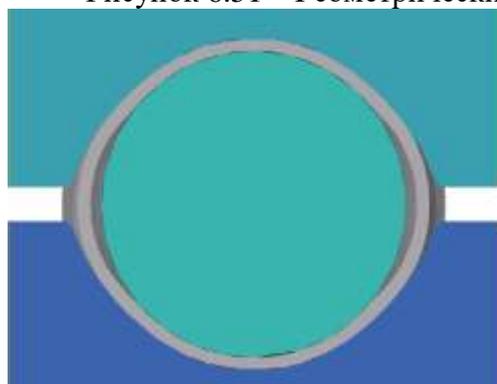
(б)



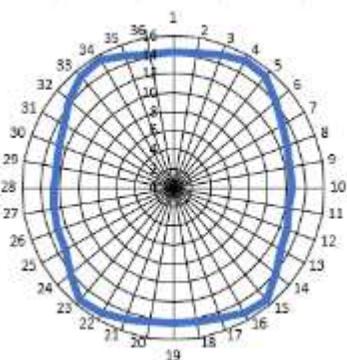
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

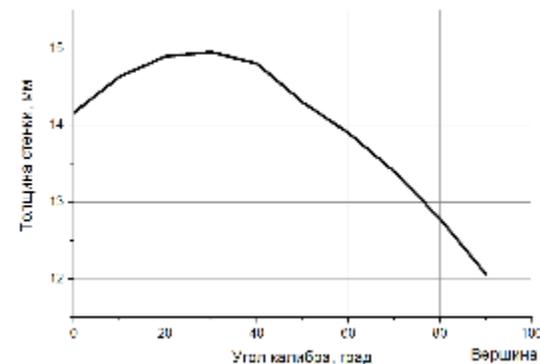
Рисунок 6.51 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в третьей клетке стана для 4 модели по данным QForm



(a)



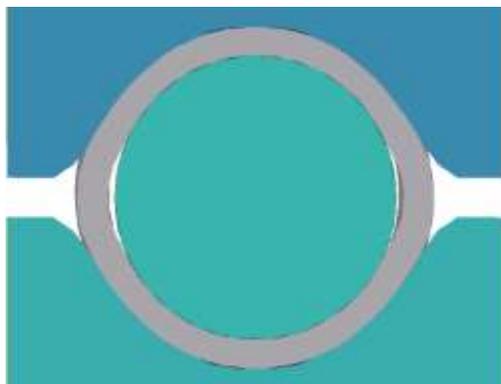
(б)



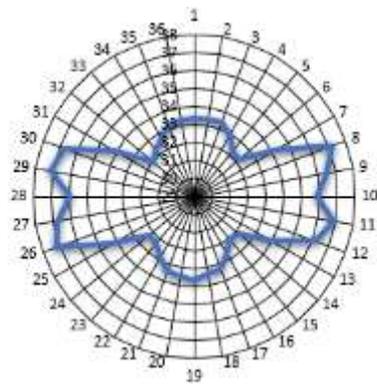
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

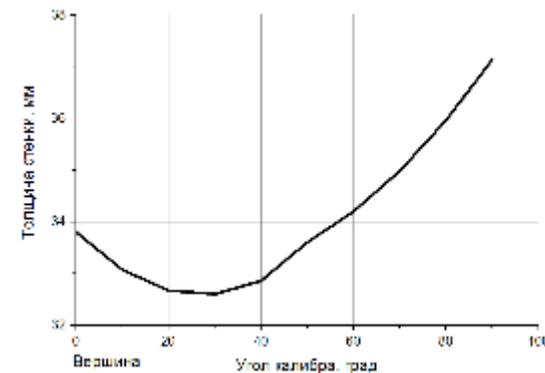
Рисунок 6.52 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в четвертой клетке стана для 4 модели по данным QForm



(a)



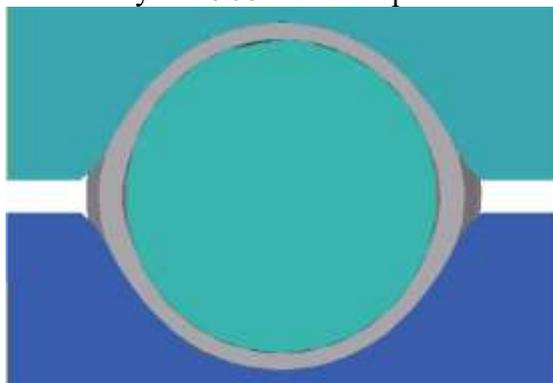
(б)



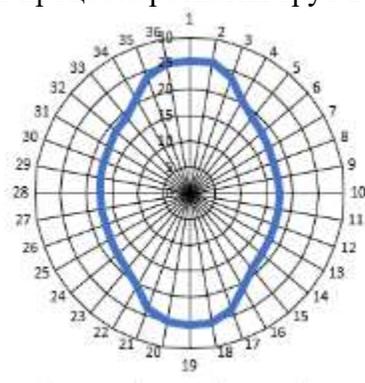
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

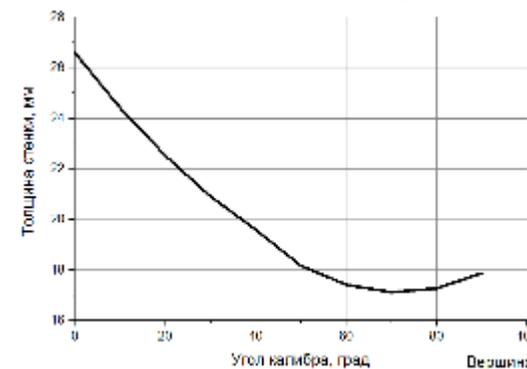
Рисунок 6.53 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в первой клетке стана для 5 модели по данным QForm



(a)



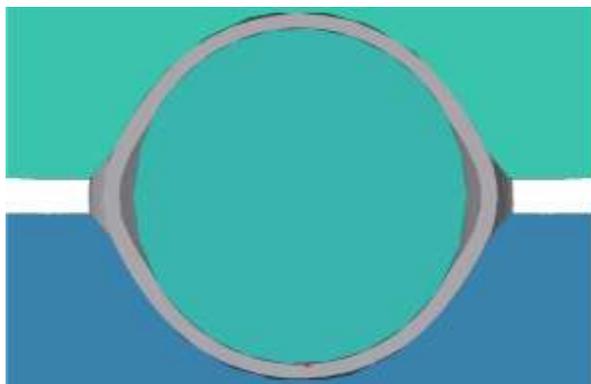
(б)



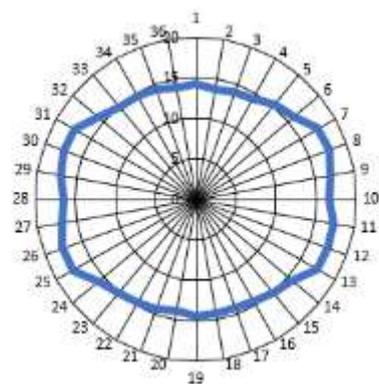
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

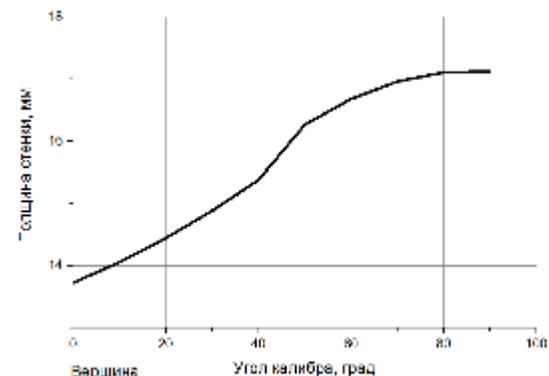
Рисунок 6.54 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб во второй клетке стана для 5 модели по данным QForm



(a)



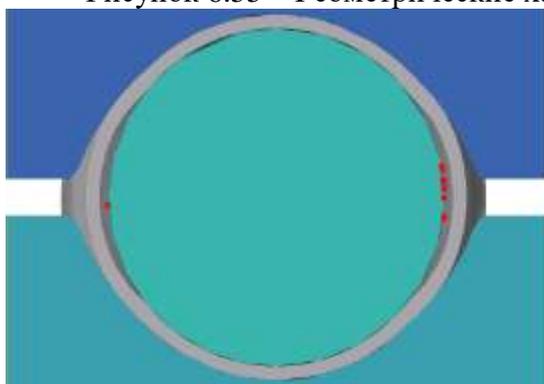
(б)



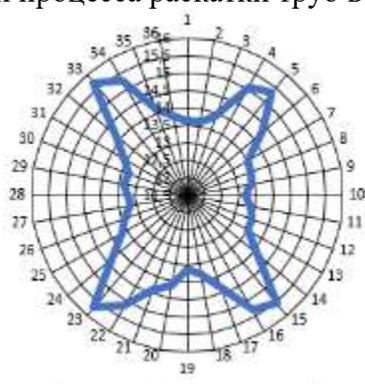
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

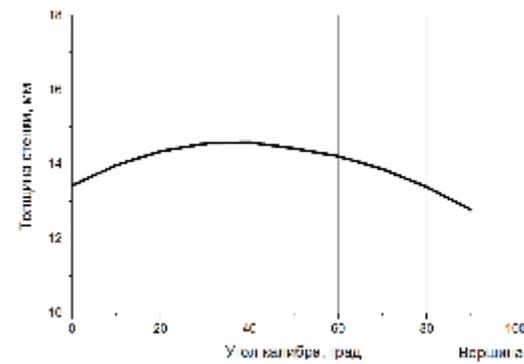
Рисунок 6.55 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в третьей клетке стана для 5 модели по данным QForm



(a)



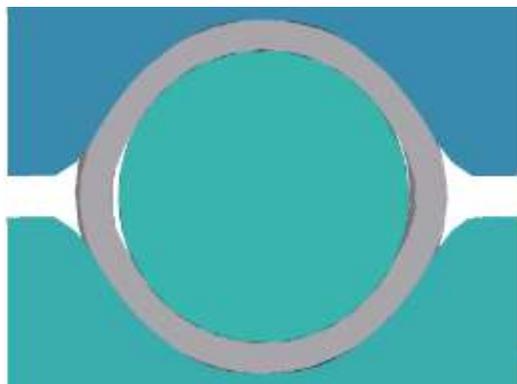
(б)



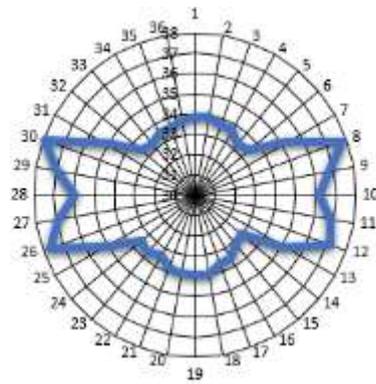
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

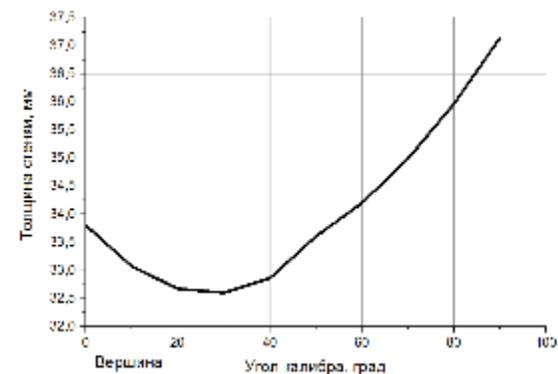
Рисунок 6.56 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в четвертой клетке стана для 5 модели по данным QForm



(a)



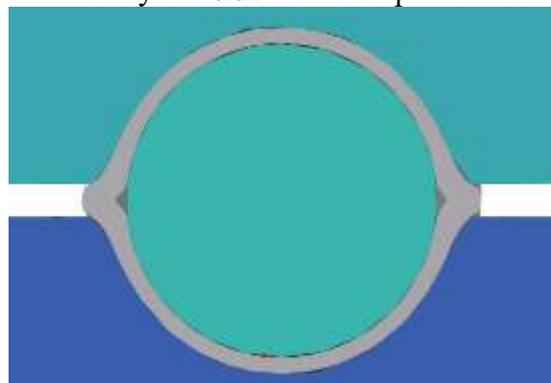
(б)



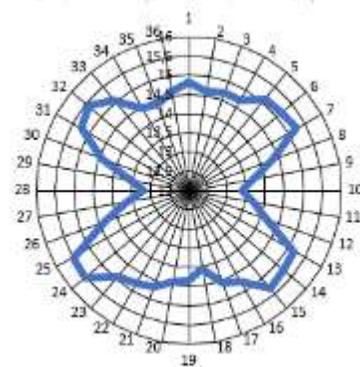
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

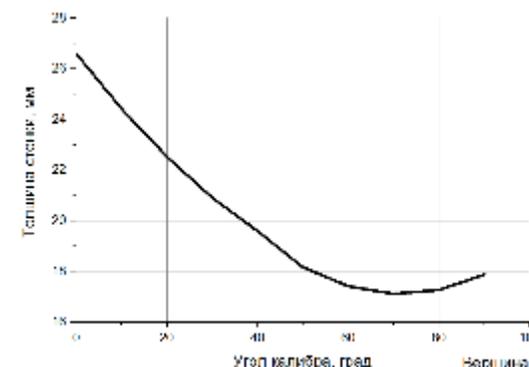
Рисунок 6.57 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в первой клетке стана для 6 модели по данным QForm



(a)



(б)



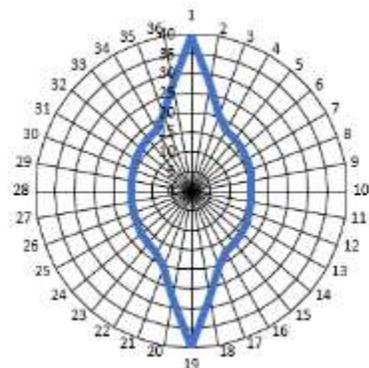
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

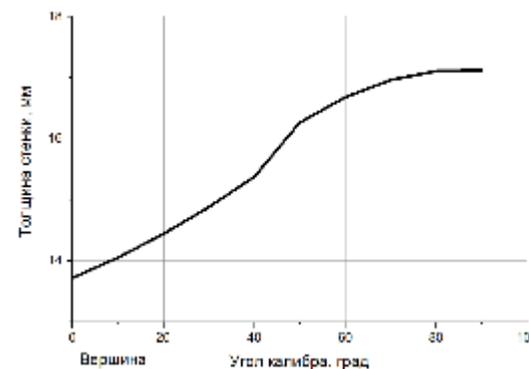
Рисунок 6.58 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб во второй клетке стана для 6 модели по данным QForm



(a)



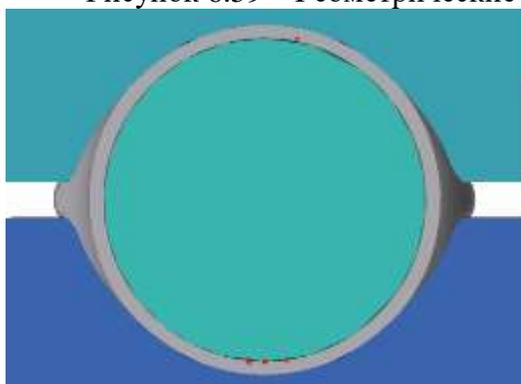
(б)



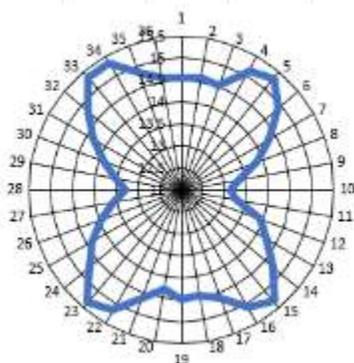
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

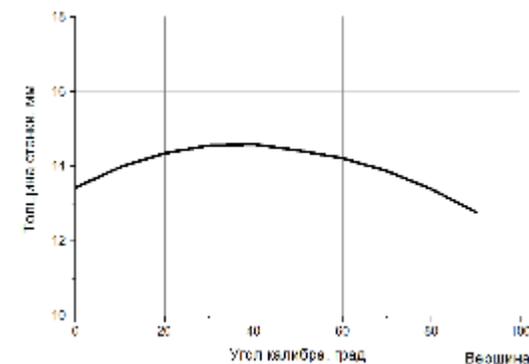
Рисунок 6.59 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в третьей клетке стана для 6 модели по данным QForm



(a)



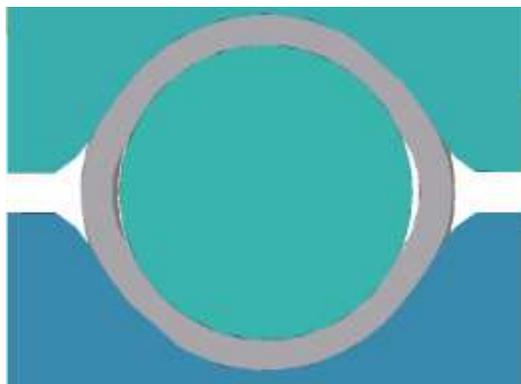
(б)



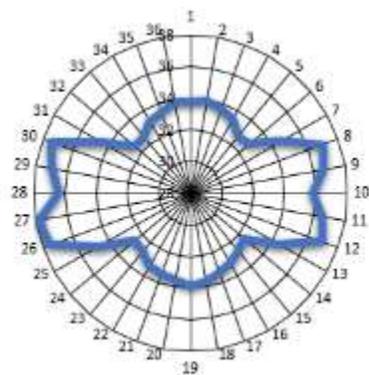
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

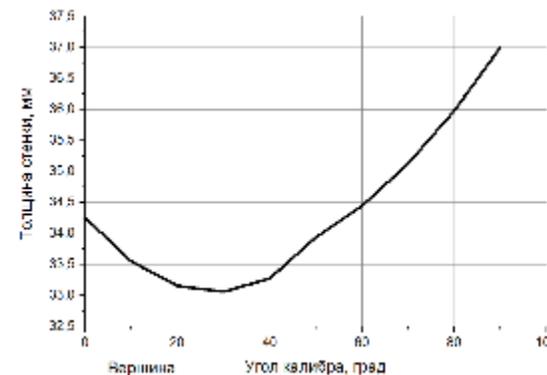
Рисунок 6.60 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в четвертой клетке стана для 6 модели по данным QForm



(a)



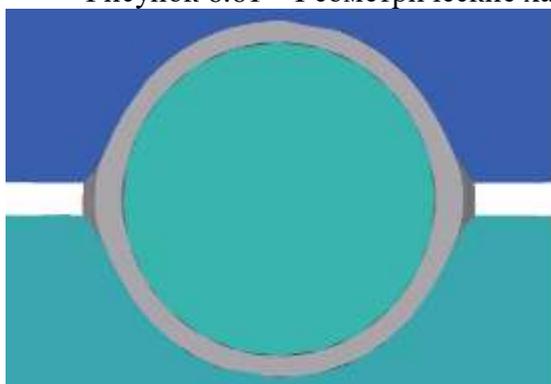
(б)



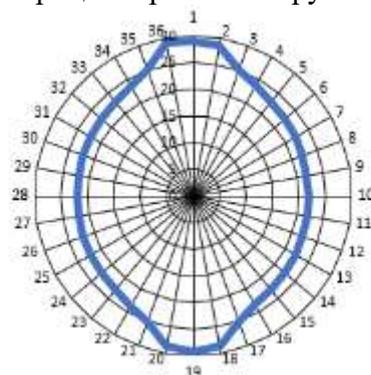
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

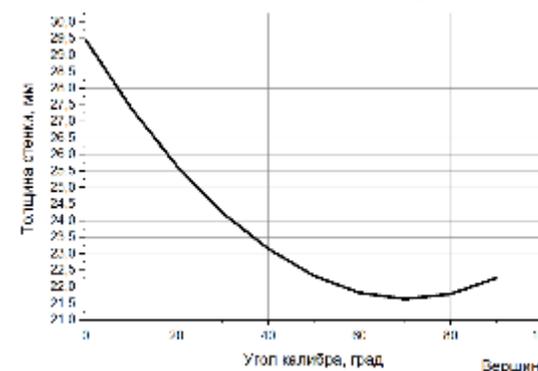
Рисунок 6.61 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в первой клетке стана для 7 модели по данным QForm



(a)



(б)



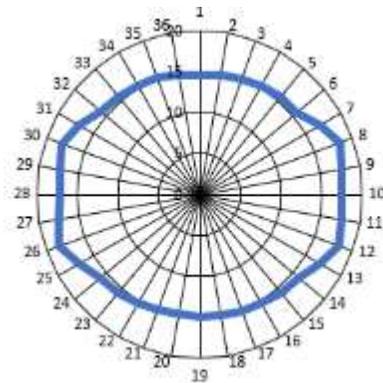
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

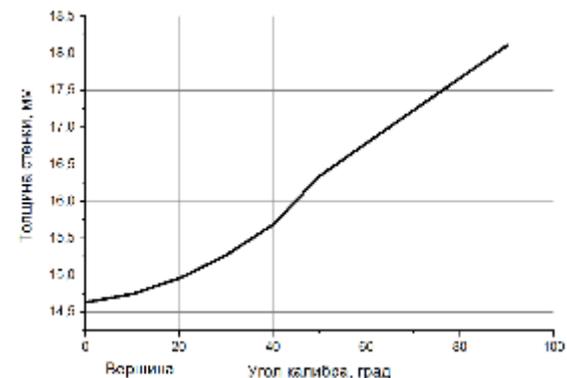
Рисунок 6.62 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб во второй клетке стана для 7 модели по данным QForm



(a)



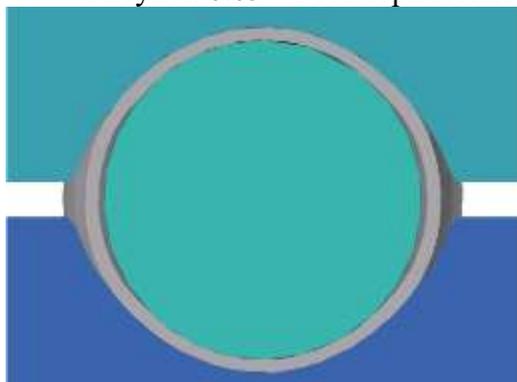
(б)



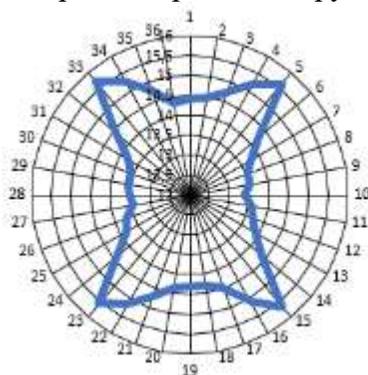
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

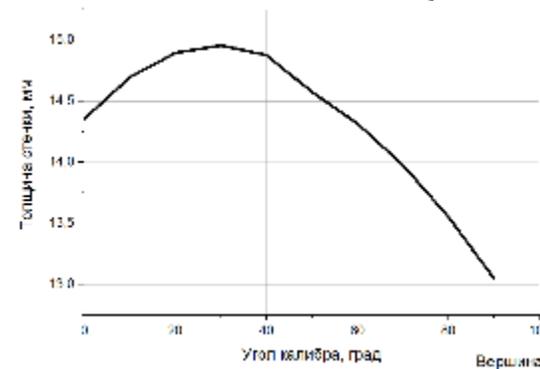
Рисунок 6.63 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в третьей клетке стана для 7 модели по данным QForm



(a)



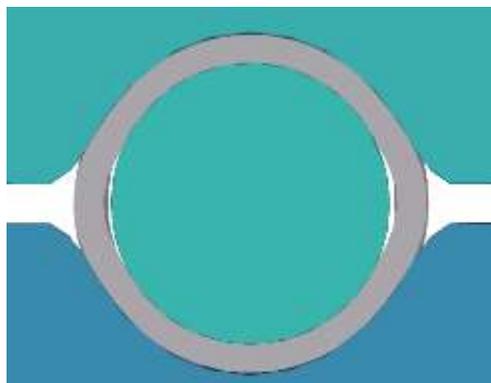
(б)



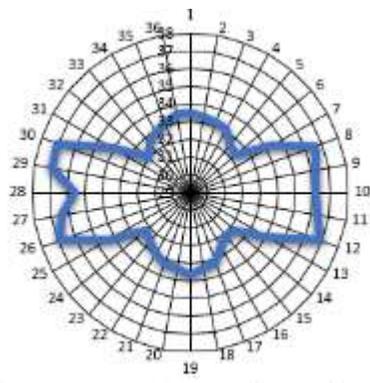
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

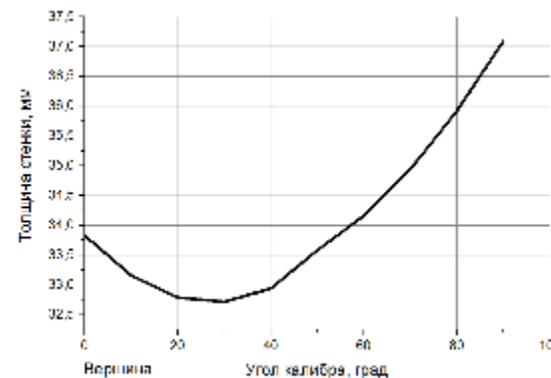
Рисунок 6.64 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в четвертой клетке стана для 7 модели по данным QForm



(a)



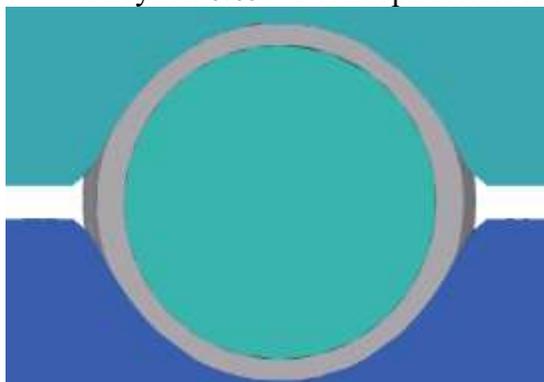
(б)



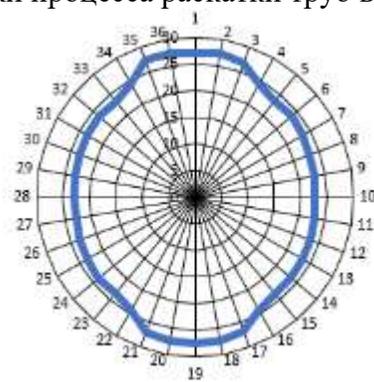
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

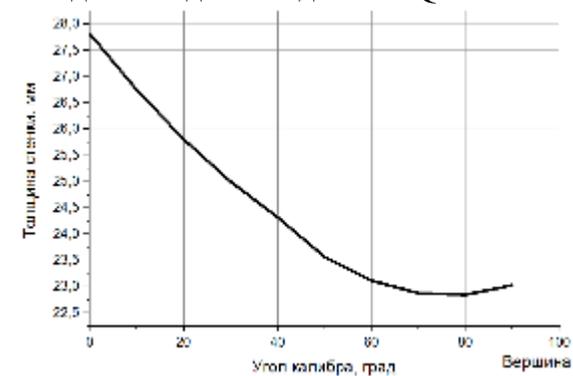
Рисунок 6.65 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в первой клетке стана для 8 модели по данным QForm



(a)



(б)



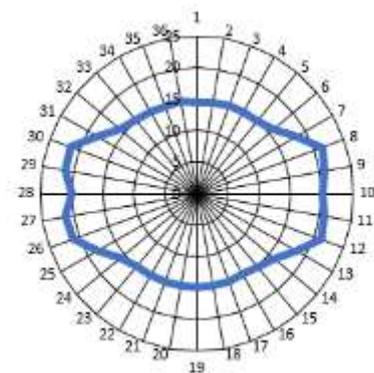
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

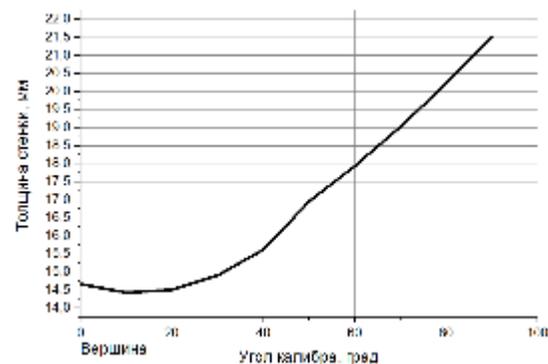
Рисунок 6.66 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб во второй клетке стана для 8 модели по данным QForm



(a)



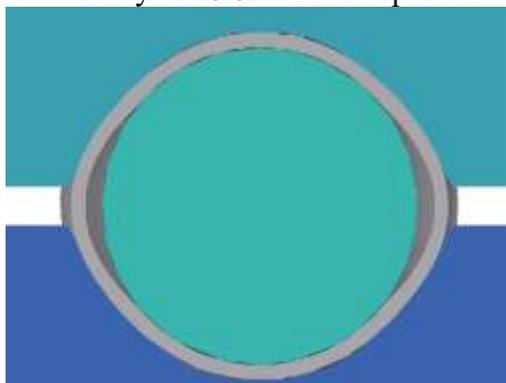
(б)



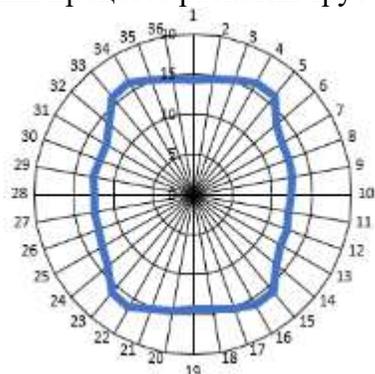
(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

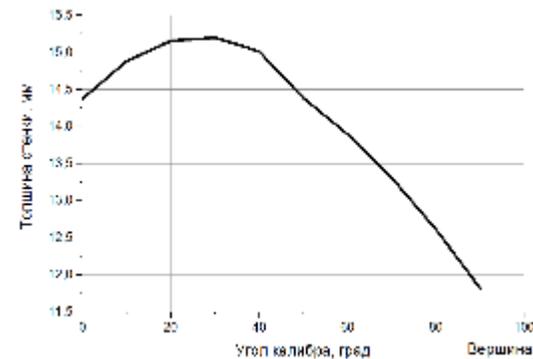
Рисунок 6.67 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в третьей клетке стана для 8 модели по данным QForm



(a)



(б)



(в)

(a) – очаг деформации; (б) – толщина стенки по периметру калибра; (в) – относительное изменение толщины стенки по 1/4 части калибра

Рисунок 6.68 – Геометрические характеристики процесса раскатки труб в четвертой клетке стана для 8 модели по данным QForm

Как видно из рисунков 6.37а-6.68а, в процессе раскатки гильз при изменении геометрических параметров второй клетки (таблица 8) удается получить необходимые геометрические параметры трубы.

Лепестковые диаграммы на рисунках 6.37б-6.68б получены с использованием данных моделирования процесса раскатки гильз в программе Qform. Так как модель раскатанной трубы представляет собой совокупность объемных конечных элементов, получить данные по геометрическим характеристикам трубы без какой-либо погрешности не представляется возможным. Анализ моделей Qform показал, что размер конечных элементов оказывает прямое влияние на точность расчета геометрических характеристик модели труб, в частности, на толщину стенки модели трубы до 5 %. Таким образом, повышенная зубчатость лепестковых диаграмм в пределах 5 % говорит о стабильности толщины стенки.

Однако более высокая зубчатость свидетельствует о характере формоизменения, так на рисунках 6.37б, 6.41б, 6.50б видно, что толщина стенки трубы во второй клетке зоны выпуска калибра больше, чем в зонах вершины и разъема калибров. Это вызвано тем, что в вершине металл обжимается сильнее, чем в выпуске, а в зону разъема попадает обжатый металл из вершины первой клетки. В результате чего образуется дефект вида «ус» (рисунок 6.69).

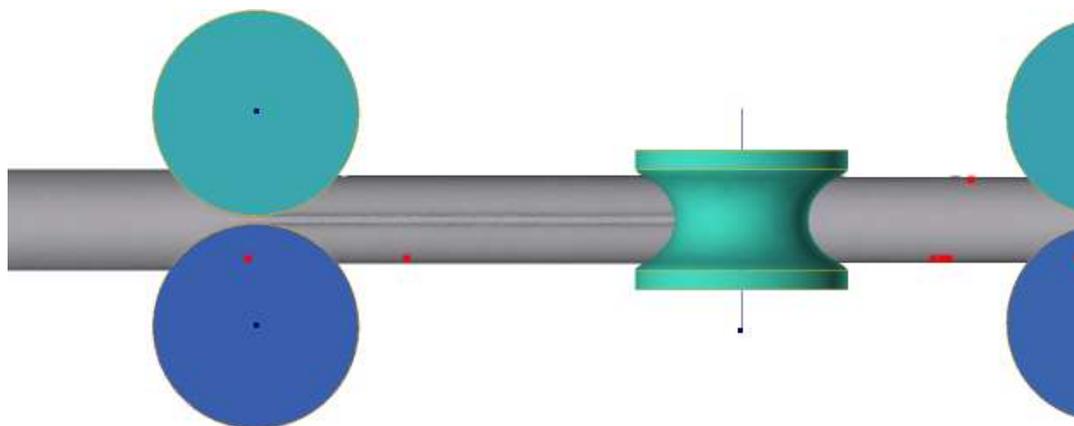


Рисунок 6.69 – Скриншот модели № 6

Так как основные варьируемые параметры относятся ко второй клетки, произведем оценку основных геометрических параметров после проката в данной клетки. Полный анализ по клетям для всех моделей формоизменения представлен на рисунках 6.37-6.68.

Основные характеристики формоизменения заготовки по моделям для второй клетки сведены в таблицу 6.22.

Таблица 6.22 – Геометрические параметры процесса раскатки труб во второй клетки по результатам моделирования

| № модели | № клетки | Толщина стенки в вершине калибра, мм | Толщина стенки в выпуске калибра, мм | Относительная разнотолщинность, % | Обжатие по толщине стенки в выпуске калибра, % |
|----------|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|--|
| 1 | 1 | 34,7 | 35,21 | 0,51 | 3,6 |
| | 2 | 22,89 | 28,45 | 5,56 | 35,0 |
| 2 | 1 | 34,38 | 36,5 | 2,12 | 4,5 |
| | 2 | 22,3 | 27,15 | 4,85 | 38,9 |
| 3 | 1 | 34,12 | 36,03 | 1,91 | 5,2 |
| | 2 | 27,62 | 29,14 | 1,52 | 23,3 |
| 4 | 1 | 34,02 | 35,49 | 1,47 | 5,5 |
| | 2 | 27,09 | 30,31 | 3,22 | 23,7 |
| 5 | 1 | 33,81 | 36,59 | 2,78 | 6,1 |
| | 2 | 17,36 | 26,02 | 8,66 | 52,6 |
| 6 | 1 | 33,94 | 35,45 | 1,51 | 5,7 |
| | 2 | 17,56 | 37,14 | 19,58 | 50,5 |
| 7 | 1 | 34,36 | 35,34 | 0,98 | 4,6 |
| | 2 | 22,87 | 28,09 | 5,22 | 35,3 |
| 8 | 1 | 34,56 | 35,152 | 0,592 | 4,0 |
| | 2 | 20,62 | 28,99 | 8,37 | 41,3 |

В таблице 6.22 формулы расчета относительной разнотолщинности $\Delta S_{\text{отн}}$ и изменения толщины стенки в выпуске калибра $\Delta S_{\text{вып}}$:

$$\Delta S_{\text{отн}} = \frac{S_{\text{max}} - S_{\text{min}}}{S_{\text{cp}}}; \quad (6.82)$$

$$\Delta S_{\text{вып}} = \frac{S_{\text{вх}} - S_{\text{вып}}}{S_{\text{вх}}}, \quad (6.83)$$

где S_{max} , S_{min} , S_{cp} – максимальное, минимальное и среднее значение толщины стенки в поперечном сечении на выходе рассматриваемой клетки;

$S_{вх}$ – толщина стенки в выпуске калибра на входе в клеть;

$S_{вых}$ – толщина стенки в выпуске калибра на выходе из клетки.

Из таблицы 6.22 видно, для вариантов № 5, 6 расчета во второй клетке наблюдается увеличение разнотолщинности, вызванное сравнительно большими обжатиями.

Важным параметром, влияющим как на геометрические, так и энергосиловые параметры является угол охвата. При заполнении стана оправка будет препятствовать проталкиванию трубы через межклетевую промежуток и чем больше угол охвата оправки, тем это препятствие больше. На рисунках 6.71, 6.72 представлен график распределения угла охвата и ширины трубы в зависимости от сечения (рисунок 6.70). В таблице 6.23 представлены значения полученных величин для 1 и 4 клетки.

Таблица 6.23 – Параметры процесса раскатки труб и результаты моделирования

| № | Угол охвата, градусы | | Ширина трубы, мм | | Скорость удержания оправки, мм/с | Rк 2-ой клетки, мм | Частота вращения валков 2-ой клетки, об/мин | Эксцентриситет калибра 2-ой клетки, мм | Угол промежуточной зоны, градусы |
|---|----------------------|---------|------------------|---------|----------------------------------|--------------------|---|--|----------------------------------|
| | 1 клеть | 4 клеть | 1 клеть | 4 клеть | | | | | |
| 1 | 267,02 | 217,48 | 422,47 | 375,76 | 600,00 | 185 | 45,00 | 5 | 44 |
| 2 | 266,93 | 224,08 | 422,61 | 401,82 | 900,00 | 185 | 60,00 | 5 | 34 |
| 3 | 267,56 | 227,98 | 421,06 | 405,67 | 600,00 | 190 | 60,00 | 5 | 34 |
| 4 | 269,45 | 212,03 | 422,45 | 386,66 | 900,00 | 190 | 45,00 | 5 | 44 |
| 5 | 271,38 | 211,74 | 423,28 | 380 | 600,00 | 185 | 60,00 | 0 | 44 |
| 6 | 270,08 | 286,89 | 422,69 | 365,04 | 900,00 | 185 | 45,00 | 0 | 34 |
| 7 | 270,84 | 204,16 | 422,92 | 375,15 | 600,00 | 190 | 45,00 | 0 | 34 |
| 8 | 266,88 | 221,84 | 422,97 | 400,7 | 900,00 | 190 | 60,00 | 0 | 44 |

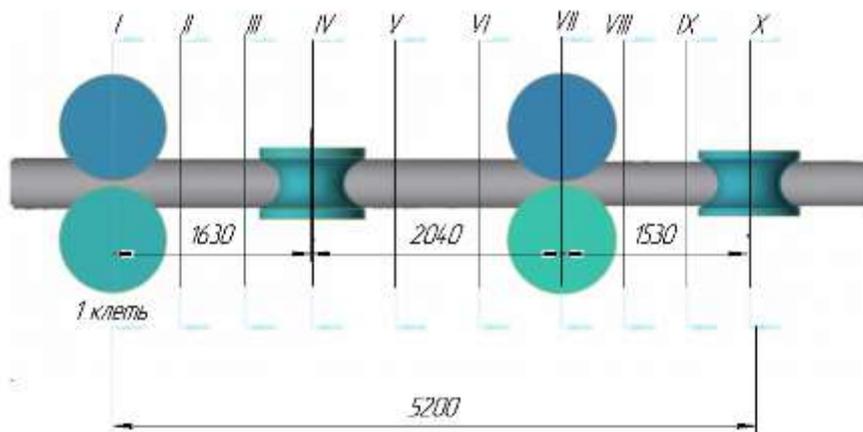


Рисунок 6.70 – Количество исследуемых сечений для анализа угла охвата и ширины трубы

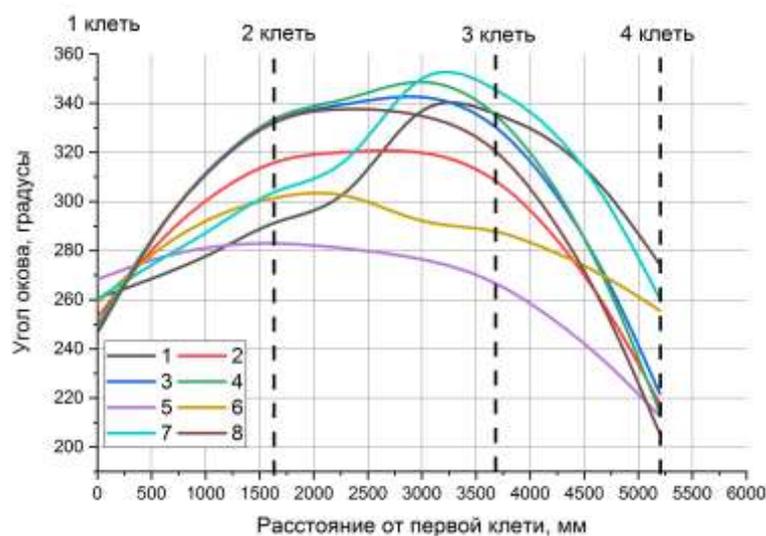


Рисунок 6.71 – Распределение величины охвата оправки металлом

Из рисунка 6.71 видно, что на увеличение угла охвата влияет скоростной режим прокатки. Так в промежутке между первой и второй клетью увеличение охвата оправки больше там, где линейная скорость трубы больше. После второй клетки практически во всех моделях происходит увлечение угла охвата оправки, что может спровоцировать затруднение при извлечении оправки и повышенные нагрузки на двигатель. Поэтому модель № 5, с точки зрения образования угла охвата, является наилучшим для данного исследования.

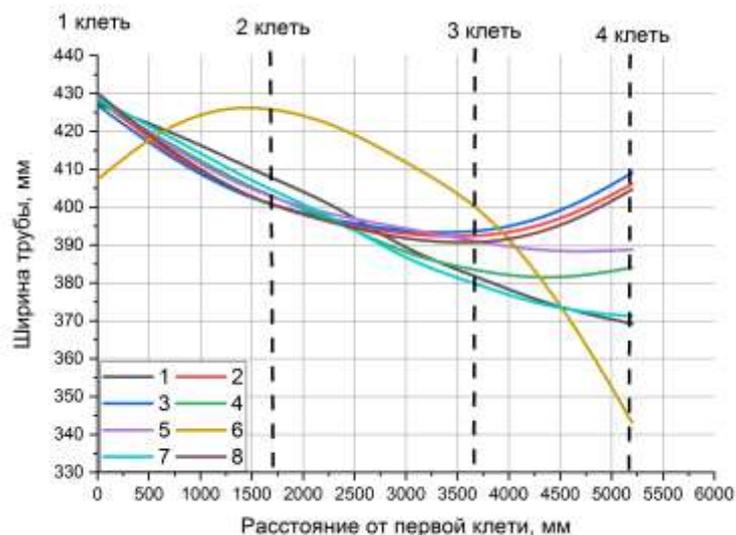


Рисунок 6.72 – Распределение ширины трубы

Из рисунка 6.72 видно, что в модели № 6 образуется переполнение металла в калибре во второй клетке в результате чего образовался дефект «ус» прокатки (рисунок 6.69). В моделях № 2,3,8 происходит резкое увеличение ширины калибра после 3 клетки в результате чего труба может не выйти на необходимый диаметр. Стоит отметить, что в данных моделях используется увеличенный скоростной режим (частота вращения валков 2-ой клетки – 60 об/мин). В данном эксперименте модель № 5 является оптимальной, так как ширина трубы распределяется в нисходящем тренде и без явных скачков.

Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод о том, параметры, которые используются в модели № 5 являются наилучшими и могут быть использованы в опытно-промышленном исследовании.

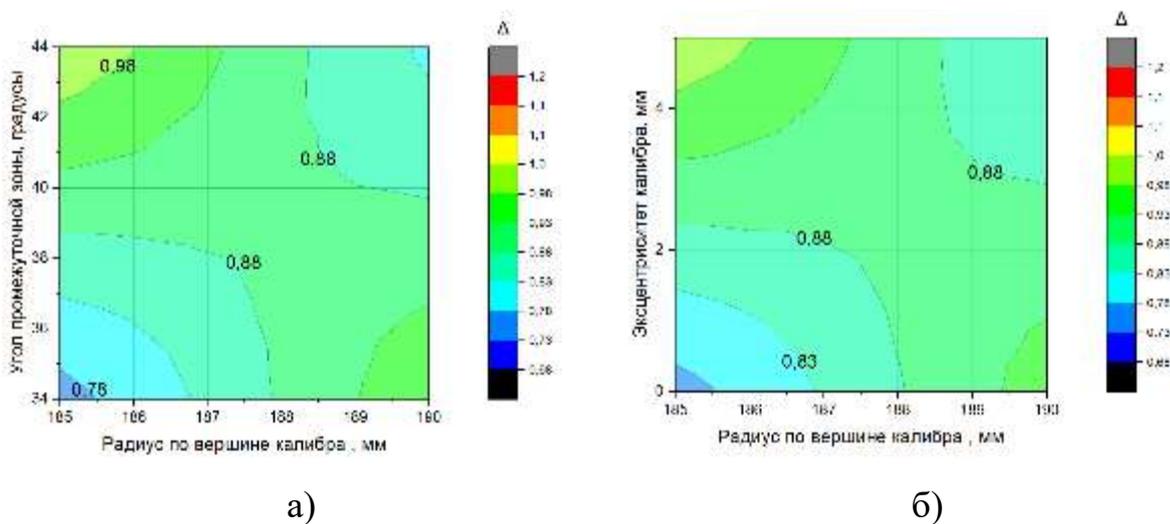
Однако, так как основные изменения происходят во второй клетке оценим ее влияние более подробно. В таблице 6.24 приведены значения угла охвата во 2-ой и 3-ей клетке для каждой модели.

Таблица 6.24 – Распределение величины охвата оправки металлом

| № | Угол охвата, градусы | | | | Δ^* | X_1 | X_2 | X_3 |
|--|----------------------|--------|--------|--------|------------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | | |
| 1 | 307,1 | 297,5 | 296,75 | 360 | 1,17 | 185 | 5 | 44 |
| 2 | 336,02 | 321,32 | 332,5 | 283,95 | 0,85 | 185 | 5 | 34 |
| 3 | 360 | 360 | 360 | 296,31 | 0,82 | 190 | 5 | 34 |
| 4 | 360 | 360 | 360 | 306,68 | 0,85 | 190 | 5 | 44 |
| 5 | 296,16 | 285,31 | 284,52 | 250,76 | 0,85 | 185 | 0 | 44 |
| 6 | 334,2 | 327,33 | 326,5 | 229,17 | 0,69 | 185 | 0 | 34 |
| 7 | 328,36 | 313,37 | 321,9 | 360 | 1,10 | 190 | 0 | 34 |
| 8 | 360 | 360 | 360 | 286,32 | 0,80 | 190 | 0 | 44 |
| * Для анализа результатов компьютерного моделирования был использован показатель влияния угла охвата в первой клетки на угол охвата во второй клетки $\frac{Y_i}{Y_{i-1}}$. | | | | | | | | |
| X_2 – радиус по вершине калибра во 2-й клетки, X_3 – эксцентриситет калибра 2-й клетки, X_3 – угол промежуточной зоны. | | | | | | | | |

Анализируя таблицу 6.24 можно сделать выводы о том, что на величину охвата оправки металлом влияет радиус по вершине калибра. Так в модели 3, 4 при радиусе по вершине калибра во 2-й клетки 190 мм образуется оков оправки и необходимое обжатие по диаметру не происходит. Угол промежуточной зоны также оказывает влияние на угол охвата металла, так в модели 1 при угле 44 градуса в 3 клетки образуется оков металла, а при использовании угла 34 градуса (6 модель) образуется дефект вида «шов прокатки».

Для нахождения наиболее оптимальных вариантов построим графики изменения показателя влияния угла охвата от исследуемых параметров.



а) угол промежуточной зоны б) эксцентриситет калибра
 Рисунок 6.73 – Изменение показателя влияния угла охвата

Как видно из рисунка 6.73 (а) максимальное значение показателя влияния угла охвата происходит при увеличении угла промежуточной зоны калибра и в результате чего образуется полный оков оправки. При уменьшении угла промежуточной зоны калибра и радиуса по вершине калибра наблюдается повышенное обжатие металла в результате чего образуются дефекты. Поэтому наиболее оптимальные значения находятся в центре графика в промежутке значений 0,82-0,85. При уменьшении эксцентриситета и радиуса по вершине калибра (рисунок 6.73 (б)) также повышается обжатие и соответственно показатель влияния угла охвата.

Так как варьирование скорости вращения валков происходит во второй клетки для оценки влияния скоростных режимов оценим геометрические параметры (стенка трубы) на выходе из ОД в 1 клетки и перед входом во вторую клетку (рисунок 6.74).

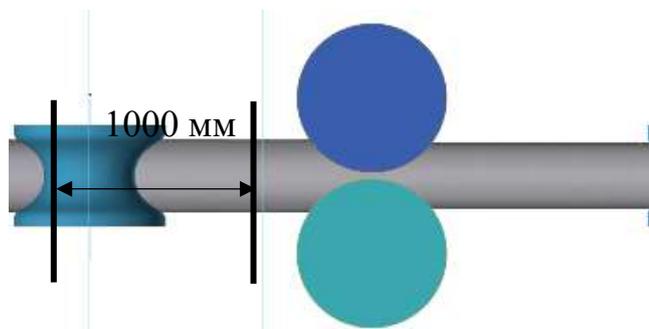


Рисунок 6.74 – Исследуемые сечения

На рисунке 6.75, 6.76 представлены графики влияния изменения скорости вращения клетки во второй клетке и скорости удержания оправки на толщину стенки трубы. На графиках значения « Δs » соответствуют изменению толщины стенки на исследуемых сечениях ($\Delta s = s_2 - s_1$).

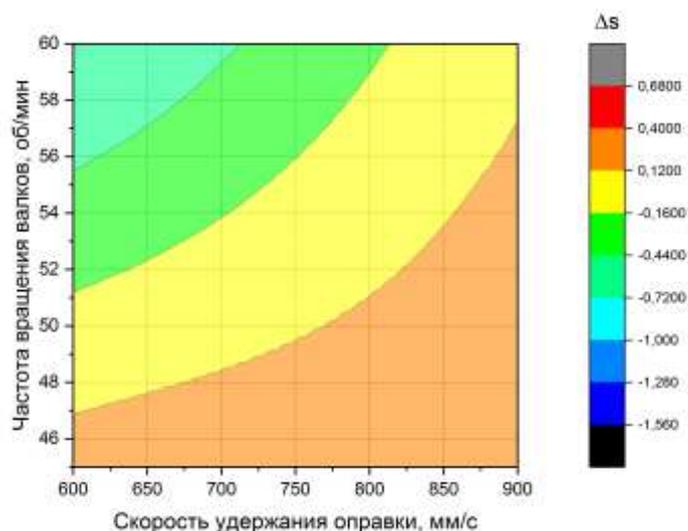


Рисунок 6.75 – Изменение толщины стенки трубы относительно варьируемых параметров (частота вращения валков, скорость удержания оправки)

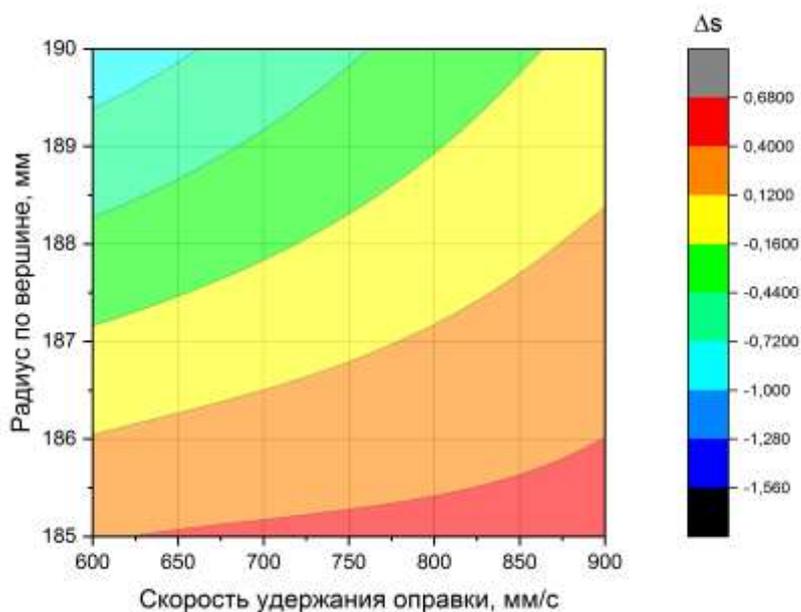


Рисунок 6.76 – Изменение толщины стенки трубы относительно варьируемых параметров (радиус по вершине, скорость вращения валков)

На основании представленных графиков можно сделать следующие выводы:

1) С увеличением скорости вращения валков второй клетки при минимальной скорости удержания оправки происходит подпор металла и увеличение толщины стенки в межклетевом промежутке между первой и второй клетью;

2) При увеличении скорости перемещения оправки происходит растяжение и утонение толщины стенки. Однако если повышать скорость вращения валков, то в определённый момент происходит смена растяжения на подпор (происходит увеличение толщины стенки);

3) При увеличении радиуса по вершине валков в межклетевом промежутке образуется растяжение, так как увеличивается линейная скорость трубы;

4) В комбинации варьирования увеличении радиуса по вершине и минимальной скорости удержания оправки дает максимальное растяжение. Однако если увеличивать скорость перемещения, то растяжение будет уменьшаться и в моменте образуется в участок обычного редуцирования без натяжения.

5) Исходя из проведённого анализа можно сделать вывод о том, параметры, которые используются в модели № 5 являются наилучшими и могут быть использованы в опытно-промышленном исследовании.

На основе проведённого анализа результатов компьютерного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. При исследовании влияние коэффициентов трения на контакте поверхности трубы с валками и оправкой в отдельно взятой клетки получены данные по изменению толщины стенки и ширины трубы на выходе из ОД. По полученным данным произведен статистический анализ и получены регрессионные зависимости, с помощью которых можно предсказывать значения при определённых заданных параметрах.

2. Выявлено, что при уменьшении угла промежуточной зоны происходит увеличение ширины трубы на выходе из ОД, так как происходит переполнение калибра. Поэтому более оптимальным в данном случае с точки зрения получения допустимых геометрических характеристик является использование угла выпуска калибра 44 градуса. Также следует отметить, что при увеличении коэффициента трения на оправке также происходит увлечение ширины трубы на выходе из ОД.

3. При определенной комбинации параметров максимального трения на валках и максимального обжатия образуются дефекты в продольном направлении, так как металл течет не только в зоны выпуска калибра, но и по направлению оси прокатки.

4. При уменьшении угла промежуточной зоны калибра и радиуса по вершине калибра наблюдается повышенное обжатие металла в результате чего образуются дефекты. При уменьшении эксцентриситета и радиуса по вершине калибра также повышается обжатие и соответственно показатель влияния угла охвата.

5. С увеличением скорости вращения валков второй клетки при минимальной скорости удержания оправки происходит увеличение толщины стенки в межклетевом промежутке. При увеличении скорости удержания оправки происходит растяжение и утонение толщины стенки. Однако если повышать скорость вращения валков, то в определённый момент происходит смена растяжения на подпор.

6. При увеличении радиуса по вершине валков в межклетевом промежутке образуется растяжение, так как увеличивается линейная скорость трубы.

Глава 7. Разработка и внедрение сквозной технологии прокатки непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марки стали на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой

7.1 Разработка методики прострелки и обеспечение оси непрерывного стана продольной прокатки

Раскатка гильз в черновую трубу в непрерывном стане продольной прокатки является осесимметричным технологическим процессом. На практике ось непрерывного стана может отклоняться от нормативных допусков (как правило, не более 0,5мм) ввиду износа станин, посадочных мест клеток, опорных и регулировочных пластин. Контроль состояния оси многоклетьевого стана и своевременная корректировка – очень важная практическая задача, напрямую влияющая на качество бесшовных труб, в том числе нержавеющей. Отсутствие оси непрерывного стана продольной прокатки может привести к сверхнормативной продольной и поперечной разностенности, а также недопустимой концевой кривизне труб.

В условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ» разработана и внедрена методика прострелки оси стана МРМ с использованием современного оборудования – лазерного трекера API Tracker 3. Техническая задача, решаемая данным способом, заключается в улучшении прямолинейности прокатываемых на станах продольной прокатки труб за счёт контроля положения и устранения смещения станин клеток, нажимных винтов и прокатных валков от оси прокатки.

Схема проведения измерений приведена на рисунке 7.1.

Измерения выполняются посредством лазерной координатно-измерительной системы с помощью стандартных уголковых отражателей, по предварительно замаркированным специальным маркером по металлу контрольным точкам относительно стационарной опорной сети точек,

расположенных на взаимно перпендикулярных плоскостях (стенах цеха), и стационарной реперной точки, имеющей известную высоту относительно нулевой высотной отметки цеха.

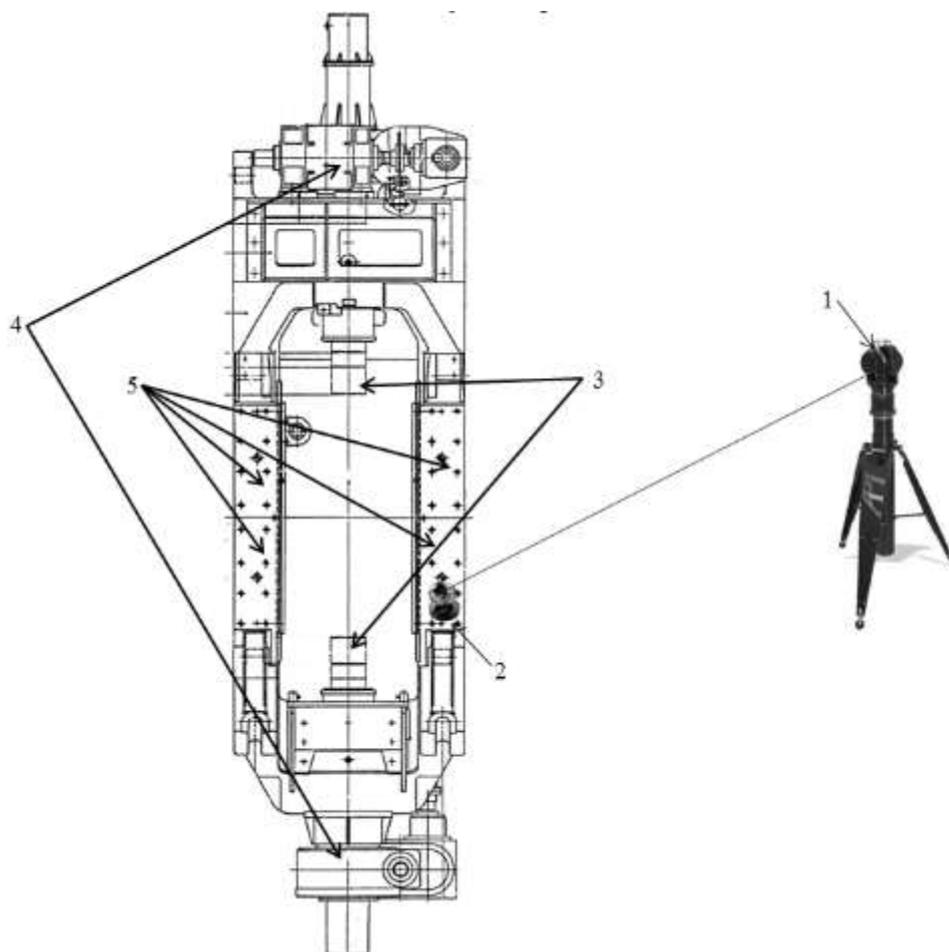


Рисунок 7.1 – схема проведения замера:

1 – лазерный трекер; 2- уголкового отражатель; 3 – нажимные винты валковой клетки; 4 – редукторы нажимных винтов; 5 – опорные пластины валковой клетки

Преимуществами разработанного технического решения являются:

- наличие долгосрочного эффекта улучшения в связи с тем, что выравниваются относительно оси прокатки не только валки стана, но также станины клетей и нажимные винты.

- применение стандартных уголковых отражателей лазерной координатно-измерительной системы вместо специальных приспособлений, что упрощает проведение работы. При этом нет необходимости сканировать поверхность всего валка, после контроля определённых методикой точек, профиль валка достраивается при помощи специального программного обеспечения.

Лазерная координатно-измерительная система API Tracker 3 представляет собой систему, состоящую из высокоточных лазерных измерителей расстояния на базе абсолютного дальномера (ADM) и интерферометра (IFM), а также высокоточных измерительных датчиков вертикального и горизонтального углов. Лазерная координатно-измерительная система API Tracker 3 состоит из измерительного блока на подвижном штативе, блока контроллера, портативного компьютера, соединительных кабелей. Измерительный блок содержит сервоприводы, угломерные устройства, блоки дальномеров, и имеет две перпендикулярные оси вращения. Сервоприводы позволяют наводить лазерный луч дальномера на измеряемый объект и отслеживать положение отражателя.

Применение данного технического решения позволяет избежать кривизны концов труб, вызываемой нарушением соосности валков станов продольной прокатки. На предложенную методику способа контроля соосности клетей станов продольной прокатки получен Патент РФ [158].

7.2 Обеспечение жесткости непрерывного стана продольной прокатки

Наравне с осью стана важнейшим фактором повторяемости технологии и обеспечения геометрических параметров труб является жесткость стана. В первую очередь это касается жесткости станин, крепление которых осуществляется на шпильках. Надежная затяжка гайки на шпильке требует

усилия с определенным моментом, добиться которого можно только с использованием специального шпильконатяжителя.

Для сравнения были рассмотрены варианты гидравлических шпильконатяжителей используемых в период монтажа трубопрокатного оборудования ТПЦ-3 АО «ВТЗ» фирмой INNSE в 1989г. с применением индукционного нагрева шпилек, и альтернативное предложение по высокоточным механическим гайкам – натяжителям для затяжки и ослабления крепежа станин М60, М80:

1) При использовании способа вытяжения шпилек гидравлическими шпильконатяжителями, необходимо превысить рабочую нагрузку на шпильку, так как неизвестна величина релаксации-усадки, что приводит к неточности, и соответственно к неравномерности затяжки, вследствие чего может возникнуть отклонение в прямолинейности посадочных размеров. Так же, анализируя накопленный многолетний опыт использования стандартных гидравлических шпильконатяжителей необходимо отметить прихотливость обслуживания и эксплуатацию данного типа инструмента. При технологических операциях использования шпильконатяжителей в работе необходимо постоянно задействовать дополнительный персонал для осуществления контроля хода гидравлического поршня т.к. при превышении сигнальной отметки оборудование выходит из строя и требует сервисного обслуживания производителя. Кроме того, существенными недостатками использования гидравлических шпильконатяжителей являются постоянные расходы средств на замену ремонтных комплектов дорогостоящих уплотнений.

2) При использовании способа затяжки креплений с помощью гаек-натяжителей напряжение шпилек достигается плавно и равномерно до заданного уровня без перенапряжения шпильки, обеспечивая точность затяжки, что очень важно при использовании больших моментов затяжки резьбового соединения.

Учитывая неприхотливость в техническом обслуживании, уменьшенным временем на производство одной операции на единицу времени в сравнении с гидравлическим инструментом, а также наличием ключа для симметричного тарированного натяжения «AVANTI 20» используемого для привода гаек-натяжителей, более эффективным представляется использование современной и надёжной «Системы симметричного тарированного натяжения» в качестве гаек-натяжителей «HYTORC-10RV-917-02-01-HD».

Принцип работы гаек-натяжителей представлен на рисунке 7.2.



Рисунок 7.2 – гайка-механический натяжитель

Гайка-механический натяжитель надежнее, производительнее и удобнее в применении гидравлических шпильконатяжителей.

Внедрение методики способа контроля соосности клетей станов продольной прокатки [158] и технического решения использования гайки-натяжителя для обеспечения жесткости стана, позволили получить экономию расходного коэффициента металла в условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ» в объеме 4 кг/тн.

7.3 Технология прокатки труб из нержавеющей марок стали мартенситного класса на ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой

Горячая часть технологической схемы не отличается от применяемой в настоящее время технологии, предусмотренной для прокатки бесшовных труб из легированных марок стали. В условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ» предложенная технология подготовки заготовок и прокатки обсадных труб из нержавеющей марок стали мартенситного класса обеспечила требуемую производительность и экономичность. С 2018 года данные трубы производятся в промышленных масштабах как освоенная серийная продукция ничем не уступающая по своим эксплуатационным свойствам импортным аналогам [159].

7.4 Технология прокатки труб из нержавеющей марок стали аустенитного класса на ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой

Опытная прокатка труб диаметром 325 мм с толщиной стенки 16 мм из стали 08X18H10T в условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ» выявила технологическую проблему, связанную с извлечением оправки непрерывного стана при раскатке гильзы в черновую трубу. Для решения указанной проблемы была разработана программа освоения (приложение 1) и

предложена специальная калибровка непрерывного стана МРМ, шаблон валков которой представлен на рисунке 7.3.

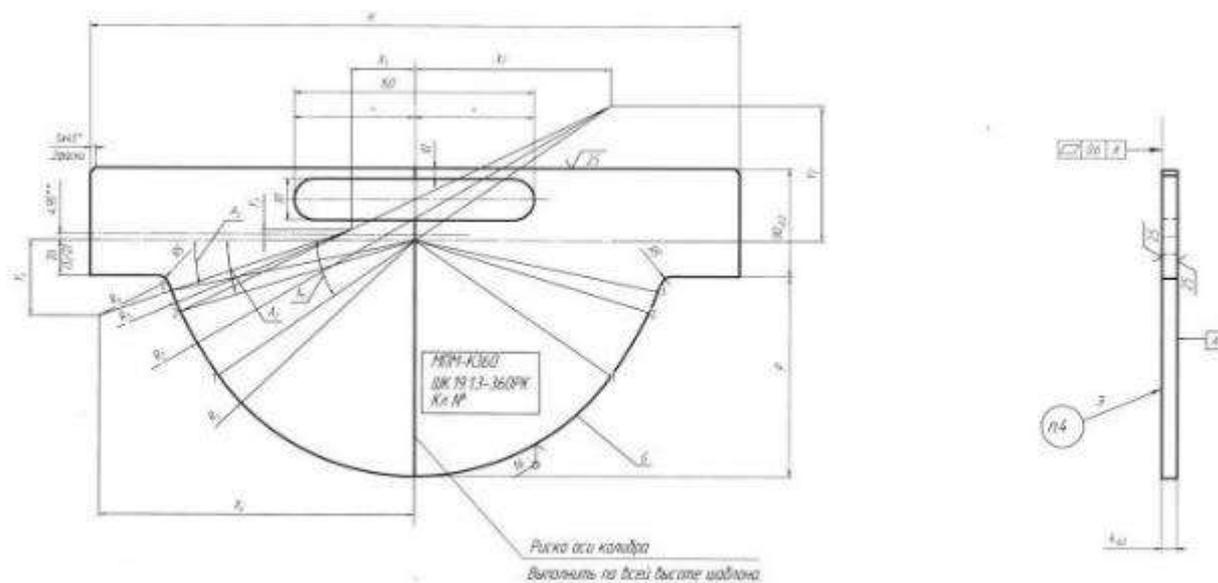


Рисунок 7.3 – шаблон специальной калибровки непрерывного стана

По результатам компьютерного, лабораторного и математического моделирования процесса раскатки гильз из нержавеющей марки стали 08-12X18Н10Т в непрерывном стане продольной прокатки установлено, что для обеспечения стабильного извлечения контролируемо-перемещаемой оправки необходимо использовать калибровку с овальностью $1,05 \div 1,18$ при соотношении ширины калибра к диаметру гильзы не превышающем 1,07. Благодаря большей ширине и увеличенным выпускам калибра извлечение оправки непрерывного стана в момент раскатки осуществляется при допустимых нагрузках на рейку механизма удержания оправки.

Настройки непрерывного стана МРМ осуществлялись по расчетным технологическим режимам, приведенным в таблице 7.1. Для сравнения в таблице 7.2 приведены настройки стана МРМ для того же размера труб 325x16 мм, но из углеродистой марки стали 06ГФБ.

Таблица 7.1 – настройки непрерывного стана МРМ при раскатке гильзы в готовую трубу 325x16 мм из марки стали 08Х18Н10Т

| Исходные данные | | | | | | | |
|--|-------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|
| Конечный размер трубы – 325x16 мм, сталь 08Х18Н10Т | | | | | | | |
| Размер гильзы – 421x32 мм | | | | | | | |
| Диаметр оправки МРМ – 334,5 мм | | | | | | | |
| Вытяжка – 2,392 | | | | | | | |
| Клеть | Диаметр валка, мм | Скорость двигателя, об/мин | Мощность двигателя, кВт | Зазор без нагрузки, мм | Зазор под нагрузкой, мм | Скорость трубы, мм/с | Катающий диаметр валка, мм |
| 1 | 930 | 350 | 3771 | 45,1 | 47,1 | 1005 | 703 |
| 2 | 930 | 370 | 6975 | 41,0 | 47,1 | 1383 | 652 |
| 3 | 921 | 340 | 6528 | 44,4 | 47,1 | 1761 | 652 |
| 4 | 830 | 320 | 4240 | 45,7 | 47,1 | 1882 | 552 |
| 5 | 823 | 310 | 2277 | 45,8 | 47,1 | 2019 | 546 |
| 6 | 832 | 270 | 1688 | 45,8 | 47,1 | 1990 | 545 |
| 7 | 748 | 355 | 653 | 48,0 | 47,1 | 2090 | 435 |

Таблица 7.2 – настройки непрерывного стана МРМ при раскатке гильзы в готовую трубу 325x16 мм из марки стали 06ГФБ

| Исходные данные | | | | | | | |
|--|-------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|
| Конечный размер трубы – 325x16 мм, сталь 06ГФБ | | | | | | | |
| Размер гильзы – 421x38 мм | | | | | | | |
| Диаметр оправки МРМ – 330 мм | | | | | | | |
| Вытяжка – 2,26 | | | | | | | |
| Клеть | Диаметр валка, мм | Частота вращения двигателя, об/мин | Мощность двигателя, кВт | Зазор без нагрузки, мм | Зазор под нагрузкой, мм | Скорость трубы, мм/с | Катающий диаметр валка, мм |
| 1 | 930 | 410 | 4000 | 43,8 | 42,1 | 1165 | 670 |
| 2 | 903 | 445 | 5852 | 32,8 | 42,1 | 1591 | 592 |
| 3 | 890 | 445 | 4882 | 33,2 | 42,1 | 2188 | 600 |
| 4 | 814 | 445 | 3138 | 35,8 | 42,1 | 2536 | 525 |

| | | | | | | | |
|---|-----|-----|------|------|------|------|-----|
| 5 | 795 | 445 | 1754 | 36,8 | 42,1 | 2744 | 544 |
| 6 | 758 | 432 | 1002 | 38,6 | 42,1 | 2747 | 447 |
| 7 | 757 | 455 | 446 | 40,4 | 42,1 | 2733 | 429 |

Сравнение настроек одного и того же размера труб 325x16 мм из марок стали 08X18H10T и 06ГФБ, согласно приведенных таблиц 7.1 и 7.2, позволяет сделать выводы, что принципиальным отличием технологии раскатки труб из нержавеющей марки стали аустенитного класса являются: меньшая скорость прокатки, большие зазоры, а также гильза с более тонкой стенкой.

Новая технология изготовления в условиях ТПА с непрерывными станами позволяет осуществлять прокатку длинномерных труб специального назначения из нержавеющей марок стали аустенитного класса с высоким качеством внутренней и наружной поверхности [160, 161].

7.5 Технический и экономический эффект от внедрения сквозной технологии прокатки непрерывно-литых заготовок из нержавеющей марок стали на ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой

Проведенный комплекс исследований с применением классических научных подходов, результаты которых приведены в главах 2-6, позволил впервые сформулировать теоретические основы новой технологии прокатки товарных труб из коррозионно-стойких марок стали.

Новая технология изготовления опробована в промышленном производстве в условиях ТПА 159-426 с непрерывным станом АО «ВТЗ» и позволяет осуществлять прокатку длинномерных труб специального назначения из нержавеющей марок стали мартенситного и аустенитного класса с высоким качеством внутренней и наружной поверхности. Использование собственной НЛЗ в комплексе с новой технологией прокатки, позволило локализовать производство и вывело на принципиально новый

уровень производства нержавеющей труб, обеспечив тем самым важное конкурентное преимущество.

В период 2018-2022 годы в ТПЦ-3 АО «ВТЗ» прокатано и отгружено потребителям свыше 4000тн труб из марок стали группы 13Cr, и свыше 300тн труб из марки стали 08X18H10T. Импортозамещение, расширение сортамента и локализация производства горячекатаных труб из коррозионно-стойких марок стали обеспечивает стратегическую безопасность нефтяной и атомной промышленности РФ.

Суммарный экономический эффект от внедрения новых технологических решений, полученных по результатам диссертационной работы в условиях действующего промышленного производства, составил более 100 млн. рублей.

Основные результаты и выводы

В диссертационной работе на основе результатов математического и компьютерного моделирования, лабораторных и промышленных экспериментов сформулированы теоретические основы и создан комплекс технологических решений, направленные на разработку и освоение новой технологии по получению высококачественных бесшовных труб из коррозионно-стойких марок стали с применением непрерывно-литой заготовки и трубопрокатного агрегата с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой:

1. Выявлены отличительные особенности пластических и прочностных свойства коррозионно-стойких марок стали аустенитного класса, а также исследована трансформация свойств коррозионно-стойкой марки стали на различных переделах в линии ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой. Построены диаграммы пластичности, выведена формула для определения сопротивления пластической деформации стали марки 08X18H10T.

2. Сформулированы требования к составам применяемых при прокатке труб дезоксиданта и графитовой смазки, обеспечивающие высокое качество внутренней поверхности труб из коррозионно-стойких марок стали, а также высокую стойкость контролируемо-перемещаемых оправок. Даны рекомендации по способу подачи указанных смазок к контактирующим поверхностям и требования к оборудованию для подачи. Впервые исследовано влияние дезоксиданта и графитовых смазок на коэффициенты контактного трения при прокатке труб из коррозионно-стойких марок стали и установлено, что на контактной поверхности трубы и вала коэффициент контактного трения составляет 0,47, а на контактной поверхности трубы и оправки 0,38.

3. С использованием программного комплекса QForm 3D проведено моделирование процесса прошивки как полой непрерывно-литой, так и

сплошной ковальной заготовки из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса. Установлено, что для прокатки труб целесообразно использовать полую непрерывно-литую заготовку.

4. Разработана технология подготовки непрерывно-литой заготовки из коррозионно-стойких марок стали, позволяющая устранить недостатки литой структуры металла, и обеспечить высокое качество бесшовных труб, получаемых прокаткой на ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой.

5. Применение оправок с высокой износостойкостью в совокупности с другими техническими решениями при прокатке заготовок из коррозионно-стойких марок стали, позволило увеличить часовую производительность участка горячего проката ТПА 159-426 АО «ВТЗ» более, чем в 2 раза в сравнении с ранее достигнутой.

6. По результатам компьютерного, лабораторного и математического моделирования процесса раскатки гильз из коррозионно-стойкой марки стали 08X18H10T в непрерывном стане продольной прокатки установлено, что для обеспечения стабильного извлечения контролируемо-перемещаемой оправки при допустимых нагрузках на рейку механизма удержания оправки необходимо использовать калибровку, отличающуюся увеличенной шириной и увеличенными выпусками калибра с овальностью $1,05 \div 1,18$.

7. Разработана и внедрена методика способа контроля соосности клеток непрерывных станов продольной прокатки, а также техническое решение по обеспечению повышенной жесткости станов ТПА за счет повышения надежности крепления клеток к фундаментам, что позволило снизить расход металла в условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ» на 4 кг/т.

8. Впервые внедрена в промышленное производство новая наукоемкая сквозная технология прокатки непрерывно-литых заготовок в условиях ТПА с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой,

обеспечивающая высокое качество внутренней и наружной поверхности труб из коррозионно-стойких марок стали мартенситного и аустенитного класса.

9. Суммарный экономический эффект от внедрения новых технологических решений, полученных по результатам диссертационной работы в условиях действующего промышленного производства, составил более 100 млн рублей.

10. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлению «Металлургия», а также кадров высшей квалификации по профилю «Обработка металлов давлением» в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

Список использованной литературы

1. Трубное производство: Учебник для ВУЗов / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2011, 970 с.
2. Данилов Ф.А., Глейберг А.З., Балакин В.Г. Горячая прокатка и прессование труб. – М.: Металлургия. 1972, 576 с.
3. Прессование стали и тугоплавких металлов./ Прозоров Л.В. – М.: Машиностроение, 1969. – 244 с.
4. Прессование стальных труб и профилей./ Гуляев Г.И., Притоманов А.Е., Дробич О.П., Верховод В.К. – М.: Металлургия, 1973. – 192 с.
5. Атлас дефектов стали: пер. с нем. / Под. ред. М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1979. – 187 с.
6. Прессование металлов. / Жолобов В.В., Зверев Г.И. – М.: Металлургия, 1971. – 456 с.
7. Теория прессования металлов. / Перлин И.Л., Райтберг Л.Х. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.
8. Современное производство стальных труб. / Зимовец В.Г. – Волжский: Волжский полиграфкомбинат, 1998. – 520 с.
9. Дефекты стальных прессованных труб и профилей: справочник. / Васюченко В.Е., Притоманов А.Е., Ризоль А.И. и др. – М.: Металлургия, 1990. – 70 с.
10. Технология и оборудование трубного производства: Учебник для Вузов / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001, 608 с.
11. Цикл докладов фирмы Маннесманн Демаг Меер для симпозиума по изготовлению и окончательной обработке бесшовных труб. Т.1: Новые технологии изготовления труб фирмы Маннесманн Меер. – М. 1981, 62 с.

12. Повышение качества трубной заготовки за рубежом / Ю.А. Дубровская, А.Е. Сочнев, Л.Н. Скоробогатская и др. // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». Вып. 5.– М., 1981. – С. 23-45.
13. Технология трубного производства: Учебник для ВУЗов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев – М.: Интернет Инжиниринг, 2002, 640 с.
14. Непрерывнолитые круглые заготовки / В.Я. Генкин, А.Т. Есаулов, М.И. Староселецкий и др.– М.: Металлургия, 1984, 143 с.
15. Повышение качества трубной заготовки для горячедеформированных бесшовных труб / Г.Г. Шепель, П.П. Навныко, О.А. Симоненко и др. // Сталь.– 2002.– № 8.– С. 84-85
16. Обработка металлов давлением: Учебник для ВУЗов / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев. – М.: МИСиС, 2008, 960 с.
17. Машины и агрегаты трубного производства / А.П. Коликов, В.П. Романенко, С.В. Самусев и др. – М.: МИСИС, 1998, 536 с.
18. Совершенствование производства стальных труб. / Зимовец В.Г., Кузнецов В.Ю. – М.: МИСиС, 1996, 480 с.
19. Техническое перевооружение трубопрокатного агрегата 8-16" с пилигримовыми станами / А.В. Сафьянов, Н.П. Карпенко, Ю.А. Медников и др. // Сталь.– 1997.– № 9.– С. 38-39.
20. Производство бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки. / Чикалов С.Г. – Волгоград: Комитет по печати и информации, 1999, 416 с.
21. Основные требования, предъявляемые к деформированной круглой заготовке для производства горячедеформированных труб // Сокуренок В.П., Правосудович В.В.// Металлургическая и горнорудная промышленность.– 1987.– № 2.– С. 34-35.
22. Производство труб: Справочник. / Розов Н.В.– М.: Металлургия, 1974, 600 с.

23. Специфика использования катаной и непрерывнолитой заготовки для производства труб. / Минаев А.А., Захур М., Коновалов Ю.В. // Производство проката.– 2005.– № 4.– С. 29-37.
24. Напряженное состояние и качество непрерывного слитка./ Мирсалимов В.М., Емельянов В.А. – М.: Metallurgia, 1990, 151 с.
25. Заготовки для производства бесшовных труб. / Корн Р.// Производство труб.– М.: Metallurgia, 1980.– С. 95-103.
26. Непрерывнолитые трубные заготовки из легированной стали / П.Н. Ткачев, Ю.Е. Кан, Е.П. Мавтевосян и др. // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». Вып. 16.– М., 1987.– С. 49-51.
27. Современное состояние мирового производства труб / Ю.Г. Крупман, Л.С. Ляховский, О.А. Семенов и др. – М.: Metallurgia, 1992, 353 с.
28. Производство круглых непрерывнолитых заготовок на высокопроизводительных МНЛЗ фирмы Маннсманрёрен-верке. / Нильсон Х., Шреве Г., Якоби Х. // Черные металлы.– 1987.– № 5.– С. 17-26.
29. Дефекты стальных слитков и проката. Справочное издание. / В.В. Правосудович, В.П. Сокуренок, В.Н. Данченко и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006, 384 с.
30. Освоение производства горячекатанных труб из непрерывнолитой заготовки углеродистой стали./ М.М. Фадеев, С.Г. Чикалов, А.П. Коликов. и др. // Труды третьего конгресса прокатчиков.– Липецк, 2000 г.– С. 402-405.
31. Разработка и освоение технологии производства шарикоподшипниковых труб из непрерывнолитой заготовки. / М.М. Фадеев, С.Г. Чикалов, В.Ю. Кузнецов и др. // Труды третьего конгресса прокатчиков.– Липецк, 2000 г.– С. 405-407.
32. Опыт использования непрерывнолитой заготовки из углеродистой стали при производстве бесшовных труб. / К.Л. Марченко, В.Ю. Кузнецов, М.М. Фадеев и др. // Сталь.– 2003.– № 8.– С. 53-54

33. Освоение производства бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки на ТПА 159-426 / С.Г. Чикалов, М.М. Фадеев, А.К. Беломестнов и др. // Сталь.– 1999.– № 1.– С. 46-49.
34. Освоение прокатки непрерывнолитой заготовки на ТПА 50-200. / В.В. Фролочкин, М.М. Фадеев, В. Ю. Кузнецов и др. // Сталь.– 2002.– № 7.– С. 56-58.
35. Влияние способа и степени деформации на структуру и свойства труб, изготавливаемых из непрерывнолитой заготовки / К.Л. Марченко, В.Ю. Кузнецов, Б.А. Романцев и др. // Производство проката.– 2006.– № 4.– С. 26-30.
36. Матвеев Б.Н. Горячая прокатка труб. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000, 142 с.
37. Столетний М.Ф., Клемперт. Е.Д. Точность труб. – М.: Металлургия, 1975, 240 с.
38. Матвеев Б.Н. Совершенствование производства труб из высоколегированных сталей. // Сталь.– 2000.– № 3.– С. 56-59.
39. Матвеев Б.Н., Голубчик Р.М. Новые исследования процесса прошивки заготовок в косовалковых станах. // Сталь.– 2000.– № 9.– С. 53-58.
40. Белокозович Ю.Б., Рогова К.В., Клемперт Е.Д. Совершенствование технологии прошивки на косовалковых станах с целью минимизации образования наружных дефектов. // Труды XVII международной научно-практической конференции «Трубы-2009».– Челябинск, 2009.
41. Клемперт Е.Д., Меркулов Д.В., Голубчик Р.М. Диаметр прошиваемой заготовки и качества труб. // Сталь.– 2006.– № 4.– С. 56-57.
42. Оценка режимов прошивки заготовок из стали 12Х18Н10Т по параметрам циклического формоизменения в станах 140 / Р.М. Голубчик, Д.В. Меркулов, Е.Д. Клемперт и др. // Сталь.– 2009.– № 3.– С. 50-55.
43. Р.М. Голубчик, Е.Д. Клемперт, Д.В. Меркулов и др. Резервы повышения качества поверхности гильз при прошивке заготовок. // Вестник

УГТУ УПИ. Серия «Научные школы. Наши учителя». – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006, № 2.– С. 50-59.

44. Траекторно-скоростные условия процесса прошивки в станах винтовой прокатки / С.П. Галкин, Б.А. Романцев, А.В. Гончарук и др. // Производство проката.– 2007.– № 5.– С. 37-42.

45. Оценка интенсивности деформации при прошивке в станах винтовой прокатки / С.П. Галкин, Б.А. Романцев, А.В. Гончарук и др. // Производство проката.– 2008.– № 4.– С. 29-33.

46. Анализ влияния безразмерных факторов прошивки на частные параметры формоизменения металл перед оправкой / С.П. Галкин, Б.А. Романцев, А.В. Гончарук и др. // Производство проката.– 2008.– № 6.– С. 35-40.

47. Р.М. Голубчик, Д.В. Меркулов, Е.К. Медведев и др. Оптимизация отношения диаметра заготовки к диаметру гильзы при прошивке заготовок в станах различного конструктивного исполнения // Труды XVII международной научно-практической конференции «Трубы-2009».– Челябинск, 2009.

48. Потапов И.Н., Полухин П.И. Новая технология винтовой прокатки. –М.: Metallurgy, 1975 г., 344 с.

49. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. – М.: Metallurgy, 1990 г., 344 с.

50. Прошивка заготовок в стане с направляющими дисками / И.Н. Потапов, А.Д. Шейх-Али, Б.А. Романцев и др. // Машины и агрегаты для производства труб и проката. Труды ВНИИМЕТМАШ. Сб. № 37– М., 1974.– С. 48-56.

51. 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.

52. Прокатное производство. Справочник. Т.2 / П.А. Александров, В.П. Анисифоров, В.И. Байраков и др.; Под ред. д.т.н. Е.С. Рокотяна; Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии. – М., 1962, 686 с.
53. Jan Kazanecki. Wytwarzanie rur bez szwu. Kraków: Wydawnictwa AGH, 2003, 622 с.
54. Вердеревский В.А., Глейберг А.З., Никитин А.С. Трубопрокатные станы. – М.: Металлургия, 1983, 240 с.
55. Технология производства труб. / И.Н. Потапов, А.П. Коликов, В.Н. Данченко и др. – М.: Металлургия, 1994, 528 с.
56. Совершенствование процессов горячей прокатки труб. / В.Ф. Балакин, Ю.С. Кривченко, В.В. Перчаник, Г.Н. Кущинский и др. – Сталь. – 2006.–№ 9.– С. 73-79.
57. Анализ и пути совершенствования процессов горячей раскатки труб. / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, В.К. Михайлов, Е.С. Бабина // Сталь.– 2002.– № 12.– С. 44-47.
58. Совершенствование производства горячекатаных труб / Г.И. Гуляев, А.С. Коба, Ю.М. Миронов и др. – К.: Техніка, 1985, 136 с.
59. Ксаверчук Л.П., В.В. Сергеев. Перспективы трубного производства Украины. // Развитие теории процессов производства труб.– Днепропетровск: Системные технологии, 2005.– С. 23-27.
60. Технология RQF для производства стальных бесшовных труб / Н. Теллен, П. Ринальди, Д. Миланезе и др. // Черные металлы.– 2005.– № 4.– С. 47-52.
61. Современная технология для производства бесшовных труб на заводе в Тяньцзине. / Н. Теллен, П. Ринальди, Д. Миланезе и др. // Металлургическое производство и оборудование.– 2005.– № 1.– С. 40-50.
62. Садыков В.В., Чикалов С.Г. Развитие российского рынка труб и металлургического машиностроения // Сталь.– 2007.– № 11.– С. 121-124.

63. Новый цех по производству бесшовных труб в Казастане / С. Делпано, Л. Бираджи, О. Мышкин и др. // *Металлургическое производство и технология.*– 2005.– № 2.– С. 24-32.

64. 4th generation of PQF plants boosts productivity with low investment costs. // *Steel Technology.* Vol. 3. 2021. P.46-48.

65. Чекмарев А.П., Ваткин Я.Л. Основы прокатки труб в круглых калибрах. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1962, 222 с.

66. Матвеев Ю.М., Ваткин Я.Л. Калибровка инструмента трубных станов. – М.: Металлургия, 1970, 480 с.

67. Чекмарев И.А. Разработка научных основ и рациональной технологии непрерывной прокатки труб. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва, 1978, 44 с.

68. Чекмарев. И,А. Исследование непрерывной прокатки труб на длинной оправке. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Днепропетровск, 1960, 22 с.

69. Современное состояние и перспективные производства труб на установках с непрерывными оправочными станами / А.А. Шевченко, Я.Л. Ваткин, Г.И. Гуляев и др. // *Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами.* Материалы научно-технической конференции 1967 года.– Д.: ВНИТИ, 1968.– С. 8-21

70. Прокатка труб на непрерывных станах с регулируемой скоростью оправки / А.П. Чекмарев, Я.Л. Ваткин, В.Н. Данченко и др. // *Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами.* Материалы научно-технической конференции 1967 года. – Д.: ВНИТИ, 1968.– С. 27-33

71. Опыт калибровки валков непрерывных станов / А.А. Шевченко, Я.Л. Ваткин, А.П. Савкин и др. // *Теория, практика и перспективы развития*

производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами. Материалы научно-технической конференции 1967 года. – Д.: ВНИТИ, 1968. – С. 78-83

72. Гульянов Ю.Н., Нодев О.Э., Столетний М.Ф. Рациональная деформация металла в непрерывном стане / Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами. Материалы научно-технической конференции 1967 года.– Д.: ВНИТИ, 1968.– С. 83-88

73. Ваткин Я.Л., Данченко В.Н. Об оптимальном диаметре валков непрерывных станов / Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами. Материалы научно-технической конференции 1967 года.– Д.: ВНИТИ, 1968.– С. 106-110

74. К вопросу о выборе оптимального диаметра валков непрерывного трубопрокатного стана / Г.Н. Павлушкин, П.И. Тетельбаум, Ф.И. Орлов и др. // Теория, практика и перспективы развития производства бесшовных труб на установках с непрерывными станами. Материалы научно-технической конференции 1967 года.– Д.: ВНИТИ, 1968. – С. 111-114

75. Данченко В.Н., Чус А.В. Продольная прокатка труб. – М.: Металлургия, 1984, 136 с.

76. Данченко В.Н. Развитие теории процессов непрерывной прокатки труб // Развитие теории процессов производства труб.– Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – С. 94-133.

77. Блинов Ю.И. Продольная прокатка труб в многовалковых калибрах. – Челябинск: Металл, 1992, 240 с.

78. Шевченко А.А., Кириченко А.Н. Возможности увеличения производительности непрерывных оправочных станов путем изменения параметров прокатки и перераспределения их по клетям// Производство бесшовных труб.– М.: Металлургия, 1975, № 2.– С. 35-41.

79. Лавров П.П. Определение основных параметров при прокатке труб в непрерывном стане на длинной оправке. // Труды ВНИИМЕТМАШ.– М., 1963, № 8.–С. 193-212.

80. А.С. Никитин, Н.С. Копытин, Г.Н. Павлушкин и др. Математическое моделирование переходных процессов в непрерывном оправочном стане. // Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. Теоретические проблемы прокатного производства.– М., Metallurgiya, 1975.– С. 443-446.

81. Чекмарев И.А. Некоторые вопросы теории прокатки труб на длинной оправке в непрерывном стане // Теория прокатки. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции. Теоретические проблемы прокатного производства.– М., Metallurgiya, 1975. – С. 348-352.

82. Особенности деформации труб при непрерывной прокатке на длинной оправке / Г.И. Гуляев, И.П. Савкин, И.А. Чекмарев и др. // Производство труб: Сб.– М.: Metallurgiya, 1971, № 26.– С. 31-36

83. Исследование деформации трубы при прокатке в круглом калибре на длинной оправке / Я.Л. Ваткин, А.А. Шевченко, Г.И. Гуляев и др. // Обработка металлов давлением. Научные труды ДМЕТИ.– М.: Metallurgiya, 1967, № 53.– С. 169-177

84. Онищенко И.И., Куценко П.И., Куценко А.И. Теория непрерывной прокатки. – Запорожье: ЗГИА, 1998, 470 с.

85. Онищенко И.И. Взаимодействие трубы и оправки при непрерывной прокатке // Известия ВУЗов.– 1981.– № 3.– С. 97-102.

86. Технология непрерывной безоправочной прокатки труб. / Г.И. Гуляев, П.Н. Ившин, И.Н. Ерохин и др. – М.: Metallurgiya, 1975, 264 с.

87. Вавилкин Н.М., Сербин В.А. Особенности кинематических параметров раскатки на непрерывном стане // Изв. вузов. Черная металлургия.– 2006.– № 7.– С. 33-35.

88. Совершенствование математической модели расчета энергосиловых параметров ТПА 159-426. / Ю.Н. Уткин, М.В. Бунышин, И.И. Лубе и др. – Сталь, 2007, № 4, С. 57-60.
89. Совершенствование методики расчета геометрических параметров очага деформации при прокатке бесшовных труб в непрерывных станах с трехвалковыми клетями / А.А. Терещенко, Н.И. Фартушный, А.В. Гончарук и др. // Производство проката.– 2007.– № 9.– С. 20-23.
90. Ершов Ю.Л., Тартаковский Б.И. PQF/MPM – особенности проектирования непрерывного оправочного стана. // Теория и практика металлургии. – № 5-6. – 2009.– С. 3-14.
91. Теория пластической деформации металлов и сплавов / А.В. Выдрин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2020. – 218 с.
92. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Изд. второе / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург: изд-во УГТУ-УПИ, 2001. – 836 с.
93. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
94. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов: учеб. пособие для вузов / А.А. Богатов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с.
95. Богатов А.А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, С.В. Смирнов. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
96. Смирнов, С.В. Сравнительное исследование пластичности прутков из вольфрамового сплава ВА при ротационной ковке и прокатке / С.В. Смирнов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1994. - Вып. 8. – С. 2-4.
97. Богатов, А.А. Методики определения технологических свойств металла и его отдельных составляющих в условиях сложного нагружения / А.А. Богатов, С.В. Смирнов, В.П. Швейкин, А.В. Нестеренко // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1995. - №1. – С. 42-49.

98. Смирнов, С.В. Моделирование разрушения штамповой стали от трещин разгара при циклическом термомеханическом воздействии / С.В. Смирнов, Р.Е. Лаповок, В.П. Швейкин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – Вып. 8. – С. 11-14.

99. Lapovok, R. Damage mechanics for the fracture prediction of metal forming tools / R. Lapovok, S. Smirnov, V. Shveykin // International Journal of Fracture. – 2000. – v. 103/ - Pp. 111-126.

100. Нестеренко, А.В. Пластичность и деформируемость промышленных сплавов на основе вольфрама, хрома и молибдена / А.В. Нестеренко. – Автореферат дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. - Екатеринбург, 2005.

101. Рудской, А.И. Исследование структуры и свойств TRIP-сталей на комплексе Gleeble 3800 / А.И. Рудской, Н.Г. Колбасников, О.Г. Зотов, Д.А. Рингинен и др. //Черные металлы. – 2010. - №2.

102. Выдрин А.В. Исследование пластичности хромистых сталей при прессовании труб / А.В. Выдрин, А.С. Жуков, Е.В. Храмков, В.Д. Николенко // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2020. - №1. - С. 102-104.

103. Производство стальных труб горячей прокаткой / Ф.А. Данилов, А.З. Глейберг, В.Г. Балакин. – М.: Металлургия, 1954. – 615 с.

104. Gleeble Users Manual: Hot Torsion Mobile Conversion Unit Operations Manual.

105. Прошивка в косовалковых станах / А.П. Чекмарев, Я.Л. Ваткин, М.И. Ханин и др. – М.: Металлургия, 1967, 241 с.

106. Определение температурного интервала максимальной технологической пластичности металла методом горячего кручения применительно к процессу косовалковой прошивки / А.В. Курятников, А.В. Король, А.А. Корсаков и др. // Производство проката. – 2014 – № 1. – С. 20-27.

107. ГОСТ 3565-80 Металлы. Метод испытания на кручение. - Введ. 30.06.1981. - М.: Издательство стандартов, 1981. - 15 с.
108. Дубинский Ф.С. Планирование и обработка эксперимента в ОМД: конспект лекций / Ф.С. Дубинский, А.В. Выдрин, П.А. Мальцев. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2007. – 43 с.
109. Дукмасов В.Г. Математические модели и процессы прокатки профилей высокого качества / В.Г. Дукмасов, А.В. Выдрин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 215 с.
110. Аль-Кхузаи А.С.О. Исследование сопротивления пластической деформации стали марки 32ХГА / А.С.О. Аль-Кхузаи, В.В. Широков, А.В. Выдрин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т.20. - №1. – С. 80-86.
111. Третьяков, А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – М.: Metallurgy, 1973. – 224 с.
112. Аль-Кхузаи, А.С.О. Исследование сопротивления пластической деформации стали марки 09Г2С в широком диапазоне изменения температур / А.С.О. Аль-Кхузаи, А.В. Выдрин, В.В. Широков, О.А. Панасенко // Черные металлы. – 2020. - №5. – С. 15-19.
113. Манегин Ю.В., Анисимова И.В. Стекло смазки и защитные покрытия для горячей обработки металлов. М.: Metallurgy, 1978. 223 с.
114. Грудев А.П., Тилик В.Т. «Технологические смазки в прокатном производстве», М., Metallurgy, 1975, 366 с.
115. Грудев А.П. «Внешнее трение при прокатке», М., Metallurgy, 1973, 228 с.
116. Чертавских А.К., Белосевич В.К. «Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением» М., Metallurgy, 1968, 362 с.
117. Вейлер С.Я., Лихтман И.В. «Действие смазок при обработке металлов давлением», М., Изд. АН СССР, 1960, 230 с.

118. Патент РФ № 2 458 111, С10М 169/04, опубликовано: 10.08.2012.
119. Патент РФ № 2 536 820 С1, опубликовано: 27.12.2014.
120. Graue, G., W. Luckerath und G. Gebauer: Schmiertechnik 9 (1962), S.245-253.
121. O. Pawelski, G. Graue, und D. Lohr Reibungsbeiwert und Temperaturverteilung beim Warmumformen von Stahi mit verschiedenen Schmiermitteln, Teill II, I sihe Schmiertechnik und Tribologie Bd. 17 (1970), S.120-125.
122. Северденко В.П., Макушок Е.М., Равин А.Н. Окалина при горячей обработке металлов давлением. - М.: Metallurgiya, 1977. - 208 с.
123. Ковалева И.А., Кучков А.А., Венгура А.В. и др. Исследование влияния окалинообразования на состояние поверхности заготовок для повышения качества горячекатаных бесшовных труб // Литье и металлургия. 2014. № 3. С. 53-57.
124. Топоров В.А., Панасенко О.А., Пьянкова А.А. Исследование механизма образования трудноудаляемой окалины на внутренней поверхности труб из стали марки 13ХФА. // Сборников трудов XXII Международной научно-практической конференции «Инновации и импортозамещение в трубной промышленности» под ред. И.Ю. Пышминцева. – Челябинск: изд-во ОАО «РосНИТИ». 2016. С. 19-22.
125. Гарбер Э.А., Гатиятуллин Д.З. Причины образования на поверхности горячекатаных стальных широких полос дефекта «остаточная окалины» и методы его устранения. // Механическое оборудование металлургических заводов. 2017. № 2. С. 18-21.
126. Кириллов Ю.А. Комплексное исследование окалинообразования на углеродистых и низколегированных сталях и оптимизация процессов нагрева при горячей пластической деформации. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Санкт-Петербург: АОЗТ «КопиСервис». 1998. - 24 с.

127. Темлянцев М.В., Коноз К.С., Кузнецова О.В., Деев В.Б., Живаго Э.Я. Исследование окалинообразования стали марки 40С2 при высокотемпературном нагреве. // Сборник трудов II Международной научно-практической конференции «Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности». - Екатеринбург: изд-во Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2018. С. 166-171.

128. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Уразова Л.Ф. Влияние состава газовой среды в печи на окисление стали. // Сталь. 2015. № 11. С. 69-70.

129. Емельянов А.В., Лубе И.И., Кузнецов В.И., Левченко Д.А. Минимизация образования окалины на внутренней поверхности бесшовных горячекатаных труб. // Сталь. 2020. № 05. С. 31-37.

130. Пат. 2745011 Российская Федерация, МПК В21В 17/04, В21В 45/02. Способ изготовления горячекатаных бесшовных труб / В.И. Кузнецов, И.Ю. Пышминцев, А.А. Кривошеев [и др.]. - № 2020121419; опублик. 18.03.21.

131. Патент РФ № 2 745 011 С1, опубликовано: 18.03.2021. «Способ изготовления горячекатаных бесшовных труб», дата подачи 29.06.2020.

132. Уббелоде А.Р. Графит и его кристаллические соединения/ А.Р. Уббелоде, Ф.А. Льюис; пер. с англ. Е.С. Головиной – М.: Мир, 1965. - 128с.

133. Брейтуэйт Е.Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия/ Е.Р. Брейтуэйт - М.; Химия, 1967 - 320с.

134. Матвеевский Р.М. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний / Р.М. Матвеевский, В.Л. Лашхи, И.А. Буяновский и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 220с.

135. Pierson O. Hugh. Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerene. 1993. – 397с.

136. Обработка металлов давлением: теория процессов трубного производства: учеб. / А.П. Коликов, Б.А. Романцев, А.С. Алещенко. – М.: Изд. дом НИТУ «МИСиС», 2019. – 502 с.

137. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. М.-«Металлургия». 1982. – 312 с.

138. Технология подготовки непрерывно-литой заготовки из нержавеющей марки стали к прокатке на ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой. / Красиков А.В. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». Т.21. №3. 2021. С.40-48.

139. Влияние центровочного отверстия на переднем торце заготовки на качество гильзы. / Корсаков А.А., Король А.В., Михалкин Д.В., Алютина Е.В., Храмов Е.В., Никляев, А.В., Ульянов А.Г., Благовещенский С.И. // Производство проката. №10. 2017. С. 44-48.

140. Повышение стойкости оправок прошивного стана при производстве бесшовных труб из нержавеющей стали мартенситного класса марки типа 13Cr в линии ТПА 159-426 АО ВТЗ. / Лубе И.И., Трутнев Н.В., Тумашев С.В., Красиков А.В., Ульянов А.Г., Корсаков А.А., Космацкий Я.И. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. Т.76. №12. 2020. С.1259-1264.

141. Extending the life of piercing plugs. / Lube I.I., Krasikov A.V., Vydrin A.V., Korsakov A.A. // Steel Times International. Vol.45 No.2. 2021. P. 33-35.

142. Механизм формирования и расчет концевой разнотолщинности трубных плетей между раскатным и извлекательно-калибровочным станами. Черные металлы, №3 / А.В. Выдрин, Е.В. Храмов, М.В. Бунышин. – М.: Руда и металлы, 2017. – с. 47-50.

143. Выдрин В.Н. Основы процесса прокатки-волочения / В.Н. Выдрин, Л.М. Агеев, Н.В. Судаков. – Челябинск: ЧПИ, 1975. – 48 с.

144. Потапов И.Н., А.П. Коликов, В.М. Друян. Теория трубного производства. – М.: Металлургия, 1991, 424 с.

145. Алгоритм расчета энергосиловых параметров процесса раскатки гильзы в непрерывном стане / А.В. Выдрин, М.Ж.М. Аль-Джумаили, Е.А. Шкуратов // Вестник МГТУ им. Носова. – 2019. – Т.17. - №2. – С. 32-37.

146. Аль-Джумаили, М.Ж.М. Влияние условий непрерывной раскатки гильз на технологические параметры процесса / М.Ж.М. Аль-Джумаили, А.В. Выдрин, Е.А. Шкуратов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т.20, №1. – С.60-67.
147. Поляков М.Г. Деформация металла в многовалковых калибрах / М.Г. Поляков, Б.А. Никифоров, Г.С. Гун. – М.: Metallurgiya, 1979. – 240 с.
148. Коликов, А.П. Теория обработки металлов давлением / А.П. Коликов, Б.А. Романцев. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. – 451 с.
149. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением: издание второе, переработанное и дополненное / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного технического университета – УПИ, 2001. – 836 с.
150. Выдрин, А.В. Математическое моделирование процесса деформации труб в непрерывном стане и стане-извлекателе при реализации технологии RQF / А.В. Выдрин, В.В. Широков, П.А. Мальцев, А.В. Зинченко // Сб. трудов международной научно-технической конференции «ТРУБЫ-2009». – Челябинск, 2009, с.147-150.
151. Выдрин, А.В. Компьютерное моделирование скоростного режима непрерывной прокатки труб / А.В. Выдрин, В.В. Широков // Сталь. – 2011. - №2. – С. 56-58.
152. Выдрин, В.Н. Процесс непрерывной прокатки / В.Н. Выдрин, А.С. Федосиенко, В.И. Крайнов. – М.: Metallurgiya, 1970. – 456 с.
153. Аркулис Г.Э. Теория пластичности / Г.Э. Аркулис, В.Г. Дорогобид. – М.: Metallurgiya, 1987. – 352 с.
154. Унксов, Е.П. Теория пластических деформаций металлов // Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров, Е.А. Попов и др. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
155. Аль-Кхузай, А.С.О. Расчет сопротивления металла пластической деформации с учетом его разупрочнения при непрерывной прокатке / А.С.О.

Аль-Кхузай, В.В. Широков, А.В. Выдрин // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – Т.76. - №3. – С. 258-263.

156. Зильберг, Ю.В. Теория обработки металлов давлением / Ю.В. Зильберг. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 434 с.

157. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020662611 Российская Федерация. Программа для расчета геометрических параметров труб при моделировании в среде QForm: № 2020661915: заявл. 08.10.2020: опубл. 16.10.2020 / Д. Ю. Звонарев, М. А. Павлова, Д. А. Ахмеров, М. А. Зинченко; заявитель Открытое акционерное общество «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности» (ОАО «РосНИТИ»).

158. Патент РФ №2692683 – «Способ контроля соосности клеток станов продольной прокатки».

159. Освоение производства бесшовных труб из нержавеющей стали мартенситного класса марки типа 13Cr на ТПА 159-426 АО ВТЗ. / Трутнев Н.В., Красиков А.В., Ульянов А.Г., Лубе И.И., Космацкий Я.И., Корсаков А.А. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. №12. 2018. С.68-71.

160. Освоение технологии прокатки труб из нержавеющей стали. / Трутнев Н.В., Выдрин А.В., Буняшин М.В., Красиков А.В., Черных И.Н., Звонарев Д.Ю., Ульянов А.Г. // СТАЛЬ. №2. 2021. С.35-38.

161. Technological development of the rolling of stainless steel pipes. / Trutnev N.V., Vydrin A.V., Bunyashin M.V., Krasikov A.V., Chernykh I.N., Zvonarev D. Yu., Ulyanov A.G. // Steel in Translation. Vol. 51. pp. 131-134. 2021.

Приложение 1. Программа освоения технологии прокатки труб из нержавеющей марки стали аустенитного класса в условиях ТПА 159-426 АО «ВТЗ»

Программа №02.09.229-2019

опытного опробования проката труб 325×16мм из предварительно сверленной непрерывно-литой заготовки ЭСПЦ стали 08X18N10T

Цель работы: определение возможности использования сверленной НЛЗ ЭСПЦ для проката труб из нержавеющей стали.

Обоснование: указание Главного инженера.

Объем испытаний: условный заказ в количестве одной заготовки.

| № | Наименование работ | Исполнитель | Срок |
|-----------|---|--------------------|------------------------|
| 1. | Подготовка производства | | |
| 1.1 | Выдача условного заказа на трубы по ГОСТ 9940-81 или ТУ 14-3Р-85-2005. | ТМК-ИНОКС | До начала производства |
| 1.2 | Передача 1 шт заготовки, плавка № 293324А длиной 4340 мм диаметром 345 мм из ТПЦ-2 в ЭСПЦ. | ТПЦ-2 | До начала производства |
| 1.3 | Осмотр заготовки и зачистка дефектов, острые кромки не допускаются. | ЭСПЦ ОТК ЦЗЛ | До начала производства |
| 1.4 | Заявка шаблонов по чертежу ШК19.1.3-360РК | ТПЦ-3 | Март 2020 |
| 1.5 | Изготовление шаблонов по п.1.4. | МЦ | До начала производства |
| 1.6 | Подготовка 2 шт буферных неделовых заготовок диаметром 345мм длиной не короче 4,0м. | ЭСПЦ | До начала производства |
| 1.7 | Подготовка прокатного инструмента. – стержень прошивного стана Ø330 мм; – Боек зацентрировщика диаметром 110мм; – штатный инструмент прошивного стана: валки прошивного стана по чертежу 19.1.1-334; оправки Ø345-730 мм по чертежу 19.1.1-275Г6-М; направляющие линейки по чертежу 19.1.1-405ГБ; – комплект клетей МРМ для калибра 360 с опытной калибровкой по чертежу ШК19.1.3-360РК; – комплект клетей МРМ со штатной калибровкой под последующее производство; – оправки МРМ Ø337,5 мм по чертежу 19.1.3-254А-01; – клетки ИКС с калибровками и расстановками согласно чертежа 19.1.4-360А.РК. | ТПЦ-3 | До начала производства |
| 1.8 | Подготовка акта готовности оборудования, задействованного в производстве труб. | ТПЦ-3 | До начала производства |
| 1.9 | Работа проводится перед прокатом труб идентичного типоразмера. После проката опытных труб производится перевалка непрерывного стана на штатную калибровку. | ПрУ | До начала производства |
| 1.10 | Разработка карт настройки станом на трубы 325x16мм | ЦЗЛ ТПЦ-3 | До начала производства |
| 2 | Производство труб | | |
| 2.1. | Перевалка непрерывного стана на новую калибровку по чертежу ШК19.1.3-360РК, настройки согласно карт по п. 1.10 | ТПЦ-3 | По графику ПрУ |
| 2.1 | Посад заготовок в ПШБ в конце идентичного заказа. Разрыв между буферными заготовками и 08X18N10T – 15 минут. Нагрев заготовки в соответствии с ТИ 03.1.17 для 2-й группы марок сталей (Таблица П1-2 ТИ 03.1.17). Можно проводить нагрев совместно с заготовками из 1 группы марок сталей. Минимальный цикл нагрева для 08X18N10T составит 151 секунда. | ТПЦ-3 | По графику ПрУ |

| | | | |
|----------|--|-------|-------------------------|
| 2.2 | Прокат буферных заготовок для настройки прошивного стана: Необходимые параметры гильзы: Диаметр 417мм (-0/+3мм), толщина стенки 32,0мм. При прокате буферных заготовок производится введение оправки непрерывного стана для оценки внутреннего диаметра и возможного сдирания графитовой смазки с оправки. | ТПЦ-3 | По графику ПрУ |
| 2.3 | Гидросбив после ПШБ, а так же на входе в непрерывный стан отключаются при прокате труб из стали 08X18H10T. Остальное охлаждение прокатного инструмента в штатном режиме. | ТПЦ-3 | Во время производства |
| 2.4 | При переходе на прокат стали 08X18H10T устанавливается дозировка дезоксиданта 2250г, режим вдувания для толстых стенок, нанесение графитовой смазки – двумя контурами при минимальной скорости перемещения оправки МРМ (для калибра 444). Работа с забитыми форсунками не допускается. | ТПЦ-3 | Во время производства |
| 2.5 | Прошивка заготовки и прокат гильз осуществляется в соответствии с ТН 03.1.01 . Диаметр гильзы: 421 (-3/+0) мм Толщина стенки гильзы: 32мм Ожидаемая длина гильзы: 4 900 мм Рекомендуемые геометрические размеры труб: Наружный диаметр: 320,2÷329,8 мм Толщина стенки: 14,0÷18,0 мм Прокат двух плетей однократной длины. Длина труб после порезки: 10,5÷11,0 м | ТПЦ-3 | В процессе производства |
| 2.6 | Осмотр оправки ПС после прошивки. | ТПЦ-3 | В процессе производства |
| 2.7 | Выдача рекомендаций ЦЗЛ по порезке заготовки на станках зоны Q. Предусмотреть увеличенный расход твердосплавного инструмента и сниженную производительность станка | ЦЗЛ | До начала производства |
| 2.8 | Отбор на зоне «Q» 2-х патрубков длиной 250 ^{-0/+50} мм от труб Ø325×16 мм из стали 08X18H10T в горячекатаном состоянии. Передача проб в ЛИИО ТПЦ-3 с маркировкой и направлением с пометкой «Программа ЦЗЛ, г/к состояние 08X18H10T». | ТПЦ-3 | В процессе производства |
| 2.9 | Визуальный осмотр труб после охлаждения на зоне «Q». | ЦЗЛ | В процессе производства |
| 2.10 | В случае требований заказа к термообработке и/или МКК передача труб в ТПЦ-2 и проведение в РП аустенизации по п. 3.1, 3.2, 3.5 настоящей программы. В случае отсутствия вышеизложенных требований, дальнейшее производство осуществляется по п. 4 программы. | ТПЦ-3 | По графику ПрУ |
| 2.11 | В случае наличия требований к химической обработке, передача труб в ТПЦ-2 и проведение работ по п. 3.3 и 3.4 настоящей программы. | ТПЦ-3 | По графику ПрУ |
| 3 | Термообработка труб в ТПЦ-2 | | |
| 3.1 | Проведение термообработки труб Ø325×16 мм из стали 08X18H10T в РП ТПЦ-2 по режиму аустенизации в соответствии с ТН 04.1.05 . Режим выдается специалистами ЦЗЛ. | ТПЦ-2 | По графику ПРУ |
| 3.2 | Отбор проб в количестве 2 шт. длиной 250 ^{-0/+50} мм для проведения механических испытаний. Передача патрубков в ЛИИО ТПЦ-2 с маркировкой, направлением с пометкой «по Программе». | ТПЦ-2 | По графику ПРУ |
| 3.3 | Проведение химической обработки в соответствии с ТН 04.1.04 . Режим выдается специалистами ЦЗЛ. | ТПЦ-2 | По графику ПРУ |
| 3.4 | Визуальный контроль качества труб после проведения операции травления. | ЦЗЛ | По графику ПРУ |
| 3.5 | Передача труб Ø325×16 мм из стали 08X18H10T в ТПЦ-3 для проведения дальнейших операций. | ТПЦ-2 | По графику ПРУ |
| 4 | Калибровка и правка труб в соответствии с ТН 03.1.06 и ТН 03.1.14 | ТПЦ-3 | По графику ПрУ |
| 5 | Технологическое сопровождение. | ЦЗЛ | В процессе производства |
| 6 | Аттестация труб на условный заказ. | ТПЦ-3 | В процессе производства |

| | | | |
|---|---|-------|--|
| 7 | Подготовка справок по качеству труб | ОТК | В течение 5 дней после сдачи |
| 8 | Подготовка справок по РКМ и производительности основных технологических участков. | ТПЦ-3 | В течение 5 дней после сдачи |
| 9 | Подготовка отчета. | ЦЗЛ | В течение 14 дней после получения всех справок |

Ответственные руководители работ: от ТУ – А.В. Красиков; от ТПЦ-3 – И.А. Былков

Примечание:

1. Пункты работ могут быть скорректированы в ходе реализации настоящей программы при условии согласования отп. руководителями работ.
2. ПрУ в графике производства выделить дополнительно:
 - 12 часов на УГПТ (перевалка, настройка и прокат) + 7 часов на перевалку на шпигатную калибровку при отсутствии возможности комплектации с аналогичным типоразмером труб.
 - 3 часа на УТОТ ТПЦ-2 (расчет на скорость транспортировки 40 м/ч, 3 пята по 2-3 трубы)
3. Нормативы ЦП, ЦПН и РКМ по факту
4. Недокаты, полученные при реализации данной программы в качественных показателях ТПЦ-3 не учитывать.
5. В обязательства ответственного исполнителя от цеха входит мониторинг хода программы в целом.
6. При выявлении фактов невыполнения пунктов программы, выполнение последующих этапов останавливается до момента устранения или до момента выпуска соответствующе оформленного дополнения к программе.

Все согласующие подписи получены в СЭДО.

Приложение 2. Акт о внедрении результатов докторской диссертационной работы в промышленное производство бесшовных труб из труднодеформируемых марок стали на ТПА 159-426 с непрерывным станом и контролируемо-перемещаемой оправкой в ТПЦ-3 АО «ВТЗ»

«УТВЕРЖДАЮ»



Главный инженер АО «ВТЗ»

Н.В. Трутнев

« 7 » октября 2022 г.

АКТ

о внедрении результатов докторской диссертационной работы Красикова Андрея Владимировича в промышленное производство бесшовных труб из труднодеформируемых марок стали на ТПА 159-426 с непрерывным станом и контролируемо-перемещаемой оправкой в ТПЦ-3 АО «ВТЗ»

Настоящий акт подтверждает использование в промышленном производстве в ТПЦ-3 АО «ВТЗ» результатов работы Красикова А.В. на тему «Теоретические основы технологии прокатки товарных труб специального назначения из труднодеформируемых марок стали на агрегатах с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук.

В результате выполнения диссертационной работы создан комплекс технологических решений для промышленного производства высококачественных бесшовных труб из труднодеформируемых марок стали:

1. На основе разработанной методики прогнозирования прочностных и пластических свойств нержавеющей марки стали, а также построенных диаграмм пластичности металлов при горячей деформации, определены рациональные температурно-скоростные режимы прокатки для условий ТПА 159-426 с непрерывным станом и контролируемо-перемещаемой оправкой.

2. С использованием компьютерного моделирования разработана эффективная промышленная технология подготовки НЛЗ из нержавеющей марки стали, позволяющая полностью устранить все недостатки литой структуры металла, и обеспечить высокое качество бесшовных труб, получаемых прокаткой на ТПА 159-426 с непрерывным станом и контролируемо-перемещаемой оправкой. Установлено, что для прокатки труб целесообразно использовать полу НЛЗ.

3. Применение новых рифленых оправок с высокой износостойкостью в совокупности с другими техническими решениями при прокатке заготовок из нержавеющей марки стали, позволило увеличить часовую производительность участка горячего проката ТПА 159-426 более, чем в 2 раза в сравнении с ранее достигнутой.

4. По результатам компьютерного и физического моделирования процесса раскатки гильз из нержавеющей марки стали 08-12X18N10T в непрерывном стане продольной прокатки установлено, что для обеспечения стабильного извлечения контролируемо-перемещаемой оправки необходимо использовать специальную калибровку с овальностью 1,05÷1,18 при соотношении ширины калибра к диаметру гильзы не превышающем 1,07. Благодаря большей ширине и

увеличенным выпуском калибра извлечение оправки непрерывного стана в момент раскатки осуществляется при штатных нагрузках на рейку.

5. Определены требования к материалу дезоксиданта и графитовой смазки, обеспечивающие высокое бездефектное качество внутренней поверхности труб из нержавеющей марки стали, а также стойкость контролируемо-перемещаемых оправок. Даны рекомендации к оборудованию и способу их подачи.

6. Разработана и внедрена методика способа контроля соосности клетей станов продольной прокатки, а также техническое решение обеспечения жесткости непрерывного и извлекательно-калибровочного станов ТПА 159-426.

7. Внедрена в промышленное производство новая сквозная технология прокатки в условиях ТПА 159-426 с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой, обеспечивающая высокое качество внутренней и наружной поверхности труб из нержавеющей марки стали мартенситного и аустенитного класса, а также требуемый набор эксплуатационных свойств.

В период 2018-2022гг в ТПЦ-3 на ТПА 159-426 было произведено с использованием новой технологии прокатки более 300тн труб из нержавеющей марки стали аустенитного класса 08X18H10T, а также более 4000тн из нержавеющей марки стали мартенситного класса группы 13Cr. Суммарный экономический эффект от внедрения новых технологических решений, полученных по результатам диссертационной работы в условиях действующего промышленного производства, составил более 100 млн. рублей.

**Зам. главного инженера –
Начальник ТУ АО «ВТЗ»**



А.Б. Тюняев

Приложение 3. Акт о внедрении результатов исследований в учебный процесс на кафедре «Процессов и машин обработки металлов давлением» НИУ «ЮУрГУ»



Приложение 4. Акт о внедрении результатов исследований в учебный процесс на кафедре «Технологии материалов» «ВолГТУ»



АКТ о внедрении результатов докторской диссертационной работы Красикова Андрея Владимировича в учебный процесс на кафедре «Технология материалов» Волгоградского государственного технического университета

Настоящий акт подтверждает использование в учебном процессе результатов работы Красикова А.В. на тему «Теоретические основы технологии прокатки товарных труб специального назначения из труднодеформируемых марок стали на агрегатах с непрерывными станами с контролируемо-перемещаемой оправкой», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук.

Представленные в диссертации результаты разработки методики прогнозирования прочностных и пластических свойств нержавеющей марки стали при изготовлении бесшовных труб, технологии подготовки НЛЗ, компьютерного и физического моделирования процессов прошивки и раскатки, а также внедрения в промышленное производство новой сквозной технологии прокатки в условиях ТПА с непрерывным станом с контролируемо-перемещаемой оправкой использованы в учебном процессе на кафедре технологии материалов в рамках курса «Технология производства бесшовных труб» при выполнении лабораторных работ, подготовке курсовых и выпускных квалификационных работ студентами, обучающимися по профилю «Обработка металлов давлением». Созданный комплекс технологических решений по получению высококачественных бесшовных труб из труднодеформируемых марок стали на основе разработки и применения теоретических основ так же полезен для подготовки кадров высшей квалификации по профилю.

Результаты работы рассмотрены и рекомендованы к внедрению на заседании кафедры Технология материалов от 30 августа 2022 г. (протокол №1).

Начало использования объекта внедрения – сентябрь 2022 г.

Зав. кафедрой Технология материалов,
канд. техн. наук, доцент,

Д.В. Руцкий